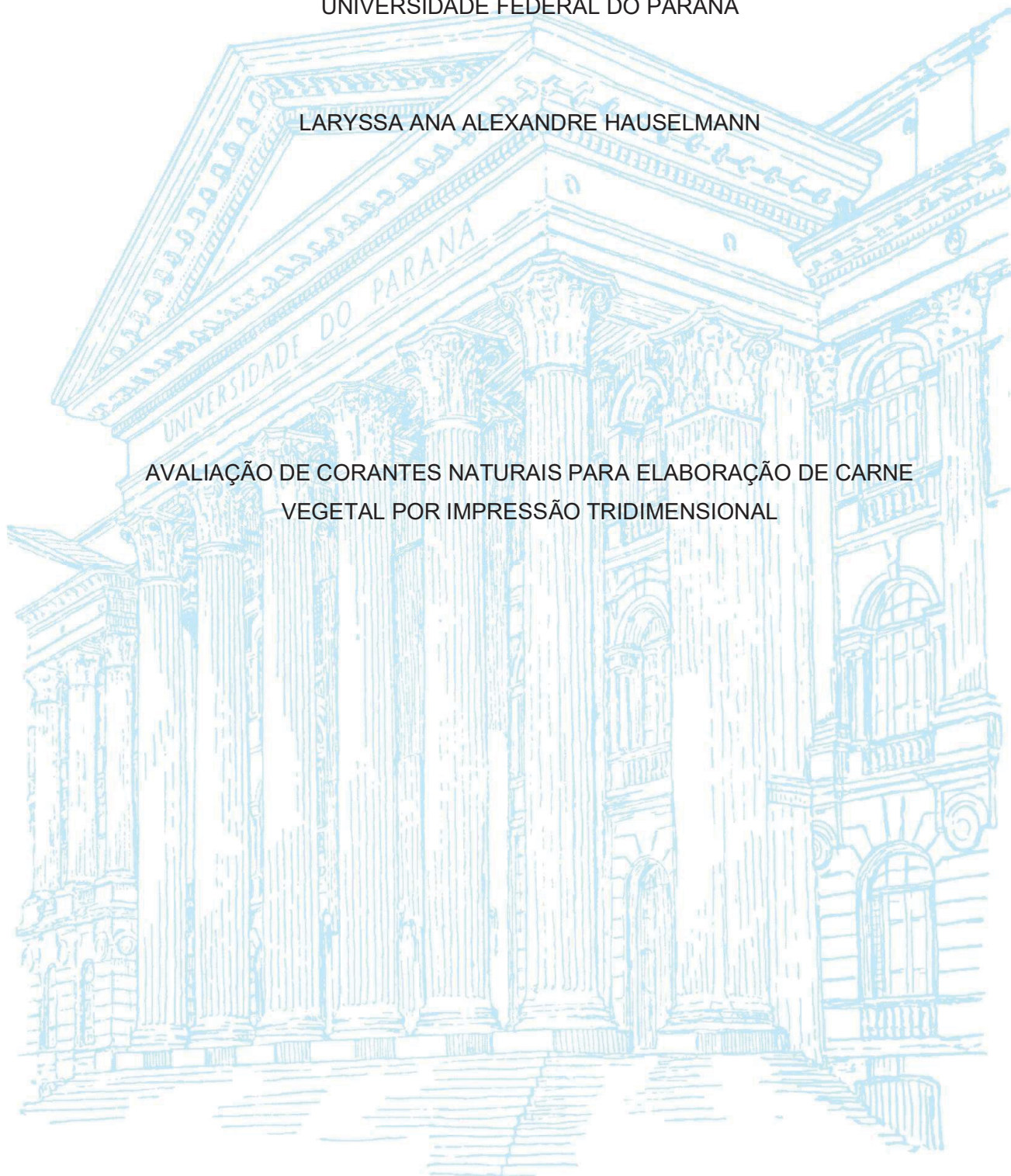


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LARYSSA ANA ALEXANDRE HAUSELMANN

AVALIAÇÃO DE CORANTES NATURAIS PARA ELABORAÇÃO DE CARNE  
VEGETAL POR IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL



CURITIBA

2025

LARYSSA ANA ALEXANDRE HAUSELMANN

AVALIAÇÃO DE CORANTES NATURAIS PARA ELABORAÇÃO DE CARNE  
VEGETAL POR IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos

Orientadora: Profa. Dra. Luana Carolina Bosmuler Züge

Coorientadora: Profa. Dra. Agnes de Paula Scheer

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA JANDAIA DO SUL

Hauselmann, Laryssa Ana Alexandre

Avaliação de corantes naturais para elaboração de carne vegetal por impressão tridimensional. / Laryssa Ana Alexandre Hauselmann. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Pós-graduação em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Profa. Dra. Luana Carolina Bosmuler Züge.

Coorientadora: Profa. Dra. Agnes de Paula Scheer.

1. Proteína de ervilha. 2. Proteína de soja. 3. Análogo a carne. 4. Carne vegetal. 5. Estabilidade térmica. I. Züge, Luana Carolina Bosmuler. II. Scheer, Agnes de Paula Scheer. III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 664.06

Bibliotecário: César A. Galvão F. Conde - CRB-9/1747



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE  
ALIMENTOS - 40001016019P6

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE ALIMENTOS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **LARYSSA ANA ALEXANDRE HAUSELMANN**, intitulada: **AVALIAÇÃO DE CORANTES NATURAIS PARA ELABORAÇÃO DE CARNE VEGETAL POR IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL**, sob orientação da Profa. Dra. LUANA CAROLINA BOSMULER ZUGE, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 05 de Dezembro de 2025.

Assinatura Eletrônica

10/12/2025 10:35:44.0

LUANA CAROLINA BOSMULER ZUGE

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

10/12/2025 11:30:27.0

HELAYNE APARECIDA MAIEVES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

10/12/2025 10:18:43.0

LEOMARA FLORIANO RIBEIRO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

---

Francisco Heráclito dos Santos, 100 - Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3232 - E-mail: posalim@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 502986

**Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 502986**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pela honra e glória de Seu Nome. Por não ter me deixado só em nenhum momento, desde o início e até agora.

Aos meus pais, Roberto e Cidinha e à minha madrinha, Candelária, pelo apoio e oração incondicionais durante todo o processo. Eu não teria conseguido sem vocês, nem sequer chegar onde cheguei. Vocês são minha base, inspiração e tem o meu amor para sempre. Às minhas irmãs, Lorayne e Lays, por todo o apoio e amor. Vocês são as melhores.

Ao meu marido, Marcelo Eduardo, pelo amor, paciência e compreensão em todos os momentos ao longo destes anos. Por me aguentar nos piores dias e por me incentivar a ser melhor sempre. “Uma coisa de cada vez”. Você tem meu coração.

À Luana, minha orientadora desde a graduação, por todo o aprendizado nestes anos. Obrigada por me ensinar a ser melhor em cada versão. Sua orientação foi essencial para a conclusão deste ciclo.

À Agnes, minha coorientadora, por toda a paciência e ensinamento.

À minha querida amiga, Larissa Resende, por ter me acompanhado não só na jornada laboratorial, mas ter compartilhado tantas risadas na vida e na B102.

Aos meus queridos amigos de turma: Felismina, Israel, Marina, Nicole e Renan. Pela amizade e apoio emocional durante a minha estadia em Curitiba. Vocês têm um lugarzinho no meu coração. E às queridas colegas do PPGEAL: Amanda, Anna, Gerliane, Mayra e Thalia.

Às professoras Leomara Floriano Ribeiro e Helayne Aparecida Maieves pela disponibilidade em participar da banca avaliadora do presente trabalho.

Ao técnico Silvio Pomin pelo suporte no laboratório NanoMakers.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Paraná e a Universidade Federal do Paraná – Campus Jandaia do Sul pelo apoio e estrutura.

A todas as pessoas que ajudaram de maneira direta ou indireta na realização deste trabalho e durante o mestrado.

“Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso! Não se apavore, nem desanime, pois o Senhor, o Seu Deus, estará com você por onde você andar.”

(JOSUÉ 1, 9)

## RESUMO

A alta emissão de gases poluentes pela pecuária, aliada ao crescimento populacional, impulsiona a busca por alternativas alimentares mais sustentáveis. Nesse cenário, a impressão 3D de alimentos destaca-se como uma tecnologia promissora para o desenvolvimento de carnes vegetais voltadas a diferentes perfis de consumidores. A utilização de corantes naturais nesses produtos contribui para a melhoria da coloração e da aceitação sensorial, além de atender à crescente demanda por alimentos mais naturais e com menor uso de aditivos artificiais. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um produto à base de proteínas vegetais, incorporando corantes naturais como a beterraba, cúrcuma, cenoura, urucum e páprica, por meio de impressão tridimensional, e avaliar suas propriedades físicas, químicas, tecnológicas e o desempenho de impressão. Foram realizados delineamentos experimentais DOE com ponto central e axial para encontrar a melhor formulação sendo de 13% isolado proteico de ervilha (PTE), 2% de isolado proteico de soja (PTS), 1,3% goma xantana, 1,2% HPMC, 1,5% NaCl, 0,9% psyllium, 0,7% corante (urucum, cenoura ou páprica), 0,3% cúrcuma, 37% extrato aquoso de beterraba, 30% água, 12% óleo de canola. Para a impressora, utilizou-se um bocal de 2 mm, com temperatura da mesa de impressão de 8°C. Após impressas, as carnes passaram por processo de maturação com temperatura (5°C) e umidade relativa (75%). Em seguida, foram submetidas a tratamentos térmicos a seco (assar) e úmido (cozinhar). Com as carnes crua, assada e cozida foram realizadas análises de composição centesimal (umidade, cinzas, açúcares redutores, lipídeos, proteínas, pH e acidez titulável), coloração, fenólicos totais, flavonoides totais, atividade antioxidante (ABTS, FRAP e DPPH) e coloração. As amostras cozidas apresentaram umidade média de 64%, enquanto as assadas mostraram valores relativamente superiores de cinzas, sendo a média de 3,79%, e açúcares redutores, com média de 9,29 g/100g. Os lipídios foram mais elevados nas amostras cruas, com média de 29,09%, e o teor de proteínas aumentou nas amostras assadas devido à perda de água, com média de 45,95%. Observou-se pH mais alto nas amostras cozidas, média de 6,49, e maior acidez titulável nas assadas, com média de 0,37. Na análise colorimétrica foi observado o comportamento semelhante ao da mioglobina para carnes de origem animal, com redução na tonalidade vermelha ( $a^*$ ) e escurecimento ( $L^*$ ) após os tratamentos térmicos. Para os compostos fenólicos, flavonoides totais e atividade antioxidante (FRAP, DPPH, ABTS) as amostras cruas apresentaram os maiores valores, em virtude da ausência de oxidação térmica e não ocorrência de lixiviação durante o processamento. De modo geral, os pigmentos naturais apresentaram comportamentos semelhantes entre si, sendo o tratamento térmico o principal fator de variação. As carnes impressas em 3D representam uma alternativa promissora para a indústria alimentícia, uma vez que apresentaram composição centesimal favorável e desempenho expressivo em termos de compostos bioativos, podendo ser classificadas como produtos enriquecidos. Além disso, a coloração obtida foi muito semelhante à de carnes convencionais, o que tende a facilitar a aceitação pelo público.

Palavras-chave: Proteína de ervilha; proteína de soja; análogo a carne; carne vegetal; estabilidade térmica.

## ABSTRACT

The high emission of polluting gases from livestock production, combined with population growth, drives the search for more sustainable food alternatives. In this context, 3D food printing stands out as a promising technology for the development of plant-based meats aimed at different consumer profiles. The use of natural colorants in these products contributes to improved coloration and sensory acceptance, in addition to meeting the growing demand for more natural foods with reduced use of artificial additives. The objective of this study was to develop a product based on plant proteins, incorporating natural colorants such as beetroot, turmeric, carrot, annatto, and paprika through three-dimensional printing, and to evaluate its physical, chemical, and technological properties as well as printing performance. Experimental designs (DOE) with central and axial points were conducted to determine the best formulation, consisting of 13% pea protein isolate (PPI), 2% soy protein isolate (SPI), 1.3% xanthan gum, 1.2% HPMC, 1.5% NaCl, 0.9% psyllium, 0.7% colorant (annatto, carrot, or paprika), 0.3% turmeric, 37% aqueous beetroot extract, 30% water, and 12% canola oil. For printing, a 2 mm nozzle was used, with the printing bed temperature set at 8°C. After printing, the products underwent a maturation process at 5°C and 75% relative humidity. Subsequently, they were subjected to dry (baking) and moist (boiling) heat treatments. Analyses were performed on raw, baked, and boiled samples, including proximate composition (moisture, ash, reducing sugars, lipids, proteins, pH, and titratable acidity), color, total phenolic compounds, total flavonoids, antioxidant activity (ABTS, FRAP, and DPPH), and colorimetry. The cooked samples showed an average moisture content of 64%, while the baked samples exhibited relatively higher ash values, averaging 3.79%, and reducing sugars, with an average of 9.29 g/100 g. Lipid content was higher in the raw samples, averaging 29.09%, and protein content increased in the baked samples due to water loss, with an average of 45.95%. A higher pH was observed in the cooked samples, with an average of 6.49, while higher titratable acidity was found in the baked samples, averaging 0.37. Colorimetric analysis revealed behavior similar to myoglobin in animal-derived meats, with a reduction in red tone ( $a^*$ ) and darkening ( $L^*$ ) after heat treatments. Regarding phenolic compounds, total flavonoids, and antioxidant activity (FRAP, DPPH, ABTS), raw samples showed the highest values due to the absence of thermal oxidation and the lack of leaching during processing. Overall, the natural pigments exhibited similar behavior to one another, with heat treatment being the main factor influencing variation. 3D-printed meats represent a promising alternative for the food industry, as they showed favorable proximate composition and significant performance in terms of bioactive compounds, allowing them to be classified as enriched products. Moreover, the coloration obtained was very similar to that of conventional meats, which is likely to facilitate consumer acceptance.

Keywords: Pea protein; soy protein; meat analog; plant-based meat; thermal stability.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PASSO A PASSO DA IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL .....	17
FIGURA 2 - MÉTODOS DE EXTRUSÃO .....	23
FIGURA 3 - PROTEÍNA DE SOJA (PTS).....	27
FIGURA 4 - PROTEÍNA DE ERVILHA (PTE).....	29
FIGURA 5 - ESTRUTURA QUÍMICA DOS HIDROCARBONETOS E XANTOFILAS OXIGENADAS DOS CAROTENOIDES .....	32
FIGURA 6 – URUCUM SEMENTE E URUCUM MOÍDO .....	33
FIGURA 7 - PÁPRICA MOÍDA COMERCIAL .....	35
FIGURA 8 - BETERRABA .....	37
FIGURA 9 - CÚRCUMA .....	38
FIGURA 10 - FASES DO TRABALHO .....	44
FIGURA 11 - OBTENÇÃO DA CENOURA EM PÓ .....	46
FIGURA 12 - ESQUEMA DE PREPARO DAS FORMULAÇÕES .....	47
FIGURA 13 - IMPRESSORA DE CARNE VEGETAL .....	52
FIGURA 14 - CONDIÇÕES DE IMPRESSÃO .....	53
FIGURA 15 - PERFORMANCE DE IMPRESSÃO .....	54
FIGURA 16 – OBSERVAÇÃO EM ESTÚDIO DO DESEMPENHO DE IMPRESSÃO DAS AMOSTRAS .....	55
FIGURA 17 - AMOSTRAS CRUAS, COZIDAS E ASSADAS CONTENDO EXTRATO DE CENOURA, URUCUM E PÁPRICA .....	57
FIGURA 18 – GRÁFICO REFERENTE À ANÁLISE COLORIMÉTRICA DAS AMOSTRAS CONTENDO EXTRATO DE CENOURA, URUCUM E PÁPRICA .....	59
FIGURA 19 - EXTRATOS HIDROALCOÓLICOS DAS AMOSTRAS CONTENDO URUCUM, EXTRATO DE CENOURA E PÁPRICA, CRUAS, COZIDAS E ASSADAS. .....	68
FIGURA 20 – GRÁFICO REFERENTE À ANÁLISE DE ANTIOXIDANTES DAS AMOSTRAS CONTENDO EXTRATO DE CENOURA, PÁPRICA E URUCUM .....	77

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - INGESTÃO MÁXIMA DIÁRIA DE CAROTENOIDES .....	33
TABELA 2 - VALORES PARA OS DELINEAMENTOS 2 <sup>o</sup> COM PONTO CENTRAL E AXIAL E PONTO ÓTIMO ENCONTRADO .....	45
TABELA 3 - PARÂMETROS DE IMPRESSÃO PARA A IMPRESSORA DE CARNE VEGETAL.....	53
TABELA 4 - VALORES ENCONTRADOS PARA O DESEMPENHO DE IMPRESSÃO .....	55
TABELA 5 - RESULTADO DA ANÁLISE COLORIMÉTRICA PARA AS AMOSTRAS CONTENDO URUCUM, PÁPRICA OU EXTRATO DE CENOURA CRUAS, COZIDAS E ASSADAS .....	56
TABELA 6 – RESULTADO DE UMIDADE, CINZAS, LIPÍDEOS, PROTEÍNAS, AÇÚCARES REDUTORES, PH E ACIDEZ TITULÁVEL PARA AMOSTRAS CONTENDO URUCUM, PÁPRICA OU EXTRATO DE CENOURA CRUAS, COZIDAS E ASSADAS .....	61
TABELA 7 - COMPOSIÇÃO BASEADA NA FORMULAÇÃO.....	66
TABELA 8 - RESULTADO DE FENÓLICOS TOTAIS E FLAVONOÍDES TOTAIS PARA AMOSTRAS CONTENDO URUCUM, PÁPRICA OU EXTRATO DE CENOURA CRUAS, COZIDAS E ASSADAS.....	71
TABELA 9 - ATIVIDADE ANTIOXIDANTES (ABTS, FRAP E DPPH) PARA AMOSTRAS CONTENDO URUCUM, PÁPRICA OU EXTRATO DE CENOURA CRUAS, COZIDAS E ASSADAS.....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

PTE – Proteína de Ervilha

PTS – Proteína de Soja

HPMC – Hidroxipropilmetilcelulose

NaCl – Cloreto de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

HCl – Ácido clorídrico

H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> – Ácido bórico

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – Ácido sulfúrico

DNS – Ácido 3,5-dinitrosalicílico

TPTZ – 2,4,6-Tris(2-piridil)-s-triazina

ABTS – Ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico)

DPPH – 2,2-difenil-1-picril-hidrazila

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>14</b>
2.1	NOVAS TECNOLOGIAS NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA	14
2.1.1	A tecnologia na indústria 4.0 do ramo alimentício	15
2.1.2	Impressão tridimensional na indústria alimentícia	16
2.2	CARNE VEGETAL	19
2.2.1	Impressão tridimensional de análogos de carne	20
2.2.2	Impressão tridimensional por extrusão	22
2.3	MATÉRIAS-PRIMAS PARA IMPRESSÃO DE CARNE VEGETAL	24
2.3.1	Proteínas	24
2.3.1.1	Proteína de soja	25
2.3.1.2	Proteína de ervilha	28
2.3.2	Corantes naturais	31
2.3.2.1	Carotenoides	32
2.3.2.2	Betalainas	35
2.3.2.3	Curcuminoides	37
2.3.3	Demais componentes da formulação	39
2.4	ESTADO DA ARTE	40
2.4.1	Impressão 3D de carne vegetal	40
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>43</b>
3.1	MATERIAIS	43
3.2	MÉTODOS	43
3.2.1	Montagem da impressora	44
3.2.2	Determinação dos parâmetros para a formulação da tinta	44
3.2.3	Formulação da tinta para impressão	45
3.2.4	Impressão	47
3.2.5	Maturação e processamento térmico	48
3.2.6	Desempenho da impressão	48
3.2.7	Caracterização das amostras	48
3.2.7.1	Análise colorimétrica	48

3.2.7.2	Composição centesimal, pH e acidez titulável .....	49
3.2.7.3	Preparo dos extratos .....	49
3.2.8	Compostos fenólicos.....	49
3.2.9	Flavonoides totais .....	50
3.2.10	Determinação da atividade antioxidante total pela captura do radical livre ABTS <sup>°+</sup> 50	
3.2.11	Determinação da atividade antioxidante total pelo método de redução do ferro (FRAP).....	50
3.2.12	Determinação da atividade antioxidante total pela captura do radical livre DPPH 51	
3.2.13	Análise estatística.....	51
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>52</b>
4.1	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS E PERFORMANCE DE IMPRESSÃO .....	52
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	55
4.2.1	Análise colorimétrica .....	55
4.2.2	Composição Centesimal, pH e Acidez Titulável.....	60
4.3	DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO BIOATIVA .....	67
4.3.1	Determinação de fenólicos totais .....	68
4.3.2	Determinação de flavonoides totais .....	71
4.4	ATIVIDADE ANTIOXIDANTE .....	72
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a necessidade crescente da preservação dos recursos naturais e disponibilização de alimentos suficientes para a população mundial, surge a necessidade de inovar em produtos e tecnologias para a indústria de alimentos (MALILA et al., 2024). Nos últimos anos houve um aumento na utilização de proteínas vegetais, a fim de complementar a proteína animal na dieta da população. Além disso, o consumo exclusivo de proteína de origem vegetal já é uma realidade para parte da população, nestas inclui-se veganos e alguns vegetarianos. Atualmente, há também o alto consumo de proteínas vegetais para pessoas que buscam uma forma de aumentar a ingestão proteica, como os atletas (ZHAO et al., 2024).

A proteína vegetal pode ser advinda de diversas fontes, entre as principais estão a soja, a ervilha, o feijão e o grão de bico. Destes, a mais comumente utilizada é a proteína de soja, a qual o Brasil é o maior produtor mundial, responsável por 40% da produção de acordo com o Foreign Agricultural Service (2024/2025) (KOHLI e SINGHA, 2024; MONTANHA et al., 2024). A proteína de ervilha (isolado proteico) têm mostrado benefícios, entre eles, a presença de aminoácidos essenciais e boa digestibilidade, sendo uma promissora fonte para alimentos funcionais (VERKEMPINCK et al., 2024).

A impressão tridimensional já é utilizada há muitas décadas por indústrias no ramo de polímeros derivados do petróleo, porém é recente a sua utilização em indústrias alimentícias (MITTAL et al. 2023). A impressão tridimensional de proteínas de origem vegetal, apresenta um produto com características sensoriais muito próximas à carne, reduzindo problemas de viés natural, que vem sendo acelerado com o alto consumo advindo da pecuária, como é o caso da emissão de gás carbônico (REUBEN et al. 2025; RITOTA et al. 2025).

Os avanços recentes na impressão 3D de alimentos evidenciam o uso crescente de corantes naturais como estratégia para personalização da cor, melhoria da aceitação sensorial e atendimento às exigências por ingredientes mais naturais, caracterizando essa aplicação como uma abordagem inovadora no desenvolvimento de alimentos impressos tridimensionalmente (YU et al., 2025).

Outra vantagem da carne vegetal impressa, é que esta pode ser facilmente incluída na dieta de idosos, vegetarianos e flexitarianos, uma vez que as fibras são

fáceis para a mastigação, possibilitando a adaptação da composição ou constituintes da referida porção, como por exemplo o teor lipídico.

As carnes vegetais advindas de impressão tridimensional estão em processo de aceitação. Muitos acreditam que o sabor seja diferente e optam por não comer, outros apostam que esse será o futuro da ingestão proteica. Sendo assim, é um desafio tornar a carne impressa tridimensionalmente comum aos olhos dos consumidores, é essencial também que isto seja, ao longo do tempo, implantado no mercado alimentício e possível de ser facilmente industrializável.

Visto todos os benefícios que a impressão tridimensional tem, é provável que, em pouco tempo, haverá investimentos nesta área, fazendo com que seja mais fácil aumentar a sua disponibilidade. Muitos estudos estão sendo desenvolvidos nesta área e, conseqüentemente, em pouco tempo, espera-se que no Brasil encontre-se carnes impressas a preços aceitáveis para a população e com requisitos sensoriais atendidos.

Enquanto isso, em outros países, como Estados Unidos, Israel e Singapura, já é realidade a comercialização deste tipo de produto. Por exemplo, em Israel há impressos em 3D à base de proteína vegetal a venda no varejo (U\$ 6,50 para 180 g) (STEAKHOLDER FOODS, 2025). Portanto, o atual desafio é desenvolver um produto como este, de forma acessível às pessoas que precisem consumi-lo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um produto à base de proteína vegetal variando a utilização de corantes naturais.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir os parâmetros para impressão do produto à base de proteína de soja e proteína de ervilha;
- Realizar análises do desempenho de impressão com os parâmetros definidos;
- Obter os corantes a serem utilizados na formulação;

- Avaliar a coloração do produto impresso por meio da análise de colorimetria CIElab;
- Avaliar o produto impresso com base nas análises de umidade, cinzas, teor lipídico, teor proteico, açúcares redutores, pH e acidez titulável;
- Avaliar a composição bioativa do produto impresso baseado nas análises de composição fenólica, flavonoides totais e atividade antioxidante (FRAP, ABTS e DPPH).

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 NOVAS TECNOLOGIAS NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

A indústria alimentícia enfrenta diversos desafios, entre eles estão a oferta de produtos seguros e o aumento na população mundial. Isso gera dúvidas, como por exemplo se futuramente haverá alimentos suficientes sem danificar tanto os recursos naturais do planeta (KAKANI et al., 2020).

Historicamente, a Revolução Industrial marcou o surgimento das grandes indústrias e esteve diretamente vinculada ao avanço tecnológico. Cada etapa deste processo foi caracterizada pela intensificação do trabalho, mecanização e pela busca por maior eficiência produtiva, isto é, produzir mais utilizando menos recursos. Ao longo do tempo, as revoluções industriais também impulsionaram o uso da eletricidade, dos sistemas analógicos e digitais, bem como a automatização baseada em dispositivos eletrônicos. Atualmente considera-se como a Indústria 4.0 como a quarta Revolução Industrial, já em fase de implementação no Brasil, a qual se fundamenta em inteligência artificial, inovação tecnológica, atualizações em tempo real e integração de processos por meio de tecnologias digitais (HASSOUN et al., 2022).

A indústria alimentícia compreende todas as atividades relacionadas ao processamento, produção, comercialização e serviço de alimentos, bebidas e suplementos, incluindo também etapas de projeto, construção e manutenção das instalações (AKYAZI et al., 2020). Assim como ocorre em outros setores, as indústrias de alimentos adaptaram-se ao longo das diferentes revoluções industriais para

garantir segurança, eficiência e alta produtividade na oferta de seus produtos (HASSOUN et al., 2022).

No contexto da indústria 4.0, a cadeia produtiva de alimentos vem incorporando tecnologias digitais avançadas, como sensores inteligentes e Internet das Coisas (IoT) para monitoramento em tempo real, inteligência artificial aplicado ao controle de qualidade e à otimização de processos, além de automação integrada a sistemas ciber-físicos e robótica colaborativa, que aumentam a eficiência e a rastreabilidade das operações (HASSOUN et al. 2024; PERES et al. 2025). Entre as novas tecnologias do mercado alimentício, encontram-se as impressoras tridimensionais. Existem várias técnicas de impressão tridimensional, podendo ser por extrusão, sinterização seletiva, jato de encadernação e jato de tinta. Destas, a mais utilizada é a extrusão (BAIANO, 2020). Inserida neste cenário, a impressão tridimensional de alimentos surge como uma inovação promissora, permitindo a personalização de formas, texturas e perfis nutricionais, utilizando diferentes técnicas de manufatura aditiva, entre as quais a extrusão se destaca como a mais empregada, tanto em formulações de alta quanto de baixa umidade (TENG et al. 2022; SINGHAL et al., 2020). Assim, a convergência entre digitalização, automação inteligente e impressão 3D reforça a transição da indústria alimentícia para modelos produtivos mais flexíveis, precisos e sustentáveis.

