



ANGÉLICA SOUSA GUIMARÃES

**ACCELERATED AGING BY THE FREEZING/THAWING
PROCESS: EFFECTS ON THE TECHNOLOGICAL AND
SENSORIAL QUALITY OF WET- AND DRY-AGED BEEF**

**LAVRAS – MG
2023**

ANGÉLICA SOUSA GUIMARÃES

**ACCELERATED AGING BY THE FREEZING/THAWING PROCESS: EFFECTS
ON THE TECHNOLOGICAL AND SENSORIAL QUALITY OF WET- AND DRY-
AGED BEEF**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Ciência dos
Alimentos para a obtenção do título de
Doutora.

Prof. Dr. Eduardo Mendes Ramos
Orientador

Profa. Dra. Vanelle Maria da Silva
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA,
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Guimarães, Angélica Sousa.

Accelerated aging by the freezing/thawing process: effects on the technological and sensorial quality of wet- and dry-aged beef / Angélica Sousa Guimarães. - 2023.

125 p.: il.

Orientador(a): Eduardo Mendes Ramos.

Coorientador(a): Vanelle Maria da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Maturação úmida e maturação à seco. 2. Congelamento e descongelamento. 3. Perfis químicos e sensorial. I. Ramos, Eduardo Mendes. II. da Silva, Vanelle Maria. III. Título.

ANGÉLICA SOUSA GUIMARÃES

**ACCELERATED AGING BY THE FREEZING/THAWING PROCESS: EFFECTS
ON THE TECHNOLOGICAL AND SENSORIAL QUALITY OF WET- AND DRY-
AGED BEEF**

**MATURAÇÃO ACELERADA PELO PROCESSO DE CONGELAMENTO/
DESCONGELAMENTO: EFEITOS NA QUALIDADE TECNOLÓGICA E
SENSORIAL DA CARNE BOVINA MATURADA A VÁCUO E À SECO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 16 de junho de 2023.

Dra. Vanelle Maria da Silva	UFV
Dra. Alcinéia de Lemos Souza Ramos	UFLA
Dr. Robledo de Almeida Torres Filho	UFV
Dr. Paulo Rogério Fontes	UFV

Prof. Dr. Eduardo Mendes Ramos
Orientador (UFLA)

**LAVRAS – MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por cuidar especialmente de mim em todos os momentos da minha vida, por me permitir recomeçar a cada novo amanhecer, renovando meus sonhos e mostrando que toda grande espera é o Seu cuidado agindo em mim. À Santa Rita de Cássia, pela sua intercessão e pelas inúmeras graças concedidas em minha vida.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), especialmente, ao Programa de Pós-graduação em Ciência dos Alimentos, ao Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA)/ESAL, pela oportunidade e contribuição na minha formação acadêmica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; processo 430206/2016-0) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG; CVZ APQ 02904-17) pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa e ao CNPq pela concessão da bolsa de Doutorado (processo GD 144541/2019-0), agradeço.

Aos meus pais, Osvaldo e Marli, e meu irmão Igor, pelo amor, apoio incondicional e genuíno em minha vida, dividindo comigo todos os meus projetos pessoais e profissionais. Muito obrigada por não medirem esforços e por se fazerem sempre presentes. Amo muito vocês! Muito obrigada por cada gesto acolhedor e de puro amor!

À minha irmã Jéssica, por todo amor, amizade e cumplicidade em minha vida e por ser meu exemplo e inspiração. Quando tudo parece estar fora de controle, é em você que encontro abraço aconchegante e fortaleza para seguir em frente. Admiro sua persistência e resiliência! Estarei sempre ao seu lado! Te amo!

Ao meu orientador, professor Eduardo Mendes Ramos, pela oportunidade da orientação, pelo apoio e possibilidades durante minha formação profissional. Muito obrigada pela amizade, por confiar no meu trabalho, pelos ensinamentos diários e por me permitir fazer parte de sua equipe. É gratificante vivenciar e saber que existem profissionais tão dedicados, motivados e humanos como você.

A minha coorientadora, Vanelle Maria da Silva, por toda contribuição e dedicação ao nosso trabalho. Agradeço por estar sempre disposta a colaborar e por todo ensinamento.

À professora Alcinéia de Lemos Souza Ramos, pelo apoio e acolhimento diário, pelos ensinamentos, incentivos e pela contribuição ao trabalho.

Aos membros Paulo Rogério Fontes e Robledo de Almeida Torres Filho, pela gentileza em participarem da banca, colaborando e enriquecendo o trabalho.

Aos técnicos e funcionários do DCA/ESAL, em especial, à Ana Alice, Felipe, Pâmela, Paloma, Creuza e, também, a técnica Lidiany do Departamento de Química (DQI), pela disponibilidade e interesse em auxiliar nas análises. Ao laboratório de Análise Sensorial, pelas experiências profissionais e pessoais, em especial, à professora Ana Carla Marques Pinheiro.

A toda minha equipe do LabCarnes, ou melhor dizendo Família Labcarnes, agradeço pela acolhida, pelas risadas, vivências, experiências, pelos conhecimentos e profissionalismo. Pelos momentos de dificuldades, mas também pelos momentos prazerosos que passamos juntos e pelas deliciosas e divertidas confraternizações. Em especial, agradeço as minhas amigas e amigos Bruna, Lorrany, Ana Paula, Thainá, Vanúzia, Elídio, Márcia, Adelaide, Marielle, Marcelo, Gabriel por toda ajuda e apoio!

As minhas amigas Lorena e Ana Beatriz, pela amizade e suporte ao decorrer da minha caminhada.

Aos meus queridos avaliadores pela colaboração, disponibilidade e participação ao decorrer do experimento.

Enfim, a todos os meus amigos e familiares que de forma direta ou indireta compartilharam desta jornada.

MUITO OBRIGADA!

“Mesmo quando tudo parece desabar, cabe a mim decidir entre rir ou chorar, ir ou ficar, desistir ou lutar, porque descobri, no caminho incerto da vida, que o mais importante é o decidir.”

(Cora Coralina)

RESUMO

Este estudo avaliou os efeitos do congelamento/descongelamento como forma de acelerar o processo de maturação, em diferentes sistemas (*wet aging*, WA, e *dry aging*, DA) da carne bovina de animais da raça Nelore e do cruzamento F1 Nelore x Angus (F1Angus). No primeiro experimento, contrafilés não congelados e congelados/descongelados de animais Nelore foram maturadas por 0, 14 e 28 dias em ambos os sistemas (WA e DA) e avaliados quanto à qualidade tecnológica e microbiológica e ao perfil de compostos voláteis (VOC). O congelamento/descongelamento proporcionou maiores perdas de peso ($P<0.05$) em ambos os sistemas de maturação, mas as perdas foram compensadas pela redução do tempo de maturação para 14 dias no sistema DA, diferentemente do sistema WA. Além disso, as amostras congeladas/descongeladas apresentaram ($P<0.05$) maior contagem de bactérias totais (5,49 logs UFC/g), mas sem comprometer a qualidade microbiológica, e maior taxa de amaciamento (menores valores de índice de fragmentação e força de cisalhamento e maior maciez sensorial). Por outro lado, o congelamento/descongelamento proporcionou ($P<0.05$) menor intensidade da cor (menor C^*), com maior instabilidade do pigmento de mioglobina e, logo, oxidação a metamioglobina, sendo as amostras DA mais escuras (menor L^*). No segundo experimento, contrafilés de animais Nelore e F1Angus foram maturados à seco no processo convencional (não congelados) por 28 dias (NF28d) e no processo acelerado (congelado/descongelado) por 14 dias (FT14d), e avaliados quanto à qualidade tecnológica, sensorial (perfil descritivo *check-all-that-apply* – CATA – e aceitação) e aos perfis de compostos voláteis (VOC), de ácidos graxos (AG) e de aminoácidos (AA; no exsudato de cozimento). O processo de maturação acelerada modificou os perfis de VOC, AA e AG, aprimorando o sabor e o aroma. Amostras Nelore FT14d e F1Angus FT14d e NF28d foram relacionadas aos VOC acetóina, 2-metilbutanal e 3-metilbutanal e a uma maior variedade de aminoácidos no exsudato. Nas amostras maturadas de Nelore e F1Angus os consumidores perceberam diferenças ($P<0.05$) em 10 características sensoriais que contribuíram para discriminá-las no CATA, principalmente, em relação aos atributos de aparência e de textura. A carne de Nelore FT14d foi similar as carnes F1Angus FT14d e NF28d para o aspecto global, as quais foram igualmente aceitas pelos consumidores, com notas entre “gostei moderadamente (7)” a “gostei muito (8)”. Concluiu-se que o processo acelerado de maturação no sistema DA é vantajoso, pois permite alcançar a maciez e o perfil de sabor desejado em um menor tempo, sem aumentar os custos com as perdas de massa ou prejudicar a segurança microbiológica. Além disso, o processo de maturação acelerada permite melhorar as características sensoriais de carnes de animais com menores teor de marmoreio (Nelores), equiparando-as a carnes de animais F1Angus, sendo uma alternativa viável e competitiva para comercialização.

Palavras-chaves: Maturação a vácuo. Maturação à seco. *Check-all-that-apply* (CATA). Perfil de voláteis. Perfil de aminoácidos. Análise de múltiplos fatores.

ABSTRACT

This study evaluated the effects of freezing/thawing as a way of accelerating the maturation process, in different systems (wet aging, WA, and dry aging, DA) of beef from Nelore animals and the F1 Nelore x Angus cross (F1Angus). In the first experiment, non-frozen and frozen/thawed strip loins steaks from Nelore animals were matured for 0, 14 and 28 days in both systems (WA and DA) and evaluated for technological and microbiological quality and volatile compounds (VOC) profile. Freezing/thawing provided greater weight losses ($P<0.05$) in both maturation systems, but the losses were compensated by reducing the maturation time to 14 days in the DA system, unlike the WA system. In addition, frozen/thawed samples showed ($P<0.05$) higher total bacteria count (5.49 logs CFU/g), but without compromising microbiological quality, and higher tenderness rate (lower values of fragmentation index and strength shear strength and greater sensory tenderness). On the other hand, freezing/thawing provided ($P<0.05$) lower color intensity (lower C^*), with greater instability of the myoglobin pigment and, therefore, oxidation to metmyoglobin, with DA samples being darker (lower L^*). In the second experiment, strip loins steaks from Nelore and F1Angus animals were dry-aged in the conventional process (not frozen) for 28 days (NF28d) and in the accelerated process (frozen/thawed) for 14 days (FT14d), and evaluated for technological quality, sensory (descriptive profile check-all-that-apply – CATA – and acceptance) and the profiles of volatile compounds (VOC), fatty acids (FA) and amino acids (AA; in the cooking exudate). The accelerated maturation process modified the VOC, AA and AG profiles, improving the flavor and aroma. Nelore FT14d and F1Angus FT14d and NF28d samples were related to VOCs acetoin, 2-methylbutanal and 3-methylbutanal and a greater variety of amino acids in the exudate. In mature samples of Nelore and F1Angus, consumers noticed differences ($P<0.05$) in 10 sensory characteristics that contributed to discriminate them in the CATA, mainly in relation to appearance and texture attributes. Nelore FT14d meat was similar to F1Angus FT14d and NF28d meat for the overall impression, which were equally accepted by consumers, with scores ranging from “I liked it moderately (7)” to “I liked it a lot (8)”. It was concluded that the accelerated maturation process in the DA system is advantageous, as it allows achieving the desired tenderness and flavor profile in a shorter time, without increasing costs with mass losses or impairing microbiological safety. In addition, the accelerated maturation process allows improving the sensory characteristics of meat from animals with less marbling (Nelores), matching them to meat from F1Angus animals, being a viable and competitive alternative for commercialization.

Keywords: Vacuum aging. Dry aging. Check-all-that-apply (CATA). Volatiles profile. Amino acid profile. Multifactor analysis.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1 - Interações entre as reações oxidativas.....	28
Figura 2 - Carne maturada à vácuo (maturação úmida – <i>wet aging</i>).....	29
Figura 3 - Processo de Maturação à Seco (<i>dry aging</i>).....	31
Figura 4 - Formação da camada protetora “crosta” na superfície da carne.....	35
Figura 5 - Processo de maturação à seco em embalagem (<i>Dry aging bag</i>).....	38

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1

Figure 1 - Effects of treatments (non-frozen and frozen/thawed) on the weight losses of strip loins from Nellore cattle during (A) wet-aging and (B) dry-aging.....	65
Figure 2 - Bi-plot principal component analysis (PCA) of volatile compounds in frozen/thawed and non-frozen muscles (<i>L. lumbarum</i>) from Nellore cattle during aging process (14 and 28 days) in different systems (DA = dry-aging; and WA = wet-aging).....	76

ARTIGO 2

Figura 1 - Cortes de contrafilés entre a 12 ^a e 13 ^a costelas para caracterização das carcaças de bovinos (A) Nelores e (B) cruzas F1 Angus x Nelore.....	87
Figura 2 - Perfil representativo das proteínas miofibrilares (separadas por 10% SDS-PAGE) do músculo bovino <i>L. lumbarum</i> de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) não-maturados e maturados à seco nos processos acelerado e convencional.....	98
Figura 3 - Análise de componentes principais (PCA) das características físico-químicas na carne (<i>L. lumbarum</i>) de animais Nelore e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).....	100
Figura 4 - Análise de componentes principais (PCA) do perfil de ácidos graxos na carne (<i>L. lumbarum</i>) de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).....	102
Figura 5 - Análise de componentes principais (PCA) do perfil de compostos orgânicos voláteis na (A) carne e no (B) exsudato de contrafilés (<i>L. lumbarum</i>) grelhados de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).....	106
Figura 6 - Análise de componentes principais (PCA) do perfil de aminoácidos no exsudato de contrafilés grelhados de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).....	109
Figura 7 - Representação das características sensoriais do teste <i>check-that-all-apply</i> (CATA) de contrafilés grelhados de animais Nelore e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturadas à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).....	111
Figura 8 - Projeções dos (A) quatro tratamentos (carnes de Nelores e F1Angus maturadas à seco, nos processos FT14d e NF28d) e das (B) variáveis ativas (VOC, AA, AG, CATA,) formadas pelas dimensões D1 e D2 do MFA global.....	114
Figura 9 - Representação das coordenadas dos pontos projetados dos grupos de variáveis do MFA global para as carnes da raça Nelore e F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturadas à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).....	118

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1

Table 1 - Effects of the aging system (S), treatment (T), and aging time (D) on the pH values, total bacteria count (TBC), fragmentation index (FI), cooking loss (CL), shear force (SF), and sensory tenderness (TENDER) and juiciness (JUICY) of muscles (<i>L. lumbrorum</i>) from Nelore cattle.....	66
Table 2 - Aging system and treatment × aging time effects on cooking loss (CL), sensory tenderness and juiciness and total bacteria count (TBC) of muscles (<i>L. lumbrorum</i>) from Nelore cattle.....	68
Table 3 - Effects of the aging system (S), treatment (T), and aging time (D) on the metmyoglobin reducing activity (MRA), oxygen consumption rate (OCR) and myoglobin chemical forms of muscles (<i>L. lumbrorum</i>) from Nelore cattle.....	72
Table 4 - Effects of the aging system (S), treatment (T), and aging time (D) on the CIE color indices of muscles (<i>L. lumbrorum</i>) from Nelore cattle.	73
Table 5 - Aging system and treatment × aging time effects on cooking loss (CL), sensory tenderness and juiciness and total bacteria count (TBC) of muscles (<i>L. lumbrorum</i>) from Nelore cattle.	74

ARTIGO 2

Tabela 1 - Lista de características por atributo da ficha CATA usada para caracterizar os diferentes tratamentos.	94
Tabela 2 - Características (média ± desvio padrão) de carcaça e da carne de contrafilés de animais da raça Nelore e F1 Angus x Nelore (F1Angus)	96
Tabela 3 - Características físicas, químicas e físico-químicas de bifês de contrafilés (<i>M. L. lumbrorum</i>) de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).	97
Tabela 4 - Perfil de ácidos graxos (% das áreas normalizadas) de contrafilés (<i>M. L. lumbrorum</i>) de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) e maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).....	101
Tabela 5 - Perfil de compostos voláteis (contagem de íons totais ×10 ⁴) da carne e do exsudato de contrafilés (<i>M. L. lumbrorum</i>) grelhados de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d)....	103
Tabela 6 - Perfil de aminoácidos (mg/g de proteína) de exsudatos de contrafilés (<i>M. L. lumbrorum</i>) grelhados de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).....	108
Tabela 7 - Pontuações (médias ± desvio-padrão) do teste de aceitação de contrafilés (<i>M. L. lumbrorum</i>) grelhados de animais Nelores cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).....	112
Tabela 8 - Coordenadas, contribuições dos fatores (%) e valores do cosseno ao quadrado (cos ²) dos grupos de variáveis pela Análise Fatorial Múltipla (MFA).....	113

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE.....	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Bovinocultura brasileira: evolução e tendências	15
2.2 Ciência do processo de maturação da carne bovina.....	16
2.2.1 Maciez	17
2.2.2 Sabor e aroma	19
2.2.3 Cor.....	25
2.3 Tipos de maturação	28
2.3.1 Maturação úmida.....	28
2.3.2 Maturação à seco	31
2.3.3 Maturação à seco em embalagens	37
2.4 Efeito do congelamento na maturação de carne bovina.....	39
2.5 Análise sensorial: uma ferramenta de avaliação do processo de maturação	44
3. CONSIDERAÇÕES GERAIS	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	56
ARTIGO 1	57
Effects of accelerated aging by the freezing/thawing process on the quality of Nellore wet- and dry-aged beef.....	57
ARTIGO 2	84
Perfis químicos e sensorial da carne bovina de Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore maturadas à seco pelo processo convencional e acelerado	84

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

A maturação da carne bovina tem se destacado mundialmente como um processo diferenciado, apresentando-se como uma alternativa para a produção de carnes de alta qualidade, conquistando o nicho da alta gastronomia dos produtos cárneos “gourmetizados”. Sua importância se deve ao aprimoramento dos atributos sensoriais da carne, conferindo maciez e suculência, além de sabores e aromas característicos. Todas estas alterações desejáveis ocorrem naturalmente pela atividade de proteases endógenas da carne *in natura*.

