

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS
Curso de Graduação em Farmácia

**Utilização de microalgas para produção de ração animal
pecuária em complementação à soja**

JONATAN BIASOLI PRIETO

SÃO PAULO
2024

JONATAN BIASOLI PRIETO

**Utilização de microalgas para produção de ração animal
pecuária em complementação à soja**

Trabalho de conclusão do curso apresentado à Faculdade de
Ciências Farmacêuticas da Universidade de São Paulo como
requisito para obtenção do título de bacharel em Farmácia

Orientador:

Prof. Dr. João Carlos Monteiro de Carvalho

SÃO PAULO

2024

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	3
2.	OBJETIVOS	6
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	7
4.	DISCUSSÃO	7
4.1	Análise de custo e demanda de produção de soja	7
4.2	Análise de custo de produção de microalgas	13
4.3	Usos, metabólitos e componentes de interesse para uso em rações pecuárias	17
4.3.1	Derivados de soja para uso em rações pecuárias	19
4.3.2	Derivados de microalgas para uso em rações pecuárias	21
4.3.2.1	Carboidratos	22
4.3.2.2	Ácidos Graxos	23
4.3.2.3	Aminoácidos	24
4.3.2.4	Flavonoides	26
4.3.2.5	Vitaminas e Minerais	27
4.3.2.6	Pigmentos	27
4.4	Processos de recuperação de biomassa microalgal e de seus metabólitos	28
4.5	Ciclo de vida da soja comparada à de microalgas	30
4.6	Gargalos e perspectivas do processo de produção de microalgas para uso em rações pecuárias	31
5.	CONCLUSÃO	33
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

RESUMO

O uso da soja já é muito bem estabelecido no mercado de rações pecuárias, havendo várias tecnologias avançadas e pesquisas visando aumentar a eficiência na produção desta leguminosa. Mesmo assim, a demanda por rações para animais de pecuária tende a ser maior, o que faz com que o cultivo de soja procure por mais terras aráveis. Como as microalgas são organismos produtores de cadeias alimentares marinhas, elas podem ser muito promissoras para suplementar os produtos de soja, e atender as demandas, sem utilizar terras aráveis. Com essa possibilidade de suplementação de nutrientes, com base na literatura, esse estudo focou em trazer informações de custos, benefícios, lucratividade e fluxo de produção para ambas as fontes. Ainda foram apresentados dados de nutrientes oferecidos potencialmente pelas duas fontes, para que se pudesse dar subsídios para avaliação dos potenciais benefícios de se utilizar as microalgas como matérias-primas complementares à soja em rações pecuárias. Por fim, foram colocados os principais desafios e gargalos, para que um modelo de fonte microalgal de suplementação de ração pecuária seja implantado. Pode ser concluído que as microalgas podem contribuir no setor de rações pecuárias, em complementação à soja, por apresentarem em sua constituição, além de altos teores proteicos, metabólitos de alto valor biológico, sendo que o cultivo em grande escala destes microrganismos pode favorecer esta aplicação por proporcionar uma diminuição de seu custo de produção.

ABSTRACT

The use of soy is already very well established in the livestock feed market, with several advanced technologies and research aimed at increasing efficiency in the production of this legume. Even so, the demand for feed for livestock tends to be greater, which makes soybean cultivation look for more arable land. As microalgae are marine food chain producing organisms, they can be very promising to supplement soy products, and meet demands, without using arable land. With this possibility of nutrient supplementation, based on the literature, this study focused on providing information on costs, benefits, profitability and production flow for both sources. Data on nutrients potentially offered by both sources were also presented, so that subsidies could be provided for evaluating the potential benefits of using microalgae as raw materials complementary to soy in livestock feed. Finally, the main challenges and bottlenecks were identified, so that a microalgal source model for livestock feed supplementation can be implemented. It can be concluded that microalgae can contribute to the livestock feed sector, in addition to soy, as they contain, in addition to high protein content, metabolites of high biological value, and the large-scale cultivation of these microorganisms can favor this application by providing a reduction in production costs.

1. INTRODUÇÃO

Microalgas são organismos de história evolutiva muito longa, sendo consideradas algas unicelulares de grupo polifilético com características de metabolismo semelhantes, ou seja, que surgiram e evoluíram em tempos diferentes, mas com mecanismos metabólicos semelhantes (BOLTON, 2016).

No ecossistema, são essenciais, sendo a principal fonte trófica da cadeia alimentar aquática. De fato, as microalgas, que são fotossintetizantes, usam energia solar, água e componentes inorgânicos para suprir seu crescimento celular, possuindo grande papel em importantes ciclos químicos, como de carbono, nitrogênio, enxofre e fósforo. Atualmente, há mais de 35.000 espécies descritas de microalgas, que representam apenas uma fração da variedade total estimada, entre 200.000 a 800.000 espécies (EBENEZER et al., 2012).

Esses organismos de alta riqueza metabólica, produzem ampla variedade de compostos bioativos, utilizados principalmente nas áreas de cosméticos e nutracêuticos. Dentre eles, os ácidos graxos poliinsaturados (ADARME-VEGA et al., 2012), carotenoides (CARVALHO & CARAMUJO, 2017), flavonoides (FERDOUS & YUSOF, 2021), carboidratos (CHACÓN-LEE & GONZÁLEZ-MARINHO, 2010), vitaminas (RAPOSO et al., 2013) e peptídeos (BUONO et al., 2014). Devido à riqueza de compostos produzidos por microalgas e a possibilidade de obtenção de altos teores proteicos, a depender da espécie cultivada, esses microrganismos apresentam potencial para a incorporação em alimentos para uso humano (GOHARA-BEIRIGO et al., 2022), além de apresentar grande potencial para a nutrição pecuária (DINESHBABU et al., 2019).

Devido às possibilidades de aplicações das microalgas, é crescente o número de estudos relacionados aos processos de produção, separação, fracionamento e usos das microalgas. As pesquisas são muito recentes, de modo que dos 100 gêneros cultivados em escala laboratorial, somente 10 gêneros são cultivados em escala industrial, atendendo várias áreas, dentre estas, a produção de rações em pequena escala (BARSANTI & GUALTERI, 2018). O foco é destinado para produtos de microalgas de alto valor agregado,

compensando custos de produção e tratamentos de cultivo. Assim, o mercado de obtenção de biomoléculas é mais atrativo neste ramo (ZHU, 2015).

Para que culturas de microalgas tornem-se economicamente viáveis, são necessárias estratégias de biorrefinarias que englobam a compreensão dos conteúdos das espécies e localização celular das principais classes das biomoléculas de interesse, visando maior eficiência em colheita e recuperação, utilizando processos unitários que levem a uma produção satisfatória. Um dos maiores desafios são os elevados custos além da complexidade para a eficácia das biorrefinarias, cujo benefício é um ciclo de vida muito mais curto para as microalgas em comparação com cultivos de soja (PIGNOLET et al., 2013). No caso da soja, é possível uma safra por ano no Brasil, iniciada, de modo geral, em outubro e levando um total de 120 dias para a colheita. Já o cultivo de microalgas, pode-se estender pelo ano todo.

A variedade de produtos metabólicos relacionada com as diferentes espécies de microalgas é interessante do ponto de vista nutricional para todos os organismos heterotróficos. Outros usos possíveis das microalgas são como fertilizante e fontes de ácidos graxos para produção de biodiesel. Há estudos recentes da aplicação para produção de proteínas de interesse farmacêutico e alimentar (MASI et al., 2023). Um setor industrial de alta demanda de matéria-prima de qualidade é o de alimentação animal, e no caso de produtos de origem animal o que se visa é a obtenção de materiais proteicos, como derivados de leite, ovos e carnes a partir de outras fontes proteicas, como as plantas e os microrganismos.

Graças ao agronegócio e inovações tecnológicas, o Brasil é um dos maiores exportadores de produtos agrícolas de soja e milho, com sistemas de pesquisa e expansão fundamentais para o avanço agrícola citado (FIGUEIREDO, 2016). Com isso, o grau administrativo e gestor aumentou, gerando a realização nos últimos anos de vários estudos sobre custos de produção e estimativas, em conjunto com aplicação de modelos industriais, aplicados à agricultura (ARTUZO et al., 2018).

No Brasil, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) é responsável por fornecer informações sobre custos de produção das principais

culturas, para que a gestão agrícola seja facilitada, e isso se aplica ao mercado da soja (BARROS et al., 2006). O estabelecimento da soja como um produto importante se atribui a estrutura do mercado internacional, implementada de pesquisas e tecnologias, e por ser a principal fonte de proteína vegetal da atualidade (BRASIL, 2016). Em 2016, a produção de soja foi avaliada em 95.434,60 mil toneladas, cultivadas em uma área de 33.251,9 mil hectares, em que 90% da produção é destinada para ração animal (CONAB, 2017), categorizando o Brasil como um dos maiores produtores de soja no mundo. Com isso em vista, é proposto que com investimentos e inovações, seja possível um caminho semelhante com a produção de microalgas, atualmente em ascensão.

As microalgas têm potencial de produção econômica e eficiente, pois são organismos de rápido crescimento, e de um modo geral, habitam qualquer ecossistema, desde oceanos, até montanhas frias. A capacidade de prover nutrientes em rações animais reduziria a necessidade de terrenos destinados à produção de soja, deixando terrenos livres para o cultivo de alimentos vegetais para consumo humano direto, ou como reservas ambientais (DINESHBABU et al., 2019).

Apesar de todas as suas potenciais aplicações e eficiência, a utilização de microalgas em escala industrial é voltada quase que exclusivamente para produtos de alto valor. Isso ocorre, porque as tecnologias para extração e biorrefinaria ainda são muito caras e as pesquisas minoritárias; a situação vem se modificando ao longo dos últimos anos, pelo interesse nas aplicações e benefícios. A consequência é um maior investimento em pesquisa e a diminuição gradual dos custos em tecnologia (BOROWITZKA, 2013).

É necessário aprimoramento para a liberação e coleta de dados comerciais de empresas de produção, pois são obtidos estudos comunicados de instalações em pequena escala; além disso, não há uma padronização determinada no campo, ou seja, cada processo e aplicação utiliza diferentes tecnologias, tipos de cultivo e ambiente, dificultando comparativos sólidos de desempenho (ACIÉN et al., 2017).

As microalgas podem crescer em águas residuárias, um fator que contribui para diminuir o custo de produção. Elas apresentam alta plasticidade

metabólica, permitindo que seu cultivo e produção sejam integrados com biorremediação, removendo substâncias orgânicas e inorgânicas das águas residuais de atividades humanas bem como a mitigação de CO₂ de efluentes residuais, destacando a alta capacidade de captura de CO₂, atmosférico ou aquático (BARSANTI & GUALTERI, 2018).