### 2.1.1 A tecnologia na indústria 4.0 do ramo alimentício

A indústria surgiu na revolução industrial, onde era necessário aprimorar a mão-de-obra de forma a entregar os produtos o mais rápido possível. Hoje em dia a exigência ao produtor é mais alta, forçando a indústria a entregar cada vez mais exigindo menos tempo e mão de obra. Com a necessidade de mecanizar as indústrias, na Alemanha a partir de 2013 foi lançado o programa “Plataforma Indústria 4.0”, que foi relançada em 2015, com o intuito de automatizar sistemas e desenvolver novas tecnologias, otimizando a relação homem *versus* máquina (OLIVEIRA et al. 2023).

Em consonância à indústria 4.0 surgiu a agricultura industrial, uma vez que a agricultura é a fonte da indústria. Aos poucos a agricultura convencional foi substituída por uma agricultura com processamento mecanizado, com produção e distribuição automatizados dominando a agricultura mundial (LIU et al. 2021). Esse modelo tem como objetivo integrar tecnologias da informação e comunicação, com a intenção de

produzir mais, com maior flexibilidade e qualidade e atingir novas estratégias e modelos de negócios (OLIVEIRA, et al. 2023).

As tecnologias associadas à indústria 4.0 estão em ascensão e têm ganhado destaque devido ao seu papel estratégico diante dos desafios ambientais contemporâneos. Embora a quarta revolução industrial tenha como objetivos principais o aumento da produtividade e a redução da demanda por mão de obra, torna-se essencial considerar os impactos ambientais decorrentes dessa transformação digital. Estudos recentes indicam que, quando corretamente implementadas, as tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 possuem potencial para elevar a eficiência produtiva ao mesmo tempo que promovem avanços em sustentabilidade ambiental e desenvolvimento social, reforçando a transição para modelos industriais mais responsáveis e equilibrados (STEFANINI; VIGNALI, 2024).

Por fim, a indústria 4.0 vem sendo pensada e implantada há anos para chegar no resultado que se vê hoje. Um trabalho com fornecedores e mão de obra profissional, que visa entregar produtos de qualidade, levando em consideração atividades sustentáveis e criando um futuro melhor e com mais oportunidades para as novas gerações (OLIVEIRA, et al. 2023; LIU et al. 2021).

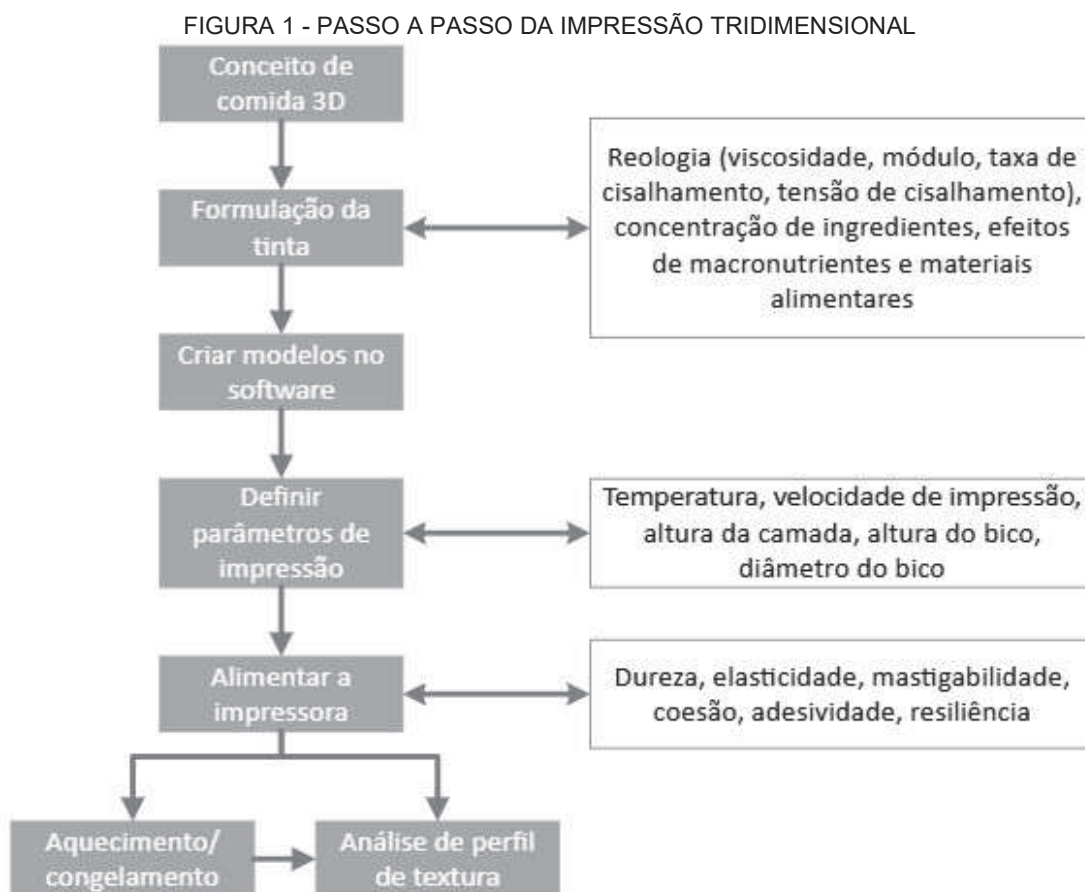
Em meio a esse avanço tecnológico, destaca-se a utilização de impressoras tridimensionais de alimentos, capazes de fabricar porções individualizadas com estrutura, forma e perfil nutricional predefinidos, atendendo às exigências modernas de personalização e eficiência industrial. Estudos atuais indicam que essa tecnologia está sendo direcionada para integração nas fábricas do século XXI, adaptando-se aos padrões de produção em escala, automação e digitalização típicos da indústria alimentícia contemporânea. Assim, a impressão 3D de alimentos representa não apenas uma inovação no design e entrega do produto, mas também um componente emergente do ecossistema da Indústria 4.0, com potencial para transformar a forma como alimentos são concebidos, produzidos e distribuídos (DEROSSI et al., 2024).

### 2.1.2 Impressão tridimensional na indústria alimentícia

O surgimento da impressão em três dimensões é dividido em três fases, sendo de 1981 a 1999, a prototipagem rápida, que foi utilizada na área da engenharia; de 2000 a 2010, a impressão de órgãos com células humanas; e de 2011 até o momento,

onde é capaz de produzir-se essas impressões com melhor custo benefício e maior precisão de impressão (BAIANO, 2020).

A impressão tridimensional alimentícia, FIGURA 1, é emergente e sua função é estruturar alimentos a partir de designs digitais (MA, ZHANG, 2022). Data 1960 por meio de um filme, Star Trek, que reproduz alimentos a partir de um comando. Mas estruturou-se apenas em 2001 quando a Nanotek Instruments Ink fabricou um bolo de aniversário impresso em 3D. A evolução da impressão tridimensional foi: materiais açucarados (2012-2015), esculturas de açúcar (2013), carne *in vitro* (2013), chocolate (2014) e massas (2015) (BAIANO, 2020).



FONTE: Zhang et al. (2021)

A impressão é dividida em quatro etapas principais: 1. Formulação, 2. Design do modelo, 3. Impressão 3D e 4. Pós-Processamento. Na primeira etapa seleciona-se os materiais para utilização, considerando as propriedades de cada alimento e a capacidade de mistura, levando em consideração as reações que podem acontecer durante este processo. Na segunda etapa considera-se a forma exterior e o

preenchimento do modelo, ou seja, exatidão e estabilidade da estrutura. Esta etapa relaciona-se com as propriedades mecânicas do produto. A terceira etapa trata-se da própria impressão, que deve ser analisada conforme a necessidade do alimento a ser impresso, visto que muitas vezes são necessários uma etapa pós impressão para se obter o produto final. E a última etapa é o pós-processamento, que é a entrega do produto pronto (cozer, fritar, secar, entre outros). Estas etapas são importantes, principalmente, para garantir a segurança do alimento, manter padrões microbiológicos, aumentar prazo de validade ou fazer com que o produto seja sensorialmente aceito (TEJADA-ORTIGOZA, CUAN-URQUIZO, 2022).

A impressão tridimensional trata-se de uma deposição camada por camada de materiais, onde há a formação de estruturas complexas. Os produtos alimentícios geralmente utilizam um processo de extrusão. Para produtos complexos como a carne utiliza-se materiais fibrosos extrusados por meio de um bico utilizando seringas ou transportador helicoidal, que é responsável pelo aquecimento do produto, temperatura esta que pode ser controlada. Por este método os materiais são extrusados camada por camada e também é utilizado para pastas semissólidas, massas, chocolates e purês de carne (RAMACHANDRAIAH, 2021). De acordo com as características de impressão, ela pode ser caracterizada por impressões crus sendo chocolate, queijo ou purê, ou não crus sendo carne, vegetais ou frutas (DONG, et al. 2023).

A grande competitividade para a impressão tridimensional no setor alimentício é que, com esta tecnologia, será possível produzir porções de dietas individuais, minimizando os desperdícios e calculando suas calorias exatas, conseqüentemente, controlando a dieta com quantidades e ingredientes selecionados (BAIANO, 2020).

A National Aeronautics and Space Administration (NASA) traz tendências importantes à indústria alimentícia e já é uma realidade a busca pela impressão tridimensional ligada à segurança alimentar para a alimentação de viajantes espaciais (BAIANO, 2020). Além disso, a impressão tridimensional facilita o controle de gorduras, açúcares e sódio no alimento, o que hoje é muito importante no ponto de vista nutricional do consumidor (SHAHBAZI, et al. 2021).

De acordo com Cheng e colaboradores (2024) a impressão 3D é muito exigente quanto às propriedades das matérias-primas, como as propriedades reológicas, que determinam o resultado da impressão. A utilização de hidrocoloides já foi citada na produção de análogos de carne, como Shi e colaboradores (2023) que utilizaram amido de arroz e goma xantana junto à proteína. A utilização de gomas é

comum na indústria alimentícia, pois possuem agente espessante e por consequência, auxiliam na gelificação dos produtos, efeito desejado para a preparação do material a ser alimentado na impressora 3D (CHAO et al., 2024).

## 2.2 CARNE VEGETAL

De acordo com o RIISPOA, carne de açougue corresponde às massas musculares maturadas, acompanhadas ou não de base óssea provenientes de animais abatidos sob inspeção (BRASIL, 2017). Diferente da carne animal, os produtos de origem vegetal podem ser classificados como produtos proteicos de origem não animal, e podem estar entre as classes: extensor de carne, análogos de carne e produtos proteicos completamente novos não associados a carne. Os análogos de carne podem vir de vários materiais, como a proteína de soja, leguminosas, nozes, proteínas de cereais, vegetais e micoproteínas (KUMAR et al., 2016) e podem ser definidos como um “composto estruturalmente semelhante a outro, mas que difere em sua composição”, portanto, estruturalmente semelhante à carne, mas divergente em relação à sua estrutura (MALAV et al., 2015)

Majoritariamente, a carne vegetal é feita a partir de materiais ricos em proteínas e atualmente já se utiliza muitos alimentos proteicos como substituto para a carne convencional. Embora seja estudado há anos sobre a impressão tridimensional de análogos de carnes e a sua viabilidade, a literatura é limitada quando se trata da caracterização destes produtos (WANG et al. 2023). É uma tendência no mercado alimentício, e é previsto que em algum tempo será parte da alimentação mundial. Alguns problemas enfrentados para chegar ao ideal são sua textura e aspecto visual, visto que a fibra é a parte mais complexa de se reproduzir. Existem estudos atuais que são focados em um aumento na capacidade de impressão e dureza com a adição de hidrocoloides ou enzimas, como apontado por Chen e colaboradores (2021) e Wen e colaboradores (2023).

Para que a carne vegetal alcance boa aceitação sensorial, seu aspecto deve remeter à carne tradicional, apresentando fibras, maciez e, após cozimento, uma estrutura que se desfia com facilidade, porém preserva certa firmeza característica. Para atingir essas características, é fundamental compreender tanto a composição e a organização estrutural das carnes convencionais quanto as propriedades dos ingredientes de origem vegetal, de modo a ajustar e modificar suas estruturas para

que se aproximem do comportamento esperado no produto final (CHAO et al. 2024). É necessário que haja gordura e músculo, pois assim a experiência sensorial torna-se completa. Alguns estudos estão sendo desenvolvidos adicionando um meio de diferenciação miogênese-adipogênese afim de misturar músculo e gordura, para posterior adição de hidrogel (JEONG et al. 2024).

Estudos trazem a impressão tridimensional como alternativa viável para a carne vegetal, assim como alguns padrões que estas podem apresentar (WANG et al. 2022). Os análogos de carne absorvem aproximadamente três vezes mais água quando cozidos e tem estrutura estriada semelhante à carne muscular. Quando simulam carne moída podem conter proteína texturizada para obter os atributos sensoriais esperados. Para obter o ponto certo e atingir as texturas esperadas, utiliza-se água, proteína texturizada de soja, glúten de trigo e pode variar, chegando a utilizar claras de ovo, proteína do soro do leite, entre outros (MALAV, et al. 2015).

A avaliação da aparência superficial da carne vegetal é fundamental, uma vez que a apresentação do produto constitui o primeiro atributo percebido pelo consumidor. A conformação fibrosa do análogo cárneo merece atenção especial, pois, além de sabor, odor e cor, a textura exerce influência direta sobre a aceitabilidade. Considera-se, ainda, que o público potencial desses produtos inclui não apenas vegetarianos, veganos e flexitarianos, mas tende a se expandir progressivamente para toda a população (XIA et al. 2023).

### 2.2.1 Impressão tridimensional de análogos de carne

A impressão tridimensional de análogos de carne surgiu como resposta para a alta emissão de gases prejudiciais ao efeito estufa (DONG et al., 2023). Além disso, a quantidade de consumidores veganos, vegetarianos ou flexitarianos têm aumentado. Relatórios de mercado demonstram que o segmento de análogos de carne à base de plantas apresenta elevado potencial de expansão. Estima-se que o mercado global de carnes *plant-based* tenha movimentado cerca de US\$ 7,1 bilhões em 2023, com projeção de alcançar US\$ 24,7 bilhões até 2030, evidenciando uma taxa de crescimento anual composta superior a 15% (Grand View Research, 2024). Esses dados indicam uma demanda crescente por produtos alternativos à carne de origem animal. Por consequência, houve uma diminuição na compra de produtos cárneos e um aumento drástico na compra de produtos de origem vegetal (NEZLEK;

FORESTELL, 2020), portanto, o mercado alimentício deve estar pronto para satisfazer essa necessidade.

Há a opção da impressão tridimensional da carne cultivada. Esta outra tendência no mercado utiliza células de tecidos musculares para recriar estes tecidos e imprimir via impressora 3D (IANOVICI, et al. 2022). O problema neste tipo de impresso é que ainda assim utiliza células de tecido animal, o que não geraria um produto apto para a dieta vegana e vegetariana, pois ainda assim teria problemas de viés natural, bem como o abate do animal. Existem pesquisas iniciais – porém que já estão há anos – que procuram recriar esta cultura por meio laboratorial, evitando que a retirada frequente do soro bovino. Porém, como citado, por mais que as pesquisas já estejam rodando há anos, estão em estágio inicial, e por esta razão, ainda não é utilizado majoritariamente (CHODOWSKA; WÓDZ; WOJCIECHOWSKI, 2022).

O desafio da indústria alimentícia são as características que este alimento pode apresentar. A carne é considerada um alimento complexo e com grande exigência por meio dos consumidores, uma vez que há um padrão sensorial alto para quem a consome (RAMACHANDRAIAH, 2021).

Para a formulação deste produto é necessário material proteico fibroso, para que seja possível imitar o músculo do animal, além de materiais que imitem a gordura animal, como é o caso das gorduras vegetais (RAMACHANDRAIAH, 2021). Huang e colaboradores (2022) apontam em seu estudo que a utilização de bico com diâmetro menor apresenta maior número de camadas e com isso, uma dureza mais baixa. Segundo Wang e colaboradores. (2023) é possível obter um alimento impresso tridimensional com textura modificada eficaz sabendo qual a formulação deste produto e o desempenho da impressão e microestrutura do alimento.

Além dos pontos citados, é importante levar em consideração as bases a serem utilizadas e as proporções, além da força de cisalhamento e bocal para a impressão (WANG et al. 2023). Os materiais utilizados variam de acordo com o alimento que se deseja imprimir. No caso da carne, diferenças na composição — como teor de gordura, fibras e tipo de proteína — influenciam diretamente a textura, o comportamento durante a extrusão e a capacidade de manter a forma após a deposição. Estudos recentes mostram que a printabilidade de matrizes cárneas depende de suas propriedades físico-químicas e da necessidade de ajustes específicos conforme o tipo de carne utilizado (YATMAZ, 2024).

O principal método utilizado para a impressão da carne é a extrusão, que é realizada por meio da extrusão de um material, controlada via programação. Esse caminho é controlado por modelo 3D predefinido, que permite que este material produza forma específica. A estrutura única da carne faz com que haja pré-tratamentos ou aditivos, permitindo a suavização na hora da extrusão do material, tendo bom autossuporte e capacidade de conformação (DONG et al. 2023).

Em seu trabalho, Kumar e colaboradores (2016) apontam que embora muitas empresas já tenham projetos relacionados à impressão tridimensional de carne a base de proteína vegetal, existem lacunas a serem preenchidas que são de total importância para o consumidor, como é o caso da coloração, paladar, sensação na boca e propriedades nutricionais. Wen e colaboradores (2023) trazem que é necessário análises quanto às propriedades físicas e químicas da carne animal para posteriormente reprodução da mesma utilizando bases vegetais.

### 2.2.2 Impressão tridimensional por extrusão

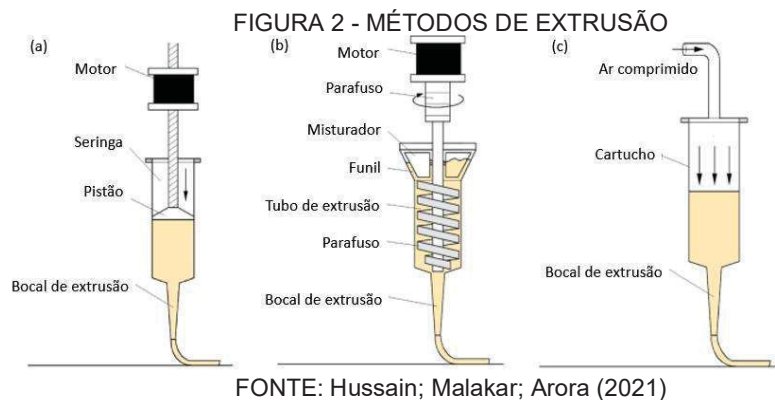
São diversos os métodos que podem ser utilizados para obter carne vegetal. Entre eles estão extrusão com alta umidade, célula de cisalhamento, jato rotativo de imersão, extrusão coaxial em impressora tridimensional e impressora tridimensional (ZHANG, et al. 2021).

A tecnologia da extrusão, também chamada de modelagem por deposição (extrusion-based printing), é atualmente o principal método empregado na impressão tridimensional de alimentos. Nesses sistemas, o material alimentício – geralmente formulado em estado semi-sólido para permitir escoamento controlado – é depositado por meio de um bico extrusor acoplado a um braço mecânico capaz de se mover nas coordenadas X, Y e Z. A extrusão pode ocorrer pelo acionamento de diferentes mecanismos, como pistão hidráulico, compressor de ar ou rosca sem fim, os quais fornecem a pressão necessária para empurrar o material através do bico (NING et al., 2024)

Para que a deposição seja bem-sucedida, a formulação deve apresentar propriedades reológicas adequadas, permitindo que o material flua durante a extrusão, mas recupere a rigidez após a deposição (NIKOLAOU et al., 2025). Em alguns casos, o material é aquecido a temperaturas superiores ao seu ponto de fusão ou transição de modo que se solidifique logo após a extrusão, garantindo a

estabilidade estrutural das camadas. O movimento coordenado do bico nas direções X e Y, combinado ao deslocamento vertical da plataforma no eixo Z, possibilita a construção camada a camada do objeto planejado (NING et al. 2024). Todo esse processo é orientado por um software de fatiamento que converte o modelo digital em instruções precisas, determinando velocidade, taxa de extrusão, espessura das camadas e trajetória do bico, assegurando que a geometria projetada seja fielmente reproduzida (OUTREKIN et al. 2023).

Geralmente utiliza-se três formas para a alimentação da impressora, podendo ser extrusão com base em rosca sem fim, extrusão com base em seringa e extrusão com base em pressão de ar (FIGURA 2) (HUSSAIN; MALAKAR; ARORA, 2021; WANG et al. 2022).



No caso da extrusão com base em rosca sem fim, há uma mistura separada dos ingredientes e após o processo alimenta-se o cartucho. Por meio de um tubo com rosca sem fim eles são movidos e passam pelo bocal. Materiais com viscosidade alta e géis, não são adequados para este tipo de extrusão, pois ocorrerá a compressão, deformação, resultante em uma resolução baixa do material impresso (HUSSAIN; MALAKAR; ARORA, 2021; WANG et al. 2021).

Em relação à extrusão com seringa, o material já misturado é depositado em um tubo estilo seringa, em que há a presença de um êmbolo em seu interior. O motor será ligado a esse êmbolo que fará com que ocorra um movimento linear, impulsionando o material a passar pelo bocal. Os materiais mais indicados para este tipo de extrusão são semi-sólidos, como é o caso de massas e chocolates (HUSSAIN; MALAKAR; ARORA, 2021).

Já para o processo de extrusão para pressão de ar, há a produção desta pressão por um compressor e os materiais são armazenados no interior de um tubo.

Estes materiais são empurrados por meio de força do ar comprimido e passam pelo bocal, efetivando a impressão (HUSSAIN; MALAKAR; ARORA, 2021).

Os tipos de impressoras citadas dependem do material de alimentação, com viscosidade adequada. O desempenho dessa impressão dependerá majoritariamente de materiais maleáveis com propriedades reológicas estudadas. Na indústria alimentícia são classificadas quanto à temperatura, podendo ser extrusão à temperatura ambiente, extrusão de fusão a quente e extrusão de formação de hidrogel (HUSSAIN; MALAKAR; ARORA, 2021; WANG et al. 2022).

As vantagens deste método incluem a escolha dos materiais a serem impressos, a simplicidade de utilização, automação do processo de preparação de alimentos, melhoria da eficiência do processo de produção e da qualidade estética e nutricional final dos alimentos, baixo custo de manutenção, poucos resíduos, personalização de forma e dimensão e possibilidade de uso de ingredientes alternativos e novos. Já em relação às desvantagens, a impressão tridimensional pelo método de extrusão apresenta poucas escolhas de materiais e, às vezes, o tempo para fabricação é extenso, além de sua inadequação para a fabricação de estruturas complexas (BAIANO, 2020; MALAGHINI, et al. 2022).

No método de impressão por extrusão, existem cuidados a serem tomados, como é o caso da velocidade. Estudos apontam que quando a impressão é feita em uma velocidade muito baixa, há possibilidade de que a pasta (a 'tinta') se acumule no bocal e forme linhas não precisas (ZHENG; ZHANG; LIU, 2021).

Um ponto muito importante na elaboração da tinta para a impressão é a sua composição. Isso variará de acordo com a sua base e objetivo de impressão, podendo ser uma proteína (geralmente de origem vegetal) ou amido (ZHENG; ZHANG; LIU, 2021).

## 2.3 MATÉRIAS-PRIMAS PARA IMPRESSÃO DE CARNE VEGETAL

### 2.3.1 Proteínas

As proteínas são polímeros complexos formados de aminoácidos, os quais são moléculas constituídas por um carbono central ligado a quatro grupos químicos fundamentais: um grupo amino ( $-NH_2$ ), um grupo carboxila ( $-COOH$ ), um átomo de

hidrogênio e uma cadeia lateral variável (grupo R) responsável pelas diferenças estruturais e funcionais entre os aminoácidos (NELSON; COX; 2021).

As proteínas vegetais possuem uma estrutura molecular e supramolecular que exerce influência direta sobre suas propriedades técnico-funcionais em alimentos, como solubilidade, emulsificação, gelificação e reticulação. A estrutura primária – a sequência de aminoácidos com grupos amina e carboxila ligados ao carbono  $\alpha$  e à cadeia lateral variável — define os grupos químicos disponíveis para interações iônicas, de hidrogênio e hidrofóbicas. Em um nível mais alto, a conformação secundária (hélices  $\alpha$ , folhas  $\beta$ ) e a disposição terciária/quaternária determinam a exposição de sítios de ligação, a capacidade de formar agregados e redes tridimensionais, e a resposta a tratamentos térmicos ou mecânicos. No caso das proteínas de origem vegetal, fatores como a alta proporção de resíduos de prolina, lisina ou outros grupos hidrofóbicos, e a presença de domínio desordenado (IDRs) alteram a compactação da molécula e favorecem agregação ou gelificação sob processo controlado. A funcionalização dessas proteínas — por meio de extrusão, aquecimento, hidratação ou modificação enzimática — promove reorganizações estruturais, rompendo ou formando pontes de dissulfeto e complexos hidrofóbicos, o que resulta em texturas fibrosas ou elásticas em análogos de carne vegetal. Estudos recentes mostram que tais modificações estruturais são essenciais para alcançar formatos e funcionalidades equivalentes à carne tradicional (KIM, 2024) e que a relação entre estrutura e funcionalidade está sendo sistematicamente investigada para proteínas vegetais isoladas e processadas (LI et al., 2025).

E por fim, é necessário observar quais proteínas serão utilizadas de acordo com as suas propriedades e a oferta da mesma, verificando a viabilidade. Entre as proteínas, encontra-se comumente utilizadas como é o caso da proteína de soja e as que estão em ascensão como é o caso da proteína de ervilha (QIN et al. 2022; SHANTHAKUMAR et al. 2022).

#### 2.3.1.1 Proteína de soja

No Brasil, a produção de proteína de soja está majoritariamente concentrada nos estados de Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul, respectivamente, segundo a CONAB (2024/2025). No ranking mundial, o Brasil está entre os 3 maiores produtores, perdendo apenas para os Estados Unidos. Em 2023 a produção foi de

160,3 milhões de toneladas, sendo que 101,9 milhões foram para exportação (ABIOVE, 2023). A composição da soja varia em relação aos grãos, plantação, temperatura, período de chuva, entre outros, e seu teor de nutrientes pode conter até 40% de proteína, 15-20% de gordura, 30% de carboidratos e 10-30% de umidade, sendo também rico em fibras, ferro, cálcio, zinco e vitaminas. Após a obtenção do isolado proteico de soja, que consiste na remoção do óleo a uma baixa temperatura, pode-se realizar a separação da proteína por solubilização e precipitação, que remove parcialmente o carboidrato, e chegar a um teor proteico de 90% (ZHENG et al., 2022).

Alguns problemas no processamento em escala da soja são justamente as divergências que o grão pode trazer quando cultivados em locais muito distintos, principalmente do ponto de vista nutricional. Isto pode gerar ajustes nos parâmetros, reformulação de produtos e esporadicamente afetar a qualidade do produto (MEDIC et al. 2014).

A soja é utilizada para diversos fins na indústria alimentícia, como para o óleo, leite, tofu, farinhas e até mesmo para rações. Atualmente têm atraído a atenção por ser fonte de proteína vegetal, com baixo custo e alta qualidade (MALAV et al., 2015). Por ser fonte proteica atrai o olhar de atletas e empresas que tenham apelo saudável, uma melhor qualidade de vida e aumento no desempenho de exercícios (SANTOS et al., 2018). Por conta dos desenvolvimentos tecnológicos, a produção de proteínas vegetais vem aumentando. Dos subprodutos presentes no mercado alimentício hoje tem-se o leite de soja e o óleo de soja (QIN et al., 2022).