O processo de maturação é complexo, sendo realizado, principalmente, por dois métodos, que impactam diretamente no desenvolvimento das características sensoriais: maturação à seco (*dry aging*) e maturação à vácuo, ou úmida (*wet aging*). A maturação à seco consiste em manter a carne sem embalagem em condições de refrigeração com controle de tempo, temperatura, fluxo de ar e umidade relativa, enquanto na maturação úmida, a carne é maturada em embalagem à vácuo com tempo e temperatura de maturação controlados. Todavia, a maturação à seco tem sido considerada como de melhor qualidade sensorial por aprimorar e, ou, intensificar o sabor da carne, em razão da concentração de compostos químicos responsáveis pelo sabor à medida que ocorre maior perda de água durante o processo.

O perfil sensorial da carne maturada à seco é descrito como sabor de carne (*meaty*) mais intenso, umami, amanteigado, acastanhado, entre outros. Em contrapartida, a maturação úmida propicia o desenvolvimento de sabores indesejáveis com um tempo prolongado de maturação, identificados pelos descritores sangrento, metálico, amargo e azedo. Contudo, os resultados da literatura são inconsistentes e conflitantes quanto à descrição das características sensoriais, possivelmente, porque os consumidores estão familiarizados com a maturação úmida. Além disso, a intensidade e o desenvolvimento do sabor e do aroma também são dependentes de fatores como o tempo de maturação, raça animal, tipo de corte, entre outros. Sabe-se que quanto mais prolongada a maturação à seco, mais intensos e complexos os sabores se tornam.

Há indicações recentes de que o processo combinado de maturar carnes bovinas que foram previamente congeladas e descongeladas é eficaz na redução do tempo de amaciamento, porém pouco se tem conhecimento sobre os efeitos desta combinação no perfil sensorial descritivo e na aceitabilidade da carne, especialmente no sistema de maturação à seco. O congelamento e descongelamento são processos complexos que promovem alterações físicas e químicas diretamente relacionadas com a qualidade da carne bovina. Estas alterações

proporcionam efeitos positivos como o amaciamento da carne em decorrência da desnaturação e pela agregação de proteínas, mas por outro lado, também gera efeitos negativos que incluem descoloração com a oxidação da mioglobina, oxidação lipídica e presença de exsudato, os quais, podem ser minimizados pela combinação dos processos de congelamento/descongelamento e maturação.

Somando-se a isso, existem poucos trabalhos que descrevem os atributos sensoriais e componentes aromáticos de carnes de animais zebuínos maturadas à seco, uma vez que, o processo de maturação à seco normalmente é realizado em carnes de animais taurinos (*Bos taurus*), que possuem maior teor de gordura de marmoreio (intramuscular), o que garante produtos com sabor e suculência característicos. Mas, por outro lado, o interesse em aplicar o processo de maturação à seco em carnes de animais zebuínos (*Bos indicus*) se justifica pelo relato de que o processo de maturação à seco favorece a qualidade sensorial desta carne. Também pelo fato de o rebanho bovino brasileiro ser majoritariamente constituído por este genótipo, em especial pela raça Nelore e seus cruzamentos, e que apresentam maior demanda dos consumidores em função do seu menor custo quando comparada a carne de animais taurinos.

O conhecimento do perfil sensorial descritivo e a percepção do consumidor por carnes maturadas em diferentes processos de maturação é crucial para o setor cárneo, determinando a tomada de decisão de compra e agregação de valor ao produto. Desse modo, a análise sensorial aliada às técnicas para identificação e quantificação dos compostos químicos e dos parâmetros de textura, relacionados ao sabor e à maciez, permitem maximizar a qualidade da carne bovina maturada, colocando-a em nicho de mercado da alta gastronomia.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicação do congelamento/descongelamento como forma de acelerar os processos de maturação úmida e à seco, analisando seus efeitos sobre a qualidade tecnológica, microbiológica e sensorial da carne bovina de animais da raça Nelore. Também objetivou-se avaliar os efeitos do processo acelerado pelo congelamento no perfil sensorial e aromático de carnes bovinas de animais da raça Nelore e do cruzamento F1 Nelore x Angus (F1Angus) durante a maturação à seco.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Bovinocultura brasileira: evolução e tendências

A indústria de carnes mundialmente apresenta uma enorme importância econômica, sendo a maior em geração de empregos, recursos e capital (FERRAZ; FELÍCIO, 2010; RAMOS; GOMIDE, 2017). Neste cenário, o Brasil ocupa uma posição de destaque na produção e no comércio de carne bovina no mundo, devido a um processo de desenvolvimento organizado que garante a produtividade, qualidade, competitividade e abrangência de mercado (GOMES; FEIJÓ; CHIARI, 2017).

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes (ABIEC, 2022), o Brasil está entre os países com os maiores rebanhos (196,47 milhões de cabeças bovinas) e produtores de carne (9,71 milhões de toneladas de carne bovina) no mundo em 2021, sendo que, desse total, o mercado interno movimentou 74,49% da produção (7,2 milhões de toneladas de carne bovina), responsável por um consumo *per capita* de 34,3 kg/ano e, somente, 25,51% da carne é destinada à exportação (2,4 milhões de toneladas). As maiores concentrações de bovinos em 2021 se encontraram no Centro-Oeste (35,39%) do país, aproximadamente 69,6 milhões de cabeças, com destaque para os estados de Mato Grosso (14,15%), Mato Grosso do Sul (11,21%) e Goiás (10,03%), enquanto outra parte considerável do rebanho está localizada no Sudeste (18,25%), aproximadamente 35,9 milhões de cabeças, sendo que Minas Gerais (11,33%) apresentou o segundo maior rebanho.

Esta expansão da produção e qualidade da carne bovina brasileira é sustentada por avanços importantes, podendo citar, melhoria nos sistemas de produção e na organização da cadeia produtiva, com adoção de tecnologias nos eixos de alimentação (suplementação alimentar), manejo (semiconfinamento, confinamento), saúde animal (prevenção e controle de patologias), melhoramento genético dos animais, entre outros. No entanto, a atividade pecuarista tem sido cada vez mais estimulada a buscar a melhoria na qualidade da carne, a fim de atender às exigências do mercado consumidor (GOMES; FEIJÓ; CHIARI, 2017).

O rebanho bovino brasileiro é predominantemente constituído por raças zebuínas, destacando a raça Nelore (*Bos indicus*) e seus cruzamentos, que tem origem na Índia e foi introduzida no Brasil na primeira metade do século XIX, por volta de 1868, e no século XX (ACNB, 2023).

Segundo a Associação dos Criadores de Nelore do Brasil (ACNB), estima-se que 80% do gado de corte do país é nelore ou anelorado, devido à sua produtividade, resistência natural

às doenças e parasitas e, por tolerar as condições tropicais (ACNB, 2023). No entanto, a indústria brasileira de carne bovina enfrenta limitações relacionadas à qualidade da carne, em consequência do alto nível dos genes *Bos indicus* que diminui a maciez da carne, sendo indicado menos de 25% de contribuição genética de *Bos indicus* em raças combinadas (CARVALHO et al., 2014; HADDAD et al., 2022; RODRIGUES et al., 2020).

A maciez é um atributo de textura extremamente importante para o consumidor em relação à qualidade de carne e, por isso, o fato de o gado Nelore apresentar uma menor maciez ocasiona a desvalorização da carne bovina brasileira. Neste sentido, a estratégia do cruzamento com raças europeias, por exemplo, *Bos taurus* ou taurinos como Angus tem sido constantemente adotada, devido ao fato da carne de animais *Bos taurus* apresentarem melhor qualidade quanto à maciez. Porém, os taurinos não se adaptaram à climas tropicais e subtropicais do Brasil, sendo criados principalmente no sul do país por ser uma região temperada. Por isso, quanto maior a porcentagem de contribuição genética de taurinos, menor a adaptabilidade ao ambiente tropical, principalmente aos ectoparasitas, impactando diretamente nos custos de produção (CARVALHO et al., 2014; FERRAZ; FELÍCIO, 2010; HADDAD et al., 2022; RODRIGUES et al., 2020).

Neste contexto, o processo de maturação é uma das alternativas para a produção de carnes bovinas de alta qualidade, resultando em atributos sensoriais aprimorados da carne, especialmente sabor, aroma e maciez e, dessa forma, conquistando um campo da alta gastronomia que são os produtos cárneos gourmertizados.

2.2 Ciência do processo de maturação da carne bovina

O processo de maturação consiste em diversas alterações bioquímicas, físicas e físico-químicas que ocorrem naturalmente no músculo esquelético *post mortem* que conduzem ao amaciamento da carne *in natura*, por meio do armazenamento refrigerado (0 a 4 °C), acima do seu ponto de congelamento (-1,5 °C). Além disso, a maturação também aprimora os atributos sensoriais, conferindo sabor e aroma únicos e característicos, devido a alterações nas concentrações de precursores e no desenvolvimento de compostos odoríferos provenientes de reações químicas e enzimáticas (BISCHOF et al., 2022; HADDAD et al., 2022; RESCONI et al., 2018; RODRIGUES, 2017).

2.2.1 Maciez

Alterações *post mortem* na conversão do músculo em carne têm uma profunda influência no amaciamento em carnes. No momento em que o equilíbrio homeostático é perdido, tem-se início as respostas que desencadeiam as alterações com o gradual esgotamento do ATP (Adenosina trifosfato), indicando o início do *rigor mortis*, quando o tecido começa a obter energia pelo metabolismo anaeróbico, que favorece a produção de ácido lático com redução do pH para, aproximadamente, 5,9. Ao final do processo de transformação do músculo em carne, tem-se o estabelecimento do *rigor mortis*, em que o tecido muscular cuja natureza flexível e elástica é transformada em um estado mais rígido e inextensível, pela formação de ligações permanentes entre as proteínas miofibrilares, os filamentos de miosina e de actina. Outras proteínas que também desempenham papel nesta interação são as chamadas proteínas estruturais, dentre elas a desmina, titina, nebulina, troponinas e tropomiosinas (FERREIRA, 2018; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; LANA; ZOLLA, 2016; RAMOS; GOMIDE, 2017).

Estas proteínas altamente organizadas estão presentes dentro de uma estrutura chamada de sarcômero, que é a unidade funcional e contrátil da fibra muscular. O sarcômero é constituído por uma banda A e duas metades de banda I, onde ocorre o processo de contração e relaxamento muscular. A banda A é formada pelos miofilamentos finos (actina) e grossos (miosina) enquanto a banda I, contendo miofilamentos finos (actina), é dividida em duas meias bandas pela linha Z. A linha Z interliga os miofilamentos de actina de cada lado do sarcômero. Na contração muscular, os miofilamentos finos deslizam sobre os miofilamentos grossos, ocasionando o encurtamento do sarcômero e, conseqüentemente, tem-se a resistência da carne com a diminuição da sua maciez pela formação de ligações permanentes entre os filamentos de actina e miosina (AROEIRA, 2014; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; LANA; ZOLLA, 2016; RAMOS; GOMIDE, 2017; RODRIGUES, 2017).

Durante a maturação, ocorre a degradação dessas proteínas miofibrilares pela atividade de enzimas proteolíticas endógenas e, conseqüentemente, a perda desta integridade estrutural muscular com o amaciamento da carne. Para que um sistema de proteases esteja envolvido no processo de proteólise *post mortem* e, portanto, no amaciamento da carne, deve atender a critérios básicos como: i) a protease deve ser endógena às células musculares esqueléticas; ii) em condições ideais, devem ser capazes de reproduzir as alterações *post mortem* nas miofibrilas *in vitro*; e, iii) ter acesso às miofibrilas no tecido. Dois principais sistemas enzimáticos estão envolvidos na maturação *post mortem*: as calpaínas e as catepsinas

lisossomais. Além disso, outros sistemas que têm despertado a atenção em relação à degradação da estrutura muscular são as proteassomas ou Complexo Multicatalítico de Proteases (MCP), que atuam sobre peptídeos, e as caspases, que estão envolvidas com o processo de apoptose celular (CHOE; STUART; KIM, 2016; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; HULÁNKOVÁ et al., 2018; KEMP et al., 2010; KOOHMARAIE; GEESINK, 2006; LANA; ZOLLA, 2016; RAMOS; GOMIDE, 2017).

As calpaínas são proteases de cisteína presentes no sarcoplasma, cuja atividade é dependente de cálcio, com atividade ótima em pH neutro entre 7,0 e 7,5 e temperatura entre 10 e 25 °C. O complexo enzimático das calpaínas é composto por várias isoformas, sendo duas isoformas as mais bem caracterizadas, e um inibidor específico, as calpastatinas. As duas enzimas dependentes de Ca^{+2} , a μ -calpaína (calpaína I) e m-calpaína (calpaína II), diferem quanto a quantidade de Ca^{+2} requerida para atuarem, sendo que a μ -calpaína requer quantidades micromolares de Ca^{+2} (5 a 50 μM), enquanto que a m-calpaína requer quantidades milimolares (~ 1mM). Outra protease do complexo identificada recentemente é denominada de p94 ou calpaína III, exclusiva do músculo esquelético (GOMIDE; RAMOS; FONTES, 2013; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; LANA; ZOLLA, 2016; RAMOS; GOMIDE, 2017).

Essas proteases apresentam especificidade limitada e, portanto, não degradam as proteínas miofibrilares principais, como a miosina e a actina, promovendo a degradação das proteínas estruturais desmina, titina, nebulina, tropomiosina, troponinas, proteína C e a linha Z (LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; RAMOS; GOMIDE, 2017).

No entanto, apesar da presença de Ca^{+2} ativar as calpaínas, também permite sua inibição pela interação com a calpastatina, que é uma proteína cálcio-dependente existente no sarcoplasma, sendo que a quantidade de Ca^{+2} requerido para a formação do complexo calpaína-calpastatina é, aproximadamente, similar ou menor à exigida para a ativação das calpaínas. Sua atividade biológica indica uma correlação negativa com a maciez da carne maturada, podendo a atividade das calpastatinas, determinada 24 horas pós-abate, prever a maciez, ou seja, a proporção entre as atividades das calpastatinas e calpaínas determina a velocidade da atividade proteolítica e de maturação da carne. A quantidade de calpaínas e de calpastatinas no músculo depende de inúmeros fatores, como espécies animais, raça, tipo de músculo e sua atividade, concentração sarcoplasmática de Ca^{+2} , temperatura e pH (BHAT et al., 2018; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; LANA; ZOLLA, 2016; NOWAK, 2011; RAMOS; GOMIDE, 2017).

Segundo Ramos e Gomide (2017), animais com alto teor de calpastatina produzem carnes menos macias, mesmo com um período de maturação correspondente a 14 dias. Diante disso, a reduzida proteólise das proteínas miofibrilares, juntamente com a maior concentração das calpastatinas em animais *Bos indicus*, quando comparados com *Bos taurus*, tem sido apontado como um fator determinante para justificar a diferença de maciez das carnes.

Quanto às catepsinas, compreendem uma ampla variedade de proteases contidas nos lisossomos, no entanto, existem aproximadamente de 15 a 20 identificadas, das quais apenas oito são expressas em células musculares, sendo sete cisteína-proteases (catepsinas B, E, F, H, K, L e S), pertencentes à família das papaínas, e uma aspartil-protease (catepsina D). São consideradas proteases ácidas por terem atuação máxima em pH mais baixo, menor que 6,0, sendo muito ativas na degradação do disco Z, troponinas, proteína C, actina, miosina, tropomiosina, nebulina e α -actinina. Além disso, destaca-se que diferentemente das calpaínas, as catepsinas além de degradarem as proteínas miofibrilares, também agem sobre as proteínas do tecido conectivo, principalmente sobre as ligações cruzadas do colágeno, solubilizando-o (GOMIDE; RAMOS; FONTES, 2013; LANA; ZOLLA, 2016; RAMOS; GOMIDE, 2017).

Por último, os dois outros sistemas relacionados com a maciez da carne maturada são as proteassomas e as caspases. As proteassomas são um complexo multicatalítico de proteases envolvidas na regulação de diversos processos celulares por meio da degradação de proteínas. O proteassoma 26S é composto por uma subunidade reguladora (19S) e uma estrutura multicatalítica (20S) que contém as atividades da enzima proteolítica. O proteassoma 20S, denominado de Complexo Multicatalítico de Proteases (MCP), é o núcleo catalítico desses complexos de proteassoma. São atuantes principalmente sobre peptídeos, no entanto, não estão envolvidos na proteólise inicial e, diante disso, sua intervenção na maciez ainda não está completamente elucidada. Quanto as caspases, são proteases de cisteína-aspártico que hidrolisam proteínas associadas ao mecanismo de apoptose no músculo *post mortem*, sendo responsáveis por mudanças bioquímicas e estruturais logo após o abate e, conseqüentemente, contribuem para o processo de amaciamento da carne (LANA; ZOLLA, 2016; RODRIGUES, 2017; RAMOS; GOMIDE, 2017).

2.2.2 Sabor e aroma

A maturação é relatada na literatura como um processo diferenciado por desempenhar um papel fundamental no estabelecimento da qualidade sensorial da carne bovina, promovendo além do amaciamento da carne, como citado anteriormente, melhorias

consideráveis nos atributos sensoriais relacionados ao sabor, suculência e aroma, sendo que todas estas alterações ocorrem principalmente pela ação das proteases endógenas presentes naturalmente durante o processo de maturação prolongado (BERGER et al., 2018; HA et al., 2019a; LONERGAN; ZHANG; LONERGAN, 2010; KEMP et al., 2010; KIM et al., 2018a).

Ao decorrer do processo de maturação *post mortem*, ocorre a decomposição química dos constituintes de proteínas e lipídios da carne devido à ação de várias hidrolases (como as proteases), com a liberação de peptídeos e aminoácidos livres que apresentam um impacto significativo na geração de sabor e aroma da carne (Quadro 1) (BISCHOF et al., 2022; DASHDORJ et al., 2016).

Quadro 1 - Percepção dos gostos básicos em relação aos aminoácidos.

Aminoácidos	Gosto básico
Alifáticos (Valina, metionina, isoleucina, leucina, glicina, alanina), glutamina	Doce
Apresentam um átomo de enxofre (cisteína e metionina), ácido glutâmico, ácido aspártico	Umami
Valina, tirosina, isoleucina, fenilalanina, triptofano e leucina	Amargo
Ácido aspártico e glutâmico, histidina, asparagina	Azedo
Ácido glutâmico e aspártico	Salgado

Fonte: DASHDORJ et al. (2016); KIM; KEMP; SAMUELSSON (2016).