Possibilitando benefícios ao meio ambiente e lucro alternativo, pois esses efluentes são indesejados pelas indústrias que os produzem, e devem ser tratados para não contaminarem o ambiente. Existem possibilidades de cortes de custos com nutrientes, oferecendo um tratamento de resíduos mais barato às indústrias, beneficiando ambas as partes, e impactando positivamente o *marketing* das empresas que utilizarem essa tecnologia.

Cada microalga possui um perfil de nutrientes e metabólitos de interesse que podem ser listados e quantificados conforme espécie, traçando-se um perfil para variadas necessidades nutricionais na pecuária, e na alimentação humana, podendo variar conforme ambiente de cultivo, qualidade de luz, fase de crescimento e métodos de colheita (DINESHBABU et al., 2019).

Neste trabalho, serão feitas avaliações que possam dar subsídios para o emprego de microalgas e/ou seus componentes em formulações para rações animais.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho propõe verificar as aplicações, propriedades, benefícios e desafios no uso do cultivo de microalgas como matéria-prima complementar à soja para rações pecuárias, visando principalmente aspectos nutricionais, econômicos e ambientais favoráveis por esta aplicação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Na coleta e análise de dados, necessárias para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizados textos, artigos e publicações de especialistas consultados em bases de dados científicas relevantes ao assunto, como Scielo, SciFinder, Web of Science. Bem como, revistas e jornais científicos, além de publicações em órgãos de saúde e abastecimento como ANVISA e CONAB.

Para selecionar o conteúdo de maior relevância, priorizaram-se fontes a partir de 2010, considerando trabalhos anteriores de relevância para o tema, como o englobamento do assunto em discussão, a integralidade dos textos e o idioma da escrita (português e inglês).

Para a pesquisa, foram utilizados como palavras-chaves termos como microalgas, soja + produção, soja + ração, soja + mercado, microalgas + nutrição, microalgas + ração, microalgas + carboidratos, microalgas + lipídeos, microalgas + proteínas, microalgas + espécies + aminoácidos, microalgas + custo de produção (seus equivalentes em inglês), excluindo artigos não relacionados com nutrição, produção de microalgas e mercado de ração animal.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise de custo e demanda de produção da soja

Os custos de produção de soja e de seus subprodutos, assim como recursos necessários são bem conhecidos e estabelecidos. A soja é separada em farelo e polpa, sendo o farelo o material mais utilizado para rações animais, principalmente de aves e bovinos. O farelo de soja é rico em aminoácidos, o que o torna muito versátil para suprir deficiências dos mesmos em rações, apresentando alta digestibilidade e fácil comércio (YILDIZ, 2024).

Em artigo por ARTUZO et al., 2018, utilizando dados de produção de soja e milho da CONAB, variáveis necessárias para produção são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Variáveis a serem consideradas na produção de soja e milho (Fonte: ARTUZO et al., 2018)

I - Custo das despesas de colheita	III - Despesas Financeiras
a) Operação de avião	a) Interesse
b) Operação de maquinário	IV - Depreciações
c) Aluguel de maquinário/serviços	a) De modernização/instalações
d) Trabalhos temporários	b) De implementos de agricultura
e) Trabalhos fixos	c) De maquinário
f) Sementes	V - Outros custos fixos
g) Fertilizantes	a) Manutenção periódica de maquinário
h) Agrotóxicos	b) Encargos sociais
II - Custos pós-colheita	c) Seguro de capital de campo
a) Seguro de produção	VI - Renda de fatores
b) Assistência técnica	a) Retorno esperado de capital investido
c) Transporte	b) Terreno
d) Armazenagem	VII - Custo total

Os custos de produção de soja vêm aumentando nas principais regiões produtoras do Brasil, em razão dos fatores citados no quadro acima e também em razão da desvalorização do real em relação ao dólar. O principal fator para razão desse aumento de custo é o preço elevado dos produtos químicos como fertilizantes, utilizados em larga escala nas principais áreas produtoras, ainda mais que os produtores brasileiros, em média, dependem de importações em 85% do que utilizam. Adicionalmente, os preços de produtos fertilizantes acompanham oscilações de preços de suas matérias-primas, volatilizando esse

mercado. Apesar de pesticidas também serem produtos químicos, os custos diminuíram de US\$44,92 por hectare em 2016, para US\$34,40 por hectare em 2022. Os custos de sementes, assim como dos fertilizantes, também aumentaram de US\$11,73 por hectare em 2016, para US\$25,90 por hectare em 2023, mas houve um impacto menor, pois a maior parte das sementes é produzida em território nacional (COLUSSI et al., 2023).

Estudos de RICHETTI, A. 2021 e levantamentos recentes da EMBRAPA (2024) indicam que houve desvalorização do preço de venda pela saca de 60kg de soja, onde, para a safra 2021/2022 o preço médio da era de US\$25,29/saca (R\$136,58), no centro-sul passando a uma média de US\$ 16,37/saca (R\$ 88,00) em 2023. Segundo o Conselho Internacional de Grãos (IGC), em relatório de novembro de 2023, a produção de soja foi de 357 milhões de toneladas em 2021/2022, aumentando para 367 milhões de toneladas em 2022/2023, com expectativa de aumento em 2023/2024 para 395 milhões de toneladas. O Serviço agrícola Estrangeiro dos Estados Unidos da América (USDA), com relatório em dezembro de 2023, indica que os dados são quase os mesmos, reforçando a expectativa de aumento da produção e demanda: com a produção de soja em 360 milhões de toneladas na temporada 2021/2022, para 374 milhões de toneladas em 2022/2023 e expectativa de 399 milhões de toneladas em 2023/2024. Tudo isso corrobora para que se tenha certeza de que a demanda de produção é crescente, e, por enquanto, a produção é suficiente para atender a demanda no momento (YILDIZ, 2024). Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros de produção de soja em 2016, onde se evidencia que a maior parte é produzida no continente americano, que também apresenta a maior produtividade.

Tabela 1: Parâmetros de produção de soja no mundo em 2016 (Fonte: POPOVIC, et al. 2018).

Parâmetro	Colheita (t/ha)	Produção (t)	Porcentagem de produção (%)
Mundial	2.76	334.894.085	100
América	3,10	293.414.006	87,61
Ásia	1,45	28.808.950	8,60
Europa	2,08	10.488.759	3,12
África	1,07	2.119.814	0,63
Oceania	2,14	62.556	0,02

Segundo estudos realizados em 2018, contendo os dados da Tabela 1, ainda há espaço suficiente para aumentar-se a produção de soja; mas também aponta que a área plantada em 50 anos a partir de 2016 será aumentada em 88 vezes, o que faz com que muitos gastos, aumentem também, devido necessidade de mais terrenos, insumos, sementes e afins. Ainda, conforme apontado na Tabela 2, há diferentes eficácias de colheita por hectare, o que se deve a diversos fatores, principalmente à tecnologia empregada desde o processo de cultivo até o final, evidenciado pela América, que é o maior produtor em quantidade e exportador, por uma margem muito grande. Os fatores como solo a ser cultivado, tipo de espécie de soja, clima e outros fatores naturais influenciam muito, tanto na eficácia, quanto nos custos gerais. Ainda, o Brasil é apontado como segundo maior produtor, ficando atrás apenas da produção dos Estados Unidos da América (POPOVIC et al., 2018).

Mas se levanta o questionamento de até quando a produção será suficiente e economicamente viável, pelos recursos de cultivos abordados anteriormente, pelos insumos químicos que impactam diretamente o meio ambiente e que dependem de uma produção industrial para tal.

De acordo com o IMEA (2024), o custo da soja convencional em maio de 2024 foi de R\$7.232,77 (US\$1.322,26) por hectare, com uma produtividade de 61,5 sacas por hectare (3690 Kg/ ha). Isso corresponde a um custo de R\$1,96/

kg (U\$0,36/ kg). Em 1 hectare de plantação de soja, considerando o valor de venda (U\$23,52/ saca), o valor obtido é de U\$1.446,48. Dessa forma, o lucro obtido é de U\$124,22/ hectare. Nota-se que o lucro é da ordem de 9% do valor investido. Isso significa que, embora o custo da soja seja bastante baixo se comparado com o custo das microalgas, como se observará adiante, precisa-se ter um maior valor de venda e/ou de produtividade para aumentar o lucro do produtor.

Já são estudados vários modelos com projeções e cenários alternativos de produção e comércio de alimentos, mas poucos com foco especialmente no mercado de soja, havendo necessidade de previsões indiretas e diretas correlacionadas para que se tenha uma metodologia de previsão de quanto terá de ser produzido, e com que produtividade. Em artigo de 2009, as projeções para 2020 eram para produção de 311,1 milhões de toneladas, valor que segundo os dados da Tabela 1 já foram ultrapassados em muito, já em 2016; entretanto, o mesmo artigo, propunha em cenário moderado, que, apenas em 2030, a produtividade chegaria a ter níveis de 2,64 toneladas/ha, com uma área total de cultivo de soja de 140,9 milhões de hectares (Figura 1), ou seja, apesar de já em 2016 haver uma produção maior do que uma projetada para 2030 em um cenário moderado, a área de cultivo é menor do que a que se esperava para essa quantidade de produção, fruto do aumento da produtividade da soja. Já em cenário otimista, projetado para 2030, haveria uma área de cultivo de 93 milhões de hectares de soja (Figura 1), mas com eficácia produtiva média mundial de 4 toneladas/ha, mas que envolveria grandes investimentos em pesquisas e desenvolvimento em agricultura, incluindo genética, práticas de cultura e tecnologias de colheita, o que, em teoria, mesmo para o ano do artigo, diminuiria a área destinada para cultivo de soja, que já era de 94,1 milhões de hectares na média de 2005-2007. (MASUDA & GOLDSMITH, 2009).

