

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**IMPACTOS DO CONSUMO ALIMENTAR RESIDUAL NA
QUALIDADE DE CARNE DE BOVINOS NELORE
CONFINADOS**

Daniela Alvarado Vesga

Médica Veterinária

2024

D
I
S
S.

/

A
L
V
A
R
A
D
O

D
A
V

2

0

2

4

**IMPACTOS DO CONSUMO ALIMENTAR RESIDUAL NA
QUALIDADE DE CARNE DE BOVINOS NELORE
CONFINADOS**

Discente: Daniela Alvarado Vesga

Orientador: Prof. Dr. Welder Angelo Baldassini

Coorientador: Prof. Dr. Luis Artur Chardulo Loyola

Coorientadora: PhD. Yury Tatiana Granja Salcedo

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciência Animal.

FICHA CATALOGRAFICA

V576i	Vesga, Daniela Impactos do consumo alimentar residual na qualidade de carne de bovinos Nelore confinados / Daniela Vesga. -- , 2024 133 f. : il., tabs., fotos Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, Orientador: Welder Baldassini Coorientador: Luis Artur Chardulo 1. Bovinos de corte. 2. Carcaças. 3. Maciez. 4. Avaliação de desempenho. I. Título.
-------	--

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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: IMPACTOS DO CONSUMO ALIMENTAR RESIDUAL NA QUALIDADE DE CARNE DE BOVINOS NELORE CONFINADOS

AUTORA: DANIELA ALVARADO VESGA
ORIENTADOR: WELDER ANGELO BALDASSINI
COORIENTADORA: YURY TATIANA GRANJA-SALCEDO
COORIENTADOR: LUIS ARTUR LOYOLA CHARDULO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciência Animal, área: Nutrição Animal pela Comissão Examinadora:

gub

Prof. Dr. WELDER ANGELO BALDASSINI (Participação Virtual)
Departamento de Melhoramento e Nutrição Animal / FMVZ UNESP Botucatu

Prof. Welder Angelo Baldassini
DMNA/FMVZ - UNESP/Botucatu

Prof. Dr. PEDRO HENRIQUE VILELA DE CARVALHO (Participação Virtual)
Animal Science Departament / Colorado State University - Fort Collins/CO/EUA

Pedro Carvalho

Pesquisador Dr. SERGIO RAPOSO DE MEDEIROS (Participação Virtual)
Embrapa Pecuária Sudeste / São Carlos/SP

Jaboticabal, 16 de outubro de 2024



Documento assinado digitalmente

SERGIO RAPOSO DE MEDEIROS
Data: 20/10/2024 17:28:45-0300
Verifique em <https://validar.br.gov.br>

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

DANIELA ALVARADO VESGA – filha de Jaqueline Vesga Piñeres e Fidel Alvarado Martinez. Nasceu em 22 de maio de 1997, na cidade Bucaramanga, (Santander-Colômbia). Em fevereiro de 2015, ingressou no curso de Medicina Veterinária na Universidade de Santander na Colômbia – UDES na cidade de Bogotá, Colômbia. No 2019, realizou estágio curricular de conclusão de curso na Universidade Estadual Paulista campus Jaboticabal. Graduiu-se como Médica Veterinária em junho de 2020 com o projeto intitulado “Avaliação das mudanças na fermentação e na população microbiana ruminal em bovinos Nelore castrados alimentados com uma dieta rica em lipídeos” sob orientação da Pesquisadora. Dr. Yury Tatiana Granja Salcedo. Em agosto de 2022, ingressou no programa de Pós-Graduação em Ciência Animal da FCAV/UNESP, Câmpus Jaboticabal, sob orientação do Prof. Dr. Welder Angelo Baldassini. Durante o mestrado foi bolsista pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundación para el Futuro de Colombia/COLFUTURO's, desenvolvendo estágio de pesquisa no exterior sob orientação do Prof. Dr. Pedro Henrique Vilela Carvalho, Department of Animal Sciences, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, EUA.

EPIGRAFE

“A vida de um homem é o que seus pensamentos fazem dela.”

Marco Aurelio

“Pensar em aquilo que você quer e ir traz isso, com a seguridade que só vai dar certo”

Anônimo

*Aos meus pais, Jaqueline e Fidel, as minhas
irmãs Valentina e Laura, aos meus avos Hector
(in memoriam) e Maria del Rosario.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por me acompanhar em todo o caminho, por me guiar nos momentos onde a luz se torna pouca.

Aos meus pais Jaqueline e Fidel por me apoiarem em todo momento nas minhas escolhas, por me dar palavras de conforto e me impulsionar a cada dia mais para ser uma melhor versão cada vez.

A minha melhor amiga Gabriela, por me motivar e me inspirar no dia a dia, por me escutar por horas quando as vezes parecia que nada daria certo, e por estar há 14 anos ao meu lado, ela é maravilhosa.

As minhas irmãs Valentina e Laura por serem meu porto seguro nos momentos de dificuldade, por serem meu suporte no dia a dia.

A meu avô, Hector Vesga (*in memoriam*) por me mostrar o lindo que pode ser trabalhar com gado, por me ensinar que quando se trabalha com visão e determinação podemos chegar até onde nos queiramos. Serei eternamente agradecida por ser sua neta, levo com muito orgulho seu sobrenome.

A minha avó, Maria del Rosário por ser o exemplo verdadeiro da palavra amor, obrigada por me ensinar a amar e por me mostrar que a felicidade está nas coisas simples do dia a dia, te amo com tudo meu coração.

A minha tia Esperança por ser essa pessoa que me ensinou a disciplina e coragem de ser melhor cada dia.

A minha tia Amanda (*in memoriam*) por ser essa pessoa amorosa e dedicada a nos ajudar em todo momento, por me ensinar que o orgulho mais grande vem de onde nós viemos e com isso fazer o melhor que podamos. Lembro de você no dia a dia, gratidão de ter crescido com uma mulher trabalhadora e guerreira como você foi.

A minha amiga Carolina por ser uma guia, nos momentos complexos, pelas bonitas conversas a meia noite, me incentivando que tudo daria certo.

A minha amiga Lida, por me abrir a possibilidade para vir nos Estados Unidos, pela amizade e suporte para minha família nos momentos difíceis.

A meu primo Jorge quem sempre acredito em mim, por ser essa pessoa positiva que não duvido em me apoiar quando mais precisava.

A meu orientador Welder Baldassini não só por exercer o seu papel de professor, como pela confiança, carinho, dedicação e por ter me proporcionado tantos ensinamentos e oportunidades de crescimento pessoal e profissional. Além de me abrir a possibilidade de fazer meu estagio nos Estados Unidos.

A meu coorientador Luis Chardulo, por ter me incentivado o interesse no mundo da qualidade da carne e por ter me proporcionando muitos ensinamentos na minha vida profissional.

A minha coorientadora e amiga Yury, por ter me ensinado tanto, por confiar no meu processo de fazer mestrado, além de me incentivar no dia a dia a melhorar pessoal e profissionalmente.

A meu orientador do estágio internacional Pedro Henrique Vilela Carvalho, por sua dedicação e disposição em compartilhar conhecimentos que foram fundamentais

para o meu crescimento acadêmico e profissional. A experiência que vivi sob sua supervisão foi enriquecedora e inspiradora, levarei os ensinamentos comigo para o futuro. Foi uma oportunidade única, obrigada por todo o suporte ao longo dessa jornada na Colorado State University.

A minha companheira de experimento e intercambio no Colorado, Irene, por me ajudar no meu experimento, mas também por toda a amizade e companheirismo. Obrigada por estar ao meu lado nos momentos felizes, tristes, risadas, desabafos, por me incentivar nos dias cinzas. Obrigada amiga pelas conquistas juntas.

A minha amiga Karine, por ter sido um apoio durante a fase de disciplinas em Jaboticabal, pelas risadas e pelas boas conversas.

A todas as meninas da República Choppana, um lugar onde aprendi a morar em uma república e conheci pessoas incríveis.

Aos meus colegas de pós-graduação, Murilo e Rafaela por me ajudarem no dia a dia no trabalho de laboratório e pela amizade.

A Ju, por ter compartilhado pesquisa junto, por ter me orientado no meu trabalho de lipidômica e pelos momentos gratos na Oklahoma.

A Gabi, quem me ajudo no período experimental na Brasilândia, obrigada pela companhia e risadas.

A todos os estagiários do laboratório, especialmente a Gabriel, Antony, Murilo e Clara, por sempre estar com disponibilidade para conduzir as análises do experimento.

A todos os funcionários da fazenda Hora em Brasilândia, Osmar, Leo, Igor, Janaine, por sempre estar com a disponibilidade na prova de eficiência alimentar dos animais.

A todos os meus amigos que estiveram ao meu lado durante meu mestrado sanduíche no Colorado State University. A Cesar Velásquez, meu amigo quem me brindo suporte e muitos aprendizados na fase experimental na California, em especial por me incentivar o gosto da pesquisa com bezerros.

A todos os funcionários do Calf Ranch, Standard Cattle na California, pessoas com muito conhecimento sempre com a melhor iniciativa para te ensinar e ajudar.

A mim mesma, por nunca desistir e continuar acreditando, mesmo quando a realidade, em muitos momentos, parecia mostrar o contrário.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, câmpus de Jaboticabal, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, pela oportunidade de realização do curso.

À FAPESP pela concessão das bolsas de estudos (Grant Nos. 2023/05002-3 and 2023/02662-2) á COLFUTURO pelos recursos necessários para a realização do estágio de pesquisa na Colorado State University, Department of Animal Sciences, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

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

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. REVISÃO DE LITERATURA	3
1.2.1. Eficiência alimentar (EA)	3
1.2.2. Consumo alimentar residual (CAR)	4
1.2.3. Bases fisiológicas e moleculares do consumo alimentar residual	6
1.2.4. Comportamento alimentar e digestibilidade	9
1.2.5. CAR e características de carcaça e qualidade da carne	11
1.2.6. Análise sensorial e qualidade de carne	13
1.2.7. Lipidômica	15
CAPÍTULO 2 - Carcass and meat quality traits in <i>Bos indicus</i> cattle: A meta-analysis examining the effect of residual feed intake	37
2.1 Introduction	38
2.2 Material and Methods	40
2.2.1 Dataset	40
2.2.2 Weighted mean difference and publication bias	40
2.2.3 Meta-regression and subgroup analysis	41
2.2.4 Standardized mean difference	42
2.3 Results	42
2.3.1. Meat quality traits	44
2.3.2. Meta-regression analysis and funnel plot asymmetry	44
2.3.3. Subgroup analysis	44
2.4 Discussion	45
2.5 References	49
3 CAPÍTULO 3 - Avaliação do consumo alimentar residual sobre as características de carcaça e qualidade de carne de bovinos Nelore: uma abordagem bioquímica, sensorial e molecular	60
3.1 INTRODUÇÃO	62
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	64

3.2.1	Animais e teste alimentar	64
3.2.2	Características de carcaça e coleta de amostras	67
3.2.3	Análises laboratoriais de qualidade de carne	67
3.2.4	Coloração instrumental da carne	68
3.2.5	Capacidade de retenção de água (CRA)	68
3.2.6	Perdas por cocção e maciez instrumental.....	68
3.2.7	Determinação do teor de gordura intramuscular	69
3.2.8	Oxidação lipídica (TBARS).....	70
3.2.9	Índice de fragmentação miofibrilar (MFI)	70
3.2.10	Análise sensorial	71
3.2.11.	Monitoramento de Reação Múltipla (MRM)-perfil	72
3.2.12.	Análise de Lipidoma	73
3.3.	RESULTADOS	75
3.3.1.	Características de desempenho e carcaça	75
3.3.2.	Características de qualidade de carne	77
3.3.3.	Análise sensorial	79
3.3.4.	Lipidômica	80
3.4.	DISCUSSÃO	88
3.4.1.	Características de desempenho e carcaça	89
3.4.2.	Características de qualidade de carne	91
3.4.3	Análise sensorial	92
3.4.4	Associações da lipidômica e o consumo alimentar residual.....	93
3.5.	CONCLUSÃO.....	96
3.6.	REFERENCIAS.....	97

ATESTADO

Atesto que o Projeto "Eficiência alimentar, qualidade de carcaça e carne de bovinos Nelore terminados em confinamento" **Protocolo CEUA 0109/2022**, a ser conduzido por Rafaela Cristina Rodrigues, responsável/orientador Luis Artur Loyola Chard/ Welder Angelo Baldassini, para fins de pesquisa científica/ensino - encontra-se de acordo com os preceitos da Lei nº 11.794, de 08 de outubro de 2008, do Decreto nº 6.899, de 15 de julho de 2009, e com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal - CONCEA.

Finalidade	PESQUISA CIENTÍFICA
Vigência do projeto	15/06/2022 a 01/09/2022
Nome Comum / Espécie / Linhagem	BOVINA / BOS INDICUS /
Raça	Nelore
Nº de animais machos	96
Nº de animais fêmeas	0
Nº de animais sexo indefinido	0
Peso médio de animais machos	400
Peso médio de animais fêmeas	0
Peso médio de animais sexo indefinido	0
Idade	2 ano(s) e 0 mes(es) e 0 dia(s).
Procedência	Longissimus (contra-filé) a partir da 11a costela.

Projeto de Pesquisa aprovado em reunião da CEUA em 08/06/2022



JULIANY GOMES QUITZAN

Presidente da CEUA da FMVZ, UNESP - Campus de Botucatu

IMPACTS OF RESIDUAL FEED INTAKE ON MEAT QUALITY TRAITS OF NELLORE BULLS FEEDLOT FINISHED

Abstract -The objective of first study was examines through metanalysis the effects of residual feed intake (RFI) phenotypes on performance, nutrient utilization, and meat quality traits in Zebu (*Bos indicus*) cattle. The study includes data from 23 peer-reviewed publications, encompassing 37 treatment means. It compares cattle classified as low RFI (more efficient) to those in medium or high RFI (less efficient) groups, using weighted mean difference analysis. The analysis also considers data heterogeneity through meta-regression and subgroup analysis, examining factors like animal age, sex class, experimental duration, RFI group, dietary concentrate, and estimated metabolizable energy intake. The primary cattle breed represented in the dataset is Nellore (89,18%), followed by Brahman (10,81%). Cattle with the low RFI phenotype showed significantly lower dry matter intake (DMI; $P < 0,010$) than those with medium or high RFI (-0,95 kg versus -0,42 kg/d). While crude protein and fiber digestibility in the diet were similar across RFI groups ($P > 0,05$), ether extract digestibility tended to decrease in low RFI animals (-13,20 g/kg DM; $P = 0,050$). Low RFI cattle also tended to have a larger ribeye area (REA; $P = 0,065$) compared to high/medium RFI groups but had reduced carcass backfat thickness (BFT; $P = 0,042$). Additionally, low RFI animals exhibited a significant increase of 0,22 kg in Warner-Bratzler shear force (WBSF; $P < 0,001$) and a decrease in the myofibrillar fragmentation index (MFI; $P < 0,001$). Meat color parameters such as lightness (L^*) and yellowness (b^*), as well as visual marbling scores, remained consistent across RFI groups ($P > 0.05$). In conclusion, Zebu cattle identified as efficient (low RFI) showed improved feed efficiency (FE) through reduced DMI. However, these cattle also exhibited compromises in BFT and meat quality traits, such as tenderness (WBSF and MFI) and redness (a^*), emphasizing the difficulty of enhancing both FE and meat quality traits simultaneously in Zebu cattle. The objective of the second study was to compare Nellore bulls finished in a feedlot and divergent for RFI in terms of performance, RFI, carcass, and meat quality traits. A FE trial was conducted with 96 Nellore bulls, with initial body weight (BW) of 400 ± 23 and 24 months, housed in a collective pen equipped with three static scales attached to the water troughs and thirteen electronic feeders, assessing daily DMI and BW gain over 70 days. At the end of FE test, the animals were classified into low RFI (efficient), medium, and high RFI (inefficient). The animals were slaughtered with final body weight of 520 ± 31 after 120 days on feed. At deboning, the *Longissimus thoracis et lumborum* (between 12th and 13th ribs) was collected for analysis of carcass and meat quality traits such as color (L^* , a^* , b^*), water-holding capacity, cooking loss, shear force, intramuscular fat (IMF) content, lipid oxidation through thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) and myofibrillar fragmentation index (MFI) at 5 and 15 days post-mortem. Sensory tests ($n = 120$ untrained consumers) were conducted to assess tenderness (TE), liking of flavor (FL), juiciness (JU), and overall acceptance (OA) using samples aged for 15 days. Moreover, a targeted lipidomics analysis was conducted comparing low versus high RFI groups. Data were analyzed using the GLM procedure using initial body weight (BW) as covariable. Significant effects were considered at $P < 0.05$, while trends were

considered when $0,05 \leq P < 0,10$. Low RFI ($n=20$) compared to high RFI animals ($n=20$) showed differences ($P < 0,05$) in productive performance such as DMI ($9,14 \pm 0,64$ versus $10,42 \pm 0,56$ kg/day; or $1,72 \pm 0,01$ versus $1,92 \pm 0,02$ %BW), gross FE ($0,17 \pm 0,00$ versus $0,15 \pm 0,00$ kg/kg), feed conversion ratio ($6,06 \pm 0,11$ versus $6,74 \pm 0,13$ kg/kg), and RFI (-1.22 ± 0.01 versus 1.33 ± 0.02 kg/day). Differences ($P < 0,05$) also were found comparing low versus high RFI for hot carcass weight (HCW = $288,02 \pm 5,20$ versus $290,34 \pm 8,58$ kg) and backfat thickness (BFT = $4,75 \pm 0,45$ versus $5,61 \pm 0,50$ mm), while a trend ($P = 0,078$) toward an increase in ribeye area (REA = $86,05 \pm 1,30$ vs. $82,91 \pm 1,46$) cm² was observed and there were no differences ($P > 0,05$) for MAR. Regarding meat quality traits, there was a reduction in MFI ($27,04$ versus $32,15$) and IMF ($1,43$ versus $1,75\%$) content in low RFI animals compared to high RFI animals ($P < 0,005$). However, no differences were observed ($P > 0,05$) in meat pH, L^* , a^* , b^* , cooking loss, water-holding capacity, drip loss, WBSF, and thiobarbituric acid reactive substances (TBARS). After 15 days post-mortem, L^* , and MFI variables increased ($P < 0,001$), while meat pH, a^* , b^* , and WBSF ($P < 0,001$) decreased. In the sensory analysis, low RFI animals showed lower JU ($58,91 \pm 1,46$ versus $55,3 \pm 1,48$; $P < 0,05$) and OA ($58,3 \pm 1,4$ versus $63,6 \pm 1,4$; $P < 0,01$) compared to high RFI animals. The lipidomic analysis identified 60 lipid molecules that were different ($P < 0,05$) in presence between the low and high RFI groups. These compounds include diglycerides (DG), fatty acids (FA), phosphatidylcholines (PC), phosphatidylethanolamines (PE), sphingomyelins (SM), and triglycerides (TG). Positive regulation of lipids was evidenced in low RFI animals compared to high RFI animals, involving mitochondrial function, storage lipids and glycerophosphoethanolamines. In conclusion, better FE in low-RFI animals results in leaner and heavier carcasses, with lower IMF content. Changes in lipidome of Nellore beef were identified, explaining possible metabolic pathways in efficient animals. These combined changes negatively affect the sensory meat quality traits, particularly JU and OA in low-RFI animals.

Keywords: Beef cattle, carcass, feed efficiency, lipidomics, tenderness.

IMPACTOS DO CONSUMO ALIMENTAR RESIDUAL NAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE DA CARNE DE TOUROS NELORE TERMINADOS EM CONFINAMENTO

Resumo - O objetivo do primeiro estudo foi examinar, através de uma metanálise, os efeitos dos fenótipos de consumo alimentar residual (CAR) sobre o desempenho, a utilização de nutrientes e as características de qualidade da carne em bovinos zebuínos (*Bos indicus*). O estudo incluiu dados de 23 publicações revisadas por pares, abrangendo 37 médias de tratamento. Foram comparados bovinos classificados como baixo CAR (mais eficientes) versus os grupos médio ou alto CAR (menos eficientes), utilizando análise de diferença de média ponderada. Considerou-se também a heterogeneidade dos dados por meio de meta-regressão e análise de subgrupos, examinando fatores como idade dos animais, classe sexual, duração experimental, grupo de CAR, nível de concentrado na dieta e ingestão estimada de energia metabolizável. A principal raça de bovinos representada no conjunto de dados foi a Nelore (89,18%), seguida pela Brahman (10,81%). Os bovinos com o fenótipo baixo CAR apresentaram consumo de matéria seca (CMS) menor ($P < 0,01$) em comparação com aqueles dos grupos médio ou alto CAR (-0,95 kg versus -0,42 kg/d). Embora a digestibilidade da proteína bruta e da fibra na dieta tenha sido semelhante entre os grupos de CAR ($P > 0,05$), a digestibilidade do extrato etéreo tendeu a diminuir em animais de baixo CAR (-13,20 g/kg MS; $P = 0,050$). Os bovinos de baixo CAR também tenderam a apresentar uma área de olho de lombo (AOL) maior ($P = 0,065$) em comparação com os grupos de CAR alto/médio, mas tiveram espessura de gordura subcutânea (EGS) reduzida ($P = 0,042$). Além disso, os animais de baixo CAR exibiram um aumento de 0,22 kg na força de cisalhamento (WBSF; $P < 0,001$) e uma diminuição no índice de fragmentação miofibrilar (MFI; $P < 0,001$). Os parâmetros de cor da carne, como luminosidade (L^*) e intensidade de amarelo (b^*), assim como o escore de marmoreio, permaneceram consistentes entre os grupos de CAR ($P > 0,05$). Em conclusão, bovinos Zebuínos identificados como eficientes (baixo CAR) mostraram uma eficiência alimentar (EA) superior devido ao menor CMS. No entanto, Zebuínos com baixo CAR também exibiram menor EGS, além de piores características de qualidade da carne, tais como maciez (maior WBSF e menor MFI) e intensidade do vermelho (a^*), enfatizando a dificuldade de melhorar simultaneamente a EA e a qualidade da carne desses animais. O objetivo do segundo estudo foi comparar bovinos Nelore terminados em confinamento e divergentes quanto ao CAR sobre o desempenho, CAR, características de carcaça e qualidade da carne. Um teste de EA foi realizado com 96 bovinos Nelore, com peso vivo inicial de 400 ± 23 e 24 meses de idade, alojados em um curral coletivo equipado com três balanças estáticas conectadas aos bebedouros e treze comedouros eletrônicos, avaliando diariamente o consumo de matéria seca (CMS) e o ganho de peso corporal ao longo de 70 dias. Ao final do teste de EA, os animais foram classificados em baixo CAR (eficientes), médio e alto CAR (ineficientes). Os animais foram abatidos com

peso corporal final de 520 ± 31 kg após 120 dias de alimentação. Características de carcaça como peso de carcaça quente (PCQ), AOL, e EGS foram avaliadas. Na desossa, o músculo *Longissimus thoracis et lumborum* (entre as 12^a e 13^a costelas) foi coletado para análises de qualidade da carne, tais como cor (L^* , a^* , b^*), capacidade de retenção de água, perda de cozimento, força de cisalhamento (WBSF), teor de gordura intramuscular (IMF), substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) e índice de fragmentação miofibrilar (MFI) aos 5 e 15 dias post-mortem. Testes sensoriais ($n = 120$ consumidores não treinados) foram realizados para avaliar maciez (MA), sabor (SA), suculência (SU) e aceitação geral (AIG) utilizando amostras maturadas por 15 dias. Além disso, uma análise de lipidômica direcionada foi conduzida comparando os grupos de baixo versus alto CAR. Os dados foram analisados utilizando o procedimento GLM, com o peso vivo inicial como covariável. Efeitos significativos foram considerados em $P < 0,05$, enquanto tendências foram consideradas quando $0,05 \leq P < 0,10$. Animais de baixo CAR ($n=20$), em comparação com os de alto CAR ($n=20$), foram diferentes ($P < 0,05$) em desempenho produtivo, especificamente no CMS ($9,14 \pm 0,64$ versus $10,42 \pm 0,56$ kg/dia; $1,72 \pm 0,01$ versus $1,92 \pm 0,02$ %PV), eficiência alimentar bruta ($0,17 \pm 0,00$ versus $0,15 \pm 0,00$ kg/kg), taxa de conversão alimentar ($6,06 \pm 0,11$ versus $6,74 \pm 0,13$ kg/kg) e CAR ($-1,22 \pm 0,01$ versus $1,33 \pm 0,02$ kg/dia). Diferenças ($P < 0,05$) foram encontradas comparando baixo versus alto CAR para PCQ ($288,02 \pm 5,20$ versus $290,34 \pm 8,58$ kg) e EGS ($4,75 \pm 0,45$ versus $5,61 \pm 0,50$ mm), enquanto uma tendência ($P = 0,078$) de aumento foi verificada sobre a AOL ($86,05 \pm 1,30$ versus $82,91 \pm 1,46$ cm²) e não se evidenciou diferenças ($P > 0,05$) para MAR. Quanto à qualidade da carne, houve redução no MFI ($27,04$ versus $32,15$) e no teor de IMF ($1,43$ versus $1,75\%$) nos bovinos baixo CAR em comparação ao alto CAR ($P < 0,005$) aos 5 dias post-mortem. No entanto, não foram observadas diferenças ($P > 0,05$) na carne em relação ao pH, L^* , a^* , b^* , perda de cozimento, capacidade de retenção de água, perda por gotejamento, WBSF e TBARS. Após 15 dias de maturação, L^* , estabilidade da cor e variáveis de MFI aumentaram ($P < 0,001$), enquanto o pH, a^* , b^* e WBSF ($P < 0,001$) diminuíram. Na análise sensorial, os animais de baixo CAR apresentaram menor SU ($58,91 \pm 1,46$ versus $55,3 \pm 1,48$; $P < 0,05$) e AIG ($58,3 \pm 1,4$ versus $63,6 \pm 1,4$; $P < 0,01$) em comparação com alto CAR. A análise lipidômica identificou 60 moléculas lipídicas que diferiram ($P < 0,05$) entre os grupos de baixo e alto CAR. Esses compostos incluem diglicerídeos (DG), ácidos graxos (AG), fosfatidilcolinas (PC), fosfatidiletanolaminas (PE), esfingomielinas (SM) e triglicerídeos (TG). Regulação positiva dessas classes de lipídios foram identificadas nos animais de baixo CAR em comparação com os de alto CAR, as quais envolveram função mitocondrial, lipídios de armazenamento e glicerofosfoetanolaminas. Em conclusão, a melhor EA em animais de baixo CAR resulta em carcaças mais magras e mais pesadas, porém reduz a gordura intramuscular da carne. Diversas mudanças no lipidoma de bovinos Nelore foram identificadas, explicando possíveis vias metabólicas em animais eficientes (baixo CAR) comparados aos ineficientes (alto CAR). Essas mudanças combinadas afetaram negativamente as características físico-

químicas e sensoriais de qualidade da carne, particularmente SU e AIG no grupo baixo CAR.

Palavras chave: Bovinos de corte, carcaça, eficiência alimentar, lipidômica, maciez.

LISTA DE ABREVIATURAS

CAR	Consumo Alimentar Residual
CA	Conversão Alimentar
CMS	Consumo de Materia Seca
EA	Eficiência Alimentar
G:R	Ganho Ração
R:G	Ração Ganho
GMD	Ganho Medio Diario
CMS _o	Consumo de Materia Seca Observado
CMS _p	Consumo de Materia Seca Predito
PVMM	Peso Vivo Medio Metabólico
RNA	Ácido Ribonucleico
ATP	Adenosin Trifosfato
UCP1	Proteína Desacopladora
ROS	Especies Reativas ao Oxigenio
EGS	Espessura de Gordura Subcutânea
AOL	Área de Olho de Lombo
WBSF	Força de cisalhamento
DFD	Dark, Firm, Dry
CRA	Capacidade de Retenção de Agua
WBSF	Warner-Bratzler Shear Force
MFI	Indice de Fragmentação Miofibrilar
MSA	Meat Standards Australia
<i>L</i> [*]	Luminosidade
<i>a</i> [*]	Intesidade da Cor Vermelho
<i>b</i> [*]	Intensidade da Cor Amarelo
TEC	Toneladas Equivalente Carcaça
RC	Rendimento de Carcaça

PQC	Peso de Carcaça Quente
PPC	Perdas por Cocção
PEVP	Perdas por Evaporação
PGOT	Perdas por Gotejamento
TBARS	Substâncias Reativas ao Ácido Tiobarbitúrico
IMF	Gordura intramuscular
HHA	Hipotálamo-hipófise-adrenocortical
PLSDA	Discriminante de Mínimos Quadrados Parciais
MA	Maciez
SU	Suculencia
AIG	Aceitação geral
SA	Sabor
TG	Triglicerídeos
DG	Lipídeos Difosfato de Glicerol
SM	Esfingomielina
PC	Fosfatidilcolina
AG	Ácidos graxos
PE	Fosfatidiletanolaminas
PPARs	Receptores ativadores de proliferador peroximase
SREBP	Proteínas de ligação a elementos reguladores de esteróis

LISTA DE TABELAS

Página

CAPITULO 2

Tabela 1. Efeito da classificação de animais *Bos indicus* como de baixo consumo alimentar residual no desempenho, eficiência alimentar e características de carcaça.....55

Tabela 2. Meta-regressão dos efeitos de covariáveis na diferença média ponderada (DMP) da eficiência alimentar e características da carcaça entre animais *Bos indicus* classificados como de baixo consumo alimentar residual em comparação com o controle (médio/alto CAR)56

CAPITULO 3

Tabela 1. Composição da dieta experimental (em base de MS).....64

Tabela 2. Média, desvio padrão, mínimo e máximo das principais características de desempenho e carcaça de bovinos Nelore em confinamento75

Tabela 3. Características de desempenho e carcaça de bovinos Nelore terminados em confinamento classificados como eficientes (baixo CAR) e ineficientes (alto CAR).....77

Tabela 4. Características laboratoriais de qualidade de carne de amostras maturadas por 5 dias e maturadas por 15 dias de bovinos Nelore terminados em confinamento classificados como eficientes (baixo CAR) e ineficientes (alto CAR).....78

Tabela 5. Identificação de classes de lipídeos do músculo *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore terminados em confinamento classificados como baixo CAR (eficiente) e alto CAR (ineficiente)84

LISTA DE FIGURAS

Página

CAPITULO 1

Figura 1. Porcentagem da contribuição dos mecanismos na variação do consumo alimentar residual	7
--	---

CAPITULO 2

Figura 1. Fluxograma PRISMA mostrando a estratégia de triagem usada para identificar artigos elegíveis para construir o conjunto de dados dos efeitos do fenótipo de consumo alimentar residual (CAR) sobre o desempenho, a utilização de nutrientes e as características de qualidade da carne em gado Zebu (<i>Bos indicus</i>).....	57
--	----

Figura 2. Gráfico de floresta mostrando o efeito de animais eficientes (baixo consumo alimentar residual [CAR]) na digestibilidade (incluindo matéria seca [MS], proteína bruta [PBd], extrato etéreo [EE], fibra em detergente neutro [FDNd] e digestibilidade de carboidratos não fibrosos [CNCd]). O eixo x mostra a diferença média ponderada (efeito); diamantes à esquerda da linha sólida indicam uma redução na medida, enquanto diamantes à direita da linha indicam um aumento. Cada diamante representa o tamanho médio do efeito para aquele estudo, e o tamanho do diamante reflete o peso relativo do estudo para a estimativa do tamanho do efeito geral, com diamantes maiores indicando um peso maior. As linhas conectadas ao diamante representam o intervalo de confiança de 95% superior e inferior para o efeito do tratamento. A linha vertical pontilhada representa a estimativa do tamanho do efeito geral. O diamante na parte inferior representa a resposta média em todos os estudos e a linha vertical sólida indica uma diferença média de zero ou nenhum efeito.....	58
---	----

Figura 3. Gráfico de floresta mostrando o efeito de animal eficiente (baixo consumo residual de ração [RFI]) em características de qualidade da carne. O eixo x mostra a diferença média ponderada (efeito); os diamantes à esquerda da linha sólida indicam uma redução na medida, enquanto os diamantes à direita da linha indicam um aumento. Cada diamante representa o tamanho médio do efeito para aquele estudo e o tamanho do diamante reflete o peso relativo do estudo para a estimativa geral do tamanho do efeito, com diamantes maiores indicando um peso maior. As linhas conectadas ao diamante representam o intervalo de confiança superior e inferior de 95% para o efeito do tratamento. A linha vertical pontilhada representa	
--	--

a estimativa geral do tamanho do efeito. O diamante na parte inferior representa a resposta média entre os estudos e a linha vertical sólida indica uma diferença média de zero ou nenhum efeito.....59

CAPITULO 3

Figura 1. Cochos para mensurar o consumo alimentar individual (Intergado®).....65

Figura 2. Período de experimento.....66

Figura 3. Relação entre consumo predito e observado de matéria seca de bovinos Nelore em confinamento (N=96)76

Figura 4. A) Análise de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) músculo *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore divergentes para consumo alimentar residual (CAR): baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes). B) Análise de gordura intramuscular (IMF) do músculo *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore com baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes).....79

Figura 5. Análise sensorial da carne de bovinos Nelore divergentes para consumo alimentar residual (CAR): baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes) A) Maciez (MA). B) Suculência (SU). C) Sabor (AS). D) Aceitação geral (AIG)..... 80

Figura 6. Análise discriminante parcial de mínimos quadrados (PLSDA) para lipídeos UPLC-q-MS identificados no *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore divergentes para consumo alimentar residual (CAR): baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes). Animais com alto CAR (ineficientes-vermelho; n=20) e baixo CAR (eficientes-verde; n=20). Cada ponto de dados representa um animal..... 81

Figura 7. Gráfico das variáveis da importância no modelo de projeção, como a análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA). Eixo Y representa os diferentes lipídeos analisados. Eixo X evidencia os valores dos VIP scores para cada lipídio. A variação da cor nos blocos à direita indica se um lipídio específico está mais presente (vermelho) ou menos presente (azul), para os grupos baixo CAR (eficiente; n=20) e alto CAR (ineficiente; n=20).....82

Figura 8. Mapa de calor com análise de cluster hierárquico dos diferentes lipídeos medidos no músculo *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore terminados em confinamento classificados para baixo CAR (eficiente; n=20) e alto CAR (ineficiente; n=20). A cor azul indica uma baixa concentração do lipídio e o

vermelho	indica	uma	alta	concentração	do	
lipídeo.....						83

Figura 9. Alterações na intensidade relativa (up regulated) dos lipídeos do musculo <i>Longissimus thoracis et lumborum</i> de bovinos Nelore divergentes para consumo alimentar residual (CAR): baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes).....	86
---	----

Figura 10. Alterações na intensidade relativa (down regulated) dos lipídeos do musculo <i>Longissimus thoracis et lumborum</i> de bovinos Nelore divergentes para consumo alimentar residual (CAR): baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes).....	87
--	----

Figura 11. Análise de enriquecimento de lipidômica do tecido <i>Longissimus thoracis et lumborum</i> pelo Lion considerando todos os lipídeos que foram regulados positivamente e negativamente de bovinos Nelore com diferentes CAR - baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes).....	88
---	----

1. CAPITULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui o maior rebanho comercial de bovinos do mundo, contando com cerca de 234.3 milhões de animais, sendo a maior parte representada por animais da raça Nelore, e é o segundo maior produtor de carne globalmente, gerando mais de 11 milhões de toneladas métricas de equivalente carcaça (ABIEC, 2023). A pecuária participa com um 32,4% do valor bruto da produção agropecuária nacional, com um faturamento de R\$ 371,4 bilhões. Desde 2004, o país exporta carne para mais de 180 nações, alcançando em 2022 mais de três milhões de toneladas equivalente carcaça (TEC) para 155 países, o que representou 12,9 bilhões de dólares (ABIEC, 2023).

