UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

A QUALIDADE DA CARNE DE BOVINOS NELORE EM UMA ABORDAGEM FÍSICO-QUÍMICA, SENSORIAL E METABOLÔMICA

Rafaela Cristina Rodrigues

Zootecnista

Janeiro de 2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

A QUALIDADE DA CARNE DE BOVINOS NELORE EM UMA ABORDAGEM FÍSICO-QUÍMICA, SENSORIAL E METABOLÔMICA

Discente: Rafaela Cristina Rodrigues

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luis Artur Loyola Chardulo

COORIENTADOR: Prof. Dr. Welder Angelo Baldassini

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Ciência Animal.

Janeiro de 2025

R696q

Rodrigues, Rafaela Cristina
A qualidade da carne de bovinos Nelore em uma abordagem físico-química, sensorial e metabolômica / Rafaela Cristina Rodrigues -- Jaboticabal, 2025
84 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientadora: Luis Artur Loyola Chardulo
Coorientadora: Welder Angelo Baldassini

1. Bos indicus. 2. Confiamento. 3. Maciez. 4. Marmoreio. 5. Metabólitos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: A QUALIDADE DA CARNE DE BOVINOS NELORE EM UMA ABORDAGEM FÍSICO-QUÍMICA, SENSORIAL E METABOLÔMICA

AUTORA: RAFAELA CRISTINA RODRIGUES
ORIENTADOR: LUIS ARTUR LOYOLA CHARDULO
COORIENTADOR: WELDER ANGELO BALDASSINI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciência Animal, área: Genética e Melhoramento Animal pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LUIS ARTUR LOYOLA CHARDULO (Participaçao Presencial)
Departamento de Melhoramento e Nutricao Animal / FMVZ UNESP Botucatu

gov.br Documento assinado digitalmente
LUIS ARTUR LOYOLA CHARDULO
Data: 06/03/2025 16:33:14-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

gov.br Documento assinado digitalmente
MARCELO ARANDA DA SILVA COUTINHO
Data: 14/03/2025 15:11:04-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Pesquisador Dr. MARCELO ARANDA DA SILVA COUTINHO (Participaçao Presencial)
Brazil Beef Quality (BBQ) / Piracicaba/SP

gov.br Documento assinado digitalmente
NARA REGINA BRANDAO CONSOLO
Data: 13/03/2025 17:00:59-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. NARA REGINA BRANDAO CÔNSOLO (Participaçao Presencial)
Departamento de Nutrição e Produção Animal / FMVZ USP Pirassununga

gov.br Documento assinado digitalmente
GUILHERME LUIS PEREIRA
Data: 17/03/2025 17:17:08-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. GUILHERME LUIS PEREIRA (Participaçao Presencial)
Departamento de Melhoramento e Nutricao Animal / FMVZ UNESP Botucatu

Documento assinado digitalmente
JULIANA AKAMINE TORRECILHAS
Data: 09/03/2025 09:36:16-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Pós-doutoranda JULIANA AKAMINE TORRECILHAS (Participaçao Presencial)
Departamento de Melhoramento e Nutrição Animal / FMVZ UNESP Botucatu

Jaboticabal, 16 de janeiro de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Rafaela Cristina Rodrigues-nascida em 07 de março de 1989, na cidade de Diamantina/MG e é filha de Maria Elza Rodrigues. Em agosto de 2011 ingressou no curso de Zootecnia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri-UFVJM, Câmpus JK Diamantina/MG e Graduou-se em abril de 2017. Em agosto de 2018 inicou o curso de Mestrado em Zootecnia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri-UFVJM, Câmpus JK Diamantina/MG, com bolsa pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior/Capes. Em janeiro de 2021 inicou o curso de Doutorado em Ciência Animal da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV)-Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal (PPG-CA)-Câmpus de Jaboticabal/SP, com bolsa pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior/Capes. Atua na área demanejo de pastagem, bovinocultura de corte, qualidade de carne bovina e metabolômica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a DEUS, pelo dom da vida e por todas as oportunidade que me foram concedidas. Pelas pessoas que cruzaram o meu caminho e por cada aprendizado adquirido ao longo desta jornada.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo que viabilizou a realização desta pesquisa. Sem esse apoio, este trabalho não teria sido possível.

Aos meus queridos pais, Elza e Idalmo, que, mesmo com a distância me apoiaram. Obrigada por me ensinarem que, mesmo nas dificuldades, é possível superar obstáculos e alcançar os objetivos.

Aos meus irmãos, Renata e Gabriel, pelo apoio constante e pelas palavras de incentivo que sempre me fortaleceram.

Ao meu orientador, Luis Artur Loyola Chardulo, que me aceitou antes mesmo de assumir essa função. Obrigada por confiar em mim, por todo apoio, incentivo e orientação.

Ao meu coorientador, Welder Ângelo Baldassini, pela paciência, dedicação e orientação ao longo desta jornada.

À Juliana Akamine, pela atenção, dedicação e pelas as análises e correções fundamentais para a execução deste trabalho.

Aos novos amigos que fiz ao longo deste caminho, Murilo, Julínha e Maju obrigada pela amizade, e aos amigos da “vila do chaves” obrigada pelos momentos de descontração que foram fundamentais para tornar essa trajetória mais leve e especial.

À Unesp e ao MeatLab, pela estrutura recursos e insumos que possibilitaram a execução deste trabalho.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo meus mais sinceros agradecimentos pela confiança, apoio e contribuição.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

1. Introdução Geral 1

2. Capítulo 1: Revisão de literatura 2

2.1. Importância dos modelos 2

2.2. Modelagem 3

2.3. Importância dos parâmetros de rendimento de carcaça 4

2.4. Perfil dos consumidores brasileiros e determinantes da qualidade da carne bovina 7

***2*.5. Perfil de metabólitos e sua relação com a qualidade da carne 8**

***2*.6 Maciez 9**

***2*.7. Sabor 11**

CAPÍTULO 2: Regressão múltipla para estudo das características de produção, carcaça e qualidade da carne de bovinos nelore 21

Resumo 22

1. Introdução 23

2. Material e Métodos 24

3. Resultados 26

4. Discussão 32

4. Conclusão 37

5. Referências bibliográfica 38

Capítulo 3: Maciez, teor de gordura intramuscular e perfil metabolômico da carne de bovinos nelore como fatores de aceitação pelos consumidores 44

Resumo 45

1. Introdução 46

2. Material e Métodos 47

3. Resultados 54

4. Discussão 59

5. Conclusão 64

6. Referências bibliograficas 64

7. Material suplementar 68

RODRIGUES, R.C. A qualidade da carne de bovinos nelore em uma abordagem físico-química, sensorial e metabolômica. 2025 . Tese (Doutorado) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, SP, 2025.

RESUMO-Dois diferentes experimentos foram conduzidos: O experimento 1teve objetivo de avaliar modelos de regressão linear (MRL) para a predição de características de carcaça e qualidade da carne de bovinos Nelore. O experimento 2 teve o objetivo de avaliar a variação de força de cisalhamento e teor de gordura intramuscular de bovinos Nelore na análise sensorial da carne e perfil de metabolitos. Experimento 1, foram utilizados dados de 700 bovinos Nelore machos não castrados, grupos de contemporâneos, com 24 meses de idade, terminados em confinamento por 100 a 126 dias e oriundos de diversas fazendas registradas em programas de melhoramento genético da raça Nelore. Dados de desempenho produtivo (ganho médio diário e peso vivo final), características de carcaça (rendimento de carcaça, peso de carcaça quente [PCQ], area de olho de lombo [AOL] e espessura de gordura subcutânea [EGS]) e de qualidade de carne (pH, coloração [*L*, a*, b*,* Chroma, Hue], capacidade de retenção de água, força de cisalhamento [FC] e escore de marmoreio [MAR]) foram utilizados em modelos de regressão linear múltipla (MRL) e abordagem multivariada. No estudo 2, foram utilizadas amostras dos animais do estudo 1, além disso foi realizado análise de teor de gordura intramuscular (GIM), teste sensorial e estudo do perfil metabolômico da carne. Os modelos foram comparados pelo coeficiente de determinação (R^2) e erro padrão residual (RSE). Adicionalmente, foi utilizada análise de componentes principais (PCA) entre características de carcaça e carne, visando explorar suas relações e identificar aquelas que mais influenciaram a variância dos dados. Verificou-se que o MRL para a variável PCQ apresentou R^2 de 0,99 e RSE de 1,41, enquanto para variáveis como AOL e EGS, foram observados R^2 e RSE de 0,20 e 8,16; e 0,13 e 2,25, respectivamente. Já os MRLs para variáveis relacionadas com a cor da carne apresentaram R^2 e RSE, respectivamente, de 0,43 e 3,56 (*L**), 0,95 e 0,79 (*a**), 0,93 e 0,74 (*b**), 0,94 e 1,21 (Chroma) e 0,83 e 1,89 (Hue). Além disso, para as variáveis de qualidade da carne como FC e MAR, verificou-se R^2 de 0,09 e RSE de 0,42; e 0,19 e 1,19, respectivamente. A PCA permitiu estudar as relações entre as características de carcaça e qualidade de carne. Verificou-se que os quatro primeiros componentes principais explicaram mais de 60% da variância dos dados, sendo as variáveis de crescimento, coloração, capacidade de retenção de água, maciez, perdas por descongelamento, perdas por cocção, perdas por evaporação e rendimento de carcaça as mais importantes no conjunto de dados. Exp. 2; com base nas analises de forca de cisalhamento e teor de gordura intramuscular, quatro grupos contrastantes foram formados (n = 15/grupo): -FC-GIM (maciez intermediária, FC = 6,21 ± 0,14 kg e baixa GIM = 0,76 ± 0,03%); +FC+GIM (carne dura, FC = 8,26 ± 0,17 kg e maior GIM = 2,35 ± 0,15%); -FC+GIM (maciez intermediária, FC = 5,68 ± 0,18 kg e maior GIM = 2,54 ± 0,15%); e +FC-GIM (carne

dura, FC = 8,41 ± 0,1 kg e menor GIM = 0,85 ± 0,08%). Além disso, a análise metabolômica foi conduzida por meio de espectroscopia de ressonância magnética nuclear (1H-RMN) nos diferentes grupos experimentais. Os resultados indicaram que o grupo -FC-GIM obteve as melhores avaliações dos consumidores, superando o grupo +FC-GIM em 10 pontos ($P < 0,01$). No grupo -FC-GIM, verificou-se uma maior concentração de glutamato e sucrose ($P < 0,05$), enquanto no grupo +FC-GIM houve um aumento na concentração de inosina-5'-monofosfato ($P < 0,05$). A análise das vias metabólicas revelou que, na comparação entre +FC-GIM e -FC-GIM, foram identificadas sete vias enriquecidas ($P < 0,05$), incluindo o metabolismo da nicotinamida, ácido araquidônico, triptofano, cisteína, folato, malato e aspartato. Entre os grupos +FC+GIM e -FC+GIM, oito vias metabólicas foram enriquecidas ($P < 0,05$), destacando-se o metabolismo do triptofano, ácido araquidônico, cisteína, folato, fenilalanina-tirosina, biossíntese de ácidos graxos, degradação de etanol e lisina. Já na comparação entre +FC-GIM e +FC+GIM, foram identificadas seis vias metabólicas enriquecidas ($P < 0,05$), com destaque para o metabolismo do triptofano, aspartato, ácidos graxos, beta-oxidação de ácidos graxos saturados de cadeia curta, beta-oxidação de ácidos graxos saturados de cadeia longa e biossíntese de ácidos graxos. A variação na maciez (FC), no teor de GIM e no perfil metabolômico influenciou a preferência dos consumidores. As carnes mais macias, com menor teor de GIM, receberam as maiores notas no teste sensorial, influenciadas pela presença de metabólitos como glutamato, sucrose, glicerol, triptofano e niacinamida.

Palavras chaves: *Bos indicus*, confinamento, maciez, marmoreio, metabólitos

RODRIGUES, R.C. The quality of Nelore beef from a physicochemical, sensory and metabolomic approach. 2025 . Tese (Doutorado) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, SP, 2025.

Abstract-Two different experiments were conducted: Experiment 1 aimed to evaluate linear regression models (LRM) for predicting carcass and meat quality carcass and meat quality characteristics of Nelore cattle. Experiment 2 aimed to evaluate the variation in shear force and intramuscular fat content of Nelore of Nelore cattle on the sensory analysis of the meat and metabolite profile. Experiment 1 used data from 700 uncastrated male Nelore cattle, contemporaneous groups, 24 months old, finished in feedlot for 100 to 126 days and for 100 to 126 days and from various farms registered in Nelore genetic improvement programs. breeding programs for the Nelore breed. Data included production performance (average daily gain and final live weight), carcass traits (carcass yield, hot carcass weight [HCW], ribeye area [REA], and subcutaneous fat thickness [SFT]), and meat quality traits (pH, color parameters [*L**, *a*, b*,* Chroma, Hue], cooking losses, water-holding capacity, Warner-Bratzler shear force [SF] and marbling score [MAR]) were used in multiple linear regression (MLR) models. [MAR]) were used in multiple linear regression (MLR) models and a approach. In study 2, samples from the animals in study 1 were used. intramuscular fat content (IMF), sensory testing and a study of the meat's metabolism profile. metabolomic profile of the meat. The models were compared by coefficient of determination (R^2) and residual standard error (RSE). In addition, principal principal component analysis (PCA) was used between carcass and meat meat traits was used to explore their relationships and identify those that most influenced the variance of the data. The MRL for the PCQ variable was found to have an R^2 of 0.99 and RSE of 1.41, while for variables such as REA and SFT, R^2 and RSE of 0.20 and 8.16; and 0.13 and 2.25, respectively. The MRLs for variables related to meat color showed R^2 and RSE, respectively, of 0.43 and 3.56 (*L**), 0.95 and 0.79 (*a**), 0.93 and 0.74 (*b**), 0.94 and 1.21 (Chroma) and 0.83 and 1.89 (Hue). In addition, for meat quality variables such as FC and MAR, there was an R^2 of 0.09 and RSE of 0.42; and 0.19 and 1.19, respectively. PCA made it possible to study the relationships between carcass characteristics and meat quality. It was found that the first four principal components explained more than 60% of the variance in the data. the variables of growth, coloration, water retention capacity, tenderness softness, thawing losses, cooking losses, evaporation losses and carcass yield. evaporation losses and carcass yield were the most important in the data set. Exp. 2; based on the analysis of shear force and intramuscular fat content, four contrasting groups were formed (n = 15/group): -SF-IMF (intermediate tenderness, SF = 6.21 ± 0.14 kg and low IMF = 0.76 ± 0.03%); +SF+ MF (tough meat, SF= 8.26 ± 0.17 kg and highest IMF = 2.35 ± 0.15%); -SF+IMF (intermediate tenderness, SF= 5.68 ± 0.18 kg and highest IMF = 2.54 ± 0.15%); and +SF-IMF (tough meat, SF= 8.41 ± 0.1 kg and lowest IMF = 0.85 ± 0.08%). In addition, metabolomic analysis was carried out using nuclear magnetic resonance spectroscopy (1H NMR) in the different experimental groups. The results indicated that the -SF-IMF group obtained the best consumer evaluations, surpassing the +SF-IMF group by 10 points ($P < 0.01$). In the -SF-IMF group, there was a higher concentration of glutamate and sucrose ($P < 0.05$), while in the +SF-IMF group there was an increase in the

concentration of inosine-5'-monophosphate ($P < 0.05$). Analysis of the metabolic pathways revealed that, in the comparison between +SF-IMF and -SF-IMF, seven enriched pathways were identified ($P < 0.05$), including the metabolism of nicotinamide, arachidonic acid, tryptophan, cysteine, folate, malate and aspartate. Between the +SF+IMF and -SF+IMF groups, eight metabolic pathways were enriched ($P < 0.05$), including the metabolism of tryptophan, arachidonic acid, cysteine, folate, phenylalanine-tyrosine, fatty acid biosynthesis, ethanol degradation and lysine. In the comparison between +SF-IMF and +SF+IMF, six enriched metabolic pathways were identified ($P < 0.05$), with emphasis on the metabolism of tryptophan, aspartate, fatty acids, beta-oxidation of short-chain saturated fatty acids, beta-oxidation of long-chain saturated fatty acids and fatty acid biosynthesis. Variation in tenderness (SF), IMF content and metabolomic profile influenced consumer preference. The most tender meats, with the lowest IMF content, received the highest scores in the sensory test, influenced by the presence of metabolites such as glutamate, sucrose, glycerol, tryptophan and niacinamide.

Keywords: *Bos indicus,* confinement, tenderness, marbling score, metabolites

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Descrição dos animais e dados de desempenho dos touros Nelore terminados em confinamento.....24

Tabela 2. Características objetivas da qualidade da carcaça de touros Nelore terminados em confinamento.....27

Tabela 3. Características objetivas da qualidade da carne de touros Nelore terminados em confinamento.....27

Tabela 4. Modelos de regressão para predição das características de carcaça e qualidade de carne de bovinos Nelore terminados em confinamento.....30

Tabela 5. Componentes principais, autovalores e variância dos seis primeiros componentes principais obtidos no estudo de características de carcaça e qualidade de carne de bovinos Nelore….....31

Tabela 6. Análise de componentes principais e coeficientes dos autovalores das características de carcaça e qualidade de carnes de bovinos Nelore. 31

CAPÍTULO 3

Tabela 1. Caracterização do objeto de estudo por análises objetivas da qualidade da carne.....55

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1. Correlação fenotípica entre características de carcaça (A) PCQ: Peso de carcaça quente; RC: Rendimento de carcaça; MAR: Marmoreio; AOL: Área de olho de lombo; EGS: Espessura de gordura subcutânea; DDC: Dias de confinamento; ID: Idade FC: Força de cisalhamento. correlação fenotípica entre características de qualidade da carne (B) pH: pH 48h post-mortem; PPC: Perda por cocção: GOT: Perdas por gotejamento; EVP: Perdas por evaporação L*: Luminosidade; a*: Intensidade do vermelho; b*: Intensidade do amarelo; CRA: Capacidade de retenção de água; correlação fenotípica entre características de qualidade da carne (B).....28

Figura 2. 2. Análise de componentes principais indicando correlação entre as características de carcaça e qualidade de carne do músculo Longíssimus thoracis de bovinos Nelore. A) Componente principal 1 vs. 2 (PC1 vs. PC2). B) Componente principal 2 vs. 3 (PC 2 vs. PC3). PF: Peso final; PCQ: Peso de carcaça quente; RC: Rendimento de carcaça; MAR: Marmoreio; AOL: Área de olho de lombo; EGS: Espessura de gordura subcutânea; FC: Força de cisalhamento; PPC: Perda por cocção; pH: pH 48h post-mortem; L*: Luminosidade; a*: Intensidade do vermelho; b*: Intensidade do amarelo; CRA: Capacidade de retenção de água; ID: Idade; DDC: Dias de
confinamento.....32

CAPÍTULO 3

Figura 1. Formação dos grupos experimentais e modelo metodológico de análises.....50

Figura 2. Características sensoriais da qualidade da carne dos quatro tratamentos segregados por força de cisalhamento e quantidade de lipídios totais. a,b médias com diferentes letras sobrescritas na mesma linha diferem (P < 0,05, teste de Tukey.....56

Figura 3. Gráfico de pontuação da análise discriminante de mínimos quadrados parciais do perfil de metabólitos da carne em função dos tratamentos.……..…….....……...…...57

Figura 4. Volcano plot, gráfico de pontuação da análise discriminante de mínimos quadrados parciais do perfil de metabólitos da carne em função dos tratamentos.

Indicando diferentes concentrações dos metabólitos em: (A) carnes dura e menor teor de gordura intramuscular (+FC-GIM) vs. carnes intermediaria e menor teor de gordura intramuscular (-FC-GIM) ; (B) carnes macia e maior teor de gordura intramuscular (-FC+GIM) vs. carnes dura e mais maior teor de gordura intramuscular (+FC+GIM); (C) carnes dura e menor teor de gordura intramuscular (+FC-GIM) vs. carnes dura e maior teor de gordura intramuscular (+FC+GIM).....58

Figura 5. Enriquecimento de análise mostrando vias metabólicas em função da comparação de pares A) +FC-GIM vs. -FC-GIM; B) +FC+GIM vs. -FC+GIM; C) +FC-GIM vs. +FC+GIM.....60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

*a**	Intensidade de vermelho
ABIEC	Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes
GMD	Ganho médio diário
AOL	Área de olho de lombo
*b**	Intensidade de amarelo
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CH	Saturação da cor
PPC	Perdas por cozimento
CV	Coeficiente de Variação
DDC	Dias de confinamento
DL	Drip loss
DP	Desvio padrão
ECC	Escore de condição corporal
EGS	Espessura de gordura Subcutânea
EVP	Perdas por evaporação
FL	Flavor
GMP	Guanosina monofosfato
GOT	Perdas por gotejamento
HUE	Cor real
GIM	Gordura Intramuscular
IMP	Inosina-5'-monofosfato
SU	Suculência
*L**	Luminosidade
LT	*Longíssimus thoracis*
MAR	Marmoreio
N	Número de observações
NAD	Nicotinamida Adenina Dinucleotídeo
NADH	Nicotinamida Adenina Dinucleotídeo + Hidrogénio
MRL	Modelo de regressão linear
PC	Peso corporal
PCQ	Peso de carcaça quente
PH	pH (48 h *post-mortem*)
PD	Perdas por descongelamento
PPC	Perdas por cocção
PV	Peso vivo
R^2	Coeficiente de determinação
RC	Rendimento de carcaça
RMN	Ressonância magnética nuclear
RSE	Erro padrão residual
SIF	Serviço de Inspeção Federal
TCA	Ácido tricarboxílico
TE	Maciez
FC	Força de cisalhamento
CRA	Capacidade de retenção de água
DG	Diglicerídeos

1. Introdução Geral

A produção de carne brasileira está em crescente desenvolvimento e para que permaneça competitiva no mercado é essencial garantir uma produção eficiente e oferta de produtos de alta qualidade. Observa-se que os consumidores têm demonstrado crescente interesse em uma carne de qualidade superior, o que pode ser atribuído, às suas propriedades sensoriais, composição física e química e qualidade nutricional (Teixeira e Rodrigues, 2021).

O rebanho bovino brasileiro, constituído majoritariamente por animais zebuínos (*bos indicus*), possibilitou que o Brasil se tornasse o segundo maior produtor e o maior exportador de carne bovina do mundo, com aproximadamente 197 milhões de cabeças em 2023 (ABIEC, 2024). Apesar da importância desses animais para o sistema produtivo nacional, há indícios que a carne proveniente de animais zebuínos seja menos macia quando comparada à de animais *bos taurus* (Rodrigues et al., 2017).