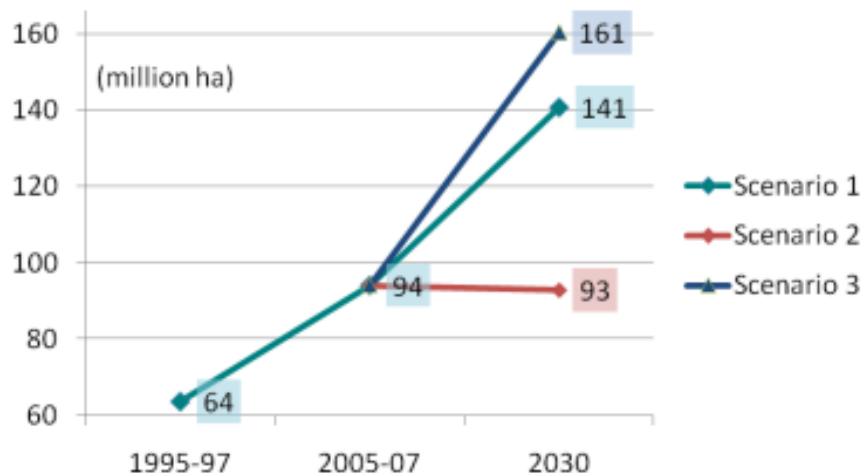


Figura 1 - Cenários para Área Cultivada de Soja (milhões de hectares) Mundialmente Projetados para 2030. Cenário 1 (Moderado): Projeção de produtividade prevista de 2,64 t/ha e área de cultivo de 141 milhões de ha em 2030. Cenário 2 (Otimista): Projeção de produtividade prevista de 4,00 t/ha e área de cultivo de 93 milhões de ha em 2030. Cenário 3 (Pessimista): Projeção de produtividade prevista de 2,3 t/ha e área de cultivo de 161 milhões de ha em 2030 (MASUDA & GOLDSMITH, 2009).

Isso deixa um leque de oportunidades para tecnologias e opções mais viáveis e eficazes de serem pesquisadas, já que mesmo com estudos de projeção, o futuro da produtividade e demanda são incertos. Portanto, começa a se fazer necessário procurar alternativas sólidas de suplementação da ração animal mundial, que depende da ordem de 88% da produção de soja das Américas para suprir os aminoácidos completamente, e que são usadas em larga escala na criação de bovinos, aves e suínos, antes que o custo comece a ficar muito alto e se refletir nos alimentos animais produzidos, ou ainda que a produção não consiga suprir a demanda. Isto posto, uma alternativa como microalgas, que poderiam ser cultivadas em áreas de oceanos muito mais vastas do que em solos, bem como em sólidos não férteis, e que possam suprir não apenas proteicamente as rações, mas também com quantidade suficiente de carboidratos, lipídios e outros metabólitos essenciais, os quais serão abordados neste trabalho, fazem-se uma boa alternativa de pesquisa.

4.2. Análise de custo de produção de microalgas

As microalgas atualmente demonstram ser altamente promissoras para diversos mercados emergentes, incluindo para produção de rações, sendo fixadoras de CO₂, e podendo ser utilizadas em tratamento de águas residuais, que são abordadas neste trabalho. No entanto, as instalações comerciais atuais não atendem a demanda, por não terem capacidade de produzir a biomassa necessária de mais de 100 kt/ano para uma única instalação a um custo-alvo de 1,10 US\$/kg (1 Euro = 1,10 Dólar) para que seja viável economicamente (ACIÉN et al., 2019).

Para se organizar e analisar de forma eficaz os custos econômicos de algum tipo de produção, é necessário um diagrama de blocos, com as principais operações unitárias, que também identifique as principais entradas e saídas do processo, do qual depois podem se estabelecer listas, tabelas e fluxogramas relacionando materiais, maquinário, instrumentos necessários e custos (ACIÉN et al., 2017). Assim, no cultivo de microalgas, pode-se organizar o diagrama apresentado na Figura 2.

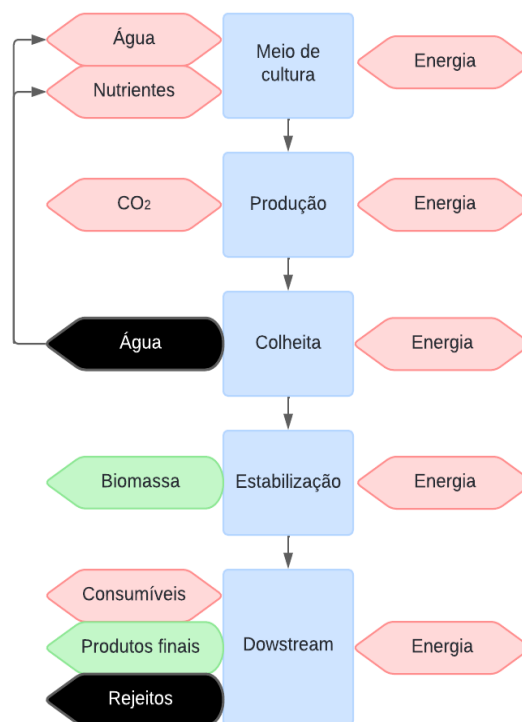


Figura 2 - Diagrama de processos de produção de microalgas. Adaptado de ACIÉN et al., 2017.

O custo de cada um desses itens irá depender do tipo de cultura e processo feitos, que dependem do tipo de produto final que se quer obter, seja com respeito à espécie da microalga cultivada e/ou a qualidade da biomassa obtida. Além disso, são necessárias se levar em conta outras variáveis dependentes de como são feitos os processos, como custo das instalações, consumo de energia, estruturas, edifícios, funcionários, etc. Algo a se levar em conta também é a vida útil dos equipamentos e instrumentos para melhor custo-benefício possível (ACIÉN et al., 2017).

O custo de energia para a produção é altamente dependente de outros fatores, como ambientação da localização, modo de recebimento dos nutrientes, tipo de biorreator, etc. A soma dos custos de taxas e produção direta e custo anual de produção obtidos com esses dados, são divididos pela quantidade total a ser obtida de produto, podendo-se calcular o custo de base unitário de biomassa de microalgas, que, por exemplo, pode variar de 108 US\$/Kg a 10,8 US\$/Kg, para processos de produção em reatores fechados e abertos, respectivamente. (ACIÉN, et al., 2019).

Em estudo de ACIÉN et al., 2012, foram analisados os custos de produção de biomassa de microalgas de alto valor, em uma instalação de dez fotobiorreatores tubulares de 3 metros cúbicos operados em modo contínuo para a espécie *Scenedesmus almeriensis*, em meio de cultura preparado com fertilizantes agrícolas a fim de diminuir custo de produção. Para tal estudo, o pH foi controlado com adição de CO₂ puro e a temperatura foi mantida abaixo de 35°C. Nessas condições, foram calculados os valores de produtividade, nutrientes, consumo de energia e rendimento. Com isso, foi possível obter os custos de produção deste processo visando a aplicação de microalgas em mercados de energia e commodities. Entretanto, os dados também são úteis para a produção de microalgas para outros fins, como o de aplicação em rações pecuárias. As instalações foram otimizadas, de modo que a produtividade fosse a maior possível, por isso foi obtido um valor alto de produtividade nesse caso, a fim de que pudessem ser avaliadas formas de como diminuir esse custo. Estes autores dividiram o custo de produção em 4 grupos, denominados mão-de-obra, depreciação, utilidades e matéria-prima. No caso de utilidades e matérias-primas, os componentes principais que os compõem são energia, água, CO₂ e

fertilizantes. A energia envolvida no processo de produção da microalga está relacionada à movimentação da cultura, que neste estudo foi com borbulhamento de ar, ao aquecimento e/ou resfriamento do meio, bem como nos processos de separação e secagem da biomassa. No tocante às matérias-primas, de fato, as fontes de nutrientes oferecem a base pela qual as microalgas irão atingir seu crescimento e produzir seus produtos (CHEW et al., 2017). Por exemplo, para produção de 100 toneladas de biomassa de microalgas, são necessárias 200 toneladas de CO₂, 10 toneladas de nitrogênio e 1 tonelada de fósforo; sendo que nitrogênio e fósforo já são necessários em agricultura e amplamente utilizados em fertilizantes (ACIÉN et al., 2019). Para reduzir os custos destes nutrientes, o meio de cultura deve ser ajustado para que haja o menor desperdício possível; além disso, pelo fato do CO₂ comercial ser muito caro, é relevante que se utilize da capacidade das microalgas de sequestrar CO₂ atmosférico e industriais, sendo promissoras para reduzir em muito as taxas de emissão de gases de efeito estufa (ACIÉN et al., 2012; CHEW et al., 2017). A maior velocidade de conversão de CO₂ para o crescimento e metabolismo das microalgas, se comparado com as plantas terrestres, com maior possibilidade de acúmulo de compostos bioativos desejados para os fins de produção, indicam que as microalgas são extremamente promissoras quando se trata de produção significativa de nutrientes tanto para humanos, quanto para pecuária (DINESHBABU et al., 2019). Analogamente, para não haver competição com a agricultura por fontes de nitrogênio e fósforo, a utilização de águas residuais como fontes destes apresenta alta atratividade (ACIÉN, et al. 2012). De fato, A combinação dos métodos convencionais de tratamento de água, com a tecnologia de microalgas pode se mostrar eficiente o bastante para ser aplicada em conjunto com o cultivo de microalgas para produção de rações pecuárias, pois boa parte do nitrogênio e fósforo necessários ao seu crescimento estão presentes nas águas residuais (MAHAPATRA et al., 2013). A biomassa de microalgas que passa por fluxos de águas residuais, oferece um grande potencial para bioprodutos sustentáveis e valiosos, tais quais, mas não apenas, produção de produtos para alimentação animal com alta taxa de proteínas, ácidos graxos, carboidratos e carotenoides (MADEIRA et al., 2017). No entanto, o conhecimento da constituição tanto química como biológica das águas

residuárias de processos industriais é fundamental para se verificar qual seria a aplicabilidade das biomassas microalgais a serem produzidas com uso delas.

Um detalhamento descrito mais profundamente em estudos de pesquisa de produção em larga escala, é de alta importância para avaliação de dados de custos de produção, permitindo que os custos de equipamentos sejam previstos por bibliografias, ou diretamente com fornecedores, e logo após, um cálculo de capital fixo necessário. Isso permite calcular os custos totais de operação, que são a soma das depreciações mais custos diretos de produção, incluídos aqui matéria-prima, utilidades e mão de obra. Com esses dados, é possível calcular o custo de produção de biomassa de microalgas em diversas outras escalas, apenas modificando os custos dos principais equipamentos conforme a escala e necessidades do tipo de espécie de microalgas.