Na bovinocultura de corte, a nutrição representa aproximadamente dois terços dos custos de produção, excluindo o valor dos animais. Assim, reduzir a quantidade de alimento necessário por unidade de peso torna-se um objetivo essencial para produtores e nutricionistas (Pulina et al., 2022). Dado que os custos de alimentação constituem a maior despesa na produção de carne bovina (Rouquette et al., 2023), o foco da indústria é melhorar a rentabilidade. Isso pode ser alcançado por meio da redução desses custos e do aumento das taxas de ganho de peso, o que implica uma maior eficiência alimentar (EA).

Embora vários índices de EA tenham sido considerados, alguns deles estão relacionados ao crescimento, o que poderia resultar em maior ganho de peso e tamanho adulto ao ser incorporadas nos programas de seleção (Eler et al., 1995). Portanto, um dos índices usados é o consumo alimentar residual (CAR), conforme definido por Koch et al., (1963) e mede a diferença entre a ingestão real de matéria seca (MS) de um animal e o valor esperado, levando em conta a relação do valor estabelecido como consumo para obter determinado ganho. Valores negativos indicam que consomem menos ração do que o previsto, enquanto valores positivos de CAR indicam menor eficiência, com um consumo de ração maior do que o esperado.

A EA avaliada através do CAR, foi associada a diversas variações no comportamento e atividade dos animais (Kenny et al., 2018), digestibilidade e emissões de metano (Sauvant e Nozière, 2016; Bonilha et al., 2017), metabolismo energético (Chavez et al., 2015), composição de carcaça (Meale et al., 2017; Fitzsimons et al., 2017) e ao sistema endócrino (Perkins et al., 2014). Esses estudos buscam entender as diferenças entre os animais com diferentes níveis de CAR, destacando a importância de identificar as variações biológicas subjacentes.

Nos últimos 10 anos, houve um aumento significativo nas pesquisas direcionadas aos mecanismos biológicos que explicam essas variações, com foco na identificação de biomarcadores que ajudem a esclarecer as diferenças entre os fenótipos de CAR (Chaves et al., 2015; Fitzsimons et al., 2017; Alexandre et al., 2019; Artegoitia et al., 2019; Alexandre et al., 2020). Indicadores plasmáticos, como IGF-I, β -hidroxibutirato, leptina e glucocorticoides (como o cortisol), têm sido considerados, mas nenhum deles conseguiu explicar suficientemente a variabilidade do CAR. Atualmente os determinantes biológicos da variação na EA entre animais ainda não são completamente compreendidos, o que torna essa compreensão essencial por diversos motivos. Primeiro, pode expor efeitos colaterais indesejáveis da seleção genética para EA em características importantes, como a qualidade da carcaça, da carne e a composição corporal (Zorzi et al., 2013; Rouquette et al., 2023). Além disso, pode indicar novas estratégias de manejo para otimizar o desempenho de animais menos eficientes.

Contudo, pesquisas em nível molecular, abrangendo a análise de metabólitos (Consolo et al., 2021), lipidômica (Antonelo et al., 2022b), parâmetros sanguíneos (Bourgon et al., 2017), caracterização do microbioma ruminal (Carberry et al., 2014) e o estudo da função mitocondrial e dos mecanismos relacionados ao uso de energia (Baldassini et al., 2017; Idowu et al., 2024), têm sido fundamentais para compreender as diferenças metabólicas entre animais com diferentes níveis de EA. No entanto, são necessários estudos moleculares mais aprofundados para esclarecer as diferenças observadas entre os grupos divergentes para CAR, a fim de obter uma compreensão detalhada dos processos biológicos subjacentes que influenciam a EA.

Nesse contexto, o objetivo foi investigar a relação entre a EA de bovinos de corte em confinamento e as características de qualidade da carcaça e da carne, buscando entender como a divergência do CAR pode impactar negativamente atributos sensoriais e a aceitação do consumidor. Além disso, procurou-se integrar análises moleculares para fornecer informações sobre a relação entre o metabolismo energético e a divergência do CAR dos animais com as variações observadas na qualidade da carne, contribuindo para uma compreensão mais detalhada dos mecanismos biológicos envolvidos.

1.2. REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1. Eficiência alimentar (EA)

A EA é o inverso da CA que é definida como a quantidade de alimento consumido por um animal por unidade de ganho de peso corporal (Wagner et al., 2014). Assim, quando os animais apresentam menor quantidade de alimento consumido para atingir a mesma unidade de ganho comparado aos animais que consomem mais, pode-se dizer que apresentam uma melhor EA. Um dos grandes motivos para avaliar a EA está relacionado com os altos custos de produção. Assim, uma alternativa para melhoria da lucratividade na produção de carne bovina é a seleção para características de EA (Bottje e Carstens 2012), sendo esta característica considerada como moderada na herdabilidade no contexto de seleção genética (0.31 - 0.41) (Arthur et al., 2001).

Na literatura têm sido propostos mais de uma dúzia de índices alternativos para medir EA desde 1960. Esses índices refletem diferenças biológicas e aspectos matemáticos, além de suas interações com o ambiente (Arthur et al., 2001). Alguns de esses índices são conversão alimentar (CA); CAR, eficiência parcial de crescimento, índice de Kleiber, eficiência para manutenção, ganho residual e consumo e ganho residual.

A CA também referida como ração: ganho (R:G) e seu inverso matemático ganho: ração (G:R) tem sido muito usada com índice de EA. Entretanto, alguns

estudos demonstraram que a taxa de CA está altamente correlacionada com o ganho de peso e pode levar a um aumento substancial na energia de manutenção e no tamanho corporal adulto quando é usada como critério de seleção (Archer et al., 1999; Bishop et al., 1991; Herd e Bishop, 2000). Além disso, vários estudos demonstraram o impacto do aumento do tamanho corporal adulto com a seleção para a CA (Sundstrom 2004; Carstens et al., 2002), concluindo que um aumento no peso na idade adulta do animal pode ter consequências nos sistemas de produção (Archer et al., 1999), como o comprometimento da eficiência reprodutiva (Lanna et al., 2003). Segundo, Archer et al., (1999) a CA pode ser um indicador válido para avaliar EA em determinadas situações, como em confinamentos experimentais, estudos de nutrição nos quais se empregam genéticas uniformes, ou seja, em circunstâncias em que o tamanho corporal adulto do rebanho não seja afetado no futuro.

1.2.2. Consumo alimentar residual (CAR)

Diversas pesquisas já foram conduzidas utilizando o CAR como índice de EA. O CAR foi proposto no trabalho clássico de Koch et al. (1963) e é definido como a diferença entre o consumo de matéria seca (CMS) ou de energia observado e o CMS predito por meio de uma equação de regressão que leva em consideração o peso vivo metabólico e o ganho de peso médio diário (GMD) do animal obtidos no decorrer de um teste de EA. O CAR é considerado um índice independente do peso corporal e da taxa de crescimento dos animais (Saviotto et al., 2014). Animais mais eficientes apresentam CAR negativo e têm consumo de matéria seca observado (CMS_o) menor que o consumo de matéria seca predito (CMS_p), enquanto animais menos eficientes têm CAR positivo e CMS observado maior que o predito.

A regressão do consumo observado de cada animal com seus respectivos PVMM e GMD dá origem aos coeficientes médios do grupo (β_0 , β_1 e β_2) e o resíduo (ϵ), conforme equação proposta por Koch et al. (1963):

$$\text{CMS} = \beta_0 + \beta_1 \times (\text{PVMM}) + \beta_2 \times (\text{GMD}) + \varepsilon$$

A parcela residual do consumo, calculada a partir da equação mencionada anteriormente, tem sido utilizada para identificar animais cujo consumo observado diverge do consumo esperado. As variações individuais no CMS, acima ou abaixo do esperado em relação ao peso vivo metabólico e ao ganho de peso diário, também foram descritas em estudos com diferentes espécies, incluindo ratos (Archer et al., 1998), aves domésticas (Luiting; Urff., 1991), suínos (Gilbert et al., 2007; Hoque et al., 2007) e bovinos de corte (Archer et al., 1999). De acordo com Archer et al., (1999) o CAR é fenotipicamente independente das características de produção usadas para calcular o consumo de ração esperado. Além disso, permite a comparação entre indivíduos de diferentes níveis de produção, sendo uma vantagem do CAR quando comparado ao CA. Vários estudos demonstraram que o CAR apresenta valores moderados a altos de herdabilidade (0.4 – 0.5) (Arthur et al., 2001; Hoque et al., 2009; Berry and Crowley et al., 2013) e, portanto, pode ser explorado como índice de identificação e seleção de animais geneticamente superiores em relação ao CMS.

Por outro lado, o CAR pode ser dividido em dois parâmetros distintos: 1) consumo previsto para sustentar o nível de produção (ganho de peso) e manutenção e 2) uma parcela residual que poderia ser utilizada para identificar animais que apresentem desvios do nível de consumo esperado (Koch et al., 1963). Consequentemente, esse índice possibilita a identificação de animais que apresentem diferenças entre a exigência nutricional estimada e observada, permitindo classificar como eficientes aqueles que se mantêm e crescem com consumo inferior ao estimado (Del claro et al., 2012).

Para obter o CAR é crucial garantir a precisão das medições de consumo individual e do ganho de peso dos animais avaliados. Na avaliação de animais Nelore, para o ganho de peso é necessário um período mínimo de avaliação de 70 a 84 dias, devido à maior variação dessa característica ao longo do tempo em comparação com o CMS (devido às diferenças no conteúdo gastrointestinal entre pesagens). Decorrente disso, o CAR deve ser determinado ao longo de um

período mínimo de 70 dias e 21 dias de adaptação (Archer Bergh, 2000; Castilhos et al., 2011), com o peso vivo registrado em 2 dias consecutivos no início e no final e em intervalos periódicos ao longo do tempo.

É importante ressaltar que estudos estão tentando reduzir ainda mais a duração do teste (Wang et al., 2006; Manafiazar et al., 2017), o peso dos animais foi monitorado por 63 e 84 dias, respectivamente, e constatou-se que a duração mínima do teste de consumo alimentar poderia ser reduzida para entre 35 e 42 dias sem comprometer excessivamente a validade dos resultados.

Nos últimos dez anos, houve um aumento significativo no interesse em aprimorar a EA de bovinos de corte mediante o uso de programas de melhoramento genético (Fitzsimons et al., 2014a; Fitzsimons et al., 2014b; Higgins et al., 2018). O CAR pode ser menos suscetível às influências ambientais durante a pre-desmama do que as características relacionadas ao crescimento. Por ser o CAR um índice considerado não dependente do tamanho do animal e da taxa de crescimento, variações no CAR podem refletir variações inerentes aos processos fisiológicos que determinam a eficiência da produção (Munro et al., 2017; Fitzsimons et al., 2018; Martin et al., 2021).

1.2.3. Bases fisiológicas e moleculares do consumo alimentar residual

Em ruminantes, a variação no consumo de alimentos está diretamente relacionada à variação nas necessidades de manutenção e processos biológicos como metabolismo de ácidos graxos, função imunológica, produção de energia e crescimento muscular (Keogh et al., 2023). Quando o consumo de alimentos aumenta, a quantidade de energia necessária para digerir esses alimentos também aumenta, em parte devido ao aumento no tamanho dos órgãos digestivos e à maior demanda energética nos próprios tecidos do animal (Basarab et al., 2003). De acordo com estimativas de Richardson e Herd (2004) os processos fisiológicos que regulam a variação do CAR incluem o turnover proteico, o estresse e o metabolismo dos tecidos (37%), o transporte de íons (27%), a atividade, a

digestibilidade, o incremento calórico, a composição corporal e o comportamento alimentar (Figura 1).

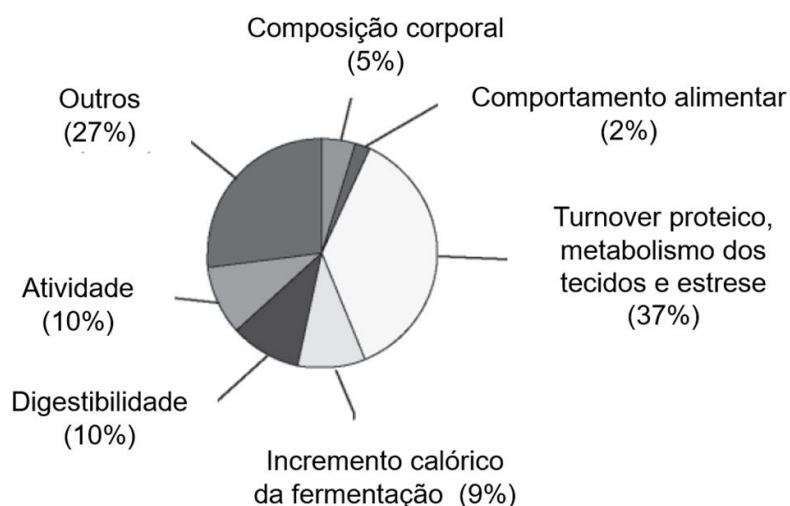


Figura 1. Porcentagem da contribuição dos mecanismos na variação do consumo alimentar residual (Herd et al., 2004).

A renovação proteica (turnover proteico) representa um ciclo que consome energia acarretando um custo energético elevado para o organismo (Lopez et al., 2022). Pois é um processo contínuo de degradação e síntese de proteínas que é essencial para a vida, fornecendo o fluxo de aminoácidos que permite serviços de manutenção como regulação metabólica, reparação celular e rápida adaptação às mudanças ambientais, entre outras funções (Taiwo et al., 2022). O gasto de energia estimado associado à síntese de proteínas pode constituir aproximadamente 23% do gasto energético total em ruminantes (Foote et al., 2024). Contudo, essa estimativa representa apenas um custo energético mínimo relacionado à renovação completa das proteínas, pois os requisitos energéticos para o transporte de aminoácidos e íons, renovação do ácido ribonucleico (RNA) e regulação metabólica não são considerados. Consequentemente, a variação no gasto total de energia entre animais de biótipo e histórico de manejo semelhantes pode ser atribuída a uma variedade de processos celulares que consomem

energia, como o bombeamento de íons (por exemplo Na^+/K^+ ATPase), vazamento de prótons mitocondriais, efeitos de hormônios da tireoide, leptina, IGF-1, turnover proteico, atividade enzimática lipídica/proteica ou atividade simpática (Hafla et al., 2013; Foote et al., 2024).

Algumas explicações fisiológicas sobre a EA evidenciam que bovinos Nelore com baixo CAR apresentam níveis mais baixos de hemoglobina e hematócrito no sangue (Chaves et al., 2015). Esses resultados apoiam a teoria de que uma menor capacidade fisiológica de reserva está relacionada a uma maior EA, além de que as funções da hemoglobina, como o transporte de oxigênio, podem contribuir para explicar as diferenças fenotípicas na EA (Baldassini et al., 2017; Chaves et al., 2015). Isto pode ser relacionado com animais de baixo CAR que podem ter um sistema circulatório mais ajustado, reduzindo os custos energéticos de manter níveis mais altos de glóbulos vermelhos, além disso com um melhor transporte ou eficiência de oxigênio.

Além disso, se relata que as diferenças no proteoma do fígado podem estar associadas à capacidade de transporte de oxigênio devido ao número de glóbulos vermelhos que influenciam a capacidade de oxigenação dos tecidos (Baldassini et al., 2017).

Por outro lado, as mitocôndrias desempenham um papel fundamental na produção de mais de 90% da adenosina trifosfato (ATP) celular a partir do acetil CoA, que é gerado pela digestão e catabolismo de carboidratos, proteínas e lipídeos derivados a dieta e/ou reservas corporais, através da fosforilação oxidativa que envolve uma série de transferências de elétrons por meio da cadeia de transporte de elétrons a respiração celular (Yang et al., 2021). Sendo esta, acoplada ao bombeamento de prótons para o espaço interno das membranas, impulsionando a síntese de ATP. Quando os prótons retornam para a matriz da via ATP sintase no tecido adiposo marrom, essa força protomotriz é dissipada devido à presença de uma proteína desacopladora (UCP1) gerando calor em vez de ATP (Baldassini et al., 2017). A ineficiência da fosforilação oxidativa também pode ocorrer devido ao vazamento de elétrons através da cadeia de transporte de elétrons resultando na geração de espécies reativas de oxigênio (ROS; superóxido

H₂O₂) que causam estresse oxidativo (Keogh et al., 2023). A função mitocondrial superior em bovinos eficientes, juntamente com a produção modificada de ROS e desintoxicação celular, ajudam a explicar as diferenças nos fenótipos de EA. Nesse sentido, bovinos com maior EA exibiram uma menor expressão de genes associados ao estresse oxidativo, além de uma expressão reduzida de genes ligados à desintoxicação celular (Fitzsimons et al., 2017).

Genes relacionados à proteção celular e combate ao estresse oxidativo mostraram expressão diferencial entre grupos diferentes para CAR. Um estudo reportou que, o gene *HPX*, que desempenha um papel na proteção das células contra o estresse oxidativo, foi mais expressado em novilhos com baixo CAR (Keogh et al., 2023). De fato, o *HPX* também apresentou expressão diferencial no estudo de Weber et al., 2016 onde foi observado que sua expressão era mais elevada na hipófise, fígado e duodeno, e reduzida nos tecidos muscular e adiposo dos novilhos com baixo CAR. Esses resultados mostram um efeito do processamento mitocondrial celular e da desintoxicação celular em direção à variação em CAR em bovinos de corte, que parece depender de vários fatores como tipo de raça, bem como da fonte alimentar empregada.

Nesse contexto, o metabolismo energético, a expressão diferencial de genes, como o *HPX*, sugere que os sistemas de proteção celular desempenham um papel central na eficiência metabólica dos animais. No entanto, ainda é necessário aprofundar a investigação desses processos, considerando fatores como a genética e o manejo nutricional, para otimizar a seleção de bovinos com maior EA.

1.2.4. Comportamento alimentar e digestibilidade

Animais com baixo e alto CAR demonstram comportamento alimentar distintos: os de baixo CAR apresentam menor CMS e menor duração de alimentação, mas maior frequência de alimentação e taxa de alimentação. Essas diferenças destacam a importância de considerar as variações diárias no comportamento alimentar e sua relação com o CAR (Garcia et al., 2024).

Pesquisas recentes indicam que animais com baixo CAR apresentam uma capacidade de digestão de alimentos superior em comparação com aqueles com alto CAR (Bonilha et al., 2017; Johnson et al., 2019). Essa maior eficiência na fermentação pode estar associada ao perfil microbiano do rúmen, que varia entre os grupos de CAR (Guan et al., 2008; Lam et al., 2018; Ellison et al., 2019), com uma maior abundância de bactérias ruminais e uma menor proporção de metanogênicos em animais classificados com baixo CAR (Lam et al., 2018). Por outro lado, McDonnell et al (2016) não encontraram efeito do status de CAR sobre as emissões de CH₄ (g/dia) em novilhas de corte alimentadas inicialmente com uma dieta de silagem de gramíneas e, posteriormente, com uma dieta rica em amido à base de cereais. Esses resultados sugerem haver pouca evidência de um efeito direto do CAR nas emissões ruminais de CH₄ (g/dia), indicando que as diferenças observadas provavelmente refletem a variação no CMS entre os animais.

Um estudo evidenciou que certos microrganismos metanogênicos como *Methanobrevibacter smithii* podem estar relacionados à EA do hospedeiro; entretanto, a composição química da dieta pode ter um impacto significativo na metanogênese no rúmen, devido à alteração nos substratos dietéticos disponíveis para fermentação (Carberry et al., 2014). Além disso, a expressão de genes envolvidos no metabolismo energético e no transporte de ácidos graxos voláteis em bovinos Nelore com diferente CAR, evidenciou que as diferenças do CAR podem estar relacionadas ao gasto energético no tecido ruminal, além que a expressão de genes relacionados à fosforilação oxidativa foi maior no tecido ruminal dos animais com alto CAR, refletindo assim que este grupo fenotípico pode ter maior produção de ATP no epitélio do rúmen (Benedeti et al., 2018).

Os estudos demonstram que as variações no comportamento alimentar, na composição microbiana do rúmen e na digestibilidade entre animais com baixo e alto CAR estão relacionadas à eficiência metabólica e à produção de metano. Animais com baixo CAR apresentam maior eficiência digestiva e menor emissão de metano, fatores que podem contribuir tanto para a melhoria da EA quanto para a redução do impacto ambiental. Esses achados ressaltam a importância de

integrar e continuar pesquisando abordagens de manejo nutricional na bovinocultura, visando não apenas o aumento da produtividade, mas também a sustentabilidade da produção de carne bovina.

1.2.5. CAR e características de carcaça e qualidade da carne

Várias pesquisas em pecuária de corte têm revelado variações entre o CAR e a composição corporal do animal (Cruz et al., 2010; Fitzsimons et al., 2014). Em estudo com bovinos Angus, Richardson et al. (2001) demonstraram que animais com baixo CAR apresentavam 13,2% menos gordura subcutânea em comparação com a progênie de alto CAR. Herd et al., (2004) estimaram que cerca de 5% da variação total do CAR está relacionada à maior deposição de gordura em animais ineficientes. Além disso, existe uma relação genética entre o CAR e a espessura de gordura subcutânea (EGS). Em novilhos Angus x Hereford, após uma geração de seleção divergente, foi observada uma menor EGS em animais de baixo CAR (McDonagh et al., 2001). Esses achados geram preocupação sobre o impacto da seleção para baixo CAR na qualidade da carne ao longo do tempo.

A AOL, que indica a musculatura da carcaça e prevê o rendimento de cortes bovinos, não apresentou diferenças significativas em estudos com bovinos Nelore e Brahman de baixo e alto CAR (Bonilha et al., 2009; Rouquette et al., 2023), sugerindo uma correlação fraca entre CAR e características de carcaça. Em contrapartida, outros estudos apontam que animais com baixo CAR tendem a apresentar carcaças mais magras, com menor gordura de acabamento, intramuscular e cavidade abdominal (Basarab et al., 2003; Herd et al., 2004; Gomez et al., 2019). Novilhos Nelore de baixo CAR apresentaram menor EGS em comparação com os de alto CAR (Nascimento et al., 2016). Em relação à qualidade da carne, Pflanzner e Felício (2009) identificaram que bifes de carcaças com menor gordura apresentaram maior resistência ao cisalhamento (WBSF), refletindo uma carne menos macia. Contudo, os achados são inconsistentes.

Nos países onde o uso de implantes é permitido, há evidências de que essas tecnologias podem melhorar a taxa de crescimento ao aumentar a síntese proteica e reduzir sua degradação (Smith et al., 2020). No entanto, um estudo de Al-Husseni

et al. (2013) com novilhos *Bos taurus* e *Bos indicus* não encontrou efeito dos implantes na expressão dos genes associados ao CAR, sugerindo que o CAR é regulado por mecanismos não influenciados por essa prática. Estudos sobre suplementação materna também indicam que bezerros cujas mães foram suplementadas durante a gestação apresentaram melhor CAR nos anos seguintes, com maior eficiência na conversão alimentar e melhores características de carcaça, como maior peso de carcaça quente (Summers et al., 2015; Foroutan et al., 2021). Isso reforça a importância da programação fetal no desempenho pós-natal.

Além disso, a seleção para crescimento rápido em bovinos Angus ao longo de cinco gerações não resultou em melhorias significativas no CAR (Herd et al., 2024). Estudos que investigaram a qualidade da carne não encontraram diferenças significativas na maciez, como a força de cisalhamento Warner-Bratzler (WBSF), entre grupos de CAR (Reis, 2009). No entanto, Blank et al. (2017) identificaram uma tendência de maior atividade de calpastatina em novilhos com baixo CAR, mas a maturação da carne compensou essas diferenças, tornando a maciez similar após 14 dias.

O pH final da carne, que influencia diretamente sua cor e capacidade de retenção de água (CRA), é um fator crítico. Estresse pré-abate pode elevar o pH, resultando em carne DFD (Dark, Firm, Dry), caracterizada por coloração escura e menor retenção de água. Animais com alto CAR, que respondem mais intensamente ao estresse, tendem a apresentar carne com pH mais alto (Richardson et al., 2004; Cantalapiedra et al., 2018). O estresse também afeta os sistemas neuroendócrinos, particularmente o eixo hipotálamo-hipófise-adrenocortical (HHA) e o sistema nervoso simpático, que influenciam o comportamento alimentar e o uso de glicogênio (Kelly et al., 2016).

Em termos de qualidade da carne, a maciez, influenciada pela atividade de calpastatina e pela fragmentação miofibrilar, é fundamental para a aceitação do consumidor. Carcaças com menor EGS estão mais sujeitas ao encurtamento das fibras durante o resfriamento, o que pode prejudicar a maciez (Baldassini et al., 2016; Caetano et al., 2013). Além disso, um pH elevado pode comprometer a cor e a CRA, afetando negativamente a qualidade da carne. A relação entre CAR e

qualidade da carne é ainda inconclusiva, com alguns estudos apontando carcaças mais magras em animais com maior EA (Gomes et al., 2019; Mota et al., 2019), enquanto outros não encontram diferenças significativas nas características de carcaça (Abreu et al., 2019; Zorzi et al., 2013).

Diante disso, melhorar a eficiência produtiva e a qualidade da carne no Brasil é essencial para impulsionar a competitividade da pecuária de corte, com benefícios econômicos, ambientais e de segurança alimentar. A integração de estratégias de manejo, genética e nutrição pode otimizar a EA sem comprometer as características sensoriais da carne. No entanto, são necessárias mais pesquisas para desvendar os mecanismos moleculares subjacentes que ligam a EA à composição da carcaça e à qualidade da carne, permitindo o desenvolvimento de estratégias que equilibrem eficiência produtiva e qualidade.

1.2.6. Análise sensorial e qualidade de carne

As análises sensoriais são empregadas geralmente no controle de qualidade, na comparação de protótipos de produtos para compreender as respostas dos consumidores em relação aos atributos sensoriais dos produtos, além de serem utilizadas no mapeamento sensorial (Ruiz-Capilla et al., 2021). As pesquisas sobre a qualidade da carne bovina geralmente focam na satisfação do consumidor com cortes de maior valor.

Para prever a qualidade da carne bovina, o modelo MSA (Meat Standards Australia) baseia-se nas características da carcaça e nas respostas de consumidores não treinados, que são solicitados a avaliar a maciez, suculência, sabor e aceitação geral de cada corte de carne bovina, seguindo protocolos padrão, o músculo comumente utilizado para esses estudos é o *Longissimus thoracis et lumborum*. Essas quatro pontuações são então combinadas para gerar a pontuação de qualidade da carne em quatro variáveis, que resulta em uma pontuação global de qualidade (Watson et al., 2008). Os principais fatores de classificação utilizados no modelo de previsão incluem o conteúdo de *Bos indicus* (que tende a reduzir a palatabilidade da carne), o sexo do animal, a ossificação (indicador da maturidade fisiológica do animal), o peso da carcaça, o uso de

promotores de crescimento hormonal, o marmoreio e a EGS, o método de suspensão da carcaça, o pH final, o tempo de maturação, o músculo e o método de cozimento final. O MSA identificou pontos de controle críticos nos setores de produção, pré-abate, processamento e agregação de valor na cadeia de abastecimento de carne bovina, quantificando sua importância relativa por meio de testes de consumo em grande escala (Thompson, 2002). Nesse contexto, o Brasil tem um protocolo parecido ao MSA, o qual é feito pela startup Brazil Beef Quality, uma empresa especializada na classificação e certificação de carnes, que permite estabelecer padrões de qualidade e na cadeia de carnes, permitindo assim atender as altas expectativas dos consumidores.

Por outro lado, a gordura desempenha papéis significativos e diversos na qualidade da carne bovina. Enquanto a gordura intramuscular afeta principalmente as percepções sensoriais, uma quantidade suficiente de gordura externa nas carcaças é crucial para assegurar o desenvolvimento da qualidade ideal nas primeiras 24 horas pós-morte (Hocquette et al., 2014; Baldassini et al., 2017). Embora o excesso de gordura na carne cause uma reação negativa em grande parte dos consumidores (Chappell, 2001), estudos demonstraram uma correlação positiva entre o nível de marmoreio e as avaliações de palatabilidade (Shackelford, Koohmaraie e Wheeler, 1994; Thompson, 2002; Wheeler, Cundiff e Koch, 1994). No Brasil, os consumidores de carne bovina valorizam especialmente características como a maciez, a suculência e o sabor, que são influenciadas pelo teor de gordura intramuscular (Hötzel e Vandresen et al., 2022). Entretanto, a preferência pelo teor de gordura, maciez, suculência varia conforme o perfil do consumidor, e ainda são necessárias mais informações detalhadas sobre as preferências específicas desse público.

A maciez da carne é um dos principais critérios sensoriais, pois afeta diretamente a satisfação do consumidor e sua intenção de compra (Warner et al., 2022). Por outro lado, a suculência e o sabor da carne estão fortemente associados ao teor de gordura intramuscular, que influencia o sabor, a cor, o aroma e a aparência geral da carne (Williams, 2008). Segundo McKillip et al., (2017) o sabor é a característica de palatabilidade mais crucial ao consumir carne bovina,

seguido pela maciez. Um estudo conduzido por Jiu et al., (2019) associando o CAR, qualidade de carne e uma análise sensorial evidenciou que a seleção de animais com baixo CAR apresentam menor sabor e suculência, sendo isto um indicativo de efeitos negativos ao longo prazo na qualidade do produto quando se seleciona animais com baixo CAR. Entretanto, Ellis et al., (2024) não encontraram diferenças entre animais com baixo e alto CAR para WBSF e as avaliações feitas pelo painel sensorial, indicando que neste estudo não se observou uma correlação entre CAR e a qualidade da carne em novilhos Angus puros.

Essa divergência mostra a necessidade de pesquisas adicionais que conectem a EA a investigações das vias moleculares envolvidas nas variações da qualidade da carne. Compreender como esses processos metabólicos afetam a deposição de gordura, WBSF e outros atributos sensoriais é crucial para esclarecer as diferenças encontradas em alguns estudos e a ausência delas em outros. Além disso, fatores como genética, sexo, idade dos animais e condições ambientais também podem influenciar os resultados.

Contudo, um estudo conduzido por Ahola et al., (2011) em tourinhos Angus de grupos diferentes para o CAR não observou nenhuma correlação entre CAR, perdas por cocção (PPC), WBSF, e análise sensorial para as características maciez, suculência, sabor, ou preferência geral, pelo qual pesquisas adicionais que incorporem uma avaliação completa do produto final (WBSF e análise sensorial por painel) de bifes de bovinos avaliados para CAR são necessárias, para assim melhorar os índices de EA sem impactar negativamente a qualidade da carne.

1.2.7. Lipidômica

Explorar e entender a base fundamental da EA por uma visão molecular por meio das ferramentas ômicas permite encontrar biomarcadores que identifiquem animais superiores, além de explicar as possíveis alterações das rotas metabólicas que refletem no destino da produção de energia e, consequentemente, na qualidade da carne (Gagaoua e Zhu., 2022). As técnicas das ômicas, juntamente com suas metodologias associadas, têm sido valiosas em diversas áreas de

pesquisa para identificar interações entre o genoma e fatores externos que podem alterar as características de um sistema biológico. Esses métodos têm sido cada vez mais utilizados na ciência dos alimentos e na avaliação da qualidade da carne. A qualidade dos produtos de carne é influenciada por diversas características que são afetadas tanto pela genética quanto por fatores externos, como métodos de criação, tipo de alimentação, manejo durante o abate e processamento de produtos à base de carne (Moreno et al., 2015; Liang et al., 2020; Guo et al., 2017).

A identificação de biomarcadores para características relacionadas à deposição de gordura por meio de estudos de associação do genoma completo (GWAS) e a sequenciamento de RNA-seq foram descritos na literatura (Salleh et al., 2017). Esses métodos ajudam a entender melhor os genes envolvidos na deposição de gordura e na composição dos AG (Di et al., 2022). Na produção de carne bovina, a lipidômica foi aplicada para investigar as variações nas características da carcaça e em atributos da qualidade da carne, como maciez, cor, marmoreio e a redução do pH (Antonelo et al., 2021b).

Pesquisadores já demonstraram que animais eficientes possuem um menor *turnover* proteico e deposição de gordura, com diferenças na função mitocondrial e eficiência respiratória (Goldansaz et al., 2017; Artegoitia et al., 2017). Consequentemente, diversos genes influenciam a variação do CAR, e esses genes estão associados ao metabolismo de proteínas e lipídeos, ao transporte intracelular e ao metabolismo de carboidratos, motivo pelo qual é fundamental entender o papel do metabolismo de lipídeos e energia em animais com baixo e alto CAR. Além de possibilitar a associação de mecanismos envolvendo lipídios que possam explicar as diferenças sensoriais percebidas pelos consumidores em animais com diferentes níveis de CAR.

Um estudo do perfil lipidômico direcionada em múltiplos tecidos associados a EA em novilhos de corte *Bos taurus* relacionou que várias classes de fosfolipídeos, são os principais fatores relacionados a lipídeos que caracterizam as propriedades e funções das membranas, incluindo a regulação de processos de transporte, homeostase energética e transdução de sinal (Artegoitia et al., 2017). Além disso, esses autores evidenciaram que a concentração de colesterol

é vista como um biomarcador confiável da EA em bovinos, pois observaram menores níveis de colesterol no fígado e no sangue de animais mais eficientes. As concentrações de colesterol realmente refletem a capacidade do fígado de sintetizar, transportar e oxidar essa substância.

Por outro lado, um estudo conduzido por Antonelo et al., (2022b) identificou que o perfil lipídico e metabolômico mostraram uma redução na glicólise e um aumento no uso de processos metabólicos alternativos como fatores centrais na diferenciação entre carnes com pH final alto e normal. Esse estudo indicou que a modificação na biossíntese de fosfolipídeos ocorreu na carne com pH final mais alto, possivelmente devido ao maior estresse oxidativo.