Dentre as características de qualidade da carne, a maciez e a quantidade de gordura intramuscular é considerada como uma das mais importantes para o consumidor. Além disso, com a melhoria nos níveis de consumo,os consumidores têm apresentado maiores demandas pela qualidade da carne (Wan et al., 2016). Nesse contexto, para a indústria da carne bovina o aprimoramento das características de carcaça e qualidade da carne de animais zebuínos é crucial (Gordo et al., 2018).

A maciez da carne é o aspecto sensorial com maior relevância, e está relacionada à preferência do consumidor, o que pode influenciar na economia do setor produtivo da carne bovina (Barcellos, 2007). O consumidor é capaz de perceber diferenças na maciez de 1kg (Brugiapaglia et al., 2008), o que pode influenciar sua decisão de optar por uma carne mais macia, fazendo com que invista mais nesse tipo de produto. No entanto, a indústria não aplica avaliação da maciez para a classificação das carcaças, logo seria necessário um método que identificasse a maciez na indústria (Bonin, 2012). Por isso, a predição da maciez da carne é uma oportunidade relevante para a produção animal.

Diversos fatores influenciam a maciez da carne, como genéticos e não genéticos, dificultando sua previsão. Logo, a busca por ferramentas objetivas que possibilite a predição da maciez da carne antes do abate torna-se necessária, para melhorar a avaliação da carcaça e diminuir a insatisfação do consumidor. Com isso, o controle da maciez da carne são necessidades para melhorar o setor produtivo da carne bovina, portanto, é necessário identificar e caracterizar os elementos que afetam a maciez e entender melhor a discrepância da maciez entre os diferentes grupos de animais.

Neste contexto, modelos de predição e o estudo do metaboloma animal, vem como ferramentas que podem ser utilizadas para decifrar a maciez em nível molecular e definir marcadores moleculares para melhorar a predição da maciez da carne (Ouali et al., 2013; Picard e Gagaoua, 2020). Isso pode facilitar a padronização dos cortes cárneos após o abate com base em seu potencial da maciez, permitindo a identificação e seleção de animais com carne mais macia pelos programas de melhoramento genético.

2. CAPÍTULO 1: Revisão de literatura

2.1. Importância dos modelos

Modelos matemáticos são representações simples que facilitam a compreensão das estruturas que influenciam o comportamento de sistemas produtivos, por meio de relações quantitativas entre variáveis mensuráveis. Esses modelos permitem prever os efeitos de possíveis alterações nas variáveis, equilibrando a precisão com a simplicidade da análise (Tedeschi et al., 2009). A tomada de decisão em propriedades pode ser baseada em modelos, que fornecem informações cruciais para maximizar a produção.

A precisão na comparação entre os valores observados e os estimados por modelos matemáticos é obtido ao comparar tanto o fator de correção de viés quanto à precisão, sendo esta última avaliada por meio do coeficiente de correlação R, que representa o grau de relação linear entre duas variáveis numéricas (Fonseca et al., 2017).

Os parâmetros de qualidade do ajuste da regressão são importantes para avaliar o modelo matemático desenvolvido. Dentre eles, destaca-se o coeficiente de

determinação (R^2), que representa a proporção da variável resposta explicada pela variável exploratória, na qual um valor maior representaria uma melhor qualidade de ajuste do modelo estatístico (Fonseca et al., 2017).

Os modelos podem auxiliar em análises de sensibilidade abrangentes, incorporando diferentes medições, condições e parâmetros (Plà, 2007). Com o uso de métodos computacionais avançados na modelagem, é possível levar em conta uma maior variedade de fatores em uma decisão, além de compará-los com análises feitas por profissionais ou com a aplicação de normas, padrões e recomendações. As decisões podem ser tomadas em diferentes horizontes: longo, médio e curto prazo (Jalvingh, 1992). As principais desvantagens da utilização de modelos para tomada de decisão incluem a capacidade de avaliar condições específicas, fornecer uma estrutura clara para integrar informações provenientes de diferentes fontes, busca eficiente de algarismo para determinação de decisões precisas (Stygar e Makulska, 2010).

2.2. Modelagem

A técnica de modelagem tem sido aplicada em diversos setores da produção e tecnologia, desde de 1970 na Zootecnia. Nos últimos anos tem desempenhado um papel significativo na área de nutrição animal e qualidade de produtos agropecuários, sendo utilizado como uma ferramenta essencial para auxiliar nos processos de tomada de decisão na indústria e planejamento de atividades no campo (Bywater, 1990).

A desigualdade nas características de carcaça e qualidade de carne é influenciada por diversos fatores, tais como raça, sexo, idade, peso e maturidade (Bautista-Díaz et al., 2020). Portanto, o acesso a informações prévias pode aumentar a eficiência na tomada de decisão, uma vez que a modelagem visa prever situações de possíveis comportamento da produção com base em variáveis já avaliadas, considerando interações que podem ocorrer entre elas (Silvestre et al., 2019). Essas avaliações podem ser empregadas em análises simulando sistemas complexos por meio da modelagem, permitindo o esclarecimento de possíveis problemas na produção por meio de respostas mais simplificadas. Isso auxilia na tomada de

decisões sobre as medidas adequadas para alcançar as metas estabelecidas na produção (Silvestre et al., 2019).

No Brasil, a escassez de estudos na área de predição da qualidade da carne de bovinos é notável. Alguns trabalhos têm sido realizados equações de predição desenvolvidos para raças e sistemas de produção que não são comuns no país, como os aplicados nos Estados Unidos, por exemplo. Contudo, esses modelos não foram validados cientificamente em condições brasileiras, o que limitou a sua aplicabilidade. A adaptação dessas equações no contexto brasileiro, levando em conta as particularidades das raças, alimentação e manejo no país, ainda não foi explorada de forma robusta na literatura, evidenciando a necessidade de mais pesquisas e validações locais.

A quantidade e qualidade de carne produzida está diretamente associado ao crescimento animal (Silva et al., 2011). Assim, o peso corporal e o ganho de massa corporal são medidas simples, rápidas e amplamente utilizadas para avaliar o desempenho animal. Esses parâmetros servem como critérios de seleção pelos criadores e programas de melhoramento genético, e são fundamentais para comercialização em frigoríficos (Souza et al., 2019). No entanto, além das características genéticas do animal, o ganho de peso pode ser influenciado por fatores como alimentação, condições climáticas e a situação sanitária dos animais (De Paula et al., 2013).

Os modelos para predição de características de qualidade de carne e carcaça são dependentes da faixa de valores que suas variáveis assumem no conjunto de dados usado para calcular os parâmetros, o processo de ajuste dos modelos aos dados na tentativa de derivar os valores dos parâmetros é uma das principais variáveis do desenvolvimento do modelo (Gunawardena, 2010).

2.3. Importância dos parâmetros de rendimento de carcaça

O retorno financeiro da pecuária de corte foi estabelecido com base no peso vivo de rendimento de carcaça dos animais. Atualmente pode-se observar uma mudança neste cenário, com bonificações para melhor qualidade de carne,

especialmente para acabamento de carcaça e animais precoces (Fernandes et al., 2020).

Diferentes fatores como a raça, idade, sexo, dietas e peso de maturidade podem influenciar na composição e qualidade da carcaça e rendimento de cortes cárneos, e consequentemente no preço final do produto. Possibilitando oportunidades para se trabalhar nesses fatores de variação, com finalidade de proporcionar a atividade pecuária mais eficiente por meio de melhores combinações (Bautista-Díaz et al*.,* 2020).

A seleção criteriosa de animais superiores para reprodução, com ênfase em características de desempenho, carcaça e qualidade de carne, é essencial para impulsionar a eficiência e a rentabilidade na pecuária de corte. Além disso, essa prática contribui para a produção de carne de qualidade, atendendo às demandas do mercado, promovendo retornos econômicos interessantes para a pecuária de corte.

Dada a significativa relevância econômica, nutricional e social, tem sido objetivo de estudos diversos métodos para avaliação da quantidade de carcaça e a composição corporal em animais de produção (De Paula et al., 2013). De acordo com (Brethour, 2000), é necessário empregar um método objetivo para determinar a quantidade de dias que o bovino deve ser alimentado com uma dieta específica, visando alcançar características desejadas pelo frigorífico e otimizar a eficiência do ganho de carcaça. Entre os métodos indiretos, os parâmetros mais frequentes utilizados são o peso corporal (PC) e o escore de condição corporal (ECC). No entanto, atributos relacionados ao acabamento de carcaça, como área de olho de lombo (AOL) e espessura de gordura subcutânea (EGS) fornecem informações cruciais sobre o rendimento, a qualidade da carne e da carcaça (Scholz et al., 2015; Chay-Canul et al., 2019).

A EGS é um importante indicador da qualidade da carcaça e pode estar relacionado positivamente com o rendimento da carcaça (Silva et al., 2006). Além disso, uma EGS adequada desempenha função importante na proteção da carcaça contra o encurtamento pelo frio durante o resfriamento na câmara frigorífica e permite que as mesmas esfriem lentamente, melhorando a atividade enzimática proteolítica e maciez da carne (Bridi, 2009). A indústria brasileira estabelece um padrão mínimo de 3 mm para EGS para carcaças de bovinos (Bridi, 2009). Carcaças com EGS excessivo

(>10 mm) podem implicar em menor AOL, afetando negativamente o rendimento dos cortes, podendo gerar prejuízos econômicos, conforme reportado na literatura (Pacheco et al., 2005).

A utilização da técnica de ultrassonografia possibilita a previsão, em animais vivos, de características de carcaças que são importantes para a produção animal, como a EGS e AOL. Isso permite a seleção de animais superiores pelos programas de melhoramento genético, além de facilitar a segregação de lotes em sistemas de confinamento ao identificar animais pronto para o abate (Faria, 2012).

Alguns frigoríficos oferecem incremente 2% no pagamento de animais com até 36 meses de idade e espessura de gordura entre 3-6 mm, isso resulta em valorização adicional dos animais e proporciona uma remuneração mais vantajosa para os produtores. No entanto, quando a espessura de gordura subcutânea é inferior a 3 mm, ocorrem prejuízos nos rendimentos de carcaça e na qualidade da carne, o que leva a descontos aplicados pelos frigoríficos (Silva et al., 2006). Por outro lado, o excesso de gordura também é considerado prejudicial ao valor comercial, especialmente devido aos impactos nos rendimentos dos cortes principais na composição física da carcaça (Neto et al., 2009).

A AOL é uma característica da carcaça que está intimamente ligada ao desenvolvimento muscular. Juntamente com as medidas de EGS, fornece informações essenciais para estimar o rendimento da produção, a precocidade de crescimento e acabamento, bem como o rendimento de carne na carcaça (Williams, 2002; Meirelles et al., 2011). A avaliação da AOL desempenha um papel crucial no preço final da carne e na classificação de carcaça, influenciando diretamente na quantidade de carne produzida (Prado et al., 2004).

A mensuração da AOL é realizada a partir de um corte transversal entre a 12ª e 13ª costelas com uso de grade quadriculada seguindo a metodologia australiana e americana, posteriormente é feita a contagem de pontos dentro dos limites do músculo. Essa região foi estabelecida por ser considerada de maturação tardia e representar fielmente o desenvolvimento da carcaça, permitindo a análise de proporções de seus componentes (Taylor, 1985).

2.4. Perfil dos consumidores brasileiros e determinantes da qualidade da carne bovina

A qualidade de um produto é definida por um conjunto de atributos que atendem às necessidades do consumidor final. Esses atributos podem ser classificados como: organolépticas, nutricionais, de segurança e econômica, desempenhando papel fundamental na formação das percepções dos consumidores. No caso da carne bovina, as variações nos atributos de qualidade decorrem da interação entre diversos fatores, incluindo segurança alimentar, responsabilidade social e ambiental, além do bem-estar animal (Souza e Ribeiro, 2024). Os fatores relacionados ao animal, como raça, idade, sexo bem como a localização anatômica do músculos em relação à sua função fisiológica, também contribuiem para essas variações (Monin, 1991). Já os fatores de manejo englobam a taxa e estratégia de crescimento, além da dieta principalmente na fase de terminação. Por fim, os fatores tecnológicos abrangem todo o processo, desde o transporte dos animais até o frigorífico, abate, armazenamento e preparo final do produto cárneo (Ouali et al., 2006).

A raça Nelore é predominante no sistema de produção brasileiro e apresenta grande importância para a produção pecuária. Animais dessa raça apresentam boa em termos de rusticidade e adaptabilidade às condições brasileiras, considerando que o sistema de produção a pasto é o mais praticado no país (Silva et al., 2020). O consumo médio global per capita de carne é de aproximadamente 36 kg no ano de 2022, e esse consumo deve aumentar principalmente pelo crescimento populacional (ABIEC, 2023). Os consumidores brasileiros têm demostrado mudança em suas preferências, com aspectos como maciez e qualidade das carnes ganhando cada vez mais importância (Chardulo et al., 2013).

Os consumidores representam a fase final da cadeia de produção de alimentos e atender suas expectativas em relação aos produtos é fundamental (Aviles et al., 2020). O atendimento a expectativa do mercado consumidor é vital para a indústria alimentícia, e para todos envolvidos na cadeia de produção, tendo em vista aprimorar e otimizar processos (Polkinghorne; Thompson, 2010) da mesma forma a estratégias de marketing (Wang et al., 2018) para estimular melhorias nos aspectos de preço e

qualidade (Garmyn, 2020). Para os consumidores, a qualidade de carne é avaliada durante a compra e o consumo desse alimento (Santos et al., 2021). Ao optarem pela compra, os consumidores fundamentam suas escolhas em características como cor, marmoreio, maciez, frescor, corte e maturação e esses atributos influenciam diretamente a percepção do consumidor sobre a qualidade e o valor do produto, impactando suas decisões de compra e experiências de consumo (Henchion et al., 2017; Santos et al., 2021).

2.5. Perfil de metabólitos e sua relação com a qualidade da carne

A metabolômica emprega métodos sofisticados de química analítica para realizar uma análise abrangente de um vasto número de metabólitos de moléculas pequenas presentes em células e tecidos. A capacidade de detectar e quantificar rapidamente centenas de metabólitos em uma única amostra está revolucionando a compreensão de metabólitos em nível sistêmico (Goldansaz et al., 2017; Muroya et al., 2019). A metabolômica está possibilitando aos pesquisadores a medição dos produtos finais de interações genéticas, epigenéticas e ambientais mais complexas. Assim, os metabólitos podem ser considerados como componentes cruciais dos fenótipos intermediários, que atuam como ponte entre as informações genômicas e as características de produção de difícil compreensão. Como consequência, a metabolômica emergiu como abordagem “ômica” cada vez mais difundida para facilitar a caracterização fenotípica abrangente de seres humanos, plantas e organismos modelo. A metabolômica é definida como “a análise compreensiva e quantitativa de todos os metabólitos de um sistema biológico” (Fiehn, 2001). Está sendo frequentemente empregada em pesquisas biomédicas, nutricionais e agrícolas. Além disso, seu uso está em ascensão na pesquisa e monitoramento pecuário (Gagaoua et al., 2018).

No entanto, são poucos os trabalhos que estudam o metaboloma para prever características de qualidade da carne (Beauclercq et al., 2016; Moon et al., 2018). Moon et al., 2018, estudando metabólitos bovino hanwoo durante a fase de acabamento, concluíram que o conteúdo de retinol poderia ser impossível biomarcador para uma carne marmorizada. As descobertas desses marcadores podem ser utilizadas como parâmetro para a seleção de animais em programas de

melhoramento genético, juntamente com a genômica, melhorando a seleção de animais para a produção de carne de alta qualidade. Além disso, o potencial da metabolômica da carne para compreender as informações genéticas é consolidado por trabalhos vistos na literatura, que avaliaram o potencial genético para crescimento e precocidade, bem como sua associação com características de desempenho e qualidade da carne. No entanto, essa associação ainda não foi explicada em termos de qualidade de carne (Da Costa et al., 2020). A complementação entre as análises não apenas oferece informações detalhadas sobre sistema biológico de interesse, mas também nos conduz ao desenvolvimento de biomarcadores para as características específicas que estamos estudando, que neste caso, é a maciez da carne e quantidade de gordura.

2.6. Maciez

A maciez da carne é uma das características mais valorizadas pelos consumidores, desempenhando um papel crucial na percepção de qualidade e na satisfação com o produto, levando-o a repetir a compra é ate mesmo pagar mais caro por uma carne de melhor qualidade (Warner et al., 2022). Garantir a maciez carne não apenas atende ás expectativas do consumidor, mas também contribui para o sucesso econômico d a indústria, promovendo maior aceitação e retorno financeiro. Essa caracteristicaé influenciada por uma complexa interação de fatores que ocorrem em diferentes etapas, desde a produção até o pós-abate, modulando as interações biomoleculares na matriz do tecido muscular (Johnson et al., 2023).

A maciez pode ser avaliada pelo painel sensorial, e instrumentalmente, pela força de cisalhamento e índice de fragmentação miofibrilar da carne é determinada por uma variedade de fatores que podem ser categorizados em duas origens principais, os fatores *ante mortem* (idade do animal, o genótipo, o sexo, a nutrição, o nível de exercício, o estresse pré-abate, a presença de tecido conjuntivo, bem como a espessura de gordura sbcutãnea) e os fatores *post mortem* (estimulação elétrica, o rigor mortis, o resfriamento da carcaça, o pH, o processo de maturação, e as condições de cocção, incluindo método e temperatura) (Warner et al., 2019).

O processo de transformação do músculo em carne envolve uma série de alterações bioquímicas, resultando na formação de metabólitos. Estudos indicam que glicogênio, glicose, glicose-6-fosfato, frutose-6-fosfato e lactato são responsáveis por aproximadamente 95% dos intermediários glicolíticos presentes no músculo *post-mortem* (Dalrymple; Hamm, 1975). Além dos metabólitos, enzimas como calpaínas, catepsinas e proteossomos desempenham um papel siguinificativo no aumento da proteolise durante o cozimento e armazenamento. Essa enzimas atuam na degradação das protéinas do citoesqueleto, influenciando diretamente na textura e a maciez da carne (King et al., 2019).

Um estudo recente utilizou a técnica de UHPLC-MS para compreender os metabolitos presentes em amostras de carne submetidas a diferentes tempos de maturação (Yu, 2024). Os resultados demostraram que o processo de proteólise desempenha um papel fundamental na maciez da carne, uma vez que envolve a degradaçãode protéinas musculares mediada por sistemas enzimáticos, como catepsinas, calpaínas e proteossomas. Essa degradação promove a formação de aminoácidos livres e peptídeos, que contribuem não apenas para a maciezmas também para o sabor da carne.

Em uma pesquisa similar, o perfil metabolômico de carnes bovinas foi analisado por meio de Ressonância Magnética Nuclear (RMN), como objetivo de diferenciar carnes macias e duras de bovinos cruzados Nelore-Angus (Antonelo et al., 2020). Os metabólitos acetil-carnitina, adenina, beta-alanina, fumarato, glutamina e valina apresentaram concentrações siguinificativamente mais elevadas em carnes macias quando comparadas às carnes duras. Além disso, lactato, glicose, creatina e glutamina foram identificados como os quatro compostos mais relevantes para distinguir carnes macias e duras. Esses achados refoçam a ideia de que o perfil metabolômico de carnes e duras é destinto e reflete vias metabólicas alteradas associadas à textura da carne (Antonelo et al., 2020).

Em um estudo, envolvendo bovinos da raça Maremmana, técnicas como LC-MS e HPLC-MS foram utilizdas para identificar metabólitos associados à maciez da carne (D'Alessandro et al*.,* 2012). Os resultados revetaram que a concentração relativa de fosfoenolpiruvato, lactato, NADH, NAD + e guanosina monofosfato (GMP) estava correlacionada com a maciez da carne. O fosfoenolpiruvato, em particular,

apresentou um aumento médio de mais de três vezes nas amostras de carne macia em comparação com as carne dura, acompanhado por um aumento substancial nas concentrações relativas de lactato, NADH, NAD + e GMP nas amostras de carne macia. Além disso, a relação entre glutationa oxidada/glutationa reduzida foi identificada como um parâmetro relevante para maciez , sendo maior em carnes macias do que em carnes duras. Esses metabólitos estão envolvidos em processos metabólicos e de estresse oxidativo, que podem influenciar diretamente a maciez da carne bovina (D'Alessandro et al., 2012).

2.7. Sabor

O sabor dos alimentos é um importante atributo de qualidade que impulsiona a escolha dos consumidores. É o resultado da combinação de sabor, aroma e sensações orais ou quimioestésicas. O sabor é devido aos compostos não voláteis presentes nos alimentos, que caracterizam os cinco sabores básicos: doce, salgado, amargo, azedo e umami (Franco, 2004). O sabor é percebido por células receptoras organizadas em grupos, as papilas gustativas. São células epiteliais modificadas encontradas na língua e no palato mole, que têm uma vida útil média de uma semana (Lawless e Heymann). Na carne contém diversos metabólitos em sua composição, como açúcares, aminoácidos, ácidos graxos e vitaminas, que tem capacidade de contribuir para o desenvolvimento do sabor (Khan et al., 2015). Conforme relatado pelos mesmos autores, os compostos aromatizantes da carne são formados por meio da oxidação lipídica, reação de Maillard, degradação de vitaminas e interações entre seus produtos de degradação. A análise do perfil de metabólitos surge como uma ferramenta valiosa e promissora para a identificação de descompuestos voláteis e não voláteis que contribuem para o sabor da carne (Lee et al., 2011).

Em uma pesquisa que investigou os metabólitos envolvidos na geração de sabor no aroma da carne de Wagyu (Ueda et al., 2021). A glutamina , conhecida por conferir um sabor de umami à carne, mostrou uma forte associação com o aroma e o sabor. Ademais, metabolitos como ácido decanoico, ácido fosfórico e ácido lático foram identificados como participantes na formação de sabor e apresentaram uma correlação negativa com y-hexalactona, um dos compostos aromáticos encontrados. Esses ácidos derivam da inosina monofosfato (IMP), nucleotídeo ligado ao sabor

umami, que se decompõe em hipoxantina no processo de maturação post mortem. Os resultados indicam que a composição metabólica da carne. Esses resultados indicam que a composição metabólica da carne, com a presença desses metabólitos desempenha um papel fundamental na formação do sabor da carne de Wagyu (Ueda et al., 2021).