Conforme estudo de ACIÉN et al., 2012 considerando o custo referente a matéria-prima, verificaram que o dióxido de carbono é o principal componente do custo. Adicionalmente, numa avaliação onde incluíram o estudo dos custos diretos de produção, outros custos que se destacaram foram os referentes ao consumo de energia e relacionadas ao trabalho, incluídas aqui a mão-de-obra, supervisão e gerenciamento, bem como taxas e provisão para contingências. Este custo, particularmente, representou 51,6% do custo total de produção, onde se considera também o custo de depreciação, nas condições avaliadas, que é o trabalho em 10 fotobiorreatores tubulares, totalizando 30 m³, operado em processo contínuo com uma vazão específica de alimentação de 0,34 dia⁻¹, com tempo total de operação anual de 300 dias, com tempo médio de insolação de 10 horas por dia, gerando uma produção de 3,8 toneladas de biomassa por ano. Nestas condições, obtiveram um custo de U\$75,82 / kg de biomassa seca (1 Euro = 1,10 Dólar). Como esperado, o custo de produção diminuiu com o aumento da escala, de modo que para uma produção anual de 200 toneladas de biomassa seca de microalgas o custo da biomassa caiu para U\$13,85 / Kg. Neste processo, no entanto, além do aumento de escala, alteram algumas operações unitárias. Por exemplo, utilizaram filtração para remoção de microrganismos em vez de usar sistema de ozonização e incluíram uma etapa de floculação-decantação anterior à centrifugação. Nestas condições, o custo envolvendo mão-de-obra caiu para 7% em relação ao custo total de operação. Como se

sabe, nutrientes como fósforo, nitrogênio, potássio e outros nutrientes inorgânicos são essenciais na constituição dos meios de cultivo de microalgas. Por exemplo, para a produção de 1 Kg de biomassa seca de microalga há se gasta U\$ 1,10 em nutrientes (ACIÉN et al., 2019). Dessa forma, há trabalhos que visam o uso de águas residuárias para baixar o custo de produção de microalgas (WANG et al., 2018; MEJIA-DA-SILVA, 2020; MEDRANO-BARBOZA et al., 2022) e também o reuso de meio de cultivo (MOROCHO-JÁCOME et al., 2015; HUANG et al., 2016).

No tocante ao processo de produção das microalgas propriamente dito, vários parâmetros exercem influência no custo, uma vez que afetam a produtividade, rendimento do processo e/ou reduzem custos com matéria-prima. Nesse sentido, parâmetros como intensidade luminosa (CHEW et al., 2017), forma de alimentação da fonte de nitrogênio (FERREIRA et al., 2010), fonte de dióxido de carbono (MATSUDO et al., 2011), tipo de fotobiorreator empregado (ACIÉN et al., 2019, CARVALHO et al., 2014). Sabe-se que as microalgas são dependentes da intensidade luminosa para seu crescimento, de modo que fotobiorreatores que maximizem a disponibilidade de luz para as culturas são vantajosos neste quesito. No entanto, a escolha do tipo de fotobiorreator a ser empregado é complexa, pois é necessário levar em conta vários aspectos, como custo de construção, acúmulo de oxigênio nos fotobiorreatores, perda de água, custo de manutenção de temperatura, contaminação, automação, etc. (ÁCIEN et al., 2019; CARVALHO et al., 2014).

4.3 Usos, metabólitos e componentes de interesse para uso em rações pecuárias

O critério mais levado em conta na pecuária para decidir custos de produção é o preço de unidade de proteína por unidade de peso da ração, além da sequência e concentração de aminoácidos presentes e funcionalidades de proteínas (ARRUTIA et al., 2020), de maneira que a composição proteica da matéria prima de rações pecuária é extremamente importante. A soja integral contém maior quantidade de fibras, mas menor digestibilidade energética, proteica, pois a matriz proteína-fibra-gordura da soja dificulta a digestão, sendo muito mais vantajoso utilizar os processos para se obter o farelo de soja para produto para uso em rações (YÁNEZ et al., 2019). Ainda assim, outros nutrientes

que aumentem o valor da ração podem ser levados em conta para custo-benefício.

Em relação a produtos obtidos a partir de bovinos, na produção de leite, deve ser levado muito em consideração o quanto a ração irá afetar na qualidade dele, que é um subproduto muito valioso da pecuária bovina. Em estudos, as microalgas demonstraram muitos benefícios, aumentando a composição no ômega-3 do leite de vacas holandesas, sem diminuir o teor de gordura. De fato, *Spirulina platensis* e *Chlorella pyrenoidosa* proporcionaram o aumento de proteína microbiana e ácidos graxos ramificados no rúmen, sendo que a suplementação com microalgas em ração de vacas em lactação se relacionou com maior produção de leite, assim como na qualidade energética, teor de proteína e lactose neste produto. Entretanto, em alguns casos, a suplementação com microalgas em vacas holandesas se relacionou com diminuição de produção do leite em quantidade e qualidade; já em outros, o consumo de ração diminuiu, mas sem afetar a produção de leite. Isso tudo demonstra o quão importante é ter estudos pontuais que relacionem espécies específicas de bovinos e microalgas, com a produção de leite (DINESHBABU et al., 2019).

Na criação de suínos, alguns fatores antinutricionais do farelo convencional da soja, que é a principal fonte de aminoácidos utilizado para rações, pode reduzir o crescimento de porcos jovens, podendo ser citados inibidores de tripsina e oligossacarídeos, os quais diminuem digestibilidade de nutrientes (LAGOS & STEIN, 2017). Na dieta de desmame e inserção de ração, a alternativa utilizada é o uso de farelo de soja fermentado em combinação com milho, além de suplementação de vitaminas e minerais na dieta, para atender as necessidades de ingestão de energia e digestibilidade de aminoácidos pretendidas (ROJAS & STEIN, 2013). A presença em maior concentração de fatores antinutricionais gera um maior custo, necessidade de processos de aumento de digestibilidade proteica e energética e atratividade por produtos mais adequados para dietas de porcos jovens (YÁNEZ et al., 2019). A maior preocupação na criação de suínos é a digestibilidade ileal de nutrientes.

Assim como na produção de produtos oriundos e de bovinos e suínos, as proteínas são de extrema importância na produção de aves. Particularmente no caso de proteínas de origem microalgal, há relatos de bons resultados de

eficiência delas na alimentação de aves desde os anos 1950, com aumento de peso das aves criadas, e redução do consumo de ração; também refletindo melhorias na qualidade de ovos produzidos, e havendo diferentes resultados de eficiência e teor de substâncias desejáveis na produção tanto de carne, quanto de ovos, a depender de diferentes espécies de microalgas utilizadas para experimentos de produção (DINESHBABU et al., 2019).

4.3.1 Derivados de soja para uso em rações pecuárias

Os valores nutritivos dos grãos utilizados para o preparo das rações são influenciados por fatores do ambiente de cultivo, principalmente fertilização. A soja tem valores de composição nutricionais que são muito atrativos para seu uso em rações pecuárias, principal, mas não somente, por seu alto teor de proteína (ARRUTIA et al., 2020).

O farelo de soja obtido após a limpeza e descascamento da soja é a principal matéria prima na produção de rações pecuárias, com teor de proteína bruta de 44% a 48%, com alta digestibilidade da maioria dos aminoácidos (GAFFIELD et al., 2024). De fato, como se observa na Tabela 2, os valores de digestibilidade tanto para suínos como para aves, de um modo geral, são da ordem de 80% ou superiores. O valor nutritivo do farelo de soja é determinado não apenas pela quantidade, disponibilidade e digestibilidade de aminoácidos para os animais, mas também pela necessidade de processos necessários para que seja preparado, condições que devem ser levadas em conta para que o custo-benefício do produto final seja avaliado (GRIESHOP et al., 2003). Não é preciso tratamento térmico para o uso de soja para nutrição de ruminantes, mas em suínos e aves, esse tratamento é necessário para inativar certas enzimas e inibidores enzimáticos, a fim de aumentar a biodisponibilidade protéica assim como a eficiência nutricional (THIAGO & da SILVA, 2003). Entretanto, processamentos e aquecimento em excesso podem diminuir a solubilidade protéica e causar desnaturação, portanto, diminuindo a qualidade nutricional; as condições ideais de processamento dependem das condições e características da soja a ser processada, que pode variar conforme a ambientação de cultivo e genótipo. Os antinutricionais são levados em conta, e compreendem inibidores de tripsina que diminuem retenção de nitrogênio e aumentam sua excreção nos animais; hemaglutininas, que se ligam aos carboidratos e diminuem a taxa de

crescimento; oligossacarídeos, que causam problemas intestinais e diminuem digestibilidade dos nutrientes; e ácido fítico, que interfere na absorção de minerais dos mamíferos (ARRUTIA et al., 2020).

Tabela 2: Aminoácidos fornecidos pelas principais fontes de farelo de soja em rações pecuárias e digestibilidade em animais. (Fontes: IBÁÑEZ, M. A. et al, 2020; LAGOS & STEIN, 2017; ARRUTIA, F. et al, 2020; ROJAS & STEIN, 2013; COCA-SINOVA, A. et al, 2008).

Aminoácido	Classificação como essencial*	Proporção em farelo de soja (%)	Digestibilidade ileal de aminoácidos essenciais em suínos (%)	Digestibilidade ileal de aminoácidos essenciais em aves (%)
Alanina	-	5,02	-	-
Arginina	1,2,3	4,47	95,6	87,5
Ácido aspártico	-	6,31	-	-
Cisteína	-	0,64	-	-
Ácido glutâmico	-	8,47	-	-
Glicina	-	3,43	-	-
Histidina	1,2	1,13	92,1	-
Isoleucina	1,2,3	3,64	91,7	77,1
Leucina	1,2	6,17	91,2	-
Lisina	1,2,3	3,4	90,6	85,1
Metionina	1,2,3	1,71	93,6	88,8
Fenilalanina	1,2,3	3,33	91,6	92,4
Prolina	-	2,53	-	-
Serina	-	3,09	-	-
Treonina	2,3	3,31	88,4	76,0
Triptofano	1,2,3	0,85	92,6	NA**
Tirosina	-	3,07	-	-
Valina	1,2,3	4,22	89,0	92,1

* 1, aminoácidos essenciais em bovinos; 2, aminoácidos essenciais em suínos; 3, aminoácidos essenciais em aves. ** Não avaliada.

O farelo de soja também apresenta minerais em sua composição, incluindo cálcio (3,0 g/kg), fósforo (6,2 g/kg), magnésio (3,1 g/kg), potássio (21,5 g/kg), sódio (14,8 mg/kg), enxofre (4,2 g/kg), cobre (9,0 mg/kg), ferro (150,9 mg/kg), manganês (29,7 mg/kg), molibdênio (3,93 mg/kg) e zinco (50,5 mg/kg).