Em seu estudo, Iida et al. (2016), verificaram que o conteúdo de cada aminoácido livre aumentou significativamente durante a maturação por 60 dias, sendo que o conteúdo de treonina, serina, asparagina, glutamato, glicina, valina, cisteína, metionina, isoleucina, leucina, tirosina, fenilalanina e lisina aumentaram rapidamente após 30 dias. Bischof et al. (2021) também observaram quinze metabólitos em carne maturada à seco e dez em carne maturada úmida que se correlacionam com o tempo de maturação, demonstrando efeitos significativos relacionados ao tempo e ao tipo de maturação na fração polar do metaboloma da carne bovina.

Kim, Kemp e Samuelsson (2016) identificaram e quantificaram 32 metabólitos, entre eles, aminoácidos (alanina, leucina, glutamina, glutamato, valina, metionina, tirosina, isoleucina e fenilalanina), metabólitos conhecidos por serem altamente abundantes em carnes (creatina, carnitina, carnosina e creatinina), lactato, açúcares (glicose, glicose-1-fosfato, glicose-6-fosfato) e nucleotídeos (glutaciona, inosina monofosfato, 5' - monofosfato de

inosina, guanosina 5-monofosfato). Além dos aminoácidos (Quadro 1), todos estes metabólitos estão relacionados direto ou indiretamente ao sabor por serem substratos em reações químicas, como por exemplo, lactato e succinato ao sabor doce e azedo, guanosina e inosina monofosfato (IMP) ao sabor salgado/umami. Estes metabólitos solúveis em água, em maior ou menor grau, aprimoram o desenvolvimento do sabor isoladamente ou como precursores nas reações de Maillard.

No entanto, o sabor da carne é uma característica complexa resultante da combinação dos gostos básicos (doce, azedo, amargo, salgado e umami) com o aroma oriundo dos compostos voláteis, derivados de açúcares redutores, aminoácidos e compostos lipossolúveis. Diante disso, observa-se que além da proteólise, que origina grande parte destes precursores de sabor, o metabolismo energético *post mortem* também resulta em um aumento nos fragmentos de açúcar pela degradação do conteúdo de glicogênio (ribose, glicose, 6-fosfato, glicose 6-fosfato, etc.) que são substratos para a reação de Maillard, a qual está diretamente relacionada ao desenvolvimento do sabor, aroma e a cor (DASHDORJ et al., 2016; KIM et al., 2018a; MARTINS; JONGEN; VAN BOEKEL, 2001; STETZER et al., 2008).

A carne crua é caracterizada por pouco ou nenhum aroma e simplesmente um sabor semelhante ao sangue e metálico, de modo que a reação de Maillard é uma das inúmeras reações iniciadas pelo tratamento térmico que contribuem para o sabor e o aroma da carne. Estas reações são multidirecionais e incluem também a oxidação lipídica e a interação entre os produtos da reação de Maillard e da oxidação lipídica (KOSOWSKA; MAJCHER; FORTUNA, 2017; VAN BA et al., 2012).

A reação de Maillard é uma reação química entre os grupos carbonilas de um açúcar redutor e os grupos amina livre de aminoácidos, peptídeos ou proteínas e que envolve diversas etapas, como a denominada de degradação de Strecker, que resulta na formação de compostos aromáticos voláteis, além da ocorrência de outros rearranjos nas etapas finais, formando produtos polimerizados que são os principais responsáveis pela coloração (MARTINS; JONGEN; VAN BOEKEL, 2001).

Os aminoácidos livres, particularmente os sulfúricos, como a cisteína e metionina, são os substratos básicos nas reações de Maillard e na reação de degradação de Strecker. As interações destes aminoácidos com açúcares resultam na formação de muitos compostos voláteis responsáveis pelo sabor de carne (*meaty*). Além disso, durante a degradação de Strecker, a decomposição da fenilalanina em fenilacetaldeído resulta em um sabor levemente adocicado e aroma de mel, enquanto a metionina decompõe-se em metional, com aroma típico de batata cozida (ELMORE et al., 2002; GRANVOGL; BEKSAN; SCHIEBERLE, 2012;

KOSOWSKA; MAJCHER; FORTUNA, 2017). Entre os compostos voláteis formados pela interação dos açúcares com os aminoácidos, podem-se citar as pirazinas, oriundas da reação entre a glicose e a lisina, e da ribose com diversos compostos chaves de enxofre como a cisteína, formando o 2-furanometanotiol, 2-metil-3-furantiol, 2-acetil-2-tiazolina, 3-tiofenotiol, entre outros (KOSOWSKA; MAJCHER; FORTUNA, 2017).

Outro ponto importante é a oxidação lipídica, que aumenta à medida que o tempo de maturação aumenta, resultando na lipólise e, conseqüentemente, na liberação de produtos que conferem sabor e aroma intensos na carne maturada, que podem ser desejáveis ou indesejáveis (KHAN et al., 2016), sendo que os produtos da oxidação de ácidos graxos estão associados ao desenvolvimento de características rançosas. Este processo de oxidação tem início no nível de membrana, nas frações fosfolipídicas, como um mecanismo de cadeia autocatalítica de radicais livres, no qual os pro-oxidantes interagem com os ácidos graxos insaturados, gerando radicais livres e na propagação da reação em cadeia (CAMPO et al., 2006).

Dentre os ácidos graxos, os poli-insaturados são mais suscetíveis à oxidação, como os fosfolipídios, resultando na formação de 2,4-decadienal, 2-nonenal, 1-octen-3-ona e 2,4-nonadienal, enquanto os lipídios oxidados, em reações com os produtos da reação de Maillard, resultam na geração de pirazinas, tiazóis e tióis (KOSOWSKA; MAJCHER; FORTUNA, 2017; O'QUINN, 2012). O'Quinn et al. (2016) observaram que as amostras de carnes ricas em ácidos graxos monoinsaturados foram preferidas pelos consumidores, sendo descritas por apresentarem sabores de carne grelhada, amanteigada, nozes e doce, enquanto os ácidos graxos poli-insaturados foram associados a sabores negativos como gramíneo, sangrento, metálico, peixe, azedo e amargo.

Portanto, pode-se observar que uma diversidade de voláteis ativos ligados ao sabor e aroma ocorrem na carne, incluindo as seguintes classes químicas: ácidos, álcoois, aldeídos, ésteres, compostos aromáticos, éteres, furanos, hidrocarbonetos, cetonas, pirazinas, piridinas, pirróis, sulfetos, tiazóis, tiofenos, entre outros.

Watanabe et al. (2015), em seu estudo sobre o efeito da maturação em compostos voláteis em carne bovina cozida, verificaram que a quantidade de alguns compostos heterocíclicos aumentaram em decorrência do processo de maturação, sendo identificados 79 compostos dos quais 17 eram heterocíclicos, contendo nitrogênio (pirazinas, piridina e pirroles), 7 heterocíclicos, contendo enxofre (tiofenos, tiofenona, tiazóis), 8 heterocíclicos, contendo oxigênio (furanos, furanonas, pirano), 4 compostos homocíclicos (tolueno,

benzaldeído, fenilacetaldeído, ácido benzoico) e 33 compostos não aromáticos, como aldeídos (hexanal, heptanal, octanal, nonanal), álcoois, cetonas, hidrocarbonetos e ácidos graxos.

Os álcoois são oriundos da degradação térmica dos fosfolipídios, os aldeídos da oxidação de ácidos graxos insaturados e também a partir da degradação de Strecker, as pirazinas derivam da reação de Maillard, hidrocarbonetos, cetonas, ácidos e ésteres por meio da oxidação lipídica e da degradação térmica dos lipídios (O'QUINN, 2012). Estes compostos, que provocam vários gostos e odores, têm limites diferentes para a percepção e um mesmo composto pode ter um sabor/aroma diferentes em concentrações variadas (BREWER, 2009). A concentração e o limiar de aroma destes compostos é que determinam quais são os principais compostos de impacto que influenciam diretamente o sabor (O'QUINN, 2012; VAN BA et al., 2012).

No Quadro 2 encontra-se a relação de alguns dos voláteis comumente encontrados em carne e seus respectivos sabores e aroma (BREWER, 2009; SHAHIDI et al., 2012; VAN BA et al., 2012). No entanto, estes compostos ativos relacionados aos sabores e aromas da carne são influenciados por uma série de fatores, como por exemplo, raça, sexo, dieta e idade do animal; composição da carne (perfil lipídico e conteúdo de marmoreio); condições e processo de abate; condições de armazenamento; tipo e tempo de maturação; tipo de músculo; modo de preparação da carne e tipo de tratamento térmico, entre outros (BISCHOF et al., 2021; BISCHOF et al., 2022; KOSOWSKA; MAJCHER; FORTUNA, 2017; O'QUINN, 2012; VAN BA et al., 2012).

Quadro 2 - Percepção dos sabores e aromas em relação aos compostos voláteis.

Composto Volátil	Sabores e aromas
Aldeídos	
Decanal	Gorduroso, rançoso, carnudo, torrado
Heptanal	Doce, gorduroso, oleoso, rançoso
Nonanal	Sebo, gorduroso
Undecanal	Pungente, frutado, verde
Hexanal	Gramíneo, rançoso
Octanal	Doce, gorduroso, sabão, frutado, cítrico
Propanal	Caramelo, doce, cozido, caldo de carne
Álcoois	
1-hexanol	Metálico, verde, grama
1-heptanol	Amadeirado, oleoso, verde, gorduroso
Propanol	Alcoólico
1-octanol	Gorduroso, ceroso, cítrico, oleoso
Hidrocarbonetos	
Pentano	Sabor leve de aquecido, rançoso
Hexano	Aroma peculiar fraco
Ácidos	
Ácido butanoico	Rançoso
Ácido propanoico	Pungente, rançoso, soja
Pirazinas	
2-etil-3,5-dimetilpirazina	Queimado, carnudo, verde
2-etil-3,6-dimetilpirazina	Queimado, torrado
2,5-dimetilpirazina	Arroz frito, pipoca
Compostos contendo nitrogênio e enxofre	
Benzotiazol	Metálico
2,4-dimetiltiazol	Borracha, mofado
4,5-dimetiltiazol	Assado, noz
Cetonas	
2-octanone	Mofado, frutado
2-decanone	Mofado, frutado
2-dodecanone	Mofado, frutado

Fonte: BREWER (2009); SHAHIDI et al. (2012); VAN BA et al. (2012).

2.2.3 Cor

A cor da carne *in natura* e sua estabilidade são critérios fundamentais na percepção e na intenção de compra pelo consumidor por estarem associadas à qualidade e segurança, de modo que a carne muito escura ou pálida é um atributo de aparência inaceitável para o consumidor (BOAKYE; MITTAL, 1996; KHAN et al., 2016; RAMANATHAN et al., 2020; WYRWISZ et al., 2016). No entanto, o processo de maturação *post mortem* influencia consideravelmente a cor da superfície da carne e a sua estabilidade, podendo afetar negativamente a aceitabilidade da carne maturada (KILGANNON et al., 2019; KIM et al., 2018a; WYRWISZ et al., 2016).

A cor da carne é determinada pela presença de pigmentos, compostos capazes de mudar a cor da luz transmitida ou refletida, resultante da absorção seletiva em um dado comprimento de onda, de maneira que a concentração e a forma química dos pigmentos terão efeitos na cor final da carne. O principal pigmento responsável pela cor da carne é a mioglobina (Mb), e a hemoglobina (Hb), que é o pigmento do sangue também tem uma importância secundária. Ambas são proteínas sarcoplasmáticas conjugadas, constituídas de um grupo prostético, grupo heme, ligado a uma molécula de proteína globular, a globina, com afinidade pelo oxigênio (RAMOS; GOMIDE, 2017).

Na carne fresca, a Mb ocorre de três formas: a deoximioglobina (DMb), de coloração vermelho-púrpura, ferro na forma reduzida ou ferrosa (Fe^{+2}); a oximioglobina (OMb), de coloração vermelho brilhante, ferro na forma ferrosa e uma molécula de oxigênio ligada à sexta valência do ferro, sendo considerada a cor ideal pelo consumidor; e metamioglobina (MMb) que é o resultado da oxidação da forma ferrosa à forma férrica (Fe^{+3}), sendo extremamente indesejável para carnes, por ser responsável pela descoloração durante o armazenamento na presença de ar (21% de oxigênio), a qual, adquire coloração amarronzada (RAMOS; GOMIDE, 2017).

De acordo com Hernández Salueña et al. (2019), a formação de MMb é um fator decisivo na intenção de compra pelos consumidores, uma vez que um em cada dois consumidores rejeita o produto quando a proporção de MMb na superfície da carne atinge 20% e, quando este teor alcança 50% se torna totalmente inaceitável.

Os mecanismos exatos pelos quais a maturação afeta a cor e a sua estabilidade ainda não foram totalmente elucidados, visto que períodos longos de maturação reduzem o potencial de *blooming* (oxigenação) e promovem a descoloração acelerada da superfície (KIM et al., 2018a). Li et al. (2014) observaram que o valor de L^* (índice de luminosidade) e o ângulo *hue*

(ângulo de tonalidade) aumentaram com o tempo de maturação. Vitale et al. (2014) também relataram que as carnes maturadas apresentaram valores maiores de L^* , a^* (índice de vermelho), b^* (índice de amarelo), C^* (saturação) e o ângulo *hue* do que as carnes não maturadas.

No entanto, sabe-se que a cor vermelho brilhante, considerada ideal pelos consumidores, depende de inúmeros fatores como a profundidade de penetração do oxigênio (O_2), temperatura da carne, pressão parcial de O_2 , pH e consumo de O_2 por outros processos respiratórios (Taxa de Consumo do Oxigênio – TCO). Quanto à coloração amarronzada, formada pelo pigmento MMb, também é determinada por fatores como pressão parcial de O_2 , temperatura, pH, Atividade da Metamioglobina Redutase (MRA, do inglês *Metmyoglobin Reducing Activity*), oxidação lipídica e, também pode ocorrer pela multiplicação microbiana (AROEIRA, 2014; MANCINI; HUNT, 2005). Além disso, outros fatores que causam alteração na cor, por afetar diretamente a Mb, são espécie, sexo, idade, localização anatômica do músculo e atividade física (GOMIDE; RAMOS; FONTES, 2013).

Desta forma, observa-se que as condições de maturação influenciam os mecanismos celulares como enzimas redutoras e de eliminação de oxigênio, por meio de dois mecanismos, como a TCO e a MRA que comandam a química redox da mioglobina e, conseqüentemente, podem afetar a intensidade e a estabilidade da cor da carne (MANCINI; RAMANATHAN, 2014; SUMAN et al., 2014; RAMOS; GOMIDE, 2017).

A MRA é um sistema de enzimas redutoras, NADH dependentes, responsáveis por prolongar a estabilidade da cor por meio da redução da MMb à mioglobina, possibilitando a ligação do oxigênio ou de outros gases e, portanto, o retorno à coloração vermelho brilhante (AROEIRA, 2014; MCKENNA et al., 2005). No músculo fresco, a enzima é muito ativa e a MMb formada é rapidamente reduzida a DMb e oxigenada a OMb, mantendo a cor ideal. No entanto, à medida que a carne é maturada, a atividade mitocondrial diminui pela falta de substratos e cofatores como o NADH, prejudicando o consumo de oxigênio e, desta forma, ocorre a redução gradativa do NADH no músculo e da MRA com o tempo *post mortem* (LEYGONIE; BRITZ; HOFFMAN, 2012; RAMOS; GOMIDE, 2017).

A TCO também é extremamente importante na cor, a qual está associada à respiração mitocondrial residual no músculo *post mortem* e relaciona com a profundidade de penetração do oxigênio da superfície exposta do músculo. Geralmente, uma menor TCO permite maior penetração de oxigênio no músculo e maior estabilidade da cor com uma camada de OMb mais espessa (AROEIRA, 2014; MCKENNA et al., 2005; RAMOS; GOMIDE, 2017).

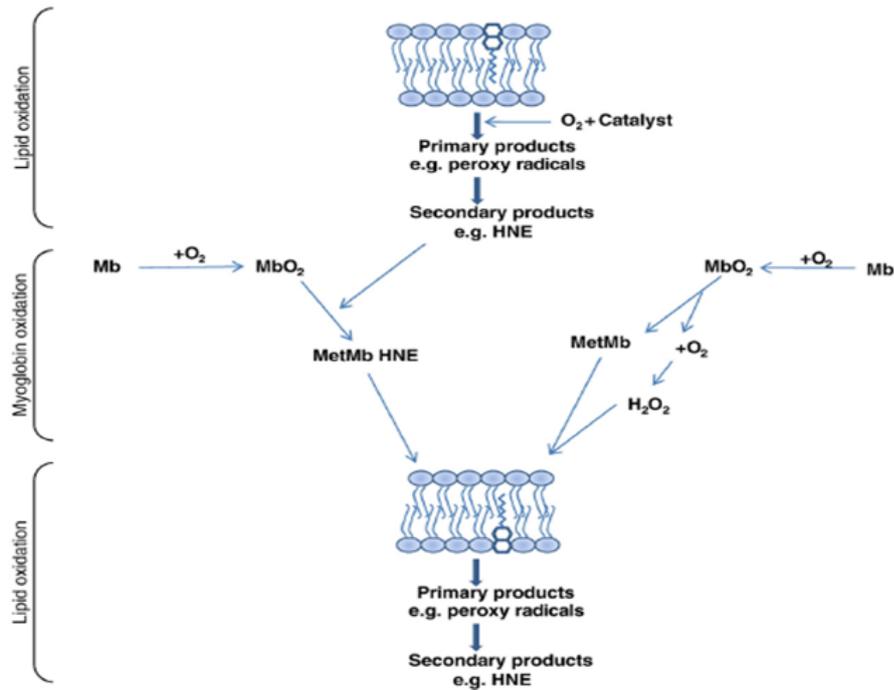
No entanto, a literatura relata que as contribuições relativas da redução da MRA e da TCO para a estabilidade da cor ainda são controversas (LANARI; CASSENS, 1991; MCKENNA et al., 2005). Segundo Ramos e Gomide (2017), a estabilidade da cor não é exclusivamente determinada pela redução da MRA ou TCO, mas sim pela proporção dos dois fatores, sendo que músculos com baixa estabilidade de cor parecem ter uma MRA proporcionalmente baixa em relação à TCO, independentemente de esta ser alta ou baixa, enquanto em músculos com alta estabilidade a atividade MRA é proporcionalmente maior do que a TCO.