Adicionalmente, um estudo investigou como diferentes dietas (grãos versus forragem) e taxas de crescimento em bovinos afetam os perfis lipídicos musculares, revelando diferentes agrupamentos no perfil lipídico, afetando metabolismos de glicerolipídeos, fosfolipídeos, esfingolipídeos e beta-oxidação mitocondrial de AG saturados de cadeia longa (Antonelo et al., 2022a). Neste estudo, os pesquisadores evidenciaram que o conteúdo e perfil lipídico variaram conforme a estratégia de alimentação e foram associados a uma aparência mais clara e aumento da intensidade do vermelho nos bifes de animais terminados em confinamento além de uma maior maciez comparados com os animais em pastagem, e ao mesmo tempo maior concentração de TG. Esses resultados fornecem uma compreensão detalhada dos perfis lipídicos em bovinos terminados sob diferentes estratégias alimentares e a relação entre o conteúdo lipídico e a qualidade da carne.

Embora a lipidômica tenha avançado significativamente nos estudos relacionados à qualidade da carne, ainda existem áreas importantes que precisam ser exploradas. Pesquisas futuras devem focar em como os diferentes perfis lipídicos se associam à EA em bovinos, já que a composição lipídica pode impactar tanto o metabolismo energético quanto atributos de qualidade, como retenção de água, maciez e teor de gordura intramuscular. A integração da lipidômica com a EA em bovinos de corte pode oferecer, de maneira inédita, uma visão mais abrangente das vias metabólicas que afetam tanto a qualidade da carne quanto o

aproveitamento de nutrientes. Isso pode ajudar a esclarecer as razões pelas quais alguns animais são mais eficientes na conversão alimentar do que outros.

1.3. REFERENCIAS

ABIEC (2018). Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne

Abo-Ismael MK, Lansink N, Akanno E, Karisa BK, Crowley JJ, Moore SS, Bork E, Stothard P, Basarab JA, Plastow GS (2018). Development and validation of a small SNP panel for feed efficiency in beef cattle. **Journal of animal science**, v. 96, n. 2, p. 375-397.

Ahola, J. K., Skow, T. A., Hunt, C. W., & Hill, R. A (2011). Relationship between residual feed intake and end product palatability in longissimus steaks from steers sired by Angus bulls divergent for intramuscular fat expected progeny difference. **The Professional Animal Scientist**, v. 27, n. 2, p. 109-115.

Al-Husseini, W., Gondro, C., Quinn, K., Cafe, L. M., Herd, R. M., Gibson, J. P., PL, Greenwood, Chen, Y, (2013). Hormonal growth implants affect feed efficiency and expression of residual feed intake-associated genes in beef cattle. **Animal Production Science**, v. 54, n. 5, p. 550-556.

Artegoitia, V. M., Foote, A. P., Lewis, R. M., & Freetly, H. C. (2019). Metabolomics profile and targeted lipidomics in multiple tissues associated with feed efficiency in beef steers. **ACS omega**, 4(2), 3973-3982.

Artegoitia, V. M., Foote, A. P., Lewis, R. M., & Freetly, H. C. (2017). Liver metabolomics analysis associated with feed efficiency on steers. **Journal of Animal Science**, 95, 258.

Antonelo, P.R. dos Santos-Donado, C.R. Ferreira, L.A. Colnago, F.M.M. Ocampos, G.H. Ribeiro, R.V. Ventura, D.E. Gerrard, E.F. Delgado, C.J. Contreras-Castillo, J.C.C. Balieiro (2022b). Exploratory lipidome and metabolome profiling contributes to understanding differences in high and normal ultimate pH beef. **Meat Science**, v. 194, p. 108978.

Antonelo, M. Beline, S. Silva, J. Gómez, C. Ferreira, X. Zhang, B. Pavan, L. Koulicoff, A. Rosa, R. Goulart, D. Gerrard, S. Suman, M. Schilling, J. Balieiro (2022a). 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.

Archer, J. A., Richardson, E. C., Herd, R. M., & Arthur, P. F (1999). Potential for selection to improve efficiency of feed use in beef cattle: a review. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 50, n. 2, p. 147-162.

Alexandre, P. A., Reverter, A., Berezin, R. B., Porto-Neto, L. R., Ribeiro, G., Santana, M. H., & Fukumasu, H. (2020). Exploring the regulatory potential of long non-coding RNA in feed efficiency of indicine cattle. **Genes**, 11(9), 997.

Archer, J.A.; Arthur, P.F.; Herd, R.M.; Parnell, P.F.; Pitchford, W.S (1997). Optimum post weaning test for measurement of growth rate, feed intake, and feed efficiency in British breed cattle. **Journal of Animal Science**, Savoy, v. 75, p. 2024- 2032.

Archer, J.A.; Arthur, P.F.; Herd, R.M.; Richardson, E.C (1998). Genetic variation in feed efficiency and its component traits. In: World Congress on Genetics Applied To Livestock Production, 6., 1998, Armidale. **Proceedings.Armidale**,. v. 25, p. 81-84.

Archer, J.A.; Bergh, L, (2000). Duration of performance tests for growth rate, feed intake and feed efficiency in four biological types of beef cattle. **Livestock Production Science**, Amsterdam, v. 65, p. 47–55.

Artegoitia, V. M., Foote, A. P., Lewis, R. M., & Freetly, H. C (2017). Rumen fluid metabolomics analysis associated with feed efficiency on crossbred steers. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 2864.

Arthur, P. F., Archer, J. A., Johnston, D. J., Herd, R. M., Richardson, E. C., & Parnell, P. F. (2001). Genetic and phenotypic variance and covariance components for feed intake, feed efficiency, and other postweaning traits in Angus cattle. **Journal of animal science**, v. 79, n. 11, p. 2805-2811.

Arthur, P.F.; Herd, R.M, (2005). Efficiency of feed utilization by livestock: implications and benefits of genetic improvement. **Canadian Journal of Animal Science**, Ottawa, v. 85, p. 281–290.

Baker, S. D, Szasz, J. I, T. A. Klein, P. S. Kuber, C. W. Hunt, J. B. Glaze, Jr., D. Falk, R. Richard, J. C. Miller, R. A. Battaglia, R. A. Hill (2006). Residual feed intake of purebred Angus steers: Effects on meat quality and palatability. **Journal of animal science**, v. 84, n. 4, p. 938-945.

Baldassini, W, (2017). **Bioquímica da eficiência alimentar, metabolismo energético e função mitocondrial, uma abordagem animal e molecular**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo (USP). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ).

Baldassini, W. A., Bonilha, S. F. M., Branco, R. H., Vieira, J. C. S., Padilha, P. M., & Lanna, D. P. D, (2018). Proteomic investigation of liver from beef cattle (*Bos indicus*) divergently ranked on residual feed intake. **Molecular biology reports**, v. 45, p. 2765-2773.

Basarab, J. A., Price, M. A., Aalhus, J. L., Okine, E. K., Snelling, W. M., & Lyle, K. L, (2003). Residual feed intake and body composition in young growing cattle. **Canadian Journal of Animal Science**, v. 83, n. 2, p. 189-204.

Berry, D. P., & Crowley, J. J (2013). Cell biology symposium: genetics of feed efficiency in dairy and beef cattle. **Journal of animal science**, v. 91, n. 4, p. 1594-1613.

Bishop, M. D., Davis, M. E., Harvey, W. R., Wilson, G. R., & Vanstavern, B. D. , (1991) Divergent selection for postweaning feed conversion in Angus beef cattle: II. Genetic and phenotypic correlations and realized heritability estimate. **Journal of animal science**, v. 69, n. 11, p. 4360-4367.

Blank, C. P., Russell, J., Lonergan, S. M., & Hansen, S. L. (2017). Influence of feed efficiency classification and growing and finishing diet type on meat tenderness attributes of beef steers. **Journal of Animal Science**, v. 95, n. 7, p. 2986-2992.

Boligon, A. A., & Albuquerque, L. G. D (2011). Genetic parameters and relationships of heifer pregnancy and age at first calving with weight gain, yearling and mature weight in Nelore cattle. **Livestock Science**, v. 141, n. 1, p. 12-16.

Bonilha, S. F. M., Branco, R. H., Corvino, T. L. S., Alleoni, G. F., Figueiredo, L. A., & Razook, A. G (2009). Relationships between residual feed intake and internal organs of Nelore bulls. In: **Proceedings of American Dairy Science Association**,

Canadian Society of Animal Science, American Society of Animal Science Joint Annual Meeting. p. T310.

Cantalapiedra-Hijar G, Abo-Ismael M, Carstens GE, Guan LL, Hegarty R, Kenny DA, Plastow G, Relling A, Ortigues-Marty I (2018). Biological determinants of between-animal variation in feed efficiency of growing beef cattle. **Animal**, 12(S2):S321-S335.

Bottje, Walter G.; Carstens, Gordon E (2012). Variation in metabolism: biological efficiency of energy production and utilization that affects feed efficiency. **Feed efficiency in the beef industry**, p. 251-273.

Brand, Martin D.; Murphy, Michael P (1987). Control of electron flux through the respiratory chain in mitochondria and cells. **Biological Reviews**, v. 62, n. 2, p. 141-193.

Brethour, J. R (2004) The relationship of average backfat thickness of feedlot steers to performance and relative efficiency of fat and protein retention. **Journal of animal science**, v. 82, n. 11, p. 3366-3372.

Brown, D. R.; Denise, S. K.; Mcdaniel, R. G (1988). Mitochondrial respiratory metabolism and performance of cattle. **Journal of Animal Science**, v. 66, n. 6, p. 1347-1354.

Bünger, L., MacLeod, M. G., Wallace, C. A., & Hill, W. G (1998). Direct and correlated effects of selection for food intake corrected for body weight in the adult mouse. **Proceedings of the 6th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production**.

Bureš, Daniel; Bartoň, Luděk (2018). Performance, carcass traits and meat quality of Aberdeen Angus, Gascon, Holstein and Fleckvieh finishing bulls. **Livestock Science**, v. 214, p. 231-237.

Byrne, C. E.; Troy, D. J.; Buckley, D. J (2000). Postmortem changes in muscle electrical properties of bovine *M. longissimus dorsi* and their relationship to meat quality attributes and pH fall. **Meat science**, v. 54, n. 1, p. 23-34.

Caetano, S. L., Savegnago, R. P., Boligon, A. A., Ramos, S. B., Chud, T. C. S., Lôbo, R. B., & Munari, D. P (2013). Estimates of genetic parameters for carcass, growth and reproductive traits in Nellore cattle. **Livestock Science**, v. 155, n. 1, p. 1-7.

Capozzi, Francesco; Trimigno, Alessia; Ferranti, Pasquale, (2017). Proteomics and metabolomics in relation to meat quality. In: **Poultry Quality Evaluation**. Woodhead Publishing. p. 221-245.

Carberry, C. A., Waters, S. M., Kenny, D. A., & Creevey, C. J, (2014). Rumen methanogenic genotypes differ in abundance according to host residual feed intake phenotype and diet type. **Applied and environmental microbiology**, v. 80, n. 2, p. 586-594.

Carstens, G.E., C.M. Theis, M.B. White, T.H. Welsh, Jr., B.G. Warrington, R.D. Randel, T.D.A. Forbes, H. Lippke, L.W. Greene, And D.K. Lunt (2002). Residual feed intake in beef steers: I. Correlations with performance traits and ultrasound measures of body composition. **Proc West Sect Meet Am Soc Anim Sci** 53: 552–555.

Carstens, G.E.; Theis, C.M.; White, M.B.; Welsh Jr, T.H.; Warrington, B.G.; Miller, R.K.; Randel, R.D.; Forbes, T.D.A.; Lippke, H.; Greene, L.W.;Lunt D.K (2002). Relationships between net feed intake and ultrasound measures of carcass composition in growing beef steers. **Beef Cattle Research in Texas**, Kleberg, v. 75, n. 3, p. 31-34.

Castilhos, A.M.; Branco, R.H.; Razook, A.G.; Bonilha, S.F.M.; Mercadante, M.E.Z.; Figueiredo, L.A (2011). Test post-weaning duration for performance, feed intake and feed efficiency in Nellore cattle. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 2, p. 301-307.

Caton, J. S.; Bauer, M. L.; Hidari, H (2000). Metabolic components of energy expenditure in growing beef cattle-review. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 13, n. 5, p. 702-710.

Ceacero, T. M., Mercadante, M. E. Z., Cyrillo, J. N. D. S. G., Canesin, R. C., Bonilha, S. F. M., & de Albuquerque, L. G (2016). Phenotypic and genetic correlations of feed efficiency traits with growth and carcass traits in Nellore cattle selected for postweaning weight. **PLoS One**, v. 11, n. 8, p. e0161366.

Chaves, A. S., Nascimento, M. L. D., Tullio, R. R., Rosa, A. N., Alencar, M. M., & Lanna, D. P. (2015). Relationship of efficiency indices with performance, heart rate, oxygen consumption, blood parameters, and estimated heat production in Nellore steers. **Journal of Animal Science**, 93(10), 5036–5046.

Chappell, Greg, (2001). The importance of marbling in the domestic market—what does it mean for consumer. In: **Marbling Symposium**. p. 30-38.

Chen, C., Guo, Z., Shi, X., Guo, Y., Ma, G., Ma, J., & Yu, Q (2022). H₂O₂-induced oxidative stress improves meat tenderness by accelerating glycolysis via hypoxia-inducible factor-1 α signaling pathway in postmortem bovine muscle. **Food Chemistry**: X, v. 16, p. 100466.

Costa, E. C. D., Restle, J., Brondani, I. L., Perottoni, J., Faturi, C., & Menezes, L. F. G. D (2002). Composição física da carcaça, qualidade da carne e conteúdo de colesterol no músculo Longissimus dorsi de novilhos Red Angus superprecoces, terminados em confinamento e abatidos com diferentes pesos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, p. 417-428.

Crowley, J. J., Evans, R. D., Mc Hugh, N., Kenny, D. A., McGee, M., Crews Jr, D. H., & Berry, D. P (2011). Genetic relationships between feed efficiency in growing males and beef cow performance. **Journal of animal science**, v. 89, n. 11, p. 3372-3381.

Alexandre, P. A., Naval-Sanchez, M., Porto-Neto, L. R., Ferraz, J. B. S., Reverter, A., & Fukumasu, H. (2019). Systems biology reveals NR2F6 and TGFB1 as key regulators of feed efficiency in beef cattle. **Frontiers in Genetics**, 10, 230.

Cruz, G. D., Rodríguez-Sánchez, J. A., Oltjen, J. W., & Sainz, R. D (2010). Performance, residual feed intake, digestibility, carcass traits, and profitability of Angus-Hereford steers housed in individual or group pens. **Journal of Animal Science**, v. 88, n. 1, p. 324-329.

Culler, R.D.; Parrish, F.C.; Smith, G.C.; Cross, H.R (1978). Relationship of myofibril fragmentation index to certain chemical, physical and sensory characteristics of bovine longissimus muscle. **Journal of Food Science**, New York, v. 43, p. 1177–1180.

Del Claro, A. C., Mercadante, M. E. Z., & Silva, J. A. I. (2012) Meta-análise de parâmetros genéticos relacionados ao consumo alimentar residual e a suas características componentes em bovinos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 302-310.

Du, L., Li, K., Chang, T., An, B., Liang, M., Deng, T., Cao, S., Du, Y., Cai, W., Gao, X., Xu, L., Zhang, L., Li, G., & Gao, H (2022). Integrating genomics and transcriptomics to identify candidate genes for subcutaneous fat deposition in beef cattle. **Genomics**, v. 114, n. 4, p. 110406.

Eler, J. P., Van Vleck, L. D., & Lobo, R. B (1995). Estimation of variances due to direct and maternal effects for growth traits of Nelore cattle. **Journal of Animal Science**, v. 73, n. 11, p. 3253-3258.

Ellison, M. J., Conant, G. C., Lamberson, W. R., Austin, K. J., van Kirk, E., Cunningham, H. C., Rule, D., & Cammack, K. M (2019). Predicting residual feed intake status using rumen microbial profiles in ewe lambs. **Journal of Animal Science**, v. 97, n. 7, p. 2878-2888.

Firkins, J. L.; Reynolds, C (2005). Whole-animal nitrogen balance in cattle. In: Nitrogen and phosphorus nutrition of cattle: reducing the environmental impact of cattle operations. Wallingford UK: **CABI Publishing**. p. 167-186.

Fitzsimons, C.; Kenny, D. A.; McGee, M (2014a). Visceral organ weights, digestion and carcass characteristics of beef bulls differing in residual feed intake offered a high concentrate diet. **Animal**, v. 8, n. 6, p. 949-959.

Fitzsimons, C., Kenny, D. A., Fahey, A. G., & McGee, M (2014b). Feeding behavior, ruminal fermentation, and performance of pregnant beef cows differing in phenotypic residual feed intake offered grass silage. **Journal of animal science**, v. 92, n. 5, p. 2170-2181.

Fitzsimons, C., McGee, M., Keogh, K., Waters, S. M., & Kenny, D. A, (2017). Molecular physiology of feed efficiency in beef cattle. **Biology of domestic animals**, p. 122-165.

Foote, A. P., Salisbury, C. M., King, M. E., Rathert-Williams, A. R., McConnell, H. L., & Beck, M. R (2024). Association of glucose metabolism and insulin resistance

with feed efficiency and production traits of finishing beef steers. **Journal of Animal Science**, v. 102, p. skae050.

Foroutan, A., Wishart, D. S., & Fitzsimmons, C (2021). Exploring biological impacts of prenatal nutrition and selection for residual feed intake on beef cattle using Omics technologies: A review. **Frontiers in Genetics**, v. 12, p. 720268.

Foury, A., Devillers, N., Sanchez, M. P., Griffon, H., Le Roy, P., & Mormède, P. J. M. S (2005). Stress hormones, carcass composition and meat quality in Large White× Duroc pigs. **Meat Science**, v. 69, n. 4, p. 703-707.

Gacula Jr, Maximo C, (2008). **Descriptvie Sensory Analysis in Practice**. John Wiley & Sons.

Gagaoua, Mohammed e Zhu, Yao (2022). Proteomics advances in beef production. In: **Food Proteomics**. Academic Press. p. 151-182.

Garcia, I. M. C., Benfica, L. F., Malheiros, J. M., Gianvecchio, S. B., Canesin, R. C., & Mercadante, M. E. Z, (2024). Is residual feed intake related to the feeding behavior of Nellore cattle during the four periods of the day?. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 275, p. 106299.

Gilbert, H.; Bidanel, J.P.; Gruand, J.; Caritez, J.C.; Billon, Y.;Guillouet, P.; Lagant, H.; Noblet, J.; Sellier, P (2007). Genetic parameters for residual feed intake in growing pigs, with emphasis on genetic relationships with carcass and meat quality traits. **Journal of Animal Science**, Savoy, v. 85, p. 3182- 3188.

Goldansaz, S. A., Guo, A. C., Sajed, T., Steele, M. A., Plastow, G. S., & Wishart, D. S , (2017). Livestock metabolomics and the livestock metabolome: A systematic review. **PloS one**, v. 12, n. 5, p. e0177675.

Guan, L. L., Nkrumah, J. D., Basarab, J. A., & Moore, S. S (2008). Linkage of microbial ecology to phenotype: correlation of rumen microbial ecology to cattle's feed efficiency. **FEMS microbiology letters**, v. 288, n. 1, p. 85-91.

Guarnido-Lopez, P., Ortigues-Marty, I., Salis, L., Chantelauze, C., Bes, A., Nozière, P., & Cantalapiedra-Hijar, G, (2022). Protein metabolism, body composition and

oxygen consumption in young bulls divergent in residual feed intake offered two contrasting forage-based diets. **Animal**, v. 16, n. 7, p. 100558.

Guo, Wei; Greaser, Marion L, (2022). Muscle structure, proteins, and meat quality. In: **New aspects of meat quality**. Woodhead Publishing. p. 15-37.

Guo, Y., Zhang, X., Huang, W., & Miao, X (2017). Identification and characterization of differentially expressed miRNAs in subcutaneous adipose between Wagyu and Holstein cattle. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 44026.

Hafla, A. N., Carstens, G. E., Forbes, T. D. A., Tedeschi, L. O., Bailey, J. C., Walter, J. T., & Johnson, J. R, (2013). Relationships between postweaning residual feed intake in heifers and forage use, body composition, feeding behavior, physical activity, and heart rate of pregnant beef females. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 11, p. 5353-5365.

He, Z., Xiao, S., Xie, X., Zhong, H., Hu, Y., Li, Q., Gao, F., Li, G., Liu, J & Qiu, G, (2007). Molecular diversity of microbial community in acid mine drainages of Yunfu sulfide mine. **Extremophiles**, v. 11, p. 305-314.

Herd, R. M., Arthur, P. F., Bottema, C. D. K., Egarr, A. R., Geesink, G. H., Lines, D. S., Pier, S., Sidell, J., Thompson, J.M., & Pitchford, W. S, (2014). Genetic divergence in residual feed intake affects growth, feed efficiency, carcass and meat quality characteristics of Angus steers in a large commercial feedlot. **Animal Production Science**, v. 58, n. 1, p. 164-174.

Herd, R. M.; Bishop, S. C, (2000). Genetic variation in residual feed intake and its association with other production traits in British Hereford cattle. **Livestock Production Science**, v. 63, n. 2, p. 111-119.

Herd, R.M. Residual feed intake. In: RAUW, W.M. (Ed.) (2008). **Resource allocation theory applied to farm animal production**. Cambridge: CAB International. p.89-109

Herd, R.M.; Archer, J.A.; Arthur, P.F, (2003). Reducing the cost of beef production through genetic improvement in residual feed intake: Opportunity and challenges to application. **Journal of Animal Science**, Savoy, v. 81, p. 9-17.

Herd, Robert M.; Oddy, V. H.; Richardson, E. C, (2004). Biological basis for variation in residual feed intake in beef cattle. 1. Review of potential mechanisms. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 44, n. 5, p. 423-430.

Higgins, M. G., Fitzsimons, C., McClure, M. C., McKenna, C., Conroy, S., Kenny, D. A., Morris, D. W, (2018). GWAS and eQTL analysis identifies a SNP associated with both residual feed intake and GFRA2 expression in beef cattle. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 14301.

Hocquette, J. F., Van Wezemael, L., Chriki, S., Legrand, I., Verbeke, W., Farmer, L., Scollan, N.D., Polkinhorne, R., Rodbotten, R., Allen, P., & Pethick, D. W. , (2014). Modelling of beef sensory quality for a better prediction of palatability. **Meat science**, v. 97, n. 3, p. 316-322.

Hoque, M. A.; Hosono, M.; Suzuki, K (2009). Direct and maternal genetic parameters for measures of feed consumption and feed efficiency in young male Japanese Black cattle. **Livestock Science**, v. 122, n. 2-3, p. 333-338.

Hoque, M.A.; Kadowaki, H.; Shibata, T.; Oikawa, T.; Suzuki, K, (2007). Genetic parameters for measures of the efficiency of gain of boars and the genetic relationships with its component traits in Duroc pigs. **Journal of Animal Science**, Savoy, v. 85, p. 1873-1879.

Hötzel, M. J., & Vandresen, B. (2022). Brazilians' attitudes to meat consumption and production: Present and future challenges to the sustainability of the meat industry. **Meat Science**, 192, 108893.

Huffman, K. L., Miller, M. F., Hoover, L. C., Wu, C. K., Brittin, H. C., & Ramsey, C. B.(1996). Effect of beef tenderness on consumer satisfaction with steaks consumed in the home and restaurant. **Journal of animal science**, v. 74, n. 1, p. 91-97.

Johnson, C., Fitzsimmons, C., Kovalchuk, I., Kastelic, J., & Thundathil, J. , (2020). Testis-specific changes in gene expression of post-pubertal beef bulls divergent for residual feed intake and exposure to different pre-natal diets. **Animal Production Science**, v. 60, n. 12, p. 1491-1502.

Johnson, J. R., Carstens, G. E., Krueger, W. K., Lancaster, P. A., Brown, E. G., Tedeschi, L. O., Anderson, R.C., Johnson, A.K., & Brosh, A, (2019). Associations

between residual feed intake and apparent nutrient digestibility, in vitro methane-producing activity, and volatile fatty acid concentrations in growing beef cattle. **Journal of animal science**, v. 97, n. 8, p. 3550-3561.

Kelly, A. K., Earley, B., McGee, M., Fahey, A. G., & Kenny, D. A. (2016). Endocrine and hematological responses of beef heifers divergently ranked for residual feed intake following a bovine corticotropin-releasing hormone challenge. **Journal of Animal Science**, v. 94, n. 4, p. 1703-1711.

Kelly, A. K., Lawrence, P., Earley, B., Kenny, D. A., & McGee, M. (2017). Stress and immunological response of heifers divergently ranked for residual feed intake following an adrenocorticotrophic hormone challenge. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, v. 8, p. 1-8.

Keogh, K., McKenna, C., Waters, S. M., Porter, R. K., Fitzsimons, C., McGee, M., & Kenny, D. A. (2023). Effect of breed and diet on the M. longissimus thoracis et lumborum transcriptome of steers divergent for residual feed intake. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 9034.

Koch, R.M.; Swinger, L.A.; Chambers, Gregory, D.K.E (1963). Efficiency of feed use in beef cattle. **Journal of Animal Science**, Savoy, v. 22, p. 486-494.

Lam, S., Munro, J. C., Zhou, M., Guan, L. L., Schenkel, F. S., Steele, M. A., Miller, S.P., & Montanholi, Y. R. (2018). Associations of rumen parameters with feed efficiency and sampling routine in beef cattle. **Animal**, v. 12, n. 7, p. 1442-1450.

Lanna, D.P.D.; Calegare, L.; Almeida, R.; Berndt, A (2003). Conversão alimentar: eficiência econômica de vacas de corte de raças puras e cruzadas. In: SIMPÓSIO DE PECUÁRIA DE CORTE, 3., 2003, Lavras. **Anais**. Lavras: UFLA. p. 87-110.

Lawrie, R.A (2004). **Ciência da carne**. Porto Alegre: Artmed. p384.

Liang, H., Xu, L., Zhao, X., Pan, K., Yi, Z., Bai, Qui, X., Xin, J., Li, M., Ouyang, K., Song, X., Liu, C., & Qu, M. (2020). RNA-Seq analysis reveals the potential molecular mechanisms of daidzein on adipogenesis in subcutaneous adipose tissue of finishing Xianan beef cattle. **Journal of animal physiology and animal nutrition**, v. 104, n. 1, p. 1-11.

Lucila Sobrinho, T.; Branco, R.H.; Bonilha, S.F.M.; Castilhos, A.M.; Figueiredo, L.A.; Razook, A.G.; Mercadante, M.E.Z, (2011). Residual feed intake and relationships with performance of Nelore cattle selected for post weaning weight. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 4, p. 929-937.

Luiting, P.A.; Urff, E.M, (1991). Residual feed consumption in laying hens. 1. Quantification of phenotypic variation and repeatabilities. **Poultry Science**, Maryland, v. 70, p. 1655-1662.

Manafiazar, G., Basarab, J. A., McKeown, L., Stewart-Smith, J., Baron, V., MacNeil, M. D., & Plastow, G. (2017). Optimizing feed intake recording and feed efficiency estimation to increase the rate of genetic gain for feed efficiency in beef cattle. **Canadian journal of animal science**, 97(3), 456-465.

MAPA, 2022. Projeções do Agronegócio: Brasil 2022/23 a 2022/23 projeções de longo prazo / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 9a. ed. **Biblioteca Nacional De Agricultura – BINAGRI**, Brasília-DF

Marie Pierre et Ellies-Oury, M. P., Insausti, K., Papillon, S., Albechaalany, J., & Cantalapiedra-Hijar, G, (2024). Effect of residual feed intake on meat quality in fattening Charolais bulls fed two contrasting diets. **Meat Science**, v. 214, p. 109536.

Martin, P., Ducrocq, V., Faverdin, P., & Friggens, N. C, (2021). Invited review: Disentangling residual feed intake—Insights and approaches to make it more fit for purpose in the modern context. **Journal of Dairy Science**, v. 104, n. 6, p. 6329-6342.

Matarneh, Sulaiman K.; Scheffler, Tracy L.; Gerrard, David E (2023). The conversion of muscle to meat. In: **Lawrie's meat science**. Woodhead Publishing. p. 159-194.

McDonagh, M. B., Herd, R. M., Richardson, E. C., Oddy, V. H., Archer, J. A., & Arthur, P. F (2001). Meat quality and the calpain system of feedlot steers following a single generation of divergent selection for residual feed intake. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 41, n. 7, p. 1013-1021

McDonnell, R. P., Hart, K. J., Boland, T. M., Kelly, A. K., McGee, M., & Kenny, D. A. (2016). Effect of divergence in phenotypic residual feed intake on methane

emissions, ruminal fermentation, and apparent whole-tract digestibility of beef heifers across three contrasting diets. **Journal of Animal Science**, 94(3), 1179-1193.

Mckillip, K. V., Wilfong, A. K., Gonzalez, J. M., Houser, T. A., Unruh, J. A., Boyle, E. A., & O'quinn, T. G (2017). Sensory evaluation of enhanced beef strip loin steaks cooked to 3 degrees of doneness. **Meat and Muscle Biology**, v. 1, n. 1.

Montaño-Bermudez, M.; Nielsen, M. K.; Deutscher, G. H (1990). Energy requirements for maintenance of crossbred beef cattle with different genetic potential for milk. **Journal of Animal Science**, v. 68, n. 8, p. 2279-2288.

Moreno-I, Isabel; T, Francisco José (2015). Impaired adipose tissue expandability and lipogenic capacities as ones of the main causes of metabolic disorders. **Journal of diabetes research**, v. 2015, n. 1, p. 970375.

Mousel, M. R.; Stroup, Walter W.; Nielsen, Merlyn K (2001). Locomotor activity, core body temperature, and circadian rhythms in mice selected for high or low heat loss. **Journal of animal science**, v. 79, n. 4, p. 861-868.

Muchenje, V., Dzama, K., Chimonyo, M., Strydom, P. E., Hugo, A., & Raats, J. G. (2009) Some biochemical aspects pertaining to beef eating quality and consumer health: A review. **Food chemistry**, v. 112, n. 2, p. 279-289.

Mukiibi, R., Johnston, D., Vinsky, M., Fitzsimmons, C., Stothard, P., Waters, S. M., & Li, C (2020). Bovine hepatic miRNAome profiling and differential miRNA expression analyses between beef steers with divergent feed efficiency phenotypes. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 19309.

Mukiibi, R., Vinsky, M., Keogh, K. A., Fitzsimmons, C., Stothard, P., Waters, S. M., & Li, C (2018). Transcriptome analyses reveal reduced hepatic lipid synthesis and accumulation in more feed efficient beef cattle. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 7303.

Munro, J. C., Schenkel, F. S., Physick-Sheard, P. W., Fontoura, A. B. P., Miller, S. P., Tennessen, T., & Montanholi, Y. R (2016). Associations of acute stress and overnight heart rate with feed efficiency in beef heifers. **Animal**, v. 11, n. 3, p. 452-460.

Nascimento, L (2011) **Eficiência alimentar e suas associações com o lucro, características de carcaça e qualidade de carne de bovinos Nelore**. 2011. Tese de Doutorado (Ciência Animal e Pastagens) - Universidade de São Paulo-USP- Piracicaba.

Nascimento, M. L., Souza, A. R. D. L., Chaves, A. S., Cesar, A. S. M., Tullio, R. R., Medeiros, S. R., G.B. Mourão, A.N. Rosa, G.L.D. Feijó, M.M. Alencar & Lanna, D.(2016). P. D. Feed efficiency indexes and their relationships with carcass, non-carcass and meat quality traits in Nelore steers. **Meat science**, v. 116, p. 78-85.

Nkrumah, J. D., Basarab, J. A., Price, M. A., Okine, E. K., Ammoura, A., Guercio, S., Hansen, C. Li, B. Benkel, B. Murdoch, & Moore, S. S (2004). Different measures of energetic efficiency and their phenotypic relationships with growth, feed intake, and ultrasound and carcass merit in hybrid cattle. **Journal of animal science**, v. 82, n. 8, p. 2451-2459..

Nkrumah, J. D., Basarab, J. A., Wang, Z., Li, C., Price, M. A., Okine, E. K.& Moore, S. S, (2007). Genetic and phenotypic relationships of feed intake and measures of efficiency with growth and carcass merit of beef cattle. **Journal of animal science**, v. 85, n. 10, p. 2711-2720.

Nkrumah, J. D., Okine, E. K., Mathison, G. W., Schmid, K., Li, C., Basarab, J. A., Prince, M.A., Wang, S.S., & Moore, S. S. (2006) Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. **Journal of animal science**, v. 84, n. 1, p. 145-153.

Owens, F. N., Gill, D. R., Secrist, D. S., & Coleman, S. W (1995). Review of some aspects of growth and development of feedlot cattle.**Journal of Animal Science**, v. 73, n. 10, p. 3152-3172.

P. Del Bianco Benedeti a, E. Detmann a, H.C. Mantovani b, S.F.M. Bonilha c, N.V.L. Serão d, D.R.G. Lopes b, W. Silva a, C.J. Newbold e, M.S. Duarte a (2018). Nelore bulls (*Bos taurus indicus*) with high residual feed intake have increased the expression of genes involved in oxidative phosphorylation in rumen epithelium. **Animal Feed Science and Technology**, v. 235, p. 77-86.

Pflanzer, S. B.; De Felício, P. E. (2009). Effects of teeth maturity and fatness of Nelore (*Bos indicus*) steer carcasses on instrumental and sensory tenderness. **Meat Science**, v. 83, n. 4, p. 697-701.

Pflanzer, S.B.; Dias, M.P.; Felício, P.E. Efeito do pH final na força de cisalhamento e na perda de peso por cocção da carne de touros jovens Nelore e Cruzados F1. In: **Congresso Brasileiro De Ciência E Tecnologia**.

Pringle, T.D.; Williams, S.E.; Lamb, B.S.; Johnson, D.D.; West, R.L (1997). Carcass characteristics, the calpain proteinase system, and aged tenderness of Angus Brahman crossbred steers. **Journal of Animal Science**, Savoy, v. 75, p.2955-2961.

Pulina, G., Acciaro, M., Atzori, A. S., Battacone, G., Crovetto, G. M., Mele, M., Pirlo, G., & Rassa, S. P. G. (2021) Animal board invited review–Beef for future: technologies for a sustainable and profitable beef industry. **Animal**, v. 15, n. 11, p. 100358.

R Boccard, L Buchter, E Casteels, E Cosentino, E Dransfield, D.E Hood, R.L Joseph, D.B MacDougall, D.N Rhodes, I Schön, B.J Tinbergen, C Touraille, (1981). Procedures for measuring meat quality characteristics in beef production experiments. Report of a working group in the Commission of the European Communities'(CEC) beef production research programme. **Livestock Production Science**, v. 8, n. 5, p. 385-397.

Razminowicz, R. H.; Kreuzer, M.; Scheeder, Mr Al (2006). Quality of retail beef from two grass-based production systems in comparison with conventional beef. **Meat Science**, v. 73, n. 2, p. 351-361.