4.3.2 Derivados de microalgas para uso em rações pecuárias

Microalgas recentemente têm recebido muito interesse para produção de biocombustíveis, mas apenas o desenvolvimento de biocombustíveis não satisfaz a demanda, nem aproveita todo o potencial de microalgas para outros produtos biológicos de alto valor, como carboidratos, lipídios, proteínas, vitaminas, flavonoides e carotenoides, pois estes organismos são os produtores primários de basicamente toda vida aquática. Sendo assim, é possível estender ao uso direto ou indireto humano para nutrientes (CHEW et al., 2017). Na tabela 3, são apresentadas as composições de alguns microrganismos fotossintetizantes. Como se observa nesta tabela, cada espécie de microrganismo pode ser fonte de um tipo de componente celular. Por exemplo, *Chlorella vulgaris* e *Arthrospira platensis* são ricas em proteínas, enquanto que *Haematococcus pluvialis* e *Dunaliella salina* são ricas em carotenóides.

Tabela 3: Quantidade média de componentes celulares em diferentes espécies de microalgas de interesse industrial. Fonte: MOLLINO, et al. 2018

Componente celular (% da massa seca)	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Arthrospira platensis</i>	<i>Haematococcus pluvialis</i>	<i>Dunaliella Salina</i>	<i>Nannochloropsis sp.</i>
Proteínas	45,64	46,76	25,69	10,03	26,67
Lipídios	3,13	1,40	2,60	3,49	15,30
Carboidratos	5,30	3,32	6,30	25,31	32,05
Fibras alimentares	35,04	42,82	58,52	8,97	17,67
Minerais	10,88	5,71	4,02	48,74	8,31
Carotenoides	ND*	ND*	2,87	3,46	ND*

* Abaixo do limite de detecção do método empregado

Diferentes cepas possuem uma grande variedade e quantidade de nutrientes desejados e muitos produtos de interesse podem ser obtidos, superando os custos de produção, se houver boa eficiência no processo de separação e uso de energia. As microalgas possuem produtividade relativa maior em proteínas e lipídios do que as principais fontes provindas de agricultura, como soja, cana-de-açúcar, milho e afins, mas sem necessitar de terras aráveis, podendo ser cultivadas em locais estéreis, com águas salgadas, ou até mesmo com águas residuais. Portanto, sendo uma potencial fonte de nutrientes necessários e sustentáveis (VANTHOOR-KOOPMANS et al., 2013).

A maior parte da massa das microalgas se constitui de lipídios, carboidratos e proteínas, mas há também presença de produtos valiosos como pigmentos, tornando-as muito atrativas para fornecer aditivos para alimentos e rações como carotenoides, ácidos graxos poli-insaturados de cadeia longa, flavonoides, antioxidantes e outros metabólitos secundários de alto valor que podem ter sua síntese modulada por alteração do ambiente de cultivo e estresse nutricional das microalgas. Essas substâncias descritas já são utilizadas na alimentação da aquicultura, elevando os valores nutricionais de peixes (CARLA & CARAMUJO, 2017) e apresentam potencial até como nutracêuticos para consumo diretamente por humanos, mas dependeria de uma tecnologia muito cara envolvendo microencapsulamento, ou nanoencapsulamento para terem níveis altamente elevados (CAI et al., 2021), o que seria inviável para o que o estudo se propõe. Por isso é proposta uma abordagem do uso dessas substâncias para o enriquecimento nutricional de rações pecuárias, com custo menos elevado.

4.3.2.1 Carboidratos

Microalgas possuem um alto teor de carboidratos, normalmente cerca de mais de 50% de sua massa seca, diretamente relacionados com sua eficiência de fotoconversão, fração esta constituída de compostos principalmente de glicose, amido, celulose e diversos tipos de polissacarídeos (CHEW et al., 2017).

Os polissacarídeos de microalgas também possuem a capacidade de modular o sistema imunológico, tornando-os ainda mais atrativos como fonte de moléculas biologicamente ativas tanto para ingrediente de rações pecuárias,

minimizando o uso de fármacos para imunização dos animais, quanto para moléculas para uso em suplementação humana, para maior lucratividade de produtos de refino (CHEW et al., 2017)

4.3.2.2 Ácidos Graxos

Ácidos graxos são a maior fração lipídica de microalgas, que podem ser cultivadas de forma autotrófica ou heterotrófica, em diversos ambientes e estações, com produtividade maior do que culturas de oleaginosas aráveis, com baixo consumo de água e nutrientes (MATA et al., 2010). Elas contêm em principal, lipídios polares confinados em suas membranas de organelas, como fosfolipídios e glicolipídios; e também lipídios neutros como monoglicerídeos, diglicerídeos, triglicerídeos, ácidos graxos livres, hidrocarbonetos principalmente nos vacúolos celulares, mas que são mais produzidos em sua fase estacionária ou sob condições adversas (PIGNOLET et al., 2013).

Possuem capacidade alta de acumular lipídios, com 30% a 50% de seu peso total; e o teor de lipídios varia conforme as condições de ambiente de cultura, onde a fonte de nitrogênio escassa faz com que as células fiquem em condição de estresse e tendam a acumular mais lipídios para reserva energética, assim como condições de alta temperatura, mudança de pH e concentração de sal (CHEW et al., 2017). Isso favorece a possibilidade de se poder modular a porcentagem de lipídios produzidos a depender não apenas da espécie, mas também das condições de cultivo.

Em lipídios, a presença de triacilglicerídeos (TAGs) é muito bem vista para aplicações nutritivas, pois melhoram o ganho de peso animal, a qualidade de subprodutos, como leite e ovos, transporte de vitaminas lipossolúveis, precursor de hormônios e composição de membrana celular nos animais criados, e são altamente presentes em microalgas, além de conter comparativamente a outras culturas, mais ácidos graxos insaturados considerados saudáveis (VANTHOOR-KOOPMANS et al., 2013).

Os ácidos graxos poliinsaturados (PUFAs) constituem entre 25 a 60% dos lipídios totais, a depender de espécie de microalga, e possuem importantes funções no campo nutracêutico, e também podem ser utilizados para suplementar rações de mais alta qualidade (YEN et al., 2015). O corpo humano

não possui síntese eficiente para PUFA's de cadeia longa, essenciais para a saúde, e poderiam ser suplementados pela alimentação, como ácido docosahexanóico, conhecido como DHA, que é um ácido graxo importante para a manutenção e bom funcionamento cerebral; ou o ácido eicosapentaenoico, conhecido como EPA, que é um precursor de eicosanóides, um grupo semelhante a hormônios importantes na fisiologia regulatória do organismo. Também estão presentes os ácidos essenciais linoleico e linolênico para a síntese de prostaglandinas da membrana celular, sistema imunológico e regeneração tecidual (RAPOSO et al., 2013). Normalmente a obtenção alimentar desses ácidos graxos são por consumo de peixes ou por suplementação nutricional, que apresentam custos mais elevados no Brasil (CARLA & CARAMUJO, 2017), então uma alternativa de se usar microalgas ricas nesses nutrientes, para suplementar a alimentação pecuária e oferecer alimentos de maior valor nutricional é promissora.

4.3.2.3 Aminoácidos

Os aminoácidos podem ser considerados os produtos de maior importância para o que se propõe este trabalho, já que a produção de rações pecuárias a partir de soja, utiliza principalmente do farelo do grão para prover aminoácidos essenciais aos animais. Esses aminoácidos são originados das proteínas produzidas, por isso, ao falar de proteínas ou aminoácidos, estaremos lidando com a mesma área, basicamente.

As proteínas são os principais constituintes das microalgas, representando de 50% a 70% de sua composição. Em proteínas o principal fator de qualidade é o conteúdo de aminoácidos, mais especificamente os aminoácidos essenciais, ou seja, que não são sintetizados pelos animais a serem alimentados com a ração, mas são necessários para a manutenção metabólica e crescimento, conforme demonstrados na Tabela 1, bem como seu balanceamento. Atualmente, o farelo de soja cumpre muito bem esse papel de suprimento de aminoácidos em rações, mas a biomassa de microalgas pode contribuir para suprir todas as necessidades qualitativas de aminoácidos (Tabela 4) e também potencializá-la com adição de aminoácidos específicos, como metionina e lisina na criação de frangos, que aumenta sua taxa de crescimento, mas é muito cara com a soja como fonte proteica principal da ração. Além disso,

com alta variedade de espécies de microalgas, com diferentes porcentagens de produtos, seria possível modular-se o quanto seria o ponto ideal de quantidade e qualidade, já a partir do cultivo. (VANTHOOR-KOOPMANS et al., 2013).

Tabela 4: Quantidade média de aminoácidos (g/ 100 g proteína) em diferentes espécies de microalgas de interesse industrial. (Fontes: a: ANDREEVA, et al. 2021; b: BORTOLINI, et al. 2022; c: ZHU, et al. 2019; YAP, et al. 2022; d: WILD, et al. 2018).

Aminoácido	<i>Chlorella vulgaris</i> ^a	<i>Spirulina</i> ^b	<i>Haematococcus pluvialis</i> ^c	<i>Dunaliella salina</i> ^a	<i>Nannochloropsis</i> ^d
Alanina	10,82	5.02	5,6	10,99	6,6
Arginina	7,33	4.47	10,26	8,16	5,2
Ácido aspártico ou asparagina	8,54	6,31	5,01	9,56	8,4
Cisteína	1,47	0,64	0,25	1,63	0,7
Ácido glutâmico ou glutamina	10,28	8,47	10,41	12,41	11
Glicina	7,14	3,43	6,61	8,71	5,2
Histidina	1,52	1,13	0,31	1,73	2,0
Isoleucina	3,36	3,64	4,32	4,09	3,8
Leucina	8,41	6,17	3,64	9,58	8,1
Lisina	5,35	3,4	2,68	5,99	5,6
Metionina	2,52	1,71	0,65	2,79	1,9
Fenilalanina	6,17	3,33	1,4	6,98	4,6
Prolina	5,08	2,53	1,24	5,23	5,9
Serina	4,34	3,09	3,43	4,81	4,3
Treonina	5,46	3,31	5,47	5,16	4,7
Triptofano	0,21	0,85	ND*	0,18	1,6
Tirosina	4,34	3,07	2,22	4,86	2,9
Valina	6,89	4,22	2,45	7,23	5,0

* Não detectado

Algumas microalgas possuem proteínas tóxicas, havendo necessidade de estudos anteriores ao cultivo, não apenas para saber que tipo e quantidade de produto final haverá, mas também para análise de proteínas seguras para utilização na alimentação (CHEW et al., 2017).