A proteína da soja, FIGURA 3, tem qualidade próxima às proteínas da carne, do leite e ovos. Das proteínas vegetais, a proteína de soja é considerada como sendo a que possui mais alto valor biológico. Ela possui alto teor de aminoácidos exógenos, como leucina (8 g/100 g), lisina (6,5 g/100 g), valina (5 g/100 g), isoleucina (5 g/100 g), a fenilalanina (4 g/100 g), além de metionina, treonina e triptofano em quantidades inferiores (KUDELKA et al. 2021). As proteínas da soja podem ser agrupadas como albuminas solúveis em água ou globulinas solúveis em solução salina. A glicinina, subgrupo da globulina, compõe aproximadamente 30% da proteína presente nos grãos de soja, dos subgrupos presentes, é a encontrada em maior quantidade (SUI et al., 2021).

FIGURA 3 - PROTEÍNA DE SOJA (PTS)



FONTE: A autora (2024).

A proteína de soja tem sido largamente utilizada em produtos análogos à carne e até mesmo à produção de carne vegetal. Isto porque possui boas propriedades de gelificação, valor nutricional alto e baixo custo de obtenção. Uma das alternativas já existentes é o tofu, amplamente consumido na Ásia (ZHANG et al., 2021).

A proteína de soja, muito utilizada para substituir a carne na dieta vegetariana possui processamentos próprios para ter mais atrativos sensoriais, como é o caso da extrusão, cozimento, fermentação, concentração para proteínas isoladas e outros (QIN et al., 2022). Dos métodos de processamento deve-se evitar o superaquecimento, pois isto pode causar a desnaturação de proteínas. Já em relação aos processamentos térmicos, tem-se cozimento, irradiação e autoclave (PI et al., 2021).

A população opta pela sua utilização quando se trata de análogos de carne, isto por conta da sua propriedade gelificante, fibrosa e estrutural. Além disso possui outras propriedades interessantes, como é o caso da formação de espuma, emulsificação, capacidade de aumentar a viscosidade e absorção de água. O problema ao utilizar a proteína de soja é que ela apresenta um sabor marcante, em que normalmente faz-se a mescla para poder amenizar esse sabor (LEE; CHOI; HAN, 2022).

A proteína de soja é muito utilizada na indústria alimentícia. Parcialmente por aumentar o teor proteico e parcialmente por proporcionar propriedades interessantes aos alimentos, como já citado anteriormente. A mais utilizada destas propriedades é a formação de gel, pois atua no fornecimento de uma matriz estrutural que retém água, gordura, aromas, açúcares e ingredientes. Esses géis são utilizados em diversos produtos, como hambúrgueres, salsichas, nuggets, almôndegas e atualmente como análogos à carne (LI et al.; 2020).

Em relação à produção do concentrado e isolado de proteína de soja, geralmente utiliza-se combinações de técnicas de processamento secas (para a moagem e descasque) e úmidas (para lavagem e precipitação). Algumas dificuldades na utilização da proteína de soja são a baixa solubilidade e fatores externos como a temperatura, pH e ponto isoelétrico (O'FLYNN et al., 2021).

#### 2.3.1.2 Proteína de ervilha

A ervilha (*Pisum sativum* L.) é cultivada globalmente e, na última década, sua produção aumentou consideravelmente. A produção mundial de ervilha seca foi estimada em aproximadamente 14,16 milhões de toneladas em 2022 (GRDC, 2025). A área colhida global desse cultivo situou-se em torno de alguns milhões de hectares (dados globais de área específicos para 2022 variam entre fontes). A ervilha conhecida como 'forrageira' é muito procurada para a produção de proteína vegetal e assim utilizar como análogo à proteína animal (DABA; MORRIS, 2021). É conhecida como fonte primária de componentes nutricionais, podendo enriquecer os produtos com proteínas, amido ou fibras (LU et al., 2019).

Existem fatores que influenciam estrutura e características funcionais das ervilhas e, por consequência, alteram a sua composição. Entre esses fatores, pode-se citar a variedade das ervilhas, os métodos de extração e métodos de modificação. Alguns métodos que tem grande influência são a extração alcalina e a ultrafiltração (SUN et al., 2023). O processo de melhoramento no cultivo de ervilhas está sempre em estudo. Do ponto de vista agrônomo, fatores como a segurança do rendimento máximo, a estabilidade da planta, a porcentagem das sementes e o rendimento proteico são fatores muito importantes a serem considerados. Além disso, quando se trata do cultivo para processamento industrial, é importante considerar também teor proteico, funcionalidade, cor, sabor e odor, que muda consideravelmente de acordo com o cultivar, ano da colheita e condições de beneficiamento (ARTEAGA et al., 2021).

Dentre as vantagens do cultivo das ervilhas pode-se citar a fácil colheita com recursos maquinários e a cultura valiosa na rotação dominada por cereais, como é o caso de aveia e cevada. Entre as leguminosas, a ervilha é uma das mais importantes por conta da sua utilização, que pode ir para o campo da proteína ou do amido, além de desempenhar papel de fertilidade em solos não tão ricos, isto devido à sua

capacidade de fixar o azoto atmosférico. Em relação ao milho, à batata e ao trigo, possui um custo muito baixo quando considerando utilizá-la como amido, porém somente para aplicações industriais, pois seu amido não é funcional (KESKIN et al., 2021). Há variabilidade quanto à qualidade da proteína de ervilha, isso influenciará no seu valor nutricional e propriedades funcionais. A qualidade é dada de acordo com fatores genéticos, condições ambientais de crescimento e condições de processamento (DABA; MORRIS, 2021).

A proteína de ervilha, FIGURA 4, classificada como *pulse* por ser derivada de leguminosas secas, tem se destacado nos últimos anos como uma alternativa proteica vegetal de elevado valor nutricional. Estudos recentes indicam que essa proteína apresenta bom perfil de aminoácidos essenciais, alta digestibilidade e baixo potencial alergênico, características que favorecem sua aplicação em alimentos plant-based e produtos funcionais (NOSWORTHY et al., 2024). Além disso, pesquisas apontam que os *pulses* contribuem não apenas como fonte proteica, mas também como fornecedores de fibras, minerais e compostos bioativos, ampliando os benefícios nutricionais dos alimentos nos quais são incorporados (BOYE; ARCAND; LAGACE, 2025). Esses atributos, aliados à menor demanda ambiental da produção de ervilha em comparação às proteínas de origem animal, reforçam seu papel estratégico no desenvolvimento de sistemas alimentares mais sustentáveis.

FIGURA 4 - PROTEÍNA DE ERVILHA (PTE)



FONTE: A autora (2024).

A proteína de ervilha, FIGURA 4, demorou a ser utilizada como um análogo à carne convencional, por esta razão é considerada uma fonte atual de proteína vegetal. Por possuir baixo custo, boa disponibilidade e benefícios à saúde, vem despertando o interesse na indústria alimentícia. Existem estudos que destacam o uso da proteína de ervilha para evitar doenças cardiovasculares, anti-inflamatórios, anti-hipertensivos e principalmente hipoalergênicos (SHANTHAKUMAR et al., 2022).

A extração deste produto pode acontecer por meio de três métodos, sendo: extração alcalina (precipitação isoelétrica baseada na dissolução da proteína em meio alcalino), extração de sal (por diálise) e precipitação micelar (a proteína é extraída em solução salina neutra). O processo varia conforme o nível de pureza desejado e o tipo de fração proteica a ser obtida. Globulinas e albuminas, por exemplo, podem exigir métodos distintos, que podem ser conduzidos em meio alcalino ou ácido, dependendo de qual fração se pretende extrair em maior quantidade (TANGER; ENGEL; KULOZIK, 2020; SHEN; HONG; LI, 2022). Em relação à sua classificação quanto ao conteúdo proteico, podem ser separadas em quatro grupos, sendo: globulinas, contém 60 a 70% do conteúdo proteico, albuminas, contém 15 a 20% do conteúdo proteico, prolaminas e glutelinas que possuem quantidade mínima (WONGPRASERT et al., 2024). A proteína de ervilha (PTE) apresenta elevados teores de lisina, arginina e de aminoácidos de cadeia ramificada — como leucina, isoleucina e valina — além de teores expressivos de ácido glutâmico e ácido aspártico, o que a torna uma fonte relevante de aminoácidos essenciais, especialmente para dietas baseadas em vegetais (PLOCINA et al., 2024; ALINAQUI et al., 2025).

Em relação ao aspecto nutricional, as proteínas da ervilha possuem níveis mais elevados de triptofano de que cereais, além de conter menos inibidores de tripsina de que a soja. Ainda em relação à proteína de soja, a proteína de ervilha pode substituir a mesma desde que mantenha suas propriedades funcionais. Ainda assim, há uma falha na literatura quanto à comparação de condições idênticas (ZHAO et al., 2020). O concentrado da proteína de ervilha pode atingir 50-75% em sua composição, já o isolado pode passar de 80% em sua composição (BOUKID; ROSELL; CASTELLARI, 2021).

A funcionalidade das proteínas é derivada do processo de germinação, que pode melhorar ou não o valor nutricional da proteína de ervilha. Com isso pode-se atenuar os fatores anti-nutricionais e deixar sabor marcante nas proteínas de armazenamento das sementes, isto por conta das enzimas hidrolíticas ativadas durante a sua germinação (BOUKID; ROSELL; CASTELLARI, 2021). Setia e colaboradores (2019), por exemplo, verificaram que a germinação até 5 dias fez com que o valor nutricional e propriedades funcionais aumentassem. Estudos apontam que a germinação acima de um dia aumentou odores parecidos com o do feijão. Por esta razão é necessário atentar-se ao que se espera neste processo e adequar as tecnologias.

Estima-se que o mercado global de proteína de ervilha tenha apresentado crescimento expressivo nos últimos anos, impulsionado pela expansão do consumo de alimentos plant-based, pela busca por fontes proteicas sustentáveis e pelo avanço tecnológico no processamento de proteínas vegetais. Projeções recentes indicam que, em 2025, a receita desse mercado deverá atingir aproximadamente US\$ 2,2 bilhões, consolidando a proteína de ervilha como um dos principais ingredientes do setor de proteínas alternativas, com ampla aplicação em carnes vegetais, bebidas, produtos de panificação e nutrição esportiva (GRAND VIEW RESEARCH, 2024).

### 2.3.2 Corantes naturais

A coloração dos alimentos é o primeiro aspecto observado para que haja a compra de um produto. Posteriormente considera-se aroma, sabor e textura. Por esta razão é que se utilizam corantes, afim de intensificar as cores ou até mesmo padronizar a cor de um produto, podendo trazer de volta a aparência original do mesmo. A aparência pode ter sido deturpada durante o processamento se não houver os cuidados necessários, ou a posteriori, durante o armazenamento, embalagem ou distribuição (SANTOS et al., 2021).

Nas indústrias alimentícias, existem duas classificações para os corantes utilizados, podendo ser naturais ou sintéticos. Os corantes sintéticos são obtidos por meio de uma síntese química, já os corantes naturais são obtidos por meio de matrizes de plantas e vegetais (SANTOS et al., 2022).

Os corantes sintéticos possuem muitas vantagens, como a boa estabilidade, o baixo custo de processamento e um melhor rendimento. Porém, atualmente, a busca é alta por produtos que tragam benefícios à saúde, e neste caso, opta-se pela utilização de corantes naturais (SANTOS et al., 2022).

Os corantes naturais são amplamente utilizados, em grande parte na indústria alimentícia, para modificar ou preservar a coloração/aparência dos alimentos. Hoje são utilizados em panificação, bebidas ou sistemas monofásicos. Destes, os mais utilizados são carotenoides (urucum, cenoura, páprica), betalaínas (beterraba), curcuminoides de açafrão (cúrcuma) e outros, como antocianinas (casca de uva, suco de frutas vermelhas), clorofilas de alfafa (*Medicago sativa*), ácido carmínico do extrato de cochonilha (*Dactylopius coccus*) e caramelo do aquecimento de açúcares. Dos

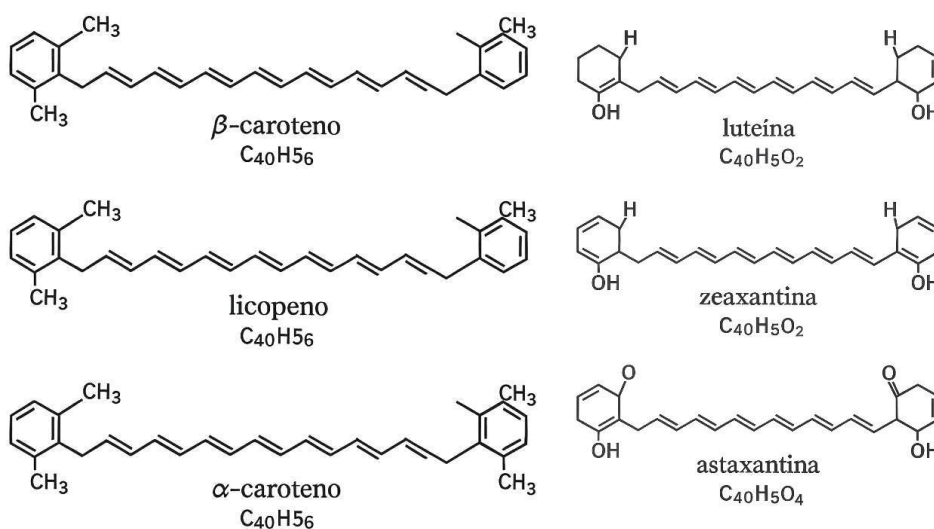
corantes apresentados, destaca-se os carotenoides, as betalaínas e os curcuminoides (ROSSI et al., 2021).

No Brasil, os corantes são regulamentados pelo órgão da saúde, a ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária), e existem limites críticos que devem ser respeitados, até mesmo para os corantes naturais. Estes limites são considerados a partir de pesquisas internacionais e por meio de padrões do Mercosul (bloco econômico em que o Brasil faz parte) e também a partir de pesquisas toxicológicas, afim de garantir a saúde das pessoas que ingerirem o produto (PENNA et al., 2021).

### 2.3.2.1 Carotenoides

Os carotenoides tem sua produção em 100 milhões de toneladas por ano. Desempenham funções importantes no organismo e são precursores de vitamina A. Possuem dois grupos estruturais, sendo eles os hidrocarbonetos e as xantofilas oxigenadas, FIGURA 5 (DAMODARAN et al., 2010).

FIGURA 5 - ESTRUTURA QUÍMICA DOS HIDROCARBONETOS E XANTOFILAS OXIGENADAS DOS CAROTENOIDES



FONTE: A autora (2025).

O carotenoide que possui a ocorrência mais comum é o beta caroteno, porém existem outros comumente encontrados nos alimentos, como é o caso do alfa caroteno, capsantina, bixina e astaxantina (DAMODARAN et al., 2010).

Algumas das principais aplicações dos carotenoides são produtos cárneos, óleos vegetais e manteiga. Possui uma ingestão máxima diária apresentada na TABELA 1 (ROSSI et al., 2021).

TABELA 1 - INGESTÃO MÁXIMA DIÁRIA DE CAROTENOIDES

Ingestão máxima diária	
Beta-caroteno	< 15 mg/ kg de peso corporal / dia
Bixina	6 mg/ kg de peso corporal / dia
Luteína	1 mg/ kg de peso corporal / dia
Zeaxantina	0,75 mg/ kg de peso corporal / dia
Licopeno	0,5 mg/ kg de peso corporal / dia
Norbixina	0,4 mg/ kg de peso corporal / dia

FONTE: ROSSI et al. (2021).

O urucum (*Bixa orellana*), FIGURA 6, é muito cultivado no Brasil e por essa razão, possui um baixo custo. Além disso, apresenta também baixa toxicidade e apresenta uma coloração atrativa. Sua comercialização é feita em grãos moídos dos corantes denominados bixina, norbixina e norbixato. Muito utilizado como condimento, está presente na maioria das casas brasileiras. O mercado deste produto corresponde à aproximadamente 90% do total do consumo de corantes naturais no Brasil, quando em relação ao mundo pode atingir 70% (FABRI; TERAMOTO, 2015).

FIGURA 6 – URUCUM SEMENTE E URUCUM MOÍDO



FONTE: A autora (2024).

O Brasil mantém-se como o maior produtor mundial de urucum, sendo responsável por aproximadamente 13,6 mil toneladas das cerca de 17 mil toneladas produzidas na América Latina (IBGE, 2020). Quando o fruto atinge a maturidade, suas

sementes apresentam coloração amarelo-avermelhado em razão da elevada concentração de carotenoides, especialmente a bixina e norbixina, que são os principais pigmentos característicos do urucum. Estudos recentes confirmam a predominância desses compostos e destacam sua relevância tanto para a coloração natural quanto para aplicações tecnológicas e funcionais (OLIVEIRA et al., 2021).

Em termos de legislação, é regulamentado o uso do urucum e seus derivados. Atualmente, o foco da utilização do urucum é como ativo antioxidante (GARCIA et al., 2012). Encontra-se atividade antioxidante tanto na semente quanto em suas folhas, levando à utilização como corante natural e subutilização como inibidor da oxidação dos alimentos (MOREIRA et al., 2014).

Uma das mais promissoras fontes de corante natural, o urucum é obtido de uma porção resinosa das sementes da *Bixa orellana*. É uma espécie considerada tropical e por essa razão é mais encontrada na América Latina. Além da sua utilização na indústria farmacêutica e alimentícia, também é utilizada para cosméticos e tinturaria. Dos interesses, o potencial é a indústria alimentícia, onde os estudos estão centrados em encontrar técnicas de extração mais eficientes, embora atualmente possua custo acessível e boa biodisponibilidade (HIRKO; GETU, 2022).

A cenoura, *Daucus carota*, pertencente à família Apiaceae, é um vegetal amplamente cultivado em diversas regiões do mundo. Entre suas variedades, a cenoura de coloração laranja destaca-se pelo elevado teor de carotenoides e pela expressiva capacidade antioxidante, sendo o  $\alpha$ -caroteno, o  $\beta$ -caroteno e a vitamina E seus principais compostos bioativos. Pesquisas recentes confirmam o potencial funcional da cenoura, especialmente pela sua ação antioxidante e seus efeitos benéficos associados à prevenção de doenças crônicas (MOTEGAONKAR et al., 2024; CHOI et al., 2025).

Os carotenoides da planta tendem a aumentar na medida em que amadurecem para as cultivares amarelas e laranjas. A alta biodisponibilidade dos carotenoides da cenoura é um fator relevante dentro das pesquisas e oferece quantidade considerável de vitamina A. Além de apresentar boa concentração de flavonoides, através da quercetina e luteolina (VARSHNEY; MISHRA, 2022).

A utilização da cenoura como corante natural decorre do crescente interesse dos consumidores por ingredientes mais saudáveis nos alimentos que consomem. Devido ao seu elevado teor de carotenoides, a cenoura representa uma opção viável e economicamente acessível, proporcionando não apenas coloração, mas benefícios

associados aos compostos presentes em sua matriz, como antioxidantes, flavonoides e outros fitoquímicos (HUSENOVICH et al., 2021).

A páprica, FIGURA 7, (*Capsicum annum*, L.)  um fruto conhecido e cultivado mundialmente por seu perfil nutricional interessante. Possui compostos fitoquímicos benéficos  saúde, como carotenoides, compostos fenólicos (incluindo flavonoides) e antioxidantes (FERRANDO et al., 2024).

FIGURA 7 - PÁPRICA MOÍDA COMERCIAL



FONTE: A autora (2025).

Ela possui carotenoides em sua composição, como a capsantina, zeaxantina e  $\beta$ -caroteno (OH, et al. 2024). Além da utilização como tempero, a páprica também  empregada como corante natural, conferindo coloração vermelha característica aos alimentos. Além disso, apresenta bom teor de micronutrientes e compostos bioativos, incluindo carotenoides, fenólicos e flavonoides, conforme estudos recentes em frutos de *Capsicum annum* (KOLAŠINAC et al., 2025).

A intensidade da coloração deste pigmento está diretamente relacionada  sua composição carotenidica, sendo o  $\beta$ -caroteno, precursor da vitamina A, considerado um corante natural de alta qualidade. O  $\beta$ -caroteno, além de seu papel vitamínico, demonstra potencial na modulação do metabolismo lipídico e na redução do risco de doenças, embora sua elevada lipofilia e baixa solubilidade em água representem desafios para sua aplicação direta em matrizes aquosas (MOSTAFA; HASHEM, 2024; SERETI et al., 2025).

#### 2.3.2.2 Betalaínas

As betalaínas são pigmentos que estão em cerca de 17 famílias de plantas, sua ordem é a Caryophyllales. São divididas em duas subclasses: betacianinas que tem a coloração vermelho-violeta e betaxantinas com coloração amarelo-alaranjado (SADOWSKA-BARTOSZ; BARTOSZ, 2021). São pigmentos solúveis em água e possuem propriedades anti-inflamatórias e efeitos antimicrobianos (MADADI et al., 2020).

São utilizadas como corantes devido às suas cores e consistência em pH 3,0 a pH 7,0. Possui propriedades antioxidantes e antimicrobianas, levantando grande interesse da indústria alimentícia, principalmente em aplicações colorimétricas inteligentes, visto que é de natureza não tóxica e apresenta características halocromáticas (ABEDI-FIROOZJAH et al., 2023).

As dificuldades encontradas na utilização de betalaínas, visto os tantos efeitos benéficos que ela pode apresentar, são as suas instabilidades frente a fatores externos, como condições de armazenamento, degradação em temperaturas elevadas, gases e iluminação (ABEDI-FIROOZJAH et al., 2023).

A raiz de beterraba é uma fonte significativa de pigmentos do grupo das betalaínas, compostos solúveis em água e contendo nitrogênio. Estudos recentes mostram que, após extração, essas betalaínas demonstram não apenas bom potencial como corantes naturais, mas também propriedades benéficas à saúde – como atividades antioxidantes, anti-inflamatórias e metabólicas – o que motivou grande interesse para aplicação em alimentos funcionais (MARTINEZ et al., 2024).

Nos últimos anos o interesse pela beterraba tem aumentado consideravelmente. Isto porque a beterraba apresenta propriedades benéficas à saúde, como compostos bioativos. Tem sido muito utilizada como alimento funcional e despertado olhares na indústria alimentícia e na área da saúde (FU et al., 2020). Na área alimentícia é utilizada comumente como um corante natural, pois apresenta coloração vermelha-arroxeadada forte, trazendo cores vibrantes para os alimentos ao qual é acrescentado (AKAN et al., 2021).

A beterraba, FIGURA 9, contém betalaínas, pigmentos bioativos que exibem potentes atividades antioxidantes, anti-inflamatória e imunomodulatória, além de efeitos promissores na prevenção de processos tumorais (MARTINEZ et al., 2024). Em particular, compostos presentes na beterraba – como betalainas e nitratos dietéticos – podem melhorar a função vascular: os nitratos são convertidos no organismo em óxido nítrico (NO), que promove vasodilatação, reduz a resistência

periférica e melhora o fluxo sanguíneo, favorecendo o fornecimento de oxigênio e nutrientes aos tecidos (APTE et al., 2024). Ensaio clínicos e revisões recentes também mostram que o consumo de suco ou suplementos de beterraba pode reduzir a pressão arterial sistólica em curto a médio prazo, corroborando seu potencial para beneficiar a circulação sistêmica, sobretudo em indivíduos com risco cardiovascular (GRÖNROOS et al., 2024).

FIGURA 8 - BETERRABA



Fonte: A autora (2024)

Assim como qualquer alimento, além dos benefícios apresentados, pode trazer alguns danos à saúde quando o consumo é excessivo, como é o caso do aumento dos nitratos na corrente sanguínea (ZAMANI et al., 2020). Já em relação à utilização deste alimento na indústria alimentícia, como as betalaínas possuem certa instabilidade, possuem potencial de degradação muito alto, devendo ser escolhidos tratamentos pouco intensos para a sua manutenção (AKAN et al., 2021).

A beterraba contém substâncias classificadas como biologicamente ativas, além de betalaínas, carotenoides e fenóis, contém também vitaminas B (B1, B2, B3, B6 e B12). Todas as suas partes podem ser aproveitadas e são estudadas pelos tantos efeitos benéficos que se conhece. Além disso, também inibe a peroxidação lipídica e apresenta efeitos quimiopreventivos (CECLU; NISTOR, 2020).

### 2.3.2.3 Curcuminoides

O curcuminóide é obtido da *Curcuma longa* e é considerado uma cetona natural. Suas primeiras utilizações documentadas foram na Índia 2.000 a.C., e nas últimas décadas surgiu grande interesse neste condimento, uma vez que possui

atividades biológicas as quais são advindas dos grupos funcionais presentes em sua estrutura (TAVARES et al., 2022).

Possui efeito anti-inflamatório e antidepressivo, além de auxiliar no sistema respiratório, sistema reprodutor, sistema digestório e sistema nervoso central. Dos curcuminoides, a curcumina está presente de 60 a 70% na composição. São consideradas as principais responsáveis pelo bom funcionamento das plantas (PASCHOAL et al., 2021).

A cúrcuma contém alto teor de curcuminoides e por essa razão apresenta benefícios, como auxílio à digestão, controle do diabetes e melhora no sistema imunológico, atividades que podem ser atraentes para a indústria alimentícia e para a área da saúde. Estudos mostram que o uso deste composto pode reduzir o risco de doenças cardiovasculares e diabetes, assim como ajudar a gerir as doenças. Além disso, é um ótimo pigmento para se utilizar como corante natural, pois traz efeitos que dificultam a oxidação dos alimentos (MUNEKATA et al., 2021).

A cúrcuma, FIGURA 10, é advinda do sudeste asiático e foi durante séculos utilizada na cozinha asiática e como remédio natural, tratando inflamação, dores, cicatrização de feridas e trato digestório. Portanto, desempenha papel importante e de grande relevância na saúde humana (SINGLETERY, 2020 e MATA et al., 2020).

FIGURA 9 - CÚRCUMA



Fonte: A autora (2024).

Sua constituição é por três curcuminoides, sendo eles: a curcumina (70-80%), demetoxicurcumina (18-20%) e bisdemetoxicurcumina (2-10%). Como observado, a curcumina é o principal constituinte e é responsável por suas ações biológicas e propriedades anti-inflamatórias (MATA et al., 2020). Apresenta também ação moderada para a digestão e recentemente descobriu-se uma alta ação antibacteriana contra a bactéria *Staphylococcus aureus* (BAJRANG, 2022).

É muito utilizado como suplemento alimentar e corante natural, que por sua vez apresenta uma forte coloração amarelo-alaranjado. Possui propriedades hidrofóbicas e ligeiramente hidrofílicas, dificultando seu contato direto com a água. É necessário cuidado ao manusear a curcumina, pois assim como outros compostos que apresentam inibição à oxidação, possui rápida degradação (ELTOUM et al., 2020).

A curcumina é a mais estudada do seu grupo, parte por ser um corante natural com propriedades benéficas à saúde e parte por ser fonte de um óleo essencial responsável por efeitos biológicos, como potencializar a ação no intestino (ROLFE et al., 2020).

### 2.3.3 Demais componentes da formulação

A formulação da carne vegetal impressa em 3D foi estruturada considerando uma combinação de fibras e hidrocoloides, afim de apresentar boa capacidade de retenção de água e estabilidade durante a extrusão.