Por último, outro fator intrínseco em que o mecanismo ainda não é completamente compreendido, quanto à participação na estabilidade da cor de carnes é a oxidação lipídica que, apesar de estar relacionada, não se sabe se esta catalisa a oxidação da Mb ou vice-versa (FAUSTMAN et al., 2010; MCKENNA et al., 2005; RAMOS; GOMIDE, 2017).

A Mb é uma proteína heme e, desta forma, a oxidação do átomo central de ferro é responsável pela descoloração com a mudança da OMb, de coloração vermelho brilhante para a MMb, de coloração amarronzada. A literatura relata que possivelmente os radicais livres e produtos secundários reativos, como aldeídos, produzidos durante a oxidação lipídica, podem atuar de duas maneiras, sendo diretamente, oxidando o pigmento de Mb e, ou, indiretamente, lesando os sistemas redutores da carne (FAUSTMAN et al., 2010; MCKENNA et al., 2005; RAMOS; GOMIDE, 2017). Os aldeídos são mais estáveis que os radicais livres, os quais difundem prontamente para o meio celular e reagem com biomoléculas como a Mb. Dentre os aldeídos indicativos da oxidação lipídica, pode-se citar o hexanal, o malonaldeído (MAD) e o 4-hidroxinonenal (4-HNE) (RAMOS; GOMIDE, 2017).

No entanto, acredita-se que supostamente ocorra uma inter-relação entre dois tipos de reações oxidativas, conforme demonstrado na Figura 1. A oxidação da Mb é catalisada pelos produtos da oxidação lipídica, bem como pelos radicais superóxido ($\cdot\text{O}_2^-$), produzidos pela auto-oxidação da Mb e da própria MMb (FAUSTMAN et al., 2010; RAMOS; GOMIDE, 2017).

Figura 1 - Interações entre as reações oxidativas.



Fonte: FAUSTMAN et al. (2010).

2.3 Tipos de maturação

A maturação é um dos métodos mais utilizados pela indústria por desempenhar um papel fundamental na melhoria da qualidade da carne bovina por meio da atividade de sistemas proteolíticos inerentes à carne, resultando em um processo de agregação de valor ao produto que se apresenta mais homogêneo e com maior aceitabilidade pelos consumidores (KIM et al., 2018a; VITALE et al., 2014). No entanto, a maturação é um processo complexo e são praticadas diversas formas, variando de carcaça tradicionalmente pendurada à cortes de porções, tempo de maturação, entre outras condições, que irão impactar diretamente no desenvolvimento das características sensoriais da carne em geral.

O conhecimento das condições específicas permite a maximização dos impactos da maturação nos atributos de qualidade, em particular na maciez, mas também na suculência, aroma e sabor.

2.3.1 Maturação úmida

De acordo com a literatura, a maturação úmida, ou *wet aging*, consiste no acondicionamento da carne em embalagem plástica selada a vácuo, altamente impermeável ao

vapor d'água e ao oxigênio, à temperatura de refrigeração (0 a 4 °C) por um período específico, geralmente de 7 a 21 dias (Figura 2) (AHNSTRÖM et al., 2006; BERGER et al., 2018; DASHDORJ et al., 2016; SMITH et al., 2014; STENSTRÖM et al., 2014).

No entanto, recentemente, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) aprovou o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade (RTIQ) para a carne maturada de bovino, por meio da Portaria SDA nº 723, de 23 de dezembro de 2022 (BRASIL, 2022), que designa como carne maturada bovina, a carne submetida ao processo de maturação úmida, a vácuo, podendo ser um produto resfriado ou congelado, com ou sem osso. Também é estabelecido que para a elaboração da carne maturada bovina, na preparação dos cortes, a divisão e a subsequente desossa das meias-carcaças somente deve ser efetuada após a resolução do *rigor mortis*, sendo determinado que a maturação se inicia após os cortes embalados atingirem a temperatura máxima de 0 °C, devendo ser mantidos dentro do intervalo de -1 °C a 4 °C, pelo tempo mínimo de 12 dias.

Figura 2 - Carne maturada à vácuo (maturação úmida – *wet aging*)



Fonte: BIG CARNES (2023).

Com o surgimento da embalagem a vácuo por volta de 1960, a maturação úmida se tornou até os dias atuais o processo mais utilizado na indústria, devido a maior facilidade e flexibilidade de armazenamento. No ano de 1970, a embalagem a vácuo se consolidou como uma alternativa eficaz para o transporte da carne bovina, facilitando assim a exportação, primeiramente, para os Estados Unidos e, depois, internacionalmente e, em 1980, mais de 90% da carne comercializada utilizava este processo de embalagem (SAVELL, 2008; SMITH et al., 2014; SMITH et al., 2008).

Na maturação úmida, a temperatura e o tempo de maturação são os principais fatores a serem controlados para não afetarem negativamente a segurança microbiológica e as características sensoriais. O uso de temperaturas elevadas acelera a proteólise e, conseqüentemente, permite maior taxa de amaciamento, embora limite a vida útil da carne *in*

natura, possibilitando a multiplicação microbiana e, também, resultando em menor estabilidade da cor. Desta forma, recomenda-se o uso de temperaturas próximas a zero (GOMIDE; RAMOS; FONTES, 2013; KILGANNON et al., 2019; KIM et al., 2018a). Quanto ao tempo de maturação, é um fator determinante para o desenvolvimento e a intensidade dos atributos sensoriais.

Colle et al. (2016) e Colle et al. (2015), ao analisarem a influência do tempo da maturação úmida (2 a 63 dias) de diferentes tipos de músculos nas características sensoriais e de qualidade, observaram um aumento da oxidação lipídica e da contagem microbiana e redução da estabilidade da cor no varejo, com a maturação prolongada, indicando a necessidade de 14 a 21 dias para a otimização da percepção de maciez pelos consumidores. Ha et al., (2019a) também notaram que as amostras maturadas a vácuo por 21 dias receberam maiores pontuações de suculência, sabor e gosto geral, indicando ausência de benefícios em relação a estes atributos, com tempo mais prolongados de maturação. No entanto, as notas de preferência da maturação a vácuo foram inferiores quando comparadas à seco.

Além do amaciamento da carne obtido com o processo de maturação, a literatura aponta algumas vantagens da maturação úmida quando comparada à seco, que determinam sua maior aplicação atualmente, como por exemplo, menor tempo de processamento e custo para o consumidor, condições mais controladas resultando em melhorias no transporte e prazo de validade, reduções significativas na perda de peso do produto e no acabamento, além de exigir um espaço menor de processamento (HA et al., 2019a; KIM et al., 2018a; RAMANATHAN et al., 2020).

A perda de peso relacionada ao processo de maturação úmida é notoriamente menor em comparação com a maturação à seco, variando de 0,8 a 2,90% (BERGER et al., 2018; DIKEMAN et al., 2013; LI et al., 2014; STENSTRÖM et al., 2014). Outro fator importante é o sistema de embalagem a vácuo que, associado a temperaturas baixas de estocagem, contribuem com maior prazo de validade, uma vez que tem a capacidade de preservar a carne *in natura* em condições anaeróbicas, nas quais as bactérias são inibidas pelo baixo pH (< 5,8). Desta forma, observa-se a inibição da multiplicação de espécies de *Pseudomonas*, mas espécies de *Lactobacillus* ou bactérias anaeróbicas facultativas e enterobactérias psicrotólicas têm sua multiplicação favorecida (GOMIDE; RAMOS; FONTES, 2013).

Li et al. (2013) constataram que as contagens de bactérias lácticas foram maiores nas amostras maturadas a vácuo comparado a maturação à seco e ao controle. Li et al. (2014) observaram que as contagens de *Enterobacteriaceae* e bactérias lácticas na superfície da carne maturada a vácuo aumentaram com o tempo de maturação mais longo, sendo de 0,24 e 1,20

log UFC/cm² nos dias 8 e 19, respectivamente, para *Enterobacteriaceae* e de 2,27 e 5,34 logs UFC/cm² nos dias 8 e 19, respectivamente, para bactérias láticas.

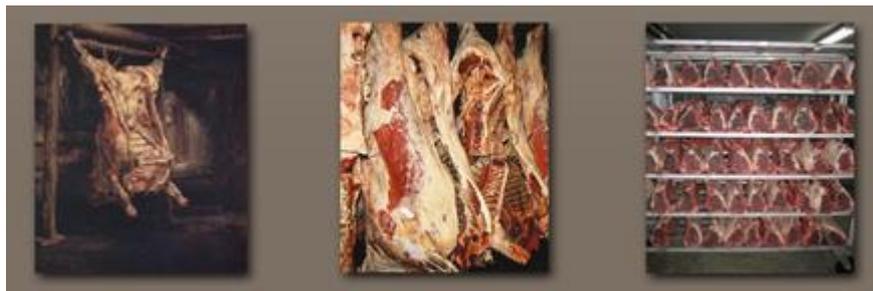
No entanto, apesar das vantagens listadas anteriormente, a maturação úmida prolongada promove algumas características sensoriais indesejáveis no sabor, identificadas pelos descritores sangrento, metálico, amargo e azedo (DIKEMAN et al., 2013; KHAN et al., 2016; KIM et al., 2018a; RAMANATHAN et al., 2020).

O'Quinn et al. (2016) observaram que a maturação úmida, por um período prolongado, produz um perfil de sabores indesejáveis à carne, em que as amostras maturadas por 46 dias apresentaram sabores desagradáveis e fortes, descritos como tipo gramíneo/feno, azedo, peixe, amargo, sabor associado ao fígado bovino cozido e outros órgãos e sabor ou aroma diferente (mais forte, associado a animais selvagens). Segundo os autores, o sabor azedo se deve provavelmente à multiplicação de bactérias láticas nas embalagens a vácuo durante o longo período de maturação. Quando realizada por um período de 14 dias, a maturação úmida apresentou um sabor mais doce e menos sabor associado ao fígado bovino cozido e outros órgãos.

2.3.2 Maturação à seco

A maturação à seco, ou *dry aging* é um processo convencional que consiste em manter a carne, sem nenhum tipo de embalagem protetora, em refrigeração (Figura 3), sendo que este processo requer o controle ambiental rigoroso de temperatura, fluxo do ar e umidade relativa para obter uma adequada qualidade do produto (AHNSTRÖM et al., 2006; KILGANNON et al., 2019; KIM et al., 2017; KIM et al., 2018a; KIM; KEMP; SAMUELSSON, 2016).

Figura 3 - Processo de Maturação à Seco (*dry aging*)



Fonte: UMAi DRY® (2023)

Durante séculos, a maturação à seco foi o método mais comumente empregado para a preservação e amaciamento da carne, em que as carcaças inteiras ou cortes nobres eram pendurados em câmaras frigoríficas por dias a semanas. Posteriormente, com advento da embalagem a vácuo por volta de 1960, a maturação à seco foi amplamente substituída pela maturação úmida (descrita no item 2.3.1) devido ao alto rendimento de produção, aumento do prazo de validade e conveniência no armazenamento e transporte. Por estes motivos, apenas um pequeno grupo de produtores e fornecedores continuaram praticando o método de maturação à seco. No entanto, recentemente, tem havido um crescente interesse no processo de maturação à seco, sendo considerada a carne como um produto nobre (*gourmet, premium*) que exige um preço mais alto no mercado criando um nicho gastronômico exclusivo (AHNSTRÖM et al., 2006; BERGER et al., 2018; DASHDORJ et al., 2016; HA et al., 2019a; KIM et al., 2017; LASTER et al., 2008; LEE et al., 2019a; LI et al., 2014; SAVELL, 2008).

No Brasil, o processo de maturação à seco da carne bovina ainda é um método pouco empregado, mas que tem evoluído, sendo este tipo de carne comercializada, por exemplo, pelas indústrias do setor que possuem Serviço de Inspeção. A JBS é uma indústria de alimentos multinacional de origem brasileira que conta com um portfólio de carnes *in natura* e produtos cárneos diversificados, comercializados por meio de marcas como a Friboi, Seara, entre outras. Em comemoração aos seus 65 anos, a Friboi lançou a marca 1953 para a comercialização de produtos que privilegiam a carne macia, saborosa e suculenta, aumentando a oferta de cortes *premium*, em 900 pontos de venda de redes varejistas instaladas nos estados de São Paulo (750) e Rio de Janeiro (150) e também nas capitais Brasília, Curitiba, Fortaleza e Santa Catarina. Estes locais contam com uma estrutura de açougue da marca “Açougue 1953 Friboi” que tem uma câmara exclusiva para a produção e comercialização de carnes *dry aged*, em que o cliente da rede pode adquirir peças já maturadas e prontas ou escolher o próprio corte e encomendar a maturação pelo prazo que desejar, produzindo a carne *dry aged* de maneira totalmente personalizada (FRIBOI, 2021; JBS, 2021; JCA, 2019).

Segundo Terjung, Witte e Heinz (2021), a matéria-prima tem efeito direto no resultado da maturação à seco, em que parâmetros como presença ou ausência de osso, espécie, tipo de músculo, sexo, idade e raça influenciam nas características do produto final. Desta forma, a maturação à seco é sugerida em animais de raças europeias, como *Bos taurus* ou taurinos como Angus, por apresentarem maior deposição de gordura intramuscular, ou seja, gordura de marmoreio, influenciando positivamente na qualidade da carne bovina por contribuir com sabor e suculência da carne cozida, além de apresentar maior consistência na maciez

(AROEIRA et al., 2016; HIGHFILL et al., 2012; IIDA et al., 2016; MALHEIROS et al., 2020).

A gordura de marmoreio é a principal característica relacionada com a qualidade da carne em um sistema de classificação e tipificação de carcaças, sendo influenciada por fatores como o desenvolvimento, nutrição animal, predisposição genética, entre outros (AROEIRA, 2014; BERGER et al., 2018). Frequentemente, o grau de qualidade da gordura de marmoreio, como da USDA, afeta os escores sensoriais da carne bovina avaliados por consumidores e provadores treinados, em que o aumento do teor de gordura intramuscular é um fator primário da aceitabilidade do sabor da carne bovina, quando se tem uma maciez aceitável e ausência de sabores estranhos (CORBIN et al., 2015; IIDA et al., 2016; LEGAKO et al., 2015; LEGAKO et al., 2016).

A literatura relata uma variedade de cortes que podem ser utilizados (do inglês “*strip loins*”, “*short loins*”, “*sirloin*”, “*beef rib*”, “*ribeye roll*”, “*top sirloin butt*”) com ou sem osso, apesar deste tipo de maturação ser aplicada mais frequentemente em cortes com osso (AHNSTRÖM et al., 2006; BERGER et al., 2018; CAMPBELL et al., 2001; DIKEMAN et al., 2013; HA et al., 2019a; HA et al., 2019b; HULÁNKOVÁ et al., 2018; KIM; KEMP; SAMUELSSON, 2016; KIM et al., 2017; LASTER et al., 2008; VILELLA, 2016).

Os principais fatores que devem ser considerados durante o processo de maturação à seco são o tempo de processamento, a temperatura, umidade relativa e o fluxo de ar, uma vez que irão determinar e influenciar no desenvolvimento do sabor, no prazo de validade, na deterioração microbiana, no encolhimento do produto, entre outras questões de qualidade e econômicas. Geralmente são utilizadas prateleiras perfuradas, ganchos, ventiladores, entre outros para o armazenamento da carne na câmara frigorífica, garantindo que todas as superfícies estejam expostas às condições similares que permita uma secagem uniforme, minimiza a deterioração e o desenvolvimento *off-flavor* (SAVELL, 2008).

Desta forma, embora a maturação à seco seja praticada há décadas, na literatura observa-se uma grande variabilidade nas condições de processamento que, não foram claramente estabelecidas e, diferentemente da maturação úmida, a maturação à seco não possui uma regulamentação como o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade. Contudo, os intervalos das condições avaliadas nas pesquisas auxiliam e norteiam o processo, de modo a garantir um produto mais seguro. A determinação da quantidade de dias de maturação está mais relacionada à preferência dos consumidores, sendo que os estudos indicam que um período variando de 14 a 35 dias para se alcançar os resultados sensoriais

desejados (BAIRD, 2008; DASHDORJ et al., 2016; KIM et al., 2018a; PERRY, 2012; SAVELL, 2008; SMITH et al., 2008).

Ha et al. (2019b) observaram que maiores tempos de maturação (40 a 60 dias) melhoraram os atributos de qualidade, resultando em carnes mais macias e saborosas. Smith et al. (2008) constataram que o período de maturação tem um efeito significativo nas características sensoriais da carne, em relação ao sabor e suculência, sendo que as amostras maturadas por 21 dias receberam notas mais altas para o sabor. Segundo Perry (2012), o processo ocorre por cerca de 28 a 35 dias e, é neste período, que a carne atinge seu potencial, apresentando o equilíbrio ideal entre maciez, sabor e suculência.

Em relação aos demais parâmetros, preconiza-se a temperatura na faixa de -1 à 4 °C, umidade relativa de 65-85% e fluxo de ar de 0,2-5 m/s (LEE et al., 2019b). Segundo Savell (2008) e Baird (2008), a temperatura é um ponto crítico, pelo motivo de que uma temperatura abaixo do ponto de congelamento da carne (-1,5 à -2 °C) diminuíra os sistemas enzimáticos envolvidos no processo de maturação. Ao contrário, com temperaturas elevadas, os sistemas enzimáticos atuarão muito bem, mas favorecerá a deterioração microbiana, originando sabores e aromas desagradáveis.

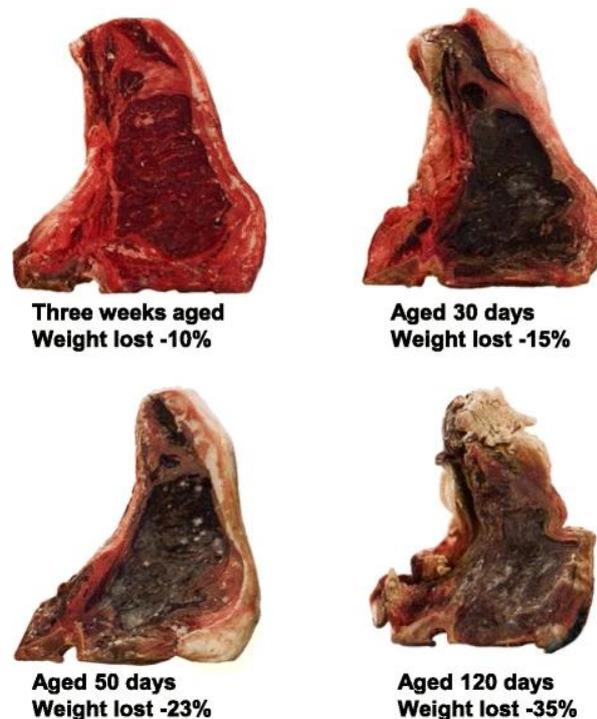
A umidade relativa também tem papel crucial durante a maturação à seco, pois se for muito alta, as bactérias deteriorantes podem se multiplicar e, conseqüentemente, produzir sabores e aromas desagradáveis. Por outro lado, se for muito baixa, promoverá maior perda de peso com encolhimento excessivo e a secagem muito rápida e, portanto, uma carne com menor suculência (BAIRD, 2008; DASHDORJ et al., 2016; SAVELL, 2008). Quanto ao fluxo de ar, deve ser suficiente e uniforme para fornecer circulação de ar em todos os pontos do produto e, além disso, recomenda-se aumentar o fluxo ao redor da sala de maturação com ventiladores montados no teto para empurrar o ar em diversas direções, garantindo que a carne seque o mais rápido possível na superfície para controle do crescimento de bactérias e fungos (DASHDORJ et al., 2016; PERRY, 2012).