4.3.2.4 Flavonoides

Flavonoides têm estruturas moleculares relacionadas com funções biológicas, incluindo, mas não somente, atividades anticancerígenas e antioxidantes. Apesar de flavonoides de plantas terrestres estarem em fases de estudos clínicos, os de microalgas ainda estão em fase de detecção e pesquisas, entretanto a detecção de alto teor de flavonoides e perspectivas de classes exclusivas desses compostos em microalgas, além de possibilidade de aumento de concentração por técnicas de aprimoramento, os tornam muito promissores para investimento de estudos e ótimos subprodutos para que a lucratividade de produção e biorrefino de microalgas aumente (FERDOUS & YUSOF, 2021).

Em estudo de GOIRIS et al., 2014, foram analisadas a biomassa, taxonomia e características de várias espécies diferentes de microalgas com alta precisão para a busca de precursores biossintéticos específicos de flavonoides, por equipamento de UHPLC-MS/MS de alta sensibilidade e com produção de biomassa de fotobiorreatores fechados em condições laboratoriais, com amostras colhidas ao final da fase de crescimento logarítmica por centrifugação e imediatamente liofilizadas e armazenadas congeladas, para evitar qualquer tipo de contaminação que comprometesse a precisão dos estudos. Foram detectados ácidos fenólicos simples e hidroxicinâmicos em todas as espécies, além de outros flavonoides com grandes diferenças quantitativas e qualitativas conforme espécies; o que sugere a capacidade metabólica de microalgas de produzir flavonoides de variedades diferentes conforme espécies estudadas, semelhante a diversidade de flavonoides encontradas em briófitas, entretanto seus produtos finais não do mesmo nível de complexidade de plantas terrestres.

Em relação às plantas terrestres, as microalgas oferecem vários benefícios em relação à produção desses produtos de alto valor, em razão principalmente de sua maior eficiência fotossintética diretamente ligada a maior velocidade de crescimento e rendimento por unidade de massa. O cultivo dessas microalgas em fotobiorreatores fornecem condições extremamente adequadas

e de maior controle para que a produção destes metabólitos de alto valor sejam otimizados; embora sejam biorreatores com custo elevado, a colheita de baixo custo, com alta eficiência e produtividade, quando combinadas com as técnicas adequadas de separação, juntamente com constantes estudos de aprimoramento de processos e espécies podem compensar o investimento (FERDOUS & YUSOF, 2021).

4.3.2.5 Vitaminas e Minerais

Microalgas são fontes ricas de minerais e vitaminas, principalmente antioxidantes, que podem agregar alto valor nutricional a rações pecuárias, produzindo altas concentrações de tocoferóis, ácido ascórbico, vitaminas B1, B2, B3, B6, B9 e B12, ácido fólico, ácido pantotênico, ácido nicotínico, inositol e biotina. Diferentes espécies podem agregar diferentes efeitos nutricionais, como *Spirulina sp.* que é rica em vitamina B12 e pró vitamina A (VAZ et al., 2016).

4.3.2.6 Pigmentos

Em pigmentos de microalgas, devem ser enfatizados dois em especial: carotenoides e clorofilas. Estes pigmentos são muito utilizados em precursores de vitaminas, rações animais e aditivos alimentares (CHEW et al., 2017), e sua purificação pode ser feita por métodos de saponificação, sedimentação, centrifugação, filtração e cromatografia, de preferência em condições escuras, por sofrerem fácil isomerização e oxidação pela luz (CAI et al., 2021).

Carotenoides são lipossolúveis, e dão cores características quando presentes, atuando como protetores contra fatores de estresse, incluindo radiação UV, e facilitadores de comunicação celular por induzirem poros comunicantes entre as membranas celulares (CARVALHO & CARAMUJO, 2017), sendo usualmente extraídos de microalgas por solventes orgânicos e extração de Soxhlet; mas a baixa seletividade e alta necessidade de solventes, faz com que a extração por fluido supercrítico se mostre um método mais atrativo, mesmo sendo mais caro, já que os carotenoides possuem alto valor (CHEW et al., 2017). Em heterotróficos, especialmente α -caroteno, β -caroteno e β -criptoxantina e a astaxantina, que é o principal carotenoide em organismos marinhos, atuam de forma benéfica na visão, bem como regulam fatores de transcrição e do sistema imunológico. As pró-vitaminas A são convertidas em

vitamina A no organismo, além de capturar espécies reativas de oxigênio sendo potentes antioxidantes, reforçadores do sistema imunológico e anti-inflamatórios. Outros carotenoides, como luteína e zeaxantina absorvem a luz azul que é oxidativa às estruturas oculares, sendo muito úteis em alimentos humanos e para agregar valor nutritivo em rações (CARLA & CARAMUJO, 2017; CAI et al., 2021).

Clorofilas são lipossolúveis de baixa polaridade, com métodos de extração semelhantes aos dos carotenoides, com várias etapas de solventes orgânicos (CHEW et al., 2017).

4.4 Processos de recuperação de biomassa microalgal e de seus metabólitos

Considerando a grande variedade química dos compostos que as microalgas podem suprir para a produção de rações pecuárias, torna-se importante, separar compostos ou classes de compostos que possam ser adicionados em formulações destas. Nesse sentido, a colheita e os métodos que podem ser empregados para esta finalidade são de extrema importância, sendo comentados a seguir.

A colheita é um parâmetro importante no processo de produção microalgal, pois a composição das biomassas de microalgas pode ser altamente diferente em função de parâmetros escolhidos para a colheita. Por exemplo, a escolha de diferentes tempos de colheita faz com que a relação biomassa/proteína mude, sendo que a fase de crescimento exponencial é um período de colheita mais atrativo para se obter proteínas, e a fase estacionária para se obter mais biomassa. A condição de crescimento microalgal reflete na quantidade de biomassa produzida, e, portanto, recuperada na operação de colheita. O regime de luz contínua produz muito mais do que um regime claro/escuro, porém os custos para o regime de luz contínua não compensam o que se é produzido comparativamente (SUI et al., 2020).

As concentrações celulares baixas no cultivo de microalgas, com valores de aproximadamente 500 mg/L, evidenciam a importância da escolha do método de separação da fração celular do meio de cultivo, podendo ser separados por dois grandes grupos, baseados em sedimentação/floculação da biomassa (centrifugação, por exemplo) ou com uso de membranas (filtração). Como

operações que podem ajudar nesses métodos de separação, há possibilidade de adição de compostos químicos e de microrganismos, bem como o emprego de eletrocoagulação, que ajudam na aglutinação da biomassa microalgal, diminuindo o custo de separação. Os métodos a serem escolhidos dependem do tamanho do microrganismo, resistência a danos, reutilização de meio de cultivo, entre outros (Muyllaert et al., 2017).

Para que haja real possibilidade de complementação de ração animal de soja, por meio de microalgas, não apenas a quantidade de produção é importante, mas também a qualidade dos produtos obtidos pelo cultivo (VANTHOOR-KOOPMANS et al., 2013).

O conceito de biorrefinaria é semelhante à refinaria de petróleo: um processo de obtenção de produtos de mais alto valor, obtidos por meio da separação e concentração de matérias extraídas ou, no caso de microalgas, cultivadas; com a diferença que os materiais para refino mudam, para produzir respectivamente bioprodutos, e produtos petroquímicos (PÉREZ et al., 2017).

Para que os processos sejam sustentáveis, é necessário que haja uma estrutura que sempre evolua e pesquise métodos mais eficazes para a biorrefinaria de produtos de interesse de microalgas, para que se mantenham em alto valor, mas com custos minimizados. Sendo assim, biorrefinarias de sistema satisfatório são aquelas que tenham um excelente desempenho econômico e ambiental, para produção de rações animais; em que mesmo que fotobiorreatores sejam de custo mais elevados do que os convencionais para obtenção de produtos de interesse, isso seja compensado na produtividade e eficiência de absorção de nutrientes e controle de culturas (CHEW et al., 2017).

Técnicas aprimoradas de biorrefinaria são necessárias para explorar eficientemente todos os produtos produzidos pelas microalgas por cultivo, de maneira que um gargalo importante é desenvolver tecnologias suficientemente eficazes para que os produtos finais sejam de qualidade e sua separação não interfira nos outros produtos de interesse, com baixo custo possível de investimento e energia. As células podem ser rompidas por operações de moagem, alta pressão, campo elétrico, ultrassom, com ou sem auxílio de enzimas, sendo que componentes celulares podem ser separados usando

técnicas clássicas com solventes, sendo que os líquidos iônicos também têm sido testados para esta finalidade (VANTHOOR-KOOPMANS et al., 2013).

Considerando a diversidade de microalgas e de compostos produzidos por elas, muito estudo será necessário para a otimização da separação de componentes celulares, com as frações obtidas, inclusive chegando a nível de composto puro, poderem ser empregadas como matéria-prima de produtos de interesse comercial, sendo que o setor de rações pecuárias pode absorver grande parte dos compostos provenientes das biorrefinarias de microalgas.

4.5 Ciclo de vida da soja comparada à de microalgas

Uma das maiores vantagens em relação ao cultivo de soja, para o cultivo de microalgas, é que enquanto o amadurecimento para colheita dos grãos de soja leva cerca de meses, o de microalgas se dá em questão de dias.

As análises também devem levar em conta o uso de energia, água e impactos ambientais relacionados. O ciclo de vida das microalgas também depende dos limites do sistema utilizado para cultivo, como nutrientes disponíveis, mecanismos e qualidade de luz, havendo diferenças significativas entre o cultivo em lagoas e fotobiorreatores, por exemplo (CHEW et al., 2017). A ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma tecnologia emergente para avaliação de processamentos, utilizada para destacar áreas onde podem haver aprimoramentos. Essa tecnologia surgiu a partir de processos de produção de biocombustíveis, para avaliar Índice de Energia Líquida Produzida e Potencial de Aquecimento Global, mas também pode ser aplicada para cultivo de microalgas para outros propósitos (BENNION et al., 2015), já que a avaliação de modelo de negócios demonstrou que o cultivo de microalgas apenas para produção de biocombustíveis são menos lucrativas, pois apenas uma fração de sua biomassa de lipídios seja produto primário, fazendo com que muitos coprodutos de alto valor comercial e nutricional, como proteínas e carboidratos, sejam tratados como resíduos (SOH et al., 2014).