O *psyllium*, obtido a partir das sementes de *Plantago ovata* (família Plantaginaceae), é amplamente reconhecido como uma fonte rica de fibra solúvel, caracterizando-se por sua elevada capacidade de formar gel em meio aquoso. Essa propriedade funcional favorece a retenção de umidade e contribui para a coesão estrutural de matrizes alimentares, especialmente em sistemas ricos em proteínas, conforme demonstrado em aplicações tecnológicas recentes (NOGUEROL et al., 2022). Durante a hidratação, suas arabinosilanas formam rede hidrocoloidal para auxiliar na manutenção e integridade do produto durante a impressão, além da redução de perdas por cocção. Sua capacidade funcional de gelificação é devido a ligações dissulfeto – principais ligações covalentes, e a retenção de água, por conta do aumento das ligações hidrofóbicas. A utilização deste aditivo promove o desdobramento da estrutura proteica, fazendo com que aminoácidos sulfidríla e hidrofóbicos fiquem expostos a ambiente polar (CHENG et al., 2024).

Entre os hidrocoloides comumente utilizados, a hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de textura, especialmente após o aquecimento. Esse polímero apresenta comportamento termogelificante, formando um gel firme quando submetido à temperatura, o que contribui para a retenção de formato e para a melhoria da mastigabilidade de matrizes

vegetais durante a cocção, conforme demonstrado em estudos recentes sobre suas propriedades estruturais e aplicação tecnológica (MAHMUD et al., 2024). A goma xantana atua no aumento da viscosidade inicial da pasta antes da impressão, conferindo extrudabilidade controlada e estabilidade das camadas, evitando colapso ou espalhamento da estrutura impressa.

O uso sinérgico de psyllium, HPMC e goma xantana é amplamente justificado para garantir a estabilidade do sistema antes e após a impressão, além de reproduzir propriedades tecnológicas características da carne animal, como elasticidade, retenção de água e resistência ao corte. Estudos recentes destacam que combinações de hidrocoloides e outros agentes estruturantes são fundamentais para o desenvolvimento de análogos cárneos com textura organizada e adequada percepção sensorial (DINANI et al., 2023; BENKOVIĆ et al., 2023).

O cloreto de sódio (NaCl) apresenta funções tecnológicas, estruturais e sensoriais importantes nesses sistemas, contribuindo para a solubilização e funcionalidade das proteínas vegetais, favorecendo a formação de redes coesas e elásticas que aumentam a retenção de água e a estabilidade da matriz gordurosa. A modulação da força iônica também auxilia na interação entre proteínas vegetais e água, promovendo melhora na textura e na capacidade de gelificação. Além desses efeitos estruturais, o NaCl desempenha papel essencial na percepção sensorial, realçando o sabor e equilibrando notas indesejáveis das proteínas vegetais (BENKOVIĆ et al., 2023; SIDDIQUI et al., 2024).

## 2.4 ESTADO DA ARTE

### 2.4.1 Impressão 3D de carne vegetal

As pesquisas sobre carnes impressas em 3D têm apresentado crescimento acelerado nos últimos anos, impulsionada pela convergência entre bioimpressão, ciência dos materiais e engenharia de alimentos, que permite agora a deposição de tintas biológicas celulares e hidrogéis para recriar microestruturas análogas às do músculo animal (NG et al. 2025).

Estudos destacam avanços técnicos, como formulações de tintas com propriedades reológicas melhoradas e estratégias de pós-processamento para atingir textura e coesão sensoriais e revisões críticas que apontam desafios

remanescentes em escala, custo e maturação tecidual (RISOTA et al., 2025). Trabalhos recentes enfatizam o papel crescente da impressão 3D na fabricação de produtos híbridos (célula + proteínas vegetais) e em soluções personalizáveis de nutrição, sinalizando que a área está migrando do estágio demonstrativo para aplicações com maior potencial comercial e regulatório (MAHARJAN et al., 2025).

A interdisciplinaridade entre biologia celular, engenharia de biorreatores e design de alimentos é a chave para que a tecnologia passe de protótipos de laboratório para cadeias produtivas viáveis, embora questões regulatórias de aceitação do consumidor continuem limitando a adoção em larga escala

A impressão tridimensional é uma técnica antiga e que vem ganhando espaço no mercado alimentício (MA, ZHANG, 2022). É incomum encontrar alimentos que tenham sido impressos, uma vez que o desenvolvimento deste produto demanda um grande esforço da comunidade científica, pois é necessário atingir pontos específicos, que lembrem o produto convencional (SONG et al., 2023).

Estudos estão sendo desenvolvidos para que a técnica de impressão tridimensional seja implantada, em específico para a carne vegetal, ao mesmo tempo que existem dificuldades para atingir um ponto importante da pesquisa: que o produto tenha, de fato, características de uma carne convencional (RAMACHANDRAIAH, 2021). Afim de facilitar este ponto, a principal opção tem sido a impressão de carne similar à carne de frango, primeiramente por ser uma carne branca e, segundo, por possuir menor quantidade de tecidos fibrosos (YANG et al., 2022)

A impressão em si tem sido muito estudada e existem inúmeros produtos já impressos, como o caso de massas, gomas e chocolate (BAIANO, 2020). Estes produtos, entretanto, não apresentam o maior problema encontrado pelos pesquisadores, que é a estrutura fibrosa. Embora laborioso, o estudo para a carne vermelha vem se intensificando e possui avanços que apontam uma real possibilidade sobre a reprodução destas fibras por meio da impressão tridimensional (MOPARTHI, et al. 2023).

Do que foi visto até o presente momento para a tinta da impressão, utiliza-se amidos ou gomas para fazer com que haja uma conjugação dos materiais utilizados, poucos são os estudos que optaram pela não utilização de nenhum destes constituintes (DICK et al., 2021). A formulação, além das gomas ou amidos, utiliza-se também proteínas de fontes vegetais. Em relação à sua classificação, são classificados como análogos de carne ou extensores de carne, onde o primeiro refere-

se a réplica da carne muscular em aparência e textura e o segundo refere-se a alimentos utilizados para substituir carnes frescas. No caso da proteína vegetal texturizada, neste âmbito é considerada tanto como extensor, como também análogo (VALIKKADAN, et al. 2023)

Com isso, aponta-se o avanço dos estudos e tudo indica que em pouco tempo seja possível alcançar os resultados esperados, visto que o investimento para este tipo de produto tem sido tão alto quanto à procura do mesmo por diversas classes alimentares, como vegetarianos, veganos, flexitarianos e atletas, que visam um maior consumo de proteínas no seu dia a dia. Além deste público, em países como os Estados Unidos, está sendo acrescentado na dieta de idosos, pois é possível controlar a ingestão de micro e macro nutrientes (DICK et al., 2021; XIE, et al. 2023).

A utilização de corantes naturais em carnes vegetais tem ganhado destaque como alternativa para melhorar a aparência e a aceitação sensorial desses produtos, empregando pigmentos como betalainas, antocianinas e carotenoides para reproduzir a coloração característica da carne animal. Estudos recentes apontam que, embora esses compostos atendam à demanda por ingredientes mais naturais, sua aplicação apresenta desafios tecnológicos, como sensibilidade ao pH, à oxidação e ao tratamento térmico, exigindo ajustes na formulação e nos processos de incorporação para garantir estabilidade da cor e desempenho tecnológico, especialmente em produtos processados e impressos em 3D (WU, 2024; MARTÍNEZ et al., 2024; RATHNAYAKE et al., 2025).

Sendo assim, como foi visto anteriormente, esta nova tecnologia do mercado alimentício visa auxiliar a população em questões de sustentabilidade e disponibilidade dos alimentos, pois com isso é possível solucionar questões como a alta emissão de gases de efeito estufa e disponibilidade de novas opções de produtos proteicos.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

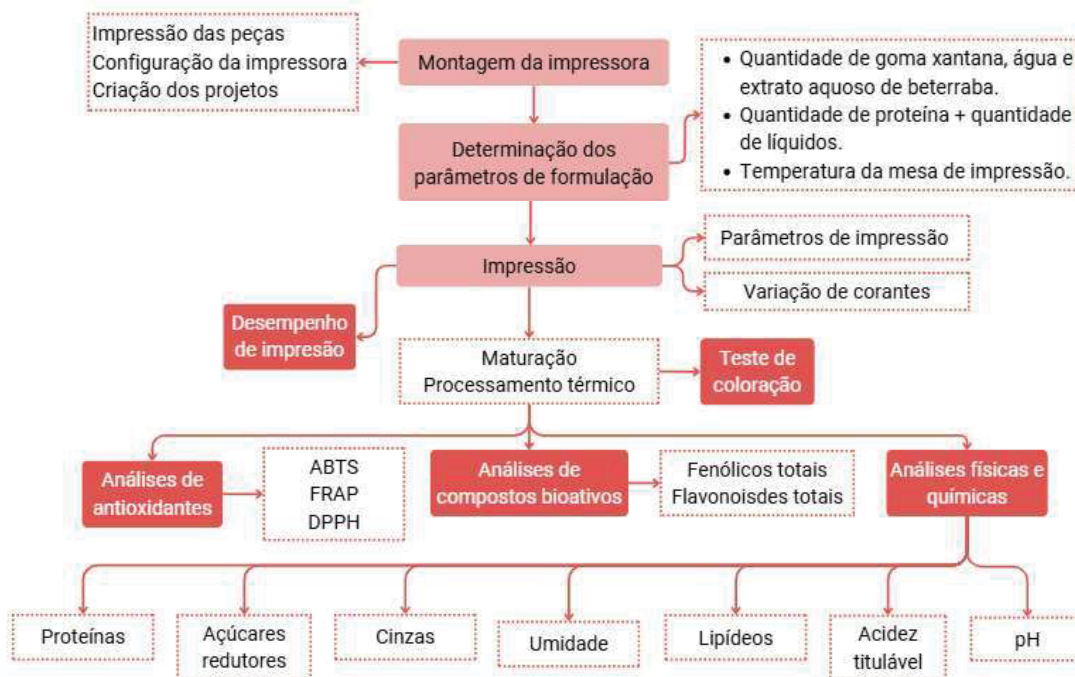
#### **3.1 MATERIAIS**

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados isolado proteico de soja comercial, adquiridos na cidade de Jandaia do Sul – Paraná e isolado proteico de ervilha comercial, adquiridos na cidade de Maringá – Paraná, ambos no ano de 2024. O psyllium e os corantes urucum, páprica e cúrcuma foram adquiridos em loja de produtos naturais, a cenoura e a beterraba foram adquiridas em mercado, ambos na cidade de Jandaia do Sul – Paraná. A goma xantana e o HPMC foram adquiridos pelo laboratório LDATA. Os reagentes utilizados foram NaCl, NaOH, HCl, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Tween 20, fosfato de sódio heptahidratado dibásico, fosfato de sódio monohidratado monobásico, éter etílico, álcool metílico, reagente DNS, sulfato de potássio, sulfato de sódio, sulfato de cobre pentahidratado, folin ciocalteu, carbonato de sódio, tartarato duplo sódio e potássio, catequina, acetato de sódio trihidratado, álcool metílico, cloreto férrico hexahidratado, sulfato ferroso heptahidratado, TPTZ, ABTS, persulfato de potássio, DPPH e trolox.

#### **3.2 MÉTODOS**

Na FIGURA 10 encontra-se um diagrama visual, que especifica o que foi feito ao longo do presente trabalho.

FIGURA 10 - FASES DO TRABALHO



Fonte: A autora (2025).

### 3.2.1 Montagem da impressora

As peças da impressora foram impressas por outras impressoras no campus avançado de Jandaia do Sul – Paraná localizadas no laboratório NanoMakers. Foram utilizadas duas placas de Peltier para refrigerar a mesa, juntamente com uma placa de alumínio 3 mm. A criação dos desenhos foi feita via programa computacional (Onshape ® - disponível para utilização em <https://www.onshape.com/en/>). A impressão foi realizada através de um bocal de extrusão que imprime o alimento em uma chapa com resfriamento para auxiliar na estabilidade do produto final impresso.

### 3.2.2 Determinação dos parâmetros para a formulação da tinta

Foram feitos 3 delineamentos preliminares para determinar a quantidade de goma xantana, extrato aquoso de beterraba e proteína de soja e ervilha, sendo delineamentos  $2^2$  com ponto central e axial. Na TABELA

TABELA 2 - VALORES PARA OS DELINEAMENTOS 2º COM PONTO CENTRAL E AXIAL E PONTO ÓTIMO ENCONTRADO

		Faixa de estudo	Ponto ótimo
Delineamento 1	Extrato aquoso de beterraba	56% a 84%	56%
	Goma xantana	0,5% a 3,5%	1,50%
Delineamento 2	Isolado proteico de ervilha	25% a 85%	85%
	Isolado proteico de soja	Diferença de PTE	15%
	Ponto ótimo do delineamento 1	6 mL a 105 mL	45 mL
Delineamento 3	Temperatura da mesa de impressão	8°C a 45°C	8°C

FONTE: A autora (2025).

Por fim, a formulação geral foi de 13% isolado proteico de ervilha (PTE), 2% de isolado proteico de soja (PTS), 1,3% goma xantana, 1,2% HPMC, 1,5% NaCl, 0,9% psyllium, 0,7% variação do corante (urucum, cenoura ou páprica), 0,3% cúrcuma, 37% extrato aquoso de beterraba, 30% água, 12% óleo de canola.

### 3.2.3 Formulação da tinta para impressão

A beterraba e a cenoura foram higienizadas com soluo de hipoclorito de sódio 100 ppm por 10 minutos, passaram por enxágue e posteriormente por moinho de facas com água destilada em proporo 1/10 v/m, filtradas. O extrato aquoso de beterraba foi utilizado após este processo. O extrato aquoso de cenoura foi congelado, liofilizado (Liofilizador LIOTOP 101), FIGURA 11, e moído em moinho de bola, sendo utilizada após este processo.

FIGURA 11 - OBTENÇÃO DA CENOURA EM PÓ

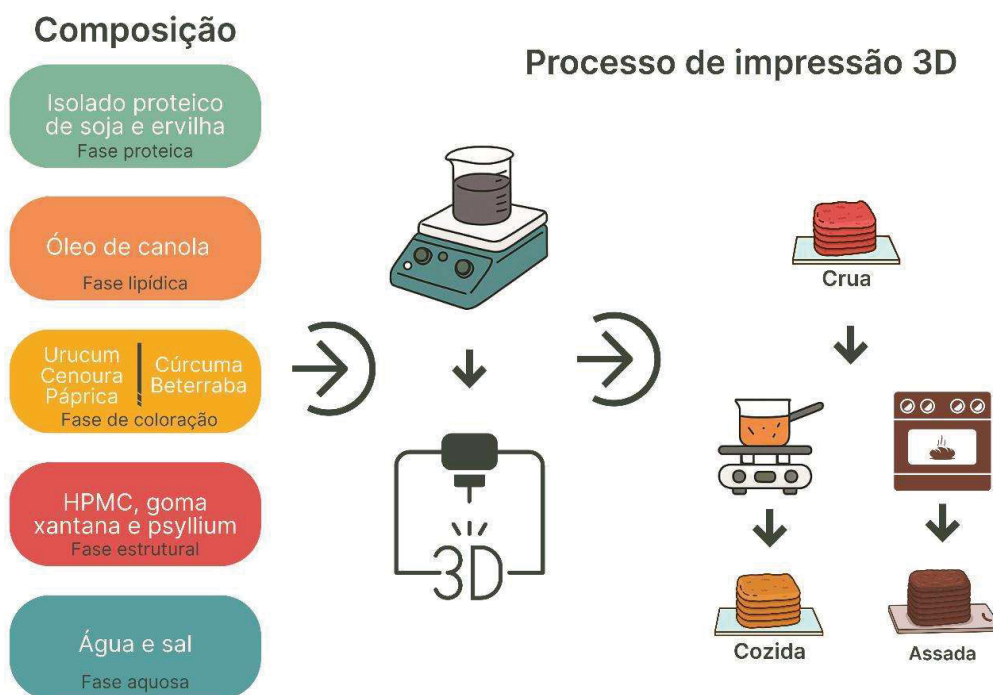


FONTE: A autora (2025).

Foram utilizados corantes naturais, sendo fixos em todas as formulações a cúrcuma e o extrato aquoso de beterraba, e variando o urucum moído, o extrato de cenoura liofilizado e a páprica. Utilizou-se proporção de 0,4% de cúrcuma e 0,7% para urucum, cenoura e páprica, 37% de extrato aquoso de beterraba e 30% de água. As proporções utilizadas são oriundas de testes preliminares quando utilizado PTS e PTE, para chegar à coloração adequada ao esperado no estudo.

Para a formulação acrescentou-se a goma xantana, os corantes, o extrato aquoso de beterraba e água em proporção citada anteriormente e agitou-se em agitador magnético em temperatura ambiente por 10 minutos ou até incorporar a goma xantana. Após, a formulação foi levada para banho ultrassônico (SolidSteel, 2025) por 5 minutos em temperatura ambiente. Simultaneamente, pesou-se o HPMC, NaCl e psyllium e as proteínas de soja e ervilha moídos. Misturou-se manualmente o líquido com os pós. Posteriormente acrescentou-se óleo de canola. Na FIGURA 12 é representada a preparação.

FIGURA 12 - ESQUEMA DE PREPARO DAS FORMULAÇÕES



### 3.2.4 Impressão

Nesta etapa foram definidos os parâmetros para a impressão. Foi utilizada a metodologia descrita por Shahbazi et al. (2021) com modificações, com base no uso de tinta à base de proteínas e um sistema de extrusão com código nas direções XY a partir do projeto criado. O controle da impressão foi realizado usando o programa Ultimaker Cura (disponível para download em <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>), que é um mecanismo 3D que traduz modelos virtuais bidimensionais em instruções de impressão. O desenho foi realizado usando um programa de computador online (Onshape), onde o objeto foi modelado e convertido em um arquivo.

A amostra foi extrusada sob diferentes combinações de velocidade e densidade de fluxo. Na condição (a) foi utilizado um fluxo de 40% a uma velocidade de 24 mm/s; na condição (b) um fluxo de 60% e 36 mm/s; na (c) um fluxo de 70% e 42 mm/s; e na (d) um fluxo de 100% e uma velocidade de 60 mm/s.

### 3.2.5 Maturação e processamento térmico

As amostras impressas foram colocadas em pote hermético com umidade relativa controlada, 75%, e temperatura controlada, 5°C. Deixou-se neste ambiente por 24 horas. Após, foram retiradas e congeladas para as próximas análises.

Para o processamento térmico, alguns quadrados 2x2 cm foram cozidos, adicionados a água em ebulição e deixadas por 15 minutos (processo úmido). Alguns quadrados 2x2 cm foram assados (processo a seco), adicionados em forno pré-aquecido a 150°C por 15 minutos. Após, foram analisados juntamente com a amostra crua. Foram cozidos e assados a quantidade necessária para a realização das análises.

### 3.2.6 Desempenho da impressão

Foi avaliado conforme descrito por Shahbazi e colaboradores (2021) com algumas modificações. Utilizou-se um estúdio, em que tirou-se fotos e fez-se a medição das linhas através de paquímetro e contagem de camadas. Posteriormente, foi feita a comparação entre o desenho do programa e o produto impresso.

### 3.2.7 Caracterização das amostras

As análises foram realizadas em triplicata com as amostras cruas, cozidas e assadas. As análises realizadas foram análises colorimétricas, composição centesimal, compostos fenólicos, flavonoides e atividade antioxidante.

#### 3.2.7.1 Análise colorimétrica

Após a impressão e o processamento térmico, as análises foram submetidas à análise colorimétrica, descrita por Abliz et al. (2020) com algumas adaptações, utilizando os parâmetros de cor L\*, a\* e b\* no colorímetro (Colorímetro NH300, 3NH technology Co., L.D., Shenzhen, China). Os testes foram realizados em triplicata.

### 3.2.7.2 Composição centesimal, pH e acidez titulável

As amostras crua, cozida e assada dos três corantes foram avaliadas quanto a umidade, cinzas, lipídeos, proteínas e açúcares redutores. Foram utilizadas as metodologias descritas pela AOAC (AOAC, 2000), em que umidade foi feita via gravimetria a 105°C e cinzas via incineração a 550°C. Para a extração de lipídeos foi utilizado metodologia de Goldfish e o solvente utilizado foi éter etílico. Para determinação de proteínas foi utilizado o método de Kjeldahl, aplicando o fator proteína-nitrogênio de 6,25. Para determinação de açúcares totais foi utilizada a metodologia de DNS (MALDONADE, 2013).

Para determinação de pH homogeneizou-se o material impresso em água destilada, seguido pela medição por pHmetro de bancada calibrado. A acidez titulável foi feita com o mesmo extrato utilizado para a medição de pH, sendo titulado com NaOH 0,1N enquanto media-se o pH até chegar em 8,1.

### 3.2.7.3 Preparo dos extratos

Com base em testes preliminares definiu-se a concentração de água e etanol para o melhor ponto de extração dos compostos fenólicos das amostras. Em um Erlenmeyer de 125 mL, pesou-se 1 g de amostra para 20 mL de extrato hidroalcoólico 50/50 v/v. As amostras foram agitadas em agitador orbital (Tecnal, TE-4200, Brasil) em temperatura de 25°C por 60 minutos com rotação de 150 rpm. Após este procedimento as amostras foram filtradas através de bomba de vácuo e segregadas para posterior utilização.

### 3.2.8 Compostos fenólicos

O teor de compostos fenólicos foi pelo método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu, conforme descrito por Swain e Hills (1959). Em um tubo de ensaio transferiu-se 500 µL de amostras e adicionados 500 µL do reagente Folin-Ciocalteu. Adicionou-se 8 mL de água destilada. A solução foi homogeneizada e permaneceu em repouso por um período de 3 minutos. Posteriormente adicionou-se 1 mL de solução saturada 15% de carbonato de sódio. Os tubos foram agitados em agitador de tubos e permaneceu em repouso em ambiente escuro por 60 minutos. Na

sequência realizou-se a leitura em espectrofotômetro (Drawell, EEQ90111.UV-B). Para a curva padrão utilizou-se ácido gálico como padrão nas concentrações de 5 a 200  $\mu\text{g mL}^{-1}$ , os resultados foram expressos em equivalentes de ácido gálico por 100 g de amostra ( $\text{mg EAG } 100 \text{ g}^{-1}$  de amostra). As análises foram realizadas em triplicata.

### 3.2.9 Flavonoides totais

A determinação do teor de flavonoides totais foi realizada segundo o método descrito por Chang et al. (2002), onde alíquotas de 1 mL de cada amostra do extrato foram adicionadas a volume igual de solução metanólica de cloreto de alumínio 5%. Após repouso de 30 minutos, realizou-se a leitura em espectrofotômetro (Drawell, EEQ90111.UV-B) a 420 nm. O conteúdo de flavonoides totais foi determinado utilizando curva padrão a partir da catequina em concentrações de 5 a 200  $\mu\text{g/mL}$ . A partir da equação da reta, determinou-se o teor de flavonoides totais, obtendo os resultados em equivalentes de catequina por 100 g de amostra ( $\text{mg ECat}/100 \text{ g}$ ).

### 3.2.10 Determinação da atividade antioxidante total pela captura do radical livre ABTS<sup>°+</sup>

A atividade antioxidante foi determinada pelo método de captura do radical livre ABTS (KUKOSKI et al., 2005) utilizando três diluições das amostras em extrato hidroalcoólico. Destas, em triplicata, transferiu-se 30  $\mu\text{L}$  para tubos de ensaio, mantidos em ambiente escuro e adicionados de 3,0 mL de radical ABTS. Homogeneizou-se as amostras e foram deixadas em repouso por 6 minutos. A leitura foi realizada em espectrofotômetro (Drawell, EEQ90111.UV-B) a 734 nm.

Para a curva padrão foi utilizado a solução de trolox (2.000  $\mu\text{M}$ ), com concentração entre 100  $\mu\text{M}$  e 2.000  $\mu\text{M}$ . Para o cálculo foi utilizado a equação da reta proveniente da curva das absorvâncias das amostras e do trolox, sendo o valor final expresso em  $\mu\text{M}$  trolox por grama de amostra.

### 3.2.11 Determinação da atividade antioxidante total pelo método de redução do ferro (FRAP)

O método FRAP foi realizado de acordo com Thaipong et al. (2006), onde foram preparados tubos de ensaio utilizando três diluições da amostra. Em um ambiente escuro, transferiu-se uma alíquota de 90  $\mu\text{L}$  de cada diluição do extrato hidroalcoólico, acrescentou-se 270  $\mu\text{L}$  de água destilada e misturou-se com 2,70 mL do reagente FRAP, homogeneizados em agitador de tubos e mantidos em banho-maria a 37°C. Realizou-se a leitura em espectrofotômetro (Drawell, EEQ9011.UV-B) a 595 nm após 30 minutos do preparo da mistura.

Para a curva padrão utilizou-se solução padrão de sulfato ferroso (2.000  $\mu\text{M}$ ), variando a concentração entre 200  $\mu\text{M}$  e 1.500  $\mu\text{M}$ . Para o cálculo foi utilizado a equação da reta proveniente da curva das absorvâncias das amostras e da curva padrão de sulfato ferroso, sendo o valor final expresso em  $\mu\text{M}$  sulfato ferroso por grama de amostra.

#### 3.2.12 Determinação da atividade antioxidante total pela captura do radical livre DPPH

O método DPPH foi realizado de acordo com Sánchez-Moreno et al. (1998), onde foram preparados tubos de ensaio utilizando três diluições da amostra. Em um ambiente escuro, transferiu-se uma alíquota de 2,5 mL de cada diluição com extrato metanólico, acrescentou-se 1,0 mL do radical DPPH. As amostras homogeneizadas foram lidas em espectrofotômetro (Drawell, EEQ9011.UV-B) a 515 nm e monitoradas até obter absorvância constante. A leitura da absorvância final foi utilizada para o cálculo do  $\text{EC}_{50}$ .

Para a curva padrão utilizou-se solução de DPPH (0,06 mM) (2.000  $\mu\text{M}$ ), variando a concentração entre 10  $\mu\text{M}$  e 50  $\mu\text{M}$ . Para o cálculo foi utilizado a equação da reta proveniente da curva das absorvâncias das amostras e da curva padrão de DPPH, sendo o valor final expresso em g amostra / g DPPH.

#### 3.2.13 Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a nível de 5% de significância utilizando o teste Tukey para análise de médias pelo programa computacional *R*, versão 4.5.0.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS E PERFORMANCE DE IMPRESSÃO

A impressora, FIGURA 14, foi montada no laboratório NanoMakers. Os parâmetros foram definidos no programa OnShape de acordo com testes preliminares.

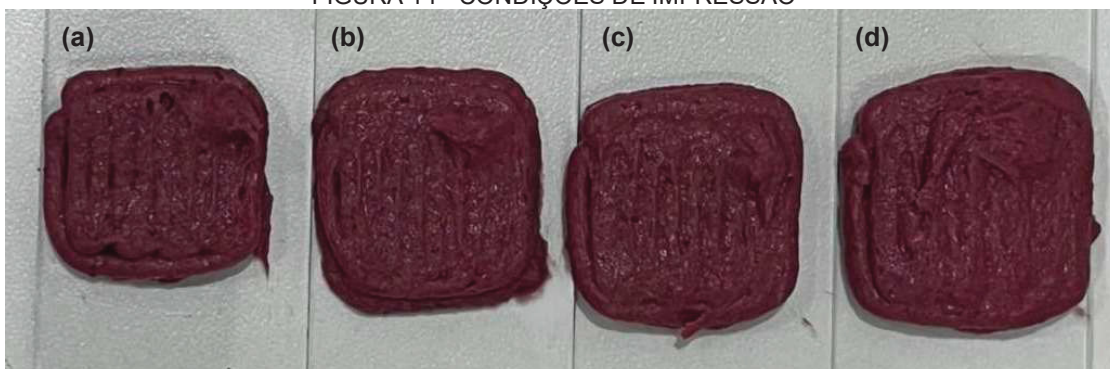
FIGURA 13 - IMPRESSORA DE CARNE VEGETAL



FONTE: A autora (2025).