Neste contexto, uma pesquisa conduzida por (Jeong et al., 2020) investigou a gordura intramuscular da carne de animais coreano e identificou diferenças significativas nos metabólitos associados ao sabor entre grupos de carne com diferentes níveis de gordura. Os metabólitos identificados incluíram N,N-dimetilglicina, creatina, lactato, carnosina, carnitina, sn-glicerol-3-fosfocolina, betaína, glicina, glicose, alanina, triptofano, metionina, taurina e tirosina. Entre esses, a carnosina, creatinina, glicose e lactato apresentaram concentrações significativamente mais elevadas em carnes com alto teor de marmoreio em comparação às carnes com menor marmoreio. Esses achados identificam potenciais marcadores envolvidos em vias metabólicas relacionadas ao sabor da carne , abrangendo o metabolismo de carboidratos e aminoácidos (Jeong et al., 2020). Pesquisas recentes também indicaram que os metabólitos carnosina, glicose, lactato são encontrados em maiores quantidades em carnes com maior marmoreio, sugerindo que esses compostos podem servir como indicadores de qualidade da carne, particularmente no que diz respeito ao sabor.

O processo de transformação do músculo em carne envolve uma série de reações e liberação de vários metabólitos (Ramanathan et al., 2023). Um estudo brasileiro que analisou os metabólitos gerados durante a conversão do músculo em carne e a maturação úmida identificou compostos relacionados à proteólise, glicose pós-mortem, ciclo do ácido tricarboxílico (TCA) e metabolismo de purinas, ácidos graxos, proteínas e nitrogênio. Esses compostos são cruciais para o sabor e aroma da carne, pois a presença de nucleotídeos aminoácidos livres a carboidratos metabolizados impacta significativamente essas características (Cônsolo et al., 2021). Durante o processo de maturação, observou-se que os compostos relacionados ao sabor aumentaram com o prolongamento da maturação. Um aumento contínuo na concentração de metabólitos foi identificado até 21 dias de maturação, caracterizado pela degradação de proteínas; entre 7 e 14 dias, houve um aumento na concentração

de metabólitos associados à glicólise e ao metabolismo de purinas. Essas mudanças nos metabólitos relacionados ao sabor são evidenciadas pelos eventos bioquímicos que ocorrem na glicólise, no ciclo do ácido cítrico, na degradação de proteínas, na geração de aminoácidos e no metabolismo de purinas (Cônsolo et al., 2021).

A acumulação de aminoácidos durante a maturação da carne está intimamente ligada à proteólise que ocorre após a morte (Kerth et al., 2023). Neste estudo, foi observado um aumento na concentração de metabólitos durante a maturação, o que pode contribuir para o surgimento de diferenças no sabor da carne. Além disso, o processo de maturação reduziu os metabólitos associados a sabores indesejáveis, como os terpenoides. Pesquisas anteriores identificaram que metabólitos como carnosina, creatina, glicose, lactato, betaína, glicerol e creatinina têm correlação com os escores de aceitabilidade sensorial da carne bovina (Antonelo et al., 2020)

Verificou-se a importância de compreender os processos envolvidos na produção e consumo da carne bovina, principalmente no que se refere a modelos regressão linear, que tem como objetivo prever quais parâmetros são mais relevantes para a qualidade de carcaça e carne, incluindo análises avançadas com metabolômica.

É importante salientar, que apesar do crescente interesse nessas áreas de pesquisa, há uma lacuna nos estudos relacionados a modelos de predição para características de carcaça e qualidade carnes, bem como nas e tecnologias aplicadas aos animais da raça Nelore. Tal lacuna representa uma oportunidade significativa para futuras investigações, considerando a relevância econômica e cultural desses animais, principalmente no contexto da indústria de carne bovina no Brasil.

3. Referências bibliográficas

ABIEC. **Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes**. [s.l: s.n.]. v. 2024

ANTONELO, D. et al. Metabolites and Metabolic Pathways Correlated With Beef Tenderness. **Meat and Muscle Biology**, v. 4, n. 1, 24 jun. 2020.

ANTONELO, D. S. et al. Metabolite profile and consumer sensory acceptability of meat from lean Nellore and Angus × Nellore crossbreed cattle fed soybean oil. **Food Research International**, v. 132, p. 109056, jun. 2020.

BAUTISTA-DÍAZ, E. et al. Prediction of Carcass Traits of Hair Sheep Lambs Using Body Measurements. **Animals**, v. 10, n. 8, p. 1276, 27 jul. 2020.

BEAUCLERCQ, S. et al. Serum and Muscle Metabolomics for the Prediction of Ultimate pH, a Key Factor for Chicken-Meat Quality. **Journal of Proteome Research**, v. 15, n. 4, p. 1168–1178, 1 abr. 2016.

BONIN, M. D. N. **Avaliação de características de desempenho e qualidade de carne em linhagens e touros representativos da raça Nelore, utilizando ultrassonografia, análise de imagens e NIRS**. Doutorado em Qualidade e Produtividade Animal—Pirassununga: Universidade de São Paulo, 5 out. 2012.

BRETHOUR, J. R. Using serial ultrasound measures to generate models of marbling and backfat thickness changes in feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, v. 78, n. 8, p. 2055, 2000.

Bridi, A.M.; Constantino, C. Qualidade e Avaliação de Carcaças e Carnes Bovinas. In: Congresso Paranaense dos Estudantes de Zootecnia. Associação Paranaense dos Estudantes de Zootecnia, 30., 2009. Anais... Maringá, PR, 2009.

BRUGIAPAGLIA, A. et al. Relationship between beef consumer tenderness perception and Warner–Bratzler shear force. **Meat Science**, v. 78, n. 3, p. 153–156, mar. 2008.

BYWATER, A. C. Exploitation of the system approach in technical design of agricultural enterprises. p. 388p, 1990.

CHARDULO, L. A. L.; SILVEIRA, A. C.; VIANELLO, F. Analytical Aspects for Tropical Meat Quality Assessment. Em: LIMA, G. P. P.; VIANELLO, F. (Eds.). **Food Quality, Safety and Technology**. Vienna: Springer Vienna, 2013. p. 53–62.

CHAY-CANUL, A. J. et al. Evaluation of equations to estimate fat content in soft tissues of carcasses and viscera in sheep based on carbon and nitrogen content. **Small Ruminant Research**, v. 178, p. 106–110, 1 set. 2019.

CÔNSOLO, N. R. B. et al. Using TD-NMR relaxometry and 1D 1H NMR spectroscopy to evaluate aging of Nellore beef. **Meat Science**, v. 181, p. 108606, nov. 2021.

DA COSTA, M. B. et al. Performance, carcass traits and serum metabolomic profile of Nellore males with different genetic potential for post-weaning growth. **Animal**, v. 14, n. 4, p. 873–880, 2020.

D'ALESSANDRO, A. et al. Love me tender: An Omics window on the bovine meat tenderness network. **Journal of Proteomics**, v. 75, n. 14, p. 4360–4380, jul. 2012.

DE PAULA, N. F. et al. Predicting carcass and body fat composition using biometric measurements of grazing beef cattle1. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 7, p. 3341–3351, 1 jul. 2013.

FERNANDES, C. D. A. et al. Evolution of slaughter precocity in male beef cattle in the Carne Pampa programme. **Ciência Animal Brasileira**, v. 21, p. e-61346, 2020.

FLÁVIA ADRIANE DE SALES, S. et al. Predição do peso de carcaça, espessura de gordura subcutânea e perda de peso corporal durante o transporte de bovinos de corte. Em: SEBASTIÃO DE CAMPOS, V. F. et al. (Eds.). **Exigências Nutricionais de Zebuínos Puros e Cruzados - BR-CORTE**. 4. ed. [s.l.] Editora Scienza, 2023. p. 139–164.

FONSECA, M. A. et al. Assessment of body fat composition in crossbred Angus × Nellore using biometric measurements1. **Journal of Animal Science**, v. 95, n. 12, p. 5584–5596, 1 dez. 2017.

FRANCO, Maria Regina Bueno. Aroma e sabor de alimentos: temas atuais. **Varela**, 2004.

GAGAOUA, M. et al. Understanding Early Post-Mortem Biochemical Processes Underlying Meat Color and pH Decline in the *Longissimus thoracis* Muscle of Young

Blond d'Aquitaine Bulls Using Protein Biomarkers. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 63, n. 30, p. 6799–6809, 5 ago. 2015.

GAGAOUA, M.; PICARD, B.; MONTEILS, V. Associations among animal, carcass, muscle characteristics, and fresh meat color traits in Charolais cattle. **Meat Science**, v. 140, p. 145–156, jun. 2018.

GOLDANSAZ, S. A. et al. Livestock metabolomics and the livestock metabolome: A systematic review. **PLOS ONE**, v. 12, n. 5, p. e0177675, 22 maio 2017a.

GORDO, D. G. M. et al. Genetic analysis of carcass and meat quality traits in Nelore cattle1. **Journal of Animal Science**, v. 96, n. 9, p. 3558–3564, 7 set. 2018.

GUNAWARDENA, J. Models in Systems Biology: The Parameter Problem and the Meanings of Robustness. **Elements of Computational Systems Biology.**, p. 19- 47., 2010.

HUFF LONERGAN, E.; ZHANG, W.; LONERGAN, S. M. Biochemistry of postmortem muscle — Lessons on mechanisms of meat tenderization. **Meat Science**, v. 86, n. 1, p. 184–195, set. 2010.

JALVINGH, A. W. The possible role of existing models in on-farm decision support in dairy cattle and swine production. **Livestock Production Science**, v. 31, n. 3–4, p. 351–365, jun. 1992.

JEONG, J. Y. et al. Metabolomics Analysis of the Beef Samples with Different Meat Qualities and Tastes. **Food Science of Animal Resources**, v. 40, n. 6, p. 924–937, nov. 2020.

JOHNSON, L. G. et al. Review of Postmortem Protein Oxidation in Skeletal Muscle and the Role of the Peroxiredoxin Family of Endogenous Antioxidants. **Meat and Muscle Biology**, v. 6, n. 3, 21 fev. 2023.

KERTH, C. R. et al. Using untargeted metabolomics and volatile aroma compounds to predict expert sensory descriptors and consumer liking of beef loin steaks varying in

quality grade, aging time, and degree of doneness. **Meat Science**, v. 204, p. 109255, out. 2023.

KHAN, M. I.; JO, C.; TARIQ, M. R. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors—A systematic review. **Meat Science**, v. 110, p. 278–284, dez. 2015.

KING, D. A. et al. Metabolomic Investigation of Tenderness and Aging Response in Beef Longissimus Steaks. **Meat and Muscle Biology**, v. 3, n. 1, 28 fev. 2019.

LAWLESS, Harry T.; HEYMANN, Hildegarde. Sensory evaluation of food: principles and practices. **Springer Science & Business Media**, 2010.

LEE, S. M. et al. Metabolomic approach for determination of key volatile compounds related to beef flavor in glutathione-Maillard reaction products. **Analytica Chimica Acta**, v. 703, n. 2, p. 204–211, out. 2011.

Meirelles, S.L., Gouveia, G. V., Gasparin, G., Alencar, M. M., Gouveia, J. J. S., Reginato, L. C. A. Candidate gene region for control of rib eye area in Canchim beef cattle. **Genetics and Molecular Research**, v. 10, n. 2, p. 1220-1226, 2011.

MOON, Y. H.; CHO, W. K.; LEE, S. S. Investigation of blood biomarkers related to meat quality and quantity in Hanwoo steers. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 31, n. 12, p. 1923–1929, 1 dez. 2018.

MUROYA, S. et al. Metabolomic approach to key metabolites characterizing postmortem aged loin muscle of Japanese Black (Wagyu) cattle. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 32, n. 8, p. 1172–1185, 4 jan. 2019.

Neto O. C., Rodrigues, V. C., Costa, D. P. B., Medeiros, L. F. D., Vieira, D. H., Camargo, A. M., Pádua F. T. Avaliação de algumas características da carcaça de bovinos e bubalinos. **Revista Brasileira de Medicina Veterinária**. v. 32, n. 3, p. 151-160, 2009

OLIVEIRA, L. B. et al. Crescimento alométrico dos componentes corporais de borregas mestiças alimentadas com níveis crescentes de concentrado na dieta. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 1, p. 391–400, 2 mar. 2017.

OUALI, A. et al. Revisiting the conversion of muscle into meat and the underlying mechanisms. **Meat Science**, v. 74, n. 1, p. 44–58, set. 2006.

OUALI, A. et al. Biomarkers of meat tenderness: Present knowledge and perspectives in regards to our current understanding of the mechanisms involved. **Meat Science**, v. 95, n. 4, p. 854–870, dez. 2013.

PACHECO, P. S. et al. Características quantitativas da carcaça de novilhos jovens e superjovens de diferentes grupos genéticos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 5, p. 1666–1677, out. 2005.

PICARD, B.; GAGAOUA, M. Muscle Fiber Properties in Cattle and Their Relationships with Meat Qualities: An Overview. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, n. 22, p. 6021–6039, 3 jun. 2020.

PLÀ, L. M. Review of mathematical models for sow herd management. **Livestock Science**, v. 106, n. 2–3, p. 107–119, fev. 2007.

Prado, C. S., Pádua, J. T., Correa, M. P. C., Ferraz, J. B. S., Resende, L. S. Comparação de diferentes métodos de avaliação da área de olho de lombo e cobertura de gordura em bovinos de corte. **Ciência Animal Brasileira.** n. 5, v. 3, p. 141-148, 2004.

RAMANATHAN, R. et al. The potential of metabolomics in meat science: Current applications, trends, and challenges. **Journal of Proteomics**, v. 283–284, p. 104926, jul. 2023.

Rodrigues et al., R.T.S. Rodrigues, M.L. Chizzotti, C.E. Vital, M.C. Baracat-Pereira, E. Barros, K.C. Busato, R.A. Gomes, M.M. Ladeira, T. Da Silva Martins Differences in beef quality between Angus (Bos taurus taurus) and Nellore (Bos taurus indicus) cattle through a proteomic and phosphoproteomic approach **PLoS One**, 12 (2017), pp. 1-21.

SCHOLZ, A. M. et al. Non-invasive methods for the determination of body and carcass composition in livestock: dual-energy X-ray absorptiometry, computed tomography, magnetic resonance imaging and ultrasound: invited review. **animal**, v. 9, n. 7, p. 1250–1264, jul. 2015.

SILVA, D. B. S. et al. Spliced genes in muscle from Nelore Cattle and their association with carcass and meat quality. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 14701, 7 set. 2020.

SILVA, F. D. L. et al. Curvas de crescimento em vacas de corte de diferentes tipos biológicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 3, p. 262–271, mar. 2011.

SILVA, S. D. L. E. et al. Alterações nas características de carcaça de tourinhos Nelore, avaliadas por ultra-som. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 2, p. 607–612, abr. 2006.

SILVESTRE, A. M. et al. Predicting feedlot cattle performance from intake of dry matter and NEg early in the feeding period. **Livestock Science**, v. 223, p. 108–115, maio 2019.

SOUZA, S. D. C.; ROBEIRO, L. F. **Aplicação do bem-estar animal e abate humanitário de bovinos para a garantia da qualidade da carne.** 2024.

SOUZA SILVA, J. D. et al. Biometric measurements of Santa Inês meat sheep reared on Brachiaria brizantha pastures in Northeast Brazil. **PLOS ONE**, v. 14, n. 7, p. e0219343, 30 jul. 2019.

STYGAR, ANNA HELENA; JOANNA MAKULSKA. **Aplicação de modelagem matemática no manejo de rebanhos bovinos - uma revisão**. **Annals of Animal Science 10 (2010): 333-348.**, 2010.

TEDESCHI; , M. L. CHIZZOTTI; , G.E. CARSTENS. **USANDO MODELOS MATEMÁTICOS NUTRICIONAIS PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA EM GADO DE CORTE**. , 2009.

TEIXEIRA, A.; RODRIGUES, S. Consumer perceptions towards healthier meat products. **Current Opinion in Food Science**, v. 38, p. 147–154, abr. 2021.

UEDA, S. et al. Exploring the Characteristic Aroma of Beef from Japanese Black Cattle (Japanese Wagyu) via Sensory Evaluation and Gas Chromatography-Olfactometry. **Metabolites**, v. 11, n. 1, p. 56, 15 jan. 2021.

WAN, X. et al. Elucidating a molecular mechanism that the deterioration of porcine meat quality responds to increased cortisol based on transcriptome sequencing. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 36589, 11 nov. 2016.

WARNER, R. D. et al. Meat tenderness: advances in biology, biochemistry, molecular mechanisms and new technologies. **Meat Science**, v. 185, p. 108657, mar. 2022.

Williams, A.R. Ultrasound applications in beef cattle carcass research and management. **Journal of Animal Science**. v. 80, n. 2, p. 183-188, 2002

CAPÍTULO 2: Regressão múltipla para estudo das características de produção, carcaça e qualidade da carne de bovinos nelore

Rafaela Cristina Rodrigues[1], Welder Angelo Baldassini[1,2*], Rick Anderson Freire Mangueira[3], Murilo Augusto Tagiariolli[1], Juliana Akamine Torrecilhas[2], Rogério Abdallah Curi[1,2], Otávio Rodrigues Machado Neto[1,2], Rodrigo de Nazaré Santos Torres[2], Luis Artur Loyola Chardulo[1,2*]

[1] School of Agricultural and Veterinary Sciences, São Paulo State University (UNESP), Jaboticabal (São Paulo), 14884-900, Brazil.

[2] School of Veterinary Medicine and Animal Science, São Paulo State University (UNESP), Botucatu (São Paulo), 18618-681, Brazil.

[3] Federal University of Piauí (UFPI), Campus Amilcar Ferreira Sobral (CAFS), Floriano (Piaui), 64808-605, Brazil.

Corresponding authors: w.baldassini@unesp.br ; luis.artir@unesp.br

RESUMO

Objetivou-se avaliar modelos de regressão linear (MRL) para o estudo de características de carcaça e qualidade da carne de bovinos de corte. Foram utilizadas informações de 700 bovinos Nelore, grupos de contemporâneos, machos não castrados, com 24 meses de idade e terminados em confinamento. Foram coletados dados de peso vivo inicial, dias de confinamento, ganho médio diário (GMD) e peso vivo final, características de carcaça (peso de carcaça quente [PCQ], rendimento de carcaça [RC], escore de marmoreio, área de olho de lombo [AOL], e espessura de gordura subcutânea [EGS]) e qualidade da carne (pH, cor [*L*, a*, b**, Chroma e Hue], capacidade de retenção de água [CRA], força de cisalhamento [FC] e perdas por cocção [PPC]). Correlações e análise de componentes principais (PCA) foram utilizadas para avaliar as relações entre as variáveis de produção, carcaça e carne. Os modelos foram comparados com base no coeficiente de determinação (R^2) e erro padrão residual (RSE). O MRL para a variável PCQ apresentou R^2 de 0,99 e RSE de 1,41, enquanto para as variáveis AOL e EGS foram obtidos R^2 e RSE de 0,20 e 8,16; e 0,13 e 2,25, respectivamente. Já os MRLs para cor da carne apresentaram R^2 e RSE, respectivamente, de 0,43 e 3,56 (*L**), 0,95 e 0,79 (*a**), 0,93 e 0,74 (*b**), 0,94 e 1,21 (Chroma) e 0,83 e 1,89 (Hue). Além disso, para a FC, verificou-se R^2 de 0,09 e RSE de 0,42, indicando limitação na capacidade de predição da maciez da carne. A PCA permitiu verificar que os quatro primeiros componentes principais explicaram mais de 60% da variação total dos dados. As variáveis de PCQ e PF foram positivamente associadas com as variáveis de cor (*a** e *b**), resultados que explicam os MRLs obtidos para PCQ e coloração com melhor capacidade preditiva. Já a maciez (FC) e as PPC foram positivamente associadas entre si, mas inversamente relacionadas com a EGS.

Palavras-chave: *Bos indicus,* confinamento, cor da carne, modelos de predição, maciez

1. Introdução

As características de qualidade da carne bovina desempenham um papel importante para o mercado consumidor, uma vez influencia a satisfação do consumidor final. A avaliação e predição de características de carcaça e de qualidade da carne são dificeis de serem executadas, uma vez que essas caracteristicas podem ser influenciadas por diversos fatores, como sexo, idade, além de aspectos genéticos e nutricionais (Sakowski et al., 2022). Além disso, a medição de algumas dessas características só pode ser realizada após o abate dos animais, seguida de coleta de amostras e análise laboratoriais. Essas análises exigem recursos e tempo, o que dificulta a rápida identificação de animais superiores em termos de qualidade de carne nos programa de seleção (Bautista-Díaz et al., 2020).

Alternativamente, análises estatísticas como a regressão linear, têm sido utilizada em pesquisas científicas com bovinos, suínos e ovinos (Judge et al., 2021; Jo et al., 2022; Barzegar et al., 2024), nos quais pesquisadores incluem desde parâmetros de produção até atributos de carcaça e qualidade de carne. Esses métodos contribuem para a implementação de práticas mais eficientes no manejo produtivo (Tedeschi, 2006; Silva, 2017). Uma das principais vantagens do uso de modelos de regressão linear (MRL) é sua capacidade de prever resultados futuros com base nas variáveis incluídas no modelo, proporcionando análise preditiva precisas que auxiliamn o manejo e na seleção de animais (Soulat et al., 2016).

A integração dos dados de produção, carcaça e qualidade de carne é fundamental para uma análise mais precisa das características desejáveis. Essa abordagem permite uma compreensão aprofundada dos fatores que influenciam a qualidade final do produto. No entanto, os estudos sobre essas características em animais zebuínos (*Bos indicus*), como a raça Nelore, predominante na pecuária brasileira, ainda são limitados (Junior et al., 2013). Apesar da importancia dos zebuínos para países tropicais como o Brasil, a qualidade da carne desses animais apresenta desafios, principalmente em relação à maciez e à deposição de gordura intramuscular (Nunes et al., 2024).

A utilização das informações de desempenho produtivo, características de carcaça e qualidade de carne podem ser utilizadas como variáveis preditoras dos atributos de qualidade da carne. No entanto, são escassos na literatura os estudos

com bovinos zebuínos que propuseram MRL para a predição de características de importância econômica, incluindo dados de carcaça (De Figueiredo Moura et al., 2023a) e qualidade de carne (Gagaoua et al.,2019). Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar MRL para a predição de características de carcaça e qualidade da carne em bovinos Nelore (*Bos indicus*).

2. Material e Métodos

2.1. Animais, características de carcaça e coleta de amostra de carne

Foram utilizados dados de 700 bovinos Nelore machos não castrados, grupos de contemporâneos, com 22-24 meses de idade, terminados em confinamento por 110 a 126 dias e oriundos de diversas fazendas registradas em programa de melhoramento genético da raça Nelore (Tabela 1), conduzido pela DeltaGen (https://deltagen.com.br/). As informações de produção foram disponibilizadas pelo programa de seleção. Os animais foram recriados a pasto e terminados em confinamento e abatidos em frigoríficos comerciais com Serviço de Inspeção Federal. Antes do abate, os animais foram submetidos a um jejum de pelo menos 16 horas. Após a abate, foi realizada a inspeção da cabeça e registrado o número de dentes incisivos permanetes (IP) de cada animal.