A ACV é uma ferramenta utilizada para que se quantifique recursos utilizados e emissões, sendo útil para identificar e definir metodologias nas diferentes etapas de exploração de microalgas para serem matérias-primas de biomassa, com ciclo de vida que varia de 1 a 4 dias de maneira sustentável e

com menos consumo, em comparação com a soja que tem ciclo de vida de 90 a 120 dias (BARSANTI & GUALTERI, 2018). Esse ciclo de vida muito menor, permite uma produtividade maior de biomassa maior por área/ano.

Para um sistema de análise de ciclo de vida, é necessário utilizar a ferramenta de ACV para espécies específicas em estudos controlados, pois cada uma delas terá perfis de biomassa características e também diferentes velocidades de crescimento, dependentes do ambiente de cultivo; deve-se também levar em conta que ao utilizar um processo que extrai a fração proteica para servir de ração pecuária, serão necessários mais nutrientes para o cultivo de microalgas, mas que comparativamente reduz a entrada de nutrientes agrícolas para produção de soja, e há de se aferir o benefício proporcional de usar águas residuais em vez de fertilizantes para o cultivo de microalgas, e como isso pode afetar o ciclo de vida na prática, a fim de flexibilizar as fontes de micronutrientes, minimizando os custos de uso de fertilizantes de cultivo, maximizando a produção de biomassa (SOH et al., 2014).

4.6 Gargalos e perspectivas do processo de produção de microalgas para uso em rações pecuárias

O principal gargalo para a abordagem de biorrefinaria é que se consiga separar as diferentes frações de interesse, sem causar danos umas às outras. Microalgas são altamente promissoras para o processo de biorrefinaria, por sua capacidade de produzirem múltiplos produtos, serem fontes renováveis de biomassa, necessitarem de pouco tempo para completarem o processo de cultivo e poderem ter composição seletiva (CHEW et al., 2017), no caso do que se propõe neste trabalho, principalmente para produção de nutrientes para rações pecuárias, e, se possível, também produção de compostos nutracêuticos de alto valor, para suplementação alimentar humana.

Outro gargalo importante é a grande quantidade de energia utilizada em todo o processo, assim como altos custos de investimentos. (VANTHOOR-KOOPMANS et al., 2013). A baixa concentração celular nos cultivos fotoautotróficos, menores que 1 g/L em muitos processos (DEEPA et al., 2023), é outro gargalo do processo, pois em decorrência disso, há aumento do custo

dos reatores, da movimentação dos cultivos para manutenção das células em suspensão, bem como do processo de separação da biomassa. Por isso é necessário que se use o máximo de energia renováveis, principalmente solar, para os processos que forem eficientes com o uso desta, além de que se invista inicialmente em mais pesquisas e evolução de processos, para que em um futuro próximo os custos de investimento diminuam e os lucros aumentem, em razão de melhor tecnologia utilizada. De maneira geral, análises tecno-econômicas baseadas em adequação de metodologias utilizadas e qualidade de banco de dados devem ser as principais ferramentas para reduzir os gargalos relacionados a custos de produção, para que sistemas eficientes e produtivos sejam garantidos e capazes de produzir o ano todo, sem falhas (ACIÉN et al., 2019).

A maior parte dos estudos se centra em obter apenas um produto específico a partir da biomassa de microalgas cultivadas, limitando os métodos de extração, e o valor que se poderia ter ao se obter o máximo de bioprodutos valiosos, havendo também muito desperdício do que poderia aproveitado. (VANTHOOR-KOOPMANS et al., 2013).

Na aquicultura, já se utilizam alimentos à base de microalgas tanto como rações 100% produzidas de microalgas, quanto por suplementação de outros tipos de rações, fornecendo ótimos resultados aos criadouros de peixes que fazem uso destes, com estudos toxicológicos e fisiológicos que comprovam a eficácia e custo-benefício do uso, inclusive sendo imunoestimuladoras, sendo já utilizadas para produção de zooplâncton, moluscos, crustáceos e piscicultura em incubatórios, significativamente (DINESHBABU et al., 2019).

Com as pesquisas relacionadas aos produtos que podem ser cultivados de microalgas, já abordados anteriormente no trabalho e considerados não apenas, mas também de alto valor nutricional, este ramo também vem ganhando notoriedade, de modo que é promissor o uso de microalgas e/ou seus metabólitos em rações pecuárias. Com o investimento e desenvolvimento em tecnologias que tornem os processos economicamente viáveis, e as tecnologias emergentes, como ultrafiltração, microfiltração, entre outros, podem servir como ótimo suporte para a eficiência produtiva para rações pecuárias a partir de microalgas (CHEW et al., 2017).

5. CONCLUSÃO

O mercado de rações pecuárias é um dos maiores do mundo, movimentando a economia, pessoas, produtos e logística. Contudo, há projeções de saturação na produção em alguns anos, impulsionando estudos comparativos de novas tecnologias e novas fontes alimentícias. O estudo averiguou a capacidade das microalgas como matéria-prima para rações pecuárias, seu custo-benefício e sustentabilidade.

As microalgas são fontes de produção de nutrientes muito promissoras, com ciclo de vida baixo, baixo custo em consumíveis caros como fertilizantes e não necessitam terras aráveis, cada dia mais escassas. Todavia, é necessário um investimento maior com equipamentos, reparo e pessoal especializado para tal produção, além de que ainda há muitas tecnologias em fases experimentais.

Por sua vez, a soja é muito bem estabelecida como principal fonte proteica de rações pecuárias no Brasil, onde o agronegócio produz de maneira lucrativa e com apoio de pesquisas. Sua estrutura, seleção de melhores espécies e características genéticas estão em um nível muito avançado, tornando mais difícil avanços científicos de novas fontes proteicas. Tendo em vista esses pontos, ao se fazer uma comparação bibliográfica de valores, estruturas, custos e lucratividade de produção, observou-se que as microalgas podem contribuir no setor de rações pecuárias, em complementação à soja, além de oferecerem metabólitos de alto valor biológico.

Adicionalmente, levando em conta o curtíssimo tempo de cultivo necessário para microalgas, essa possibilidade se mostra muito promissora, contanto que mais estudos pontuais em tecnologias e estudos de espécies de microalgas já existentes sejam feitos, focando no cultivo em grande escala, o que contribuirá para redução de custos da produção destes microrganismos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIÉN, F.G. et al., Economics of microalgae production. **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts**. p. 485 - 503, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00020-0>

ACIÉN, F.G. et al., Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. **Biotechnology Advances**. v. 30, Issue 6, p. 1344 - 1353. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.02.005>

ACIÉN, F.G., SEVILLA, J.M., GRIMA, E. M., Costs analysis of microalgae production. **Biomass, Biofuels, Biochemicals**. Biofuels from Algae (Second Edition), p 551 - 566, 2019 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64192-2.00021-4>

ADARME-VEGA, T. C. et al., Microalgal biofactories: a promising approach towards sustainable omega-3 fatty acid production. **Microbial Cell Factories**. v. 11, artigo 96. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1186/1475-2859-11-96>

ANDREEVA, A. et al. Production, Purification, and Study of the Amino Acid Composition of Microalgae Proteins. **Molecules**. v. 26, artigo 2767. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26092767>

ARRUTIA, F. et al., Oilseeds beyond oil: Press cakes and meals supplying global protein requirements. **Trends in Food Science & Technology**. v. 100, p. 88-102. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.044>

ARTUZO, F. D. et al., Costs management in maize and soybean production **Revista Brasileira de gestão de negócios**. v. 20, p. 273 - 294. 2018 DOI: <https://doi.org/10.7819/rbgn.v20i2.3192>

BARROS, G. S. A. D. C. et al., Custos de produção de biodiesel no Brasil. **Revista de Política Agrícola**. v. 15 Issue 3 p. 36-50. 2006.

BRASIL, Estatísticas de comércio exterior do agronegócio brasileiro. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. 2016 Disponível em: agrostat.agricultura.gov.br/ Acesso em 17 de agosto de 2024.

BARSANTI, L & GUALTERI, P., Is exploitation of microalgae economically and energetically sustainable? **Algal Research**. v. 31, p. 107 - 115, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.02.001>

BENNION, E. P. et al., Lifecycle assessment of microalgae to biofuel: Comparison of thermochemical processing pathways. **Applied Energy**. v 154, p. 1062 - 1071. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.009>

BOLTON, J. J., What is aquatic botany? – And why algae are plants?: The importance of nontaxonomic terms for groups of organisms. **Aquatic Botany**, v. 132, p. 1 – 4, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2016.02.006>

BOROWITZKA, M. A., High-value products from microalgae-their development and commercialisation. **Journal of Applied Phycology**. v. 25, p. 743 - 756. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-013-9983-9>

BORTOLINI, D. G. et al. Functional properties of bioactive compounds from *Spirulina* spp.: Current status and future trends. **Food Chemistry: Molecular Sciences**. v. 5, artigo 100134, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100134>

BUONO, S. et al., Functional ingredients from microalgae. **Food and Function**. v. 5, Issue 8, p. 1669 - 1685. 2014 DOI: <https://doi.org/10.1039/C4FO00125G>

CAI, Y. et al., An integration study of microalgae bioactive retention: From microalgae biomass to microalgae bioactives nanoparticle. **Food and Chemical Toxicology**. v. 158, article 112607. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112607>

CARVALHO, C. C. C. R. & CARAMUJO, M. J., Carotenoids in Aquatic Ecosystems and Aquaculture: A Colorful Business with Implications for Human Health. **Frontiers**. v. 4, 2017 DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00093>

CARVALHO, J. C. M. et al., Microalgal Bioreactors. **Algal Biorefineries**. v. 1, p. 83 - 126, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7494-0>

CHACÓN-LEE, T. L. & GONZÁLEZ-MARINHO, G. E., Microalgae for “Healthy” Foods—Possibilities and Challenges. **Comprehensive Reviews in Food**

Science and Food Safety. v. 9, Issue 6, p. 600 - 694. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00132.x>

CHEW, W. T. et al., Microalgae biorefinery: High value products perspectives. **Bioresource Technology.** v. 229, p. 52 - 62. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.006>

COBOS, M. et al., Nutritional evaluation and human health-promoting potential of compounds biosynthesized by native microalgae from the Peruvian Amazon. **World Journal of Microbiology and Biotechnology.** v. 36, artigo 121. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02896-1>

COCA-SINOVA, A. et al., Apparent Ileal Digestibility of Energy, Nitrogen, and Amino Acids of Soybean Meals of Different Origin in Broilers. **Poultry Science.** v. 87, p. 2613 - 2623. 2008. DOI: <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00182>

COLUSSI, J., N. et al., Comparing Direct Costs of Soybean Production in the United States and Brazil. **Farmdoc Daily**, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois at Urbana-Champaign. v. 13 p. 215 2023. Disponível em: <https://farmdocdaily.illinois.edu/2023/11/comparing-direct-costs-of-soybean-production-in-the-united-states-and-brazil.html> Acesso em 17 de agosto de 2024.