Em relação aos aspectos microbiológicos, dado a natureza do processo de maturação à seco que é o armazenamento da carne *in natura* em um ambiente sem embalagem, gera preocupação quanto à segurança alimentar. Contudo, o processo em si pode ser considerado seguro, produzindo naturalmente uma camada protetora ou “crosta” na superfície pela desidratação e, conseqüentemente, a baixa atividade de água na superfície pode diminuir e/ou impedir a multiplicação bacteriana aeróbica (Figura 4) (DASHDORJ et al., 2016; KIM et al., 2018a).

Por outro lado, a restrição da multiplicação de alguns microrganismos indesejados estimula o desenvolvimento de outros benéficos, com destaque para os fungos *Thamnidium*, encontrados na superfície das partes gordurosas da carcaça ou no corte, como manchas de coloração cinza-pálida, a partir, da terceira semana de maturação. Estes fungos são importantes pelo fato de liberarem enzimas proteolíticas e colagênicas que, ao penetrarem na carne, hidrolisam os tecidos muscular e conectivo, contribuindo para a maciez e o sabor de maturado do produto final (DASHDORJ et al., 2016).

As espécies de *Thamnidium* eram frequentemente isoladas de carnes em vários tipos de câmaras frigoríficas, sendo duas espécies de maior ocorrência, a *Thamnidium elegans* e *Thamnidium chaetocladioides*. Estes fungos raramente se multiplicam em outros substratos, sendo a temperatura ótima entre 1 e 2 °C. Os esporos e até mesmo os micélios jovens podem sobreviver por longos períodos a uma temperatura de -6 °C, sendo esses fungos totalmente superficiais e facilmente removidos do produto com um pano (BROOKS; HANSFORD, 1923).

Figura 4 - Formação da camada protetora ou “crosta” na superfície da carne.



Fonte: DASHDORJ et al. (2016).

Lee et al. (2019a) não detectaram fungos e leveduras na crosta da carne com 14 dias de maturação, porém, com o avanço do processo (28 dias), foram encontrados fungos e leveduras, como *Pilaira anomala*, *Debaryomyces hansenii* e *Rhodotorula*. Quanto à

composição bacteriana, antes da maturação as amostras apresentaram contagem mais alta para *Lactobacillus* (55,5%) e *Pseudomonas* (42,7%). Após 28 dias de maturação à seco, as contagens de *Pseudomonas* e *Enterobacterium* aumentaram, possivelmente devido às condições aeróbicas e de refrigeração, tendo em vista que *Lactobacillus* se desenvolvem melhor em condições anaeróbicas.

Berger et al. (2018) verificaram que a carne maturada à seco apresentou baixas contagens de bactérias aeróbicas totais (4,04 Log₁₀ UFC/mL), possivelmente pela camada protetora ou “crosta” na superfície da carne, bem como menor contagem de bactérias lácticas (3,49 Log₁₀ UFC/mL). Haddad et al. (2022) também observaram que as contagens de bactérias totais e bactérias lácticas aumentaram no 14º dia de maturação, e as contagens de psicrótróficos no 28º dia, mantendo-se constantes até o final do processo, possivelmente, pela redução da atividade de água na superfície de onde os microrganismos se infiltram nos tecidos profundos.

Em relação aos parâmetros sensoriais, segundo Savell (2008) e Baird (2008) a maturação à seco não é aplicada para promover a maciez, uma vez que, pode ser conseguida e não difere da maturação úmida (descrita no item 2.3.1), mas a maior razão para a maturação à seco é aprimorar e/ou intensificar o sabor da carne. Uma das razões pela qual ocorre a melhora acentuada e única do sabor é devido à concentração de compostos responsáveis pelo sabor, à medida que a umidade é perdida no decorrer do processo. Este sabor característico começa a se desenvolver após 14 dias e, posteriormente, se intensifica com o avanço da maturação que torna os sabores mais intensos e complexos (DASHDORJ et al., 2016).

Ha et al. (2019b) observaram que diferentes tipos de maturação aumentaram significativamente as concentrações e a quantidade total de todas as classes dos compostos aromatizantes com o tempo de maturação. No entanto, a maturação à seco resultou em concentrações significativamente mais altas destes compostos, como por exemplo, as pirazinas e compostos contendo enxofre associados a notas agradáveis de sabor.

Normalmente, a carne maturada à seco é descrita por possuir um perfil sensorial de sabor de carne, assado, umami, amanteigado, doce, acastanhado, noz e/ou terroso, em consequência, dos sucos serem absorvidos pela carne, ocorrendo a decomposição química dos constituintes proteicos e lipídicos, que resultam em um sabor mais intenso. A maior suculência provavelmente se justifica pela perda da capacidade de retenção de água, o que resulta na liberação de mais sucos da carne durante a mastigação ou na concentração da gordura que contribuem com os atributos sensoriais (BERGER et al., 2018; CAMPBELL et al., 2001; DASHDORJ et al., 2016; KIM et al., 2018a; SAVELL, 2008).

Ha et al. (2019a) observaram que os consumidores preferiram sensorialmente as carnes maturadas à seco, recebendo notas mais altas em relação à maciez, suculência, sabor e gosto geral, sendo recomendado 35 dias para maximizar a qualidade sensorial. Kim, Kemp e Samuelsson (2016) constataram que as carnes maturadas à seco eram mais saborosas e tiveram maior pontuação para gosto global, sendo que vários precursores (triptofano, fenilalanina, valina, tirosina, glutamato, isoleucina e leucina, entre outros) relacionados ao sabor eram abundantes nestas amostras, o que pode explicar o sabor intensificado.

Ahnström et al. (2006) observaram que as amostras maturadas foram altamente desejáveis quanto à maciez e ao sabor, sendo caracterizadas por “sabor de carne envelhecida”, “sabor de carne bovina” e “sabor torrado”. Li et al. (2014) observaram que o aroma de “carne frita com manteiga (ou seja, noz)” na superfície do corte foi maior na carne maturada à seco, que também apresentou pontuações mais altas em atributos como sabor “umami” e “gorduroso”, intensificadas com o tempo de maturação.

No entanto, apesar de a maturação à seco proporcionar um sabor único e agregar valor ao produto colocando em nicho de mercado mais sofisticado, é um processo oneroso. Embora a perda de umidade seja positiva para o desenvolvimento do sabor, por outro lado é negativa economicamente, resultando em perdas substanciais no encolhimento e no acabamento, reduzindo o rendimento. O encolhimento está relacionado a, aproximadamente, cerca de 5 a 40% do peso que é perdido durante o processo, sendo que a variação é dependente do tempo de maturação e do tipo de corte e, quanto ao acabamento, envolve a remoção da “crosta” seca e descolorida e da gordura desidratada formada na superfície da carne (BAIRD, 2008; DASHDORJ et al., 2016; KIM et al., 2018a; RAMANATHAN et al., 2020).

Além disso, também pode-se citar outras desvantagens do processo como ser demorado, exigir maior controle ambiental e espaço, além de ter maior risco de contaminação microbiana (AHNSTRÖM et al., 2006; DASHDORJ et al., 2016; HULÁNKOVÁ et al., 2018; KIM et al., 2018a; STENSTRÖM et al., 2014).

2.3.3 Maturação à seco em embalagens

Recentemente, foi introduzido na indústria de carnes uma nova tecnologia de embalagem a fim de combinar o aumento do rendimento da maturação a vácuo com o desenvolvimento do perfil sensorial único e aprimorado da maturação à seco, sendo este processo denominado de *dry aging in a bag* (DIKEMAN et al., 2013; KIM et al., 2018a; RAMANATHAN et al., 2020).

Consiste em um sistema integrado de embalagens plásticas que são altamente permeáveis ao vapor d'água, ou seja, o material funciona como um plástico respirável, projetado para reduzir o peso, a perda de acabamento e, ou, contaminação microbiana e aumentar o rendimento, produzindo o sabor e a maciez desejados da maturação à seco (Figura 5). A empresa TUB-EX ApS (TUB-EX ApS, Dinamarca, modelo da embalagem TUBLIN®10) produz essas embalagens plásticas TUBLIN®10 que foram premiadas em 2011, em Chicago, EUA, na categoria de Inovações em Alimentos e Bebidas da *National Restaurant Association*, sendo comercializadas nos Estados Unidos pela denominação de “UMAi DrybagSteak®” por uma empresa com o mesmo nome (DASHDORJ et al., 2016; RAMANATHAN et al., 2020; STENSTRÖM et al., 2014; TUB-EX, 2023). Estas embalagens plásticas normalmente consistem em um elastômero termoplástico feito de polímero flexível e poliamida rígida em que as taxas de transmissão de vapor d'água são cerca de 2500 g/50μ/m²/24 horas a 38 °C com 50% de umidade relativa (TUB-EX, 2023).

Figura 5 - Processo de maturação à seco em embalagem (*Dry aging bag*)



Fonte: UMAi DRY® (2023)

Dikeman et al. (2013) observaram que as amostras maturadas à seco em embalagem apresentaram perda de peso de 13,48%, comparada à maturação convencional, cuja perda foi de 15,56%, sendo que sensorialmente não houve efeito do método de maturação. Li et al. (2013) obtiveram maior perda de peso (15,2%), contagem de bactérias totais e leveduras para a maturação à seco em embalagem quando comparada ao vácuo. No entanto, a carne maturada à seco em embalagem apresentou menor contagem de bactérias lácticas e, sensorialmente, foi preferida pelos consumidores (58%) que a identificaram como mais macia e suculenta.

Li et al. (2014), ao comparar os três métodos de maturação, notaram que a perda de peso foi afetada pelo método e tempo de maturação. A perda de peso da carne maturada à seco em embalagem foi maior (5,8 e 13,5%) que no vácuo (1,2 e 1,7%) após a maturação por 8 e 19 dias, respectivamente, sendo menor na maturação à seco convencional (6,9 e 15,3%, respectivamente). O painel sensorial não detectou diferenças entre as amostras maturadas, pelos dois métodos de maturação à seco, para a maioria dos atributos sensoriais.

Barragán-Hernández et al. (2022) observaram que a maturação à seco em embalagem por 28 dias aumentou as perdas totais de peso, gosto salgado e sabor lácteo azedo em comparação à maturação úmida. Além disso, a maturação à seco em embalagem também aumentou a suculência e o aroma de torrado na carne de novilho.

Ahnström et al. (2006), ao avaliarem os dois métodos de maturação à seco, não encontraram diferenças para pH, umidade, gordura, contagem total de bactérias aeróbicas, perda de peso, força de cisalhamento (maciez) ou qualquer atributo sensorial entre os dois tratamentos após o período de maturação. Os tratamentos foram descritos como altamente desejáveis quanto à maciez, sabor de carne maturada, de carne bovina e torrado/assado.

2.4 Efeito do congelamento na maturação de carne bovina

O congelamento é um processo antigo e eficaz, praticado há milhares de anos para a conservação de alimentos, principalmente para estender a vida útil da carne *in natura* e dos produtos cárneos. O congelamento e a refrigeração são métodos que empregam a diminuição da temperatura para promover a conservação dos alimentos, uma vez que, poucos microrganismos conseguem se desenvolver, as reações químicas são reduzidas e as reações metabólicas retardadas. Contudo, as temperaturas empregadas no congelamento são muito mais baixas, geralmente -18 °C ou menos, que as utilizadas na refrigeração (-1,5 a 5 °C) e, além disso, ocorre a formação de cristais de gelo no interior dos alimentos (CHOE; STUART; KIM, 2016; DELGADO; SUN, 2001; KIANI; SUN, 2011; KIM et al., 2015; LEYGONIE; BRITZ; HOFFMAN, 2012).

Assim, durante o processo de congelamento, a água presente nos alimentos forma cristais de gelo, sendo que a taxa de congelamento desempenha papel crucial na determinação do tamanho e na localização/distribuição destes cristais no tecido da carne congelada e, conseqüentemente, terá impacto na qualidade da carne congelada/descongelada. No congelamento lento, baixas taxas de congelamento ocasionam a formação de grandes cristais de gelo nas regiões extracelulares, causando danos mecânicos à microestrutura dos alimentos,

o que no descongelamento resultará na modificação da cor, sabor e textura, aumento da perda de gotejamento e redução da capacidade de retenção de água. Em contrapartida, o congelamento rápido, com altas taxas de congelamento, forma numerosos cristais de gelo menores e intracelulares, que são distribuídos uniformemente intracelularmente, o que resultará na minimização dos danos com o degelo (KIM et al., 2015; LI; ZHU; SUN, 2018).

Portanto, o congelamento e descongelamento são processos complexos com transferência de calor, promovendo diversas alterações físicas e químicas que estão diretamente ligadas à qualidade do produto. Desta forma, para se obter carne com propriedades tecnológicas adequadas, é necessário considerar todas as alterações sofridas em decorrência do congelamento/descongelamento (GAMBUTEANU; BORDA; ALEXE, 2013).

Estas alterações químicas, que ocorrem na carne *in natura* podem proporcionar efeitos positivos, como alteração da textura em decorrência da desnaturação e pela agregação de proteínas com diminuição da força de cisalhamento, mas por outro lado, também geram efeitos negativos que incluem descoloração com a oxidação da mioglobina, o desenvolvimento de ranço oxidativo, resultante da oxidação dos lipídios, e presença de exsudato. Todas estas mudanças são influenciadas por fatores, como graus de congelamento/descongelamento, tempo de armazenamento, condições de armazenamento no congelamento, condições atmosféricas da carne congelada e tipo de congelamento (rápido ou lento) (GAMBUTEANU; BORDA; ALEXE, 2013; LEYGONIE; BRITZ; HOFFMAN, 2012; STRASBURG; XIONG; CHIANG, 2010).

A literatura relata que o congelamento/descongelamento, antes ou após a maturação da carne, pode ser uma opção para melhorar a qualidade do produto final, ou seja, os efeitos indesejáveis na qualidade, em decorrência do congelamento, podem ser minimizados pela combinação dos métodos de congelamento/descongelamento e maturação (AROEIRA et al., 2016; AROEIRA, 2014; BERNARDO et al., 2020; CHOE; STUART; KIM, 2016; HADDAD et al., 2022; KIM et al., 2015; KIM et al., 2017; RODRIGUES, 2017; SALES et al., 2020; SETYABRATA; KIM, 2019).

Segundo Aroeira et al. (2016), existem indicações de que a aplicação do processo de congelamento, antes da maturação, pode reduzir a atividade da calpastatina quando submetida às temperaturas mais baixas e, desta forma, aumentar a maciez da carne, medida pela força de cisalhamento. Além da maior suscetibilidade à inativação da calpastatina no congelamento, também se propõe que os mecanismos envolvidos na maciez sejam uma combinação da degradação das fibras musculares, por meio da atividade enzimática durante a proteólise, da maturação e da perda da integridade estrutural ocasionada pela formação dos cristais de gelo.

A formação de grandes cristais de gelo no meio extracelular rompe a estrutura física, separando as miofibrilas, o que resulta na maciez da carne, enquanto que a formação de pequenos cristais de gelo intracelulares, aumenta a taxa de maturação pela liberação das enzimas proteases (LEYGONIE; BRITZ; HOFFMAN, 2012; VIEIRA et al., 2009).

Sales et al. (2020) observaram que o congelamento/descongelamento e subsequente maturação, por até 14 dias, proporcionaram uma diminuição nos valores da força de cisalhamento de 12,07 N, em relação às amostras refrigeradas, demonstrando a eficiência desses processos combinados para melhorar a maciez da carne bovina de animais Nelore. Já Aroeira et al. (2016), observaram que o congelamento antes da maturação reduziu a força de cisalhamento da carne de Angus, no primeiro dia de maturação, para um valor similar ao encontrado no décimo quarto dia, porém este resultado não foi observado na carne de animais Nelore, indicando que o congelamento pode ser usado para melhorar a maciez da carne nos primeiros dias de maturação, embora seja dependente da raça animal.

Haddad (2020) e Haddad et al. (2022) observaram que o congelamento /descongelamento, prévio à maturação úmida e à seco, favoreceram a redução do tempo de amaciamento da carne bovina da raça Nelore para 14 dias, que alcançou a mesma força de cisalhamento e maciez sensorial de carnes não congeladas maturadas convencionalmente aos 28 dias.

Bernardo et al. (2020), ao avaliarem o efeito do congelamento e descongelamento antes e após a maturação à seco, não observaram diferenças nos valores da força de cisalhamento entre os tratamentos. Segundo Setyabrata e Kim (2019), os resultados divergentes entre os estudos podem ser atribuídos a inúmeros fatores intrínsecos e extrínsecos, como a raça animal, tipo de músculo, tempo de maturação, temperatura de refrigeração, taxa e tipo de congelamento e duração do armazenamento congelado.

Contudo, sensorialmente, o efeito da combinação do congelamento/descongelamento e da maturação não estão bem elucidados. Vieira et al. (2009), ao avaliarem a maciez e a suculência de carnes maturadas à vácuo por 3 ou 10 dias e, depois, congeladas por 30, 75 ou 90 dias, observaram que a suculência não foi afetada por nenhum dos fatores analisados, enquanto a maciez das amostras maturadas por 10 dias não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, mas as carnes maturadas por 3 dias e congeladas foram consideradas mais macias, em relação ao controle não congelado.