Tabela 1. Descrição dos animais e dados de desempenho de bovinos Nelore terminados em confinamento.

Ano	Animais(*n*)	Idade (meses)	Dias de confinamento (DDC)	Peso inicial (PI)	Peso final (PF)	Ganho médio diário (GMD) (kg)
2021	137	22,5	112	347,56	579,62	2,16
2022	298	23.8	126	337,32	550,59	1,76
2023	264	24.2	110	334,55	614,33	2,23

2.2. Características de carcaça e carne

Após abate as carcaças foram identificadas, pesadas e resfriadas de 2 a 4 º C por 48h. Foram determinadas as medidas de peso de carcaça quente (PCQ) e rendimento de carcaça (RC). Após o resfriamento, na meia carcaça esquerda, entre a 12ª e a 13ª costelas, o músculo *Longuíssimus thoracis* (LT) foi exposto e, em seguida, foi medido a espessura da gordura subcutânea (EGS, mm) e área de olho de lombo (AOL, cm ^{2}). A pontuação de marmoreio foi avaliada visualmente utilizando o sistema de classificação americana (USDA, 1997). O pH (48h post-mortem) foi determinado com um medidor de pH digital (Modelo HI 99163, Hanna Instruments, Woonsocket, Rhode Island, Estados Unidos), equipado com uma sonda de penetração (3 cm) e calibrado com pH 4.0 e 7.0

Posteriormente, foram coletadas amostras de carne do músculo LT entre a 12ª e 13ª costelas (direção cranial) para a avaliação das características de qualidade da carne em laboratório. As amostras foram separadas em bifes de 2,54 cm de espessura para serem utilizados nas análises de qualidade de carne. A coloração da carne (*L** - luminosidade; *a** - coloração vermelho; *b** - coloração amarelo) foi mensurada a partir do sistema CIELAB com colorímetro CR 400 (Konica Minolta Sensing, Inc., Tokyo, Japão). O índice colorimétrico Chroma (quantidade de cor ou saturação de cor) foi calculado pela equação $\sqrt{(a*)^2 + (b*)^2}$, e o Hue (matiz – coloração real) a partir da fórmula $tan(\frac{b*}{a*})^{-1}$ (AMSA, 2015; Gagaoua *et al*., 2018). A CRA foi determinada pela porcentagem de perda de água por pressão (Barbut, 1996).

A força de cisalhamento (FC) foi determinada de acordo com os procedimentos descritos (AMSA, 2015; Wheeler et al., 1995) com pequenas adaptações. Em resumo, as amostras foram colocadas em uma grade acoplada a um refratário de vidro e cozidas em um forno elétrico industrial (Feri90 Venâncio, Venâncio Aires, Rio Grande do Sul, Brazil). Quando a temperatura interna dos bifes atingiu 40 °C, eles foram virados e permaneceram no forno até que a temperatura final atingisse 71 °C. A temperatura interna foi monitorada com termopares ThermoPro, Modelo TP-16, (Hong Kong, China). Após o cozimento, as amostras foram resfriadas, pesadas e refrigeradas a 4 °C por 24 horas.

As perdas por cozimento (PPC) foram divididas em perda por evaporação (EVP) e perda por gotejamento (GOT), determinadas em porcentagem. A PT (perda total) foi obtida pesando-se apenas o refratário de vidro antes e depois do cozimento

da amostra. A EVP foi obtida pela pesagem da amostra antes e depois do cozimento, conforme procedimentos descritos na literatura (Baldassini et al., 2024). Para a determinação da FC, oito núcleos com um diâmetro de 1,27 cm foram seccionados em um Brookfield CT-3 Texture Analyzer (AMETEK Brookfield, Middleborough, Massachusetts, United States). O dispositivo foi equipado com uma lâmina de aço inoxidável de 3,07 mm de espessura com uma lâmina de corte em forma de v (ângulo de 60°), com uma célula de carga de 25 kg a uma velocidade de 20 cm/min. Os resultados foram expressos como a média de seis medições (núcleos) por amostra (em kg), excluindo os valores mais altos e mais baixos para minimizar a variabilidade.

3.3. Análise dos dados

Foi realizada uma análise descritiva e cálculos de coeficientes de correlação de Spearman entre as variáveis. A qualidade dos ajustes das equações desenvolvidas foi avaliada pelos coeficientes de determinação (R^2) e pelo erro padrão residual (RSE). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, 2022). Para caracterizar as variáveis de carcaça e qualidade da carne, foi realizada a análise de componentes principais (PCA) (Destefanis et al., 2000), utilizando pacotes *facto extra* (Kassambara, A. & Mundt, F., 2017) e *FactoMinerR* (LÊ; JOSSE; HUSSON, 2008) no software R. Todas as equações foram avaliadas quanto possíveis dependências lineares entre as variáveis incluídas no modelo foram removidas da matriz de dados da PCA as variáveis de GMD, EVP, GOT, *Chroma* e *Hue* devido à multicolinearidade entre as variáveis, conforme descrito na literatura (Barbosa et al., 2006).

3. Resultados

Na Tabela 2 foram descritos os dados de carcaça dos animais usados no estudo. A média, o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV) de algumas variáveis, como PCQ, RC (48h *post-mortem*) e AOL, foram inferiores a 20%. No entanto, a EGS, e o MAR apresentaram um CV superior a 20%, demonstrando que uma maior variabilidade nessas características.

Tabela 2: Características objetivas da qualidade da carcaça de touros Nelore terminados em confinamento.

Variáveis	n	Média	DP	Max.	Min.	CV
PCQ	700	325	33	441	230	10,2
RC	700	55,9	2,6	77,6	31,9	4,65
MAR, (1997) USDA	700	1,24	0,44	3,00	1	36,02
AOL (cm^2)	700	76,72	9,17	109	52	12,00
EGS (mm)	700	7,18	2,42	15,8	3	33,71

PCQ: Peso de carcaça quente; RC: Rendimento de carcaça; MAR: Marmoreio; AOL: Área de olho de lombo; EGS: Espessura de gordura subcutânea; DP: Desvio padrão; CV:Coeficiente de variação.

Os resultados das características de qualidade de carne foram descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Características objetivas da qualidade da carne de touros Nelore terminados em confinamento.

Variáveis	n	Média	DP	Max	Min	CV
pH	700	5,62	0,12	6,6	5,00	2,17
*L**	700	32,05	4,73	43,70	19,25	15,80
*a**	700	17,36	3,91	31,80	7,43	22,60
*b**	700	8,22	2,98	22,41	1,31	36,30
CH	700	19,30	4,96	38,91	7,60	25,70
Hue	700	24,95	4,67	25,00	10,04	18,74
CRA, %	700	62,60	14,10	80,50	23,47	28,80
FC, kg	700	6,48	1,32	11,21	3,64	20,40
PPC, %	700	25,0	5,02	61,39	4,30	20,10
GOT, %	700	4,30	2,53	38,17	0,85	57,43
EVP, %	700	20,73	4,85	60,00	2,00	23,39

pH: pH 48h *post-mortem*; *L**: Luminosidade; *a**: Intensidade do vermelho; *b**: Intensidade do amarelo; CH: Saturação de cor; Hue: Cor real; CRA: Capacidade de retenção de água; FC: Força de cisalhamento; PPC: Perda por cocção; GOT: Perdas por gotejamento; EVP: Perdas por evaporação.

Verificou-se diversas correlações entre variáveis de produção, características de carcaça e qualidade de carne (Figura S1; Material Suplementar). Observou-se forte correlação entre PF e PCQ (r = 0,89; $p < 0,01$), entre GMD e PF (r = 0,79; $p < 0,01$), assim como entre GMD e PCQ (r = 0,70; $p < 0,01$). Além disso, correlações negativas foram observadas entre DDC e GMD (r = -0,90; $p < 0,01$) (Figura 1A).

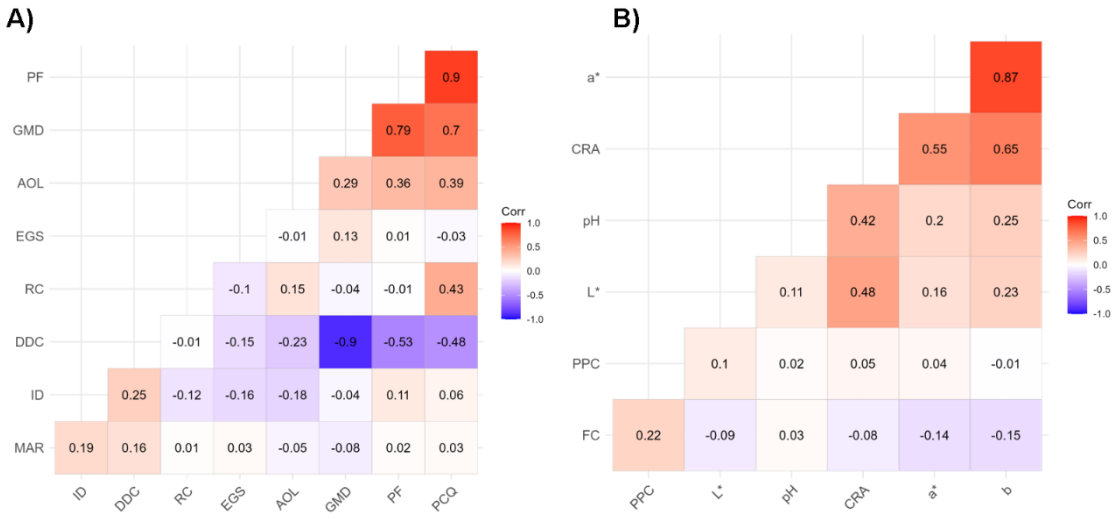


Figura 1. Correlação fenotípica entre características de carcaça (A) PCQ: Peso de carcaça quente; RC: Rendimento de carcaça; MAR: Marmoreio; AOL: Área de olho de lombo; EGS: Espessura de gordura subcutânea; DDC: Dias de confinamento; ID: Idade FC: Força de cisalhamento. correlação fenotípica entre características de qualidade da carne (B) pH: pH 48h *post-mortem*; PPC: Perda por cocção: GOT: Perdas por gotejamento; EVP: Perdas por evaporação *L**: Luminosidade; *a**: Intensidade do vermelho; *b**: Intensidade do amarelo; CRA: Capacidade de retenção de água; correlação fenotípica entre características de qualidade da carne (B)

Para os parâmetros de qualidade de carne, observou-se forte correlação fenotípica positiva entre *a** e *b** (r = 0,87; $p < 0,01$), de média magnitude entre CRA e *b** (r = 0,65; $p < 0,01$), CRA e *a** (r = 0,55; $p < 0,01$), pH e CRA (r = 0,42; $p < 0,01$), assim como entre *L** e CRA (r = 0,44; $p < 0,01$) (Figura 1B).

Foram gerados 10 MRL utilizando variáveis de desempenho, características de carcaça e qualidade da carne (Tabela 5). O modelo desenvolvido no presente estudo para a predição de PCQ apresentou coeficiente e de variação (R^2) de 0,99, o que evidencia sua excelente capacidade preditiva. O modelo desenvolvido para predição de AOL, apresentou baixa capacidade preditiva, com um R^2 de 0,20. O modelo de predição para FC também apresentou baixa capacidade preditiva, com R^2 de 0,19. Os modelos de predição das variáveis de cor da carne como *L**, *a**, *b**, CH e Hue apresentaram R^2 de 0,45, 0,95, 0,93, 0,94 e 0,83, respectivamente, indicando que os modelos apresentam capacidade preditiva considerada moderada a alta.

Tabela 4. Modelos de regressão para predição das características de carcaça e qualidade de carne de bovinos Nelore terminados em confinamento.

Modelos de regressão linear	RSE	R^2	*P*-valor
PCQ $\hat{Y}1 = -1086.56544 + 0.37434 \times$ ano abate $+ 0.53610 \times PF + 5.70860 \times RC + 0.27105 \times MAR + 0.10689 \times DDC + 5.37967 \times GMD$	1,41	0.99	<0.0001
AOL $\hat{Y}2 = 1544.4330 - 0.74746 \times$ ano abate $+ 0.07110 \times PF + 0.50525 \times RC - 0.0,03615 \times$ idade abate	8,16	0.20	<0.0001
EGS $\hat{Y}3 = 1858.27697 - 0.91234 \times$ ano abate $- 0.01062 \times PCQ + 0.52772 \times MAR - 0.05532 \times EL - 0.18907 \times a^* + 0.28367 \times b^* - 0.00642 \times$ idade abate $+ 1.63183 \times GMD$	2,25	0.13	<0.0001
MAR $\hat{Y}5 = 8.382978 - 0.015856 \times PF + 0.029878 \times PCQ - 0.168699 \times RC + 0.019020 \times EGS + 0.015967 \times L^* + 0.032382 \times a^* - 0.028763 \times CH + 0.000973 \times ID + 0.003810 \times DDC$	0,42	0.09	<0.0001
FC $\hat{Y}4 = -1206.29959 + 0.59604 \times$ ano abate $- 0.04906 \times EGS + 0.10263 \times DL + 0.06962 \times EL - 0.06717 \times L^* - 0.06187 \times b^* - 0.02063 \times CRA + 0.06001 \times DDC + 1.26025 \times GMD$	1,19	0.19	<0.0001
L^* $\hat{Y}6 = 25.7024 + 0.9201 \times MAR - 0.5332 \times FC - 0.2908 \times CL + 0.2664 \times DL + 0.4171 \times EL - 6.2042 \times pH - 0.2845 \times b^* + 0.1178 \times Hue + 0.1715 \times CRA + 0.2094 \times DDC + 3.6550 \times GMD$	3,56	0.43	<0.0001
a^* $\hat{Y}7 = 625.04574 - 0.3057 \times$ ano abate $+ 0.02583 \times RC + 0.15782 \times MAR + 0.01273 \times EL + 0.02161 \times L^* + 0.71641 \times b^* + 0.52474 \times CH - 0.3218 \times Hue + 0.01281 \times CRA - 0.00672 \times DDC$	0,79	0.95	<0.0001
b^* $\hat{Y}8 = -577.25101 + 0.28037 \times$ ano abate $- 0.01324 \times EL - 0.02509 \times L^* + 0.63623 \times a^* - 0.11480 \times CH + 0.30003 \times Hue + 0.01976 \times DDC + 0.49227 \times GMD$	0,74	0.93	<0.0001
CH $\hat{Y}9 = -6.6759 - 0.3223 \times MAR - 0.0325 \times L^* + 1.2195 \times a^* - 0.2894 \times b^* + 0.3497 \times Hue$	1,21	0.94	<0.0001
Hue $\hat{Y}10 = 18.64919 + 0.07090 \times L^* - 1.80000 \times a^* + 1.89384 \times b^* + 0.85492 \times CH + 0.00433$	1,89	0.83	<0.0001

RSE: Erro padrão residual; R^2 Coeficientes de determinação; PCQ: Peso de carcaça quente; AOL: Área de olho de lombo; EGS: Espessura de gordura subcutânea; MAR: Marmoreio FC: Força de cisalhamento; L^*:Luminosidade; a^*: Intensidade do vermelho; b^*: Intensidade do amarelo; CH: Chroma/ saturação de cor; Hue: Angulo de tonalidade/ cor real.

A PCA permitiu avaliar as relações entre as características de carcaça e qualidade de carne (Tabela 4). Verificou-se que os quatro primeiros componentes principais (PCs) explicaram mais de 60% da variação cumulativa dos dados (Tabela 5). Somente os PCs com autovalores superiores a 1,0 foram descritos, seguindo o critério de Kaiser, (1960).

Tabela 5. Componentes principais, autovalores e variância dos seis primeiros componentes principais obtidos no estudo de características de carcaça e qualidade de carne de bovinos Nelore.

Componente	Valor	% de variação	Variação acumulativa (%)
1	5,53	26,2	26,2
2	3,50	18,0	44,2
3	1,99	8,3	52,5
4	1,45	8,0	60,5
5	1,39	7,0	67,5
6	1,12	6,1	73,6

Com base na importância das variáveis na variância total dos dados de qualidade de carcaça e carne, os PC1, PC2, PC3 e PC4 foram denominados de “crescimento e cor”, baixa luminosidade e retenção de água”, “maciez e perdas por cocção” e “idade ao abate e rendimento de carcaça”, respectivamente (Tabela 6).

Tabela 6. Análise de componentes principais e coeficientes dos autovalores das características de carcaça e qualidade de carne de bovinos Nelore.

Variáveis	PC1	PC2	PC3	PC4
	“Crescimento e cor”	“Baixa luminosidade e retenção de água”	“Maciez e perdas por cocção”	“Idade ao abate e rendimento de carcaça”
PF	0,42	0,22	0,11	0,21
PI	0,42	0,22	0,11	0,21
PCQ	0,41	0,23	0,20	-0,22
RC	0,09	0,10	0,24	-0,69
MAR	0,05	-0,18	0,07	0,01
AOL	0,17	0,25	0,18	-0,18
EGS	-0,05	0,18	-0,40	0,19
FC	-0,08	-0,03	0,58	0,31

PPC	-0,01	-0,10	0,43	0,19
pH	0,14	-0,24	-0,02	0,27
*L**	0,10	-0,37	0,15	-0,21
*a**	0,34	-0,17	-0,22	-0,14
*b**	0,35	-0,22	-0,25	-0,10
CRA	0,31	-0,36	-0,04	0,01
ID	0,17	-0,42	0,01	0,57
DDC	-0,21	-0,36	0,18	-0,16

PF: Peso final; PI: Peso inicial; PCQ: Peso de carcaça quente; RC: Rendimento de carcaça; MAR: Marmoreio; AOL: Área de olho de lombo; EGS: Espessura de gordura subcutânea; FC: Força de cisalhamento; PPC: Perda por cocção; pH: pH 48h *post-mortem*; *L**: Luminosidade; *a**: Intensidade do vermelho; *b**: Intensidade do amarelo; CRA: Capacidade de retenção de água; ID: Idade; DDC: Dias de confinamento.

No presente estudo, as variáveis de PCQ e PF foram positivamente associadas com as variáveis de cor (*a** e *b**) e com CRA (Fig. 2A). A maciez (FC) e as PPC foram positivamente associadas entre si, mas inversamente relacionadas com a EGS (Fig. 2B).

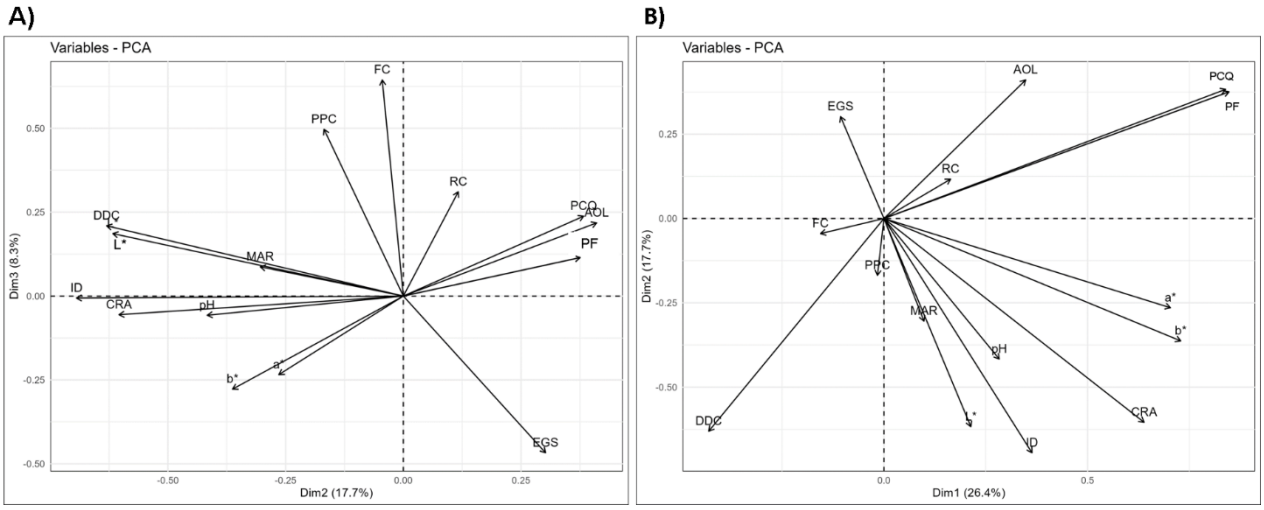


Figura 2. Análise de componentes principais indicando correlação entre as características de carcaça e qualidade de carne do músculo *Longíssimus thoracis* de bovinos Nelore. **A)** Componente principal 1 *vs*. 2 (PC1 *vs.* PC2). **B)** Componente principal 2 *vs.* 3 (PC 2 *vs*. PC3). PF: Peso final; PCQ: Peso de carcaça quente; RC: Rendimento de carcaça; MAR: Marmoreio; AOL: Área de olho de lombo; EGS: Espessura de gordura subcutânea; FC: Força de cisalhamento; PPC: Perda por cocção; pH: pH 48h *post-mortem*; *L**: Luminosidade; *a**: Intensidade do vermelho; *b**: Intensidade do amarelo; CRA: Capacidade de retenção de água; ID: Idade; DDC: Dias de confinamento.

4. Discussão

4.1. Avaliação dos modelos de regressão linear

Os MRLs são reconhecidos como ferramentas valiosas para avaliar o impacto das variáveis de desempenho, carcaça e qualidade de carne em touros de vacas de descarte (Soulat et al., 2016), bem como para entender como essas variáveis influenciam as características relacionadas à carcaça e ao produto final de novilhas (Soulat et al., 2016). A predição por meio desses modelos pode demonstrar de que maneira fatores intrínsecos e extrínsecos ao longo da vida do animal afetam as características da carcaça e a qualidade da carne, conforme reportado no estudo que utilizou dados de produção, carcaça e carne de bovinos Nelore (De Figueiredo Moura et al., 2023).

No presente estudo, foram desenvolvidos modelos específicos para parâmetros de carcaça e qualidade de carne, com ênfase para a exatidão nos parâmetros de PCQ e coloração (*L**, *a*, b**, CH e Hue). Contudo, foram identificadas limitações nos MRLs para características como AOL, EGS e FC. Esses resultados sugerem que tais variáveis podem ser influenciadas por fatores adicionais, como sistema de terminação e composição da dieta (Maciel et al., 2021), além dos porcessos relacionados a carne, como a duração e temperatura de cozimento, tempo *pós-mortem*, tipo de músculo e tamanho da amostra (Purslow; Gagaoua; Warner, 2021). Ainda não relatados pelos modelos comumente apresentados na literatura. Isso indica a necessidade de investigações mais aprofundadas para elucidar os determinantes subjacentes a essas características.