CONAB (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO), Séries históricas de área plantada, produtividade e produção. Disponível em: <http://www.CONAB.gov.br/conteudos.php?t=2&a=1252&filtrar=1&f=1&p=115&e=0&d=0&m=0&s=0&ac=0&tps=0&lvs=0&l=0&ed=0&i=> Acesso em 12 de julho de 2024.

DINESHBABU, G. et al., Microalgae–nutritious, sustainable aqua- and animal feed source. **Journal of Functional Foods.** v. 62. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103545>

EBENEZER, V.; MEDLIN, L.; KI, J., Molecular detection, quantification, and diversity evaluation of microalgae. **Marine Biotechnology.** v. 14, p. 129 - 142. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10126-011-9427-y>

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), Soja em números (safra 2023/2024). 2024 Disponível em:

<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos> Acesso em 12 de julho de 2024.

FERDOUS, U. T. & YUSOF, Z. N. B., Insight into Potential Anticancer Activity of Algal Flavonoids: Current Status and Challenges. **Molecules**. v. 26, artigo 6844. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26226844>

FERREIRA, L. S. et al. A new approach to ammonium sulphate feeding for fed-batch *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* cultivation in tubular photobioreactor, **Biotechnology Progress**, v. 26, Issue 5, p. 1271 - 1277. 2010 DOI: <https://doi.org/10.1002/btpr.457>

FIGUEIREDO, P. N., New challenges for public research organizations in agricultural innovation in developing economies: Evidence from Embrapa in Brazil's soybean industry. **The Quarterly Review of Economics and Finance**. v. 62 p. 21-32. 2016

GAFFIELD, K. T., et al., A review of soybean processing byproducts and their use in swine and poultry diets. **Translational Animal Science**. v. 8. 2024. DOI: <https://doi.org/10.22541/au.171020697.70258526/v1>

GAIGNARD, C. et al., New horizons in culture and valorization of red microalgae. **Biotechnology Advances**. v. 37, Issue 1, p. 193 - 222. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.11.014>

GRIESHOP, M. C. et al., Chemical and Nutritional Characteristics of United States Soybeans and Soybean Meals. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 51, Issue 26, p. 7684 - 7691. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf034690c>

GOHARA-BEIRIGO, A. L. et al., Microalgae trends toward functional staple food incorporation: Sustainable alternative for human health improvement. **Trends in Food Science & Technology**. v. 125, p. 185 - 199, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.030>

GOIRIS, K. et al., Detection of flavonoids in microalgae from different evolutionary lineages. **Journal Phycol**. v. 50, p. 483 - 492. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpy.12180>

HUANG, Y. et al., Improvement on light penetrability and microalgae biomass production by periodically pre-harvesting *Chlorella vulgaris* cells with culture medium recycling, **Bioresource Technology**, v. 216, p. 669 - 676. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.011>

IBÁÑEZ, M. A. et al., Chemical composition, protein quality and nutritive value of commercial soybean meals produced from beans from different countries: A meta-analytical study. **Animal Feed Science and Technology**. v. 267, article 114531. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114531>

IMEA, Custo de Produção- Soja- Mensal Convencional. Disponível em: <https://www.imea.com.br/imea-site/relatorios-mercado-detalhe?c=4&s=696277432068079616>. Acesso em 30 de agosto de 2024.

LAGOS, L. V. & STEIN, H. H., Chemical composition and amino acid digestibility of soybean meal produced in the United States, China, Argentina, Brazil, or India. **Journal of Animal Science**. v. 95, Issue 4, p. 1626 - 1636. 2017. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2017.1440>

MADEIRA, M. S. et al., Microalgae as Feed Ingredients for Livestock Production and Meat Quality: A Review. **Livestock Science**. v. 205, p. 111 - 121. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.09.020>

MAHAPATRA, D. M., CHANAKYA, H. N., RAMACHANDRA, T. V., Treatment Efficacy of Algae Based Sewage Treatment Plants. **Enviromental Monitoring and Assestment**. v. 185, p. 7145 - 7164. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3090-x>

MATA, T. M., MARTINS, A. A., CAETANO, N. S., Microalgae for biodiesel production and other applications: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, Issue 1, p. 217 - 232. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>

MASI, A. et al., Chlamydomonas reinhardtii: A Factory of Nutraceutical and Food Supplements for Human Health. **Molecules**. v. 28, p. 1185, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28031185>

MASUDA, T. & GOLDSMITH, P. D., World Soybean Production: Area Harvested, Yield, and Long-Term Projections. **International Food and Agribusiness**

Management Review. v. 12, Issue 4, p. 143-161, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.92573>

MATSUDO, M. C., et al., CO₂ from Alcoholic Fermentation for Continuous Cultivation of *Arthrospira (Spirulina) platensis* in Tubular Photobioreactor Using Urea as Nitrogen Source, **Biotechnology Progress**, v. 27, Issue 3, p. 650 - 656. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/btpr.581>

Medrano-Barboza, J. et al., Pig Slaughterhouse Wastewater: Medium Culture for Microalgae Biomass Generation as Raw Material in Biofuel Industries. **Water**, v. 14, article 3016. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14193016>

MEJIA-DA-SILVA, L. C., Avaliação do crescimento de microrganismos fotossintetizantes em fotobiorreator tubular empregando nutrientes provenientes da vinhaça tratada, **USP Universidade de São Paulo**, Tese para obtenção de título de doutorado. 2020.

MOLLINO, A. et al, Microalgae Characterization for Consolidated and New Application in Human Food, Animal Feed and Nutraceuticals. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. v. 15, Issue 11 artigo 2436. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15112436>

MOROCHO-JÁCOME, A. N. et al., Continuous cultivation of *Arthrospira platensis* using exhausted medium treated with granular activated carbon, **Journal of Hydrology**, v. 522, p. 467 - 474. 2015 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.001>

MUYLAERT, K. et al. Harvesting of microalgae: Overview of process options and their strengths and drawbacks. In: Gonzalez-Fernandez, C.; Muñoz, R. (eds.). Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: from feedstock cultivation to end-products. Elsevier, Amsterdam: Elsevier, 2017. p.114–132.

NOSHADI, M. & NOURIPOUR, R., Urban wastewater treatment by microalgae, bacteria and microalgae–bacteria system (Laboratory-scale study). **Urban Water Journal**. v. 12, p 161 - 172. 2021 DOI: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1974892>

PÉREZ, A. T. E. et al., Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: A bibliographic

analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 69, p. 350 - 359. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.084>

PIGNOLET, O. et al., Highly valuable microalgae: biochemical and topological aspects. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**. v. 40, Issue 8, p. 781 - 796, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10295-013-1281-7>

POPOVIC, V. M. et al., Soybean area, yield and production, **Romanian Agricultural Research**. v. 21, p. 135 - 144. 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/365450956> Acesso em 17 de agosto de 2024.

RAPOSO, M. F., MORAIS, R. M. S., MORAIS, A. M. M., Health applications of bioactive compounds from marine microalgae. **Life Sciences**. v. 93, Issue 15, p. 479 - 486. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2013.08.002>

RICHETT, A., Viabilidade econômica da cultura da soja para a safra 2021/2022, em Mato Grosso do Sul. **Embrapa**. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1133296/1/COT-262-2021.pdf> Acesso em 21 de agosto de 2024.

ROJAS, O. J. & STEIN, H. H., Concentration of digestible, metabolizable, and net energy and digestibility of energy and nutrients in fermented soybean meal, conventional soybean meal, and fish meal fed to weanling pigs. **Journal of Animal Science**. v. 91, Issue 9, p. 4397 - 4405. 2013. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6409>

SHENG, J., VANNELA, L., RITTMANN, B. E., Evaluation of Cell-Disruption Effects of Pulsed-Electric-Field Treatment of *Synechocystis* PCC 6803. **Environmental Science & Technology**. v. 45, p 2785 - 3802. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/es103339x>

SOH, L. et al., Evaluating microalgal integrated biorefinery schemes: Empirical controlled growth studies and life cycle assessment. **Bioresource Technology**. v. 151, p. 19 - 27. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.012>

SUI, Y. et al., Harvesting time and biomass composition affect the economics of microalgae production. **Journal of Cleaner Production**. v. 259, article 120782. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120782>

THIAGO, L. R. L. & da SILVA, J. M. Soja na Alimentação de Bovinos. **Circular Técnica EMBRAPA**. 2003. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/321033/soja-na-alimentacao-de-bovinos>. Acesso em 17 de junho de 2024. Acesso em 17 de agosto de 2024.

VANTHOOR-KOOPMANS, M. et al., Biorefinery of microalgae for food and fuel. **Bioresource Technology**. v. 135, p. 142 - 149. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.135>

VAZ, da S, B. et al., Microalgae as a new source of bioactive compounds in food supplements. **Current Opinion in Food Science**. v. 7, p. 73 - 77. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.12.006>

WANG, S. K. et al., Tofu whey wastewater is a promising basal medium for microalgae culture. **Bioresource Technology**. v. 253, p. 79 - 84. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.012>

WILD, K. J. et al. Variability in nutrient composition and in vitro crude protein digestibility of 16 microalgae products. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**. v. 102, Issue 5, p. 1306 - 1319, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpn.12953>

YÁNEZ, J. L. et al., Nutrient digestibility of soybean products in grower-finisher pigs. **Journal of Animal Science**. v. 97, Issue 11 p. 4598 - 4607. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/skz290>

YAP, S. M. et al. Enhancement of protein production using synthetic brewery wastewater by *Haematococcus pluvialis*. **Journal of Biotechnology**. v. 350, p. 1 - 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2022.03.008>

YEN, H. et al., Supercritical fluid extraction of valuable compounds from microalgal biomass. **Bioresource Technology**. v. 184, p 291 - 296. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.030>

YILDIZ, D., Global Soybean Supply and Demand & 2024 Expectations, **International Magazine for Animal Feed & Additives Industry**. 2024. Disponível em: <https://www.feedandadditive.com/global-soybean-supply-and-demand-2024-expectations/> Acesso em 17 de agosto de 2024.

ZHU, L., Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry: An innovative framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v. 41, p. 1376 – 1384. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.040>

ZHU, Y. et al. Extraction, structural and functional properties of Haematococcus pluvialis protein after pigment removal. **International Journal of Biological Macromolecules.** v. 140, p. 1073 - 1083, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.209>