Lagerstedt et al. (2008) observaram que o painel sensorial semi-treinado considerou a carne refrigerada mais macia, suculenta e com um sabor mais intenso do que a carne congelada, enquanto os consumidores não encontraram nenhuma diferença significativa. Kim

et al. (2017) observaram que os métodos de maturação e de congelamento não afetaram os parâmetros sensoriais para sabor, maciez e suculência, ou seja, os consumidores não encontraram diferença nos atributos sensoriais entre a carne congelada/descongelada e a carne não congelada (fresca), o que provavelmente se deve ao efeito positivo da maturação da carne bovina antes do congelamento.

Quanto à cor da carne, a Mb é a responsável pela alteração na estabilidade da cor, após o congelamento/descongelamento. Ao decorrer das etapas de congelamento, armazenamento e descongelamento, ocorre a desnaturação da proteína globina presente na molécula de Mb, o que torna o pigmento mais susceptível à auto oxidação e, conseqüentemente, à perda da coloração ideal vermelho brilhante. Além disso, à medida que a carne é maturada ou congelada, a MRA diminui e ocorrem o acúmulo da MMb na superfície da carne, bem como uma possível perda da MRA e, ou, co-fatores, como NADH, por lixiviação no exsudato com o descongelamento e, ou, devido à oxidação (LEYGONIE; BRITZ; HOFFMAN, 2012).

O aumento da oxidação lipídica está diretamente relacionado às alterações na cor, sabor e aroma, desta forma, quando a oxidação lipídica é iniciada, tem-se a formação de pró-oxidantes que reagem com a OMb, ocasionando a formação de MMb. Como todas as formas de oxidação estão interligadas, o mesmo princípio se aplica à oxidação de proteínas, por isso, pode-se afirmar que a oxidação consiste de uma reação em cadeia, iniciada pela fração lipídica e transferida para a Mb (LEYGONIE; BRITZ; HOFFMAN, 2012).

Aroeira et al. (2017) observaram que o congelamento promoveu maior teor de MMb durante a maturação úmida, possivelmente devido à redução da MRA e pelos danos celulares promovidos pelos cristais de gelo, ocasionando um maior contato da Mb com substâncias catalisadoras da oxidação. Além disso, obteve-se uma cor mais escura (menores valores de L^*), cuja estabilidade diminui com o congelamento.

Sales et al. (2020) não encontraram interação significativa entre o congelamento e a maturação úmida para os índices de cor, mas as amostras congeladas/descongeladas se apresentaram mais escuras (menores valores de L^*). Vieira et al. (2009) não observaram interação significativa entre a maturação úmida *post-mortem* e o congelamento para os parâmetros de cor e do índice de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS), no entanto, notaram que um período de congelamento prolongado torna a carne mais escura e amarronzada com diminuição de L^* , a^* , C^* e aumento de h , indicando que estes resultados podem estar relacionados ao aumento da oxidação lipídica, uma vez que, os valores de TBARS aumentaram.

Outra desvantagem relacionada ao processo de congelamento/descongelamento é a alteração do conteúdo e a distribuição de umidade na carne. A umidade por estar envolvida com a maciez e a suculência, pode ser avaliada por diversas maneiras, como a perda por gotejamento, perda por descongelamento, perda por cozimento, capacidade de retenção de água (CRA) e teor de umidade total. Como os cristais de gelo no congelamento danificam a estrutura celular, ocorre a movimentação da água livre dos espaços intracelulares para os extracelulares, que ao descongelar formam exsudatos denominados de “purga” ou “drip loss”. A menor capacidade de retenção de água da carne congelada/descongelada se deve à ruptura da estrutura da fibra muscular, bem como também à modificação e/ou desnaturação das proteínas (AROEIRA, 2014; LEYGONIE; BRITZ; HOFFMAN, 2012; RODRIGUES, 2017).

Kim et al. (2018b) verificaram que a perda por gotejamento e a perda de peso, nas amostras maturadas antes e após o congelamento/descongelamento, foram mais baixas quando comparadas somente ao congelamento/descongelamento. Aroeira et al. (2016) observaram que o congelamento aumentou a purga, perda por cozimento e a perda total de exsudato durante a maturação úmida. A purga acontece em qualquer sistema de embalagem, como em carne a vácuo na maturação úmida, porém, é necessário minimizar o exsudato visível por afetar características sensoriais e a intenção de compra pelo consumidor, visto que o produto não se torna atraente e implica em perdas econômicas para a indústria de carnes. Além disso, também pode fornecer um substrato para a multiplicação microbiana (AROEIRA et al., 2016; TROY; KERRY, 2010).

Quanto à questão microbiológica, os métodos de congelamento e descongelamento não diminuem a carga microbiana viável presente na carne, ou seja, durante o congelamento a deterioração é interrompida à medida que a proliferação microbiana é inibida, mas recuperam suas atividades no descongelamento. Desta forma, como o degelo é um processo mais lento e menos uniforme, as carnes podem ser expostas a condições de temperatura favoráveis e a formação de exsudato propicia um meio rico em nutriente para a multiplicação microbiana, o que o torna uma etapa preocupante quanto à contaminação microbiológica (LEYGONIE; BRITZ; HOFFMAN, 2012; RODRIGUES, 2017). Segundo Coombs et al. (2017), apesar de a literatura relatar que a deterioração da carne descongelada é mais rápida em relação à carne fresca, são necessários estudos que investiguem os perfis microbianos e a atividade de água da carne congelada após a exposição no varejo. Por esse motivo, boas práticas de higiene e manuseio são extremamente fundamentais para a carne congelada e descongelada (LEYGONIE; BRITZ; HOFFMAN, 2012).

2.5 Análise sensorial: uma ferramenta de avaliação do processo de maturação

Como descrito anteriormente, o processo de maturação desempenha um papel primordial no desenvolvimento dos atributos sensoriais da carne, como a maciez, sabor, suculência e aroma. No entanto, observa-se que a intensidade e o desenvolvimento destes atributos sensoriais que impactam positivamente na qualidade da carne são dependentes de inúmeros fatores, podendo citar entre eles, o tipo e o tempo de maturação.

Os resultados da análise sensorial dos diferentes métodos de maturação (*dry x wet aging*) ainda são inconsistentes e conflitantes, possivelmente se deve ao fato de que a maioria dos consumidores estão familiarizados com os atributos sensoriais desenvolvidos pela maturação úmida. Contudo, quando os consumidores se familiarizam com a carne maturada à seco estão dispostos a pagar mais e tendem a preferi-la, uma vez que, o processo de maturação à seco aprimora e intensifica os sabores desejáveis (DEGEER et al., 2009; KIM; KEMP; SAMUELSSON, 2016; LEE et al., 2019b; LI et al., 2013).

Smith et al. (2008) ao avaliarem os efeitos dos processos de maturação à seco e úmida nas características sensoriais da carne quanto ao gosto e sabor global, intensidade do sabor, maciez e suculência, observaram que os consumidores não conseguiram determinar as diferenças para nenhuma das características avaliadas entre a maturação à seco e a úmida. Dikeman et al. (2013) ao avaliarem os três métodos de maturação (à seco, à seco em embalagem e úmida) na característica de maciez, suculência e sabor do músculo *Longissimus lumborum*, também não observaram efeito do método de maturação, apresentando os atributos sensoriais semelhantes.

Além disso, a um debate relacionado as técnicas sensoriais para descrever as características sensoriais de carnes maturadas quanto aos avaliadores, sendo questionado se deve aplicar a análise sensorial com painel treinado ou com os consumidores, que são o público-alvo final do produto. Vilella et al. (2019) que avaliaram o efeito dos processos de maturação úmido e à seco e suas combinações no perfil sensorial descritivo das amostras de carne bovina observaram que o painel treinado foi incapaz de identificar as diferenças entre os tratamentos para qualquer um dos atributos sensoriais avaliados (aroma, sabor, aparência e textura).

Em outro estudo realizado por Ferreira (2018) foi feita a Análise Descritiva Quantitativa (ADQ[®]) somente dos atributos de sabor na qualidade sensorial da carne bovina maturada pelos processos seco e úmido em que observaram que as diferenças sensoriais

somente foram perceptíveis ao painel treinado após 42 dias de maturação, em que as carnes maturadas à seco apresentaram menor intensidade de gosto ácido.

No entanto, apesar de ser Análise Descritiva Quantitativa (ADQ[®]) ser utilizada para obtenção de informações detalhadas de um produto com avaliação de todos os atributos a um só tempo, apresenta como desvantagens o fato de ser um método complexo que demanda um longo tempo com treinamento intenso da equipe e, conseqüentemente, acarreta aumento do custo (AASLYNG et al. 2014).

Segundo Torrico et al. (2018) a avaliação sensorial de carne varia amplamente em diversos países e até em diferentes grupos de pesquisa num mesmo país, devido ao fato, deste alimento ser heterogêneo em termos de composição e características intrínsecas, apresentando uma variabilidade nos atributos sensoriais. Diante disso, observa-se que a percepção do consumidor de carnes é um fator crítico e importante para o setor industrial alimentício, uma vez que, terá impacto direto no poder de decisão de compra do consumidor e na lucratividade da empresa. Todavia, as percepções dos consumidores são complexas, dinâmica e difícil de definir, e assim, o papel da ciência e da tecnologia permitem que o setor cárneo aprimore a percepção dos consumidores sendo frequentemente alvo de inúmeras pesquisas (TROY; KERRY, 2010).

Portanto, os métodos descritivos de avaliação com consumidores surgem como uma proposta em relação aos métodos descritivos com painel treinado para redução do tempo e do custo do teste sensorial. Além de permitir a identificação de fatores que não são tradicionalmente detectados nas avaliações descritivas, como a aceitabilidade, preferência, satisfação, intenção de compra, etc. Dentre as metodologias rápidas de descrição sensorial pode-se citar o *Check-All-That-Apply* (CATA) (MINIM; SILVA, 2016).

Berger et al. (2018) e Kim, Kemp e Samuelsson (2016) avaliaram os efeitos da maturação à seco nos atributos sensoriais de aroma, maciez, suculência e sabor por 120 consumidores por meio de um teste afetivo. Em ambos os estudos observaram que a maturação à seco resultou em melhoras significativas para a maioria dos atributos sensoriais, principalmente para sabor, em comparação a maturação úmida. Já O'Quinn et al. (2016) aplicaram um teste descritivo com escala de intensidade para o atributo de sabor da carne bovina maturada pelos sistemas úmido e à seco com 307 consumidores e observaram que as amostras maturadas à seco tinham um sabor mais forte de tostado/grelhado.

Desta forma, observa-se que os testes sensoriais são necessários para descrever o perfil sensorial da carne bovina maturada à seco pelos consumidores, uma vez que, a intensidade do sabor e aroma são dependentes de fatores como o tempo de maturação, a raça do animal, entre

outros. Além disso, o processo de congelamento/descongelamento da carne seguido da maturação tem sido bastante avaliado na maturação úmida, mas pouco avaliado no processo de maturação à seco. Apesar de Haddad et al. (2022) terem observado que o congelamento/descongelamento prévio a maturação à seco favorece a maciez da carne bovina da raça Nelore em um menor tempo, pesquisas adicionais são necessárias para descrever e avaliar a redução do tempo de maturação no perfil sensorial e aceitação pelos consumidores, além de avaliar o efeito das diferentes raças Nelore e do cruzamento F1 Angus x Nelore.

3. CONSIDERAÇÕES GERAIS

No primeiro experimento, o congelamento/descongelamento proporcionou maiores perdas de peso ($P<0.05$) em ambos os sistemas de maturação, mas as perdas foram compensadas pela redução do tempo de maturação para 14 dias no sistema *dry-aging* (DA), diferentemente do sistema *wet-aging* (WA). Além disso, as amostras congeladas/descongeladas apresentaram ($P<0.05$) maior contagem de bactérias totais (5,49 logs UFC/g), mas sem comprometer a qualidade microbiológica, e maior taxa de amaciamento (menores valores de índice de fragmentação e força de cisalhamento e maior maciez sensorial). Por outro lado, o congelamento/descongelamento proporcionou ($P<0.05$) menor intensidade da cor (menor C^*), com maior instabilidade do pigmento de Mb e, logo, oxidação a MMb, sendo as amostras DA mais escuras (menor L^*).

No segundo experimento, nas amostras de Nelore e de cruzas F1 Nelore x Angus (F1Angus) maturadas no sistema DA, os consumidores perceberam diferenças ($P<0.05$) em 10 características sensoriais que contribuíram para discriminá-las, principalmente, em relação aos atributos de aparência e de textura, no teste *check-all-that-apply* (CATA). A carne Nelore maturada por 28 dias foi caracterizada como firme no CATA e diferente do F1Angus para textura no teste de aceitação. No sistema de maturação acelerada, a carne de Nelore foi similar as carnes F1Angus para o aspecto global, as quais foram igualmente aceitas pelos consumidores, com notas entre “gostei moderadamente (7)” a “gostei muito (8)”. O processo de maturação acelerada modificou os perfis de compostos voláteis, de ácidos graxos e de aminoácidos, aprimorando o sabor e o aroma com a concentração deles.

Portanto, o processo acelerado de maturação no sistema DA é vantajoso, pois permite alcançar a maciez e o perfil de sabor desejado em um menor tempo, sem aumentar os custos com as perdas de massa ou prejudicar a segurança microbiológica. Além disso, o processo de maturação acelerada permite melhorar as características sensoriais de carnes de animais zebuínos, equiparando-as a carnes de animais F1Angus, sendo uma alternativa viável e competitiva para comercialização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASLYNG, M. D. et al. Sensory assessment of meat. In: DIKEMAN, M.; DEVINE, C. **Encyclopedia of Meat Sciences**. 2^o edition, United Kingdom, UK: Elsevier Science & Technology, 2014. Chapter: 3, p. 272-279.
- ABIEC. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes. **Perfil da pecuária no Brasil. BeefREPORT**, 2022, 72 p. Disponível em: < <https://www.abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2022/> >. Acesso em: 01 abr. 2023.
- ACNB. **Associação Brasileira de Criadores de Nelore**. 2023. Disponível em: < <http://www.nelore.org.br/Raca> >. Acesso em: 01 abr. 2023.
- AHNSTRÖM, M. L. et al. Dry aging of beef in a bag highly permeable to water vapour. **Meat Science**, v. 73, n. 4, p. 674–679, 2006.
- AROEIRA, C. N. et al. Freezing, thawing and aging effects on beef tenderness from *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle. **Meat Science**, v. 116, p. 118–125, 2016.
- AROEIRA, C. N. **Efeito do congelamento prévio à maturação na maciez e cor da carne de tourinhos Nelore e Aberdeen Angus**. 2014. 112 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras – MG, 2014.
- AROEIRA, C. N. et al. Effect of freezing prior to aging on myoglobin redox forms and CIE color of beef from Nelore and Aberdeen Angus cattle. **Meat Science**, v. 125, p. 16–21, 2017.
- BAIRD, B. **Dry aging enhances palatability of beef**. Beef Safety/Quality – Product Enhancement Research, NCBA, p. 27-28, 2008.
- BARRAGÁN-HERNÁNDEZ, W. Effect of in-the-bag dry-ageing on meat palatability and volatile compounds of cull cows and youthful steers. **Meat Science**, v. 188, p. 108800, 2022.
- BERGER, J. et al. Dry-aging improves meat quality attributes of grass-fed beef loins. **Meat Science**, v. 145, p. 285–291, 2018.
- BERNARDO, A. P. S. et al. Effects of freezing and thawing on microbiological and physical-chemical properties of dry-aged beef. **Meat Science**, v. 161, p. 1-9, 2020.
- BHAT, Z. F. et al. Role of calpain system in meat tenderness: A review. **Food Science and Human Wellness**, v. 7, n. 3, p. 196–204, 2018.
- BIG CARNES (2023). Disponível em: < <https://www.bigcarnes.com.br/nossas-carnes.html> >. Acesso em: 25 mar. 2023.
- BISCHOF, G. et al. Analysis of aging type- and aging time-related changes in the polar fraction of metabolome of beef by ¹H NMR spectroscopy. **Food Chemistry**, v. 342, p. 128353, 2021.
- BISCHOF, G. et al. Effect of sampling position in fresh, dry-aged and wet-aged beef from *M.*

Longissimus dorsi of Simmental cattle analyzed by ^1H NMR spectroscopy. **Food Research International**, v. 156, p. 111334, 2022.

BOAKYE, K.; MITTAL, G. S. Changes in colour of beef *M. longissimus dorsi* muscle during ageing. **Meat Science**, v. 42, n. 3, p. 347–354, 1996.

BRASIL. Ministério de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria do Sistema de Defesa Agropecuária (SDA) nº 723 de 23 de dezembro de 2022. Dispõe sobre o regulamento técnico de identidade e qualidade para carne maturada de bovino. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 23 de dezembro de 2022. Disponível em: < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-sda-n-723-de-23-de-dezembro-de-2022-453548646> >. Acesso em: 01 abr. 2023.

BREWER, M. S. Irradiation effects on meat flavor: A review. **Meat Science**, v. 81, n. 1, p. 1–14, 2009.

BROOKS, F. T.; HANSFORD, C. G. Mould growths upon cold-store meat. **Transactions of the British Mycological Society**, v. 8, n. 3, p. 113–142, 1923.

CAMPBELL, R. E. et al. Dry-aging effects on palatability of beef *longissimus muscle*. **Journal of Food Science**, v. 66, n. 2, p. 196–199, 2001.

CAMPO, M. M. et al. Flavour perception of oxidation in beef. **Meat Science**, v. 72, n. 2, p. 303–311, 2006.

CARVALHO, M. E. et al. Heat shock and structural proteins associated with meat tenderness in Nellore beef cattle, a *Bos indicus* breed. **Meat Science**, v. 96, n. 3, p. 1318–1324, 2014.

CHOE, J. H.; STUART, A.; KIM, Y. H. B. Effect of different aging temperatures prior to freezing on meat quality attributes of frozen/thawed lamb loins. **Meat Science**, v. 116, p. 158–164, 2016.

COLLE, M. J. et al. Influence of extended aging on beef quality characteristics and sensory perception of steaks from the *gluteus medius* and *longissimus lumborum*. **Meat Science**, v. 110, p. 32–39, 2015.

COLLE, M. J. et al. Influence of extended aging on beef quality characteristics and sensory perception of steaks from the *biceps femoris* and *semimembranosus*. **Meat Science**, v. 119, p. 110–117, 2016.

COOMBS, C. E. O. et al. Long-term red meat preservation using chilled and frozen storage combinations: A review. **Meat Science**, v. 125, p. 84–94, 2017.