Richard, Allison J.; Stephens, Jacqueline M (2014). The role of JAK–STAT signaling in adipose tissue function. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Basis of Disease**, v. 1842, n. 3, p. 431-439.

Richardson, E. C., Herd, R. M., Arthur, P. F., Wright, J., Xu, G., Dibley, K., & Oddy, V. H (1996) Possible physiological indicators for net feed conversion efficiency in beef cattle. In: **Proceedings-Australian Society Of Animal Production**. Australian Society Of Animal Production. p. 103-106.

Richardson, E.C.; Herd, R.M.; Oddy, V.H.; Thomspson, J.M.; Archer, J.A.;Arthur, P.F, (2001). Body composition and implications for heat production of Angus steer progeny of parents selected for and against residual feed intake. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 41, p. 1065–1072.

Richardson, E.C; Herd, R.M (2004). Biological basis for variation in residual feed intake in beef cattle. 2. Synthesis of results following divergent selection. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 44, p. 431-440.

Robinson, Dorothy L.; Oddy, V. H (2004). Genetic parameters for feed efficiency, fatness, muscle area and feeding behaviour of feedlot finished beef cattle. **Livestock production science**, v. 90, n. 2-3, p. 255-270.

Rolfe, D. F.; Brand, Martin D, (1996). Contribution of mitochondrial proton leak to skeletal muscle respiration and to standard metabolic rate. **American Journal of Physiology-Cell Physiology**, v. 271, n. 4, p. C1380-C1389.

Rouquette Jr, F. M., Randel, R. D., Paschal, J., Machado, T. J., Long, C. R., & Riley, D (2023). Relationships of residual feed intake and residual average daily gain with carcass traits and growth of Brahman steers. **Applied Animal Science**, v. 39, n. 3, p. 178-185.

Ruiz-Capillas, C., Herrero, A. M., Pintado, T., & Delgado-Pando, G, (2021). Sensory analysis and consumer research in new meat products development. **Foods**, v. 10, n. 2, p. 429.

Salleh, M. S., Mazzoni, G., Höglund, J. K., Olijhoek, D. W., Lund, P., Løvendahl, P., & Kadarmideen, H. N (2017). RNA-Seq transcriptomics and pathway analyses reveal potential regulatory genes and molecular mechanisms in high-and low-residual feed intake in Nordic dairy cattle. **BMC genomics**, v. 18, p. 1-17.

Saviotto, Davi; Berry, D. P.; Friggens, N. C (2014). Towards an improved estimation of the biological components of residual feed intake in growing cattle. **Journal of Animal Science**, v. 92, n. 2, p. 467-476.

Schenkel, F. S.; Miller, S. P.; Wilton, J. W (2004) Genetic parameters and breed differences for feed efficiency, growth, and body composition traits of young beef bulls. **Canadian Journal of Animal Science**, v. 84, n. 2, p. 177-185.

Scheurink, Anton Jw; Steffens, Anton B (1990). Central and peripheral control of sympathoadrenal activity and energy metabolism in rats. **Physiology & behavior**, v. 48, n. 6, p. 909-920.

Shackelford, S. D.; Wheeler, T. L.; Koohmaraie, Mohammad (1995). Relationship between shear force and trained sensory panel tenderness ratings of 10 major muscles from *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle. **Journal of animal science**, v. 73, n. 11, p. 3333-3340.

Shackelford, S. D.; Wheeler, T. L.; Koohmaraie, Mohammad (1999). Evaluation of slice shear force as an objective method of assessing beef longissimus tenderness. **Journal of animal science**, v. 77, n. 10, p. 2693-2699.

Shackelford, S.D.; Koohmaraie, M.; Miller, M.F.; Crouse, J.D.;Reagan, J.O. (1991). An evaluation of tenderness of the Longissimus muscle of Angus by Hereford versus Brahman crossbred heifers. **Journal of Animal Science**, Savoy, v. 68, p. 171-177.

Smith, Zachary K.; Johnson, Bradley J, (2020). Mechanisms of steroidal implants to improve beef cattle growth: a review. **Journal of Applied Animal Research**, v. 48, n. 1, p. 133-141.

Souza L (2012). **Relações entre eficiência alimentar, características de carcaça e qualidade de carne de novilhos Nelore confinados**. Tese de Doutorado em Ciência Animal e Pastagens, Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

Sundstrom, B. **Net feed intake**: a feed efficiency measure (Now with IGF-1). 2004. Disponível em: <http://www.angusaustralia.com.au/netfeed_intakeebversus.htm>.

Tait Jr, R. G.; Wilson, D. E.; Rouse, G. H., (2005) Prediction of retail product and trimmable fat yields from the four primal cuts in beef cattle using ultrasound or carcass data. **Journal of animal science**, v. 83, n. 6, p. 1353-1360.

Thompson, John. Managing Meat Tenderness (2002). **Meat Science**, V. 62, N. 3, P. 295-308.

Wagner, John J.; Archibeque, Shawn L.; Feuz, Dillon M. The modern feedlot for finishing cattle (2014). **Annual Review Animal Bioscience**, v. 2, n. 1, p. 535-554.

Wang, Z., Nkrumah, J. D., Li, C., Basarab, J. A., Goonewardene, L. A., Okine, E. K., Crews, D. H. & Moore, S. S. (2006). Test duration for growth, feed intake, and

feed efficiency in beef cattle using the GrowSafe System. **Journal of animal science**, v. 84, n. 9, p. 2289-2298.

Warner, R. D., Wheeler, T. L., Ha, M., Li, X., Bekhit, A. E. D., Morton, J., Vaskoska, R., Dunshea, F., Liu, R., Purslow, P., & Zhang, W. (2022) Meat tenderness: Advances in biology, biochemistry, molecular mechanisms and new technologies. **Meat science**, v. 185, p. 108657..

Warner, Robyn Dorothy. The eating quality of meat: IV—Water holding capacity and juiciness, (2023). In: **Lawrie's meat science**. Woodhead Publishing, p. 457-508

Watson, R.; Gee, A.; Polkinghorne, R.; Porter, M. Consumer assessment of eating quality—Development of protocols for Meat Standards Australia (MSA) testing (2008). **Aust. J. Exp. Agric.**, 48, 1360–1367.

Weber, K. L., Welly, B. T., Van Eenennaam, A. L., Young, A. E., Porto-Neto, L. R., Reverter, A., & Rincon, G. , (2016)Identification of gene networks for residual feed intake in Angus cattle using genomic prediction and RNA-seq. **PloS one**, v. 11, n. 3, p. e0152274.

Webster, A. J. F.; Smith, J. S.; Mollison, G. S (1977) Prediction of the energy requirements for growth in beef cattle 3. Body weight and heat production in Hereford× British Friesian bulls and steers. **Animal Science**, v. 24, n. 2, p. 237-244.

Wheeler, T. L.; Cundiff, L. V.; Koch, R. M. (1994). Effect of marbling degree on beef palatability in *Bos taurus* and *Bos indicus* cattle. **Journal of animal Science**, v. 72, n. 12, p. 3145-3151.

Williams, John L. Genetic control of meat quality traits (2008) In: **Meat biotechnology**. New York, NY: Springer New York,. p. 21-60.

Wolcott, M. L., Johnston, D. J., Barwick, S. A., Corbet, N. J., & Burrow, H. M. (2013). Genetic relationships between steer performance and female reproduction and possible impacts on whole herd productivity in two tropical beef genotypes. **Animal Production Science**, v. 54, n. 1, p. 85-96.

Wolf, Claude; Quinn, Peter J. (2008) Lipidomics: Practical aspects and applications. **Progress in lipid research**, v. 47, n. 1, p. 15-36.

Zorzi, K., Bonilha, S. F. M., Queiroz, A. C., Branco, R. H., Sobrinho, T. L., & Duarte, M. S. (2013). Meat quality of young Nellore bulls with low and high residual feed intake. **Meat Science**, 93(3), 593-599.

Zhang, S. X., Farouk, M. M., Young, O. A., Wieliczko, K. J., & Podmore, C. (2005). Functional stability of frozen normal and high pH beef. **Meat Science**, v. 69, n. 4, p. 765-772.

CAPITULO 2 - Carcass and meat quality traits in *Bos indicus* cattle: A meta-analysis examining the effect of residual feed intake

Daniela A. Vesga ^a, Rodrigo N. S. Torres ^a, José B. S. Moreira ^a, Yury T. Granja-Salcedo ^c, Otavio R. Machado Neto ^{a,b}, Luis Artur L. Chardulo ^{a,b}, Mahesh N. Nair ^d, Pedro H. V. Carvalho ^d, Welder A. Baldassini ^{a,b*}

^a School of Agricultural and Veterinary Sciences (FCAV), São Paulo State University (UNESP), Jaboticabal, Brazil. ^b School of Veterinary Medicine and Animal Science (FMVZ), São Paulo State University (UNESP), Botucatu, Brazil. ^c El Nus Research Center, Colombian Agricultural Research Corporation (AGROSAVIA), San Roque, Colombia. ^d Department of Animal Sciences, Colorado State University (CSU), Fort Collins, Colorado, United States.

*Corresponding author: w.baldassini@unesp.br

Este capítulo corresponde ao artigo científico publicado na revista Tropical Animal Health and Production. Volume 56, 2024.

Abstract: This meta-analysis examines the effects of residual feed intake (RFI) phenotypes on performance, nutrient utilization, and meat quality traits in Zebu (*Bos indicus*) cattle. The study includes data from 23 peer-reviewed publications, encompassing 37 treatment means. It compares cattle classified as low RFI (more efficient) to those in medium or high RFI (less efficient) groups, using weighted mean difference analysis. The analysis also considers data heterogeneity through meta-regression and subgroup analysis, examining factors like animal age, sex class, experimental duration, RFI group, dietary concentrate, and estimated metabolizable energy intake. The primary cattle breed represented in the dataset is Nellore (89.18%), followed by Brahman (10.81%). Cattle with the low RFI phenotype showed significantly lower dry matter intake (DMI; $P < 0.010$) than those with medium or high RFI (-0.95 kg versus -0.42 kg/d). While crude protein and fiber digestibility in the diet were similar across RFI groups ($P > 0.05$), ether extract digestibility tended to decrease in low RFI animals (-13.20 g/kg DM; $P = 0.050$). Low RFI cattle also tended to have a larger ribeye area (REA; $P = 0.065$) compared to high/medium RFI groups but had reduced carcass backfat thickness (BFT; $P = 0.042$). Additionally, low RFI animals exhibited a significant increase of 0.22 kg in Warner-Bratzler shear force (WBSF; $P < 0.001$) and a decrease in the myofibrillar fragmentation index (MFI; $P < 0.001$). Meat color parameters such as lightness (L^*) and yellowness (b^*), as well as visual marbling scores, remained consistent across RFI groups ($P > 0.05$). In conclusion, Zebu cattle identified as efficient (low RFI) showed improved feed efficiency through reduced DMI. However, these cattle also

exhibited compromises in backfat thickness and meat quality traits, such as tenderness (WBSF and MFI) and redness (a^*), emphasizing the difficulty of enhancing both feed efficiency and meat quality traits simultaneously in Zebu cattle.

Keywords: Backfat thickness, feed efficiency, feed conversion ratio, myofibrillar fragmentation, meat tenderness

2.1 Introduction

The continuous growth in world population, coupled with increasing food demand, poses a significant challenge for animal protein production (OECD and FAO 2023). Therefore, ensuring production efficiency is economically significant for livestock production systems in terms of feed costs necessary for producing high-quality protein. In addition, it is also essential for environmental sustainability, affecting resource use and greenhouse gas emissions (Fitzsimons et al., 2013). Consequently, there is a critical demand to utilize animals with improved feed efficiency (FE) in meat production systems to ensure economic efficiency and environmental sustainability.

In 1963, Koch et al. (1963) proposed residual feed intake (RFI) as a measure to classify animals according to FE. It is a measure that has been widely employed in livestock breeding programs (Arthur et al., 2001). The use of RFI allows identification of animals that consume less feed while maintaining production levels in contemporary groups (Menezes et al., 2020). A potential increase of 10% in FE and up to 43% in profitability has been reported (Fitzsimons., 2013) with the use of RFI when considering that nutrition (feed) expenses represent the largest portion of production costs in cattle production (Pulina et al., 2021). Additionally, 25 to 30% reduction in cattle enteric methane emissions has been reported for cattle with better RFI (Manzanilla-Pech et al. 2022; Smith et al. 2021).

Bos indicus cattle, commonly referred to as Zebu cattle, play a significant role in the beef industries of countries like Brazil and Australia. Previous studies have suggested a negative association (Carneiro et al. 2019; Nkrumah et al. 2007; Robinson and Oddy 2004) between RFI and meat quality traits in *Bos indicus* cattle; however, published literature remains inconclusive on how genetic selecting animals with low RFI characteristics would affect meat quality traits. For example, several studies have reported less tenderness for steaks from *Bos indicus* cattle compared to *Bos taurus* cattle (Elzo et al. 2012; Wright et al. 2018) highlighting the importance of assessing how RFI affects carcass and meat quality traits.

Other studies with Nellore (*Bos indicus*) cattle have been unable to report differences in meat quality associated with RFI phenotype (Fidelis et al. 2017; Gomes et al. 2012; Zorzi et al. 2013). However, Nellore steers classified with low-RFI were associated with less intramuscular fat content and meat tenderness compared to high-RFI animals (Nascimento et al. 2016). These variable results previously reported in the literature underscore the necessity for a comprehensive and systematic analysis of existing research that describes the effects of RFI on meat quality in *Bos indicus* cattle. In this context, meta-analysis is a statistical approach capable of analyzing large sets of heterogeneous data to obtain robust quantitative evidence and to elucidate data behavior (Sauvant et al. 2020).

With respect to studies on the FE of beef cattle association with meat quality traits, we hypothesized that using low-RFI *Bos indicus* animals influences productive performance, carcass and meat quality traits, potentially affecting adipose tissue deposition and meat tenderness. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of RFI on carcass and meat quality traits in Zebu cattle (*Bos indicus*) using a meta-analytical approach.

2.2 Material and Methods

2.2.1 Dataset

A comprehensive literature search was conducted in three databases: PubMed (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>), Science Direct (<http://www.sciencedirect.com/>), and CABI (<https://www.cabi.org/>). The publications were gathered using the following search terms: “feed efficiency and beef quality” and “feed efficiency and meat quality”.

The following standardized criteria were applied for inclusion in the meta-analysis: 1) presence of a control group (medium/ high RFI) and a treatment group (low RFI); 2) reporting the genetic line, and 3) data obtained only from *Bos indicus* beef cattle. A flowchart describing the study identification and selection process is shown in Figure 1. Based on the inclusion criteria, 23 peer-reviewed publications with 37 treatments were included. The complete dataset is available in Supplemental File S1.

2.2.2 Weighted mean difference and publication bias

Meta-analysis was conducted using the R statistical software (Metafor package, version 4.4.0; Viechtbauer 2010). Forest plots were created with STATA 16.0 (StataCorp LP, College Station, Texas, United States). The effects of classifying *Bos indicus* animals as low RFI on performance and meat quality parameters were evaluated using the weighted mean difference (WMD) between the control (medium or high RFI) and treatment (low RFI) groups. Treatment means were weighted by the inverse variance according to the method proposed by DerSimonian and Laird (1986) for random effects models.

Between-study variability (i.e., treatment effect heterogeneity) was evaluated using the chi-square (Q) heterogeneity test and I^2 statistics. The latter measures the percentage of variation due to heterogeneity (Higgins et al. 2003).

Negative I^2 values were set to zero. I^2 values $< 25\%$ indicate low heterogeneity, values between 25 and 50% indicate moderate heterogeneity, and values $> 50\%$ indicate high heterogeneity (Higgins et al. 2003).

Publication bias was evaluated using a funnel plot (Light and Pillemer, 1986) and asymmetry among WMD and standard error (SE) according to Egger's regression asymmetry test (Egger et al. 1997). Significance was defined when $P \leq 0.05$ and tendency when $P > 0.05$ to < 0.10 . Studentized residuals outside the range of -2.5 to 2.5 were removed (outliers).

2.2.3 Meta-regression and subgroup analysis

Meta-regression analysis was performed to identify the effects of categorical covariates and to select those for inclusion in the subgroup analysis. A mixed model was applied to adjust the data in the meta-regression analysis using WMD as the dependent variable. The mixed-effect model was given by the equation $\Theta_i = \beta + \beta_i \times x_{ij} + \dots + \beta_p \times x_{ip} + \mu_i$, where Θ_i is the true treatment effect on the i th explanatory variable; β is the overall true effect of treatment; x_{ij} is the value of the j th covariate ($j = 1, 2, \dots, p$) for the i th explanatory variable; β_i is the change in the true effect size per one unit increase in the j th covariate, and $\mu_i \sim N(0, t^2)$. Here, t^2 indicates the extent of heterogeneity not explained by the covariate (Viechtbauer 2010).

Moment-based estimators of between-study variance (tau-squared, t^2) are used in Der-Simonian and Laird random effects meta-analysis but are less suitable when covariates are included in the analysis (Thompson and Sharp 1999). The restricted maximum likelihood (REML) approach was used to estimate t^2 because it is less likely to underestimate or produce biased variance estimates (Thompson and Sharp 1999; Viechtbauer 2005).

The null hypothesis of the covariate coefficients was obtained with the multiparameter Wald test (Harbord and Higgins 2008). The model's adjusted R^2 represents the proportion of between-study variance (heterogeneity) explained by the covariates (Harbord and Higgins 2008; Viechtbauer 2010). The adjusted R^2

was calculated by comparing the estimated between-study variance when covariates were included in the model (σ^2) and the corresponding values when they were excluded (σ_o^2): $\text{adjusted } R^2 (\%) = (\sigma_o^2 - \sigma^2) / \sigma_o^2 \sigma_o$.

The meta-regression criteria were (1) $P \leq 0.10$ for WMD; (2) $P \leq 0.05$ for the heterogeneity test; (3) $P \geq 0.05$ for the funnel plot, and (4) no observations with studentized residuals outside the range of -2.5 to 2.5 (outliers).

The covariates were divided as follows: age (< 20 and > 20 months); sex class (bulls and steers); experimental period (≤ 70 and 75 to 105 days); RFI group (high versus low RFI and medium versus low RFI); concentrate in the diet (350.0 to 600.0 and 700.0 to 900.0 g concentrate/kg dry matter – DM); estimated metabolizable energy in the diet (≤ 2.6 and 2.6 to 2.9 Mcal/kg DM). The WMD was determined by subgroup analysis when the categorical covariates were significant at $P \leq 0.10$.

2.2.4 Standardized mean difference

The effect size was calculated as the standardized mean difference (SMD), which is the difference between the control (medium or high RFI) and treatment (low RFI) groups standardized using the standard deviations of the high and low RFI groups. Consequently, the SMD data are expressed as standard deviation units (Higgins et al., 2003). The SMD estimates were calculated using the method of DerSimonian & Laird (1986) for random effects models.

2.3 Results

The database used for assessing the impact of RFI on carcass and meat quality traits in Zebu cattle comprised 23 studies with 37 treatment means. All studies included employed RFI as the method for classifying animals into low-RFI and high-RFI groups. The predominant genetic group was Nellore (89.18%), followed by Brahman (10.81%). Among these studies, animals with less than 20

months old accounted for 13.51%, animals older than 20 months accounted for 24.32%, and age was not informed in the remaining 62.16% of the animals used in this study.

Bulls were the predominant class (70.27%), while a small proportion of the studies used steers (29.72%). The experimental period ranged from less than 70 days in 43.24% of the studies to 75-140 days in 62.16%. The grain concentrate inclusion levels in the diets during feed efficiency tests ranged from 350 to 600 g/kg DM in 18.91% of the studies to 700-900 g/kg DM in another 18.91%; however, information on grain concentrate inclusion was not provided in 62.16% of the studies. Moreover, the metabolizable energy content of these diets also varied; where 2.7% of the studies reported metabolizable energy content of the diet of less than 2.6 Mcal/kg DM, while it ranged from 2.6 to 2.9 Mcal/kg DM in 18.91% of the studies; however energy content was not provided in 78.38% of the studies.

Productive performance: feed intake, nutrient digestibility and carcass traits

Animals classified as low RFI exhibited a less ($P < 0.010$) dry matter intake (DMI) and feed conversion ratio than animals of the high/medium RFI groups (Table 1; Figure S1; and Figure S2). However, low RFI animals were similar ($P > 0.050$) to the high/medium RFI groups in terms of digestibility variables, including dry matter, crude protein, neutral detergent fiber and non-fiber carbohydrate digestibility (Figure 2). Furthermore, there was a trend ($P = 0.050$) towards a reduction in fat digestibility in the low RFI group. These changes may be attributed to variations in ruminal microbial fatty acid biosynthesis, indicating higher microbial growth in more efficient animals, although not measured.

No differences between the low RFI and high/medium RFI groups were observed for cattle average daily gain, final body weight, carcass weight, carcass dressing percentage, or marbling score (Table 1; Figure S3). However, low RFI animals tended ($P = 0.065$) to increased ribeye area (REA) in 0.97% when

compared to animals in high/medium RFI groups, while low RFI animals decreased ($P = 0.042$) carcass BFT in 2.35% compared to animals high/medium RFI groups.

2.3.1. Meat quality traits

Differences in meat quality traits were observed between animals classified as low RFI and animals of the high/medium RFI groups (Fig. 3). Comparison between low-RFI with high/medium-RFI showed a reduction ($P < 0.010$) in final pH and the myofibrillar fragmentation index (MFI) measured at 0 and 7 days post-mortem. Additionally, an increase ($P < 0.01$) in Warner-Bratzler shear force (WBSF) was observed at 0 and 14 days and cooking loss at 7 days in the low RFI group compared with high/medium RFI groups. However, no differences were observed between the low RFI and high/medium RFI groups for lightness (L^*), yellowness (b^*), WBSF at 7 days, or cooking loss at 0 and 14 days post-mortem (Fig. 3).

2.3.2. Meta-regression analysis and funnel plot asymmetry

The funnel plot asymmetry test revealed no evidence of publication bias ($P > 0.050$), as shown in Table 1. Meta-regression analysis (Table 2) among all covariates (animal age, sex class, experimental period, RFI group, estimated metabolizable energy in the diet, and concentrate in the diet) indicated RFI group as the primary factor influencing the variability effect of classifying animals as low RFI.

2.3.3. Subgroup analysis

Evaluating the covariate “RFI class” (Figure S3), animals classified as low RFI exhibited less DMI than animals of the high RFI (WMD = -0.95 kg; $P = 0.0001$) and medium RFI (WMD = -0.42 kg; $P = 0.013$) groups.

2.4 Discussion

This is the first study to apply a meta-analytical approach to elucidate the effects of RFI phenotype on performance, nutrient utilization, carcass and meat quality traits specifically in *Bos indicus* animals. We observed a reduction DMI in low RFI animals compared to their medium or high RFI counterparts. Moreover, low RFI *Bos indicus* cattle tended to have greater muscle deposition (REA) and less carcass fatness (BFT) with high/medium RFI groups. However, meat quality was negatively affected in low RFI animals, with increased WBSF and reduced MFI, suggesting changes in post-mortem proteolysis (Karisa et al. 2013).

The trend towards an increase in REA in animals with low RFI could be related to enhanced protein deposition in these animals, potentially improving the yield of marketable meat cuts and reducing production costs. Previous studies in Zebu cattle have reported that differences in carcass composition may be due to the greater efficiency in energy utilization for muscle tissue deposition coupled with less protein turnover in more feed efficient animals (Santana et al. 2012; Cônsolo et al. 2021). Moreover, greater activity of the muscular mitochondrial complex, particularly respiration and phosphorylation capacity, may also contribute to this difference (Fernandez et al. 2020).

Similar to the current study, Nascimento et al. (2016) observed greater REA in low RFI animals in Nellore steers, indicating greater muscle deposition in the carcass of low RFI animals compared to animals in other RFI groups. However, the decrease in BFT in animals with low RFI may be related to alterations in energy metabolism, since animals with low RFI optimize energy utilization. As highlighted by Fernandez et al. (2020), low-RFI animals have greater mitochondrial activity, which translates into a higher cellular respiratory capacity causing efficient animals to use more energy for protein deposition. Additionally, Consôlo et al. (2020), studying Nellore bulls with different RFI, observed higher lipolytic activity in low RFI

animals, indicating a higher mobilization of body reserves which could be associated with less BFT.

The reduction in BFT might represent a concern in *Bos indicus* cattle with low RFI. Subcutaneous fat is a crucial carcass characteristic for meat quality by providing protection and thermal insulation to the carcass during chilling in the abattoir, thereby preventing cold shortening (Chardulo et al. 2013). A previous study suggested that Nellore cattle producers should achieve a BFT of at least 5.00 mm to prevent muscle fiber shortening (Baldassini et al. 2017). This practice is recommended because the Brazilian beef cattle herd is primarily composed of Zebu animals (*Bos indicus*), with the Nellore genotype accounting for approximately 80% of that. Despite their adaptation to tropical climates, Nellore cattle take longer to reach the targeted mature weight compared to taurine breeds (*Bos taurus*) such as Aberdeen Angus and Hereford (Goulart et al. 2020). Thus, *Bos indicus* bulls have less fat deposition capacity than pure *Bos taurus* animals (Goulart et al. 2020; Malheiros et al. 2020). This would possibly indicate that the *Bos indicus* genetic group requires more time to deposit intramuscular fat.

It has been reported that cold shortening of muscle fibers due to inadequate thermal insulation of the carcass can adversely affect meat tenderness (Aalhus et al. 2001). Animals in the low RFI group showed higher WBSF values, possibly due to less carcass fattening, which could have affected carcass chilling (Pacheco et al. 2023). Furthermore, MFI was diminished in the low RFI group compared to the medium/high RFI groups, even at 7 and 14 days post-mortem. These findings suggest that, apart from issues related to fat deposition, post-mortem proteolysis appears to be less efficient Zebu cattle with low RFI, a fact that helps explain the less meat tenderness (greater WBSF) in animals with low RFI compared high/medium RFI animals. Post-mortem proteolysis can be monitored by the MFI, which serves as an indicator of meat proteolytic activity. This index represents the

resistance of myofibrils to fragmentation and is correlated with meat tenderness (Feng et al. 2020).

The inverse relationship between MFI and WBSF observed in the current study and other previous studies (Baldassini et al. 2022; Karumendu et al. 2009) can be attributed to greater levels of calpastatin in the muscle the efficient animal group. Calpastatin is a potent inhibitor of calpain activity, which directly affects protein degradation mechanisms, resulting in less tender meat. Greater levels of calpastatin in the meat have been reported in *Bos indicus* cattle in animals with low RFI compared animals high-RFI (Pringle et al. 1997; Wheeler et al. 1990; Whipple et al. 1990). McDonagh et al. (2001) observed greater calpastatin concentrations and less MFI in the *Longissimus* muscle of animals selected following a single generation of divergent selection for residual feed intake, suggesting that low RFI animals exhibit different calpastatin concentrations (and less MFI) compared with high/medium RFI.

We also observed a slight reduction in meat pH in animals with low RFI compared high/medium RFI. The less differences in meat pH in low RFI animals may be related to the fact that efficient animals for RFI are less reactive to stress, as observed by Richardson et al. (2004) who studied *Bos taurus* animals divergent for RFI. The authors reported less plasma cortisol concentrations in the low-RFI group, which were associated with less meat pH (Bonilha et al. 2017). These animals showed less depletion of muscle glucose stores during pre-slaughter handling (Rui 2014; Taiwo et al. 2022). However, further studies are needed to assess the relationship between greater efficiency and less stress susceptibility and its implications for meat quality.

The reduction in redness (a^*) in the meat of low-RFI animals is a factor that may have an impact on consumers since this trait is highly associated with purchasing decisions (Testa et al. 2021). Furthermore, studies have linked less

redness (a^*) to type II muscle fibers, demonstrated by less muscle myoglobin concentrations, along with less mitochondrial abundance and vascularization (Picard and Gagaoua 2020). Thus, meat redness might be less in low- RFI animals because of differences in muscle fiber composition that is inherent to these animals.

We elucidated the primary effects of RFI phenotype on carcass and meat quality traits in *Bos indicus* cattle. Low RFI animals exhibited reduced BFT compared to their medium or high RFI counterparts, highlighting their superior FE (less DMI), which holds potential for enhancing both economic efficiency and environmental sustainability. However, variations in carcass composition were observed across studies. Low RFI animals showed a tendency towards increased REA and decreased BFT, indicating enhanced muscle deposition but reduced carcass fatness, respectively.

Furthermore, the meat quality of low RFI animals was adversely affected, as indicated by increased WBSF, reduced MFI, and a decrease in meat redness (a^*). Overall, our findings contribute to a deeper understanding of the intricate relationship between RFI, productive performance, carcass traits, and meat quality in *Bos indicus* cattle, providing valuable insights for future breeding and rearing practices aimed at optimizing both efficiency and quality in tropical beef production systems.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding this work.

Acknowledgments

This work was supported by the São Paulo Research Foundation (FAPESP) (Grant Nos. 2023/05002-3 and 2023/02662-2). The study was also financed in part

by CAPES - Finance Code 001. We also thank the Fundación para el Futuro de Colombia/COLFUTURO's loan-scholarship program (<https://plic.colfuturo.org/sponsorletter/>) – Finance code RMLD 1IS4.

Data availability

Data will be made available on request.

2.5 References

Aalhus, J. L., Janz, J. A. M., Tong, A. K. W., Jones, S. D. M., & Robertson, W. M. (2001). The effects of chilling rate and fat cover on beef quality. *Canadian Journal of Animal Science*, 81(3), 321–330.

Arthur, P. F., Archer, J. A., Johnston, D. J., Herd, R. M., Richardson, E. C., & Parnell, P. F. (2001). Genetic and phenotypic variance and covariance components for feed intake, feed efficiency, and other postweaning traits in Angus cattle. *Journal of Animal Science*, 79, 2805–2811.

Baldassini, W. A., Chardulo, L. A., Silva, J. A., Malheiros, J. M., Dias, V. A., Espigolan, R., Baldi, F. S., Albuquerque, L. G., Fernandes, T. T., & Padilha, P. M. (2017). Evaluating meat quality traits of Nellore bulls with varying degrees of backfat thickness using a multivariate approach. *Animal Production Science*, 57, 363–370.

Baldassini, W., Gagaoua, M., Santiago, B., Rocha, L., Torrecilhas, J., Torres, R., Curi, R., Neto, O. M., Padilha, P., Santos, F., Lanna, D. P., & Chardulo, L. A. (2022). Analyzing meat quality and muscle tissue proteome in crossbred bulls finished in a feedlot with wet distiller grains by-product. *Foods*, 11(20), 3233.

Bonilha, S. F. M., Branco, R. H., Mercadante, M. E. Z., dos Santos Gonçalves Cyrillo, J. N., Monteiro, F. M., & Ribeiro, E. G. (2017). Digestion and metabolism in Nellore bulls with low and high residual feed intake. *Tropical Animal Health and Production*, 49, 529–535.

Carneiro, M. M. Y., da Graça Moraes, M., Souza, A. R. D. L., Fernandes, H. J., Dias Feijó, G. L., de Nadai Bonin, M., Franco, G. L., & Rocha, R. F. A. T. (2019). Utilizing residual intake and gain to assess performance, non-carcass components, and carcass traits in confined crossbred Texel lambs. *Revista Brasileira De Zootecnia*, 48, e20180206.

Chardulo, L. A. L., Silveira, A. C., & Vianello, F. (2013). Analytical aspects of assessing tropical meat quality. In G. P. P. Lima & F. Vianello (Eds.), *Food Quality, Safety and Technology* (pp. 53–62). Springer-Verlag Wien.

Cônsolo, N. R. B., Buarque, V. L. M., Silva, J., Poleti, M. D., Barbosa, L. C. G. S., Higuera-Padilla, A., Gómez, J. F. M., Colnago, L. A., Gerrard, D. E., Saran Netto, A., & Silva, S. L. (2021). Metabolomic profiles in muscle and liver linked to residual feed intake in Nellore cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 271, 114757.

DerSimonian, R., & Laird, N. (2015). Revisiting meta-analysis methods in clinical trials. *Contemporary Clinical Trials*, 45, 139–145.

Egger, M., Smith, G. D., Schneider, M., & Minder, C. (1997). Detection of bias in meta-analysis using a simple graphical test. *BMJ*, 315(7109), 629–634.

Elzo, M. A., Johnson, D. D., Wasdin, J. G., & Driver, J. D. (2012). Breed differences in carcass and meat palatability and heterosis effects in an Angus-Brahman multibreed population. *Meat Science*, 90, 87–92.

Feng, Y. H., Zhang, S. S., Sun, B. Z., Xie, P., Wen, K. X., & Xu, C. C. (2020). Post-mortem aging effects on physical meat traits, protein solubility, and microstructure in different beef muscles. *Foods*, 9(6), 806.

Fernandez, E. E., Oltjen, J. W., & Sainz, R. D. (2020). Muscle mitochondrial abundance and function in beef steers with varying residual feed intake. *Animal*, 14(3), 560–565.

Fidelis, H. A., Bonilha, S. F. M., Tedeschi, L. O., Branco, R. H., Cyrillo, J. N. S. G., & Mercadante, M. E. Z. (2017). Residual feed intake and its association with carcass traits and meat quality in Nellore cattle. *Meat Science*, 128, 34–39.

Fitzsimons, C., Kenny, D. A., Deighton, M. H., Fahey, A. G., & McGee, M. (2013). Methane emissions, body composition, and rumen fermentation traits in beef heifers with different residual feed intake levels. *Journal of Animal Science*, 91(12), 5789–5800.

Gomes, R. C., Sainz, R. D., Silva, S. L., César, M. C., Bonin, M. N., & Leme, P. R. (2012). Performance in feedlot, feed efficiency, carcass traits, body composition, energy requirements, meat quality, and calpain system activity in Nellore steers with low and high residual feed intake. *Livestock Science*, 150(1–3), 265–273.

Goulart, R. S., Caetano, M., Pott, E. B., da Cruz, G. M., Tullio, R. R., de Alencar, M. M., Bertho, R. D. M., & Lanna, D. P. D. (2020). Performance, carcass characteristics, and fecal starch content comparison between Nellore and Bos taurus × Nellore beef crosses at the same age. *Applied Animal Science*, 36(3), 430–436.

Harbord, R. M., & Higgins, J. P. T. (2008). Conducting meta-regression in Stata. *Stata Journal*, 8(4), 493–519.

Higgins, J. P. T., Thompson, S. G., Deeks, J. J., & Altman, D. G. (2003). Measuring inconsistency in meta-analyses. *BMJ*, 327(7414), 557–560.

Karisa, B. K., Thomson, J., Wang, Z., Stothard, P., Moore, S. S., & Plastow, G. S. (2013). Candidate genes and SNPs associated with residual feed intake variation in beef cattle. *Journal of Animal Science*, 91(8), 3502–3513.