O MRL desenvolvido para a variável PCQ apresentou maior influência das variáveis PF, RC e GMD. Essas variáveis estão diretamente associadas à produção e à rentabilidade do sistema de produção, tornando-as parâmetros relevantes para orientar decisões de manejo. Entre elas, o GMD destacou por apresentar maior potencial de variação, essa variável ainda pode ser influenciada pelo peso corporal ao nascer e ao desmame, além de efeitos maternos, como a nutrição durante a gestação (Robinson; Cafe; Greenwood, 2013). O GMD é impulsionado pela energia disponível para crescimento após o atender os requisitos para manutenção e efeitos ambientais (Tedeschi et al., 2004). Além disso, o GMD está associado o tempo de confinamento e contribui para o rendimento de carcaça (De Figueiredo Moura et al., 2023).

Por outro lado, o modelo desenvolvido para a variável AOL mostrou maior influência das variáveis de PF, RC. No entanto, o modelo demonstrou uma baixa capacidade preditiva, sugerindo que essa característica pode ser influenciada por diversos fatores, com destaque para aqueles relacionado ao manejo nutricional como ingestão de matéria seca, proteína bruta e tempo de confinamento (De Figueiredo Moura et al., 2023). Já o modelo desenvolvido para EGS teve maior influência das variáveis MAR e GMD. Resultados semelhantes foram descritos por Sales et al., (2023), que ao trabalharem com modelo para predição de EGS, observaram que o GMD foi responsável pela sua maior parte da variação explicada no modelo. Em contrapartida, as variáveis ano de abate, PCQ, *L**, e *a** apresentaram coeficientes negativos, as quais atuaram reduzindo a deposição de gordura. Isso indica que a seleção de animais para maior peso de abate pode ter um efeito positivo sobre a carne mais escura (Gagaoua; Picard; Monteils, 2018). Estudo anterior (Wulf et al., 1997) relatou relações positivas entre peso de carcaça quente com as características de cor de 317 bovinos. Vale destacar que carcaças com musculatura mais pesada tendem a apresentar maior luminosidade do que a musculatura normal (Murray, 1989).

Com relação a EGS pode estar associada ao acabamento de carcaça e pode ser influenciado pelo manejo alimentar (Killinger et al., 2004). A relação negativa entre PCQ e EGS pode ser explicada pelo fato de que maior peso de abate (acabamento) tendem a depositar menos gordura subcutânea principalmente em animais mais jovens (Rezende et al., 2012). Além disso, animais da raça Nelore apresenta pouco desenvolvimento muscular em comparação com tecido adiposo subcutâneo até aos 24 meses de idade (Chardulo; Silveira; Vianello, 2013).

O modelo desenvolvido para a variável FC apresentou maior influência das variáveis ano de abate, perdas e GMD. Porém o modelo apresentou baixa capacidade preditiva, indicando que a FC é uma característica regulada por uma combinação de fatores, com destaque para o tecido conjuntivo (Purslow, 2014), a gordura intramuscular (Platter et al., 2003) e a degradação de proteínas *post-mortem* (Huff Lonergan et al., 2010). Por outro lado, De Figueiredo Moura et al. (2023) relataram um R^2 de 0,96 para predição da FC, mas advertiram que, apesar do alto coeficiente de variação, a FC demonstrou correlação significativa somente com o tempo de confinamento e o GMD. Eles concluíram que animais submetidos a períodos curto de

confinamento e maior GMD apresentam valores menores de FC, o que sugere maior maciez da carne (Moura et al., 2023). Esses achados reforçam a complexidade da regulação da FC e a necessidade de considerar múltiplos fatores para seu controle.

De maneira similar, o modelo para a variável MAR apresentou maior influência das variáveis PQC, EGS e a*. Assim como observado para outras variáveis, o MAR também pode ser influencia da por uma combinação de fatores ambientais, tais como raça, sexo, idade e manejo nutricional (Vaz et al., 2022). Cabe ressaltar que a MAR é uma característica de grande interesse econômico, contribuindo para a tipificação de carcaça e definição da qualidade da carne, influenciando diretamente a experiência sensorial do consumidor (Corbin et al., 2015).

Os modelos para as variáveis de coloração *L**, *a* *, *b**, *Chroma* e *Hue* apresentaram média a alta capacidade preditiva. No modelo da variável *L** foi observado uma grande influência da variável pH, que se destaca por seu papel no controle de qualidade tecnológica, pois influencia diretamente a vida útil e a capacidade de retenção de água da carne, que por sua vez afeta a refletividade da luz (Clinquart et al., 2022). Além disso, após o abate, o declínio do pH muscular *post-mortem* é acompanhado por alterações estruturais miofibrilares, que podem modificar o grau de penetração ou dispersão da luz pelos elementos estruturais da carne, afetando, assim, os aspectos de cor (Gagaoua et al., 2017; Hughes et al., 2017). Ademais, a variável *L** pode estar relacionada com o tipo fibra muscular (Gagaoua, Picard, e Monteils 2018). Em bovinos Nelore, (Chardulo et al., 2021) identificaram uma correlação negativa entre *L** e MyHC-I (fibras tipo I) e uma correlação positiva entre *L** e MyHC-IIa (fibras tipo II). Dessa forma, músculos com maior proporção de fibras tipo I tendem a apresentar valor mais baixos de *L**. Isso ocorre porque as fibras tipo I competem com a mioglobina pelo oxigênio, reduzindo sua disponibilidade e consequentemente, afetando a determinação da cor da carne (Picard e Gagaoua, 2020). No presente estudo, embora não tenha sido realizada a caracterização dos tipos de fibras musculares, a análise instrumental da cor revelou que as carnes apresentam médias de *L** (32,05) inferiores ao padrão estabelecido por Holman et al. (2016), que sugerem faixa ideal de *L** (34-35).

Os modelos para a predição de *a** e *b** incluíram a variáveis comuns como ano de abate, EVP, *L**, *Chroma*, *Hue* e DDC. Em bovinos, carnes com coloração mais

escura estão geralmente associados a idade de abate mais avançadas (Boccard et al., 1979; Mcgilchrist et al., 2012). Além disso, animais não castrados são conhecidos por serem mais reativos ao estresse, e, devido à depleção de glicogênio, o pH muscular diminui mais lentamente em comparação ao que ocorre em fêmeas (Page et al., 2001; Weglarz, 2010). De acordo com esses estudos, as reações de estresse podem influenciar o metabolismo muscular *post-mortem* e, consequentemente, as características de qualidade da carne, incluindo o pH e cor. Os modelos desenvolvidos para *Chroma* e *Hue* incluíram variáveis *L** e *a**, o que reforça a relação entre essas medidas de cor na carne de bovinos*,* tal como descrito em estudo prévio para a variável *Chroma* (Lopes et al., 2020). Adicionalmente, as medições de *Hue* fornecem uma indicação da descoloração na carne, particularmente em animais mais jovens (< 30 meses de idade), indicando maior formação de metamioglobina (Neethling et al., 2017).

4.2. Relações entre as variáveis de carcaça e carne utilizando abordagem multivariada

As características de carcaça e qualidade de carne que tiveram maior importância no PC1 foram PF, PCQ, *a**, *b** e CRA. Esses resultados indicaram maior importância de dados de produção e carcaça, seguido de variáveis de cor *a*, b** e CRA, as quais impactaram na variação da qualidade da carne. Em estudo anterior avaliando características de carcaça, pesquisadores (Boligon et al., 2013) relataram que três componentes principais foram suficientes para explicar a variância dos dados de qualidade de carne de bovinos Aberdeen Angus. Pesquisadores utilizando análise de PCA e regressão, também reportaram que as variáveis de cor exerceram maior influência no PC1 (Lopes et al., 2020), resultados que estão de acordo aos verificados neste estudo.

Ademais, as associações entre PCQ, PF com as variáveis de cor (*a*, b**) e CRA podem estar relacionadas à menor deposição de gordura, que foi relacionada à coloração vermelha (Astruc, 2014; Oksbjerg e Therkildsen, 2017). Além disso, essas relações podem ser explicadas pelo desenvolvimento muscular e pela variação individual no tipo de fibra muscular durante o crescimento dos animais (Astruc, 2014). Outros autores relatam que carcaças com musculatura mais pesada tendem a ter uma

incidência maior de CRA (Murray et al., 1989). Não obstante, a coloração pode ser influenciada pela dispersão da luz do músculo, que também pode estar ligada a contribuição da mioglobina, o que está intimamente ligada ao pH e a CRA da carne (Hughes et al., 2014).

Foi observada uma associação positiva entre FC e PPC, conforme também relatado por Chen et al. (2015) e Malheiros et al. (2020), que identificaram correlações positivas entre FC e CL por meio da PCA em carnes de frango e bovinos Nelore, respectivamente. Esses resultados sugerem que carne mais macias podem apresentar uma maior retenção de água. No entanto, as duas variáveis (FC e PPC) mostram-se inversamente relacionadas com a EGS, sugerindo que uma menor quantidade de gordura de cobertura (acabamento) pode comprometer a maciez da carne desses animais, tal como reportado em outro estudo com bovinos Nelore utilizando abordagem multivariada (Baldassini et al., 2017).

4. Conclusão

Os MRLs para os parâmetros PCQ e as variáveis de coloração apresentaram coeficientes de determinação mais elevados, indicando uma boa capacidade preditiva. No entanto, os MRLs desenvolvidos para variáveis relacionadas à musculosidade (AOL) e ao acabamento de gordura (EGS) apresentaram menor acurácia e precisão, sugerindo a influência de fatores adicionais que não foram plenamente capturados pelas variáveis incluídas nas análises.

A predição da FC também se mostrou limitada, possivelmente devido à complexidade de sua regulação, que envolve uma combinação de fatores, incluindo modificações no tecido conjuntivo e processos de proteólise post-mortem. Esses achados reforçam a necessidade de uma abordagem multifatorial na modelagem da qualidade da carne, considerando não apenas aspectos produtivos, mas também variáveis bioquímicas e estruturais que podem impactar diretamente essas características.

A relação entre deposição muscular, retenção de umidade e coloração também foi evidenciada, sugerindo que estratégias voltadas para a otimização do acabamento podem impactar positivamente atributos sensoriais desejáveis pelo consumidor.

Destaca-se a importância da incorporação de novas variáveis bioquímicas e estruturais nos modelos preditivos, visando aprimorar a avaliação da qualidade da carne de bovinos Nelore machos não castrados, provenientes de programas de seleção e terminados em confinamento.

5. **Referências bibliográfic**A

AMSA. **Research guidelines for cookery, sensory evaluation, and instrumental tenderness measurements of meat**. [S.L: S.N.].

ASTRUC, T. MUSCLE FIBER TYPES AND MEAT QUALITY. Em: **Encyclopedia of Meat Sciences**. [s.l.] Elsevier, 2014. p. 442–448.

BALDASSINI, W. A. et al. Meat quality traits of Nellore bulls according to different degrees of backfat thickness: a multivariate approach. **Animal Production Science**, v. 57, n. 2, p. 363, 2017.

BALDASSINI, W. A. et al. Exploring the Longissimus Muscle: Unraveling its Correlation with Meat Quality in Bos indicus and Crossbred Bulls. **Journal of Visualized Experiments**, n. 209, p. 66764, 12 jul. 2024.

BARBUT, S., B., S. Estimates and detection of the PSE problem in young turkey breast meat**. Canadian Journal of Animal Science, v. 76, n. 3, p. 455–457, set. 1996.** , 1996.

BARZEGAR, H. et al. Prediction of physicochemical and sensory parameters of coated lamb meat based on a novel edible coating. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 18, n. 3, p. 1664–1678, mar. 2024.

BELLO ACEBRÓN, L.; CALVO DOPICO, D. The importance of intrinsic and extrinsic cues to expected and experienced quality: an empirical application for beef. **Food Quality and Preference**, v. 11, n. 3, p. 229–238, maio 2000.

BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A RAPID METHOD OF TOTAL LIPID EXTRACTION AND PURIFICATION. **Canadian Journal of Biochemistry and Physiology**, v. 37, n. 8, p. 911–917, 1 ago. 1959.

BLUMER, T. N. Relationship of Marbling to the Palatability of Beef. **Journal of Animal Science**, v. 22, n. 3, p. 771–778, 1 ago. 1963.

BOCCARD, R. L. et al. The influence of age, sex and breed of cattle on their muscle characteristics. **Meat Science**, v. 3, n. 4, p. 261–280, out. 1979.

BOLIGON, A. A. et al. Principal components and factor analytic models for birth to mature weights in Nellore cattle. **Livestock Science**, v. 152, n. 2–3, p. 135–142, abr. 2013.

BONNY, S. P. F. et al. The variation in the eating quality of beef from different sexes and breed classes cannot be completely explained by carcass measurements. **Animal**, v. 10, n. 6, p. 987–995, 1 jan. 2016.

BOWMAN, C. E. et al. The Mammalian Malonyl-CoA Synthetase ACSF3 Is Required for Mitochondrial Protein Malonylation and Metabolic Efficiency. **Cell Chemical Biology**, v. 24, n. 6, p. 673- 684.e4, jun. 2017.

BRESLIN, P. A. S. An Evolutionary Perspective on Food and Human Taste. **Current Biology**, v. 23, n. 9, p. R409–R418, maio 2013.

BRETHOUR, J. R. Using serial ultrasound measures to generate models of marbling and backfat thickness changes in feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, v. 78, n. 8, p. 2055, 2000.

BRUGIAPAGLIA, A. et al. Relationship between beef consumer tenderness perception and Warner–Bratzler shear force. **Meat Science**, v. 78, n. 3, p. 153–156, mar. 2008.

CHARDULO, L. A. L. et al. Gene and protein expression of myosin heavy chain in Nellore cattle comparing growth or meat tenderness traits. **Animal Biotechnology**, v. 32, n. 3, p. 300–309, 1 jun. 2021.

CHARDULO, L. A. L.; SILVEIRA, A. C.; VIANELLO, F. Analytical Aspects for Tropical Meat Quality Assessment. Em: LIMA, G. P. P.; VIANELLO, F. (Eds.). **Food Quality, Safety and Technology**. Vienna: Springer Vienna, 2013. p. 53–62.

CLINQUART, A. et al. Review: On-farm and processing factors affecting bovine carcass and meat quality. **Animal**, v. 16, p. 100426, fev. 2022.

CORBIN, C. H. et al. Sensory evaluation of tender beef strip loin steaks of varying marbling levels and quality treatments. **Meat Science**, v. 100, p. 24–31, fev. 2015.

DE FIGUEIREDO MOURA, J. R. et al. Prediction models of carcass characteristics from non-castrated Nellore cattle finished in the feedlot system under tropical conditions. **Tropical Animal Health and Production**, v. 55, n. 6, p. 427, dez. 2023.

DENG, S. et al. The Effect of Breed and Age on the Growth Performance, Carcass Traits and Metabolic Profile in Breast Muscle of Chinese Indigenous Chickens. **Foods**, v. 11, n. 3, p. 483, 7 fev. 2022.

DESTEFANIS, G. et al. The use of principal component analysis (PCA) to characterize beef. **Meat Science**, v. 56, n. 3, p. 255–259, nov. 2000.

FLÁVIA ADRIANE DE SALES, S. et al. Predição do peso de carcaça, espessura de gordura subcutânea e perda de peso corporal durante o transporte de bovinos de corte. Em: SEBASTIÃO DE CAMPOS, V. F. et al. (Eds.). **Exigências Nutricionais de Zebuínos Puros e Cruzados - BR-CORTE**. 4. ed. [s.l.] Editora Scienza, 2023. p. 139–164.

FONSECA, M. A. et al. Assessment of body fat composition in crossbred Angus × Nellore using biometric measurements1. **Journal of Animal Science**, v. 95, n. 12, p. 5584–5596, 1 dez. 2017.

GAGAOUA, M.; MONTEILS, V.; PICARD, B. Decision tree, a learning tool for the prediction of beef tenderness using rearing factors and carcass characteristics. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 3, p. 1275–1283, fev. 2019.

GAGAOUA, M.; PICARD, B.; MONTEILS, V. Associations among animal, carcass, muscle characteristics, and fresh meat color traits in Charolais cattle. **Meat Science**, v. 140, p. 145–156, jun. 2018.

GAGAOUA, M.; TERLOUW, E. M. C.; PICARD, B. The study of protein biomarkers to understand the biochemical processes underlying beef color development in young bulls. **Meat Science**, v. 134, p. 18–27, dez. 2017.

GRUNERT, K. G.; BREDAHL, L.; BRUNSØ, K. Consumer perception of meat quality and implications for product development in the meat sector—a review. **Meat Science**, v. 66, n. 2, p. 259–272, fev. 2004.

HOLMAN, B. W. B. et al. Relationship between colorimetric (instrumental) evaluation and consumer-defined beef colour acceptability. **Meat Science**, v. 121, p. 104–106, nov. 2016.

HUFF LONERGAN, E.; ZHANG, W.; LONERGAN, S. M. Biochemistry of postmortem muscle — Lessons on mechanisms of meat tenderization. **Meat Science**, v. 86, n. 1, p. 184–195, set. 2010.

HUGHES, J. et al. High pH in beef longissimus thoracis reduces muscle fibre transverse shrinkage and light scattering which contributes to the dark colour. **Food Research International**, v. 101, p. 228–238, nov. 2017.

HUGHES, J. M. et al. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. **Meat Science**, v. 98, n. 3, p. 520–532, nov. 2014.

JO, K. et al. Prediction of cooking loss of pork belly using quality properties of pork loin. **Meat Science**, v. 194, p. 108957, dez. 2022.

JUDGE, M. M. et al. Eating quality of the longissimus thoracis muscle in beef cattle – Contributing factors to the underlying variability and associations with performance traits. **Meat Science**, v. 172, p. 108371, fev. 2021.

JUNIOR, C. C. et al. Brazilian beef cattle feedlot manure management: A country survey1. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 4, p. 1811–1818, 1 abr. 2013.

KAISER, H. F. Directional statistical decisions. **Psychological Review**, v. 67, n. 3, p. 160–167, maio 1960.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses**. , 2017. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>

KILLINGER, K. M. et al. Consumer visual preference and value for beef steaks differing in marbling level and color1. **Journal of Animal Science**, v. 82, n. 11, p. 3288–3293, 1 nov. 2004.

LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. **FactoMineR** : An *R* Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, n. 1, 2008.

LOPES, L. S. F. et al. Application of the principal component analysis, cluster analysis, and partial least square regression on crossbreed Angus-Nellore bulls feedlot finished. **Tropical Animal Health and Production**, v. 52, n. 6, p. 3655–3664, nov. 2020.

MACIEL, I. C. F. et al. Influence of beef genotypes on animal performance, carcass traits, meat quality, and sensory characteristics in grazing or feedlot-finished steers. **Translational Animal Science**, v. 5, n. 4, p. txab214, 1 out. 2021.

MALHEIROS, J. M. et al. Carcass and meat quality of Nellore cattle (Bos taurus indicus) belonging to the breeding programs. **Livestock Science**, v. 242, p. 104277, dez. 2020.

MCGILCHRIST, P. et al. Beef carcasses with larger eye muscle areas, lower ossification scores and improved nutrition have a lower incidence of dark cutting. **Meat Science**, v. 92, n. 4, p. 474–480, dez. 2012.

MURRAY, A. C. Factors affecting beef color at time of grading. **Canadian Journal of Animal Science**, v. 69, n. 2, p. 347–355, 1 jun. 1989.

MURRAY, A. C.; JONES, S. D. M.; SATHER, A. P. The effect of preslaughter feed restriction and genotype for stress susceptibility on pork lean quality and composition. **Canadian Journal of Animal Science**, v. 69, n. 1, p. 83–91, 1 mar. 1989.

NEETHLING, N. E. et al. Exogenous and Endogenous Factors Influencing Color of Fresh Meat from Ungulates. **Meat and Muscle Biology**, v. 1, n. 1, 30 nov. 2017.

NUNES, C. L. D. C. et al. Beef production and carcass evaluation in Brazil. **Animal Frontiers**, v. 14, n. 2, p. 15–20, 15 abr. 2024.

OKSBJERG, N.; THERKILDSEN, M. Myogenesis and Muscle Growth and Meat Quality. Em: **New Aspects of Meat Quality**. [s.l.] Elsevier, 2017. p. 33–62.

OLIVEIRA, L. B. et al. Crescimento alométrico dos componentes corporais de borregas mestiças alimentadas com níveis crescentes de concentrado na dieta. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 1, p. 391–400, 2 mar. 2017.

OUALI, A. et al. Revisiting the conversion of muscle into meat and the underlying mechanisms. **Meat Science**, v. 74, n. 1, p. 44–58, set. 2006.

OUALI, A. et al. Biomarkers of meat tenderness: Present knowledge and perspectives in regards to our current understanding of the mechanisms involved. **Meat Science**, v. 95, n. 4, p. 854–870, dez. 2013.

PAGE, J. K.; WULF, D. M.; SCHWOTZER, T. R. A survey of beef muscle color and pH. **Journal of Animal Science**, v. 79, n. 3, p. 678, 2001.

PICARD, B.; GAGAOUA, M. Proteomic Investigations of Beef Tenderness. Em: **Proteomics in Food Science**. [s.l.] Elsevier, 2017. p. 177–197.

PICARD, B.; GAGAOUA, M. Muscle Fiber Properties in Cattle and Their Relationships with Meat Qualities: An Overview. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, n. 22, p. 6021–6039, 3 jun. 2020.

PLATTER, W. J. et al. Relationships of consumer sensory ratings, marbling score, and shear force value to consumer acceptance of beef strip loin steaks. **Journal of Animal Science**, v. 81, n. 11, p. 2741–2750, 1 nov. 2003.

PURSLOW, P. P. New Developments on the Role of Intramuscular Connective Tissue in Meat Toughness. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 5, n. 1, p. 133–153, 28 fev. 2014.

PURSLOW, P. P.; GAGAOUA, M.; WARNER, R. D. Insights on meat quality from combining traditional studies and proteomics. **Meat Science**, v. 174, p. 108423, abr. 2021.

REZENDE, P. L. D. P. et al. Carcass and meat characteristics of crossbred steers submitted to different nutritional strategies at growing and finishing phases. **Ciência Rural**, v. 42, n. 5, p. 875–881, maio 2012.