Observa-se na FIGURA 15 a extrusão da amostra sob diferentes combinações de velocidade e densidade de preenchimento.

FIGURA 14 - CONDIÇÕES DE IMPRESSÃO



Nota: (a) fluxo de 40% e velocidade de 24 mm/s; (b) fluxo de 60% e velocidade de 36 mm/s; (c) fluxo de 70% e velocidade de 42 mm/s; (d) fluxo de 100% e velocidade de 60 mm/s.

FONTE: A autora (2025).

Na condição (d), a densidade elevada impediu a formação das linhas, pois a seringa encostava na massa durante a deposição. Já em (a) e (b), apesar da formação aparente das linhas, observou-se dificuldade de adesão entre os filamentos, indicando fluxo insuficiente. A condição (c) apresentou o melhor desempenho, pois o fluxo permitiu a adequada união das linhas, evitando ao mesmo tempo o contato da seringa com a massa, caracterizando-se como o parâmetro mais eficiente entre os testados. Na TABELA 3 são apresentados os valores definidos após testes preliminares.

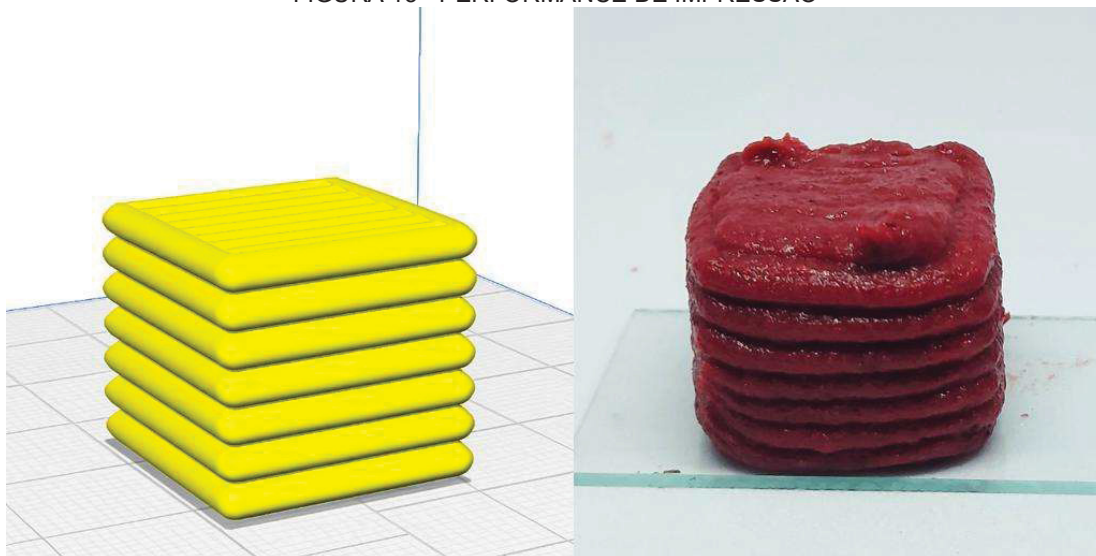
TABELA 3 - PARÂMETROS DE IMPRESSÃO PARA A IMPRESSORA DE CARNE VEGETAL

<b>Ajustes de impressão</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>	<b>Definição</b>
Diâmetro do bocal	2,0	mm	Diâmetro do bocal
Altura da camada	2,0	mm	Altura da camada
Taxa de fluxo	70	%	Volume de tinta que passa pela extrusora
Velocidade de preenchimento	42	mm.s <sup>-1</sup>	Velocidade do eixo durante a extrusão
Padrão de preenchimento	Linhas	-	Desenho geométrico interno que a impressora 3D cria dentro de uma peça
Densidade de preenchimento	70	%	Quantidade de material que preenche o objeto

FONTE: A autora (2025).

Estudos recentes apontam que a impressão 3D para análogos de carne exige controle rigoroso dos parâmetros de extrusão, como a taxa de fluxo, velocidade de deposição e densidade de preenchimento para garantir fidelidade de forma e boa adesão intercamadas (QIU et al., 2023; WEN et al., 2023). Além disso, a técnica de impressão por extrusão é a mais utilizada e indicada para alimentos devido a flexibilidade de deposição e controle de material (HUSSAIN et al., 2022). Na FIGURA 15 são apresentados o designer gerado a partir do programa e a amostra impressa.

FIGURA 15 - PERFORMANCE DE IMPRESSÃO



FONTE: A autora (2025).

Embora o designer tenha previsto linhas mais pontiagudas, a obtida apresentou formato muito próximo ao esperado, evidenciando a boa eficiência do sistema de impressão.

As fotos foram tiradas através da câmera de celular em estúdio fotográfico e a medição através do paquímetro, apresentados na FIGURA 16 e TABELA 4.

FIGURA 16 – OBSERVAÇÃO EM ESTÚDIO DO DESEMPENHO DE IMPRESSÃO DAS AMOSTRAS



FONTE: A autora (2025).

TABELA 4 - VALORES ENCONTRADOS PARA O DESEMPENHO DE IMPRESSÃO

<b>Desempenho de impressão</b>	
Altura das linhas	2 mm
Quantidade de camadas	7 camadas

FONTE: A autora (2025).

Embora a largura da linha seja um parâmetro ajustável no software, a verificação da medida da mesma é essencial para garantir que as linhas possuem mesma largura e eficiência de impressão. Através desta análise notou-se que a largura das linhas foram exatamente a largura esperada e ajustada a partir do software, resultando em peças muito próximas umas das outras.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

### 4.2.1 Análise colorimétrica

Na TABELA 5 é possível observar as coordenadas colorimétricas obtidas através de cada amostra com a alteração dos corantes.

TABELA 5 - RESULTADO DA ANÁLISE COLORIMÉTRICA PARA AS AMOSTRAS CONTENDO URUCUM, PÁPRICA OU EXTRATO DE CENOURA CRUAS, COZIDAS E ASSADAS

		Cru	Cozida	Assada
Urucum	L*	30,01 ± 0,67 <sup>bA</sup>	32,86 ± 0,28 <sup>bA</sup>	33,35 ± 1,97 <sup>bA</sup>
	a*	27,50 ± 0,44 <sup>aA</sup>	23,13 ± 0,81 <sup>bB</sup>	9,34 ± 0,56 <sup>cC</sup>
	b*	13,95 ± 0,47 <sup>bB</sup>	39,84 ± 0,94 <sup>aA</sup>	16,32 ± 2,24 <sup>bB</sup>
Páprica	L*	33,51 ± 3,07 <sup>bA</sup>	35,54 ± 0,50 <sup>bA</sup>	30,75 ± 3,21 <sup>cB</sup>
	a*	21,60 ± 3,12 <sup>bA</sup>	19,16 ± 1,23 <sup>bA</sup>	11,36 ± 2,60 <sup>cB</sup>
	b*	12,81 ± 8,32 <sup>bB</sup>	35,90 ± 4,69 <sup>aA</sup>	19,59 ± 1,84 <sup>bB</sup>
Cenoura	L*	27,59 ± 1,36 <sup>cB</sup>	41,38 ± 2,22 <sup>aA</sup>	28,07 ± 3,04 <sup>cB</sup>
	a*	29,14 ± 1,62 <sup>aA</sup>	9,83 ± 3,20 <sup>dC</sup>	12,77 ± 2,08 <sup>cB</sup>
	b*	15,28 ± 1,97 <sup>bB</sup>	28,07 ± 6,71 <sup>bA</sup>	25,20 ± 1,65 <sup>bA</sup>

Nota: Valores expressos como média ± desvio padrão (n=3). Letras minúsculas: Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey (p < 0,05). Letras maiúsculas: Médias seguidas por letras diferentes na mesma linha diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey (p < 0,05).

FONTE: A autora (2025).

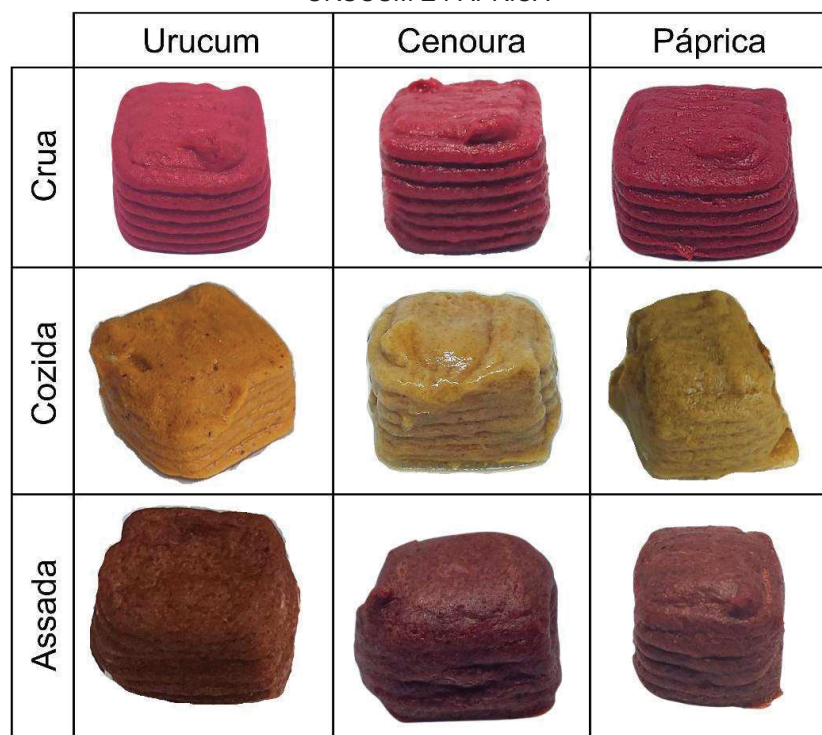
De modo geral, os pigmentos naturais apresentaram comportamentos semelhantes entre si, sendo o tratamento térmico o principal fator de variação. Observou-se variações nos parâmetros L\*, a\* e b\* decorrentes da variação na pigmentação e tratamento térmico. Os parâmetros refletem a percepção visual da cor, onde L\* significa o índice de luminosidade, 0 = preto e 100 = branco. O parâmetro a\* indica o eixo de variação do verde ao vermelho, "+" vermelho e "-" verde. Por sua vez, b\* reflete o eixo do azul "-" ao amarelo "+".

O aquecimento promoveu o aumento do parâmetro L\*, indicando que houve clareamento das amostras durante o processo de cozimento decorrente de lixiviação dos carotenoides contidos nas amostras. Já para o caso da amostra assada, houve redução de L\*, sugerindo o escurecimento decorrente da reação de Maillard e possível oxidação da amostra. O comportamento indicado é típico quando observado produtos cárneos e análogos vegetais, nos quais ocorre a alteração da estrutura proteica e degradação dos pigmentos, assim como observado por De Marchi e colaboradores (2021) e Wu e colaboradores (2024). Para o urucum, o parâmetro L\* não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. Para a páprica assada, houve diferença significativa. E para a cenoura cozida, houve diferença significativa.

O parâmetro a\* que está relacionado à intensidade de vermelho, apresentou redução progressiva com o aumento do tratamento térmico para todas as formulações, principalmente nas amostras com urucum e páprica, conforme observado na FIGURA 17. A tendência observada é coerente com a degradação de pigmentos carotenoides, como bixina, norbixina e capsantina, que apresentam

isomerização e oxidação durante o aquecimento, como Rodriguez-Amaya e colaboradores (2023) trouxeram em seu trabalho. Para a amostra contendo cenoura, rica em  $\beta$ -caroteno, foi observada redução expressiva em  $a^*$  após cocção, indicando oxidação parcial do pigmento e, conseqüentemente, perda na tonalidade avermelhada (LIANG et al., 2013). Para o urucum e a cenoura, houve diferença significativa entre os três tratamentos. Para a páprica assada, houve diferença significativa, levando em consideração a sua composição de carotenoides capsantina e capsorubina.

FIGURA 17 - AMOSTRAS CRUAS, COZIDAS E ASSADAS CONTENDO EXTRATO DE CENOURA, URUCUM E PÁPRICA



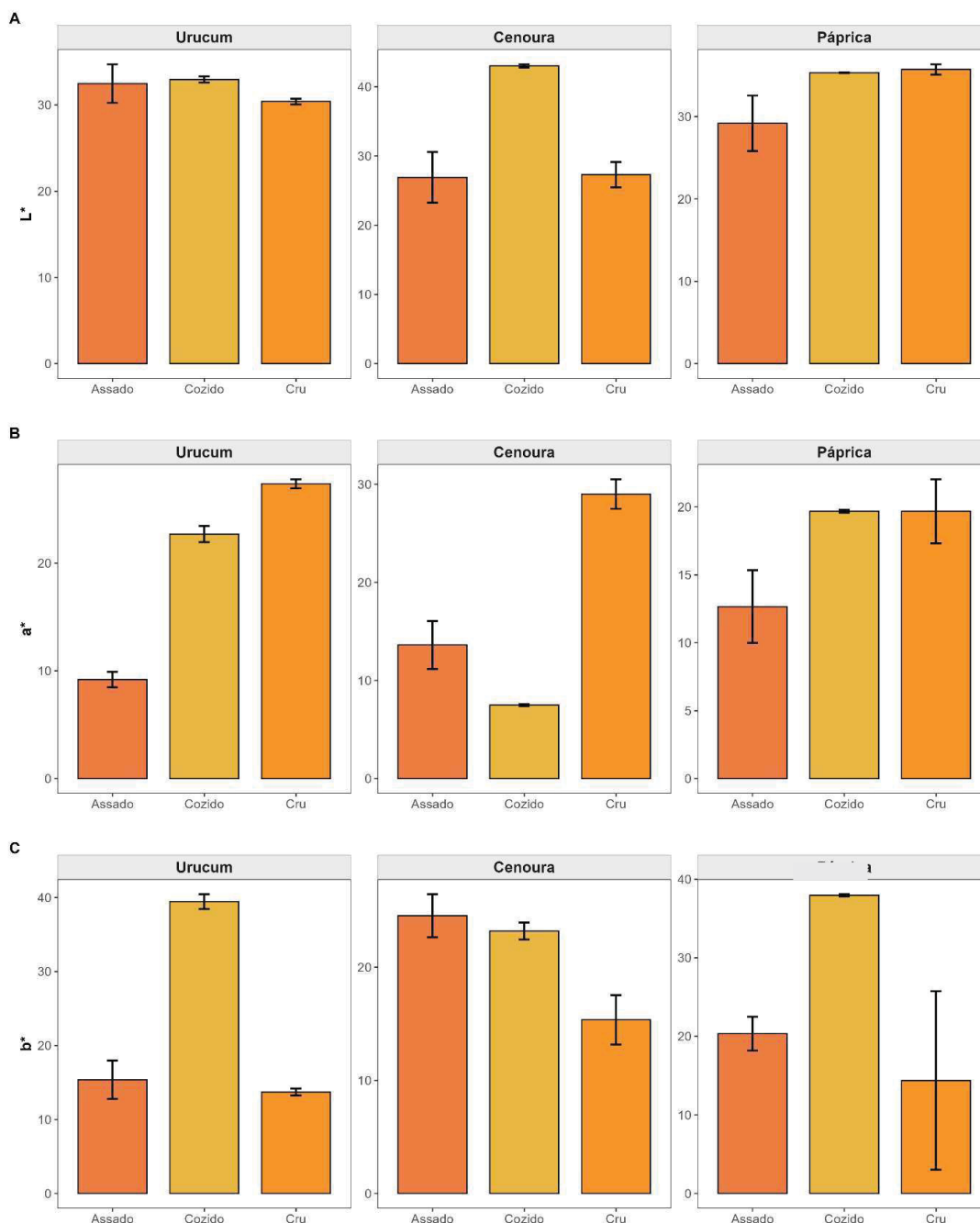
FONTE: A autora (2025).

Já para o caso de  $b^*$ , referente ao componente amarelo, a tendência foi aumentar após cocção, uma vez que a matriz vegetal absorve menos luz azul, deslocando o tom para o amarelo. Este resultado está diretamente relacionado à formação de produtos de oxidação dos carotenoides e à conversão de tons vermelhos em amarelos. Porém, durante o forneamento, tanto  $a^*$  quanto  $b^*$  diminuíram, o que refletiu no escurecimento da amostra e menor saturação de cor, comportamento relatado por Mancini e Hunt (2005) e De Marchi e colaboradores (2021) em seus trabalhos com carnes vegetais e tradicionais submetidas à temperatura intensa. Para

o urucum e a páprica cozidas, houve diferença significativa entre os tratamentos. Para a cenoura cru houve diferença significativa entre os tratamentos.

Sendo assim, o comportamento colorimétrico observado nas amostras indica que os pigmentos utilizados responderam de maneira semelhante ao apresentado em pigmentos de mioglobina de carnes animais, onde houve redução de vermelho ( $a^*$ ) e escurecimento ( $L^*$ ) após submissão a alta temperatura. Essa variação de cor reflete a influência dos processos térmicos na aparência final da carne vegetal impressa em 3D. Na FIGURA 18 é observado o comportamento das amostras de acordo com  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ .

FIGURA 18 – GRÁFICO REFERENTE À ANÁLISE COLORIMÉTRICA DAS AMOSTRAS CONTENDO EXTRATO DE CENOURA, URUCUM E PÁPRICA



FONTE: A autora (2025).

De acordo com os resultados estatísticos, há diferença significativa entre os fatores, destacando o efeito do tratamento térmico e da interação entre pigmento e tratamento com um nível de significância de 5% ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ). O fator “corante” apresentou efeito significativo apenas para  $a^*$  ( $p = 0,0016$ ), sugerindo que as fontes

diferem principalmente quanto a tonalidade vermelha. O teste de comparações múltiplas de tukey ( $p < 0,05$ ) foi aplicado para discriminar os grupos estatisticamente distintos, o que permite a identificação das médias que não apresentaram diferenças entre si.

#### 4.2.2 Composição Centesimal, pH e Acidez Titulável

Na TABELA 6 são apresentados valores de umidade, cinzas, lipídeos, proteínas, açúcares redutores, pH e acidez titulável das formulações avaliadas.

TABELA 6 – RESULTADO DE UMIDADE, CINZAS, LIPÍDEOS, PROTEÍNAS, AÇÚCARES REDUTORES, PH E ACIDEZ TITULÁVEL PARA AMOSTRAS CONTENDO URUCUM, PÁPRICA OU EXTRATO DE CENOURA CRUAS, COZIDAS E ASSADAS

Pigmento	Tratamento	Umidade (%)	Cinzas (%)	Lipídeos (%)	Proteínas (%)	Açúcares redutores (g/100g)	pH	Acidez Titulável (%)
<b>Urucum</b>	Crua	64,13 ± 0,30 <sup>bc</sup>	2,47 ± 0,26 <sup>b</sup>	28,48 ± 1,03 <sup>a</sup>	34,22 ± 1,62 <sup>a</sup>	7,806 ± 187,50 <sup>b</sup>	6,35 ± 0,03 <sup>bcd</sup>	0,22 ± 0,06 <sup>a</sup>
	Cozida	76,84 ± 1,05 <sup>a</sup>	1,12 ± 0,11 <sup>c</sup>	24,19 ± 3,95 <sup>a</sup>	38,65 ± 5,36 <sup>a</sup>	4,855 ± 280,12 <sup>c</sup>	6,60 ± 0,09 <sup>a</sup>	0,35 ± 0,02 <sup>a</sup>
	Assada	48,16 ± 0,14 <sup>d</sup>	3,97 ± 0,07 <sup>a</sup>	26,43 ± 4,05 <sup>a</sup>	51,20 ± 14,80 <sup>a</sup>	8,754 ± 555,61 <sup>a</sup>	6,34 ± 0,11 <sup>bcd</sup>	0,35 ± 0,12 <sup>a</sup>
<b>Páprica</b>	Crua	63,26 ± 0,30 <sup>c</sup>	2,83 ± 0,29 <sup>b</sup>	29,79 ± 5,41 <sup>a</sup>	33,66 ± 0,64 <sup>a</sup>	5,665 ± 208,17 <sup>b</sup>	6,45 ± 0,05 <sup>ab</sup>	0,26 ± 0,12 <sup>a</sup>
	Cozida	74,01 ± 1,34 <sup>ab</sup>	1,18 ± 0,07 <sup>c</sup>	26,97 ± 1,14 <sup>a</sup>	43,45 ± 4,57 <sup>a</sup>	4,378 ± 358,26 <sup>c</sup>	6,47 ± 0,03 <sup>ab</sup>	0,31 ± 0,06 <sup>a</sup>
	Assada	51,75 ± 1,54 <sup>d</sup>	3,79 ± 0,12 <sup>a</sup>	27,10 ± 2,20 <sup>a</sup>	35,60 ± 0,73 <sup>a</sup>	12,455 ± 235,01 <sup>a</sup>	6,25 ± 0,01 <sup>cd</sup>	0,44 ± 0,12 <sup>a</sup>
<b>Cenoura</b>	Crua	65,03 ± 0,12 <sup>bc</sup>	2,74 ± 0,08 <sup>b</sup>	29,02 ± 2,84 <sup>a</sup>	26,22 ± 10,27 <sup>a</sup>	9,268 ± 486,40 <sup>a</sup>	6,23 ± 0,02 <sup>d</sup>	0,26 ± 0,12 <sup>a</sup>
	Cozida	75,27 ± 1,05 <sup>a</sup>	1,23 ± 0,03 <sup>c</sup>	22,65 ± 2,82 <sup>a</sup>	39,30 ± 0,84 <sup>a</sup>	5,390 ± 264,09 <sup>b</sup>	6,41 ± 0,07 <sup>bc</sup>	0,33 ± 0,03 <sup>a</sup>
	Assada	50,66 ± 2,57 <sup>d</sup>	3,61 ± 0,09 <sup>a</sup>	25,49 ± 4,58 <sup>a</sup>	40,70 ± 4,46 <sup>a</sup>	6,678 ± 732,37 <sup>b</sup>	6,28 ± 0,03 <sup>cd</sup>	0,31 ± 0,06 <sup>a</sup>

Nota: Valores expressos como média ± desvio padrão (n=3) em base úmida. Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey (p < 0,05).

FONTE: A autora (2025).

A umidade e as cinzas das formulações foram significativamente influenciadas pelo tratamento térmico, enquanto o efeito isolado dos corantes foi menos expressivo, visto que todas as amostras compartilham a mesma base hidrocoloide e proteica. Sendo assim, o processamento térmico é o fator determinante da umidade final.

Para a umidade, as amostras cozidas apresentaram os maiores teores de umidade, agrupando-se entre a e ab. O uso da goma xantana, HPMC e psyllium favorece a formação de uma matriz tridimensional com afinidade por água livre, o que evidencia o resultado das amostras cozidas, onde promove gelatinização parcial de amidos e hidratação proteica (TORRES-PÉREZ et al., 2024; MONTES et al., 2022; BARTKIENE et al., 2023). As amostras assadas apresentaram menor valor de umidade, grupo (d) na análise estatística, devido à evaporação de água livre e desidratação superficial causada pela exposição ao calor seco, apresentando uma umidade mais baixa, assim como Kumar e colaboradores (2023) e Wang e colaboradores (2024) apresentaram em seu trabalho.

O comportamento semelhante entre os pigmentos estudados sugere que, dentro das proporções aplicadas, o tipo de pigmento exerce influência secundária sobre a umidade, limitada a pequenas variações na capacidade de ligação da água. Torres-Pérez e colaboradores (2024) explicam que quando há redes de hidrocoloides consolidadas, a retenção de água é determinada pela estrutura do gel e condições de processamento térmico.

Já para as cinzas, as amostras cozidas apresentaram o menor teor, sendo reflexo da diluição dos minerais pela maior retenção de água durante o cozimento e possível migração de sólidos para o meio de cocção. As amostras assadas apresentaram o maior teor de cinzas, o que é explicado pela intensa perda de umidade durante o processo de exposição ao calor seco, concentrando os minerais na matriz. O comportamento intermediário observado nas formulações cruas corresponde ao conteúdo mineral original dos ingredientes secos adicionados à base.

Assim, a tendência de assada – crua – cozida confirma que o teor de cinzas é fortemente dependente do grau de desidratação, o que reforça que o processamento térmico é o principal determinante dessa variável, enquanto a substituição do pigmento (cenoura, páprica ou urucum) não promoveu diferenças significativas quando aplicado em pequenas proporções dentro de uma mesma base.

Observou-se que os valores de lipídeos não apresentaram diferença significativa entre as formulações e os tratamentos térmicos. A ausência na variação

pode ser devido a formulação padronizada, além da retenção e estrutura da camada lipídica através do HPMC, goma xantana e psyllium, reduzindo a migração ou perda lipídica durante o processamento térmico. Em sistemas contendo hidrocoloides e emulsificantes, a interação lipídeo-carotenoide e a estabilidade lipídica são mais influenciadas pela composição estrutural da matriz do que pela fonte específica de pigmentos vegetais (MOLTENI et al., 2022; KERAMAT, 2023).

Logo, os resultados sugerem que o tipo de corante e o tratamento térmico não foram determinantes para modificar o teor de lipídeos.

O teor de proteínas variou significativamente entre os tratamentos. A aplicação de calor promoveu aumento no teor aparente de proteínas, o que é associado à perda de umidade durante o processamento térmico. À medida que há remoção de água, a proporção de sólidos totais aumenta, elevando o valor proteico. Os tratamentos térmicos influenciaram significativamente o teor proteico aparente das amostras, sendo observado, de modo geral, maior percentual de proteínas nas amostras assadas, seguido das cozidas, quando comparadas às amostras cruas. Esse comportamento pode estar relacionado, principalmente, à redução do teor de umidade durante o processamento térmico, resultando em concentração relativa da fração proteica, além de alterações na solubilidade das proteínas durante o processo (ZHANG et al., 2023).

Essas variações estão de acordo com os resultados encontrados por Neji e colaboradores (2022), onde o processamento pode alterar a concentração aparente de sólidos e proteínas. As mudanças da estrutura proteica, agregação ou desnaturação podem afetar a disponibilidade ou extração do nitrogênio em alguns métodos, embora não necessariamente modifiquem o teor bruto (KUMAR et al., 2022).

A aplicação de calor promove desnaturação proteica, caracterizada pela perda da estrutura tridimensional nativa das proteínas, com exposição de grupos hidrofóbicos e sítios peptídicos anteriormente inacessíveis. Em proteínas vegetais, essa desnaturação pode apresentar efeitos duais: tratamentos moderados tendem a aumentar a digestibilidade, enquanto tratamentos mais intensos podem favorecer a agregação proteica e a formação de estruturas menos suscetíveis à hidrólise enzimática (LIU et al., 2024; WANG et al., 2023). Dessa forma, embora o aumento percentual de proteínas observado nas amostras assadas indique maior concentração, isso não implica necessariamente maior absorção biológica, sendo

necessário interpretar esses resultados à luz da estrutura proteica e do processamento aplicado.

O comportamento das proteínas vegetais frente ao tratamento térmico apresenta similaridades conceituais ao observado em proteínas cárneas, como a mioglobina, especialmente no que se refere à desnaturação induzida pelo calor. Em sistemas cárneos, a desnaturação da mioglobina e das proteínas musculares altera propriedades funcionais e digestibilidade, podendo aumentar a disponibilidade de aminoácidos até um determinado limite térmico (YU et al., 2023). Contudo, as proteínas vegetais diferem estruturalmente da mioglobina, apresentando maior complexidade conformacional, maior tendência à agregação e diferentes temperaturas de transição térmica, o que resulta em respostas distintas ao processamento térmico (KUMAR et al., 2024).