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

DASHDORJ, D. et al. Dry aging of beef; Review. **Journal of Animal Science and Technology**, v. 58, n. 1, p. 1–11, 2016.

DEGEER, S. L. et al. Effects of dry aging of bone-in and boneless strip loins using two aging

processes for two aging times. **Meat Science**, v. 83, n. 4, p. 768–774, 2009.

DELGADO, A. E.; SUN, Da W. Heat and mass transfer models for predicting freezing processes - a review. **Journal of Food Engineering**, v. 47, n. 3, p. 157–174, 2001.

DIKEMAN, M. E. et al. Effects of dry, vacuum, and special bag aging; USDA quality grade; and end-point temperature on yields and eating quality of beef *Longissimus lumborum* steaks. **Meat Science**, v. 94, n. 2, p. 228–233, 2013.

ELMORE, J. S. et al. Effect of Lipid Composition on Meat-like Model Systems Containing Cysteine, Ribose, and Polyunsaturated Fatty Acids. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 50, n. 5, p. 1126–1132, 2002. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf0108718>.

FAUSTMAN, C. et al. Myoglobin and lipid oxidation interactions: Mechanistic bases and control. **Meat Science**, v. 86, n. 1, p. 86–94, 2010.

FERRAZ, J. B. S.; FELÍCIO, P. E. Production systems - An example from Brazil. **Meat Science**, v. 84, n. 2, p. 238–243, 2010.

FERREIRA, F. M. S. **Efeitos da temperatura e umidade relativa do ar na qualidade da carne bovina maturada pelos processos seco e úmido**. 2018. 119 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, 2018.

FRIBOI (2021). Disponível em: <<https://friboi.com.br/pecuarista/comercializacao?id=5>>. Acesso em: 15 fev. 2021.

GAMBUTEANU, C.; BORDA, D.; ALEXE, P. The Effect of Freezing and Thawing on Technological Properties of Meat: Review. **Journal of Agroalimentary Processes and Technologies**, v. 19, n. 1, p. 88–93, 2013.

GOMES, R. C.; FEIJÓ, G. L. D.; CHIARI, L. **Evolução e Qualidade da Pecuária Brasileira**. Nota Técnica da Embrapa, p. 2–5, 2017.

GOMIDE, L. A. M.; RAMOS, E. M.; FONTES, P. R. **Ciência e qualidade da carne: fundamentos**. Viçosa: Editora UFV, 2013, 197 p.

GRANVOGL, M.; BEKSAN, E.; SCHIEBERLE, P. New insights into the formation of aroma-active strecker aldehydes from 3-oxazolines as transient intermediates. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, n. 25, p. 6312–6322, 2012.

HA, M. et al. Effects of different ageing methods on colour, yield, oxidation and sensory qualities of Australian beef loins consumed in Australia and Japan. **Food Research International**, v. 125, n. June, 2019a.

HA, Y. et al. Effects of Dry- And Wet-ageing on Flavor Compounds and Eating Quality of Low Fat Hanwoo Beef Muscles. **Food Science of Animal Resources**, v. 39, n. 4, p. 655–667, 2019b.

HADDAD, G. B. S. **Efeito do congelamento nos processos de maturação úmida e a seco**

da carne de gado zebuino. 2020. 115 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras – MG, 2020.

HADDAD, G. B. S. et al. Accelerating the dry aging of bone-in beef from Nellore cattle by the freeze/thaw process. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 7, p. e16573, 2022.

HERNÁNDEZ SALUEÑA, B. et al. CIELAB color paths during meat shelf life. **Meat Science**, v. 157, p. 1-8, 2019.

HIGHFILL, C. M. Tenderness profiles of ten muscles from F1 *Bos indicus* x *Bos taurus* and *Bos taurus* cattle cooked as steaks and roasts. **Meat Science**, v. 90, p. 881-886, 2012.

HULÁNKOVÁ, R. et al. The effect of dry aging on instrumental, chemical and microbiological parameters of organic beef loin muscle. **LWT - Food Science and Technology**, v. 89, p. 559–565, 2018.

IIDA, F. et al. Changes in taste compounds, breaking properties, and sensory attributes during dry aging of beef from Japanese black cattle. **Meat Science**, v. 112, p. 46–51, 2016.

JBS (2021). Disponível em: < <https://jbs.com.br/imprensa/acougue-gourmet-1953-friboi-chega-a-florianopolis/> >. Acesso em: 15 fev. 2021.

JCA (2019). Jornal Campo Aberto. Disponível em: < <https://jornalcampoaberto.com/2019/06/pao-de-acucar-e-friboi-criam-espaco-em-loja-para-producao-e-venda-de-cortes-premium-dry-aged/> >. Acesso em: 15 fev. 2021.

KEMP, C. M. et al. Tenderness - An enzymatic view. **Meat Science**, v. 84, n. 2, p. 248–256, 2010.

KHAN, M. I. et al. 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. 159–169, 2016.

KIANI, H.; SUN, Da W. Water crystallization and its importance to freezing of foods: A review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 22, n. 8, p. 407–426, 2011.

KILGANNON, A. K. et al. The effect of different temperature-time combinations when ageing beef: Sensory quality traits and microbial loads. **Meat Science**, v. 150, p. 23–32, 2019.

KIM, H. W. et al. Effects of aging/freezing sequence and freezing rate on meat quality and oxidative stability of pork loins. **Meat Science**, v. 139, p. 162–170, 2018b.

KIM, Y. H. B. et al. Evaluation of combined effects of ageing period and freezing rate on quality attributes of beef loins. **Meat Science**, v. 110, p. 40–45, 2015.

KIM, Y. H. B. et al. Effects of stepwise dry/wet-aging and freezing on meat quality of beef loins. **Meat Science**, v. 123, p. 57–63, 2017.

KIM, Y. H. B. et al. Understanding postmortem biochemical processes and post-harvest aging factors to develop novel smart-aging strategies. **Meat Science**, v. 144, p. 74–90, 2018a.

KIM, Y. H. B.; KEMP, R.; SAMUELSSON, L. M. Effects of dry-aging on meat quality attributes and metabolite profiles of beef loins. **Meat Science**, v. 111, p. 168–176, 2016.

KOOHMARAIE, M.; GEESINK, G. H. Contribution of postmortem muscle biochemistry to the delivery of consistent meat quality with particular focus on the calpain system. **Meat Science**, v. 74, n. 1, p. 34–43, 2006.

KOSOWSKA, M.; MAJCHER, M. A.; FORTUNA, T. Volatile compounds in meat and meat products. **Food Science and Technology**, v. 37, n. 1, p. 1–7, 2017.

LAGERSTEDT, Å. et al. Effect of freezing on sensory quality, shear force and water loss in beef *M. longissimus dorsi*. **Meat Science**, v. 80, n. 2, p. 457–461, 2008.

LANA, A.; ZOLLA, L. Proteolysis in meat tenderization from the point of view of each single protein: A proteomic perspective. **Journal of Proteomics**, v. 147, p. 85–97, 2016.

LANARI, M. C.; CASSENS, R. G. Mitochondrial Activity and Beef Muscle Color Stability. **Journal of Food Science**, v. 56, n. 6, p. 1476–1479, 1991.

LASTER, M. A. et al. Dry versus wet aging of beef: Retail cutting yields and consumer sensory attribute evaluations of steaks from ribeyes, strip loins, and top sirloins from two quality grade groups. **Meat Science**, v. 80, n. 3, p. 795–804, 2008.

LEE, H. J. et al. Changes in microbial composition on the crust by different air flow velocities and their effect on sensory properties of dry-aged beef. **Meat Science**, v. 153, p. 152–158, 2019a.

LEE, H. J. et al. Role of moisture evaporation in the taste attributes of dry- and wet-aged beef determined by chemical and electronic tongue analyses. **Meat Science**, v. 151, p. 82–88, 2019b.

LEGAKO, J. F. et al. Consumer palatability scores and volatile beef flavor compounds of five USDA quality grades and four muscles. **Meat Science**, v. 100, p. 291–300, 2015.

LEGAKO, J. F. et al. Consumer palatability scores, sensory descriptive attributes, and volatile compounds of grilled beef steaks from three USDA Quality Grades. **Meat Science**, v. 112, p. 77–85, 2016.

LEYGONIE, C.; BRITZ, T. J.; HOFFMAN, L. C. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review. **Meat Science**, v. 91, n. 2, p. 93–98, 2012.

LI, D.; ZHU, Z.; SUN, Da W. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 75, p. 46–55, 2018.

LI, X. et al. Meat quality, microbiological status and consumer preference of beef *gluteus medius* aged in a dry ageing bag or vacuum. **Meat Science**, v. 95, n. 2, p. 229–234, 2013.

LI, X. et al. A comparative study of beef quality after ageing *longissimus* muscle using a dry ageing bag, traditional dry ageing or vacuum package ageing. **Meat Science**, v. 97, n. 4, p.

433–442, 2014.

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

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

MANCINI, R. A.; HUNT, M. C. Current research in meat color. **Meat Science**, v. 71, n. 1, p. 100–121, 2005.

MANCINI, R. A.; RAMANATHAN, R. Effects of postmortem storage time on color and mitochondria in beef. **Meat Science**, v. 98, n. 1, p. 65–70, 2014.

MARTINS, S. I. F. S.; JONGEN, W. M. F.; VAN BOEKEL, M. A. J. S. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. **Trends in Food Science and Technology**, v. 11, n. 9–10, p. 364–373, 2001.

MCKENNA, D. R. et al. Biochemical and physical factors affecting discoloration characteristics of 19 bovine muscles. **Meat Science**, v. 70, n. 4, p. 665–682, 2005.

MINIM, V. P. R.; DA SILVA, R. C. S. N. **Análise Sensorial Descritiva**. Viçosa: Editora UFV, 2016, 280 p.

NOWAK, D. Enzymes in tenderization of meat - the system of calpains and other systems - a review. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**, v. 61, n. 4, p. 231–237, 2011.

O'QUINN, T. G. **Identifying preferences for specific beef flavor characteristics**. 2012. 155 p. Dissertation (Doctor of Philosophy of Department of Animal Sciences) - Colorado State University, 2012.

O'QUINN, T. G. et al. Identifying consumer preferences for specific beef flavor characteristics in relation to cattle production and postmortem processing parameters. **Meat Science**, v. 112, p. 90–102, 2016.

PERRY, N. Dry aging beef. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, v. 1, n. 1, p. 78–80, 2012.

RAMANATHAN, R. et al. Biochemical changes of postmortem meat during the aging process and strategies to improve the meat quality. **Meat Quality Analysis: Advanced Evaluation Methods, Techniques, and Technologies**, 2020. Chapter: 5, p. 67–80.

RAMOS, E. M.; GOMIDE, L. A. M. **Avaliação da Qualidade de Carnes: Fundamentos e Metodologias**. 2º ed. Viçosa: Editora UFV, 2017, 472 p.

RESCONI, V. C. et al. Ageing and retail display time in raw beef odour according to the degree of lipid oxidation. **Food Chemistry**, v. 242, p. 288–300, 2018.

RODRIGUES, L. M. **Efeitos da radiação gama e do congelamento prévios à maturação na maciez da carne bovina**. 2017. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) -

Lavras-MG., 2017.

RODRIGUES, L. M. et al. Combined effects of gamma irradiation and aging on tenderness and quality of beef from Nellore cattle. **Food Chemistry**, v. 313, p. 126137, 2020.

SALES, L. A. et al. Effect of freezing/irradiation/thawing processes and subsequent aging on tenderness, color, and oxidative properties of beef. **Meat Science**, v. 163, p. 1-9, 2020.

SAVELL, J. W. **Dry-aging of Beef: Executive Summary**. Center for research and Knowledge management National Cattlemen's Beef Association, 12 p., 2008.

SETYABRATA, D.; KIM, Y. H. B. Impacts of aging/freezing sequence on microstructure, protein degradation and physico-chemical properties of beef muscles. **Meat Science**, v. 151, p. 64–74, 2019.

SHAHIDI, F. et al. Meat flavor volatiles: A review of the composition, techniques of analysis, and sensory evaluation. **CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 24, n. 2, p. 141–243, 2012.

SMITH, A. M. et al. Retail yields and palatability evaluations of individual muscles from wet-aged and dry-aged beef ribeyes and top sirloin butts that were merchandised innovatively. **Meat Science**, v. 97, n. 1, p. 21–26, 2014.

SMITH, R. D. et al. Dry versus wet aging of beef: Retail cutting yields and consumer palatability evaluations of steaks from US Choice and US Select short loins. **Meat Science**, v. 79, n. 4, p. 631–639, 2008.

STENSTRÖM, H. et al. Consumer preference and effect of correct or misleading information after ageing beef *longissimus* muscle using vacuum, dry ageing, or a dry ageing bag. **Meat Science**, v. 96, n. 2, p. 661–666, 2014.

STETZER, A. J. et al. Effect of enhancement and ageing on flavor and volatile compounds in various beef muscles. **Meat Science**, v. 79, n. 1, p. 13–19, 2008.

STRASBURG, G.; XIONG, Y. L.; CHIANG, W. Fisiologia e Química dos Tecidos Musculares Comestíveis. In: DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4ª edição, Porto Alegre: Artmed, 2010. Cap. 16, p. 719-754.

SUMAN, S. P. et al. Improving beef color stability: Practical strategies and underlying mechanisms. **Meat Science**, v. 98, n. 3, p. 490–504, 2014.

TERJUNG, N.; WITTE, F.; HEINZ, V. The dry aged beef paradox: Why dry aging is sometimes not better than wet aging. **Meat Science**, v. 172, p.108355, 2021.

TORRICO, D. D. et al. Novel techniques to understand consumer responses towards food products: A review with a focus on meat. **Meat Science**, v. 144, p. 30–42, 2018.

TROY, D. J.; KERRY, J. P. Consumer perception and the role of science in the meat industry. **Meat Science**, v. 86, n. 1, p. 214–226, 2010.

TUB.EX (2023). Disponível em: < <http://tub-ex.com/products/tublin/tublin-10> >. Acesso em: 01 abr. 2023.

UMAi DRY® (2023). Disponível em: < <https://drybagsteak.com/help/dry-aging-steps/> >. Acesso em: 01 abr. 2023.

VAN BA, H. et al. Principle of Meat Aroma Flavors and Future Prospect. **Latest Research into Quality Control.**, v. 2, p. 145–176, 2012.

VIEIRA, C. et al. Effect of frozen storage conditions (temperature and length of storage) on microbiological and sensory quality of rustic crossbred beef at different states of ageing. **Meat Science**, v. 83, n. 3, p. 398–404, 2009.

VILELLA, G. F. **Efeitos dos processos de maturação úmido e seco e suas combinações nos atributos físicos, químicos e sensoriais em filé de costela bovino.** 2016. 78 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Campinas-SP., 2016.

VILELLA, G. F. et al. Effects of combined wet- and dry-aging techniques on the physicochemical and sensory attributes of beef Ribeye steaks from grain-fed crossbred Zebu steers. **Canadian Journal of Animal Science**, v. 99, n. 3, p. 497-504, 2019.

VITALE, M. et al. Effect of aging time in vacuum on tenderness, and color and lipid stability of beef from mature cows during display in high oxygen atmosphere package. **Meat Science**, v. 96, n. 1, p. 270–277, 2014.

WATANABE, A. et al. Effect of aging on volatile compounds in cooked beef. **Meat Science**, v. 107, p. 12–19, 2015.

WYRWISZ, J. et al. Influence of 21 days of vacuum-aging on color, bloom development, and WBSF of beef *semimembranosus*. **Meat Science**, v. 122, p. 48–54, 2016.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1
Artigo redigido conforme a norma do periódico *Meat Science*
“Versão Preliminar”

Effects of accelerated aging by the freezing/thawing process on the quality of Nellore wet- and dry-aged beef

Abstract

This study aimed to evaluate the effects of accelerating aging by the freezing/thawing process on the Nellore beef quality. Strip loins were assigned to two treatments, non-frozen (NF) and freezing/thawing (FT), and aging (for 7, 14 and 28 days) by two systems: bone-in dry-aging (DA); and boneless wet-aging (WA). FT resulted in greater weight losses during aging compared to NF, especially in DA process, but the weight losses of the FT 14-day DA beef were like the NF 28-day DA ones. FT beef had a lower fragmentation index and shear force values, being the maximum sensorial tenderness achieved earlier (14 days) compared to the NF counterparts (28 days) for both systems. At 28-days aging, DA beef had higher tenderness and juiciness scores, and lower lightness values than those of WA beef. FT reduced the reducing capacity of meat, leading to greater metmyoglobin formation and lower chrome values than NF. The volatile profile expected in DA beef was achieved faster in FT samples and the treatments did not compromise the microbial count in both aging systems. Therefore, accelerated DA by the FT process could improve the palatability of Nellore beef, allowing the desired tenderness and flavor profile to be achieved in a shorter time, without increasing costs with weight losses or adversely affecting technological and microbial characteristics.

Keywords: Grass-fed Zebu beef, tenderness, color, microbial shelf-life, volatile profile.

1 Introduction

With a commercial herd of beef cattle of 194.4 million, Brazilian livestock in 2022 occupied the position of largest producer and largest exporter of beef in the world (USDA, 2023). However, Brazil still faces limitations in terms of meat quality, since the cattle herd is predominantly made up of Zebu breeds (*Bos indicus*), highlighting the Nellore breed and its crosses, raised in pasture systems and which have less tenderness and lower fat marbling than European cattle (*Bos taurus*) (Haddad et al., 2022).

Thus, aging is an important process for consumers and for the Brazilian meat industry, since it allows a substantial improvement in meat tenderization and palatability, by breaking

the muscle structure and providing unique and characteristic flavor and aroma through the action of the endogenous protease (O'Quinn et al., 2016; Resconi, Bueno, Escudero, Magalhaes, Ferreira, & Campo, 2018). The current industrial aging process (wet-aging) consists of keeping the vacuum-packaged beef in temperatures between -1 to 4 °C for sufficient time (14 to 21 days) to maximize their palatability before commercialization (Ramos & Gomide, 2017). Another form of aging that has gained popularity more recently, is the dry-aging process, in which the primal and/or sub-primal cuts are stored (at 0 to 4°C) without protective packaging, under varying conditions of air flow and relative humidity, for an extended period of time (up to 60 days) (Rezende-de-Souza, Cardello, de Paula, Ribeiro, Calkins, & Pflanzler, 2021). Currently, in Brazil, dry aged meat has been produced and sold by specialized butchers, as a gourmet or premium product that caters to specific market niches. The dry-aged beef is marketed under claims of “buttery and rich,” “superb in taste and texture,” “superior in taste and tenderness,” “mellow and intense,” and “earthy and nutty” to describe its advantages compared to wet aged beef (Zhang, Yoo, Ross, & Farouk, 2022).