ROBINSON, D. L.; CAFE, L. M.; GREENWOOD, P. L. Meat Science And Muscle Biology Symposium: Developmental programming in cattle: Consequences for growth, efficiency, carcass, muscle, and beef quality characteristics1,2. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 3, p. 1428–1442, 1 mar. 2013.

SAKOWSKI, T. et al. Genetic and Environmental Determinants of Beef Quality—A Review. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 9, p. 819605, 24 fev. 2022.

SANT'ANNA, A. C. et al. Relationships between temperament, meat quality, and carcass traits in Nellore cattle1. **Journal of Animal Science**, v. 97, n. 12, p. 4721–4731, 17 dez. 2019.

SILVA, S. R. Use of ultrasonographic examination for in vivo evaluation of body composition and for prediction of carcass quality of sheep. **Small Ruminant Research**, v. 152, p. 144–157, jul. 2017.

SOULAT, J. et al. Prediction of beef carcass and meat traits from rearing factors in young bulls and cull cows. **Journal of Animal Science**, v. 94, n. 4, p. 1712–1726, 1 abr. 2016.

SOUZA, S. D. C.; ROBEIRO, L. F. Aplicação do bem-estar animal e abate humanitário de bovinos para a garantia da qualidade da carne. 2024.

SOUZA SILVA, J. D. et al. Biometric measurements of Santa Inês meat sheep reared on Brachiaria brizantha pastures in Northeast Brazil. **PLOS ONE**, v. 14, n. 7, p. e0219343, 30 jul. 2019.

TEDESCHI, L. O. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agricultural Systems**, v. 89, n. 2–3, p. 225–247, set. 2006.

TEDESCHI, L. O.; FOX, D. G.; GUIROY, P. J. A decision support system to improve individual cattle management. 1. A mechanistic, dynamic model for animal growth. **Agricultural Systems**, v. 79, n. 2, p. 171–204, fev. 2004.

USDA, U. **United States standards for grades of carcass beef.** , 1997.

VAZ, R. Z. et al. Body mass index at calving on performance and efficiency of Charolais cow herds. **Tropical Animal Health and Production**, v. 54, n. 3, p. 168, 22 abr. 2022.

WATSON, R. et al. Consumer assessment of eating quality - development of protocols for Meat Standards Australia (MSA) testing. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 48, n. 11, p. 1360, 2008.

WĘGLARZ ANDRZEJ. Quality of beef from semi-intensively fattened heifers and bulls. **Quality of beef from semi-intensively fattened heifers and bulls**, 2010.

WULF, D. M. et al. Using objective measures of muscle color to predict beef longissimus tenderness. **Journal of Animal Science**, v. 75, n. 3, p. 684, 1997.

CAPÍTULO 3: Maciez, teor de gordura intramuscular e perfil metabolômico da carne de bovinos nelore como fatores de aceitação pelos consumidores

Rafaela Cristina Rodrigues[1], Murilo Augusto Tagiariolli[1], Welder Angelo Baldassini[1,2], Marcelo Coutinho[3], Juliama Akamine Torrecilhas[1], Gregori Rovadoscki[3], Nara Regina Brandão Cônsolo[4], Fernanda Maria Marins Ocampos[4], Luis Alberto Colnago[5], Luis Artur Loyola Chardulo[1,2*]

[1] School of Agricultural and Veterinary Sciences, São Paulo State University (UNESP), Jaboticabal (São Paulo), 14884-900, Brazil.

[2] School of Veterinary Medicine and Animal Science, São Paulo State University (UNESP), Botucatu (São Paulo), 18618-681, Brazil.

[3] Brazil Beef Quality ltd., Piracicaba (São Paulo), 13414-157, Brazil.

[4] School of Veterinary Medicine and Animal Science, University of São Paulo (USP), Pirassununga (São Paulo), 13635-900, Brazil.

[5] EMBRAPA Instrumentação, São Carlos (São Paulo), 13560-970, Brazil.

* Corresponding author: luis.artur@unesp.br

Resumo

Objetivou-se avaliar os efeitos da maciez, do teor de gordura intramuscular (GIM) e do perfil metabolômico do contrafilé de bovinos Nelore na qualidade sensorial da carne. Foram analisadas 280 amostras do músculo *Longissimus thoracis* (LT), submetidas às avaliações de força de cisalhamento (FC), GIM, cor, pH final, perdas por cocção e retenção de água. Quatro grupos contrastantes foram formados (n = 15/grupo): -FC-GIM (maciez intermediária, FC = 6,21 ± 0,14 kg e baixa GIM = 0,76 ± 0,03%); +FC+GIM (carne dura, FC = 8,26 ± 0,17 kg e maior GIM = 2,35 ± 0,15%); -FC+GIM (maciez intermediária, FC = 5,68 ± 0,18 kg e maior GIM = 2,54 ± 0,15%); e +FC-GIM (carne dura, FC = 8,41 ± 0,1 kg e menor GIM = 0,85 ± 0,08%). Além disso, a análise metabolômica foi conduzida por meio de espectroscopia de ressonância magnética nuclear (1H-RMN) nos diferentes grupos experimentais. Os resultados indicaram que o grupo -FC-GIM obteve as melhores avaliações dos consumidores, superando o grupo +FC-GIM em 10 pontos ($P < 0,01$). No grupo -FC-GIM, verificou-se uma maior concentração de glutamato e sucrose ($P < 0,05$), enquanto no grupo +FC-GIM houve um aumento na concentração de inosina-5'-monofosfato ($P < 0,05$). A análise das vias metabólicas revelou que, na comparação entre +FC-GIM e -FC-GIM, foram identificadas sete vias enriquecidas ($P < 0,05$), incluindo o metabolismo da nicotinamida, ácido araquidônico, triptofano, cisteína, folato, malato e aspartato. Entre os grupos +FC+GIM e -FC+GIM, oito vias metabólicas foram enriquecidas ($P < 0,05$), destacando-se o metabolismo do triptofano, ácido araquidônico, cisteína, folato, fenilalanina-tirosina, biossíntese de ácidos graxos, degradação de etanol e lisina. Já na comparação entre +FC-GIM e +FC+GIM, foram identificadas seis vias metabólicas enriquecidas ($P < 0,05$), com destaque para o metabolismo do triptofano, aspartato, ácidos graxos, beta-oxidação de ácidos graxos saturados de cadeia curta, beta-oxidação de ácidos graxos saturados de cadeia longa e biossíntese de ácidos graxos. A variação na maciez (FC), no teor de GIM e no perfil metabolômico influenciou a preferência dos consumidores. As carnes mais macias, com menor teor de GIM, receberam as maiores notas no teste sensorial, influenciadas pela presença de metabólitos como glutamato, sucrose, glicerol, triptofano e niacinamida.

Palavras chaves: Análise sensorial; *Bos indicus*; força de cisalhamento; metabolômica; qualidade de carne.

1. Introdução

O rebanho bovino brasileiro é predominantemente composto por animais zebuínos (*Bos indicus*), com destaque para raça Nelore (Junior et al., 2013). Apesar da extrema importância desses animais para a pecuária brasileira, a qualidade da carne proveniente de animais zebuínos apresenta limitações, principalmente em relação à maciez e à deposição de gordura intramuscular (Picard et al., 2014). O consumidor brasileiro, diante da falta de padronização na qualidade da carne de zebuínos, prioriza a maciez como principal critério para aceitação do produto (Baldassini et al., 2023).

A maciez da carne é considerada um atributos sensoriais relevantes para os consumidores, afetando a satisfação geral e a aceitabilidade da carne bovina (Listrat et al., 2016; O'Quinn et al., 2018; Ramalingam et al., 2019). A cor e a gordura intramuscular são indicadores de qualidade uma vez que a aparência desperta o interesse do consumidor uma vez que, ao preparar o alimento para o consumo o mesmo experimentará as qualidades sensoriais de maciez, sabor e suculência (Grunert et al., 2004; O'Sullivan et al., 2021).

A marmorização ou gordura intramuscular é a quantidade de gordura visível que se localiza entre as fibras musculares (Lee et al., 2018). Uma maior quantidade de gordura intramuscular/marmorização pode contribuir para melhorar a sensação de maciez, suculência, sabor e aceitabilidade geral da carne (Corbin et al., 2015; Lee et al., 2019; O'Quinn et al., 2012). Diversos estudos têm insvestigado a influência da diferentes níveis de marmorização nos atributos de qualidade e na aceitabilidade sensorial da carne bovina por parte dos consumidores (Antonelo et al., 2022; Corbin et al., 2015; Lee et al., 2019; O'Quinn et al., 2012; Shahrai et al., 2021). Por outro lado, no caso de animais *Bos indicus,* observa-se uma reputação associada a carnes com maior dureza e maior variabilidade nessa característica, o que pode representar um dos principais desafios para a melhor aceitação da sua carne no mercado (Scheffler, 2024).

Nesse sentido, compreender as principais variáveis que influenciam o sabor da carne bovina é sem dúvida um desafio. Poucos estudos foram conzudidos para a análise de metabólitos na carne e suas relações com a maciez e teor de gordura intramuscular (Sartori et al., 2024). A metabolômica é uma análise robusta que visa

identificar e quantificar os metabólitos em uma amostra biológica (Goldansaz et al., 2017), podendo ser utilizada para explicar as diferenças da carne bovina especialmente no que diz respeito à maciez e gordura intramuscular. Com bovinos Nelore, inexistem estudos que avaliaram o perfil metabolômico da carne e os impactos na aceitação pelos consumidores.

Nesse contexto, objetivou-se avaliar os efeitos da maciez, teor de gordura intramuscular e perfil metabolômico do contrafilé de bovinos Nelore na determinação da qualidade sensorial da carne.

2. Material e Métodos

Todos os procedimentos executados no presente estudo foram previamente aprovados pelo comitê de ética no uso de animais da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia - UNESP (protocolo CEUA nº 07595/2019).

2.1. Animais e características de carcaça

Duzentos e oitenta animais, contemporâneos, comidade entre 22 e 24 meses foram recriados a pasto e terminado em confinamento, e quando atingiram peso vivo médio de 522,5 ± 47,6 kg foram abatidos. Os animais foram obtidos de rebanhos registrados em programa de melhoramento genético, dedicado ao progresso genético da raça Nelore no Brasil. Os animais foram abatidos conjuntamente (grupo de abate) em frigorífico comercial de acordo com as normas de Abate Humanitário de Bovinos (Ludtke et al., 2012). Após o abate as carcaças foram identificadas e resfriadas em câmara fria a 1ºC por 24 horas. Neste momento foram colhidas informações de rendimento e peso médio de carcaça quente. Na desossa foram colhidas amostras do *Longissimus thoracis* (LT) da meia carcaça esquerda de todos os animais entre a 11ª e 13ª vértebra torácica, que foram congeladas (-20ºC) até posterior análises de qualidade da carne em laboratório.

2.2 Análises laboratoriais de qualidade da carne

Foi medido a espessura da gordura subcutânea (EGS, mm) e área de olho de lombo (AOL, cm ^{2}). A pontuação de marmoreio foi avaliada visualmente utilizando o

sistema de classificação americana (USDA, 1997). O pH (48h post-mortem) foi determinado com um medidor de pH digital (Modelo HI 99163, Hanna Instruments, Woonsocket, Rhode Island, Estados Unidos), equipado com uma sonda de penetração (3 cm) e calibrado com pH 4.0 e 7.0.

A força de cisalhamento (FC) foi determinada de acordo com os procedimentos descritos (AMSA, 2015; Wheeler et al., 1995) com pequenas adaptações. Em resumo, as amostras foram colocadas em uma grade acoplada a um refratário de vidro e cozidas em um forno elétrico industrial (Feri90 Venâncio, Venâncio Aires, Rio Grande do Sul, Brazil). Quando a temperatura interna dos bifes atingiu 40 °C, eles foram virados e permaneceram no forno até que a temperatura final atingisse 71 °C. A temperatura interna foi monitorada com termopares ThermoPro, Modelo TP-16, (Hong Kong, China). Após o cozimento, as amostras foram resfriadas, pesadas e refrigeradas a 4 °C por 24 horas.

As perdas por cozimento (PPC) foram divididas em perda por evaporação (EVP) e perda por gotejamento (GOT), determinadas em porcentagem. A PT (perda total) foi obtida pesando-se apenas o refratário de vidro antes e depois do cozimento da amostra. A EVP foi obtida pela pesagem da amostra antes e depois do cozimento, conforme procedimentos descritos na literatura (Baldassini et al., 2024). Para a determinação da FC, oito núcleos com um diâmetro de 1,27 cm foram seccionados em um Brookfield CT-3 Texture Analyzer (AMETEK Brookfield, Middleborough, Massachusetts, United States). O dispositivo foi equipado com uma lâmina de aço inoxidável de 3,07 mm de espessura com uma lâmina de corte em forma de v (ângulo de 60°), com uma célula de carga de 25 kg a uma velocidade de 20 cm/min. Os resultados foram expressos como a média de seis medições (núcleos) por amostra (em kg), excluindo os valores mais altos e mais baixos para minimizar a variabilidade.

A coloração da carne (*L** - luminosidade; *a** - coloração vermelho; *b** - coloração amarelo) foi mensurada a partir do sistema CIELAB com colorímetro CR 400 (Konica Minolta Sensing, Inc., Tokyo, Japão). O índice colorimétrico Chroma (quantidade de cor ou saturação de cor) foi calculado pela equação $\sqrt{(a*)^2 + (b*)^2}$, e o Hue (matiz – coloração real) a partir da fórmula $tan(\frac{b*}{a*})^{-1}$ (AMSA, 2015; Gagaoua *et al*., 2018). A capacidade de retenção de água (CRA) foi determinada pela porcentagem de perda de água por pressão (Barbut, 1996).

A determinação do teor de gordura intramuscular foi realizada pelo método descrito por (Bligh e Dyer, 1959) por extração a frio utilizando clorofórmio e metanol, quantificando-se lipídeos polares e apolares.

2.3. Formação dos grupos experimentais e testes sensoriais com consumidores

Os resultados das análises de força de cisalhamento e quantidade de gordura intramuscular foram obtidos apartir de quatro grupos distintos (n= 15). A separação das amostras por FC foi realizada de acordo com os critérios estabelecidos por Brugiapaglia et al., (2008). Para a característica GIM foram classificadas carnes com maior maior teor de gordura superior a 2,0%, enquanto com menor teor de gordura inferior a 1,0%.

Desta forma obteve-se quatro grupos contrastrantes: -FC-GIM; carne com maciez intermediária (6,21 ± 0,14 kg) e menor teor de gordura (0,76 ± 0,03%); 2) +FC+GIM; carne dura (8,26 ± 0,17 kg) e maior teor de gordura intramuscular (2,35 ± 0,15%); 3) -FC+GIM; carne com maciez intermediária (5,68 ± 0,18 kg) e maior teor gordura intramuscular (2,54 ± 0,15%) e; 4) +FC-GIM; carne dura (8,41 ± 0,1 kg) e menor teor de gordura (0,85 ± 0,08%). O design experimental esta apresentado na Figura 1.

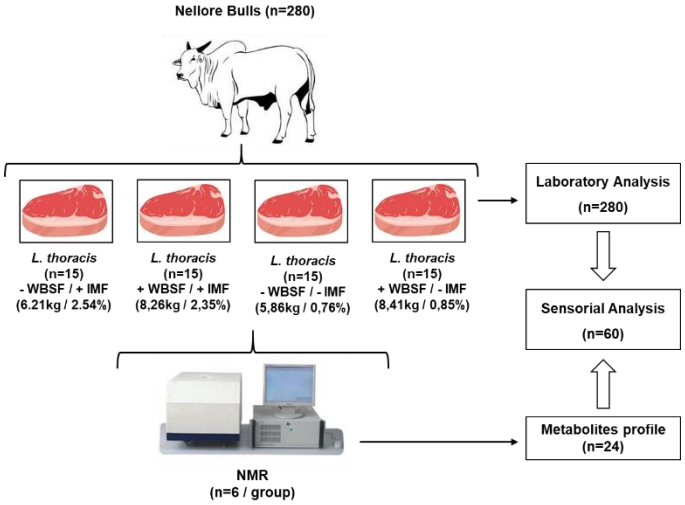


Figura 1. Formação dos grupos experimentais e modelo metodológico de análises

Para a realização da análise sensorial, os bifes selecionados (n = 60) foram descongelados e resfriados por 5 dias a fim de padronizar as carnes e os testes. A análise sensorial foi conduzida com consumidores não treinados que atribuíram notas de 0 a 100 para características de qualidade de carne como maciez, sabor, suculência e satisfação geral utilizando o software Sensory Meat v.1.6 (Brazil Beef Quality ltd., Piracicaba, São Paulo, Brasil) baseado na metodologia da MSA descrito por Watson et al. (2008). Para participação, os consumidores declararam possuir idade entre 18 e 70 anos, consumir carne pelo menos uma vez por semana, e preferir carne preparada ao ponto.

Cento e vinte consumidores foram utilizados na análise sensorial, divididos em dez sessões, compreendendo doze provadores por sessão. Os consumidores receberam sete amostras, sendo a primeira degustação utilizada como amostra de referência. Para isso, uma das amostras testadas foi selecionada aleatoriamente em cada sessão. Após terem provado as amostras de referência, os provadores analisaram seis amostras subsequentes que continham os tratamentos.

As amostras do GIM foram descongeladas por 24 horas em temperatura de 5 °C em geladeira (Gelopar, modelo GREP-4PAI, Brasil), apresentando temperatura inferior a 10 °C antes de serem preparadas. Bifes com espessura de 2,5 cm foram mergulhados em solução salina contendo NaCl 5%. Posteriormente, os bifes foram grelhados em churrasqueira gás (Char-Broil Churrasqueira Signature 3Q - Infravermelho, Estados Unidos) e tiveram a temperatura interna monitoradas por termopares (ThermoPro - Modelo TP-16, China). As amostras foram removidas das churrasqueiras ao atingirem a temperatura de 63 °C em seu centro geométrico. Após o preparo as amostras foram particionadas em sub amostras (1.27 x 1.27 x 2.5 cm) e acondicionadas em potes fechados para manter a umidade, e em estufas para controlar e estabilizar a temperatura das amostras antes de serem fornecidas aos consumidores. As amostras foram servidas em recipientes descartáveis em formato de gaveta com divisórias para impedir a comparação visual entre as amostras e para conservar a temperatura durante a avaliação.

2.4 Metabolômica da carne

Para o estudo do perfil de metabólitos na carne utilizou-se a espectroscopia de ressonância magnética nuclear (^{1}H-RMN). Para tanto, todas as amostras utilizadas no teste sensorial foram previamente separadas no momento das análises bioquímicas da carne, sendo identificadas e armazenadas (-80 ºC). Posteriormente à condução do teste sensorial, seis amostras por grupo experimental foram escolhidas aleatoriamente para análise metabolômica.

2.5 Extração de Metabólitos da Carne

A metodologia de extração seguiu protocolo descrito por Cônsolo et al., (2020), onde aproximadamente 0,5 gramas das amostras foram homogeneizadas em uma solução gelada de metanol, clorofórmio e água MiliQ (2:2:1, v:v:v). Em seguida, as amostras foram acondicionadas em gelo por 10 minutos, e posteriormente, centrifugadas por 20 min, 14.000 rpm a 4°C. Em seguida, 500 µL do sobrenadante foi coletado e acondicionado em um micro-tubo e armazenado a -80° C até o dia da análise.

2.5.1 Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear (^{1}H-NMR)

A espectroscopia de ressonância magnética nuclear de próton unidimensional (1D ^{1}H-NMR) foi utilizada para aquisição do perfil do metabólito (EMBRAPA Instrumentação, São Carlos, SP, Brasil). No dia anterior à análise em ^{1}H-RMN, as amostras foram descongeladas, os reagentes foram removidos através da secagem a vácuo (SpeedVac), restando apenas um pellet de metabólitos. Posteriormente, os metabólitos foram ressuspendidos em 550 µl de tampão de RMN, que contêm óxido de deutério (0,10 M, pH = 7.3) contendo 0.050% w/w do padrão interno DSS. Posteriormente a amostra preparada foi transferida para os tubos de 5 mm de RMN e inseridos no aparelho de 600 MHz para aquisição dos espectros.

Os espectros de RMN de ^{1}H foram adquiridos a 300 K em um espectrômetro Bruker Avance 14.1 T (Bruker Corporation, Karlsruhe, Baden-Wurttemberg, Alemanha) a 600,13 MHz para ^{1}H, usando uma banda larga com sonda de 5 mm. D_2O

foi usado como um solvente de bloqueio e DSS como a referência de deslocamento químico para ^{1}H. Os espectros foram adquiridos usando um único pulso de 90 ° e cada espectro era a soma de 128 decaimentos de indução livres. A supressão de água foi realizada usando a sequência de pulso Bruker “zgesgp” (escultura de excitação com gradientes) e os seguintes parâmetros de aquisição adicionais foram usados: 13,05 µs de pulso de 90 graus, atraso de relaxamento de 5,0 s, pontos de dados de 128 K, 64 varreduras, aquisição de 3,89 s tempo e largura espectral de 10,00 ppm.

2.5.2 Processamento espectral e quantificação de metabólitos

Os espectros 1D de ^{1}H-NMR foram processados usando o software Chenomx NMR Suite Professional 10.0 (Chenomx Inc., Edmonton, Canadá). A correção de fase e linha de base foi realizada e o pH foi calibrado usando as ressonâncias do imidazol. Os espectros foram referenciados ao pico de metil DSS a 0,00 ppm para quantificação dos metabólitos. A quantificação relativa foi feita por comparação da área dos picos do metabólito selecionado com a área sob o pico do DSS metil, que corresponde a uma concentração conhecida de 0,5 mM em cada amostra. Após a leitura espectral, uma planilha foi gerada com a quantificação relativa de cada metabólito em cada amostra.

2.6 Análise estatística

2.6.1. Análise estatística de qualidade da carne e sensorial

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, considerando cada consumidor como um bloco. No modelo estatístico, o consumidor foi incluído como efeito aleatório, enquanto a sequência dos tratamentos foi controlada como um fator fixo. Cada consumidor avaliou sete amostras, sendo uma amostra inicial "dummy". Os quatro tratamentos foram distribuídos de forma que dois deles fossem repetidos em cada conjunto de amostras. A distribuição das repetições variou entre os consumidores, garantindo uma alternância equilibrada entre os tratamentos. A análise estatística foi conduzida por meio de um Modelo Linear Generalizado Misto

(GLMM), assumindo distribuição Gamma para os dados. O modelo foi ajustado utilizando o pacote lme4 no R (Versão 4.4.2), devido à não conformidade dos resíduos com a distribuição normal e à falta de homogeneidade de variâncias, tornando o GLMM a escolha mais adequada para essa análise. Foi adotado o método *clipped* (Bonny et al., 2016) no qual, para cada sessão dentro de cada amostra, foram eliminados os dois valores mais altos e os dois mais baixos.