No contexto de produtos análogos à carne, especialmente aqueles formulados com diferentes corantes naturais, como urucum, páprica e cenoura, a matriz alimentar exerce papel relevante na estabilidade e no comportamento das proteínas. Compostos fenólicos e carotenoides presentes nesses corantes podem interagir com proteínas vegetais, influenciando tanto a desnaturação térmica quanto a solubilidade e digestibilidade proteica (SILVA et al., 2025). Essas interações podem explicar variações observadas entre amostras submetidas ao mesmo tratamento térmico, reforçando a importância de avaliar conjuntamente composição, processamento e funcionalidade.

Assim, os resultados obtidos demonstram que o assamento promove maior teor proteico aparente, associado à concentração de sólidos e à desnaturação proteica, enquanto o cozimento tende a promover modificações estruturais mais moderadas, potencialmente favoráveis à digestibilidade. Apesar de compartilhar princípios gerais com proteínas animais, o comportamento térmico das proteínas vegetais é particular e deve ser cuidadosamente controlado no desenvolvimento de carnes vegetais impressas em 3D, a fim de equilibrar valor nutricional, funcionalidade e aceitação do produto final (LIU et al., 2024; SILVA et al., 2025).

Na amostra contendo urucum observou-se nitidamente esse progresso, onde a intensa desidratação promovida nas amostras assadas concentrou os sólidos. Este mesmo comportamento se repetiu para as amostras contendo cenoura e páprica, onde apresentaram valores crescentes para cruas – cozidas – assadas.

Os resultados obtidos para as três matrizes apontam que o processamento térmico – tanto cozimento quanto para forneamento – exerceu efeito expressivo sobre o teor desses compostos. Assim como Pérez e colaboradores (2023) observaram, os efeitos térmicos podem aumentar os açúcares redutores por meio da hidrólise e liberação de açúcares livres.

Observou-se que as amostras contendo páprica e urucum quando cozidas diminuem significativamente os açúcares redutores, podendo ser resultado da lixiviação, visto que quando assadas os valores foram elevados. Slawinska (2024) destaca que o aquecimento pode alterar a matriz vegetal e o perfil de carboidratos e por isto favorecer ou degradar açúcares. Chen e colaboradores (2023) explicam o aumento dos açúcares redutores sob alta temperatura por conta da reação de Maillard, o que explica o aumento das amostras contendo páprica, onde o valor dobrou em relação ao estado cru. O tratamento térmico pode causar a desidratação e conseqüentemente maior liberação intracelular de açúcares simples. Na FIGURA 17 são apresentados os resultados graficamente.

Os resultados demonstram que o processamento térmico exerce influência decisiva sobre o perfil dos carboidratos livres, considerando que as formulações são de mesma base. O aumento relativo em sistemas submetidos à alta temperatura pode estar relacionado à participação desses açúcares em reações iniciais de Maillard, como Chen e colaboradores (2023) destacam em seu estudo.

Os valores de pH e acidez titulável apresentaram comportamento complementar, indicando que tanto o pigmento quanto o tratamento térmico influenciaram o equilíbrio ácido-base das formulações. A acidez titulável não apresentou diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos ( $p < 0,05$ ), enquanto o pH variou de forma expressiva. Este comportamento é encontrado em sistemas que contenham corantes vegetais, onde pequenas alterações nos ácidos orgânicos não apresentam diferenças notáveis na titulação, porém impactam o pH, por conta da força dissociativa dos compostos, conforme citado por Dambrosio e colaboradores (2023) e Novais e colaboradores (2022).

Entre os tratamentos foi observado que o urucum cozido apresentou o maior pH,  $6,60 \pm 0,09$ , diferindo estatisticamente dos demais, mas se manteve na mesma faixa quando comparado à acidez titulável ( $0,35\% \pm 0,02$ ). Isso indica que o aumento no pH não ocorre somente por conta redução de ácidos orgânicos, mas também da liberação de componentes de natureza básica, como sais minerais, ou à degradação

parcial de ácidos orgânicos durante aquecimento prolongado. Narra e colaboradores (2024) apresentam que o aquecimento úmido pode promover a volatilização e degradação, elevando o pH sem alterar a acidez titulável.

As amostras com cenoura e páprica assada apresentaram pH mais baixos, entretanto, não correspondem a valores maiores de acidez titulável. Isso sugere que nesses tratamentos pode ter ocorrido retencao diferencial de ácidos orgânicos de maior força ou menor degradacao térmica da matriz. Em tratamentos de aquecimento seco (assado), há tendência de concentracao de sólidos e intensificacao de atributos da matriz, sem necessariamente aumento no teor de ácidos tituláveis (MASYITA et al., 2024).

A ausência de diferenças significativas na acidez titulável entre os tratamentos demonstra que os pigmentos e os processos térmicos não alteraram substancialmente o conteúdo total de ácidos fracos da matriz. Porém, a modulacao do pH sugere que a atuacao de tratamento térmico e pigmentacao atuam mais fortemente sobre o estado químico, a dissociacao e a estabilidade dos cidos.

Portanto, a avaliaçao conjunta entre pH e acidez titulável sugerem que a estabilidade dos pigmentos, principalmente carotenoides da páprica e cenoura e apocarotenoides do urucum, influenciam o equilíbrio ácido-base através de alteraoes estruturais induzidas por calor e não pela adicao ou perda significativa de cidos.

Em termos de composicao de acordo com a formulacao, na TABELA 7 são apresentados os valores aproximados de composicao das amostras.

TABELA 7 - COMPOSIAO BASEADA NA FORMULAAO

<b>Componente</b>	<b>Quantidade estimada</b>
Carboidratos totais	18,0 g
Aucares totais	1,2 g
Aucares adicionados	0,0 g
Fibras alimentares totais	12,5 g
Proteínas	7,5 g
Gorduras totais	10,0 g
Gorduras saturadas	0,9 g
Gorduras trans	0,0 g
Sódio	590 mg

FONTE: A autora (2025).

A comparação entre a composição nutricional estimada e os resultados experimentais evidencia diferenças relevantes, principalmente quando associadas aos efeitos do processamento térmico e à base de cálculo. A estimativa teórica indicava teor moderado de proteínas ( $\approx 7,5$  g/100 g) e lipídeos ( $\approx 10,0$  g/100 g), porém, os valores experimentais foram significativamente superiores, especialmente nas amostras assadas, onde o teor proteico atingiu até 51,20%, e os lipídeos permaneceram elevados. Essa diferença está diretamente relacionada à redução da umidade observada, que promoveu concentração dos sólidos, aumentando os valores percentuais quando expressos em base úmida. Da mesma forma, os açúcares redutores, estimados teoricamente em baixos níveis ( $\approx 1,2$  g/100 g), apresentaram valores experimentais mais elevados, sobretudo nas amostras assadas, resultado atribuído à concentração dos açúcares naturais do extrato vegetal e à menor atividade de água. Por outro lado, a estimativa do teor lipídico foi confirmada experimentalmente, uma vez que não foram observadas variações significativas dessa fração entre os tratamentos térmicos. Assim, as diferenças entre valores teóricos e reais não indicam inconsistência da formulação, mas refletem principalmente o impacto do processamento térmico e da umidade sobre a expressão percentual da composição centesimal, reforçando a importância de considerar a base de cálculo ao comparar dados estimados e experimentais.

Dessa forma, observa-se que o tratamento térmico aplicado às amostras foi o principal fator determinante das variações observadas na composição centesimal, exercendo maior influência sobre os parâmetros avaliados do que a matriz vegetal empregada como fonte de pigmentação. Tal comportamento indica que as modificações físicas e químicas decorrentes do aquecimento se sobrepõem aos efeitos do tipo de pigmento vegetal utilizado, evidenciando que a pigmentação não alterou de maneira significativa a composição centesimal das formulações.

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO BIOATIVA

Na FIGURA 20 são apresentados os extratos obtidos para cada pigmento x tratamento térmico.

FIGURA 19 - EXTRATOS HIDROALCOÓLICOS DAS AMOSTRAS CONTENDO URUCUM, EXTRATO DE CENOURA E PÁPRICA, CRUAS, COZIDAS E ASSADAS.



FONTE: A autora (2025).

Nota: 1 – cenoura; 2 – urucum; 3 – cúrcuma. Amarelo: cozida; vermelho: crua; Alaranjado: assada.

Visualmente observa-se a diferença de coloração do extrato hidroalcoólico, tanto entre tratamentos quanto entre pigmentos. Esta variação ocorreu de forma consistente entre os tratamentos, em que as amostras cruas apresentaram tom rosado, indicando maior integridade e disponibilidade dos carotenoides e apocarotenoides antes de ocorrer degradação ou isomerização. Comportamento semelhante foi relatado por Wu e colaboradores (2024), que destacam a influência da integridade estrutural dos pigmentos e da matriz vegetal na preservação das tonalidades mais vivas em produtos vegetais submetidos a processamento mínimo.

Nas amostras cozidas observou-se coloração amarelada menos intensa, comportamento compatível com a degradação oxidativa e a isomerização térmica em condições úmidas, que há redução da saturação da cor e deslocam o matiz para tons mais claros, fenômeno descrito por Narra e colaboradores (2024) e Narwojsz e colaboradores (2025), ao investigarem a degradação térmica de carotenoides e compostos fenólicos em vegetais após cocção.

Para as amostras assadas, a coloração predominante é alaranjada e vibrante, sugerindo maior liberação de pigmentos devido à ruptura estrutural provocada pelo calor seco e à concentração associada à perda de umidade – efeito amplamente relatado em estudos sobre a estabilidade térmica e as transformações cromáticas de carotenoides submetidas ao aquecimento seco (FERRANDO et al., 2024; NARWOJSZ et al., 2025). Assim, o padrão observado é coerente com os mecanismos de liberação e degradação dos pigmentos durante o processamento térmico.

#### 4.3.1 Determinação de fenólicos totais

A concentração de fenólicos totais, TABELA 8, variou em função do pigmento empregado e do tratamento térmico aplicado às formulações. De modo geral, observou-se maior teor de fenólicos totais nas amostras cruas e redução após o cozimento, padrão consistente em todas as formulações avaliadas. As amostras sem tratamento térmico apresentaram valores entre 821,98 e 902,97 mg GAE 100 g<sup>-1</sup>, refletindo o elevado conteúdo de compostos bioativos oriundos da matriz vegetal. Após o cozimento, verificou-se uma redução expressiva desses teores, que passaram a variar entre 405,57 e 613,42 mg GAE 100 g<sup>-1</sup>, atribuída principalmente à degradação térmica, à oxidação e à solubilização dos fenólicos totais em meio aquoso. Esse comportamento está de acordo com estudos que reportam perdas significativas de fenólicos totais em vegetais submetidos à cocção em água (KAYAHAN; SALOGLU, 2021; GONZÁLEZ-CORIA et al., 2024).

Em contrapartida, as amostras submetidas ao forneamento apresentaram recuperação parcial dos teores de fenólicos totais, com valores entre 659,10 e 777,65 mg GAE 100 g<sup>-1</sup>. Esse efeito pode ser atribuído à menor umidade do processo e à liberação de fenólicos totais ligados à matriz alimentar durante o aquecimento a seco, fenômeno amplamente descrito na literatura. Estudos recentes indicam que tratamentos térmicos com menor contato com água favorecem a preservação ou a maior extração desses compostos bioativos (IZHAM et al., 2022; NARRA et al., 2024).

A análise estatística evidenciou que o teor de fenólicos totais foi significativamente influenciado ( $p < 0,05$ ) pelo pigmento utilizado, pelo tratamento térmico aplicado e pela interação entre esses fatores. Independentemente da formulação, observou-se um comportamento semelhante: redução acentuada dos fenólicos totais após o cozimento e aumento relativo após o assamento, quando comparado ao tratamento úmido. Esse padrão destaca a influência das condições de processamento térmico – especialmente temperatura, tempo de exposição e presença de meio aquoso – sobre a estabilidade e a disponibilidade dos fenólicos totais.

O cozimento, caracterizado pelo aquecimento em água, favorece tanto a lixiviação de fenólicos hidrossolúveis quanto a degradação de compostos termossensíveis associados aos pigmentos. No presente estudo, a formulação contendo urucum apresentou o menor teor de fenólicos totais após o cozimento, indicando maior suscetibilidade desse pigmento à degradação em condições de calor e umidade. Tal resultado está em consonância com relatos que apontam baixa

estabilidade térmica de fenólicos totais durante processos térmicos úmidos, com perdas consideráveis desses compostos (NARRA et al., 2024).

Por outro lado, o forneamento, caracterizado como um tratamento térmico a seco, resultou em maiores teores de fenólicos totais quando comparado ao cozimento. A ausência de água livre reduz as perdas por lixiviação e, simultaneamente, a ruptura da estrutura da matriz alimentar pode favorecer a liberação de fenólicos previamente ligados, aumentando sua extração. Narra et al. (2024) demonstram que alimentos submetidos ao assamento podem reter entre 67% e 85% dos fenólicos totais, reforçando que o calor seco pode preservar ou até ampliar a disponibilidade desses compostos. Resultados semelhantes também são discutidos por Klisovic et al. (2024), que destacam a temperatura como um fator determinante na perda de polifenóis durante o preparo de alimentos.

Do ponto de vista tecnológico, esses achados indicam que o desenvolvimento de produtos enriquecidos com pigmentos e fenólicos totais deve considerar não apenas a escolha do pigmento, mas também o tipo de processamento térmico empregado. Tratamentos úmidos, como o cozimento, tendem a promover maiores perdas, enquanto processos a seco, como o assamento, podem minimizar a degradação ou favorecer a extração desses compostos, desde que a matriz alimentar seja adequada. No caso específico das formulações contendo urucum, a maior instabilidade observada em meio aquoso sugere a necessidade de estratégias adicionais de proteção, como encapsulação, redução do teor de umidade ou diminuição do tempo de aquecimento, a fim de preservar os fenólicos totais.

TABELA 8 - RESULTADO DE FENÓLICOS TOTAIS E FLAVONOIDES TOTAIS PARA AMOSTRAS CONTENDO URUCUM, PÁPRICA OU EXTRATO DE CENOURA CRUAS, COZIDAS E ASSADAS

Pigmento	Tratamento	Fenólicos totais (mg EAG 100 g <sup>-1</sup> )	Flavonoides totais (mg ECat 100 g <sup>-1</sup> )
Urucum	Crua	821,98 ± 34,69 <sup>abc</sup>	1.228 ± 16,97 <sup>a</sup>
	Cozida	405,57 ± 16,82 <sup>f</sup>	493,86 ± 17,20 <sup>b</sup>
	Assada	724,07 ± 15,03 <sup>cd</sup>	1.079,42 ± 23,54 <sup>a</sup>
Páprica	Crua	902,97 ± 84,94 <sup>a</sup>	1.379,06 ± 118,56 <sup>a</sup>
	Cozida	578,34 ± 24,24 <sup>e</sup>	626,59 ± 6,82 <sup>c</sup>
	Assada	659,10 ± 36,16 <sup>de</sup>	1.055,47 ± 88,24 <sup>b</sup>
Cenoura	Crua	861,31 ± 25,43 <sup>ab</sup>	1.417,30 ± 27,39 <sup>a</sup>
	Cozida	613,42 ± 22,28 <sup>e</sup>	836,42 ± 22,84 <sup>c</sup>
	Assada	777,65 ± 16,72 <sup>bc</sup>	1.077,95 ± 23,54 <sup>b</sup>

Nota: Valores expressos como média ± desvio padrão (n=3). Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey (p < 0,05)

FONTE: A autora (2025).

#### 4.3.2 Determinação de flavonoides totais

Em relação ao teor de flavonoides totais, observa-se na TABELA 8 que os compostos variaram entre 493,86 e 1.417,30 mg ECat 100 g<sup>-1</sup>, sendo influenciados tanto pelo tipo de corante quanto pelo tratamento submetido. Observou-se que as amostras cruas apresentaram maior teor de flavonoides, enquanto o aquecimento promoveu redução significativa (p<0,05) dos compostos, principalmente após o cozimento, este comportamento foi observado por Gao e colaboradores (2022), destacando que o processamento térmico pode reduzir o teor de flavonoides alimentares.

Os resultados apresentados indicam a redução do conteúdo de flavonoides totais conforme submetidos a tratamentos térmicos. Entre as amostras cozidas, destaca-se a páprica em que a redução foi mais acentuada proporcionalmente à intensidade do tratamento.

O processamento térmico exerceu influência significativa sobre o teor de flavonoides nas amostras, apresentando redução significativa após o cozimento. Este comportamento é refletido no estudo de Mitrovic e colaboradores (2021), onde o aquecimento pode causar degradação oxidativa, já o calor seco pode favorecer a

liberação de flavonoides conjugados, aumentando a fração detectável principalmente em matrizes apolares, como é o caso do urucum.

Mitrovic e colaboradores (2021) observaram que o aquecimento no forno promoveu perdas menores de compostos quando comparados ao cozimento em água, sendo a lixiviação um dos principais mecanismos de perdas durante a cocção. Além disso, tratamentos com menor contato com água ou via calor seco podem permitir maior retenção ou liberação de flavonoides conjugados, aumentando a fração detectável, conforme discutido por Lin e Xiao (2024).

Sendo assim, o teor de flavonoides totais é significativamente afetado pelo processamento térmico, sendo as amostras cruas aquelas que apresentaram maior preservação desses compostos. Entre os tratamentos aplicados, o cozimento promoveu as maiores perdas, associadas principalmente à degradação térmica e à lixiviação em meio aquoso, enquanto o forneamento, por empregar calor seco, mostrou-se mais eficiente na retenção dos flavonoides. Esse comportamento indica que tratamentos com menor contato com água tendem a preservar melhor esses compostos bioativos, além de favorecer a liberação de flavonoides conjugados em determinadas matrizes, como observado para o urucum. Dessa forma, o assamento destaca-se como a alternativa mais adequada para a manutenção do teor de flavonoides totais, conciliando estabilidade química e preservação das características funcionais do produto.

#### 4.4 ATIVIDADE ANTIOXIDANTE

Na TABELA 9 são apresentados os valores de atividade antioxidante para as amostras cruas, cozidas e assadas contendo os pigmentos urucum, páprica e cenoura para os métodos de FRAP, DPPH e ABTS.

TABELA 9 - ATIVIDADE ANTIOXIDANTES (ABTS, FRAP E DPPH) PARA AMOSTRAS CONTENDO URUCUM, PÁPRICA OU EXTRATO DE CENOURA CRUAS, COZIDAS E ASSADAS

Pigmento	Tratamento	ABTS ( $\mu\text{M}$ trolox / 100 g)	FRAP ( $\mu\text{mol Fe}^{2+}$ / 100g)	DPPH (g amostra / g DPPH)
Urucum	Crua	0,17 $\pm$ 0,05 <sup>b</sup>	4,60 $\pm$ 0,47 <sup>a</sup>	3,67E-06 $\pm$ 4,23E-06 <sup>a</sup>
	Cozida	0,12 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup>	1,48 $\pm$ 0,34 <sup>b</sup>	7,06E-07 $\pm$ 4,4E-08 <sup>a</sup>
	Assada	0,17 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>	3,41 $\pm$ 1,25 <sup>ab</sup>	6,76E-07 $\pm$ 1,40E-07 <sup>a</sup>
Páprica	Crua	0,17 $\pm$ 0,05 <sup>b</sup>	2,95 $\pm$ 1,09 <sup>ab</sup>	2,27E-06 $\pm$ 1,05E-07 <sup>c</sup>
	Cozida	0,35 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>	1,90 $\pm$ 0,20 <sup>b</sup>	3,66E-07 $\pm$ 5,86E-09 <sup>a</sup>
	Assada	0,20 $\pm$ 0,08 <sup>b</sup>	3,47 $\pm$ 0,43 <sup>a</sup>	4,77E-07 $\pm$ 1,44E-08 <sup>d</sup>
Cenoura	Crua	0,16 $\pm$ 0,06 <sup>b</sup>	3,63 $\pm$ 0,25 <sup>a</sup>	1,4E-05 $\pm$ 1,79E-05 <sup>a</sup>
	Cozida	0,11 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup>	1,85 $\pm$ 0,12 <sup>b</sup>	4,37E-07 $\pm$ 3,84E-09 <sup>a</sup>
	Assada	0,15 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>	3,29 $\pm$ 0,41 <sup>a</sup>	3,60E-07 $\pm$ 2,72E-09 <sup>a</sup>

Nota: Valores expressos como média  $\pm$  desvio padrão (n=3). Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ )  
 FONTE: A autora (2025).

O método de FRAP (*Ferric Reducing Antioxidant Power*) é utilizado para quantificar a capacidade de reduzir os compostos antioxidantes presentes na amostra convertendo  $\text{Fe}^{3+}$  em  $\text{Fe}^{2+}$ . Os valores obtidos pelo método de FRAP apresentam diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos térmicos. Para todos os pigmentos observou-se que o cozimento apresentou redução substancial do poder antioxidante redutor, enquanto o processo de assar manteve parcialmente a capacidade antioxidante quando comparados às amostras cruas.

Para as amostras contendo o urucum, a amostra crua apresentou o maior valor de FRAP sendo de  $4,60 \pm 0,47 \mu\text{mol Fe}^{2+} 100 \text{ g}^{-1}$ , seguido pela amostra assada com  $3,41 \pm 1,25 \mu\text{mol Fe}^{2+} 100 \text{ g}^{-1}$  e a amostra cozida apresentou a menor capacidade redutora com  $1,48 \pm 0,34 \mu\text{mol Fe}^{2+} 100 \text{ g}^{-1}$ . Os resultados indicam que o tratamento térmico úmido promove maior degradação dos compostos antioxidantes, possivelmente por conta da oxidação térmica e lixiviação advinda da cocção. Ao mesmo tempo, as amostras assadas preservaram parte da atividade antioxidante, provavelmente devido a menor disponibilidade de água e concentração de pigmentos e compostos fenólicos. O urucum é rico em norbixina e bixina, carotenoides conhecidos por sua sensibilidade térmica cuja degradação é acelerada na presença de água, como ocorre durante o cozimento. Estudos recentes confirmam essa

tendência, demonstrando que o aquecimento em meio aquoso intensifica a degradação de carotenoides do urucum, além de reduzir a atividade antioxidante medida por FRAP (SANTOS et al., 2021; NGUYEN et al., 2022).

Para as amostras contendo páprica, observou-se que a amostra assada apresentou o maior poder redutor ( $3,47 \pm 0,43 \mu\text{mol Fe}^{2+} 100 \text{ g}^{-1}$ ), diferindo estatisticamente da amostra cozida ( $1,90 \pm 0,20 \mu\text{mol Fe}^{2+} 100 \text{ g}^{-1}$ ), enquanto a amostra crua apresentou valor intermediário ( $2,95 \pm 1,09 \mu\text{mol Fe}^{2+} 100 \text{ g}^{-1}$ ). Notou-se que o aumento após assar pode estar associado à liberaao de compostos ligados à matriz celular e à formaao de produtos intermediários das reaoes de Maillard, que apresentam capacidade redutora e podem contribuir para o aumento do valor de FRAP. Ferrando e colaboradores (2024) mostram que a páprica quando submetida a tratamentos térmicos apresentam perda significativa de sua capacidade antioxidante. Resultados parecidos foram descritos por Oh e colaboradores (2024), onde verificou-se a diminuiao do potencial redutor após cocao prolongada em produtos cárneos adicionados de páprica.

Na amostra contendo cenoura o padrão apresentado foi semelhante, onde a cocao reduziu significativamente o FRAP ( $1,85 \pm 0,12 \mu\text{mol Fe}^{2+} 100 \text{ g}^{-1}$ ), enquanto as amostras cruas ( $3,63 \pm 0,25$ ) e assada ( $3,29 \pm 0,41$ ) não diferiram entre si. A reduao no tratamento úmido é atribuída à degradaao térmica de compostos fenólicos e carotenoides, além da perda por lixiviaao para a água de cocao. Para a amostra assada observou-se a preservaao da atividade antioxidante, devido ao favorecimento da liberaao de antioxidantes ligados e a concentraao de pigmentos lipossolúveis. Na FIGURA 20 pode ser observado graficamente a diferena entre os tratamentos para cada pigmento.

Sendo assim, o ensaio de FRAP demonstrou que o cozimento promove uma perda da capacidade antioxidante redutora, enquanto o assamento mostra efeito mais conservativo, principalmente para amostras contendo páprica e urucum. Isso indica que o tipo de tratamento térmico influencia diretamente a estabilidade dos compostos bioativos responsáveis pela atividade antioxidante.

Na TABELA 9 são apresentados os valores encontrados para a análise de DPPH (determinaao da atividade antioxidante pela captura do radical livre DPPH). Os tratamentos térmicos tiveram efeito estatisticamente significativo sobre a atividade antioxidante medida por DPPH para os três pigmentos ( $p < 0,05$ ). As amostras contendo páprica crua (letra c) diferiu significativamente da cozida (letra a) e da

assada (letra d). Para as amostras contendo urucum, não houve diferença significativa entre cru, cozida e assada, refletindo a elevada variação nos resultados. Para o caso das amostras contendo cenoura no tratamento cru, foi significativamente superior aos demais (letra b).

A análise da atividade antioxidante pelo método do DPPH de sequestro de radical DPPH apontou diferenças expressivas entre os pigmentos utilizados e os tratamentos térmicos aplicados às amostras de carne vegetal impressa em 3D. Observou-se um padrão já relatado na literatura em que amostras cruas apresentam maior capacidade antioxidante quando comparadas a amostras cozidas ou assadas. Esse comportamento reflete a degradação térmica dos compostos fenólicos, carotenoides e outros antioxidantes que apresentam sensibilidade ao calor, podendo ocorrer tanto por oxidação quanto por isomerização (NARRA et al., 2024).