Karumendu, L. U., van de Ven, R., Kerr, M. J., Lanza, M., & Hopkins, D. L. (2009). Analyzing lamb meat particle size: The effect of homogenization speed, a comparison with the myofibrillar fragmentation index, and its relationship with shear force. *Meat Science*, 82(4), 425–431.

Koch, R. M., Swiger, L. A., Chambers, D., & Gregory, K. E. (1963). An evaluation of feed efficiency in beef cattle. *Journal of Animal Science*, 22(2), 486–494.

Light, R. J., & Pillemer, D. B. (1986). *Summing up: The science of reviewing research*. Harvard University Press, p. 15.

Malheiros, J. M., Enriquez-Valencia, C. E., de Vasconcelos Silva, J. A. I., Curi, R. A., de Oliveira, H. N., & de Albuquerque, L. G., Chardulo, L. A. L. (2020). Evaluation of carcass and meat quality traits in Nellore cattle (*Bos taurus indicus*) from breeding programs. *Livestock Science*, 242, 104277.

Manzanilla-Pech, C. I. V., Stephansen, R. B., Difford, G. F., Løvendahl, P., & Lassen, J. (2022). Enhancing feed efficiency in cows as a strategy to reduce methane gas emissions. *Frontiers in Genetics*, 13, 885932.

McDonagh, M. B., Herd, R. M., Richardson, E. C., Oddy, V. H., Archer, J. A., & Arthur, P. F. (2001). Meat quality and the calpain system in feedlot steers after a single generation of divergent selection for residual feed intake. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41(7), 1013–1021.

Menezes, A. C. B., Valadares Filho, S. C., Benedeti, P. D. B., Zanetti, D., Paulino, M. F., Silva, F. F., & Caton, J. S. (2020). Feeding behavior, water intake, and energy and protein needs in young Nellore bulls with varying residual feed intakes. *Journal of Animal Science*, 98(9), skaa279.

Nascimento, M. L., Souza, A. R. D. L., Chaves, A. S., Cesar, A. S. M., Tullio, R. R., Medeiros, S. R., Mourão, G. B., Rosa, A. N., Feijó, G. L. D., Alencar, M. M., & Lanna, D. P. D. (2016). Assessing feed efficiency indices and their links to carcass, non-carcass, and meat quality traits in Nellore steers. *Meat Science*, 116, 78–85.

Nkrumah, J. D., Basarab, J. A., Wang, Z., Li, C., Price, M. A., Okine, E. K., Crews, D. H., & Moore, S. S. (2007). Genetic and phenotypic correlations of feed intake and efficiency metrics with growth and carcass attributes in beef cattle. *Journal of Animal Science*, 85(10), 2711–2720.

OECD & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2023–2032*. OECD.

Pacheco, R. F., Machado, D. S., Restle, J., Sartori, D. B. S., Costa, P. T., & Vaz, R. Z. (2023). A meta-analysis on the meat quality of cattle slaughtered with varying levels of subcutaneous fat thickness. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 58, e03110.

Picard, B., & Gagaoua, M. (2020). An overview of cattle muscle fiber properties and their connections to meat quality attributes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(22), 6021–6039.

Pringle, T. D., Williams, S. E., Lamb, B. S., Johnson, D. D., & West, R. L. (1997). Evaluating carcass characteristics, the calpain protease system, and aged tenderness in Angus and Brahman crossbred steers. *Journal of Animal Science*, 75(11), 2955–2961.

Pulina, G., Acciaro, M., Atzori, A. S., Battacone, G., Crovetto, G. M., Mele, M., Pirlo, G., & Rassu, S. P. G. (2021). Animal board invited review – Innovations for a sustainable and profitable beef industry. *Animal*, 15 (11), 100358.

Richardson, E. C., Herd, R. M., Archer, J. A., & Arthur, P. F. (2004). Metabolic variations in Angus steers selected for different levels of residual feed intake. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44(5), 441–452.

Robinson, D. L., & Oddy, V. H. (2004). Genetic parameters for feed efficiency, fatness, muscle area, and feeding behavior in feedlot-finished beef cattle. *Livestock Production Science*, 90(2–3), 255–270.

Rui, L. (2014). Energy metabolism in the liver. *Comprehensive Physiology*, 4(1), 177–197.

Sauvant, D., Letourneau-Montminy, M. P., Schmidely, P., Boval, M., Loncke, C., & Daniel, J. B. (2020). Review: The use and misuse of meta-analysis in animal science. *Animal*, 14(S2), s207–s222.

Shen, J., Mao, Y., Zhang, Y., & Luo, X. (2012). Protein changes in the Longissimus dorsi muscle of Chinese yellow crossbred bulls due to electrical stimulation. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 11, 2301–2306.

Smith, P. E., Waters, S. M., Kenny, D. A., Kirwan, S. F., Conroy, S., & Kelly, A. K. (2021). The effect of divergence in residual methane emissions on feed intake and efficiency, growth and carcass performance, and indices of rumen fermentation and methane emissions in finishing beef cattle. *Journal of Animal Science*, 99(11), skab275.

Taiwo, G., Idowu, M., Collins, S., Sidney, T., Wilson, M., Pech-Cervantes, A., & Ogunade, I. M. (2022). Chemical group-based metabolome analysis identifies candidate plasma biomarkers associated with residual feed intake in beef steers. *Frontiers in Animal Science*, 2, 783314.

Testa, M. L., Grigioni, G., Panea, B., & Pavan, E. (2021). The role of color and marbling in predicting meat quality perception among Argentinian consumers. *Foods*, 10(7), 1465.

Thompson, S. G., & Sharp, S. J. (1999). Explaining heterogeneity in meta-analysis: A comparison of methods. *Statistics in Medicine*, 18(20), 2693–2708.

Viechtbauer, W. (2005). Bias and efficiency of meta-analytic variance estimators in the random-effects model. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 30(3), 261–293.

Viechtbauer, W. (2010). Conducting meta-analysis in R with the metafor package. *Journal of Statistical Software*, 36(3), 1–48.

Wheeler, T. L., Savell, J. W., Cross, H. R., Lunt, D. K., & Smith, S. B. (1990). Mechanisms associated with variations in tenderness of meat from Brahman and Hereford cattle. *Journal of Animal Science*, 68(12), 4206–4220.

Whipple, G., Koohmaraie, M., Dikeman, M. E., Crouse, J. D., Hunt, M. C., & Klemm, R. D. (1990). Evaluation of attributes affecting longissimus muscle tenderness in *Bos taurus* and *Bos indicus* cattle. *Journal of Animal Science*, 68(9), 2716–2728.

Wright, S. A., Ramos, P., Johnson, D. D., Scheffler, J. M., Elzo, M. A., Mateescu, R. G., Bass, A. L., Carr, C. C., & Scheffler, T. L. (2018). The influence of Brahman genetics on muscle fiber properties, protein degradation, and tenderness in an Angus-Brahman multibreed herd. *Meat Science*, 135, 84–93.

Zorzi, K., Bonilha, S. F. M., Queiroz, A. C., Branco, R. H., Sobrinho, T. L., & Duarte, M. S. (2013). Meat quality in young Nellore bulls with low and high residual feed intake. *Meat Science*, 93(3), 593–599.

Table 1. Effect of classification of *Bos indicus* animals as low residual feed intake on performance, feed efficiency and carcass traits

Item ¹	Medium/High RFI ² Mean (SD)	N ³	Low RFI		Heterogeneity ⁵		Funnel test ⁶
			⁴ WMD _{Random effect} (95%CI)	P- value	I ² (%)	P- value	P-value
Dry matter intake, kg/d	9.14 (1.89)	28	-0.804 (-0.99, -0.62)	<.0001	86.52	<.0001	0.835
FCR, kg/kg	7.25 (1.15)	10	-1.034 (-1.24, -0.82)	<.0001	0.00	0.672	0.449
ADG, kg/d	1.33 (0.37)	31	-0.001 (-0.02, 0.01)	0.911	0.00	0.992	0.696
Body weight final, kg	450.84 (95.72)	26	1.322 (-2.92, 5.57)	0.542	0.00	0.529	0.579
Carcass weight, kg	283.82 (28.06)	10	0.738 (-3.50, 4.97)	0.733	0.00	0.786	0.635
Carcass dressing, %	58.68 (2.89)	10	-0.061 (-0.28, 0.17)	0.596	0.00	0.552	0.227
Ribeye area, cm ²	73.69 (10.15)	14	0.717 (-0.05, 1.48)	0.065	0.00	0.532	0.226
Back fat thickness, mm	5.06 (0.91)	17	-0.119 (-0.23, -0.01)	0.042	16.56	0.259	0.148
Marbling score (SMD) ⁷	--	5	-0.04 (-0.16, 0.07)	0.450	0.00	0.835	0.633

¹FCR = feed conversation ration; ADG = average daily gain; RFI = residual feed intake

²Control treatment.

³N = number of comparisons between control and treatments (Low residual feed intake) (complete data set is available in Supplementary File S1).

⁴WMD = weighted mean differences between control and treatments.

⁵I² = estimated proportion of size effect's total variation due to heterogeneity; P-value to χ^2 (Q) heterogeneity test.

⁶Egger's regression asymmetry test.

⁷SMD = Standard mean difference (SMD Random effect (95%CI)).

Table 2. Meta-regression of covariate effects on the weighted mean difference (WMD) of feed efficiency and carcass traits between *Bos indicus* animals classified as low residual feed intake versus control (medium/high RFI)

Dependent variable (Y, WMD)	Meta-regression parameters (<i>P</i> -value) ¹						Adjusted R ² (%)	N ²
	Age, months	Sex class	Exp. period	RFI group	Estimate EM diet (Mcal/kg DM)	Concentrate in diet (g/kg)		
Dry matter intake, kg	-0.04 (0.937)	0.02 (0.961)	-0.41 (0.328)	-0.59 (0.001)	-0.01 (0.991)	-0.17 (0.757)	75.13	28
Feed conversation ratio, kg/kg	0.58 (0.645)	-0.19 (0.587)	-0.46 (0.686)	-0.43 (0.066)	--	-0.19 (0.906)	100	10
Back fat thickness, mm	-0.68 (0.664)	1.38 (0.356)	1.15 (0.430)	-0.19 (0.251)	0.45 (0.466)	-0.64 (0.321)	0.00	17
Ribeye area, cm ²	0.48 (0.834)	-3.17 (0.481)	0.39 (0.760)	0.486 (0.591)	-0.31 (0.976)	-2.58 (0.226)	0.00	14

¹ Exp.period = experimental period (days); RFI = residual feed intake.

Adjusted R² = proportion of the between-study variance (heterogeneity) explained by the covariate.

²N = number of comparisons between treatment and control (complete data set is available in Supplementary file S1)

Fig. 1 PRISMA flowchart showing the showing the screening strategy used to identify eligible papers to build the dataset of the effects of residual feed intake (RFI) phenotype on performance, nutrient utilization and meat quality traits in Zebu (*Bos indicus*) cattle

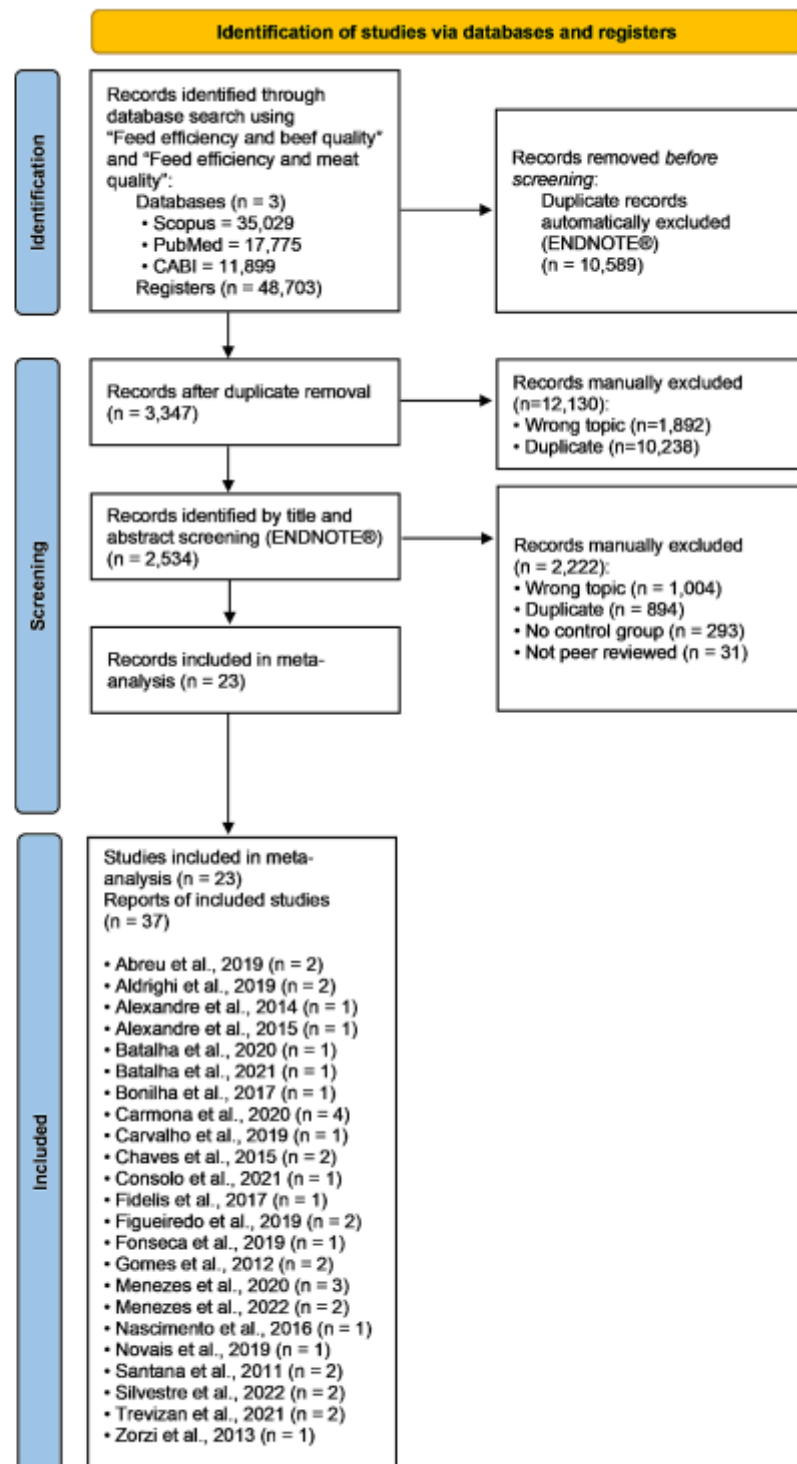


Figure 1. PRISMA flowchart showing the showing the screening strategy used to identify eligible papers to build the dataset of the effects of residual feed intake (RFI) phenotype on performance, nutrient utilization and meat quality traits in Zebu (*Bos indicus*) cattle.

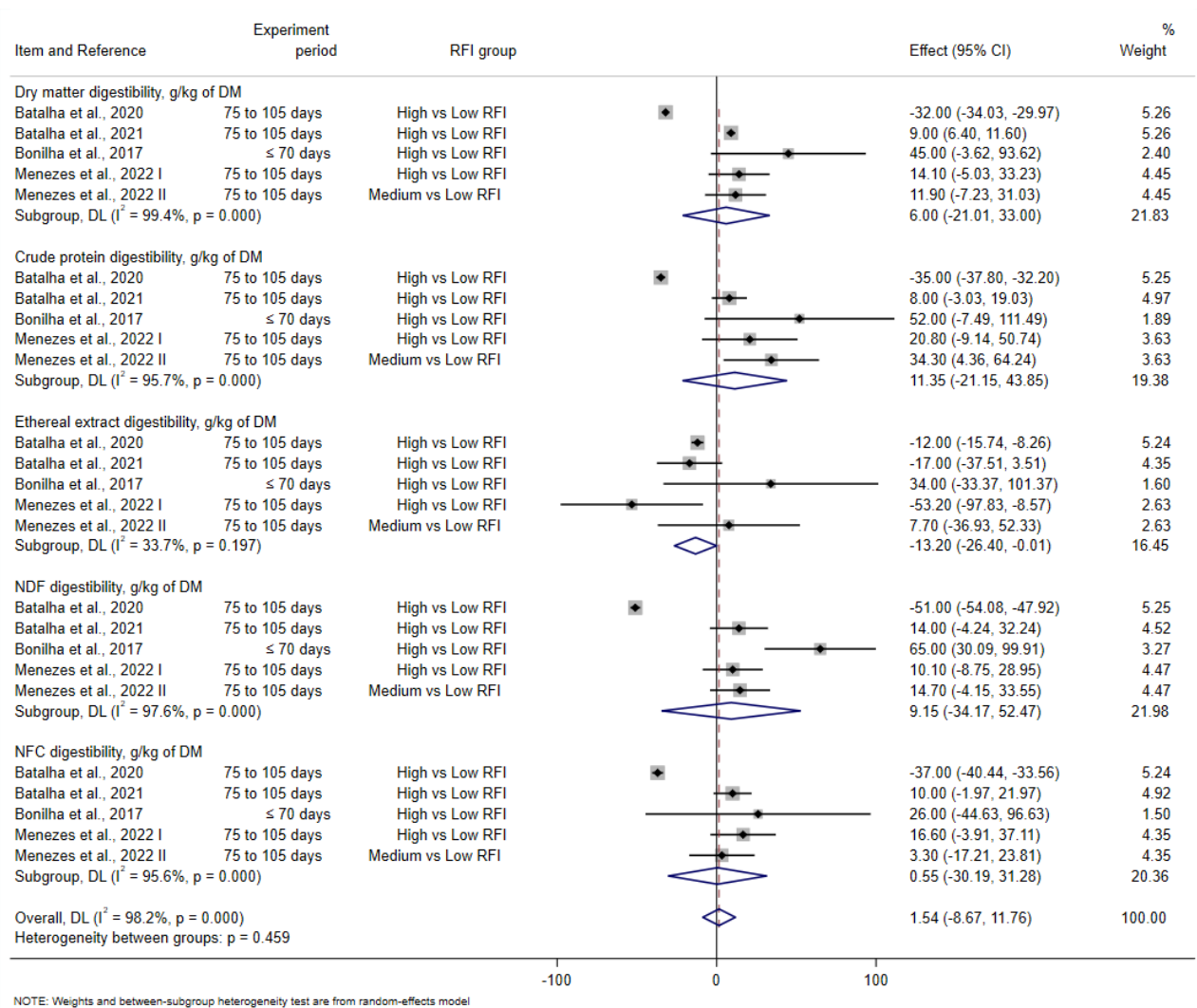


Figure 2. Forest plot showing the effect of efficient animal (low residual feed intake [RFI]) on digestibility (including dry matter [DMd], crude protein [CPd], ether extract [EEd], neutral detergent fiber [NDFd], and non-fiber carbohydrate digestibility [NFCd]). The x-axis shows the weighted mean difference (effect); diamonds to the left of the solid line indicate a reduction in the measure, whereas diamonds to the right of the line indicate an increase. Each diamond represents the mean effect size for that study and the size of the diamond reflects the relative weight of the study for the overall effect size estimate, with larger diamonds indicating a greater weight. The lines connected to the diamond represent the upper and lower 95% confidence interval for the treatment effect. The dotted vertical line represents the overall effect size estimate. The diamond at the bottom represents the mean response across studies and the solid vertical line indicates a mean difference of zero or no effect

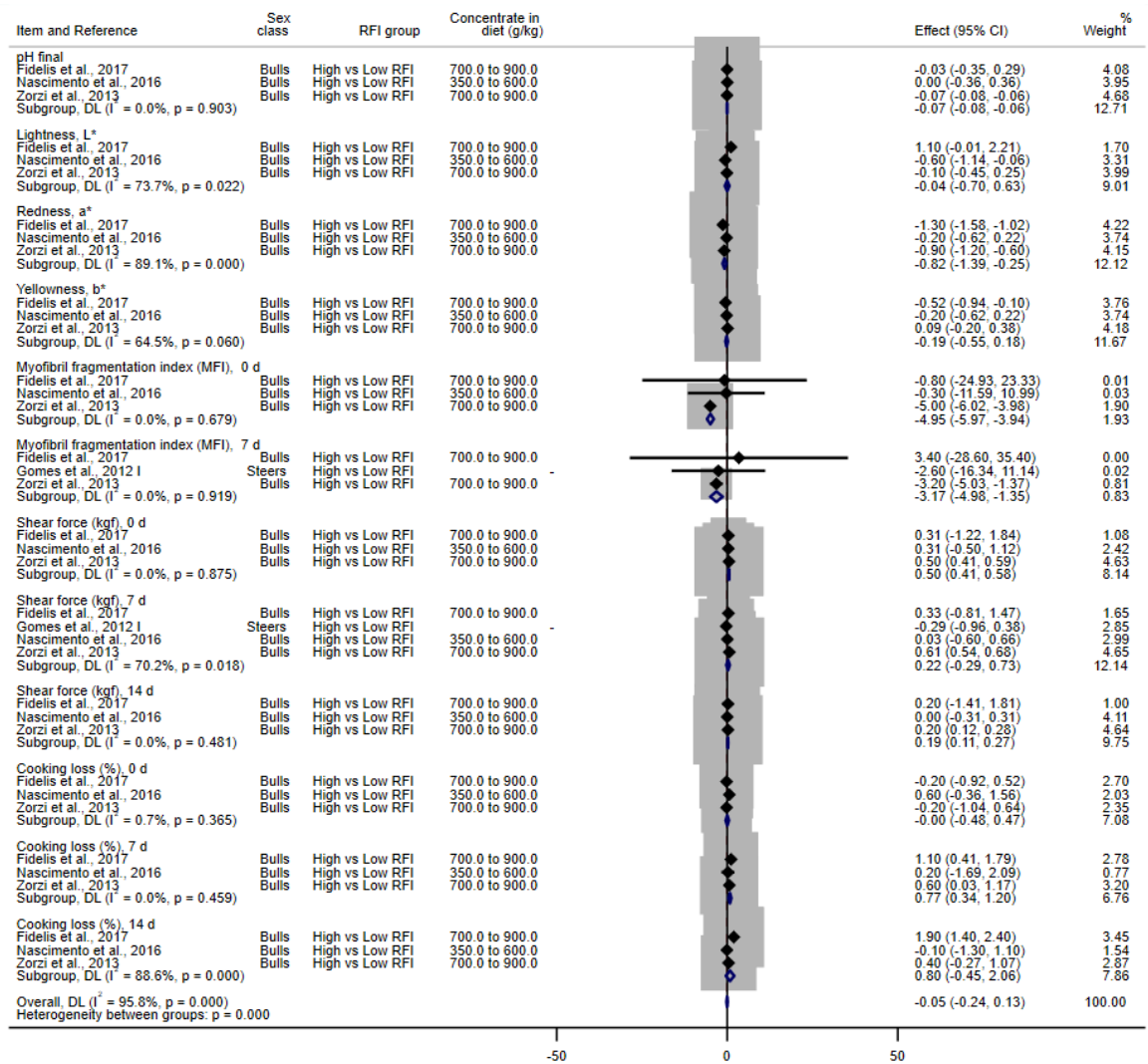


Figure 3. Forest plot showing the effect of efficient animal (low residual feed intake [RFI]) on meat quality. The x-axis shows the weighted mean difference (effect); diamonds to the left of the solid line indicate a reduction in the measure, whereas diamonds to the right of the line indicate an increase. Each diamond represents the mean effect size for that study and the size of the diamond reflects the relative weight of the study for the overall effect size estimate, with larger diamonds indicating a greater weight. The lines connected to the diamond represent the upper and lower 95% confidence interval for the treatment effect. The dotted vertical line represents the overall effect size estimate. The diamond at the bottom represents the mean response across studies and the solid vertical line indicates a mean difference of zero or no effect.

3 CAPÍTULO 3 - Avaliação do consumo alimentar residual sobre as características de carcaça e qualidade de carne de bovinos Nelore: uma abordagem bioquímica, sensorial e molecular

Resumo: O objetivo do estudo foi comparar bovinos Nelore terminados em confinamento e divergentes quanto ao CAR sobre o desempenho, CAR, características de carcaça e qualidade da carne. Um teste de EA foi realizado com 96 bovinos Nelore, com peso vivo inicial de 400 ± 23 e 24 meses de idade, alojados em um curral coletivo equipado com três balanças estáticas conectadas aos bebedouros e treze comedouros eletrônicos, avaliando diariamente o consumo de matéria seca (CMS) e o ganho de peso corporal ao longo de 70 dias. Ao final do teste de EA, os animais foram classificados em baixo CAR (eficientes), médio e alto CAR (ineficientes). Os animais foram abatidos com peso corporal final de 520 ± 31 kg após 120 dias de alimentação. Características de carcaça como peso de carcaça quente (PCQ), AOL, e EGS foram avaliadas. Na desossa, o músculo *Longissimus thoracis et lumborum* (entre as 12^a e 13^a costelas) foi coletado para análises de qualidade da carne, tais como cor (L^* , a^* , b^*), capacidade de retenção de água, perda de cozimento, força de cisalhamento (WBSF), teor de gordura intramuscular (IMF), substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) e índice de fragmentação miofibrilar (MFI) aos 5 e 15 dias post-mortem. Testes sensoriais ($n = 120$ consumidores não treinados) foram realizados para avaliar maciez (MA), sabor (SA), suculência (SU) e aceitação geral (AIG) utilizando amostras maturadas por 15 dias. Além disso, uma análise de lipidômica direcionada foi conduzida comparando os grupos de baixo versus alto CAR. Os dados foram analisados utilizando o procedimento GLM, com o peso vivo inicial como covariável. Efeitos significativos foram considerados em $P < 0,05$, enquanto tendências foram consideradas quando $0,05 \leq P < 0,10$. Animais de baixo CAR ($n=20$), em comparação com os de alto CAR ($n=20$), foram diferentes ($P < 0,05$) em desempenho produtivo, especificamente no CMS ($9,14 \pm 0,64$ versus $10,42 \pm 0,56$ kg/dia; $1,72 \pm 0,01$ versus $1,92 \pm 0,02$ %PV), eficiência alimentar bruta ($0,17 \pm 0,00$ versus $0,15 \pm 0,00$ kg/kg), taxa de conversão alimentar ($6,06 \pm 0,11$ versus $6,74 \pm 0,13$ kg/kg) e CAR ($-1,22 \pm 0,01$ versus $1,33 \pm 0,02$ kg/dia). Diferenças ($P < 0,05$) foram encontradas comparando baixo versus alto CAR para PCQ ($288,02 \pm 5,20$ versus $290,34 \pm 8,58$ kg) e EGS ($4,75 \pm 0,45$ versus $5,61 \pm 0,50$ mm), enquanto uma tendência ($P = 0,078$) de aumento foi verificada sobre a AOL ($86,05 \pm 1,30$ versus $82,91 \pm 1,46$) cm²) e não se evidenciou diferenças ($P > 0,05$) para MAR. Quanto à qualidade da carne, houve redução no MFI ($27,04$ versus $32,15$) e no teor de IMF ($1,43$ versus $1,75\%$) nos bovinos baixo CAR em comparação ao alto CAR ($P < 0,005$) aos 5 dias post-mortem. No entanto, não foram observadas diferenças ($P > 0,05$) na carne em relação ao pH, L^* , a^* , b^* , perda de cozimento, capacidade de retenção de água, perda por gotejamento, WBSF e TBARS. Após 15 dias de maturação, L^* , estabilidade da cor e variáveis de MFI aumentaram ($P < 0,001$), enquanto o pH, a^* , b^* e WBSF ($P < 0,001$) diminuíram. Na análise sensorial, os animais de baixo CAR apresentaram menor SU ($58,91 \pm 1,46$ versus $55,3 \pm 1,48$; $P < 0,05$) e AIG ($58,3 \pm 1,4$

versus $63,6 \pm 1,4$; $P < 0,01$) em comparação com alto CAR. A análise lipidômica identificou 60 moléculas lipídicas que diferiram ($P < 0,05$) entre os grupos de baixo e alto CAR. Esses compostos incluem diglicerídeos (DG), ácidos graxos (AG), fosfatidilcolinas (PC), fosfatidiletanolaminas (PE), esfingomielinas (SM) e triglicerídeos (TG). Regulação positiva dessas classes de lipídios foram identificadas nos animais de baixo CAR em comparação com os de alto CAR, as quais envolveram função mitocondrial, lipídios de armazenamento e glicerofosfoetanolaminas. Em conclusão, a melhor EA em animais de baixo CAR resulta em carcaças mais magras, porém reduz a gordura intramuscular da carne. Diversas mudanças no lipidoma de bovinos Nelore foram identificadas, explicando possíveis vias metabólicas em animais eficientes (baixo CAR) comparados aos ineficientes (alto CAR). Essas mudanças combinadas afetaram negativamente as características físico-químicas e sensoriais de qualidade da carne, particularmente SU e AIG no grupo baixo CAR.

Palavras chave: Consumo alimentar residual, lipidômica, qualidade de carne, eficiência, confinamento.

3.1 INTRODUÇÃO

A EA é um fator essencial para a pecuária de corte, pois permite maximizar ao redor de um 14,5% a rentabilidade, produzindo carne com menor consumo de recursos, reduzindo custos e impactos ambientais (Cruz et al., 2010; Boaithey et al., 2017). A crescente demanda global por carne bovina é um fator importante para o Brasil, sendo o principal exportador pois é responsável por mais do 27% das exportações mundiais e uma produção de quase 11 milhões de toneladas equivalente carcaça (TEC) em 2022 (ABIEC, 2023), isto reforça a necessidade de práticas produtivas cada vez mais eficientes. Nos últimos dez anos, as exportações brasileiras aumentaram em 1,3 milhão de TEC, alcançando 3,02 milhões em 2022 que representou US\$12,96 bilhões (ABIEC, 2023).

Um dos índices de eficiência alimentar (EA) que está sendo a cada vez mais pesquisado é o consumo alimentar residual (CAR), proposto por Koch et al., (1963), que pode ser definido como a diferença entre o consumo real e consumo predito de alimento. Neste contexto, a produção em confinamento no Brasil, que representa em torno de 3% das TEC/ano produzidas (ABIEC, 2022), exige uma melhoria contínua da EA para atender à crescente demanda sem elevar os custos de produção.

O sistema do CAR está sendo cada vez mais impulsionado, gerando um crescente interesse no uso de índices EA, pois a conversão alimentar (CA) durante a fase de terminação em confinamento exerce grande influência sobre o custo de produção (Pulina et al., 2021). No entanto, o uso do CAR como índice de EA pode apresentar algumas desvantagens para a indústria de carne bovina, devido aos impactos negativos sobre a qualidade da carcaça (Moraes et al., 2016; Gomes et al., 2019). Estudos (Bottje and Carstens, 2012; Santana et al., 2012; Herd et al., 2019) demonstraram relação entre CAR e a composição do ganho de peso, destacando que os animais com baixo CAR tendem apresentar carcaças mais magras, com menor gordura de acabamento, menor gordura intramuscular e menor gordura na cavidade abdominal, tal como também verificado em outros estudos com bovinos Nelore (Santana et al., 2012; Chaves et al., 2015; Nascimento et al., 2016). Como resultado, bovinos eficientes (baixo CAR) podem

produzir carne de pior qualidade, impactando negativamente na experiência sensorial dos consumidores, particularmente devido ao menor teor de gordura intramuscular, conforme descrito na literatura (Jiu et al., 2019). Entretanto, ainda não foram realizados estudos que avaliaram, simultaneamente bovinos com diferentes CAR no confinamento, levando em conta características de carcaça e qualidade da carne (por análises objetivas e sensoriais).

Nesse contexto, compreender a utilização dos nutrientes pelos bovinos pode fornecer explicações sobre a regulação da EA em animais divergentes quanto ao CAR. As análises moleculares são ferramentas valiosas que permitem a compreensão mais profunda de como as variações no CAR podem estar relacionadas ao metabolismo energético (Karisa et al., 2014; Clemmons et al., 2017; Consolo et al., 2021). Até o momento, destaca-se um único estudo exploratório que associa características de qualidade da carne de bovinos Nelore com o perfil do lipidoma e metaboloma (Antonelo et al., 2022^b). As descobertas evidenciam que existe uma menor atividade glicolítica e modificação na biossíntese de certos fosfolipídios (Antonelo et al., 2022^a). Esses resultados reforçam o potencial das análises de lipidômica na explicação das possíveis diferenças da EA.

Entretanto, não existem estudos de animais Nelore em confinamentos divergentes ao CAR associados a análises de lipidômica. Assim, o objetivo deste estudo foi comparar bovinos Nelore confinados divergentes para o CAR quanto às características de desempenho, EA, qualidade da carcaça e carne (análises objetivas e sensoriais). Ademais, objetivou-se aplicar uma abordagem lipidômica para identificar as alterações no perfil lipídico dos animais divergentes do CAR. A hipótese deste estudo é que animais eficientes (baixo CAR) podem ter pior qualidade da carne comparados aos ineficientes (alto CAR), refletindo nos aspectos sensoriais avaliados pelo consumidor, resultados que podem ter relação com o perfil lipídico entre os grupos de CAR.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Todos os procedimentos com animais e amostras biológicas foram aprovados pela Comissão de Ética no Uso de Animais (CEUA) da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia – FMVZ UNESP Botucatu (Protocolo nº 0109/2022).

3.2.1 Animais e teste alimentar

A fase de campo foi conduzida nas instalações da fazenda HoRa® – Hofig Ramos localizada no município de Brasilândia, Mato Grosso do Sul. Foram utilizados 96 bovinos Nelore (*Bos indicus*), machos não castrados, com peso inicial médio de $362,45 \pm 25,6$ kg, recriados a pasto e submetidos à terminação em confinamento por 21 dias de adaptação e 70 dias de coleta, com uma dieta composta de milho grão moído, silagem de milho, torta de algodão, farelo de soja e outras frações (Tabela 1).

Tabela 1. Composição da dieta experimental (em base na MS).

Item*	Valor
Ingrediente, % da MS	
Silagem de milho	15.00
Milho grão moído	69.60
Torta de algodão	8.50
Farelo de soja	2.50
Cloreto de potássio	0.40
Núcleo mineral e vitamínico	3.00
Composição química (%) ¹	
Matéria Seca	70.04
Proteína Bruta	14.06
Extrato Etéreo	5.12
FDNfe ¹	14.26
NDT ²	79.17

¹ FDNfe = Fibra em detergente neutro fisicamente efetiva;

² NDT = Nutrientes digestíveis totais, estimado pelo RLM;

Dieta formulada pelo Sistema RLM 3.3 (Lanna et al., 2011; Andrade et al., 2023).

Os bovinos foram alojados em uma baia coletiva com capacidade para 120 animais, equipada com três balanças estáticas acopladas aos bebedouros e treze cochos eletrônicos da Intergado® (Figura 1). Os cochos eletrônicos coletaram os dados de consumo alimentar. Esses equipamentos possuem comedouros apoiados sobre células de carga e, em conjunto com sensores e coletores inteligentes, possibilitaram o registro eletrônico do alimento consumido por cada animal, permitindo o acompanhamento da EA dos bovinos. As balanças estáticas coletaram os pesos toda vez que o animal foi beber água, sendo disponibilizados de forma individual por animal e em tempo real no sistema.