Para as caracteristicas obejetivas de qualidade, as médias foram comparadas utilizando o teste Tukey, e um valor de ($P < 0,05$) foi adotado como nível crítico de probabilidade. O modelo incluiu o teor de gordura imtamuscular e nível de maciez da carne como efeito fixo e o animal como efeito aleatório. Os termos de interação foram testados da seguinte forma:

$$Yij = \mu + Ii + Tj + Ak + Ti \times Ak + eijk$$

Onde Yij = característica de interesse (característica objetiva de qualidade da carne); μ = média geral; Ii = efeito do animal; Tj = efeito do teor de gordura intamuscular; Ak = efeito do nível de maciez; $Tj \times Ak$ = efeito da interação, e $eijk$ = erro aleatório.

Para as variáveis sensoriais maciez, sabor, suculência e satisfação geral, o modelo incluiu a sequência (degustação da amostra) e o grupo experimental como efeitos fixos e o consumidor como efeito aleatório. Foi realizado o teste de Tukey para comparar as médias ($P < 0,05$). Os termos de interação foram testados da seguinte forma:

$$Y = \mu + C + S + T + e$$

Onde Y = característica de interesse (característica de qualidade de carne); μ = média geral; C = efeito do consumidor; S = efeito da sequência; T = efeito do grupo experimental; e = erro aleatório.

Correlações entre os resultados das análises objetivas e sensoriais de qualidade da carne foram avaliadas.

2.6.2. Análise estatística do perfil metabolômico

Para a análise metabolômica foi utilizado o software R e o Metabo Analyst 6.0 (Chong et al., 2018). A análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA) foi realizada no software R utilizando todos os tratamentos. No Metabo Analyst, a tabela de concentração de metabólitos foi carregada e os dados foram transformados em algoritmos e em escala de pareto antes da análise. Foi realizada a análise de volcano plot para comparação de pares: (+FC-GIM *vs.* -FC-GIM), (+FC+GIM *vs*. -FC+GIM), (+FC-GIM *vs.* +FC+GIM). A combinação dos pares foi realizada para avaliar como diferentes níveis de maciez e teor gordura intramuscular impactam na qualidade sensorial da carne, por consequência, a percepção dos consumidores.

O conjunto de dados de metabólitos foi utilizado para construir uma visão geral dos conjuntos de metabólitos enriquecidos, indicando as vias mais importantes entre os tratamentos. Os nomes dos compostos foram padronizados de acordo com a Kyoto Enciclopédia de Genes e Genomas ID e a biblioteca *Bos taurus* foi usada para realizar a análise.

3. Resultados

3.1. Variáveis de qualidade de carne

Os dados de qualidade da carne de bovinos Nelore estão apresentados na Tabela 1. As características de coloração, pH, CRA, PD e PPC não apresentaram diferenças (P > 0.05) entre os tratamentos. Entretanto, como esperado, as variáveis FC, GIM foram diferentes (*P* < 0,01) entre os grupos experimentais. Os maiores valores de FC foram encontrados nos tratamentos +FC em comparação ao -FC, enquanto maiores valores de GIM foram encontrados em +GIM comparado ao grupo -GIM. Alem disso, o menor (P = 0,024) valor de PPC foi observado no grupo -FC-GIM em comparação ao +FC-GIM.

Tabela 1 – Caracterização do objeto de estudo por análises objetivas da qualidade da carne

Variáveis[1]	**n**	**-FC+GIM**	**+FC+GIM**	**-FC-GIM**	**+FC-GIM**	**EP**	***P*-valor**
*a**	15	17,66	17,14	16,03	16,69	0,42	0,576

*b**	15	7,15	6,38	6,29	6,35	0,23	0,506
L	15	28,34	28,48	28,56	27,76	0,41	0,904
Hue	15	21,67	20,15	21,2	20,62	0,29	0,269
CH	15	19,07	18,3	17,24	17,87	0,47	0,580
GOT	15	4,89	5,02	3,58	4,45	0,2	0,044
EVP	15	20,67	20,38	18,92	22,98	0,6	0,109
PPC	15	25,56ab	25,39ab	22,5b	27,43a	0,22	0,024
pH	15	5,69	5,66	5,65	5,68	0,01	0,689
PD	15	2,6	2,82	2,94	3,88	0,57	0,180
FC	15	5,86b	8,26a	6,21b	8,41a	0,17	<0,01
CRA	15	37,74	35,52	38,57	36,45	1,58	0,249
GIM	15	2,54a	2,35a	0,76b	0,85b	0,12	<0,01

[1] *a**: Intensidade de vermelho; *b**: Intensidade de amarelo; e *L**: luminosidade; HUE: cor real; CH: Chroma; GOT: Perda gotejamento; EVP: Perdas por evaporação; PC: perdas por cozimento; pH: pH 48h *post-mortem* ; PD: Perdas por descongelamento; FC: Força de cisalhamento; CRA: Capacidade de retenção de água; GIM: Gordura intramuscular [a,b] médias com diferentes letras sobrescritas na mesma linha diferem (*P* < 0,05, teste de Tukey).

3.2. Análise sensorial

O grupo -FC-GIM obteve melhores notas (*P* < 0,01) na avaliação sensorial pelos consumidores (Figura 2). O grupo +FC+GIM apresentou resultados semelhantes ao -FC-GIM em relação às características de sabor, suculência e satisfação geral. Já a maciez sensorial foi diferente entre os grupos +FC+GIM versus -FC-GIM (65,39 e 68,66 respectivamente).

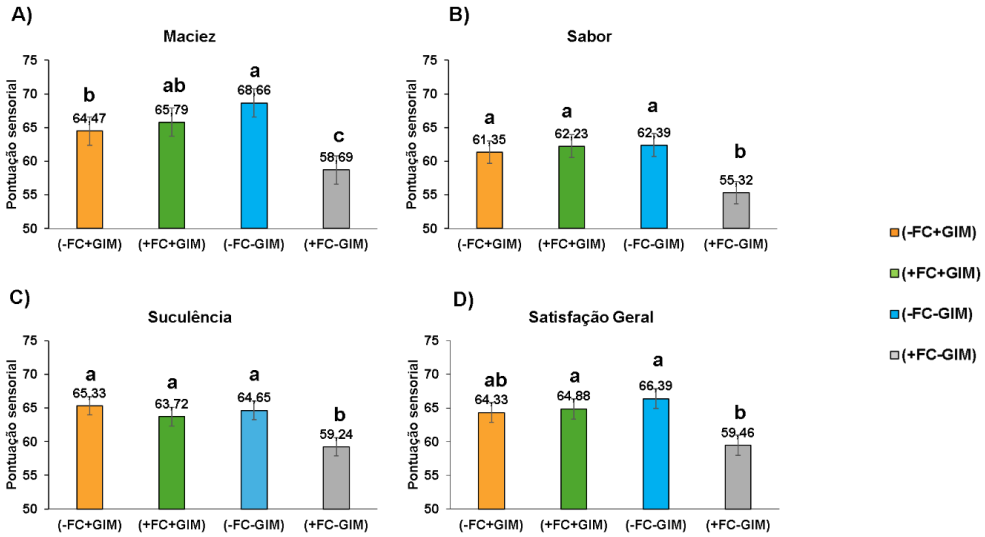


Figura 2. Características sensoriais da qualidade da carne dos quatro tratamentos segregados por força de cisalhamento e quantidade de lipídios totais. [a,b] médias

com diferentes letras sobrescritas na mesma linha diferem (P < 0,05, teste de Tukey).

O grupo caracterizado pelo +FC-GIM foi o que menos agradou os consumidores em todos os parâmetros avaliados (P < 0,01), seguido do -FC+GIM. O sabor e a suculência foram afetados negativamente quando FC era maior e GIM menor. A satisfação geral foi maior e igual no tratamento com -FC-GIM e +FC+GIM, seguido do com -FC+GIM, e por último o grupo +FC-GIM.

3.3. Perfil metabolômico da carne e vias metabólicas

Com base em análises de 1D ^{1}H-NMR, 45 metabólitos foram identificados e quantificados nas amostras de carne bovina. O conjunto de metabólitos foi utilizado para realização da análise de PLS-DA, o qual mostrou uma sobreposição nas amostras dos grupos -FC+GIM e -FC-GIM, indicando similaridades no perfil metabolômico desses animais (Figura 3). Porém, observou-se uma tendência de separação entre os tratamentos em função da variação de GIM, bem como uma distinção entre os grupos +FC e -FC, principalmente nas carnes com maior GIM (Figura 3). Para uma compreensão mais detalhada das diferenças específicas no perfil metabolômico em função dos tratamentos, foi realizada uma comparação de pares por meio de análise de Volcano Plot e de enriquecimento de vias metabólicas.

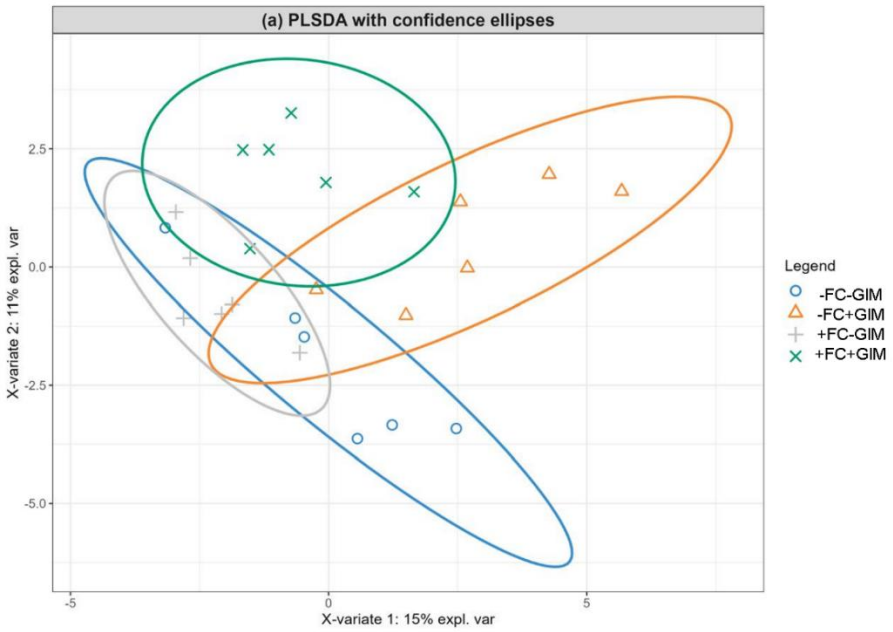


Figura 3. Gráfico de pontuação da análise discriminante de mínimos quadrados parciais do perfil de metabólitos da carne em função dos tratamentos.

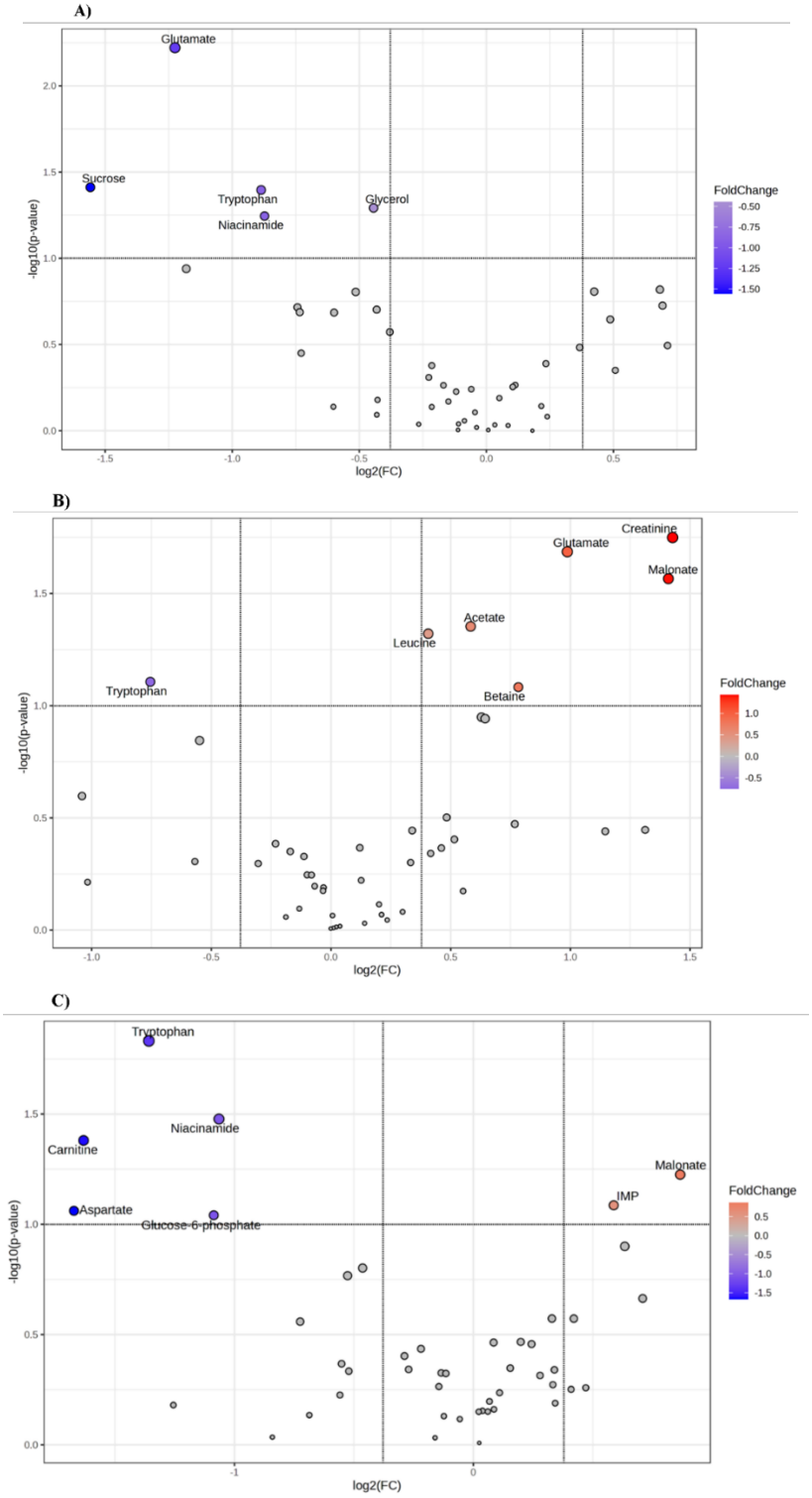


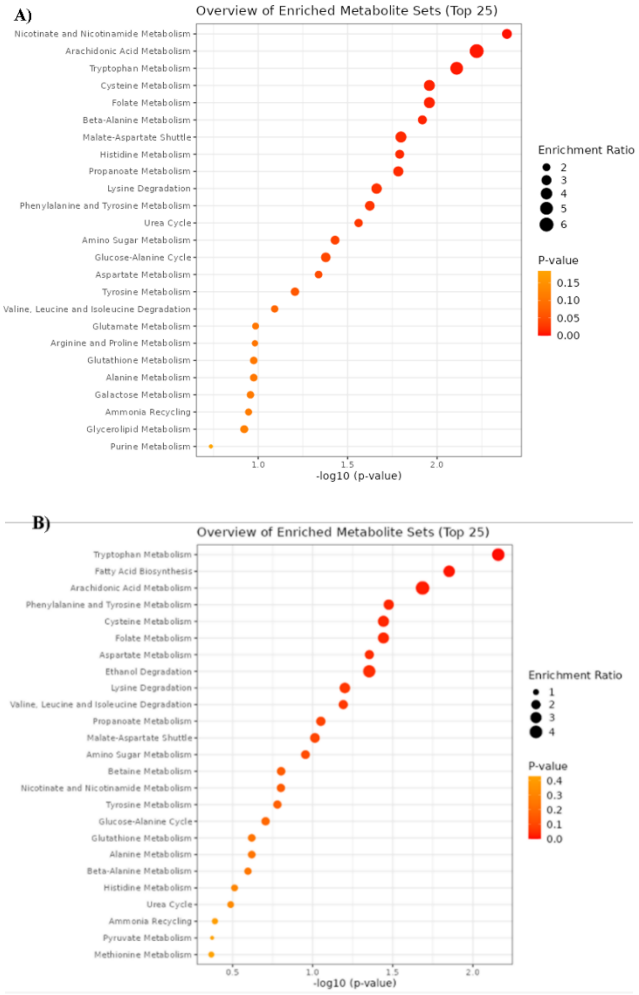
Figura 4. Volcano plot, gráfico de pontuação da análise discriminante de mínimos quadrados parciais do perfil de metabólitos da carne em função dos tratamentos. Indicando diferentes concentrações dos metabólitos em: (A) carnes dura e menor teor de gordura intramuscular (+FC-GIM) *vs.* carnes intermediaria e menor teor de gordura intramuscular (-FC-GIM) ; (B) carnes macia e maior teor de gordura intramuscular (-FC+GIM) *vs*. carnes dura e mais maior

teor de gordura intramuscular (+FC+GIM); (C) carnes dura e menor teor de gordura intramuscular (+FC-GIM) *vs.* carnes dura e maior teor de gordura intramuscular (+FC+GIM).

Na comparação +FC-GIM *vs*. -FC-GIM apresentada na Figura 4A, observou-se (*P <0.05)* uma maior concentração dos metabólitos glutamato, sucrose, triptofano, niacinamida e glicerol no grupo -FC-GIM em comparação ao +FC-GIM.

Por outro lado, em comparação ao tratamento -FC+GIM, *vs.* +FC+GIM observamos maior concentração (*P <0.05)* de triptofano no tratamento +FC+GIM (Figura 4B). Além disso, creatinina, glutamato, malonato, acetato, betaína e leucina apresentaram maiores concentrações no grupo -FC+GIM quando comprado ao +FC+GIM.

Quando a comparação realizada entre +FC-GIM *vs.* +FC+GIM (Figura 4C), foi observado maior concentração dos metabólitos IMP e malonato +FC-GIM. Por outro lado, os metabólitos triptofano, niacinamida, carnitina, aspartato e glicose-6-fosfato apresentaram concentração mais elevadas nos animais +FC+GIM.



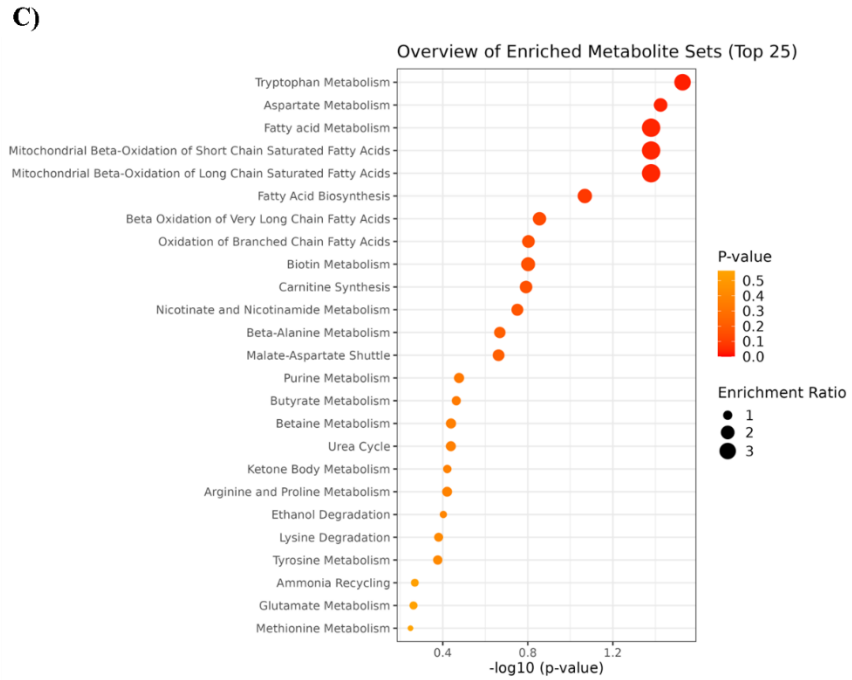


Figura 5. Enriquecimento de análise mostrando vias metabólicas em função da comparação de pares A) +FC-GIM *vs.* -FC-GIM; B) +FC+GIM *vs*. -FC+GIM; C) +FC-GIM *vs.* +FC+GIM

Na análise comparativa entre os tratamentos +FC-GIM *vs.* -FC-GIM (Fig. 5A), identificaram-se 7 vias metabólicas significativamente enriquecidas ($P < 0,05$), sendo metabolismo de nicotinamida, ácido araquidônico, triptofano, cisteina, folato, malato e aspartato. Na análise comparativa entre os tratamentos +FC+GIM *vs.* -FC+GIM (Fig. 5B), observou-se o enriquecimento de 8 vias metabólicas ($P < 0,05$), incluindo metabolismo de triptofano, ácido araquidônico, cisteína e folato, fenilalanina- tirosina, biossíntese de ácidos graxos, degradação de etanol e lisina. Por fim, na comparação entre +FC-GIM *vs.* +FC+GIM (Fig. 5C), detectou-se o enriquecimento de 6 vias metabólicas ($P < 0,05$), destacando-se metabolismo de triptofano, aspartato, ácidos graxos, beta- oxidação de ácidos graxos saturados de cadeia curta, beta-oxidação de ácidos graxos saturados de cadeia longa e biossíntese de ácidos graxos.

4. Discussão

A maciez é o atributo de maior importância na avaliação dos consumidores (Warner et al., 2022), o que foi confirmado pelos resultados obtidos no presente estudo. No entanto, de forma surpreendente, o tratamento com maior aceitação geral foi o do grupo com maior maciez e menor teor de gordura (-FC-GIM), o que corrobora com estudos que indicam a preferência dos consumidores por carnes mais magras,

com menor quantidade de gordura intramuscular (Bello Acebrón et al., 2000; Morales et al., 2013). Além disso, este resultado pode estar relacionado à menor perda de água durante a cocção neste grupo, permitindo que a carne mantenha maior umidade e suculência, preservando os compostos aromáticos (Nissen e Young, 2006). Ademais, a menor perda de água observada na carne com menor GIM em nosso experimento pode estar relacionada à menor oxidação lipídica. Cortes com menor gordura intramuscular apresentam menor quantidade de lipídios passíveis de oxidação (Andrés et al., 2001), o que poderia ter preservado a integridade das membranas celulares e mantido uma maior capacidade de retenção de água. Além disso, a menor degradação oxidativa dos fosfolipídios pode ter contribuído para estabilidade das membranas musculares, reduzindo a exsudação de líquidos durante a cocção (Domínguez et al., 2019). Dessa forma, a menor peroxidação lipídica pode ter ajudado a preservar a estrutura da matriz proteica, resultando em menor liberação de água e possivelmente a suculência da carne.