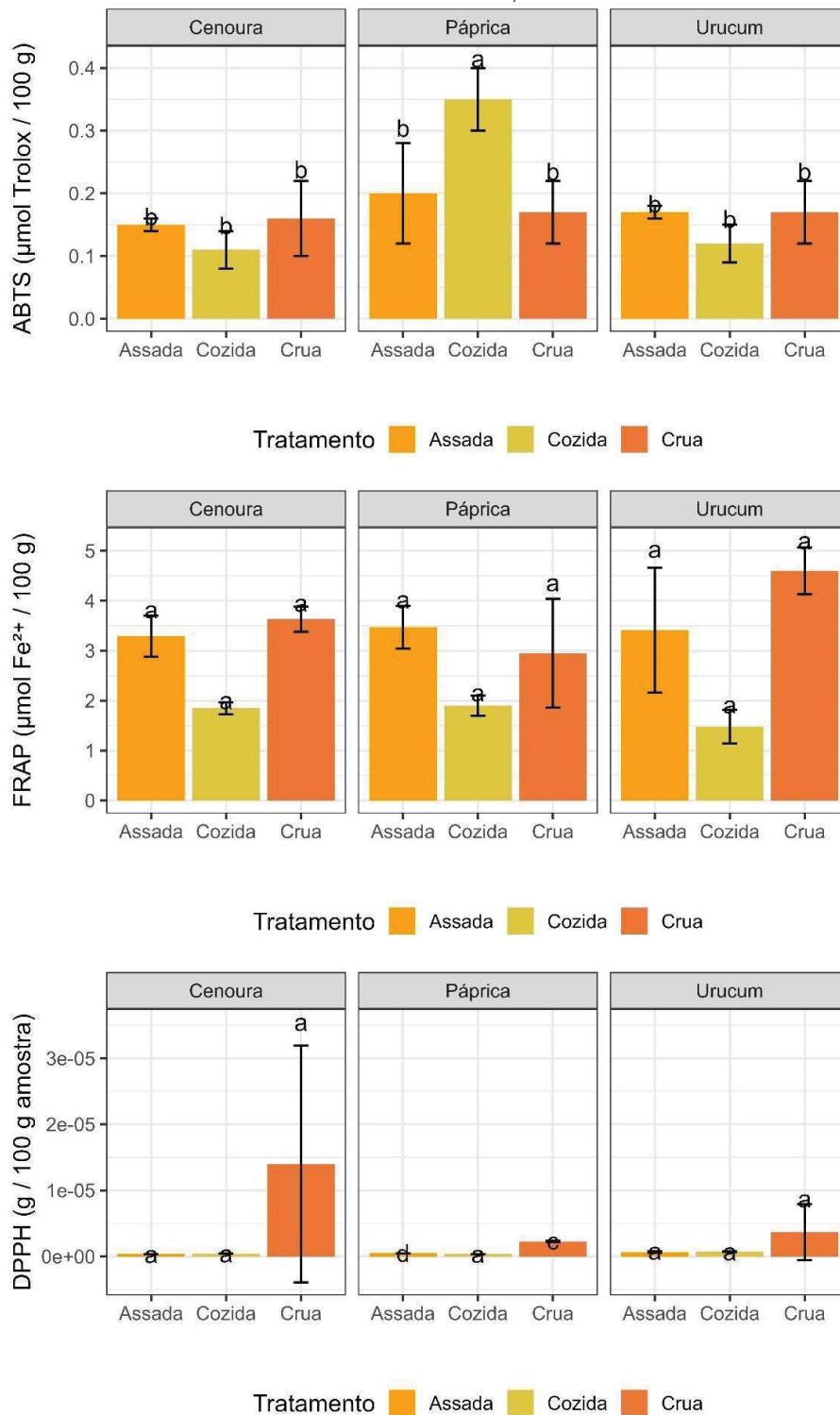
Entre os pigmentos avaliados, a amostra contendo cenoura crua apresentou a maior atividade antioxidante, destacando-se das demais. Isso pode ser explicado pela quantidade de  $\beta$ -caroteno presente em sua composição frente ao DPPH. Porém, após o tratamento térmico houve uma queda considerável, indicando forte degradação térmica destes compostos. Esse comportamento já foi observado quando há oxidação ou isomerização de carotenoides livres, reduzindo sua atividade antioxidante (NARWOJSZ et al., 2024). Na FIGURA 21 são apresentados os valores encontrados para DPPH graficamente.

As amostras contendo urucum cruas apresentaram atividade intermediária, com desvio-padrão elevado, resultado visto quando há elevado teor de bixina e norbixina. Ainda assim, o padrão de redução após o aquecimento se manteve com valores inferiores. Sendo assim, o urucum mostrou-se menos resistente ao processamento térmico, provavelmente devido à sensibilidade da bixina à temperatura, especialmente em condições oxidativas.

Por outro lado, as amostras contendo páprica cruas apresentaram o menor valor. As formas cozidas e assadas apresentaram redução da atividade antioxidante, refletindo a degradação térmica da capsantina e capsaicina, compostos majoritários da páprica. Apesar disso, as amostras formuladas com páprica assadas mantiveram valores mais elevados em comparação às amostras cozidas, associando a menor lixiviação de compostos antioxidantes em processos sem água, já que tendem a concentrar pigmentos, enquanto o cozimento facilita a perda para o meio aquoso (NARWOJSZ et al., 2024).

Os resultados reforçam que o tratamento térmico afeta diretamente a disponibilidade e reatividade antioxidante dos pigmentos incorporados. A intensidade do efeito depende do pigmento utilizado, do tipo de compostos antioxidantes presentes e da sensibilidade térmica de cada um.

FIGURA 20 – GRÁFICO REFERENTE À ANÁLISE DE ANTIOXIDANTES DAS AMOSTRAS CONTENDO EXTRATO DE CENOURA, PÁPRICA E URUCUM



FONTE: A autora (2025).

Conforme observado na TABELA 9, a análise revelou diferença estatística apenas para uma das amostras avaliadas. Somente a amostra contendo páprica submetida ao cozimento apresentou valor superior ( $p < 0,05$ ) compondo isoladamente o grupo a, enquanto todas as demais amostras, independente do pigmento de composição, permaneceram no grupo b, sem diferença significativa entre si. Esses resultados indicam que dentro das condições avaliadas, apenas o cozimento da amostra contendo páprica elevou de maneira consistente a capacidade de redução do radical ABTS, enquanto os demais binômios tratamento x pigmento não promoveram mudanças estatisticamente detectáveis.

O aumento observado para a amostra contendo páprica cozida está alinhado ao relatado mediante aquecimento moderado, onde pode favorecer a liberação de carotenoides e compostos fenólicos ligados a matriz de pigmentação, além de gerar produtos de degradação com maior reatividade frente ao radical ABTS (FERRANDO et al., 2021; NARRA et al., 2022). A capsantina, capsorubina e capsaicina, carotenoides presentes na páprica, exibem maior estabilidade térmica em comparação aos carotenoides encontrados no urucum e na cenoura, explicando a resposta diferenciada do pigmento ao tratamento térmico.

Para as amostras contendo cenoura e urucum, observa-se médias numéricas variadas entre cru, assada e cozida, essas diferenças não foram estatisticamente significativas. Esse padrão sugere que as perdas de atividade antioxidante por degradação térmica (por exemplo bixina, norbixina e  $\beta$ -caroteno) e ganhos causados pelo equilíbrio na liberação de compostos bioativos. Estudos sobre cenoura mostram que diferentes modos de aquecimento alteram tanto o perfil de carotenoides quanto o conteúdo de fenólicos solúveis e capacidade antioxidante aparente, o que gera respostas dependentes do método e intensidade do tratamento (NARWOJSZ et al., 2025; OSPINA et al., 2024). Para as amostras contendo urucum, análises de degradação térmica e cinética indicam que a presença de água acelera a perda de carotenoides livres por oxidação e hidrólise, enquanto certos componentes exibem comportamento dependente do meio (SANTOS et al., 2021. ZAPATA, 2021). Logo, a equivalência estatística observada entre os tratamentos pode refletir o balanço entre essas perdas e ganhos em cada pigmento.

Na FIGURA 20 são apresentados os valores para determinação de ABTS graficamente.

Os valores baixos observados na FIGURA 20 para as análises antioxidantes podem ser atribuídos à baixa concentração de pigmentos presentes nas amostras que são a principal fonte de compostos com capacidade redutora e de eliminação de radicais livres. Como os carotenoides e outros pigmentos bioativos são os componentes principalmente responsáveis pela atividade antioxidante, sua menor disponibilidade resulta diretamente em respostas analíticas mais baixas nos métodos aplicados. Assim, os resultados obtidos refletem não apenas a sensibilidade das metodologias empregadas, mas também a composição intrínseca da amostra, cuja baixa pigmentação limita o potencial antioxidante mensurável.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a impressão 3D é uma tecnologia viável e promissora para a produção de carnes à base de plantas, permitindo o controle de propriedades físicas, químicas e visuais do produto final. A formulação desenvolvida apresentou adequada estabilidade durante o processo de extrusão, possibilitando a obtenção de estruturas homogêneas e bem definidas. Verificou-se que os tratamentos térmicos exerceram influência significativa sobre a composição dos produtos, com aumento da concentração de sólidos nas amostras assadas e maior retenção de umidade nas amostras cozidas. As amostras cruas apresentaram maior preservação de lipídios, fenólicos totais e atividade antioxidante, evidenciando a sensibilidade desses compostos à aplicação de calor. A caracterização instrumental de cor indicou comportamento semelhante ao de produtos cárneos convencionais, reforçando o potencial da impressão 3D para a obtenção de alimentos visualmente comparáveis à carne. Dessa forma, a impressão 3D aplicada a alimentos destaca-se como uma alternativa tecnológica relevante para o desenvolvimento de produtos vegetais sustentáveis, nutricionalmente equilibrados e funcionalmente adequados, especialmente quando associada ao uso de pigmentos naturais.

Para trabalhos futuros recomenda-se a otimização da formulação quanto à textura e sabor, a ampliação das análises sensoriais e a avaliação da estabilidade do produto durante o armazenamento visando a viabilidade comercial e aceitação do consumidor.

## REFERÊNCIAS

- ABEDI-FIROOZJAH, R.; PARANDI, E.; HEYDARI, MAHSHID; KOLAHDOUZ-NASIRI, A.; BAHRAMINEJAD, M.; MOHAMMADI, R.; ROUHI, M.; GARAVAND, F. Betalains as promising natural colorants in smart/active food packaging. *Food Chemistry*. Vol. 424. Oct 2023. <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136408>>
- ABLIZ, A.; LIU, J.; GAO, Y. Effect of dynamic high pressure microfluidization on physical properties of goji juice, mango and carrot puree. *E3S Web Conf*. Vol. 189. 2020. <<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018902027>>
- AKAN, S.; GUNES, N. T.; ERKAN, M. Red beetroot: Health benefits, production techniques, and quality maintaining for food industry. *Journal of Food Processing and Preservation*. Vol. 45. Jul. 2021. <<https://doi.org/10.1111/jfpp.15781>>
- AKYAZI, T.; GOTI, A.; OYARBIDE, A.; ALBERDI, E.; BAYON, F. A guide for the Food Industry to meet the future skills requirements emerging with Industry 4.0. *MDPI – Foods*. Vol. 9. 2020. <<http://dx.doi.org/10.3390/foods9040492>>
- ALINAQUI, Z. et al. Black Pea Protein Extraction and Investigation of Physicochemical Characteristics. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2025. <https://doi.org/10.1155/jfpp/2966339>
- AOAC – Association of Official Analytical Chemists. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 17. Ed. Washington: AOAC, 2000.
- APTE, M.; NADAVADE, N.; SHEIKH, S. S. A review on nitrates' health benefits and disease prevention. *Nitric Oxide*. V.142. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2023.11.003>
- ARTEAGA, V. G.; KRAUS, S.; SCHOTT, M.; MURANYI, I.; SCHWEIGGERT-WEIZ, U.; EISNER, P. Screening of twelve pea (*Pisum sativum* L.) cultivars and their isolates focusing on the protein characterization functionality, and sensory profiles. *MDPI – Foods*. Vol. 10. Apr. 2021. <<https://doi.org/10.3390/foods10040758>>
- BAIANO, A. 3D Printed Foods: A comprehensive review on Technologies, nutritional value, safety, consumer attitude, regulatory framework, and economic and sustainability issues. *Food Reviews International*. Vol. 38. 2022. <<https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1762091>>
- BAJRANG, L. A review study on benefits of turmeric. *Academica*. Vol. 11. 2022. <DOI: <http://dx.doi.org/10.5958/2249-7137.2021.02653.7>>
- BENKOVIĆ, M. et al. An overview of ingredients used for plant-based meat analogue production and their influence on structural and textural properties of the final product. *Gels*, v. 9, n. 12, p. 921, 2023. DOI: 10.3390/gels9120921.
- BOACHIE, R. T.; ALUKO, R. E. Plant-Based Meat Analogues: Processing, Product Safety, Protein Quality, and Contributions to Environmental Sustainability. *Sustainable Food Proteins*, v. 3, e70018, 2025. DOI: 10.1002/sfp2.70018

BOUKID F.; ROSSEL, C. M.; CASTELLARI, M. Pea protein ingredients: A mainstream ingredient to (re)formulate innovative foods and beverages. *Trends in Food Science and Technology*. Vol. 110. Apr. 2021.

<<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.040>>

BOYE, J. I.; ARCAND, Y.; LAGACÉ, L. Pulses as sustainable protein sources: nutritional, functional and health perspectives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, Boca Raton, v. 65, n. 4, p. 1–22, 2025. DOI: 10.1080/10408398.2024.2334567

BRASIL. Decreto nº 9.013, de 29 de março de 2017. Regulamenta a Lei nº 1.283, de 18 de dezembro de 1950, e a Lei nº 7.889, de 23 de novembro de 1989, que dispõem sobre a inspeção industrial e sanitária de produtos de origem animal. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 mar. 2017. Disponível em:

<[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/decreto/d9013.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/d9013.htm)>

CECLU, L.; NISTOR, O. Red Beetroot: Composition and Health effects – A review. *Journal of Nutritional Medicine and Diet Care*. 2020. <DOI: 10.23937/2572-3278.1510043>

CHANG, C. C.; YANG, M. H.; WEN, H. M.; CHERN, J. C. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drugs Analysis*. V.10. 2002. DOI: 10.38212/2224-6614.2748

CHAO, C.; PARK, H. J.; KIM, H. W. Effect of L-cysteine on functional properties and fibrous structure formation of 3D-printed meat analogs from plant-based protein. *Food Chemistry*. Vol. 439. May. 2024.

<<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137972>>

CHEN, Y.; ZHANG, M.; BHANDARI, B. 3D printing of steak-like foods based on textured soybean protein. *MDPI – Foods*. Vol. 10. Aug. 2021.

<https://doi.org/10.3390/foods10092011>

CHEN, T. et al. Effects of Reducing Sugars on the Structural and Flavor Properties of the Maillard Reaction Products of Lycium barbarum Seed Meal. *Foods*. 2023. DOI: 10.3390/foods12234346

CHENG, Z.; QIU, Y.; BIAN, M.; HE, Y.; XU, S.; LI, Y.; AHMAD, I. DING, Y.; LYU, F. Muscle fibrous structural design of plant-based meat analogs: Advances and challenges in 3D printing technology. *Trends in Food Science and Technology*. Vol. 147. May. 2024. <<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104417>>

CHODKOWSKA, K. A.; WÓDZ, K.; WOJCIECHOWSKI, J. Sustainable future protein food: The challenges and the future of cultivated meat. *MDPI – Foods*. Vol. 11. Nov. 2022. <<https://doi.org/10.3390/foods11244008>>

CHOI, S. et al. Comparative Evaluation of the Antioxidant and Immunomodulatory Activities of Carrot (*Daucus carota* L.) Aerial Parts and Roots Using Different Extraction Methods. *MDPI: Foods*. 2025. <https://doi.org/10.3390/foods14233993>

- DABA, S. D.; MORRIS, C. F. Pea proteins: Variation, composition, genetics, and functional properties. *Cereal Chemistry*. Vol. 99. Apr. 2021. <<https://doi.org/10.1002/cche.10439>>
- DAMODARAN, S. Química de alimentos de Fennema [recurso eletrônico] / Srinivasan Damodaran, Kirk L. Parkin, Owen R. Fennema; tradução Adriano Brandelli... [et al.] – 4. Ed. – Dados eletrônicos. Porto Alegre: Artmed, 2010.
- DAMBROSIO, A. et al. Occurrence and Characterization of Microplastics in Commercial Mussels (*Mytilus galloprovincialis*) from Apulia Region (Italy). *Foods*. V. 12. I. 7. 2023. <<https://doi.org/10.3390/foods12071495>>
- DE MARCHI, M.; COSTA, A.; POZZA, M.; GOI, A.; MANUELIAN, C. L. Detailed characterization of plant-based burgers. *Scientific Reports*. 2021. <<https://doi.org/10.1038/s41598-021-81684-9>>
- DEROSSI, A. et al. Personalized, digitally designed 3D printed food towards the reshaping of food manufacturing and consumption. *NPJ Science Food*. V. 8. 2024. <<https://doi.org/10.1038/s41538-024-00296-5>>
- DICK, A.; DONG, X.; BHANDARI, B.; PRAKASH, S. The role of hydrocolloids on the 3D printability of meat products. *Food Hydrocolloids*. Vol. 119. Oct. 2021. <<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106879>>
- DINANI, S. T. et al. Quality improvement of plant-based meat alternatives by hydrocolloids and salts. *European Food Research and Technology*, v. 249, p. 271–282, 2023. DOI: 10.1007/s00217-023-04244-7.
- DONG, H.; WANG, P.; YANG, Z.; XU, X. 3D printing based on meat materials: Challenges and opportunities. *Current Research in Food Science*. Vol. 6. Dec. 2023. <<https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.100423>>
- ELTOUM, M. S. A.; ELFAKI, A. A. M. Extraction, characterization, and usage of turmeric curcumin for color coating of metronidazole tablets. *Highlights in BioScience*. Vol. 3. Jun. 2020. <DOI: 10.36462/H.BioSci.20206>
- FABRI, E. G.; TERAMOTO, J. R. S. Urucum: fonte de corantes naturais. *Horticultura Brasileira*. Vol. 33. Mar. 2015. <<https://doi.org/10.1590/S0102-053620150000100023>>
- FERRANDO, B. O.; BAENAS, N.; PERIAGO, M. J. Changes in carotenoids and quality parameters of sweet paprika (*Capsicum annuum*) after an accelerated heat treatment. *Antioxidants*, v. 13, n. 12, p. 1492, 2024. <<https://doi.org/10.3390/antiox13121492>>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022*. Roma: FAO, 2022.
- FU, Y.; SHI, J.; XIE, S. Y.; ZHANG, T. Y.; SOLADOYE, O. P.; ALUKO, R. E. Red beetroot betalains: Perspectives on extraction, processing, and potential health benefits. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. Vol. 68. Oct. 2020. <<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04241>>

GARCIA, C. E. R.; BOLOGNESI, V. J.; DIAS, J. F. G.; MIGUEL, O. G.; COSTA, C. K. Carotenoides bixina e norbixina extraídos do urucum (*Bixa orellana*) como antioxidantes em produtos cárneos. *Ciência Rural*. Vol. 8. Ago. 2012. <<https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000800029>>

GAO, Y. et al. Impacto f thermal processing on dietary flavonoids. *Current Opinion in Food Science*. V. 48. 2022. <<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100915>>

GONZÁLES-CORIA, J. et al. Chemometric study on the effect of cooking on bioactive compounds in tomato pomace enriched sauces. *Npj Science of Food*. V. 8. 2024. <<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.761145>>

GRAINS RESEARCH & DEVELOPMENT CORPORATION. Field Pea Crop Improvement Plan. 2025. Canberra: GRDC, 2025.

GRAND VIEW RESEARCH. Pea Protein Market Size, Share & Trends Analysis Report. San Francisco, 2024.

GRONROOS, R.; EGGERTSEN, R.; BERNHARDSSON, S.; BJORK, M. P. Effects of beetroot juice on blood pressure in hypertension according to European Society of Hypertension Guidelines: A systematic review and meta-analysis. *Nutr., Metab. And Card. Diseases*. V. 34. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2024.06.009>

HASSOUN, A.; PRIETO, N. A.; CARPENA, M.; BOUZEMBRAK, Y.; MARVIN, H. J. P.; PALLARÉS, N.; BARBA, F. J.; BANGAR, S. P.; CHAUDHARY, V.; IBRAHIM, S.; BONO, G. Exploring role of green and Industry 4.0 technologies in achieving sustainable development goals in food sectors. *Food Research International*. Vol. 162. Dec. 2022. <<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112068>>

HASSOUN, A. et al. From Food Industry 4.0 to Food Industry 5.0: Identifying technological enablers and potential future applications in the food sector. *Comp. Rev. in Food Scie. And Food Safety*. V. 23. 2024. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70040>

HIRKO, B.; GETU, A. *Bixa orellana* (Annatto Bixa): A review on use structure, extraction methods and analysis. *Journal of Agronomy, Technology and Engineering Management*. Vol. 5. Feb. 2022.

HUANG, M.; MEHANY, T.; XIE, W.; LIU, X.; GUO, S.; PENG, X. Use of food carbohydrates towards the innovation of plant-based meat analogs. *Trends in Food Science and Technology*. Vol. 129. Nov. 2022. <<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.09.021>>

HUSENOVICH, A. et al. Effective Technology For Obtaining Carrot Dye. *European Journal of Molecular and Clinical Medicine*. V.8. 2021.

HUSSAIN, S.; MALAKAR, S.; ARORA, V. K. S. Ectrusion-based 3D food printing: Technological approachers, material characteristics, printing stability, and post-processing. *Food Engineering Reviews*. Vol. 14. Aug. 2021. <<https://doi.org/10.1007/s12393-021-09293-w>>

- IANOVICI, I.; ZAGURY, Y.; REDENSKI, I.; LAVON, N.; LEVENBERG, S. 3D-printable plant protein-enriched scaffolds for cultivated meat development. *Biomaterials*. Vol. 284. May. 2022.  
<<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2022.121487>>
- IZHAM, I.; AVIN, F.; RASEETHA, S. Systematic Review: Heat Treatment on Phenolic Content, Antioxidant Activity, and Sensory Quality of Malaysian Mushroom: Oyster (*Pleurotus* spp.) and Black Jelly (*Auricularia* spp.). *Front. Sustain. Food Syst.* V. 6. 2022.
- JEONG, D.; JANG, G.; JUNG, W. K.; PARK, Y. H.; BAE, H. Stretchable zein-coated alginate fiber for aligning muscle cells to artificially produce cultivated meat. *NPJ Science of Food*. Vol. 8. Feb. 2024. <<https://doi.org/10.1038/s41538-024-00257-y>>
- KAKANI, V.; NGUYEN, V. H.; KUMAR, B. P.; KIM, H.; PASUPULETI, V. R. A critical review on computer vision and artificial intelligence in food industry. *Journal of Agriculture and Food Research*. Vol. 2. Feb. 2020.  
<<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100033>>
- KAYAHAN, S.; SALOGLU, D. Comparison of Phenolic Compounds and Antioxidant Activities of Raw and Cooked Turkish Artichoke Cultivars. *Front. Sustain. Food Syst.* 2021. <<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.761145>>
- KERAMAT, M.; EHSANDOOST, E.; GOLMAKANI, M.-T. Recent Trends in Improving the Oxidative Stability of Oil-Based Food Products by Inhibiting Oxidation at the Interfacial Region. *Foods*, v. 12, n. 6, p. 1191, 2023.  
<<https://doi.org/10.3390/foods12061191>>
- KESKIN, A. O.; ALI, T. M.; AHMED, J.; SHAIKH, M.; SIDDIQ, M.; UEBERSAX, M. A. Physico-chemical and functional properties of legume protein, starch, and dietary fiber – A review. *Legume Science*. Vol. 4. Jul. 2021.  
<<https://doi.org/10.1002/leg3.117>>
- KIM, W. "Toward diverse plant proteins for food innovation." *Advanced Science*, 2024. <https://doi.org/10.1002/advs.202408150>
- KLISOVIC, D. et al. Thermal-Induced Alterations in Phenolic and Volatile Profiles of Monovarietal Extra Virgin Olive Oils. *MDPI – Foods*. V.13. 2024.  
<https://doi.org/10.3390/foods13213525>
- KOHLI, V.; SINGHA, S. Protein digestibility of soybean: how processing affects seed structure, protein and non-protein components. *Discover Food*. V.4.
- KOLAŠINAC, S. et al. Carotenoids in Paprika Fruits and Ajvar: Chemical Characterization and Biological Activity. *MDPI: Foods*. V.14. 2025.  
<https://doi.org/10.3390/foods14060914>
- KUDELKA, W.; KOWALSKA, M.; POPIS, M. Quality of soybean products in terms of essential amino acids composition. *MDPI – Molecules*. Vol. 26. Aug. 2021.  
<<https://doi.org/10.3390/molecules26165071>>

KUSKOSKI, E.M.; ASUERO, A.G.; TRONCOSO, A.M.; MANCINI-FILHO, J.; FETT, R. Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.25, n.4, p.726-732, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612005000400016>

KUMAR, P.; CHATLI, M. K.; MEHTA, N.; SINGH, P.; MALAV, O. P.; VERMA, A. K. Meat analogues: Health promising sustainable meat substitutes. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Vol. 57. Dec. 2016. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.939739>

KUMAR, R.; KUMAR, P.; YADAV, D. N. Effect of baking conditions on moisture migration, crust formation and textural attributes of baked products. *LWT – Food Science and Technology*, v. 183, p. 115093, 2023. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.115093

KUMAR, P. et al. Technological interventions in improving the functionality of proteins during processing of meat analogs. *Front. Nutr.* V. 9. 2022. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1044024>

LEE, J.; CHOI, I.; HAN, J. Construction of rice protein-based meat analogues by extruding process: Effect of substitution of soy protein with rice protein on dynamic energy, appearance, physicochemical, and textural properties of meat analogues. *Food Research International*. Vol. 161. Nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111840>

LI, G.; GUO, W.; GAO, X.; WANG, Y.; SUN, S. Effect of superfine grinding on physicochemical and antioxidante properties of soybean residue poder. *Food Science and Nutrition*. Vol. 8. Jan. 2020. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1409>

LI, R.; RAAK, N.; ROMAN, L. Recent Advances in Processing-Induced Changes in the Structure, Techno-Functional Properties and Nutritional Quality of Animal- and Plant-Based Food Proteins. MDPI: *Foods*. 2025. <https://doi.org/10.3390/foods14050764>

LIANG, R.; SHOEMAKER, C. F.; YANG, X.; ZHONG, F.; HUANG, Q. Stability and Bioaccessibility of  $\beta$ -Carotene in Nanoemulsions Stabilized by Modified Starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Vol. 61. 2013. <https://doi.org/10.1021/jf303967f>

LIN, S.; XIAO, J. Chapter One – Impact of thermal processing on dietary flavonoids. *Advances in Food and Nutrition Research*. V. 108. 2024. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2023.10.002>

LIU, Y.; MA, X.; SHU, L.; HANCKE, G. P.; ABU-MAHFOUZ, A. M. From industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current status, enabling Technologies, and reserarch challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. Vol. 17. Jun. 2021. <DOI: 10.1109/TII.2020.3003910>

LU, Z. X.; HE, J. F.; ZHANG, Y. C.; BING, D. J. Composition, physicochemical properties of pea protein and its application in functional foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Vol. 60. Aug. 2019. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651248>

- MA, Y.; ZHANG, L. Formulated food inks for extrusion-based 3D printing of personalized foods: a mini review. *Current Opinion in Food Science*. Vol. 44. Apr. 2022. <<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.12.012>>
- MADADI, E.; MAZLOUM-RAVASAN, S.; YU, J. S.; HÁ, J. W.; HAMISHEHKAR, H.; KIM, K. H. Therapeutic application of betalains: A review. Vol. 9. Sep. 2020. <<https://doi.org/10.3390/plants9091219>>
- MAHARJAN, S. et al. 3D bioprinting of plant and animal cell-based hybrid food. *Nature Communications*. V.16. 2025. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61996-4>
- MAHMUD, N.; ISLAM, J.; TAHERGORABI, R. Utilizing foam-structured hydroxypropyl methylcellulose oleogels with curcumin for deep-fried chicken nuggets in carnauba wax-canola oil oleogel. *Journal of Agriculture and Food Research*. V. 18. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101364>
- MALAGHINI, C. M. E.; FERREIRA, B. C. F.; PIEREZAN, M. D.; MANASSE, C. F.; VERRUCK, S. Impressão 3D de alimentos: Utilização de farinha de inseto como fonte alternativa de proteínas em produtos de cereais. *Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos*. Vol. 6. 2022. <DOI: 10.37885/220207572>
- MALAV, O. P.; TALUKER, S.; GOKULAKRISHNAN, P.; CHAND, S. Meat analog: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Vol. 55. Mar. 2015. <<https://doi.org/10.1080/10408398.2012.689381>>
- MALDONADE, I. R. et al. Protocolo para determinação de açúcares totais em hortaliças pelo método DNS. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2013. (Embrapa Hortaliças: Comunicado Técnico, 85).
- MALILA, Y. et al. Current challenges of alternative proteins as future food. *NPJ Science of Food*. V. 8. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41538-024-00291-w>
- MANCINI, R. A.; HUNT, M. C. Current research in meat color. *Meat Science*. V. 71, p. 100–121, 2005. <<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.03.003>>
- MARTINEZ, R. M. et al. Betalains: A Narrative Review on Pharmacological Mechanisms Supporting the Nutraceutical Potential Towards Health Benefits. *MDPI: Foods*. V.13. 2024. <https://doi.org/10.3390/foods13233909>
- MASYITA, A. et al. Natural pigments: innovate extraction technologies and their potential application in health and food industries. *Front. Pharmacol.* 2025. <<https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1507108>>
- MATA, I. R.; MATA, S. R.; MENEZES, R. C. R.; FACCIOLI, L. S.; BANDEIRA, K. K.; DAL BOSCO, S. M. Benefits of turmeric supplementation for skin health in chronic diseases: a systematic review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Vol. 61. 2020. <<https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1798353>>
- MEDIC, J.; ATKINSON, C.; HURBURGH JUNIOR, C. R. Current knowledge in soybean composition. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. Vol. 91. Jan. 2014. <<https://doi.org/10.1007/s11746-013-2407-9>>

MILANA, M.; VAN ASSELT, E. D.; VAN DER FELS-KLERX, H. J. A review of the toxicological effects and allergenic potential of emerging alternative protein sources. *Comp. Rev. in Food Scie. And Food Saf.* V. 24. 2025. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70123>

MITROVIĆ, J., et al. (2021). The effect of thermal processing on the content and antioxidant capacity of free and bound phenolics of cookies enriched by nettle (*Urtica dioica* L.) seed flour and extract. *Food Science and Technology (Campinas)*. DOI:10.1590/fst.62420.