Figura 1. Cochos para mensurar o consumo alimentar individual (Intergado®).

Os animais foram alimentados com uma dieta única durante o período de confinamento. As dietas foram fornecidas duas vezes ao dia em horários fixos, de manhã (às 9h) e à tarde (às 15h). O ajuste do fornecimento da dieta foi através das sobras, diariamente por meio da leitura do cocho. O teste de desempenho consistiu em 70 dias de coleta ininterrupta de dados para avaliar as características de crescimento e EA (Figura 2). O critério adotado para o abate foi aos 120 dias em total de confinamento e 530 kg PV, sendo todos os animais abatidos no mesmo dia.

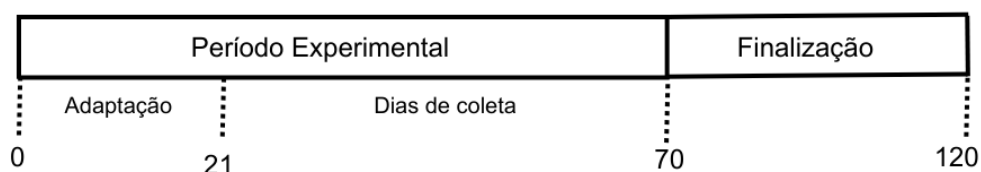


Figura 2. Período de experimento.

O CAR foi calculado entre a diferença de consumo de matéria seca predito (CMSp) e consumo de matéria seca observado (CMSo) seguindo o erro da equação (Fidelis et al., 2017):

$$\text{CMS} = \beta_0 + \beta_P * \text{PV}^{0,75} + \beta_G * \text{GMD} + \varepsilon(\text{CAR})$$

onde CMS representa o consumo observado, β_0 o intercepto da equação, $\text{PV}^{0,75}$ o peso vivo médio metabólico, o ganho médio diário de peso (GMD), e β_P e β_G os coeficientes de regressão para $\text{PV}^{0,75}$ e GMD, respectivamente. O $\text{PV}^{0,75}$ foi determinado utilizando o GMD estimado por regressão até a metade do teste e o peso inicial, $\text{PV}^{0,75} = (\text{Peso inicial} + \text{GMD} * (\text{dias em teste} / 2))^{0,75}$. A conversão alimentar (CA) foi determinada da razão de CMS entre o GMD e a eficiência alimentar (EA) foi obtida pelo inverso desta relação. Ao final do teste de desempenho, os animais foram classificados em baixo CAR (eficientes), médio e alto CAR (ineficientes).

O ultrassom da carcaça foi realizado para determinar a espessura da gordura subcutânea (EGS, mm) e a área do olho de lombo (AOL, cm^2) e marmoreio (MAR,%) utilizando uma máquina de ultrassom veterinária, Piemedical—Scanner 200, com uma sonda linear (ASP-18) e uma frequência de 3,5 MHz. A AOL; cm^2 e EGS; mm, foi determinada usando o software automatizado Beef Image Analysis – DGT, Brasil. As imagens foram tomadas entre a 12ª e 13ª costelas, transversais ao *Longissimus thoracis et lumborum*. Óleo vegetal foi utilizado como agente de acoplamento acústico em todas as avaliações

Ao final do período experimental os animais foram transportados para abate em frigorífico comercial (Marfrig, Bataguassu – Mato Grosso do Sul, Brasil). É

submetido ao sistema de inspeção federal conforme procedimentos humanitários exigidos pelo Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal - RIISPOA (normativa 003, BRASIL, 2000). Os animais foram abatidos pela técnica de concussão cerebral e corte da veia jugular, seguido de retirada do couro e evisceração.

3.2.2 Características de carcaça e coleta de amostras

O rendimento de carcaça (RC) foi calculado pela razão entre o peso da carcaça quente (PCQ) e o peso vivo (PV) do animal em jejum no pré-abate. Na desossa (24h após o abate) foram colhidas amostras de carne (músculo *Longissimus thoracis et lumborum*) da meia carcaça esquerda de todos os animais entre a 12^a e 13^a vértebras para a realização das análises de qualidade de carne.

3.2.3 Análises laboratoriais de qualidade de carne

No Laboratório de Ciência da Carne (FMVZ UNESP Botucatu), as amostras de carne coletadas foram novamente identificadas, separadas em bifes de 2,54 cm de espessura e submetidas a maturação por 5 e 15 dias. Todos os bifes foram embalados à vácuo, sendo a maturação conduzida à temperatura de 0 a 2 °C em expositor Biochemical Oxygen Demand – BOD (modelo TE – 371, TECNAL, Piracicaba, São Paulo, Brazil) utilizando sacos plásticos para alto vácuo e baixa permeabilidade ao oxigênio.

O pH da carne foi medido após o período de maturação. Os bifes foram desembalados e, em seguida, o pH foi determinado usando um medidor digital Hanna (Modelo HI 99163, Hanna Instruments, Woonsocket, Rhode Island, EUA) equipado com um eletrodo de penetração. Tampões padrões (pH 4.0 e 7.0) foram usados nos procedimentos de calibração.

3.2.4 Coloração instrumental da carne

Após 30 minutos de exposição da amostra sob refrigeração de 2 a 5 °C, foram feitas três medidas em diferentes regiões do bife. O colorímetro foi calibrado utilizando uma placa para o padrão preto e branco. A coloração da carne (L^* - luminosidade; a^* - coloração vermelha; b^* - coloração amarela) foi mensurada a partir do sistema CIELAB utilizando um colorímetro KONICA MINOLTA - CR 400 (Konica Minolta Sensing, Inc., Tokyo, Japão), com padrão de fonte de luz D65, ângulo de observação de 10°, abertura de 5.0 cm e display Y: 0.01 a 160% de reflectância.

3.2.5 Capacidade de retenção de água (CRA)

O CRA foi determinado pela porcentagem de perda de água por pressão, conforme descrito por Barbut (1996). Uma amostra de carne de 500 ± 20 mg, cortada no sentido transversal das fibras, foi colocada sobre um papel filtro e submetida a um peso de 10 kg por 5 minutos. Posteriormente, as amostras foram pesadas, calculando-se a quantidade de água perdida. Os resultados foram expressos em porcentagem de água retida em relação ao peso inicial da amostra.

3.2.6 Perdas por cocção e maciez instrumental

Para avaliar as perdas por cocção (PPC) e a maciez instrumental (força de cisalhamento-WBSF), seguiu-se o procedimento descrito por Shackelford et al., (1999) e as recomendações da American Meat Science Association (2015) e Wheeler et al., (1996). As amostras foram colocadas sobre uma grade dentro de um refratário de vidro. A temperatura interna de cada amostra foi monitorada usando um termopar conectado a um termômetro digital (DT-612, ATP Instrumentation, Ashby-de-la-Zouch, Inglaterra), inserido no centro das amostras.

As amostras foram cozidas em um forno elétrico industrial (Feri90 Venâncio, Venâncio Aires, Rio Grande do Sul, Brasil), pré-aquecido a 170 °C e equipado com um termostato para controlar as variações de temperatura. Quando a temperatura interna dos bifes atingiu 70 °C, eles foram virados e deixados no forno até atingirem uma temperatura final de 71 °C. Após o cozimento, as amostras foram deixadas

em temperatura ambiente por 15 minutos, pesadas e depois refrigeradas a 4 °C por 24 horas. A perda por cocção foi dividida em perda por evaporação (PEVP) e perda por gotejamento (PGOT), ambas expressas em porcentagem. A PGOT foi calculada pela diferença de peso do refratário antes e após o cozimento, enquanto a PEVP foi obtida comparando o peso das amostras antes e após o cozimento.

Para medir a força de cisalhamento de Warner-Bratzler (WBSF), foram seccionados oito cilindros de 1,27 cm de diâmetro usando um analisador de textura Brookfield CT-3 (AMETEK Brookfield, Middleborough, Massachusetts, Estados Unidos) equipado com uma lâmina Warner-Bratzler de aço inoxidável, com espessura de 3,07 mm e borda de corte em formato de V (ângulo de 60°). Os resultados foram expressos como a média de seis medições por amostra, em quilogramas (kgf).

3.2.7. Determinação do teor de gordura intramuscular

A determinação do teor de gordura intramuscular (IMF) foi realizada seguindo o método descrito por Bligh & Dyer (1959) através de uma extração a frio utilizando clorofórmio e metanol extraíndo lipídeos polares e apolares, utilizando aproximadamente 3.0 g de amostra.

As amostras de 3 g de músculo foram misturadas e homogeneizadas com uma solução de clorofórmio/metanol (2:1) por 2 minutos, seguidas por centrifugação a $700 \times g$ por 10 minutos a 20°C, resultando na separação das fases hidrofílica (superior), sólida (média) e hidrofóbica (inferior). Na filtração a fase hidrofóbica obtida após a centrifugação foi filtrada usando um papel de filtro com leve sucção, e o filtrado foi transferido para um frasco rotulado como fase lipídica. Após um tempo de repouso, pelo menos 5 mm do filtrado foram transferidos para um béquer previamente pesado. Na homogeneização as alíquotas de 100 g da amostra foram homogeneizadas por 2 minutos com clorofórmio e metanol, seguidas pela adição de água destilada e nova mistura. O homogeneizado foi filtrado e o filtrado transferido para um cilindro graduado, onde foi deixado em repouso para separação. Na extração de lipídios, a fase de clorofórmio, contendo os lipídios, foi recolhida, e o resíduo foi misturado com mais clorofórmio para

garantir a extração completa. A mistura foi filtrada novamente e combinada com o filtrado original. Na secagem e pesagem as amostras foram secas em estufa, resfriadas em dessecador por 24 horas e, em seguida, pesadas novamente para determinar o teor de lipídios, com base na diferença entre o peso inicial e final do béquer.

3.2.8 Oxidação lipídica (TBARS)

Para medir os produtos de oxidação lipídica, o método de Substâncias Reativas ao Ácido Tiobarbitúrico (TBARS) foi utilizado conforme descrito por Pikul et al., (1989). Cinco gramas de amostra de carne foram pesados e 20 mL de ácido tricloroacético (7,5%) foram adicionados, seguidos de homogeneização por dois minutos. As amostras foram filtradas e 5 mL do filtrado foram adicionados a tubos de ensaio contendo 5 mL de solução de ácido tiobarbitúrico (0,02 M). Os tubos foram colocados em banho-maria a 98°C por 40 minutos. A concentração de MDA (malonaldeído) foi determinada por espectrofotometria (Modelo Spectrum-2000UV, Thermo Fisher, Massachusetts, Estados Unidos) através da absorbância a 540 nm. A concentração de malonaldeído foi calculada utilizando uma curva padrão de 1,3,3-tetrametoxipropano (0-60 µM), e os resultados foram expressos em mg de MDA por kg de carne.

3.2.7 Índice de fragmentação miofibrilar (MFI)

O índice de fragmentação miofibrilar (MFI) foi obtido pelo método descrito por Culler et al. (1978). Foram utilizados 3 g de amostra de músculo de cada animal avaliado. As amostras foram homogeneizadas duas vezes por 30 s em Ultra-turrax com haste de cisalhamento (Marconi-MA102/E, Equipamentos para Laboratórios, Piracicaba, São Paulo, Brazil), a 18.000 rpm, em 30 ml de tampão de índice de fragmentação miofibrilar a 2 °C (100 mM KCl, 20 mM fosfato de potássio, 1 mM EDTA, 1 mM MgCl₂, 1 mM NaN₃, pH 7,0), com 30 s em gelo entre a primeira e a segunda homogeneização. Após a homogeneização, as amostras foram centrifugadas a 1000× g por 15 min a 2 °C, e o sobrenadante foi descartado. Os pellets foram suspensos em 30 ml de tampão MFI a 2 °C e homogeneizados com bastão de vidro, centrifugados e os sobrenadantes foram descartados. Os pellets

foram suspensos novamente em 7,5 ml de tampão MFI a 2 °C, submetidos ao vórtice até que as amostras se tornassem bastante homogêneas e filtradas em um filtro de polietileno com malha de aproximadamente 1 mm (Titan2 HPLC filter white – Thermo Fisher Scientific, Santa Clara, California, Estados Unidos). Um total de 7,5 ml de TMFI a 2 °C foram adicionados ao conteúdo filtrado para lavar o tubo de centrífuga e auxiliar na filtração.

O método Macro Biuret (Gornall et al., 1949) foi usado para quantificar proteínas miofibrilares. As amostras foram homogeneizadas por agitação vigorosa e então as leituras de absorbância foram feitas em comprimento de onda de 540 nm em um espectrofotômetro. Na determinação de MFI, amostras foram preparadas com tampão MFI para um volume final de 8 ml e concentração de proteína de 0,5 mg/ml. As amostras foram homogeneizadas por agitação vigorosa e então lidas em comprimento de onda de 540 nm em um espectrofotômetro. O espectrofotômetro foi calibrado tendo a solução de tampão MFI como branco. O valor de MFI foi obtido pelo seguinte cálculo: $MFI = Absorbância \times 200$.

3.2.8 Análise sensorial

Para a análise sensorial, consumidores não treinados atribuíram pontuações de 0 a 100 em escalas hedônicas não estruturadas às seguintes características de qualidade da carne usando o software Sensory Meat v.1.6 (Brazil Beef Quality Ltd., Piracicaba, São Paulo, Brazil): maciez (MA), sabor (SA), suculência (SU) e aceitação geral (AIG), que foi baseada no protocolo MSA, conforme descrito (Watson et al., 2008). Para participação, os consumidores foram determinados como tendo entre 18 e 70 anos de idade, consumindo carne pelo menos uma vez por semana e preferindo carne malpassada. Para este estudo, foram utilizados os grupos experimentais baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes).

Cento e vinte consumidores foram utilizados para o experimento, com dez sessões compreendendo doze consumidores divididos em dois grupos (A e B) de seis consumidores cada grupo, que receberam 6 amostras. O grupo A foi uma repetição de B para aumentar a estimativa da variância do erro. Os consumidores

receberam sete amostras, sendo a primeira degustação utilizada como amostra de referência (benchmark padronizado). Para tanto, uma das amostras testadas foi selecionada aleatoriamente em cada sessão. Após terem provado as amostras de referência, os consumidores analisaram as seis amostras subsequentes três de animais classificados como baixo CAR e três de animais classificados como alto CAR, totalizando seis amostras por consumidor.

3.2.11. Monitoramento de Reação Múltipla (MRM)-perfil

O monitoramento de reação múltipla foi analisado no laboratório de Espectrometria de Massa de Amostras Biológicas no Bindley Bioscience Center, na Purdue University. O perfil lipídico direcionado foi realizado usando métodos de MRM-descoberta e instrumentação, conforme revisado recentemente por Xie et al. (2021). Especificamente, os extratos lipídicos secos foram reconstituídos em 400 µL de metanol e 10 µL de clorofórmio para obter uma solução estoque. Uma amostra de 1 µL da solução estoque foi diluída 300 vezes no solvente de injeção (acetonitrila/metanol/300 mM de acetato de amônio 3:6,65:0,35 [v/v/v]) e adicionada com o padrão interno quantitativo para espectrometria de massa EquiSPLASH™ LIPIDOMIX® (0,1 ng/µL).

As amostras foram injetadas através de um micro-autossampler (G1377A) do espectrômetro de massa triplo quadrupolo Agilent 6410 (Agilent Technologies, San Jose, California, Estados Unidos), equipado com uma fonte de íons ESI. O solvente bombeado entre as injeções (CapPump G1376A, Agilent Technologies, San Jose, California, Estados Unidos) foi acetonitrila com 1% de ácido fórmico a 10 µL/min. A voltagem capilar do instrumento era de 4 kV, e o fluxo de gás de 5,1 L/min a 300 °C. Entre as injeções de amostras, metanol puro (lavagem) foi injetado para remover quaisquer lipídeos restantes antes da próxima injeção. Além disso, após cada 5 injeções de amostras, uma amostra de controle de qualidade contendo apenas os padrões lipídicos (EquiSPLASH® LIPIDOMIX® Mass Spec Standard) a 50 ng/µl foi injetada para monitorar o desempenho do instrumento. O método de perfil de MRM foi utilizado para analisar 3727 MRMs relacionados a lipídeos para análise de descoberta, de 11 classes de lipídeos. O conjunto de MRM incluía 147 fosfatidiletanolaminas (PE), 84 acilcarnitinas (AC), 136 ésteres de

colesterol (CE), 180 fosfatidilcolina (PC), 27 esfingomielina (SM), 142 fosfatidilinositóis (PI), 141 fosfatidilgliceróis (PG), 140 fosfatidilserinas (PS), 178 ácidos graxos (AG), 164 ceramidas (CER), 1928 triacilglicerídios (TG) e 487 lipídeos difosfato de glicerol (DG).

3.2.12. Análise de Lipidoma

Um total de 3727 MRMs foram normalizados considerando intensidades de íons >1,3 vezes a intensidade de íons dos brancos dentro de cada classe. As intensidades relativas dos íons foram calculadas para cada MRM dividindo sua intensidade de íons pela soma de todas as intensidades de íons em cada amostra. As intensidades relativas dos íons foram carregadas no Metaboanalyst 5.0 (<https://www.metaboanalyst.ca/>) (Chong, Wishart, & Xia, 2019).

3.2.13. Análise estatística

Todas as análises foram realizadas utilizando o software R versão 3.6.2. Os resultados de desempenho, características de carcaça e qualidade da carne foram analisados quanto à presença de outliers, homogeneidade de variâncias e normalidade dos resíduos, utilizando os testes de Shapiro-Wilk e Breusch-Pagan para homoscedasticidade. A análise estatística foi realizada por meio de modelos lineares generalizados, adequados para variáveis que não foram transformadas, considerando a distribuição gama dos dados. A escolha desse modelo, utilizando o pacote estatístico lme4 no R, foi feita devido à não conformidade dos resíduos com a distribuição normal. Ao invés de assumir uma distribuição normal, optou-se pela distribuição gama, mais apropriada para a natureza dos dados não normais. Os dados foram expressos como médias e seus respectivos erros.

As características CA, PCQ, RC, EVP e PPC não atenderam ao teste de normalidade, e não foi possível transformá-las. Já as características PGOT, TBARS, IMF e MFI também não apresentaram normalidade, mas foram transformadas utilizando o método Box-Cox. As diferenças entre as características de eficiência alimentar (EA), qualidade de carcaça e carne, bem como suas interações, foram analisadas por meio de análise de variância (ANOVA) e, quando diferenças significativas foram detectadas, as médias foram comparadas pelo

teste de Tukey. Diferenças com $P < 0,05$ foram consideradas significativas, e tendências foram observadas quando $0,05 \leq P < 0,10$. Foram considerados 20 animais para o grupo de baixo CAR e 20 animais para o grupo de alto CAR. As interações entre o grupo CAR e as características de desempenho foram testadas conforme o seguinte modelo:

$$\text{Característica(Desempenho)} = \mu + \text{Peso inicial (covariável)} + \text{CAR} + \varepsilon$$

As interações entre o grupo CAR e as características de carcaça seguiram o modelo:

$$\text{Característica (Carcaça)} = \mu + \text{Peso inicial (covariável)} + \text{CAR} + \varepsilon$$

Para a qualidade da carne, o modelo incluiu:

$$\begin{aligned} &\text{Característica (Qualidade da carne)} \\ &= \mu + \text{Peso inicial (covariável)} + \text{CAR} + \text{Tempo} + \text{CAR} + \varepsilon \end{aligned}$$

Na análise sensorial, foi adotado o método Clipped (Bonny et al., 2016), em que os dois valores mais altos e os dois mais baixos de cada sessão para cada característica avaliada foram eliminados. Para as variáveis de maciez, sabor, suculência e aceitação geral, o modelo incluiu a sequência (ordem de degustação), o fator (baixo CAR e alto CAR) como efeitos fixos, e o consumidor como efeito aleatório. O teste de Tukey foi utilizado para comparação de médias ($p \leq 0,05$). As interações para grupo CAR foram analisadas pelo modelo:

$$\begin{aligned} &\text{Característica (Sensorial da qualidade da carne)} \\ &= \mu + \text{Consumidor} + \text{Sequência} + \text{CAR} + \varepsilon. \end{aligned}$$

Na análise de lipidômica, os dados de intensidade relativa dos íons foram normalizados por escalonamento automático, e a análise estatística foi realizada utilizando o teste t de Student, com diferenças estatisticamente significativas para

$P \leq 0,05$. A análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA) foi aplicada, e os mapas de calor foram gerados utilizando os lipídios diferencialmente abundantes. O método de Ward foi empregado para agrupar as amostras. A análise quantitativa de enriquecimento foi realizada utilizando o modo de classificação Lion/Web (Molenaar et al., 2019), com base nos valores de P do teste t de duas amostras de Welch (Kolmogorov-Smirnov), comparando os grupos de baixo CAR com alto CAR.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Características de desempenho e carcaça

Observou-se que o CAR variou de -1.22 kg/dia a 1.33 kg/dia, uma amplitude de 2.55 kg/dia, indicando que existe uma diferença no CMS entre os grupos do baixo CAR e alto CAR. Dados de desempenho, EA, e características de carcaça foram descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Média, desvio padrão, mínimo e máximo das principais características de desempenho e carcaça de bovinos Nelore em confinamento.

Característica	Media	DP	Mínimo	Máximo
N= 96				
Características de desempenho				
Peso vivo inicial, kg	362.45	27.06	308.20	422.14
Peso vivo final, kg	535.74	29.39	478.10	600.14
GMD, kg/dia	1.44	1.18	0.97	1.93
CMS, kg/dia	9.87	0.74	7.90	11.88
CMS, % PV ¹	1.82	0.22	1.70	1.98
CA ²	6.85	0.48	5.46	7.50
EA ³	0.15	0.01	0.13	0,18
CAR ⁴	0.00	0.43	-1.22	1.33
Características de carcaça				
RC ⁵ , %	54.41	2.95	31.86	57.17
PCQ ⁶	293.04	25.17	157.40	351.60
AOL ⁷ , cm ²	85.51	6.90	72.00	107.72

EGS ⁸ , mm	5.18	1.15	2.82	8.94
MAR ⁹ , %	2.09	0.48	1.14	2.89

¹Peso vivo; ²Conversão alimentar - kg de matéria seca consumida/kg de ganho; ³ Eficiência alimentar- kg de ganho/kg de matéria seca consumida; ⁴Consumo alimentar residual; ⁵Rendimento de carcaça%, ⁶Peso de carcaça quente, ⁷Area de olho de lombo, cm², ⁸Espessura de gordura subcutânea, mm, ⁹ Marmoreio %.

A relação entre o CMS predito e o CMS observado apresentou um coeficiente de determinação de $R^2 = 0.6527$ (Figura 3).

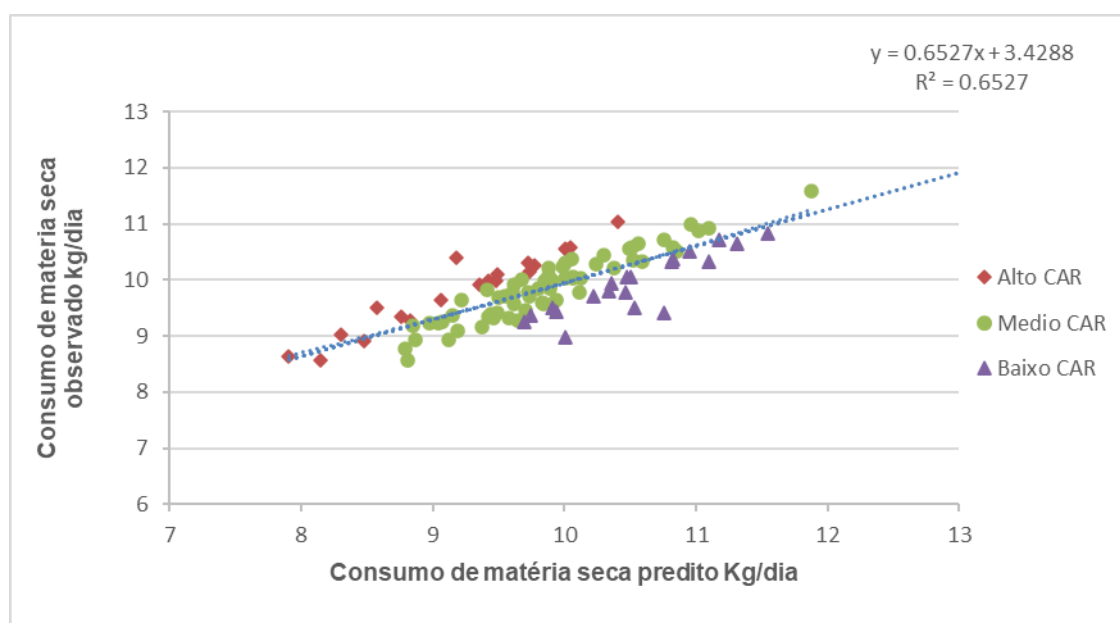


Figura 3. Relação entre consumo predito e observado de matéria seca de bovinos Nelore em confinamento (N=96).

Animais classificados como baixo CAR (eficientes) apresentaram CMS 14.00 % menor (em kg/dia) em comparação ao grupo de alto CAR (ineficientes) ($P < 0.005$; Tabela 3). O CMS expresso em %PV também foi menor nos animais de baixo CAR versus alto CAR ($P < 0.001$). Assim, como esperado, os índices EA e CA foram superiores nos animais de baixo CAR quando comparados aos de alto CAR ($P < 0.005$).

Tabela 3. Características de desempenho e carcaça de bovinos Nelore terminados em confinamento classificados como eficientes (baixo CAR) e ineficientes (alto CAR).

Características*	Eficientes (baixo CAR)	Ineficientes (alto CAR)	P-valor
Desempenho			
PV inicial, kg	317.70 (7.47)	319.23(6.05)	0.426
PV final ³	531.20 (6.59)	544.21 (7.39)	0.346
CMS, kg/dia	9.14 (0.64)	10.42 (0.56)	< 0.005
GMD, kg/dia	1.43 (0.04)	1.44 (0.04)	0.866
CMS, %PV	1.72 (0.01)	1.92 (0.02)	< 0.001
EA ¹ , kg/kg	0.17 (0.00)	0.15 (0.00)	< 0.005
CA ² , kg/kg	6.06 (0.11)	6.79 (0.13)	< 0.005
CAR, kg/dia	-1.22 (0.01)	1.33 (0.02)	< 0.005
Carcaça			
RC ⁴ , %	54.44 (1.20)	53.23 (1.65)	<0.050
PCQ ⁵	288.02 (5.20)	290.39 (8.58)	<0.010
AOL ⁶ , cm ²	86.05 (1.30)	82.54 (1.46)	0.078
EGS ⁷ , mm	4.75 (0.45)	5.61 (0.50)	<0.050
MAR ⁸ , %	2.06 (0.10)	2.13 (0.11)	0.261

* Média (erro padrão da média)

¹ Eficiência alimentar-kg de ganho/kg de matéria seca consumida, ² Conversão alimentar- kg de matéria seca consumida/kg de ganho, ³ Peso vivo, ⁴ Rendimento de carcaça %, ⁵ Peso de carcaça quente, ⁶ Área de olho-de-lombo cm², ⁷ Espessura de gordura subcutânea, mm, ⁸ Marmoreio %.

Tendência de maior AOL foi observada na carcaça dos animais de baixo CAR comparado com os animais de alto CAR (ineficientes) ($P=0.078$). A EGS e o PCQ foram menores na carcaça dos animais de baixo CAR comparado com os animais de alto CAR (ineficientes) ($P<0.05$; Tabela 3). Por outro lado, o RC foi maior nos animais de baixo CAR versus alto CAR ($P<0.05$). Enquanto o MAR não apresentou diferenças entre os grupos ($P=0.261$).

3.3.2. Características de qualidade de carne

Diferenças foram observadas com relação ao MFI e IMF nos animais com baixo CAR versus alto CAR ($P<0.005$). No entanto, não se observou diferenças (P

>0.05) nas variáveis pH, L^* , a^* , b^* , PPC, PEVP, PGOT, CRA, WBSF e TBARS (Tabela 4).

Tabela 4. Características laboratoriais de qualidade de carne de amostras maturadas por 5 dias e maturadas por 15 dias de bovinos Nelore terminados em confinamento classificados como eficientes (baixo CAR) e ineficientes (alto CAR).

Variáveis	5 dias de maturação		15 dias de maturação		P-valor	
	Eficientes (baixo CAR)	Ineficientes (alto CAR)	Eficientes (baixo CAR)	Ineficientes (alto CAR)	CAR	Maturação
<i>Análises físicas de qualidade de carne</i>						
pH	5.74 (0.14)	5.73 (0.15)	5.61 (0.11)	5.6 (0.11)	0.400	<0.001
L^*	38.26 (0.83)	36.18(0.68)	41.82 (0.53)	39.97 (0.48)	0.007	<0.001
a^*	17.93 (0.48)	17.61(0.53)	10.51 (0.46)	10.40 (0.47)	0.603	<0.001
b^*	9.48 (0.36)	9.43 (0.40)	8.94 (0.25)	8.63 (0.22)	0.462	0.041
Perdas por cocção, PPC %	28.71 (0.70)	25.74(0.79)	26.45 (0.81)	27.19 (2.44)	0.425	0.770
Perdas por evaporação PEVP, %	23.69 (0.78)	20.55(0.81)	23.44 (0.83)	23.99 (2.49)	0.356	0.267
Perdas por gotejamento, PGOT %	5.42 (1.25)	4.67 (1.06)	7.26 (1.99)	6.36 (1.99)	0.022	<0.001
Capacidade de retenção de água, CRA %	62.57 (0.80)	62.95(0.86)	68.84 (0.55)	69.26 (0.71)	0.097	<0.001
Força de cisalhamento, WBSF, kg	7.61 (0.24)	6.93 (0,25)	5.20 (0.25)	5.10 (0.24)	0.122	<0.001
Índice de fragmentação miofibrilar, MFI	27.04 (2.63)	32.15(3.53)	53.01 (4.84)	68.30 (6.32)	0.005	<0.001

L^* - luminosidade; a^* - intensidade da cor vermelha; b^* - intensidade da cor amarela.

Nas análises físicas de qualidade de carne, verificou-se que o tempo de maturação aumentou as variáveis L^* , CRA e MFI ($P<0.001$). Por outro lado, as variáveis pH, a^* , b^* , e WBSF ($P<0.001$) foram reduzidas para os mesmos tempos. No entanto, as PGOT foram aumentadas para o dia quinze de maturação ($P<0.001$) e não foram observados efeitos ($P>0.05$) do tempo de maturação nas variáveis b^* , PPC, PPEV (Tabela 5).

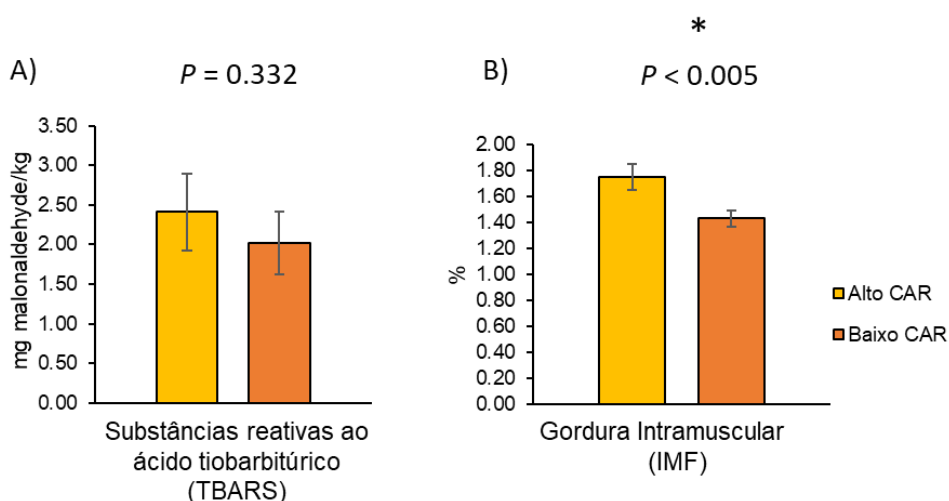


Figura 4. A) Análise de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) musculo *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore divergentes para consumo alimentar residual (CAR): baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes). B) Análise de gordura intramuscular (IMF) do musculo *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore com baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes).

Observou-se no grupo baixo CAR uma menor (1.43 versus 1.75%) porcentagem de IMF ($P < 0.001$) comparado com os animais alto CAR (Figura 4). Já o TBARS não apresentou diferença entre os grupos de CAR ($P = 0.332$).

3.3.3. Análise sensorial

A avaliação das características sensoriais entre os animais com baixo CAR e alto CAR evidenciou que existe uma menor pontuação no grupo dos animais com baixo CAR para aceitação geral (58.3 versus 64.0) ($P < 0.01$) e suculência (58.9 versus 55.3) ($P < 0.05$) (Figura 5). Verificou-se que os consumidores atribuíram maiores pontuações para as carnes do grupo dos animais com alto CAR.

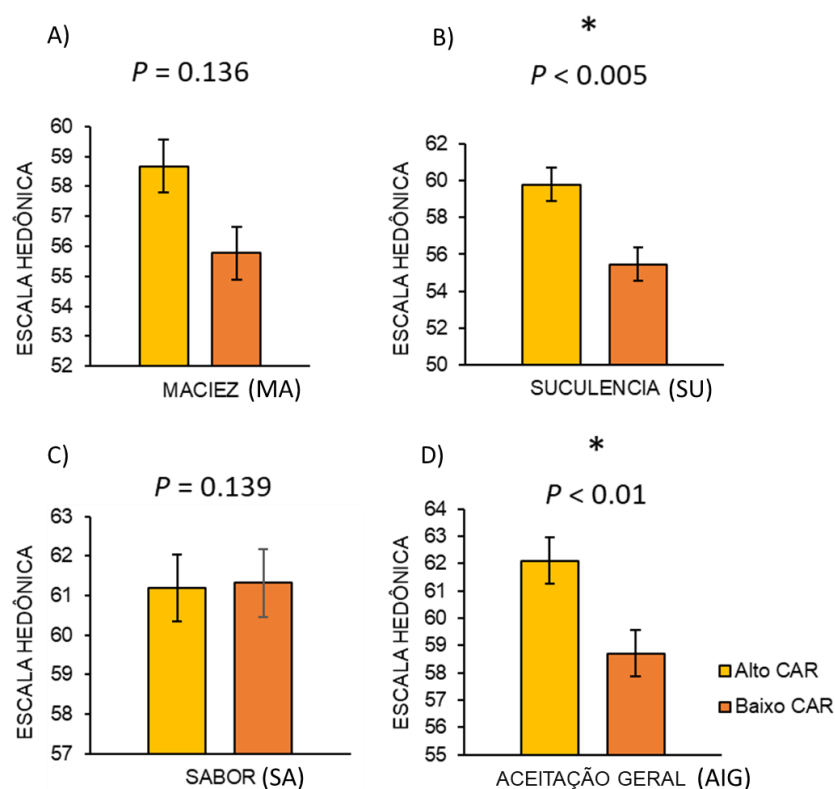


Figura 5. Análise sensorial da carne de bovinos Nelore divergentes para consumo alimentar residual (CAR): baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes) A) Maciez (MA). B) Suculência (SU). C) Sabor (AS). D) Aceitação geral (AIG).