A menor perda por cocção no grupo -FC-GIM pode estar ligada a quantidade de gordura, ou seja a carne rica em gordura intramuscular e gordura subcutânea tem uma melhor capacidade de retenção de água e menor perda (Vaskoska, 2024). Além disso, a redução da perda de água durante o cozimento pode aumentar a intensidade do sabor umami (Lida et al., 2014), que está relacionado principalmente com os compostos glutamato e aspartato, além de outros aminoácidos (Ramalingam et al., 2019). O glutamato é responsável por induzir o sabor umami, sendo descrito como uma "sensação de satisfação", esses compostos melhoradores do sabor umami desempenham um papel importante na formação do sabor dos alimentos, o que pode melhorar a qualidade dos alimentos, aumentar a percepção do sabor dos consumidores (Yamaguchi e Ninomiya, 1998). Dessa forma, as maiores concentrações de glutamato observadas no grupo de -FC-GIM podem ter contribuído para a maior aceitação pelos consumidores, conforme também evidenciado em estudo anterior (Corbin et al., 2015).

No presente estudo, a maior quantidade de sacarose encontrada no tratamento -FC-GIM, pode ter contribuído para o aumento da percepção do sabor doce, que é estimulado por carboidratos simples (Breslin, 2013). Adicionalmente, o tratamento de maior aceitação (-FC-GIM) apresentou uma correlação significativa e positiva com a

valina (Figura S1), um aminoácido de cadeia ramificada conhecido por sua capacidade de regular a taxa de síntese e degradação proteica no tecido muscular esquelético para a geração de energia (Monirujjaman e Ferdouse, 2014).

O glicerol é um produto da hidrólise dos triglicerídeos (TG) e diglicerídeos (DG) para geração de ATP (Sartori et al., 2024). Nesse contexto, o aumento desse metabólito no tratamento -FC-GIM indica que possivelmente houve um maior uso de energia proveniente dos lipídios durante o período pós-morte. Uma maior quantidade de glicerol pode indicar um aumento na utilização de lipídios como fonte de energia no metabolismo pós-morte, em detrimento dos aminoácidos (Sartori et al., 2024). Isso sugere que, nesse período, houve maior mobilização de lipídios, preservando os aminoácidos e reduzindo sua degradação para suprir a demanda energética. Como consequência, a maior disponibilidade de aminoácidos livres no pós-morte pode ter contribuído para a melhoria das características sensoriais da carne, principalmente devido ao seu envolvimento na reação de Maillard e para gerar voláteis de sabor influenciando positivamente sua aceitação pelos consumidores, tal como descrito na literatura (Dashdorj et al., 2015). Isso pode ter levado ao tratamento +FC-GIM maior enriquecimento de vias de degradação de valina, leucina, isoleicina e lisina.

Na comparação +FC+GIM versus -FC+GIM, grupos semelhantes em termos de análise sensorial, o glutamato novamente foi encontrado em maior concentração no grupo -FC+GIM. Além disso, verificou-se aumento de leucina neste grupo. Esse composto que pode dar origem ao 3-metilbutanal, facilitando a ocorrência de reação de Maillard, que ocorre entre aminoácidos e açúcares (Friedman, 1996). Além disso, foi observado que os compostos creatinina, malonato, acetato e betaína foram aumentados no tratamento -FC+GIM. A creatinina, produto de degradação da creatina, desempenha um papel importante na percepção sensorial da carne bovina. Antonelo et al. (2020) reportaram uma correlação negativa entre os níveis creatinina e os atributos sensoriais da carne, tal como também verificado no presente estudo, no qual o grupo -FC+GIM apresentou a terceira maior aceitação sensorial na comparação entre os quatro grupos avaliados.

O malonato que apresentou maior concentração no grupo -FC+GIM, é um composto chave na síntese de malonil-CoA, atuando como metabólito limitante na síntese *de novo* de ácidos graxos (Bowman et al., 2017). No presente estudo, sua

presença está relacionada aos grupos de carne com maior GIM, especificamente nos grupos -FC+GIM e +FC+GIM. A betaína também foi encontrada em maiores concentrações no grupo de -FC+GIM. Entretanto, esse metabólito foi negativamente associado ao sabor, maciez e suculência em outro estudo (Antonelo et al., 2020). De acordo com a literatura, a betaína está ligada a inibição da ativação das caspases-3 *post-mortem*, reduzindo a degradação dos filamentos miofibrilares e impactando negativamente a maciez da carne bovina (Picard e Gagaoua, 2017). Esses resultados opostos ao presente estudo podem ter ocorrido devido a uma maior quantidade de gordura intramuscular encontrada neste grupo. Existem várias explicações para o efeito positivo da GIM na maciez da carne, uma delas seria uma participação mais ativa os lipídios, contribuindo para a geração e energia nas primeiras horas após o abate, principalmente por meio da proteína quinase ativada por AMP (Scheffler e Gerrard, 2007).

A depleção de glicogênio resulta na formação de uma série de metabólitos relacionados a açúcares de baixa massa molecular, como glicose e glicose-6-fosfato, que são gerados pelas vias de glicogenólise e glicólise, respectivamente. No presente estudo foi encontrado a sacarose no grupo +FC-GIM, esses açúcares redutores não apenas contribuem para um sabor doce agradável, mas também reagem com os aminoácidos presentes na carne por meio da reação de Maillard e promove a geração de compostos aromáticos voláteis (Deng et al., 2022). À medida que os alimentos que contêm proteínas, peptidios e carboidartos são aquecidos demonstraram ter potencial para gerar sabor, devido a formação de ligações covalentes entre os grupos carbonila e grupos amino livres (Spotti et al., 2019).

Os resultados do estudo atual são consistentes com vários relatórios publicados que indicam aumento na palatabilidade e nas pontuações de sabor da carne bovina com aumento no nível de gordura ou marmoreio (Corbin et al., 2015). O tratamento +FC+GIM mostrou que o aumento da gordura intramuscular em carne dura pode ter ajudado na análise sensorial, embora alguns trabalhos mostram que gordura intramuscular pode ser responsável por 2-16% da variação de maciez e 16 % da suculência (Blumer, 1963; Jeremiah, 1996). Corbin et al. (2015), estudando a variação sensorial com diferentes níveis de marmoreio de *Bos taurus* (FC < 3.4 kg) mostrou

que os consumidores classificaram amostras com maiores teores de gordura como mais macias do que amostras de tratamentos com menores teores de gordura.

Entretanto, animais zebuínos são conhecidos como carne mais dura em comparação aos taurinos (Antonelo et al., 2020). No presente estudo, a variação de FC foi de 8.26 – 8.41 kg para os grupo +FC+GIM e +FC-GIM, que de acordo com Brugiapaglia et al. (2008) é considerada dura. Em relação ao grupo +FC-GIM que obteve 0.85 pontos de GIM que é considerado escasso, a GIM no tratamento +FC+GIM foi aumentado em 2.76 vezes. Nesse sentido, isso possivelmente levou a uma melhor aceitação dos atributos sensoriais no grupo +FC+GIM pelos consumidores em comparação ao +FC-GIM. Durante o tratamento térmico, alguns compostos voláteis relacionados aos lipídios são volatilizados, contribuindo para formação do sabor da carne cozida (Wojtasik-Kalinowska et al., 2024).

Embora tenha sido observado um aumento nos níveis de IMP no grupo +FC-GIM, que é outro composto relacionado ao sabor umami (Chaudhari e Roper, 2010), esse incremento não apresentou uma correlação positiva com a aceitação sensorial, uma vez que esse grupo foi o que obteve a menor preferência pelos consumidores no presente estudo. Por outro lado, o grupo +FC+GIM, que apresentou a segunda maior aceitação sensorial, pode ter sido influenciado por uma maior contribuicão dos lipídeos durante o período post-mortem, uma vez que vimos aumento da carnitina, que é um composto orgânico de origem natural, derivado de aminoácidos, que desempenha um papel essencial no metabolismo energético (Belay et al., 2006). Sua principal função é o transporte de ácidos graxos de cadeia longa para a mitocôndria, para serem convertidos em energia por meio da beta-oxidação, processo fundamental para a produção de ATP (Belay et al., 2006). Nesse sentido, é possivel que a maior disponibilidade lipídica tenha reduzido a utilização de aminoacidos como fonte energetica, favorecendo o acúmulo de metabólitos como creatinina, leucina e betaína. Esses resultados sugerem que o aumento de gordura intramuscular pode ter atuado como um substrato energético alternativo, contribuindo para a manutenção da maciez da carne durante o *rigor mortis* (Wojtasik-Kalinowska et al., 2024).

5. Conclusão

A maciez, gordura intrmuscular e reteção de água são caracteristicas que influenciam a aceitação geral do consumidor de carne bovina. A presença de metabólitos como glutamato, IMP e malonato, desempenham papel importante na percepção de saborna qualidade sensorial da carne.

6. Referências bibliograficas

AMSA. Research Guidelines for Cookery, Sensory Evaluation, and Instrumental Tenderness Measurements of Meat. [s.l: s.n.].

ANDRÉS, A. I. et al. Oxidative stability and fatty acid composition of pig muscles as affected by rearing system, crossbreeding and metabolic type of muscle fibre. **Meat Science**, v. 59, n. 1, p. 39–47, set. 2001.

ANTONELO, D. S. et al. Metabolite profile and consumer sensory acceptability of meat from lean Nellore and Angus × Nellore crossbreed cattle fed soybean oil. **Food Research International**, v. 132, p. 109056, jun. 2020.

ANTONELO, D. S. et al. Variations in Intramuscular Fat Content and Profile in Angus × Nellore Steers Under Different Feeding Strategies Contribute to Color and Tenderness Development in Longissimus thoracis. **Meat and Muscle Biology**, v. 6, n. 1, 23 mar. 2022.

BALDASSINI, W. et al. Bos indicus Carcasses Suspended by the Pelvic Bone Require a Shorter Aging Time to Meet Consumer Expectations Regarding Meat Quality. **Foods**, v. 12, n. 5, p. 930, 22 fev. 2023.

BARBUT, S., B., S. **Estimates and detection of the PSE problem in young turkey breast meat. Canadian Journal of Animal Science, v. 76, n. 3, p. 455–457, set. 1996.** 1996.

BELAY, B. et al. The use of levo-carnitine in children with renal disease: a review and a call for future studies. Pediatric Nephrology, v. 21, n. 3, p. 308–317, mar. 2006.

BELLO ACEBRÓN, L.; CALVO DOPICO, D. The importance of intrinsic and extrinsic cues to expected and experienced quality: an empirical application for beef. **Food Quality and Preference**, v. 11, n. 3, p. 229–238, maio 2000.

BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A RAPID METHOD OF TOTAL LIPID EXTRACTION AND PURIFICATION. **Canadian Journal of Biochemistry and Physiology**, v. 37, n. 8, p. 911–917, 1 ago. 1959.

BLUMER, T. N. Relationship of Marbling to the Palatability of Beef. **Journal of Animal Science**, v. 22, n. 3, p. 771–778, 1 ago. 1963.

BONNY, S. P. F. et al. The variation in the eating quality of beef from different sexes and breed classes cannot be completely explained by carcass measurements. **Animal**, v. 10, n. 6, p. 987–995, 1 jan. 2016.

BOWMAN, C. E. et al. The Mammalian Malonyl-CoA Synthetase ACSF3 Is Required for Mitochondrial Protein Malonylation and Metabolic Efficiency. **Cell Chemical Biology**, v. 24, n. 6, p. 673- 684.e4, jun. 2017.

BRESLIN, P. A. S. An Evolutionary Perspective on Food and Human Taste. **Current Biology**, v. 23, n. 9, p. R409–R418, maio 2013.

BRUGIAPAGLIA, A. et al. Relationship between beef consumer tenderness perception and Warner–Bratzler shear force. **Meat Science**, v. 78, n. 3, p. 153–156, mar. 2008.

CHANDRASHEKAR, J. et al. The receptors and cells for mammalian taste. **Nature**, v. 444, n. 7117, p. 288–294, 16 nov. 2006.

CHONG, J. et al. MetaboAnalyst 4.0: towards more transparent and integrative metabolomics analysis. **Nucleic Acids Research**, v. 46, n. W1, p. W486–W494, 2 jul. 2018.

CÔNSOLO, N. R. B. et al. Selection for Growth and Precocity Alters Muscle Metabolism in Nellore Cattle. **Metabolites**, v. 10, n. 2, p. 58, 6 fev. 2020.

CORBIN, C. H. et al. Sensory evaluation of tender beef strip loin steaks of varying marbling levels and quality treatments. **Meat Science**, v. 100, p. 24–31, fev. 2015.

DASHDORJ, D.; AMNA, T.; HWANG, I. Influence of specific taste-active components on meat flavor as affected by intrinsic and extrinsic factors: an overview. European Food Research and Technology, v. 241, n. 2, p. 157–171, ago. 2015.

GAGAOUA, M.; PICARD, B.; MONTEILS, V. Associations among animal, carcass, muscle characteristics, and fresh meat color traits in Charolais cattle. Meat Science, v. 140, p. 145–156, 1 jun. 2018.

DENG, S. et al. The Effect of Breed and Age on the Growth Performance, Carcass Traits and Metabolic Profile in Breast Muscle of Chinese Indigenous Chickens. **Foods**, v. 11, n. 3, p. 483, 7 Fev. 2022.

DOMÍNGUEZ, R. et al. A Comprehensive Review on Lipid Oxidation in Meat and Meat Products. **Antioxidants**, v. 8, n. 10, p. 429, 25 set. 2019.

FRIEDMAN, M. Food Browning and Its Prevention: An Overview. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 44, n. 3, p. 631–653, 1 Jan. 1996.

GOLDANSAZ, S. A. et al. Livestock metabolomics and the livestock metabolome: A systematic review. **PLOS ONE**, v. 12, n. 5, p. e0177675, 22 Maio 2017.

GRUNERT, K. G.; BREDAHL, L.; BRUNSØ, K. Consumer perception of meat quality and implications for product development in the meat sector—a review. **Meat Science**, v. 66, n. 2, p. 259–272, fev. 2004.

IIDA, F.; HORIE, K.; NISHIMURA, T. Taste and Texture Characteristics of Beef Cooked by Different Methods. v. 65, n. 1, [s.d.].

JEREMIAH, L. E. The influence of subcutaneous fat thickness and marbling on beef. **Food Research International**, v. 29, n. 5–6, p. 513–520, jun. 1996.

JUNIOR, C. C. et al. Brazilian beef cattle feedlot manure management: A country survey1. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 4, p. 1811–1818, 1 abr. 2013.

KANG, S. A. et al. Siwonhan-mat: The third taste of Korean foods. **Journal of Ethnic Foods**, v. 3, n. 1, p. 61–68, mar. 2016.

KING, D. A. et al. Metabolomic Investigation of Tenderness and Aging Response in Beef Longissimus Steaks. **Meat and Muscle Biology**, v. 3, n. 1, 28 Fev. 2019.

LEE, B.; YOON, S.; CHOI, Y. M. Comparison of marbling fleck characteristics between beef marbling grades and its effect on sensory quality characteristics in high-marbled Hanwoo steer. **Meat Science**, v. 152, p. 109–115, jun. 2019.

LEE, Y. et al. Sensory quality characteristics with different beef quality grades and surface texture features assessed by dented area and firmness, and the relation to muscle fiber and bundle characteristics. **Meat Science**, v. 145, p. 195–201, Nov. 2018.

LISTRAT, A. et al. How Muscle Structure and Composition Influence Meat and Flesh Quality. **The Scientific World Journal**, v. 2016, p. 1–14, 2016.

MONIRUJJAMAN, MD.; FERDOUSE, A. Metabolic and Physiological Roles of Branched-Chain Amino Acids. **Advances in Molecular Biology**, v. 2014, p. 1–6, 19 ago. 2014.

MORALES, R. et al. Beef acceptability and consumer expectations associated with production systems and marbling. **Food Quality and Preference**, v. 29, n. 2, p. 166–173, set. 2013.

NISSEN, P. M.; YOUNG, J. F. Creatine Monohydrate and Glucose Supplementation to Slow- and Fast-Growing Chickens Changes the Postmortem pH in Pectoralis Major. **Poultry Science**, v. 85, n. 6, p. 1038–1044, jun. 2006.

O'QUINN, T. G. et al. Consumer assessment of beef strip loin steaks of varying fat levels. **Journal of Animal Science**, v. 90, n. 2, p. 626–634, 1 fev. 2012.

O'QUINN, T. G. et al. Evaluation of the contribution of tenderness, juiciness, and flavor to the overall consumer beef eating experience1. **Translational Animal Science**, v. 2, n. 1, p. 26–36, 10 abr. 2018.

O’SULLIVAN, M. G. et al. Sensory Consumer and Descriptive Analysis of Steaks from Beef Animals Selected from Tough and Tender Animal Genotypes: Genetic Meat Quality Traits Can Be Detected by Consumers. **Foods**, v. 10, n. 8, p. 1911, 17 ago. 2021.

PICARD, B. et al. Inverse Relationships between Biomarkers and Beef Tenderness According to Contractile and Metabolic Properties of the Muscle. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 62, n. 40, p. 9808–9818, 8 out. 2014.

PICARD, B.; GAGAOUA, M. Proteomic Investigations of Beef Tenderness. Em: **Proteomics in Food Science**. [s.l.] Elsevier, 2017. p. 177–197.

RAMALINGAM, V.; SONG, Z.; HWANG, I. The potential role of secondary metabolites in modulating the flavor and taste of the meat. **Food Research International**, v. 122, p. 174–182, ago. 2019.

SARTORI, GIOVANINI DE OLIVEIRA et al. Lipidome and metabolome profiling of longissimus lumborum beef with different ultimate pH and postmortem aging. **Meat Science**, v. 217, p. 109621, Nov. 2024.

SHACKELFORD, S. D.; WHEELER, T. L.; KOOHMARAIE, M. Tenderness classification of beef: II. Design and analysis of a system to measure beef longissimus shear force under commercial processing conditions. **Journal of Animal Science**, v. 77, n. 6, p. 1474, 1999.

SHAHRAI, N. N. et al. Effects of marbling on physical and sensory characteristics of ribeye steaks from four different cattle breeds. **Animal Bioscience**, v. 34, n. 5, p. 904–913, 1 maio 2021.

SPOTTI, M. J. et al. Influence of Maillard reaction extent on acid induced gels of whey proteins and dextrans. Food Hydrocolloids, v. 91, p. 224–231, jun. 2019.

USDA, U. United States standards for grades of carcass beef. , 1997.

VASKOSKA, R. Physics and chemistry of cooking meat. Em: **Encyclopedia of Meat Sciences**. [s.l.] Elsevier, 2024. p. 189–194.

WARNER, R. D. et al. Meat tenderness: advances in biology, biochemistry, molecular mechanisms and new technologies. Meat Science, v. 185, p. 108657, mar. 2022.

WATSON, R. et al. Consumer assessment of eating quality - development of protocols for Meat Standards Australia (MSA) testing. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 48, n. 11, p. 1360, 2008.

WOJTASIK-KALINOWSKA, I. et al. The Influence of Cooking Methods and Muscle on Beef Aroma Profile and Consumer Satisfaction: Insights from Volatile Compound Analysis. **Applied Sciences**, v. 14, n. 11, p. 4477, 24 maio 2024.

YAMAGUCHI, S.; NINOMIYA, K. What is umami? **Food Reviews International**, v. 14, n. 2–3, p. 123–138, maio 1998.

7. Material suplementar

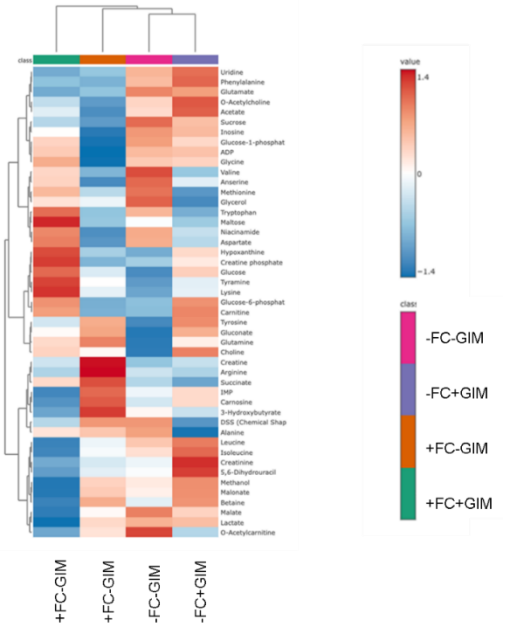


Figura S1. Correlação entre os tratamentos e os metabólitos encontrados

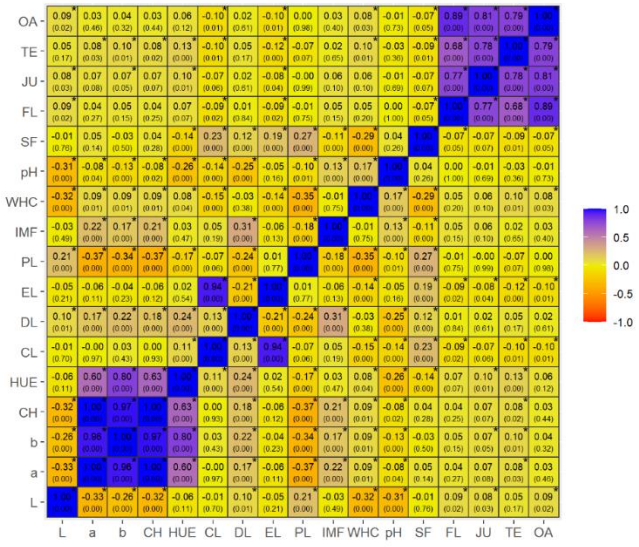


Figura S2. Correlação de Pearson (números maiores) e significância (números menores; p-valor) entre as características de qualidade de carne de bovinos Nelore. Cores azuis ou roxas significam correlações positivas fortes ou médias, enquanto cores laranja ou amarelo/castanho significam correlações negativas fortes ou médias. Variáveis: FC =Warner-Bratzler shear force; pH = ultimate pH (48 h post-mortem); TE = sensory tenderness; JU = juiciness; OA = overall acceptance; CRA= water-holding capacity; FL = liking of flavor; PL = purge loss; EL = evaporation loss; DL = drip loss; CL = total cooking losses; GIM = intramuscular fat; HUE = real color; CH = chromaticity; *b* * = yellowness; *a* * = redness; e *L** = lightness.