MITTAL, S.; BHUIYAN, M. H. R.; NGADI, M. O. Challenges and Prospects of Plant-Protein-based 3D Printing. *MDPI: Foods*. 2023. DOI: 10.3390/foods12244490

MOLTENI, C.; LA MOTTA, C.; VALOPPI, F. Improving the Bioaccessibility and Bioavailability of Carotenoids by Means of Nanostructured Delivery Systems: A Comprehensive Review. *Antioxidants – MDPI*. V. 11. I. 10. 2022. <<https://doi.org/10.3390/antiox11101931>>

MONTANHA, G. S. et al. Profile of mineral nutrients and proteins in soybean seeds (*Glycine max* (L.) Merrill): Insights from 95 varieties cultivated in Brazil. *Journal of Food Composition and Analysis*. V. 134. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106536>

MOPARTHI, S. S.; KRISHNA L., G.; KARYAPPA, R.; UPADHYAY, R. 3D printed meat and the fundamental aspects affecting printability. *Journal of Texture Studies*. Vol. 55. Sep. 2023. <<https://doi.org/10.1111/jtxs.12805>>

MOREIRA, S. V.; REBOUÇAS, T. K. H.; de MORAES, M. O. B.; REBOUÇAS, A. S. J.; MARCONDES, V. S. Atividade antioxidante de urucum (*Bixa orellana* L.) in natura e encapsulado. *Revista Iberoamericana de Tecnologia Postcosecha*. Vol. 15. Dec. 2014. <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81333269011>>

MOSTAFA, H. S. HASHEM, M. M. Microalgae as a source of carotenoids in foods, obstacles and solutions. *Phytochem Rev.* V. 24. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11101-024-10039-9>

MOTEGAONKAR, S.; SHANKAR, A.; TAZEEN, H.; GUNJAL, M.; PAYYANAD, S. A comprehensive review on carrot (*Daucus carota* L.): the effect of different drying methods on nutritional properties and its processing as value-added foods. *Sustainable Food Technology*. 2024. DOI: 10.1039/D3FB00162H

MRIDUL, A. Steakholder Foods's 3D-Printed Plant-Based Seafood Makes Retail Debut in Israel. 2024. Disponível em: [https://www.greenqueen.com.hk/steakholder-foods-3d-printed-vegan-salmon-fish-seafood-israel/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.greenqueen.com.hk/steakholder-foods-3d-printed-vegan-salmon-fish-seafood-israel/?utm_source=chatgpt.com)

MUNEKATA, P. E. S.; PATEIRO, M.; ZHANG, W.; DOMINGUEZ, R.; XING, L.; FIERRO, E. M.; LORENZO, J. M. Health benefits, extraction and development of functional foods with curcuminoids. *Journal of Functional Foods*. Vol. 79. Apr. 2021. <<https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104392>>

- NARRA, F. et al. Impact of thermal processing on polyphenols, carotenoids, glucosinolates, and ascorbic acid in fruit and vegetables and their cardiovascular benefits. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2024. DOI: 10.1111/1541-4337.13426
- NARWOJSZ, A.; SAWICKI, T.; PILAT, B.; TANSKA, M. Effect of Heat Treatment Methods on Color, Bioactive Compound Content, and Antioxidant Capacity of Carrot Root. *Applied Sciences.* V. 15. I. 1. 2025. <https://doi.org/10.3390/app15010254>
- NEJI, C.; SEMWAL, J.; KAMANI, M. H.; MÁTHÉ, E.; SIPOS, P. Legume protein extracts: The relevance of physical processing in the context of structural, techno-functional and nutritional aspects of food development. *Processes*, v. 10, 2022, art. 2586. 2022. DOI:10.3390/pr10122586
- NELSON, D. L., COX, M. M. *Lehninger Principles of Biochemistry.* 8<sup>a</sup> ed. W. H. Freeman, 2021.
- NEZLEK, J. B.; FORESTELL, C. A. Vegetarianism as a social identity. *Current Opinion in Food Science.* Vol. 33. Jun. 2020. <<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.12.005>>
- NG, W. L.; SACHDEVA, K.; CONWAY, P. L.; WUERTZ, S.; BARTOLO, P. Advanced 3D (Bio)Printing Strategies for Cultivated Meat Fabrication. *Journal of Future Foods.* 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2025.07.031>
- NGUYEN, M. L.; ZHANG, Y.; CHEN, Z. Thermal degradation kinetics and antioxidant activity of carotenoids from annatto (*Bixa orellana* L.) extracts. *LWT – Food Science and Technology*, v. 161, 2022. <<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113304>>
- NIKOLAOU, E. N. et al. The Development and Optimization of Extrusion-Based 3D Food Printing Inks Using Composite Starch Gels Enriched with Various Proteins and Hydrocolloids. *MDPI: Gels.* V. 11. 2025. <https://doi.org/10.3390/gels11080574>
- NING, X. et al. Understanding 3D food printing through computer simulation and extrusion force analysis. *Journal of Food Engineering.* V. 370. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.111972>
- NOGUEROL, A. T. et al. The effect of psyllium (*Plantago ovata* Forsk) fibres on the mechanical and physicochemical characteristics of plant-based sausages. *European Food Research and Technology*, v. 248, p. 2081–2092, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04063-2>
- NOSWORTHY, M. G.; MEDA, V.; HOUSE, J. D. Pea protein: nutritional quality, functionality, and applications in plant-based foods. *Foods, Basel*, v. 13, n. 7, p. 1–18, 2024. DOI: 10.3390/foods13071151
- NOVAIS, C. et al. Natural Food Colorants and Preservatives: A Review, a Demand, and a Challenge. *Journal of Agriculture and Food Chemistry.* 2022. <<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07533>>
- O'FLYNN, T. D.; HOGAN, S. A.; DALY, D. F. M.; MAHONY, J. A.; MCCARTHY, N. A. Rheological and solubility properties of soy protein isolate. *MDPI – Molecules.* Vol. 26. May 2021. <<https://doi.org/10.3390/molecules26103015>>

OH, M. S.; LEE, J. S.; PARK, S. Y. Effect of paprika powder on the antioxidant capacity and meat quality of sausages. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, v. 44, n. 5, p. 1126–1136, 2024. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2024.e103>

OLIVEIRA, C. F.; ANDRADE, F. C. S.; OLIVEIRA, G. N.; SOUZA, J. A. L.; ALMEIDA, V. L.; MORAIS, M. O. A indústria 4.0 e os aplicativos de entrega de alimentos. *Journal of Technology and Information*. Vol. 3. Feb. 2023. <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.7671672>

OLIVEIRA, H. S. H. et al. Caracterização e utilização do carotenoide bixina, extrato da semente do urucum (*Bixa Orellana* L.) como agente pigmentante nas dietas de animais não-ruminantes/ Characterization and use of the carotenoid bixin, urucum seed extract (*Bixa Orellana* L.) as a pigmenting agente in diets for non-ruminant animals. *Brazilian Journal of Development*. V.7. 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n6-703>

OPAZO-NAVARRETE, M.; BURGOS-DÍAZ, C.; BRAVO-REYES, C.; GAJARDO-POBLETE, I.; CHACÓN-FUENTES, M.; REYES, J. E.; MOJICA, L. Comprehensive Review of Plant Protein Digestibility: Challenges, Assessment Methods, and Improvement Strategies. *Applied Sciences*, v. 15, n. 7, p. 3538, 2025. DOI: 10.3390/app15073538

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA (FAO). 2021.

OSPINA, M. A. et al. Kinetics of thermal degradation of carotenoids related to potential of mixture of wheat, cassava and sweet potato flours in baking products. *J Sci Food Agric*. 2024. DOI: 10.1002/jsfa.12831

OUTREQUIN, T. C.; GAMONPILAS, C.; SIRIWATWECHAKUL, W.; SREEARUNOTHAI, P. Extrusion-based 3D printing of food biopolymers: A highlight on the important rheological parameters to reach printability. *Journal of Foods Engineering*. V. 342. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111371>

PASCHOAL, R. G; VIÇOSA, A. L.; SUAREZ-FONTES, A. M.; VANNIER-SANTOS, M. A.; MOREIRA, D. L. Desenvolvimento de metodologia analítica por cromatografia em fase líquida de alta eficiência para quantificação em curcuminoides. *Revista Virtual de Química*. Vol. 13. Mar. 2021. <https://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20210064>

PENNA, A. C. G.; DURÇO, B. B.; MÁRSICO, E. T.; SILVA, A. C. O.; ESMERINO, E. A. Aplicabilidade de corantes naturais como alternativas ao uso de aditivos sintéticos em produtos lácteos. *Alimentos: Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente*. Vol. 2. 2021.

PERES, F. A. P. et al. Advances in Food Quality Management Driven by Industry 4.0: A Systematic Review-Based Framework. *MDPI: Foods*. V. 14. 2025. <https://doi.org/10.3390/foods14142429>

PÉREZ, N. S. V.; RAMÍREZ-SOLETO, G.; YÁNEZ-FERNÁNDEZ, J.; CASTRO-RODRÍGUEZ, C. Role of Thermal Process on the Physicochemical and Rheological Properties and Antioxidant Capacity of a New Functional Beverage Based on

Coconut Water and Rice Flour. ACS Omega. V.8 N.21. 2023.  
<<https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01761>>

PI, X.; SUN, Y.; FU, G.; WU, Z.; CHENG, J. Effect of processing on soybean allergens and their allergenicity. Trends in Food Science and Technology. Vol. 118. Dec. 2021. <<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.006>>

PLOCINA, L.; BEITANE, I. Study of Amino Acid Profile and Solubility of Pea Protein Isolate for the Production of Beverages for Psychiatric Patients. Rural Sustainability Research. 2024. DOI: 10.2478/plua-2024-0009

QIN, P.; WANG, T.; LUO, Y. A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development. Journal of Agriculture and Food Research. Vol. 7. Mar. 2022. <<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100265>>

QIU, Y.; McCLEMENTS, D. J.; CHEN, J.; LI, C.; LU, C.; DAI, T. Construction of 3D printed meat analogs from plant-based proteins: Improving the printing performance of soy protein and gluten-based pastes facilitated by rice protein. Food Research International. Vol. 167. May. 2023. <<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112635>>

RAMACHANDRAIAH, K.; Potential development of sustainable 3D-Printed meat analogues: A review. MDPI – *Sustainability*. Vol. 13. Jan. 2021.  
<<https://doi.org/10.3390/su13020938>>

RATHNAYAKE, D.; LEE, J.; HONG, J. H. Colour transition dynamics of commercial plant-based burgers during cooking. Foods, Basel, v. 14, n. 2, p. 1–15, 2025.

DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14020318>

REUBEN, S. J.; CHANDRA, S.; PRAVEENA, B.; SANTHOSKUMAR, P.; MOSES, J. A. 3D printing of alternatives proteins> Approaches, challenges and advances. Sustainable Materials and Technologies. V. 43. 2025.  
<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01285>

RITOTA, M.; MELLONI, S.; CIANFRINI, G.; NARDUCCI, V.; RUGGERI, S.; TURFANI, V. Recent Advances in Inks for 3D Food Printing: A Review. MDPI: Applied Sciences. V.15. 2025. <https://doi.org/10.3390/app152211891>

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B.; ESQUIVEL, P.; MELÉNDEZ-MARTÍNEZ, A. J. Comprehensive Update on Carotenoid Colorant from Plants and Microalgae: Challenges and Advances from Research Laboratories to Industry. Foods (MDPI). 12(22). 2023. <<https://doi.org/10.3390/foods12224080>>

ROLFE, V.; MACKONCHIE, M.; MILLS, S.; MACLENNAN, E. Turmeric / curcumin and health outcomes: A meta-review of systematic reviews. European Journal of Integrative Medicine. Vol. 40. Dec. 2020.  
<<https://doi.org/10.1016/j.eujim.2020.101252>>

ROSSI, P. H. S.; FAVONI, S. P. G.; GIANNONI, J. A.; TRAVAGLINI, M.; PEREIRA, C. Utilização de corantes naturais em alimentos: Uma revisão. Revista Científica Multidisciplinar. Vol. 2. 2021. <<https://doi.org/10.47820/recima21.v2i11.941>>

SADOWSKA-BARTOSZ, I.; BARTOSZ, G. Biological properties and applications of betalains. MDPI – *Molecules*. Vol. 26. Apr. 2021.

<<https://doi.org/10.3390/molecules26092520>>

SÁNCHEZ-MORENO, C.; LARRAURI, J.A.; SAURA-CALIXTO, F. A procedure to measure the antiradical efficiency of polyphenols. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v.76, p.270-276. 1998. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199802\)76:2%3C270::AID-JSFA945%3E3.3.CO;2-0](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199802)76:2%3C270::AID-JSFA945%3E3.3.CO;2-0)

SANTOS, Ligiane Silva dos. Percepção dos consumidores em relação aos produtos análogos cárneos. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2022.

SANTOS, R. S. et al. Phytochemical prospecting, bixin content and allelopathic of *Bixa Orellana* L. *Brazilian Journal of Science*. V. 1. 2022.

<https://doi.org/10.14295/bjs.v1i12.243>

SANTOS, S. S.; SANTOS FILHO, S. J. A.; ENJIU, L. M.; BAPTISTA, A. S.; SANTOS, E. A. MORAIS, M. P.; GIANONI, R. L. S.; SIMÃO, A. L.; TRIGO, E. L.; CARNEVAL JÚNIOR, L. C. A suplementação com proteína da soja para a hipertrofia muscular. *Revista Revela*. Ed. 22. Jul. 2018.

SANTOS M. S. V.; SANTOS, D. E. L.; MOREIRA, J. J. S.; FLORÊNCIO, M. N. S.; OLIVEIRA JUNIOR, A. M. Prospecção tecnológica em bases de patentes com foco em corantes e pigmentos alimentícios obtidos de fontes naturais. *Research, Society and Development*. Vol. 10. Mar. 2021. <<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13603>>

SANTOS, N. S.; SILVA, F. L. A. T.; NETA, M. T. S. L. Corantes naturais: Importância e fontes de obtenção. *Revista Científica Multidisciplinar*. Vol. 3. 2022.

<<https://doi.org/10.47820/recima21.v3i3.1165>>

SANTOS, T. M. A.; OLIVEIRA, C. M.; MONTEIRO, L. R. Fluorescence quantum yields and lifetimes of annatto (*Bixa orellana*) aqueous solutions under heating.

*Current Research in Food Science*, v. 4, p. 256–262, 2021.

<<https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.03.008>>

SERETI, F. et al. Recent progress in carotenoid encapsulation: Effects on storage stability, bioaccessibility and bioavailability for advanced innovative food applications. *Food Research International*. V. 203. 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.115861>

SETIA, R.; DAI, Z.; NICKERSON, M. T.; SOPIWNYK, E.; MALCOLMSON, L.; AI, Y. Impacts of short-term germination on the Chemical compositions, technological characteristics and nutritional quality of yellow pea and faba bean flours. *Food Research International*. Vol. 122. Aug. 2019.

<<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.021>>

SHAHBAZI, M.; JAGER, H.; CHEN, J.; ETTALAIE, R. Construction of Food 3D printed reduced-fat meat analogue by emulsion gels. Part II: Printing performance, thermal, tribological, and dynamic sensory characterization of printed objects. *Food Hydrocolloids*. Vol. 121. Jul. 2021. <<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107054>>

- SHANTHAKUMAR, P.; KLEPACKA, J.; BAINS, A.; CHAWLA, P.; DHULL, S. B.; NAJDA, A. The current situation of pea protein and its application in the food industry. MDPI – *Molecules*. Vol. 27. Aug. 2022. <<https://doi.org/10.3390/molecules27165354>>
- SHEN, Y.; HONG, S.; LI, Y. Chapter Three – Pea protein composition, functionality, modification, and food applications: A review. *Advances in Food and Nutrition Research*. Vol. 101. Pag. 71-127. 2022. <<https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2022.02.002>>
- SHEN, Y.; HONG, S.; SINGH, G.; KOPPEL, K.; LI, Y. Improving functional properties of pea protein through “green” modifications using enzymes and polysaccharides. *Food Chemistry*. Vol. 385. Aug. 2022. <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132687>>
- SHI, H.; LI, J.; XU, E.; YANG, H.; LIU, D.; YIN, J. Microscale 3D printing of fish analogues using soy protein food ink. *Journal of Food Engineering*. Vol. 347. Jun 2023. <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111436>>
- SIDDIQUI, M. W. et al. Valorization of plant proteins for meat analogues design - A comprehensive review. *Food Reviews International*, 2024. DOI: 10.1080/87559129.2024.2333744.
- SINGLETARY, K. Turmeric Potential Health Benefits. *Nutrition Today*. Vol. 55. 2020. <DOI: 10.1097/NT.0000000000000392>
- SINGHAL, S. et al. 3D food printing: paving way towards novel foods. *An Acad Bras Cien*. V.92. 2020. DOI: 10.1590/0001-3765202020180737
- SLAWINSKA, N.; OLAS, B. The current state of knowledge about thermal processing of edible seeds; a special emphasis on their bioactive constituents and antioxidant activity. *Food Chemistry*. V. 458. 2024. <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140526>>
- SONG, D.; CHEN, X.; WANG, M.; WU, Z.; XIAO, X. 3D-printed flexible sensors for food monitoring. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 474. Oct. 2023. <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146011>>
- STEFANINI, R.; VIGNALI G. The influence of Industry 4.0 enabling technologies on social economic and environmental sustainability of the food sector. *International Journal of Production Research*. V.62. 2024. DOI: 10.1080/00207543.2023.2248523
- SUI, X.; ZHANG, T.; JIANG, L. Soy protein: Molecular structure revisited and recent advances in processing Technologies. *Annual Review of Food Science and Technology*. Vol. 12. Dec. 2021. <<https://doi.org/10.1146/annurev-food-062220-104405>>
- SUN, H.; SUN, J.; DOU, N.; LI, J.; HUSSAIN, M. A.; MA, J.; HOU, J. Characterization and comparison of structure, thermal and functional characteristics of various commercial pea proteins. *Food Bioscience*. Vol. 53. Jun. 2023. <<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102740>>

SWAIN, T.; HILLS, W. E. The phenolic constituents of *Punns domestica*. I. quantitative analysis of phenolics constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, London, v. 19, n. 1, p. 63-68, 1959. <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2740100110>

TANGER, C.; ENGEL, J.; KULOZIK, U. Influence of extraction conditions on the conformational alteration of pea protein extracted from pea flour. *Food Hydrocolloids*. Vol. 107. Oct. 2020. <<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105949>>

TAVARES, M. G. C.; MONTEIRO, R. F. M.; PINHEIRO, J. C.; ALMEIDA, O.; BASTOS, G. N. T.; BITENCOURT, H. R. As principais atividades de curcuminoides: uma revisão. *Research, Society and Development*. Vol. 11. Sep. 2022. <<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35452>>

THAIPONG, K.; BOONPRAKOB, U.; CROSBY, K.; CISNEROS-ZEVALLOS, L.; BYRNE, D.H. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*, v.19, p.669-675, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.01.003>

TEJADA-ORTIGOZA, V.; CUAN-URQUIZO, E. Towards the development of 3D-Printed food: A rheological and Mechanical Approach. *MDPI – Foods*. Vol. 11. Apr. 2022. <<https://doi.org/10.3390/foods11091191>>

TENG, X. ; LI, C. ; MUJUMDAR, A. S. ; ZHANG, M. Progress in Extrusion-Based Food Printing Technology for Enhanced Printability and Printing Efficiency of Typical Personalized Foods : A Review. *MDPI : Foods*. V. 11. 2022. <<https://doi.org/10.3390/foods11244111>>

TORRES-PÉREZ, R. et al. Enhancing Gluten-Free Bread Production: Impact of Hydroxypropylmethylcellulose, Psyllium Husk Fiber, and Xanthan Gum on Dough Characteristics and Bread Quality. *MDPI – Foods*. 2024. <<https://doi.org/10.3390/foods13111691>>

VALLIKKADAN, M. S.; DHANAPAL, L.; DUTTA, S.; SIVAKAMASUNDARI, S. K.; MOSES, J. A.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Meat alternatives: Evolution, structuring, techniques, trends, and challenges. *Food Engineering Reviews*. Vol. 15. Mar. 2023. <<https://doi.org/10.1007/s12393-023-09332-8>>

VARSHNEY, K.; MISHRA, K. An Analysis of Health Benefits of Carrot. *International Journal of Innovative Research in Engineering and Management*. V. 9. 2022. <https://doi.org/10.55524/ijirem.2022.9.1.40>

VERKEMPINCK, S. H. E. et al. Pea protein extraction method impacts the protein (micro)structural organisation and in vitro digestion kinetics. *Food Funct*. V. 15. 2024. DOI: 10.1039/D3FO04225A

WANG, T.; KAUR, L.; BENIWAL, A. S.; FURUHATA, Y.; AOYAMA, H.; SINGH, J. Physico-chemical and textural properties of 3D printed plant-based and hybrid soft meat analogs. *Plant for Human Nutrition*. Vol. 78. May 2023. <<https://doi.org/10.1007/s11130-023-01068-4>>

WANG T.; KAUR, L. FURUHATA, Y.; AOYAMA, H.; SINGH, J. 3D Printing of Textured Soft Hybrid Meat Analogues. MDPI – *Foods*. Vol. 11. Feb. 2022. <<https://doi.org/10.3390/foods11030478>>

WANG, X.; ZHANG, L.; CHEN, Y. Moisture migration and structural evolution of baked starchy foods: mechanisms and modeling approaches. *Food Chemistry*, v. 432, p. 137345, 2024. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.137345

WEN, Y.; CHAO, C.; CHE, Q. T.; KIM, H. W.; PARK, H. J. Development of plant-based meat analogs using 3D printing: Status and opportunities. *Trends in Food Science and Technology*. Vol. 132. Feb. 2023. <<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.12.010>>

WONGPRASERT, T.; MATHATHEERANAN, P.; CHEN, X.; VILAIVAN, T.; SURIYA, U.; RUNGROTMONGKOL, T.; SUPPAVORASATIT, I. Molecular interactions by thermodynamic and computational molecular docking simulations of selected strawberry esters and pea protein isolate in an aqueous model system. *LWT*. Vol. 198. Apr. 2024. <<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115964>>

WU, H.; SAKAI, K.; ZHANG J.; MCCLEMENTS, D. J. Plant-based meat analogs: color challenges and coloring agents. *Food Nutrition and Health*. 1:4. 2024. <<https://doi.org/10.1007/s44403-024-00005-w>>

XIA, S.; SONG, J.; LI, K.; HAO, T.; MA, C.; SHEN, S.; JIANG, X.; XUE, C.; XUE, Y. Yeast protein-based meat analogues: Konjac glucomannan induces the fibrous structure formation by modifying protein structure, *Food Hydrocolloids*. Vol. 142. Sep. 2023. <<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108798>>

XIE, Y.; LIU, Q.; ZHANG, W.; YANG, F.; ZHAO, K.; DONG, X.; PRAKASH, S.; YUAN, Y. Advances in the potential application of 3D Food Printing to Enhance Elderly Nutritional Dietary Intake. MDPI – *Foods*. Vol. 12. Apr. 2023. <<https://doi.org/10.3390/foods12091842>>

YANG, G.; TAO, Y.; WANG, P.; XU, X.; ZHU, X. Optimizing 3D printing of chicken meat by response surface methodology and genetic algorithm: Feasibility study of 3D printed chicken product. *LWT*. Vol. 154. Jan. 2022. <<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112693>>

YANG, Y.; ZHENG, Y.; MA, W.; ZHANG, C.; SUN, C.; FANG, Y. “Meat and Plant-Based Meat Analogs: Nutritional Profile and In Vitro Digestion Comparison.” *Food Hydrocolloids*, v. 143, p. 108886, 2023. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.108886

YATMAZ, H. A. 3D-Printed Meat Paste Using Minimal Additive: Assessment of Rheological and Printing Behavior with Post-Processing Stability. *Food Biophysics*. V.19. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09866-2>

YU, J.; et al. Advances of personalized color in food 3D-printing. *Food Research International*, v. 189, 2025. DOI: 10.1016/j.foodres.2025.110548.

ZAMANI, H.; JOODE, M. E. J. R.; HOSSEIN, I. J.; HENCKENS, N. F. T.; GUGGEIS, M. A.; BERENDS, J. E.; KOK, T. M. C. M.; VAN BREDA, S. G. J. The benefits and risks of beetroot juice consumption: a systematic review. *Critical Reviews in Food*

Science and Nutrition. Vol. 61. Apr. 2020.

<<https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1746629>>

ZAPATA, J. E.; SEPÚLVEDA, C. T.; ÁLVAREZ, A. C. Kinetics of the thermal degradation of phenolic compounds from achiote leaves (*Bixa orellana* L.) and its effect on the antioxidant activity. *Food Science and Technology*, v. 44, p. e30920, 2021. DOI: 10.1590/fst.30920.

ZHANG, J. Y.; PANDYA, J. K.; MCCLEMENTS, D. J.; LU, J.; KINCHLA, A. J. Advancements in 3D food printing: a comprehensive overview of properties and opportunities. Vol. 62. Feb. 2021. <<https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1878103>>

ZHANG, T.; DOU, W.; ZHANG, X.; ZHAO, Y.; ZHANG, Y.; JIANG, L.; SUI, X. The development history and recent updates on soy protein-based meat alternatives. *Trends in Food Science and Technology*. Vol. 109. Mar. 2021. <<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.060>>

ZHAO, H.; SHEN, C.; WU, Z.; ZHANG, Z.; XU, C. Comparison of wheat, soybean, rice, and pea protein properties for effective applications in food products. *Journal of Food Biochemistry*. Vol. 44. Feb. 2020. <<https://doi.org/10.1111/jfbc.13157>>

ZHAO, S.; XU, Y.; LI, J.; NING, Z. The Effect of Plant-Based Protein Ingestion on Athletic Ability in Healthy People-A Bayesian Meta – Analysis with Systematic Review of Randomized Controlled Trials. MDPI: *Nutrients*. 2024. DOI: 10.3390/nu16162748

ZHENG, L.; REGENSTEIN, J. M.; ZHOU, L.; WANG, Z. Soy protein isolates: A review of their composition, aggregation, and gelation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Vol. 21. Feb. 2022. <<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12925>>

ZHENG, Z.; ZHANG, M.; LIU, Z. Investigation on evaluating the printable height and dimensional stability of foos extrusion-based 3D printed foods. *Journal of Food Engineering*. Vol. 306. Oct. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110636>