3.3.4. Lipidômica

Das 656 transições iônicas MRMs escaneadas usando o *Longissimus thoracis et lumborum*, 599 tiveram intensidade pelo menos 1.3 vezes maior que o branco. Utilizando PLS-DA, verificou-se que aproximadamente 21% da variabilidade total dos dados pode ser explicada pelos dois primeiros componentes. Com isso, observou-se uma certa sobreposição entre as duas elipses, que representam os grupos de baixo e alto CAR (Figura 6).

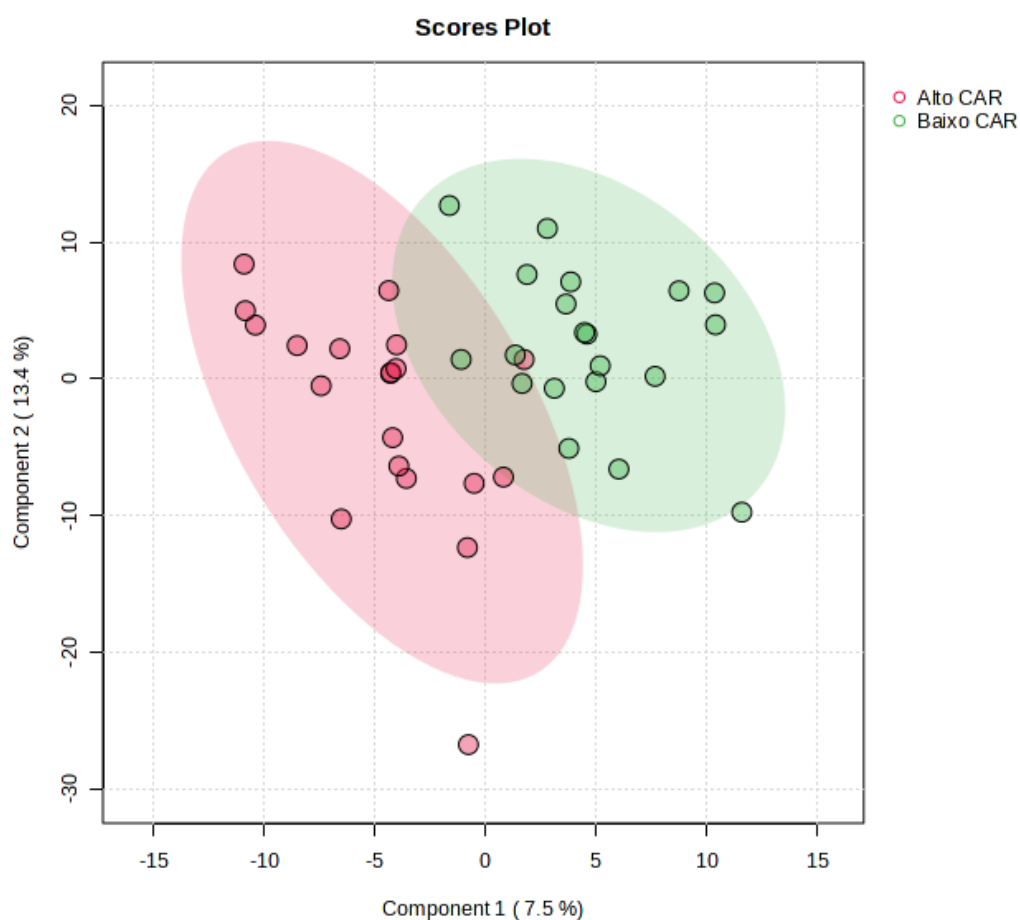


Figura 6. Análise discriminante parcial de mínimos quadrados (PLSDA) para lipídeos UPLC-q-MS identificados no *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore divergentes para consumo alimentar residual (CAR): baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes). Animais com alto CAR (ineficientes-vermelho; n=20) e baixo CAR (eficientes-verde; n=20). Cada ponto de dados representa um animal.

Analisando-se as moléculas identificadas (Figura 7), verificou-se que o grupo de triglicerídeos (TG), especificamente TG (51:8) e TG (50:3) C14 possuem um papel crucial na distinção entre os grupos de baixo e alto CAR. Dentre essas classes de lipídeos, verificou-se no grupo de baixo CAR uma menor presença de TG (50:3) C14. Já o TG (51:8) foi maior no grupo baixo CAR comparado com os animais de alto CAR. Além disso, os TG (49:8), fosfatidilcolina (PC) (34:0) e TG (53:8) foram maiores no grupo dos animais de baixo CAR, enquanto o PC (35:3) foi menor comparado com o grupo de alto CAR. Nota-se, portanto, que as classes TG e PC, parecem ser fundamentais na diferenciação entre os animais de baixo e alto CAR.

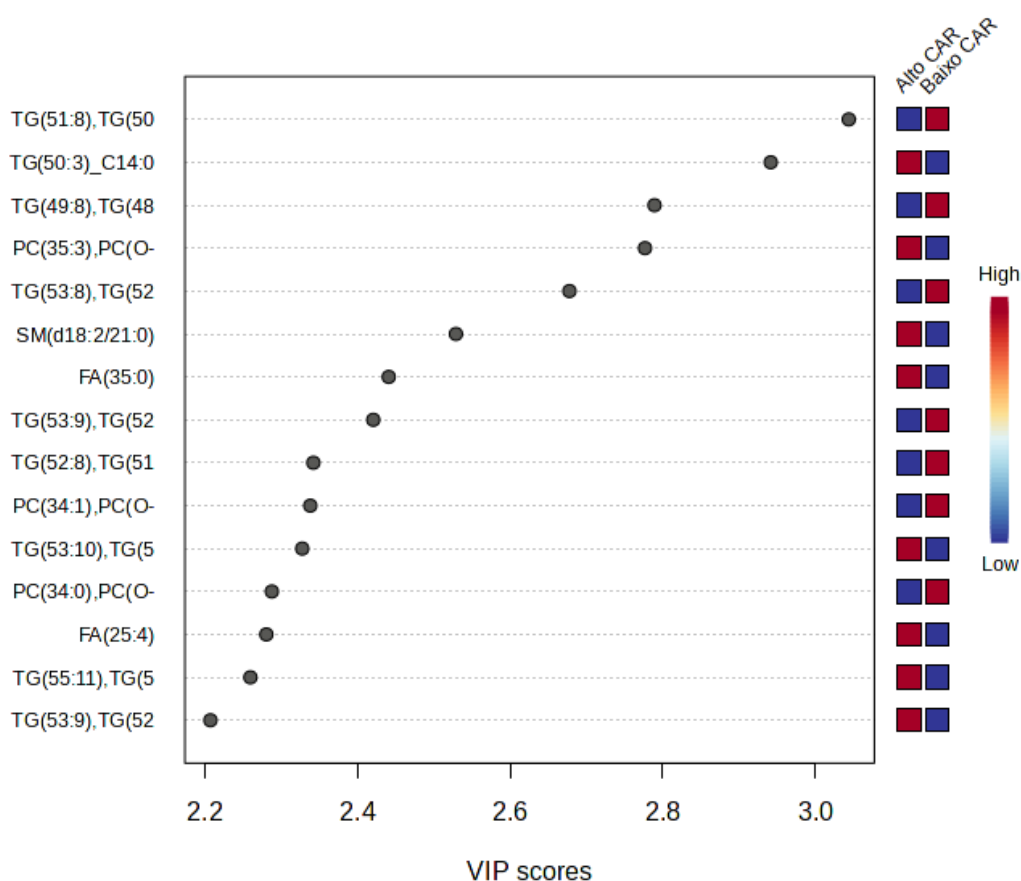


Figura 7. Gráfico das variáveis da importância no modelo de projeção, como a análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA). Eixo Y representa os diferentes lipídeos analisados. Eixo X evidencia os valores dos VIP scores para cada lipídio. A variação da cor nos blocos à direita indica se um lipídio específico está mais presente (vermelho) ou menos presente (azul), para os grupos baixo CAR (eficiente; n=20) e alto CAR (ineficiente; n=20).

A análise de agrupamento hierárquico, representada pelo heatmap (Figura 8), foi realizada para avaliar o perfil lipídico diferencial no músculo *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore classificados como alto e baixo CAR. A cor das células varia entre vermelho (alta abundância) e azul (baixa abundância), refletindo os níveis relativos dos lipídios em cada grupo. Observou-se a formação de dois clusters no dendrograma, correspondentes aos grupos altos CAR representado em roxo e baixo CAR representado em verde. Os lipídeos TG (50:3) C18:2, TG (50:3) C18:1, e TG (50:3) C16:0 apresentaram maior abundância no grupo alto CAR, indicado pela cor mais avermelhada nas amostras deste grupo. Adicionalmente, ácidos graxos, como FA (24:6), FA (22:5), e FA (20:4), mostraram maiores níveis no grupo baixo CAR, indicados pelo azul mais claro no heatmap.

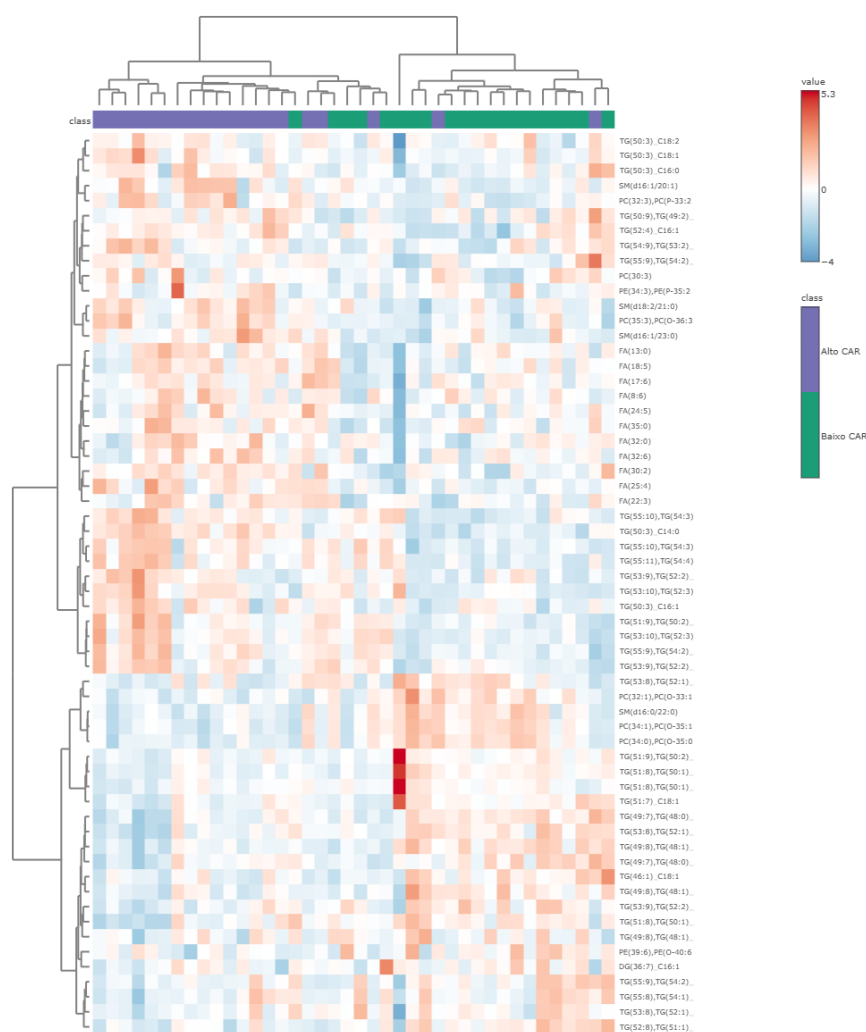


Figura 8. Mapa de calor com análise de cluster hierárquico dos diferentes lipídeos medidos no musculo *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore terminados em confinamento classificados para baixo CAR (eficiente; n=20) e alto CAR (ineficiente; n=20). A cor azul indica uma baixa concentração do lipídio e o vermelho indica uma alta concentração do lipídio.

Os compostos foram relacionados principalmente com 60 compostos que se mostraram significativos ($P < 0.05$) entre o baixo CAR e alto CAR (Tabela 5). Os lipídeos identificados estão relacionados com TG (36), FA (11), PC (6), SM (4), PE (2) e DG (1). Nos bovinos de baixo CAR comparados com os de alto CAR, verificou-se menor regulação de compostos TG (25% versus 44%), enquanto o PC foi maior (67% versus 33%), apresentando um *fold ratio* maior de 2.02 ($P < 0,01$). Além disso, constatou-se regulação positiva do composto DG unicamente no grupo de baixo CAR, enquanto no grupo de alto CAR, os compostos AC e SM foram maiores (Tabela 5).

Tabela 5. Identificação de classes de lipídeos do musculo *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore terminados em confinamento classificados como baixo CAR (eficiente) versus alto CAR (ineficiente).

Lipid	Fold ratio	P.valor	Tratamento
AG(13:0)	1.40	0.040	alto car
AG(17:6)	1.40	0.040	alto car
AG(18:5)	1.94	0.011	alto car
AG(22:3)	1.59	0.025	alto car
AG(24:5)	1.81	0.016	alto car
AG(25:4)	2.35	0.004	alto car
AG(30:2)	1.96	0.011	alto car
AG(32:0)	1.42	0.038	alto car
AG(32:6)	1.59	0.026	alto car
AG(35:0)	2.67	0.002	alto car
AG(8:6)	1.41	0.039	alto car
PC(30:3)	1.39	0.041	alto car
PC(32:3),PC(P-33:2)	1.57	0.027	alto car
PC(35:3),PC(O-36:3),PC(P-36:2)	3.44	0.010	alto car
PE(34:3),PE(P-35:2)	1.41	0.039	alto car
SM(d16:1/20:1)	1.40	0.040	alto car
SM(d16:1/23:0)	1.65	0.023	alto car
SM(d18:2/21:0)	2.86	0.001	alto car

TG(50:3)_C14:0	3.88	0.010	alto car
TG(50:3)_C16:0	1.48	0.033	alto car
TG(50:3)_C16:1	1.48	0.033	alto car
TG(50:3)_C18:1	2.21	0.006	alto car
TG(50:3)_C18:2	1.44	0.036	alto car
TG(50:9),TG(49:2)_C14:0	1.49	0.032	alto car
TG(51:9),TG(50:2)_C14:0	2.00	0.010	alto car
TG(52:4)_C16:1	1.97	0.011	alto car
TG(53:10),TG(52:3)_C16:1	2.44	0.004	alto car
TG(53:10),TG(52:3)_C18:1	2.01	0.010	alto car
TG(53:9),TG(52:2)_C16:0	2.21	0.006	alto car
TG(53:9),TG(52:2)_C18:0	1.67	0.021	alto car
TG(54:9),TG(53:2)_C18:0	1.55	0.028	alto car
TG(55:10),TG(54:3)_C18:0	1.46	0.035	alto car
TG(55:10),TG(54:3)_C18:1	1.93	0.012	alto car
TG(55:11),TG(54:4)_C18:2	2.31	0.005	alto car
TG(55:9),TG(54:2)_C16:0	1.53	0.030	alto car
TG(55:9),TG(54:2)_C18:0	2.19	0.006	alto car
DG(36:7)_C16:1	2.02	0.010	baixo car
PC(32:1),PC(O-33:1),PC(P-33:0)	1.91	0.012	baixo car
PC(34:0),PC(O-35:0)	2.36	0.004	baixo car
PC(34:1),PC(O-35:1),PC(P-35:0)	2.46	0.003	baixo car
PE(39:6),PE(O-40:6),PE(P-40:5)	1.39	0.040	baixo car
SM(d16:0/22:0)	1.94	0.011	baixo car
TG(46:1)_C18:1	1.53	0.029	baixo car
TG(49:7),TG(48:0)_C14:0	1.75	0.018	baixo car
TG(49:7),TG(48:0)_C18:0	1.71	0.019	baixo car
TG(49:8),TG(48:1)_C14:1	1.58	0.026	baixo car
TG(49:8),TG(48:1)_C16:1	3.47	0.010	baixo car
TG(49:8),TG(48:1)_C18:1	1.64	0.023	baixo car
TG(51:7)_C18:1	1.70	0.020	baixo car
TG(51:8),TG(50:1)_C16:0	1.41	0.039	baixo car
TG(51:8),TG(50:1)_C16:1	4.17	0.010	baixo car
TG(51:8),TG(50:1)_C18:1	2.11	0.008	baixo car
TG(51:9),TG(50:2)_C18:2	1.48	0.033	baixo car
TG(52:8),TG(51:1)_C18:1	2.47	0.003	baixo car
TG(53:8),TG(52:1)_C16:0	1.34	0.046	baixo car
TG(53:8),TG(52:1)_C18:0	1.36	0.043	baixo car
TG(53:8),TG(52:1)_C18:1	3.20	0.001	baixo car
TG(53:9),TG(52:2)_C18:2	2.63	0.002	baixo car
TG(55:8),TG(54:1)_C18:1	1.51	0.031	baixo car
TG(55:9),TG(54:2)_C18:2	1.38	0.042	baixo car

TG- Triglicerídeos; DG- Lipídeos difosfato de glicerol; SM- esfingomielina PC- Fosfatidilcolina AG- Ácidos graxos; PE- Fosfatidiletanolaminas.

Foram avaliadas também a distribuição das classes de lipídeos baseado na soma da intensidade relativa das moléculas identificadas como *up regulated* (Figura 9) ou *down regulated* (Figura 10) nos grupos baixo CAR versus alto CAR.

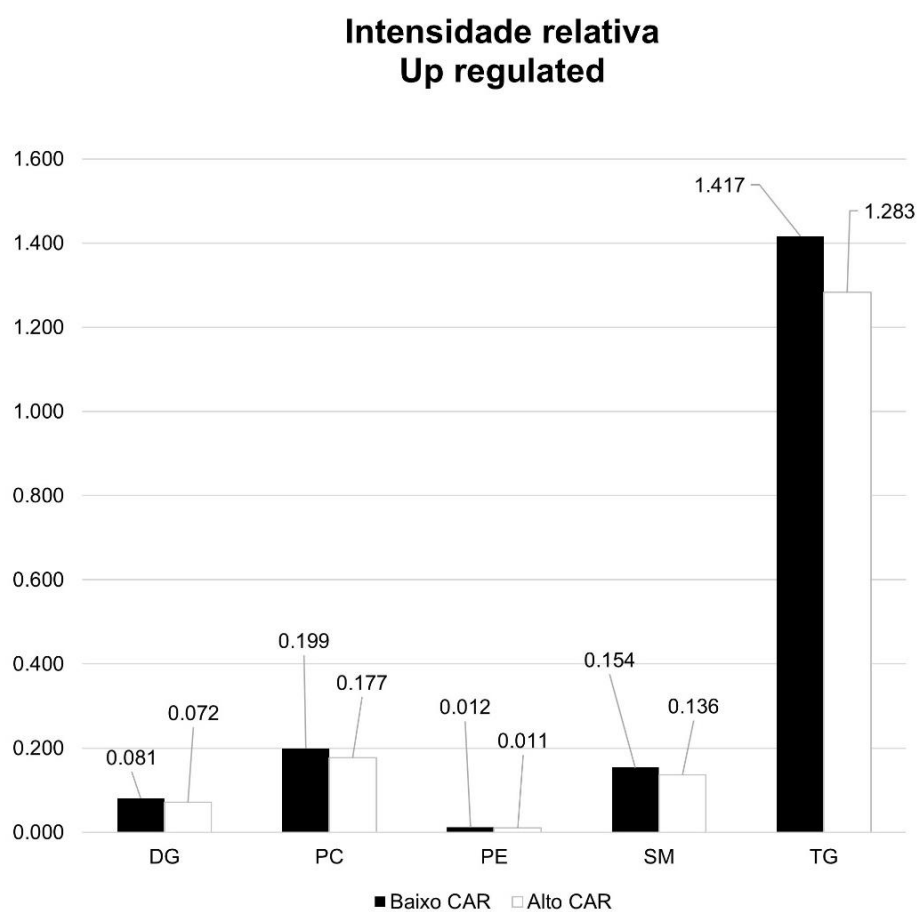


Figura 9. Alterações na intensidade relativa (up regulated) dos lipídeos do músculo *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore divergentes para consumo alimentar residual (CAR): baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes).

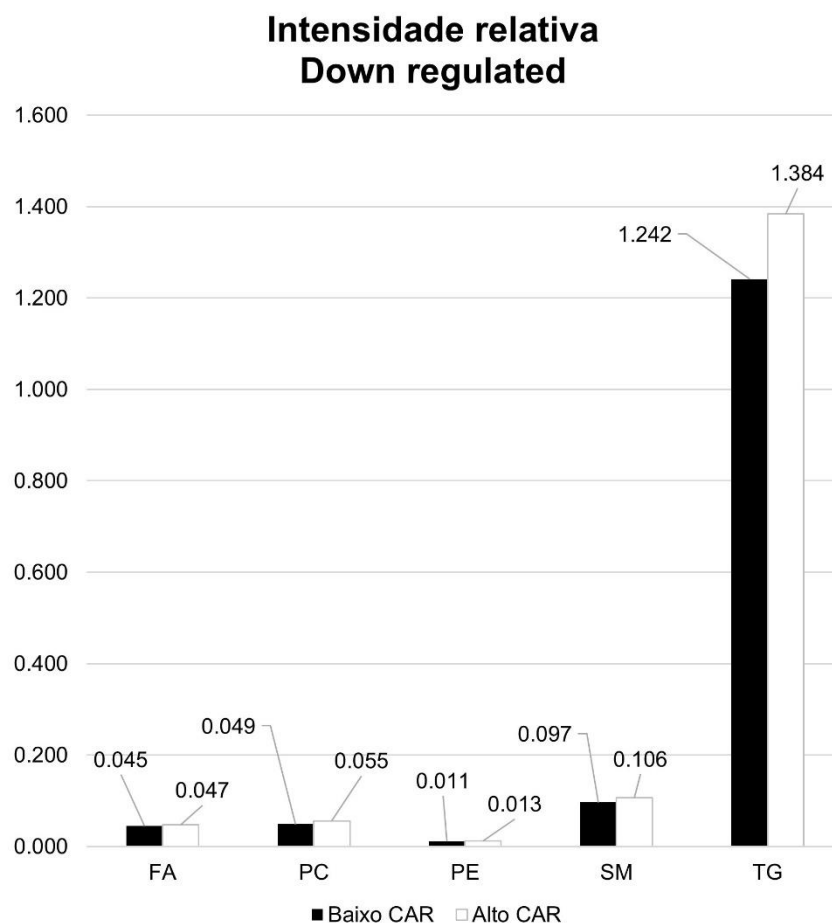


Figura 10. Alterações na intensidade relativa (down regulated) dos lipídeos do musculo *Longissimus thoracis et lumborum* de bovinos Nelore divergentes para consumo alimentar residual (CAR): baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes).

Verificou-se regulação positiva de lipídeos relacionados a função mitocondrial, as glicerofosfoetanolaminas, lipídeos de armazenamento, gota de lipídeos e triglicerídeos nos animais baixo CAR em comparação com os animais alto CAR (Figura 11). Adicionalmente, observou-se uma regulação negativa de glicerofosfocolinas, diacylglicerofosfocolinas e curvatura neutral intrínseca nos animais de baixo CAR em comparação com os animais de alto CAR.

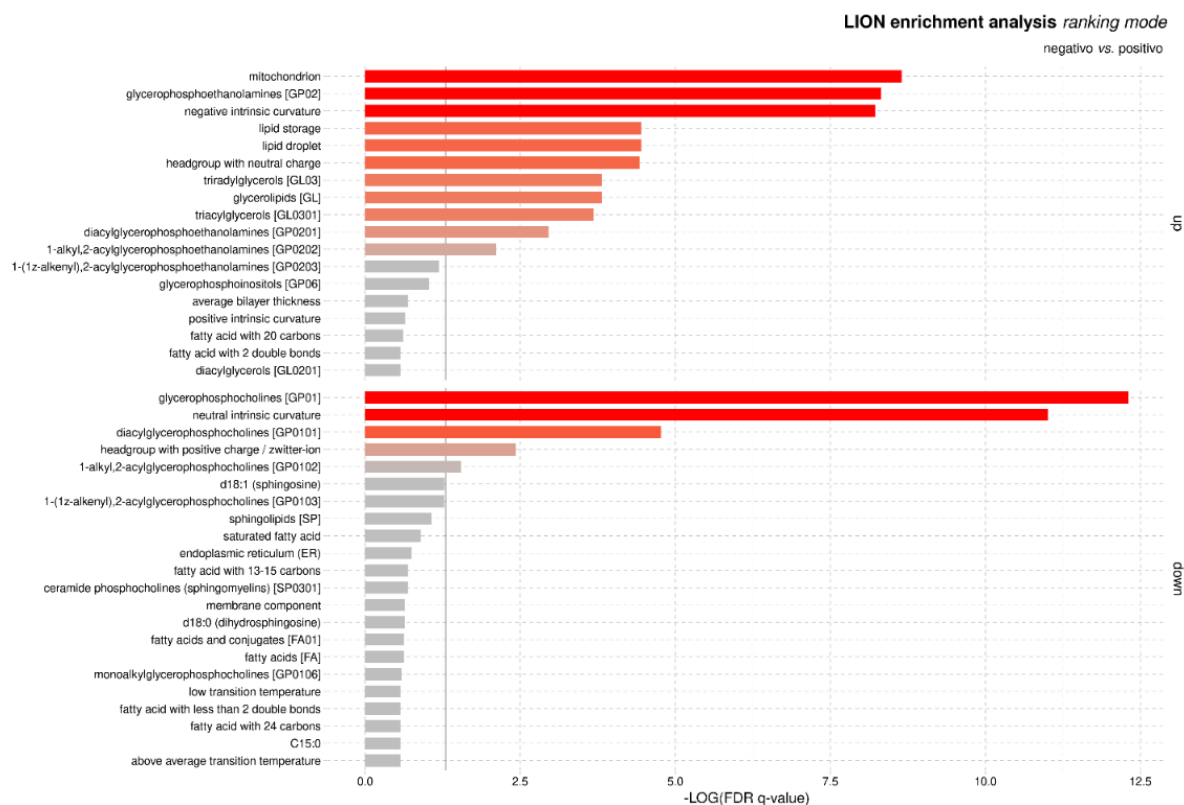


Figura 11. Análise de enriquecimento de lipidômica do tecido *Longissimus thoracis et lumborum* pelo Lion considerando todos os lipídeos que foram regulados positivamente e negativamente de bovinos Nelore com diferentes CAR - baixo CAR (eficientes) versus alto CAR (ineficientes).

3.4. DISCUSSÃO

Compreender como melhorar a EA sem afeitar as características de qualidade de carne é um fator importante na produção de carne bovina, visando assim fornecer produtos que consigam atender as expectativas do consumidor. Neste estudo, verificou-se que animais com baixo CAR apresentam menor CMS refletindo em uma melhor CA e EA, mas apresentam uma menor EGS. Embora superiores em termos de eficiência, inclusive com maior peso de carcaça quente, algumas características de qualidade de carne foram afetadas negativamente, tais como teor de gordura intramuscular e o MFI, sendo menores nos animais eficientes (baixo CAR). Consequentemente, este grupo de animais apresentou menor suculência e aceitação geral na análise sensorial comparada com a carne dos animais classificados como alto CAR, além de um perfil lipídico diferente entre

os grupos alto e baixo CAR. Assim, confirmou-se a hipótese de que classificar animais Nelore com baixo CAR terminados em confinamento traz efeitos negativos na qualidade da carne.

3.4.1. Características de desempenho e carcaça

Em nosso estudo, o GMD e o CMS foram semelhantes aos valores médios obtidos em outros estudos com zebuínos. Um estudo conduzido por Gomes et al., (2012) observaram em bovinos Nelore, valores de 1.48 kg/dia em GMD e 10.16 kg/dia no CMS. Adicionalmente, um estudo com 59 animais Nelore, conduzido por Zorzi et al. (2013), encontraram 7.13 kg/dia para CMS e 1.67 em % PV. Segundo Gomes et al., (2012), bovinos Nelore apresentaram variação de 4.26 kg/dia no CAR, com amplitude de -2.72kg/dia a 1.54 kg/dia. Já Costa e Silva et al., 2013 encontraram uma diferença de 2.0 kg/dia.

O R^2 indica que as variâncias de outros fatores não inclusos no modelo, tais como diferenças no turnover proteico, composição do ganho, digestibilidade, entre outros, explicariam os outros 34,7% da variação. Estas variações do CMS entre os grupos de baixo CAR e alto CAR verificadas no presente estudo podem estar associadas a diferenças nos processos metabólicos e fisiológicos da conservação e uso da energia (Herd and Arthur et al., 2008). Alguns autores evidenciam uma forte correlação entre o consumo de alimentos e CAR, sendo possível que haja diminuições associadas no consumo de oxigênio dos tecidos de animais com um baixo CAR (Huntington et al., 1988; Chaves et al., 2015), que conseqüentemente se reflete na diferença da ingestão de energia metabolizável (EM), devido a processos metabólicos. Em nosso estudo a redução do CMS pode-se associar a possíveis diferentes processos metabólicos nos animais do baixo CAR, como mecanismos biológicos associados a uma taxa metabólica menor (ou seja, produção de calor expressa por peso unitário e tempo unitário, em ingestão de EM semelhante) do que os animais com alto CAR na alimentação, o que pode surgir em uma redução da EM e melhor eficiência do uso da energia (Cantalapiedra et al., 2018).

De acordo com a literatura, animais com baixo CAR podem apresentar carcaças mais magras, o que pode ser atribuído a diversos mecanismos que

contribuem para reduzir o custo energético e assim depositar mais tecidos ricos em proteínas, refletindo assim em uma diferença da composição do ganho (Mukiibi et al., 2018; Mukiibi et al., 2020). Igualmente foi observado neste estudo, animais com baixo CAR versus alto CAR depositaram menos tecido adiposo e mais tecido muscular. Nascimento et al., (2016) demonstrou um maior PCQ em animais *Bos indicus* com baixo CAR, embora não tenham sido observadas diferenças significativas na EGS.

Pesquisadores avaliaram tourinhos com um alto CAR e evidenciaram maior EGS em comparação com grupo de baixo CAR (Lancaster et al., 2009; Smith et al., 2010), resultados que concordam com os observados no presente estudo, no qual a EGS dos animais ineficientes foi 0,86 mm maior em comparação aos eficientes. Além disso, Nascimento et al., (2016) observaram uma maior AOL em novilhos Nelore com baixo CAR indicando uma maior deposição de músculo na carcaça em comparação com outros grupos de CAR. No entanto, a menor EGS em animais com baixo CAR pode estar relacionada a alterações no metabolismo energético, já que animais com baixo CAR otimizam a utilização de energia. Nesse sentido, Fernandez et al., (2020) destacaram que animais com baixo CAR apresentam maior atividade mitocondrial, o que se traduz em uma capacidade respiratória celular intensa, refletindo em uma maior disponibilidade de energia para a deposição de proteínas. Além disso, Consôlo et al. (2020), estudando touros Nelore com diferente CAR, observaram uma maior atividade lipolítica em animais com baixo CAR, indicando uma maior mobilização das reservas corporais, o que poderia explicar as associações de uma menor EGS e tendência de maior AOL nos animais baixo CAR do presente estudo.

Contudo, Rouquette et al., (2023) avaliaram novilhos Brahman e não encontraram diferenças para EGS entre os grupos baixo CAR e alto CAR. Consequentemente, estas variações na literatura podem ser um resultado de possíveis modificações na deposição de gordura em diferentes raças ou diferenças na medição de ultrassonografia que refletem sobre a ESG. Os resultados divergentes desses estudos sugerem que fatores como o sistema de produção ou diferenças metabólicas em animais com baixo CAR podem estar influenciando os achados. No entanto, a causa dessa inconsistência ainda não

está completamente elucidada, destacando a necessidade de mais pesquisas para entender essas variações. Assim, estudos adicionais para entender os efeitos contínuos da seleção de CAR nas características da carcaça são necessários.

3.4.2. Características de qualidade de carne

Os valores de pH observados neste estudo estão dentro dos padrões da indústria de carne bovina no Brasil, que recomenda um pH final inferior a 5,8 como ideal para evitar que a qualidade da carne seja comprometida, resultados que foram semelhantes a outros estudos com bovinos Nelore (Gomes et al., 2012; Zorzi et al., 2013). A queda do pH post-mortem gera a formação de ácido lático a qual ocorre em condições de anaerobiose, sendo um processo importante para manter características como CRA (associa-se a texturas mais suculentas e macias), a^* (vermelha brilhante) e conservação da vida útil da carne (Roça, 2011).

Os valores de pH foram influenciados pela maturação das amostras, possivelmente devido ao consumo de glicose disponível na carne, resultando em menor pH. A queda no pH também está relacionada às mudanças nas variáveis de cor (L^* , a^* e b^*), já que a ação enzimática sobre proteínas da carne maturada leva a uma cor mais clara e à redução na intensidade do vermelho (Khan et al., 2016). O presente estudo observou aumento nos valores de L^* e queda de a^* em amostras maturadas por 15 dias.

Em relação às PGOT e CRA, o aumento dos valores está ligado à maior degradação proteolítica durante a maturação, que libera água livre do músculo devido à ruptura das miofibrilas (Mello et al., 2017). Esse aumento de exsudato é mais pronunciado com o tempo de maturação, como observado entre 5 e 15 dias neste estudo, corroborando achados de Oliveira et al. (2021). A CRA, que define a capacidade de retenção de água da carne, também aumenta com a maturação, influenciando cor, textura e maciez (Wu e Smith et al., 1987).

O menor MFI observado nos animais com baixo CAR em ambos os tempos de maturação, pode ser associado a atividade da calpastatina, que é um potente inibidor da calpaína, o que afeta diretamente os mecanismos de degradação de proteínas, resultando em carnes menos macias (Culler et al., 1978; Baldassini et al., 2022). A redução do MFI e o aumento da WBSF observada em nosso estudo

e em outros estudos envolvendo bovinos e ovinos (Baldassini et al., 2022; Karumendu et al., 2009) pode ser atribuída aos níveis mais elevados de calpastatina no grupo de animais com baixo CAR. Em um estudo realizado por Zorzi et al. (2013), foram verificados menores valores de MFI na carne de bovinos Nelore com baixo CAR em comparação com os animais de alto CAR, tanto nas amostras maturadas por 5 dias (37.0 versus 42.0), quanto naquelas submetidas a 15 dias de maturação (48.1 versus 51.3). A menor atividade proteolítica nos animais com um baixo CAR foi também reportada no clássico estudo conduzido por McDonagh et al. (2001), que observaram um aumento da concentração da calpastatina e menor MFI no músculo *Longissimus thoracis et lumborum* em animais selecionados como baixo CAR, demonstrando que esses animais podem ter carnes menos macias. Embora os resultados na literatura sobre a qualidade da carne de animais eficientes permaneçam contraditórios, existem evidências que a seleção para baixo CAR afetaria negativamente a maciez da carne (Gomes et al., 2012).

Nosso estudo evidenciou que no grupo dos animais com baixo CAR depositaram menos gordura intramuscular, podendo indicar que existe uma maior utilização de fontes de energia dietéticas ou maior mobilização e degradação de AG armazenados para gerar energia para as funções fisiológicas de outros tecidos (Bryant et al., 2010). Além disso, destacasse que a relação do conteúdo de gordura intramuscular, é uma característica importante para a indústria e o varejo de carnes, pois influência favoravelmente na qualidade do produto (palatabilidade).

3.4.3 Análise sensorial

O conceito de palatabilidade da carne bovina é abrangente; uma experiência sensorial positiva é grandemente influenciada pela interação das percepções de maciez, sabor e suculência (Thompson, 2004). Na análise sensorial, as variáveis de suculência e aceitação geral avaliadas pelos consumidores tiveram maior pontuação nos bifes de animais com alto CAR. Essa diferença pode ser atribuída as menores PGOT e maiores percentuais de IMF, o que gerou melhor experiência sensorial. Segundo Baker et al (2006), o aumento

da suculência de bifes de carne bovina pode estar relacionado ao aumento do teor de gordura.

Semelhantemente ao presente estudo, pesquisadores reportaram que o uso de animais eficientes levou a uma diminuição no teor de IMF de bovinos taurinos e zebuínos (Basarab et al., 2003; Nascimento et al., 2016), impactando negativamente a qualidade da carne. Esses achados indicam que, independentemente da subespécie, a utilização de animais mais eficientes quanto ao CAR pode influenciar a qualidade da carne para o consumo. Contudo, não foram observadas diferenças em maciez sensorial. Assim, os consumidores não foram capazes de diferenciar a maciez de bovinos Nelore com baixo CAR versus alto CAR de maneira isolada, o que possivelmente ocorreu porque maciez é uma característica influenciada por diversos fatores, e possui fraca associação a IMF (Wheeler et al., 1994; Shahrai et al., 2021; Ramos et al., 2024). Já as maiores notas de suculência e aceitação geral para as carnes dos animais de alto CAR ocorreram principalmente devido ao teor de IMF. Assim, foi verificado em um estudo que avaliou o aumento do nível de gordura nos bifes de contrafilé reflete na melhoria da maciez, suculência, sabor e aceitação geral (O'Quinn et al., 2012).

Além disso, nossos resultados concordam com Jiu et al. (2019), que avaliaram o efeito do CAR, raça e maturação da carne e reportaram que animais com baixo CAR podem ter uma influência negativa na preferência do consumidor, pois os bifes de animais com alto CAR receberam maior apreciação ou foram melhor aceitos pelos consumidores. A maciez e o sabor não apresentaram diferença entre os grupos de CAR na análise sensorial, o que possivelmente ocorreu porque os valores de WBSF entre os grupos para CAR foram semelhantes.

3.4.4 Associações da lipidômica e o consumo alimentar residual

Os lipídios possuem papéis cruciais no metabolismo celular, principalmente no metabolismo energético e processos de sinalização (Köhler et al., 2021). A lipidômica é cada vez mais influente na biologia de sistemas, pois fornece insights valiosos sobre mecanismos biológicos. As técnicas de espectrometria de massa de alta resolução (MS) para identificação e quantificação de lipídios permitem a

análise de moléculas mais detalhados e complexos, o que pode ajudar no entendimento do metabolismo animal. Os lipídeos são biomoléculas que podem atuar como componentes de estruturais essenciais para membrana celular e como moléculas de armazenamento de energia (Van Meer et al., 2008). Nossos resultados mostraram que o grupo de baixo CAR teve maior acúmulo da classe TG e PC, sugerindo uma possível alteração no metabolismo lipídico que poderia estar associada à EA. A classe PC é necessária para muitos mecanismos energéticos, como o fluxo de triglicerídeos por lipoproteínas de baixa densidade (VLDL) (Pinotti et al., 2002), sendo assim que possivelmente quando existe maior presença da PC associasse com um melhor metabolismo hepático, devido ao que tem um papel importante na oxidação do colesterol.

A concentração de colesterol foi considerada um biomarcador robusto da EA em bovinos (Bourgon et al., 2017; Montanholi et al., 2017). Em outro estudo, pesquisadores descreveram que bovinos mais eficientes possuem menor nível de colesterol no fígado e no sangue (Artegoitia et al., 2019). Nesse contexto, animais com baixo CAR apresentaram maior PC, refletindo assim (indiretamente) uma possível melhor funcionalidade hepática, o que explica em parte a superioridade em EA desses animais comparados aos ineficientes (alto CAR). Contudo, a quantificação do colesterol no tecido hepático dos grupos experimentais do presente estudo seria necessária para confirmar tal hipótese. Além disso, o estudo de expressão gênica diferencial seria uma abordagem complementar, uma vez que pesquisadores já demonstraram a importância do metabolismo dos fosfolipídeos na EA de bovinos (Mukiibi et al., 2020). Do mesmo modo, a integridade hepática é outro fator chave associado ao CAR (Alexandre et al., 2015), assim como o metabolismo dos fosfo-glicerolipídios, a glutatona e o colesterol que fazem parte da regulação dos processos de transporte celular e a homeostases da energia, que se associam com a EA (Artegoitia et al., 2019).

Por outro lado, de maneira inédita, verificou-se a associação de alguns lipídeos relacionados a função mitocondrial que ajudam a explicar porque os animais com baixo CAR são mais eficientes. Esses resultados concordam com um estudo de proteômica no fígado de bovinos Nelore divergentes para CAR que identificou proteínas de função mitocondrial e metabolismo energético em animais

com baixo CAR (Baldassini et al., 2017). Nossos resultados mostraram que os lipídeos PC e PE foram os componentes importantes dentro das mitocôndrias, pois são os componentes mais abundantes da membrana mitocondrial, correspondendo a aproximadamente 80% do total de lipídeos presentes nela (van de Veen et al., 2017). A exemplo disso, o PC é um substrato importante para a formação de outros lipídeos mitocondriais, mais notavelmente o fosfolipídio cardiolipina (Mejia et al., 2016). Este fosfolipídio específico da mitocôndria desempenha um papel importante na estrutura mitocondrial e redução no acúmulo das espécies reativas de oxigênio (ROS) (Maranzana et al., 2013). Sabe-se que as ROS geram danos oxidativos às proteínas mitocondriais, pois quando ocorre acúmulo de ROS, espera-se um pior funcionamento da mitocôndria, afetando a EA dos animais (Bottje and Carstens., 2009).

Por outro lado, o termo mitocôndria foi enriquecido principalmente com os lipídeos PE, os quais desempenham um papel fundamental na formação da membrana interna mitocondrial. De fato, destacasse que essas moléculas lipídicas podem regular e ativar os receptores ativadores de proliferador peroximase (PPARs) e as proteínas de ligação a elementos reguladores de esteróis (SREBP) causando assim uma regulação da transcrição de genes lipogênicos (Bionaz et al., 2012). A regulação das SREBP pode explicar o menor conteúdo de lipídeos intramusculares nos animais de baixo CAR, já que genes como o SREBF1 desempenham um papel crucial na homeostase energética, promovendo glicólise, lipogênese e adipogênese ao regular a expressão de genes envolvidos na síntese de AG e na diferenciação de adipócitos (Ladeira et al., 2016). Curiosamente, o aumento de lipídeos PC nesses animais está associado à inibição do SREBF1, o que reduz a expressão de genes lipogênicos e, conseqüentemente, o acúmulo de gordura (Walker et al., 2011; Van der Veen et al., 2017).

Ademais, encontramos vias enriquecidas com lipídios de armazenamento e gotículas lipídicas nos animais de baixo CAR, que interagem na regulação do metabolismo energético através do enchimento de lipídios nos adipócitos. Sabe-se que as gotículas lipídicas interagem com as mitocôndrias peridroplet (Benador et al., 2018; Sanchez et al., 2018); as quais se localizam em contato direto com estas gotículas lipídicas e interagem diretamente com o aumento e expansão das

mesmas (Benador et al., 2018), refletindo assim em uma maior disponibilidade de energia em forma de lipídeos mediada pelas mitocôndrias peridroplet. Nesse contexto, animais mais eficientes apresentam uma maior expressão de moléculas relacionadas ao transporte de AG e à beta-oxidação desses compostos (Taiwo et al., 2022; Idowu, 2024). Isso indica que, embora animais eficientes possam ter acumulado mais lipídios direcionados às reservas de energia intracelularmente, também realizaram uma oxidação mais intensa desses lipídios para utilização como fonte de energia. Assim, a regulação positiva do metabolismo lipídico, especialmente em vias associadas à função mitocondrial, ao armazenamento de lipídios e à formação de gotículas lipídicas, sugere que o metabolismo celular está orientado para o aumento na produção e no acúmulo de lipídios, possivelmente como uma resposta adaptativa a uma reorganização dos estoques energéticos.

3.5. CONCLUSÃO

Bovinos Nelore com baixo CAR apresentaram efeitos negativos sobre algumas características de carcaça e qualidade de carne, afetando os aspectos sensoriais na perspectiva dos consumidores. Os resultados deste estudo indicaram carcaças mais magras (menor EGS) e com tendência de maior musculabilidade (maior AOL) nos animais com baixo CAR (mais eficientes). Com o aumento do tecido magro, observou-se redução na deposição de gordura subcutânea e intramuscular, variáveis que ajudam a explicar as diferenças percebidas pelos consumidores entre bovinos eficientes (baixo CAR) versus ineficientes (alto CAR).

Além disso, esse é o primeiro estudo a descrever o perfil lipídico (lipidoma) de bovinos divergentes para o CAR, identificando-se classes de lipídeos como triglicerídeos e fosfatidilcolina, as quais foram relacionadas a função mitocondrial e lipídios de armazenamento, ajudando a explicar as diferenças em eficiência alimentar e qualidade da carne dos grupos experimentais.

3.6. REFERENCIAS

ABIEC. (2022). Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne. Beef Report: perfil da pecuária no Brasil. 72p88. **ABIEC**, 2022.

ABIEC. (2023). Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes. Exportações Brasileiras de Carne Bovina (Ministério da Agricultura (ed.)). Governo brasileiro. **Perfil Pecuária no Brasil**.

Alexandre PA, Kogelman LJ, Santana MH, Passarelli D, Pulz LH, Fantinato-Neto P, Silva PR, Leme F, Strefezzi L, Coutinho JB, Ferraz JP, Eler HN, Kadarmideen S, Fukumasu H (2015). Liver transcriptomic networks reveal main biological processes associated with feed efficiency in beef cattle. **BMC Genomics**, 16:1-13.

Archer JA, Richardson EC, Herd RM, Arthur PF (1999). Potential for selection to improve efficiency of feed use in beef cattle: a review. **Australian Journal of Agricultural Research**, 50(2):147-162.

Aroeira CN, Torres Filho RA, Fontes PR, Gomide LAM, Ramos AL, Ladeira MM, Ramos EM (2016). Freezing, thawing and aging effects on beef tenderness from *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle. **Meat Science**, 116:118-125.

Artegoitia VM, Foote AP, Lewis RM, Freetly HC (2019). Metabolomics profile and targeted lipidomics in multiple tissues associated with feed efficiency in beef steers. **ACS Omega**, 4(2):3973-3982.

Baldassini W (2017). **The biochemistry of feed efficiency, energy metabolism, and mitochondrial function: an animal and molecular approach**. Doctoral Dissertation. Universidade de São Paulo.

Barbut, S. (1996). Determining water and fat holding. **Methods of testing protein functionality**, 186-225.

Basarab JA, Price MA, Aalhus JL, Okine EK, Snelling WM, Lyle KL (2003). Residual feed intake and body composition in young growing cattle. **Canadian Journal of Animal Science**, 83(2):189-204.

Benador IY, Veliova M, Mahdavian K, Petcherski A, Wikstrom JD, Assali EA, Perez RA, Shum M, Oliveira MF, Cinti S, Sztalryd C, Barshop WD, Wohlschlegel JM, Corkey BC, Liesa M, Shirihai OS (2018). Mitochondria bound to lipid droplets have unique bioenergetics, composition, and dynamics that support lipid droplet expansion. **Cell Metabolism**, 27(4):869-885.

Baldassini, W., Gagaoua, M., Santiago, B., Rocha, L., Torrecilhas, J., Torres, R., & Chardulo, L. A. (2022). Meat quality and muscle tissue proteome of crossbred bulls finished under feedlot using wet distiller grains by-product. *Foods*, 11(20), 3233.

Bionaz, M., Thering, B. J., & Loo, J. J. (2012). Fine metabolic regulation in ruminants via nutrient–gene interactions: saturated long-chain fatty acids increase expression of genes involved in lipid metabolism and immune response partly through PPAR- α activation. **British Journal of Nutrition**, 107(2), 179–191.

Bligh, E. G., & Dyer, W. J. (1959). Canadian journal of biochemistry and physiology. **Canadian Journal of Biochemistry and Physiology**, 37(8), 911–917.

Boaitey, A., Goddard, E., Mohapatra, S., & Crowley, J. (2017). Feed efficiency estimates in cattle: The economic and environmental impacts of reranking. **Sustainable Agriculture Research**, 6(2).

Bonny, S. P. F., Pethick, D. W., Legrand, I., Wierzbicki, J., Allen, P., Farmer, L. J., Polkinghorne, R. J., Hocquette, J. F., & Gardner, G. E. (2016). European conformation and fat scores have no relationship with eating quality. **Animal**, 10(6), 996–1006.

Bottje WG, Carstens GE (2012). Variation in metabolism: biological efficiency of energy production and utilization that affects feed efficiency. In: **Feed Efficiency in the Beef Industry**. p. 251-273.

Bottje, W. G., & Carstens, G. E. (2009). Association of mitochondrial function and feed efficiency in poultry and livestock species. **Journal of Animal Science**, 87(E-Suppl.), E48–E63. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1379>

Bottje, W. G., & Carstens, G. E. (2012). Variation in metabolism: Biological efficiency of energy production and utilization that affects feed efficiency. In R. A. Hill (Ed.), **Feed Efficiency in the Beef Industry** (pp. 251–273). Wiley-Blackwell.

Bourgon, S. L., de Amorim, M. D., Miller, S. P., & Montanholi, Y. R. (2017). Associations of blood parameters with age, feed efficiency, and sampling routine in young beef bulls. **Livestock Science**, 195, 27–37.

Bryant, T. C., Engle, T. E., Galyean, M. L., Wagner, J. J., Tatum, J. D., Anthony, R. V., & Laudert, S. B. (2010). Effects of ractopamine and trenbolone acetate implants with or without estradiol on growth performance, carcass characteristics, adipogenic enzyme activity, and blood metabolites in feedlot steers and heifers. **Journal of Animal Science**, 88(12), 4102–4119.

Cantalapiedra-Hijar, G., Abo-Ismael, M., Carstens, G. E., Guan, L. L., Hegarty, R., Kenny, D. A., Plastow, G., Relling, A., & Ortigues-Marty, I. (2018). Biological determinants of between-animal variation in feed efficiency of growing beef cattle. **Animal**, 12(S2), S321–S335.

Castro Bulle, F., Paulino, P. V., Sanches, A. C., & Sainz, R. D. (2006). Growth, quality, and protein and energy metabolism in beef cattle with different growth potentials and residual feed intakes. **Journal of Animal Science**, 85, 928–936.

Chaves, A. S., Nascimento, M. L. D., Tullio, R. R., Rosa, A. N., Alencar, M. M., & Lanna, D. P. (2015). Relationship of efficiency indices with performance, heart rate, oxygen consumption, blood parameters, and estimated heat production in Nellore steers. **Journal of Animal Science**, 93(10), 5036–5046.

Chong, J., Wishart, D. S., & Xia, J. (2015). Using MetaboAnalyst 4.0 for comprehensive and integrative metabolomics data analysis. **Current Protocols in Bioinformatics**, 68(1), e86

Clemmons, B. A., Mihelic, R. I., Beckford, R. C., Powers, J. B., Melchior, E. A., McFarlane, Z. D., & Myer, P. R (2017). Serum metabolites associated with feed efficiency in black angus steers. **Metabolomics**, v. 13, p. 1-8.

Colle M et al. (2015). Research guidelines for cookery, sensory evaluation, and instrumental tenderness measurements of meat. In: **American Meat Science Association Guidelines**. Champaign, IL: AMSA, p. 127-150.

Colle, M. et al. AMSA. 2015. Research guidelines for cookery, sensory evaluation, and instrumental tenderness measurements of meat. American Meat Science Association, Champaign, IL. Bekhit, AEDA, DL Hopkins, FT Fahri, and EN Ponnampalam. 2013. Oxidative processes in muscle systems and fresh meat:

Sources, markers, and remedies. **Post-harvest influences on beef flavor development and tenderness**, v. 110, p. 127.

Cônsolo, N. R. B., Buarque, V. L. M., Silva, J., Poleti, M. D., Barbosa, L. C. G. S., Higuera-Padilla, A., & Silva, S. L (2021). Muscle and liver metabolomic signatures associated with residual feed intake in Nellore cattle. **Animal Feed Science and Technology**, v. 271, p. 114757.

Costa e Silva, L. F., de Campos Valadares Filho, S., Detmann, E., Rotta, P. P., Zanetti, D., Villadiego, F. A. C., Pellizoni, S. G., Pereira, R. M. G (2013). Performance, growth, and maturity of Nellore bulls. **Tropical Animal Health and Production**, v. 45, p. 795-803.

Cruz, G. D., Rodríguez-Sánchez, J. A., Oltjen, J. W., & Sainz, R. D (2010). Performance, residual feed intake, digestibility, carcass traits, and profitability of Angus-Hereford steers housed in individual or group pens. **Journal of Animal Science**, v. 88, n. 1, p. 324-329

Culler, R. D.; Smith, G. C.; Cross, H. R (1978). Relationship of myofibril fragmentation index to certain chemical, physical and sensory characteristics of bovine longissimus muscle. **Journal of food Science**, v. 43, n. 4, p. 1177-1180

Davis, Michael E.; Wick, Macdonald P.; Maquivar, Martin G (2012). Hormonal regulation of feed efficiency. **Feed efficiency in the beef industry**, p. 225-250.

De Mello, J. L., Takada, T. L., Rodrigues, A. B. B., Ferrari, F. B., De Souza, R. A., & Borba, H (2017). Estudo comparativo da qualidade do músculo longissimus dorsi bovino maturado na forma de bifês e peças. **Zootecnia Tropical**, v. 35, n. 1-2, p. 7-16.

Fernandez, E. E., Oltjen, J. W., & Sainz, R. D (2020). Mitochondrial abundance and function in muscle from beef steers with divergent residual feed intakes. **Animal**, v. 14, n. 3, p. 560-565.

Fidelis, H. A., Bonilha, S. F. M., Tedeschi, L. O., Branco, R. H., Cyrillo, J. N. S. G., & Mercadante, M. E. Z (2017). Residual feed intake and its association with carcass traits and meat quality in Nellore cattle. **Meat Science**, 128, 34–39.

Gomes, M. M. A., Faria, C. U., Bezerra, B. S. B. R., Miguel, J. M., Borges, G. C., & Mendes, E. D. M (2019). Associação entre eficiência alimentar e ganho

emacabamento de carcaça de bovinos da raça Nelore. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 71, p. 2017-2024,.

Gomes, R. D. C., Sainz, R. D., Silva, S. D. L., César, M. C., Bonin, M. D. N., & Leme, P. R. (2012). Feedlot performance, feed efficiency reranking, carcass traits, body composition, energy requirements, meat quality and calpain system activity in Nellore steers with low and high residual feed intake. **Livestock Science**, v. 150, n. 1-3, p. 265-273.

Gornall, A. G., Bardawill, C. J., & David, M. M (1949). Determination of serum proteins by means of the biuret reaction. **J. biol. Chem**, v. 177, n. 2, p. 751-766.

Herd, R. M., Velazco, J. I., Smith, H., Arthur, P. F., Hine, B., Oddy, H., Dobos, R. C., Hegarty, R. S. (2019). Genetic variation in residual feed intake is associated with body composition, behavior, rumen, heat production, hematology, and immune competence traits in Angus cattle. **Journal of Animal Science**, v. 97, n. 5, p. 2202-2219.

Arthur, J. PF; Herd, R. M (2008). Residual feed intake in beef cattle. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, p. 269-279.

Herd, R.M.; Archer, J.A.; Arthur, P.F, (2003). Reducing the cost of beef production through genetic improvement in residual feed intake: Opportunity and challenges to application. **Journal of Animal Science**, Savoy, v. 81, p. 9-17.

Herd, Robert M.; Oddy, V. H.; Richardson, E. C, (2004). Biological basis for variation in residual feed intake in beef cattle. 1. Review of potential mechanisms. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 44, n. 5, p. 423-430.

Huntington, G. B., G. A. Varga, B. P. Glenn, And D. R. Waldo (1988). Net absorption and oxygen consumption by Holstein steers fed alfalfa or orchardgrass silage at two equalized intakes. **Journal of Animal Science**, v. 66, n. 5, p. 1292-1302.

Idowu, M., Taiwo, G., Sidney, T., Adewoye, A., & Ogunade, I. M (2024). Plasma proteomic analysis reveals key pathways associated with divergent residual body weight gain phenotype in beef steers. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 11, p. 1415594.

Jiu, Z., Roy, B. C., Das, C., Wismer, W. V., Juárez, M., Fitzsimmons, C., Li, C., Plastow, G., Aalhus, J., & Bruce, H. L. (2019). Meat and sensory quality of major muscles from Angus, Charolais, and Angus crossbred steers with high and low residual feed intake. **Canadian journal of animal science**, v. 100, n. 1, p. 140-153.

Karisa, B. K., Thomson, J., Wang, Z., Li, C., Montanholi, Y. R., Miller, S. P., Moore, S. S., Plastow, G. S (2014). Plasma metabolites associated with residual feed intake and other productivity performance traits in beef cattle. **Livestock Science**, v. 165, p. 200-211.

Karumendu, L. U., Van De Ven, R., Kerr, M. J., Lanza, M., & Hopkins, D. L (2009). Particle size analysis of lamb meat: Effect of homogenization speed, comparison with myofibrillar fragmentation index and its relationship with shear force. **Meat Science**, v. 82, n. 4, p. 425-431.

Khan, M. I., Jung, S., Nam, K. C., & Jo (2016). Postmortem aging of beef with a special reference to the dry aging. **Korean journal for food science of animal resources**, v. 36, n. 2, p. 159.

Koch, R.M.; Swinger, L.A.; Chambers, Gregory, D.K.E. (1963). Efficiency of feed use in beef cattle. **Journal of Animal Science**, Savoy, v. 22, p. 486-494.

Köhler, N., Rose, T. D., Falk, L., & Pauling, J. K (2021). Investigating global lipidome alterations with the lipid network explorer. **Metabolites**, 11(8), 488.

Lana, Alessandro; Zolla, Lello (2016). Proteolysis in meat tenderization from the point of view of each single protein: A proteomic perspective. **Journal of Proteomics**, v. 147, p. 85-97.

Lancaster, P. A., Carstens, G. E., Ribeiro, F. R. B., Tedeschi, L. O., & Crews Jr, D. H (2009). Characterization of feed efficiency traits and relationships with feeding behavior and ultrasound carcass traits in growing bulls. **Journal of animal science**, v. 87, n. 4, p. 1528-1539.

Lanna, D. P. D. et al (2011). Ração de Lucro Máximo—RLM 3.2. 1.

Maranzana, E., Barbero, G., Falasca, A., Lenaz, G., & Genova, M. L. (2013). Associação de supercomplexos respiratórios mitocondriais limita produção de espécies reativas de oxigênio do complexo I. **Antioxidants & redox signaling**, v. 19, n. 13, p. 1469-1480.

Mateus, K. A., Dos Santos, M. R., Viana, L. R., Camillo, D. M., & Kessler, J. D. (2018) Período de maturação promove alterações dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da carne bovina submetida a vácuo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 4, p. 599-602.

McDonagh, M. B., Herd, R. M., Richardson, E. C., Oddy, V. H., Archer, J. A., & Arthur, P. F. (2001). Meat quality and the calpain system of feedlot steers following a single generation of divergent selection for residual feed intake. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 41, n. 7, p. 1013-1021

Meale, S. J., Morgavi, D. P., Cassar-Malek, I., Andueza, D., Ortigues-Marty, I., Robins, R. J. (2017). Exploration of biological markers of feed efficiency in young bulls. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 65, n. 45, p. 9817-9827.

Mejia, Edgard M.; Hatch, Grant M. (2016). Mitochondrial phospholipids: role in mitochondrial function. **Journal of bioenergetics and biomembranes**, v. 48, p. 99-112.

Molenaar, M. R., Jeucken, A., Wassenaar, T. A., van de Lest, C. H., Brouwers, J. F., & Helms, J. B. (2019). LION/web: a web-based ontology enrichment tool for lipidomic data analysis. **Gigascience**, v. 8, n. 6, p. giz061.

Montanholi, Y. R., Haas, L. S., Swanson, K. C., Coomber, B. L., Yamashiro, S., & Miller, S. P., (2017). Liver morphometrics and metabolic blood profile across divergent phenotypes for feed efficiency in the bovine. **Acta Veterinaria Scandinavica**, v. 59, p. 1-11.

Montanholi, Y. R., Swanson, K. C., Schenkel, F. S., McBride, B. W., Caldwell, T. R., & Miller, S. P., (2009). On the determination of residual feed intake and associations of infrared thermography with efficiency and ultrasound traits in beef bulls. **Livestock Science**, v. 125, n. 1, p. 22-30.

Montelli, N. L. L., Alvarenga, T. I. R. C., Almeida, A. K., Alvarenga, F. A. P., Furusho-Garcia, I. F., Greenwood, P. L., & Pereira, I. G. (2021). Associations of

feed efficiency with circulating IGF-1 and leptin, carcass traits and meat quality of lambs. **Meat science**, v. 173, p. 108379.

Moraes, G. F. D.; Abreu, L. R. A.; Ferreira, I. C.; Pereira, I. G (2016). Genetic analysis of residual feed intake adjusted for fat and carcass and performance traits in a Nellore herd. **Ciência Rural**, v. 47, n. 2, p. 20151505.

Mota, L. F. M., Bonafé, C. M., Alexandre, P. A., Santana, M. H., Novais, F. J., Toriyama, E., Pires, A. V., Silva, S., Leme, & Fukumasu, H (2017). Circulating leptin and its muscle gene expression in Nellore cattle with divergent feed efficiency. **Journal of animal science and biotechnology**, v. 8, p. 1-5.

Mukiibi, R., Johnston, D., Vinsky, M., Fitzsimmons, C., Stothard, P., Waters, S. M., & Li, C (2020) Bovine hepatic miRNAome profiling and differential miRNA expression analyses between beef steers with divergent feed efficiency phenotypes. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 19309.

Mukiibi, R., Vinsky, M., Keogh, K. A., Fitzsimmons, C., Stothard, P., Waters, S. M., & Li, C (2018). Transcriptome analyses reveal reduced hepatic lipid synthesis and accumulation in more feed efficient beef cattle. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 7303.

Nascimento, M. L., Souza, A. R. D. L., Chaves, A. S., Cesar, A. S. M., Tullio, R. R., Medeiros, S. R., G.B. Mourão, A.N. Rosa, G.L.D. Feijó, M.M. Alencar & Lanna, D. P. D (2016). Feed efficiency indexes and their relationships with carcass, non-carcass and meat quality traits in Nellore steers. **Meat science**, v. 116, p. 78-85.

Oliveira, P. R. O., Oliveira, M. V. M., Bonin, M. N., Avalo, S. P., Cancio, P. F., Nascimento, J. D., & Oliveira, D. M (2021). Carcass and meat characteristics of feedlot finished nelore cattle and their crossbreeds in the Brazilian Pantanal. **Livestock Science**, v. 244, p. 104360.

O'quinn, T. G., Brooks, J. C., Polkinghorne, R. J., Garmyn, A. J., Johnson, B. J., Starkey, J. D., & Miller, M. F. (2012). Consumer assessment of beef strip loin steaks of varying fat levels. **Journal of Animal Science**, v. 90, n. 2, p. 626-634.

Pearce, K. L., Rosenvold, K., Andersen, H. J., & Hopkins, D. L. (2011) Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes—A review. **Meat science**, v. 89, n. 2, p. 111-124.

Pikul, J.; Leszczynski, D. E.; Kummerow, F. A (1989). Evaluation of three modified TBA methods for measuring lipid oxidation in chicken meat. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 37, n. 5, p. 1309-1313.

Pinotti, L.; Baldi, A.; Dell'orto (2002), V. Comparative mammalian choline metabolism with emphasis on the high-yielding dairy cow. **Nutrition research reviews**, v. 15, n. 2, p. 315-332.

Pulina, G., Acciaro, M., Atzori, A. S., Battacone, G., Crovetto, G. M., Mele, M., Pirlo, G., & Rassu, S. P. G (2021). Animal board invited review–Beef for future: technologies for a sustainable and profitable beef industry. **Animal**, v. 15, n. 11, p. 100358.

Ramos, P. M., Scheffler, T. L., Beline, M., Bodmer, J., Gerrard, D. E., & Silva, S. L. (2023). Challenges and opportunities of using Bos indicus cattle to meet consumers' demand for quality beef. **Meat Science**, p. 109375.

Robinson, D.L.; Oddy, V.H (2004). Genetic parameters for feed efficiency, fatness, muscle area and feeding behaviour of feed lot finished beef cattle. **Livestock Production Science**, Amsterdam, v. 90, n. 2/3, p. 255-270.

Roça, R. O. Propriedades da carne. Retrieved 06.02.2009: 2011.Faculdade de Ciências agrônômicas - UNESP.

Sanchez-Gurmaches, J., Tang, Y., Jespersen, N. Z., Wallace, M., Calejman, C. M., Gujja, S., Li, H., Yvonne, J. K., Wolfrum, C., Metallo, C., Søren, N., Guertin, D. A , (2018). Brown fat AKT2 is a cold-induced kinase that stimulates ChREBP-mediated de novo lipogenesis to optimize fuel storage and thermogenesis. **Cell metabolism**, v. 27, n. 1, p. 195-209. e6.

Santana, M. H. A., Rossi Jr, P., Almeida, R., & Cucco, D. C (2012). Feed efficiency and its correlations with carcass traits measured by ultrasound in Nellore bulls. **Livestock Science**, v. 145, n. 1-3, p. 252-257.

Shackelford, S. D.; Wheeler, T. L.; Koohmaraie, Mohammad (1999). Evaluation of slice shear force as an objective method of assessing beef longissimus tenderness. **Journal of animal science**, v. 77, n. 10, p. 2693-2699.

Shahrai, N. N., Babji, A. S., Maskat, M. Y., Razali, A. F., & Yusop, S. M (2021). Effects of marbling on physical and sensory characteristics of ribeye steaks from four different cattle breeds. **Animal bioscience**, v. 34, n. 5, p. 904.

Smith, S. N., Davis, M. E., & Loerch, S. C (2010). Residual feed intake of Angus beef cattle divergently selected for feed conversion ratio. **Livestock Science**, v. 132, n. 1-3, p. 41-47.

Taiwo, G., Idowu, M. D., Wilson, M., Pech-Cervantes, A., Estrada-Reyes, Z. M., & Ogunade, I. M (2022). Residual feed intake in beef cattle is associated with differences in hepatic mRNA expression of fatty acid, amino acid, and mitochondrial energy metabolism genes. **Frontiers in Animal Science**, v. 3, p. 828591.

Thompson, John Mitchell (2004). The effects of marbling on flavour and juiciness scores of cooked beef, after adjusting to a constant tenderness. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 44, n. 7, p. 645-652.

van der Veen, J. N., Kennelly, J. P., Wan, S., Vance, J. E., Vance, D. E., & Jacobs, R. L. (2017) The critical role of phosphatidylcholine and phosphatidylethanolamine metabolism in health and disease. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes**, v. 1859, n. 9, p. 1558-1572.

Van Meer, Gerrit; Voelker, Dennis R.; Feigenson, Gerald W (2008). Membrane lipids: where they are and how they behave. **Nature reviews Molecular cell biology**, v. 9, n. 2, p. 112-124.

Vesga, D. A., Torres, R. N., Moreira, J. B., Granja-Salcedo, Y. T., Neto, O. R. M., Chardulo, L. A. L., Nair, M, N., Carvalho, P, H., & Baldassini, W. A (2024). Performance, nutrient utilization and meat quality traits in *Bos indicus* cattle: a meta-analysis examining the effect of residual feed intake. **Tropical Animal Health and Production**, v. 56, n. 6, p. 214.

Walker, A. K., Jacobs, R. L., Watts, J. L., Rottiers, V., Jiang, K., Finnegan, D. M., Shioda, T., Näär, A. M. (2011). A conserved SREBP-1/phosphatidylcholine feedback circuit regulates lipogenesis in metazoans. **Cell**, 147(4), 840-852.

Watson, R.; Gee, A.; Polkinghorne, R.; Porter, M (2008). Consumer assessment of eating quality—Development of protocols for Meat Standards Australia (MSA) testing. **Aust. J. Exp. Agric.**, 48, 1360–1367

Wheeler, T. L., Cundiff, L. V., & Koch, R. M (1994). Effect of marbling degree on beef palatability in *Bos taurus* and *Bos indicus* cattle. **Journal of animal Science**, v. 72, n. 12, p. 3145-3151.

Wheeler, T. L.; Shackelford, S. D.; Koohmaraie, Mohammad (1996). Sampling, cooking, and coring effects on Warner-Bratzler shear force values in beef. **Journal of Animal Science**, v. 74, n. 7, p. 1553-1562.

Wu, F. Y.; Smith, S. B (1987). Ionic strength and myofibrillar protein solubilization. **Journal of Animal Science**, v. 65, n. 2, p. 597-608.

Xie, Z., Ferreira, C. R., Virequ, A. A., & Cooks, R. G (2021). Multiple reaction monitoring profiling (MRM profiling): Small molecule exploratory analysis guided by chemical functionality. **Chemistry and Physics of Lipids**, v. 235, p. 105048.

Zorzi, K., Bonilha, S. F. M., Queiroz, A. C., Branco, R. H., Sobrinho, T. L., & Duarte, M. S (2013). Meat quality of young Nellore bulls with low and high residual feed intake. **Meat Science**, v. 93, n. 3, p. 593-599.