Although the dry-aging beef can be an efficient alternative to improve quality attributes and aggregate value to low marbling grass-feed beef (Berger et al., 2018; Haddad et al., 2022; Lepper-Bllilie, Berg, Buchanan, & Berg, 2016), the proteolysis in Zebu beef during aging is knowingly less than in European cattle, needing more aging time to reach the same degree of tenderness (Aroeira et al., 2016). To speed up the aging process, it has been suggested that the desired tenderness can be achieved by the meat freezing and thawing process prior to wet-aging (Aroeira et al., 2016; Grayson, King, Shackelford, Koohmaraie, & Wheeler, 2014; Kim & Kim, 2017; Sales et al., 2020). Freezing is an efficient process to increase beef shelf life, solving problems such as distribution and storage, and it can be easily incorporated by the industry to improve meat tenderness.

Although the effects of beef accelerated aging by freezing/thawing have been extensively evaluated in wet-aging it is still necessary to better evaluate its use in dry-aging, where weight losses during the process are greater. In the wet-aging process, the increase in weight losses is the main negative effect of the freezing/thawing process (Aroeira et al., 2016), but in the dry-aging process greater losses can contribute to accelerating the moisture lost and, consequently, the desired biochemical reactions in the process (Haddad et al., 2022). However, freezing/thawing could also cause changes in meat color and reduce its stability during storage, in addition to providing greater development of oxidative and microbial rancidity (Aroeira et al., 2017; Coombs, Holman, Friend, & Hopkins, 2017), and therefore altering the meat flavor profile. To our knowledge, only two studies have evaluated the effects

of the freezing/thawing process on beef dry-aging, and only one had reported its effects at different aging times. Bernardo et al. (2020) reported that the freezing/thawing process did not affect microbial counts and modified the volatile profile of Zebu beef dry-aged for 28 days but concluded that the process was not viable due to increased weight loss. On the contrary, Haddad et al. (2022) observed that the weight losses with freezing/thawing were compensated by the reduction of the dry-aging time to 14 days, with the development of the characteristic volatile profile and with an instrumental and sensorial tenderness similar to (non-frozen) 42-day aged Zebu beef. However, the effects of other important characteristics of dry-aged meat, such as color attributes, have not been evaluated, as well as the comparison of the effects with the wet-aging process.

Providing clear evidence of the effects of the freezing/thawing process on the overall quality of wet- and dry-aged beef destined for retail supermarkets is essential for the industry to understand the opportunities to reach new markets and improve the palatability of their products. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effects of accelerated aging by freezing/thawing process on microbiological, physicochemical, chemical (volatile compounds), and sensorial quality of Nellore wet- and dry-aged beef at different aging time.

2 Material and methods

2.1 Sample collection and preparation

Ten paired bone-in and six paired boneless strip loins (*M. Longissimus lumborum*), similar to the North American Meat Processors Association #175 and #180 (NAMP, 2007), respectively, from 16 grass-fed Nellore beef (24-30 mo old and 269 ± 28 kg of average carcass weight) were collected within 48 h postmortem from a commercial processing facility, packaged in a plastic film (not vacuum-sealed), placed on ice and transported to the Meat Laboratory of the Federal University of Lavras (LabCarnes/UFLA). At the laboratory, the pairs of loins of each carcass were identified and balanced into the two treatments (non-frozen, NF; and frozen/thawed, FT) in a predetermined design to avoid an effect of anatomical position. Bone-in loins were assigned to dry-aging (DA) and boneless loins to the wet-aging (WA) processes.

Each loin was cut into three 15-cm sections, starting from the anterior end, providing six sections from both sides per carcass. The bone-in loins were cut using a bandsaw (model SFO 1.69; C.A.F. Máquinas, Rio Claro, SP, Brazil). The sections from the NF treatment were weight and directly assigned to the aging process, while the sections from the FT treatment

were weight, individually packaged, frozen in commercial freezer (-18°C) for 7 days before thawing (4 °C/24 h) and aging. Bone-in loins sections were packaged in a plastic film (not vacuumed or sealed) and boneless loins sections were vacuum-packed (BS420; R.Baião, Ubá, MG, Brazil) in nylon-polyethylene packages (90 µm thickness; oxygen transmission rate of 30-60 cm³ m⁻² day⁻¹ atm⁻¹ at 22 °C).

2.2 Aging conditions and sampling

Samples from both treatments were stored at 4 °C in a four-door commercial fridge (GREP-4P model; Gelopar; Chapada Araucária, PR, Brazil), with minimal air circulation (< 0.2 m/s). Loin sections assigned to DA were storage without bag (removed from the FT samples) while WA samples remained in the vacuum sealed oxygen barrier bags. The chamber temperature (4.6 ± 0.8 °C) and relative humidity ($82.7\% \pm 9.2\%$) were measured by a digital thermo-hygrometer (Data Logger HT500; Instrutherm, São Paulo, SP, Brazil). During aging, the position of each piece in the fridge shelves was changed (DA samples were also weight), randomly every 7 days, to avoid any position effects among the treatments. At 0 (72 h postmortem), 14, and 28 days of aging, one section from each treatment and aging system was removed for analysis. The weight losses of DA (evaporation loss) and WA (exudate loss) after aging were calculated as percent of section weight before aging.

After aging time, each section of WA samples was unpacked, weighted and four 2.50-cm thick steaks were cut and identified for physicochemical, sensory (two steaks) or shear force analysis. DA samples were trimmed free of external crust and cut into four 2.50-cm thick steaks using a bandsaw (simulating the cut for sale with bone).

2.3 Physicochemical and microbiological analysis

Immediately after obtaining the steak, about 10 g of sample (in duplicate) were aseptically removing from the *longissimus* muscle (by internal cut of the steak), diluted with 90 mL of 0.1% peptone water, homogenized for 3 min in Stomacher (Metroterm, Brazil; 490 strokes/min) and plated after successive decimal dilutions. The total bacteria counts (TBC) were estimate in Trypticase Soy Agar (TSA) after incubation (at 37 °C) for 48 h (Silva, Junqueira, Silveira, Taniwaki, Gomes, & Okazaki, 2017). Results were expressed as the logarithmic of colony forming units (CFU) per gram (log CFU/g).

After sampling for microbiological analysis, the pH was measured by penetration, in three different points of the remained *longissimus* muscle, using a portable pH meter (206-pH2; Testo the Brazil, Campinas, SP, Brazil). Finally, about 4 g were collected (in triplicate)

for measurement of the myofibrillar degradation during aging, estimated by the fragmentation index (FI) method as described by Aroeira et al. (2016). Lower FI values indicate greater proteolysis of the myofibrillar structure.

2.4 Color analyzes

Color analyzes were performed using a CM-700 portable spectrophotometer (Kônica Minolta Sensing Inc., Osaka, Japan), with an 8 mm door opening, illuminant A and 10° observer angle, in both specular excluded (SCE) and included (SCI) light modes.

Color readings were conducted directly on five different points (replicates) of the surface of the shear force steak after blooming for 30 min at room temperature. The reflectance values (from 400 to 710 nm) recorded in the SCI mode were used to estimate the chemical proportions of the myoglobin (metmyoglobin, MMB; deoxymyoglobin, DMB; and oxymyoglobin, OMB) by the Krzywicki (1979) mathematical method. From the data obtained in SCE mode, the average values of the CIE color index, lightness (L^*), redness (a^*), yellowness (b^*), chroma (C^*) and hue angle (h , degrees) were recorded.

Pieces of $5 \times 5 \times 1.25$ cm (in duplicate) were collected in the steak of physicochemical analysis for determine the oxygen consumption rate (OCR) and metmyoglobin reducing activity (MRA), according to procedures described by Rodrigues et al. (2020). The MRA were determined by nitric oxide reducing ability (NORA) method, and the proportion of initial metmyoglobin (IMetF) immediately after the meat oxidation with nitrite was also recorded and used as an indicator of the MRA. These analyzes were performed on six samples from each aging system (all 6 wet-aged samples and 6 of the 10 dry-aged samples).

2.5 Shear force

After blooming and color readings, the steak was grilled at 180-200 °C on pre-heated clam-shell grill (model SCGE; Croydon; Duque de Caxias, RJ, Brazil) until they reached an internal temperature of 68 °C, when it was taken off the grill to target a peak internal temperature of 71-72 °C. Individual peak temperatures were recorded using a digital thermometer (Chugod-Smart Wireless BBQ Thermometer) placed in the geometric center of each steak. Steaks were weighed before and after cooking to calculate cooking losses (CL), reported as percentage of initial weight.

After cooking, the steaks were allowed to cool (at 4 °C) for 12 h before shear force analysis, determined according to the method of Warner-Bratzler square Shear Force (WBsSF) described by Silva, Torres Filho, Cazedey, Fontes, Ramos, and Ramos (2015). Six

rectangular sections (1.0 x 1.0 x 2.5 cm) were obtained (in the direction of the muscle fibers) and sheared transversely (at 3.33 mm s⁻¹) by a V-blade type Warner-Bratzler. The maximum force (N) required to shear completely each section was measured in a TA.XTplus texturometer (Stable Micro Systems Ltd., Godalming, Surrey, UK) and the average readings were taken for each sample.

2.6 Trained sensory analysis

Tenderness and juiciness were determined by a sensory panel whose members were selected and trained according to Cross, Moen, and Stanfield (1978). The sensory analysis was approved by the Human Research Ethics Committee of Federal University of Lavras (CAAE: 36202520.0.0000.5148) and the written informed consent form (TCLE) was signed from all study participants.

Ten panelists (5 women and 5 men, with 20 to 45 years old), declared frequent beef consumers, were selected through the triangular difference tests using a sequential analysis procedure. Panelists were trained to form a sensory memory and identify the beef tenderness and juiciness related to maximum and minimum intensity references. Thaw rigor and 21-day wet-aged striploin steaks of Nelore animals were used as tough and tender muscle references, respectively; and striploin steaks cooked to “rare” (internal temperature 60 °C) and “well-done” (internal temperature 80 °C) degrees of doneness were used as juicy and slight juicy references, respectively (Silva, de Moura, Ramos, & Ramos, 2017). During training, samples were presented one at a time to each panelist, all seated in a room together. After scoring each sample in a 8-point scale, panelists individually discussed their ratings and the panel leader strived to identify the extremes and middle of the rating scale.

The sensory evaluation was performed at ambient temperature in individual booths with white light on the day of obtaining the target aging time. The 2.50 cm thick steaks were grilled until internal temperature of 72 °C as described for shear force analysis and rectangular sections (1.0 cm x 1.0 cm x steak thickness) obtained. The trained sensory panel assessed the three-digit coded cooked sections (at ~ 40 °C), in a monad form, using an 8-point scale (1 = tough/slightly juicy; and 8 = extremely tenderness/juicy) in three sessions (replicates). Each session was performed with all the four samples (one of each treatment). Distilled water and unsalted saltine crackers were supplied as palate cleansers between samples.

2.7 Volatile compounds profile

The volatile organic compounds (VOC) profile was performed using the headspace-solid phase microextraction (HS-SPME) technique as previously described by Haddad et al. (2022), with minor adaptations. Divinylbenzene/Carboxen/Polydimethylsiloxane (DVB/CAR/PDMS, 10 mm length, 50-30 μ m thick layer; Supelco Bellefonte, PA, USA) fiber as stationary phase was used for the extraction. The separation and identification of VOC were conducted at the Chemical Analysis and Prospecting Center (CAPQ/UFLA), using a gas chromatograph coupled to a mass spectrometer (GC-MS, QP2010 Plusmodel; Shimadzu®, kyoto, Japan), equipped with an automatic injector for liquids and gases (AOC-5000; Shimadzu®, kyoto, Japan).

Individual portions of three steaks (one from each animal) at each sampling time were ground at once to obtain a pooled sample. About 2.5 g of raw composite were weighed into a 22 mL headspace vial and sealed with a PTFE-faced silicone septum (Supelco, Bellefonte, PA, USA). The vials were preheated for 15 min at 60 °C in a heating block, and then the HP-SPME fiber was exposed in the headspace for 45 min to extract the compounds. Prior to extraction, the fiber was conditioned at 250 °C for 5 min to prevent possible contamination. After extraction, VOC were injected into a SLB®-5MS capillary column (5% phenyl- 95% dimethylsiloxane; 30 m \times 0.25 mm i.d., 0.25 μ m film thickness; Supelco, Bellefonte, PA, USA) and separated. Thermal desorption was performed at 250 °C in a split less mode injector for 2 min. Ramped oven temperature was used to improve volatiles separation. The initial oven temperature of 35 °C was held for 2 min. After that, the oven temperature was increased to 80 °C at 2 °C per min, to 150 °C at 4 °C per min and finally to 230 °C at 8 °C per min. The carrier gas used was He 5.0 with a flow rate of 1.0 mL/min. The ionization potential of MS was 70 eV, the interface and ion source temperatures were 250 and 200 °C, respectively, and the scan range was 45 to 350 Da with a solvent cut in 0.55 min. The identification of volatiles was achieved by comparing mass spectral data of samples with those of the MS software library (Wiley 8 and FFNSC 1.2). A homologous series of alkanes (Supelco, Bellefonte, PA, USA) were used as standards to confirm the identification by the mass-selective detector. The area of each peak was integrated using the GCMS Solutions Software (Shimadzu®, kyoto, Japan).

2.8 Statistical analysis

Physiochemical, microbiological, color and shear force data were analyzed as a completely randomized design, arranged in a split-plot factorial scheme with 2 (wet and dry-

aging) \times 2 (non-frozen and frozen/thawed) in the plot and the three aging times in the subplot, with 10 repetitions for dry-aging and six repetitions for wet-aging (OCR and MRA were performed in six repetitions for both aging systems). Sensorial data were analyzed as a randomized block design, in each panelist ($n = 10$) constituted a block. The main factors and its interactions were tested by ANOVA and, if necessary ($P < 0.05$), Tukey's test was used to separate the means. The relationships between the VOC within the studied effects were explored by the multivariate statistical technique of principal component analysis (PCA). Statistical analysis was performed using the Statistica® 8.0 software (StatSoft Inc., Tulsa, OK).

3 Results and discussion

3.1 Evaporation and exudation losses

Weight losses in the wet- and dry-aged samples were affected ($P < 0.05$) only by the aging time (Figure 1). As expected, the percent aging weight loss was greater in the dry-aged strip (DA) loins compared with wet-aged (WA) strip loins as it results in a considerable amount of water evaporation, subsequently exhibiting increased surface dewatering (crusts) (Berger et al., 2018; Kim, Kemp, & Samuelsson, 2016; Laster et al., 2008; Smith et al., 2008). Freezing/thawing (FT) also provided ($P < 0.05$) greater losses due to mechanical damage to the structural integrity of the cell membrane by the formation of ice crystals, increasing the flow of water from the intracellular to the extracellular region after thawing and, therefore, increasing the exudation (especially during thawing) and evaporation losses with aging time (Grujić, Petrović, Pikula, & Amidžić, 1993; Haddad et al., 2022). Freezing also causes solute concentration in the cell, which results in greater protein denaturation resulting from increased intracellular ionic strength and hence decreased water-holding capacity of the meat (Sales et al., 2020), contributing to the weight losses.

Greater weight losses in frozen/thawed samples than non-frozen ones are reported both in wet-aging (Aroeira et al., 2016; Sales et al., 2020) and dry-aging (Bernardo et al., 2020; Haddad et al., 2022) processes. However, structural loss with cryogenic damage reduced the differences in the weight loss between aging systems at 28 days, since greater differences were observed in non-frozen samples (about 6x higher weight loss in dry-aged) than in frozen/thawed samples (about 3x higher weight loss in dry-aged). Furthermore, in the dry-aging system, the weight loss in samples frozen/thawed and aged for 14 days (19.97 ± 3.28 %) was similar ($P > 0.05$) to the samples non-frozen and aged for 28 days ($21.72 \pm$

2.50%), as also noted by Haddad et al. (2022). On the other hand, in the wet-aging system, the shorter aging time of the frozen/thawed samples (7.79 ± 1.06 % at 14 days) did not compensate the losses observed in the non-frozen samples at the end of the aging (3.30 ± 1.55 % at 28 days).

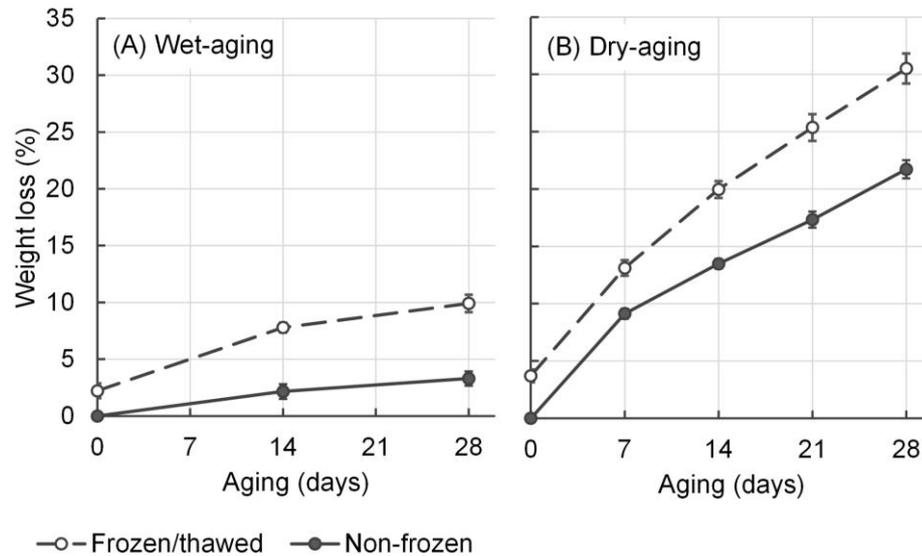


Figure 1. Effects of treatments (non-frozen and frozen/thawed) on the weight losses of strip loins from Nellore cattle during (A) wet-aging (WA; boneless) and (B) dry-aging (DA; bone-in) at 4 °C. NF = non frozen samples; FT = frozen (-18 °C for 7 days) and thawed (4 °C for 24 h) samples. Bars represent the standard error of the mean.

3.2 pH and microbial growth

The pH values were affected ($P < 0.05$) only by the aging system, being slightly higher ($P < 0.05$) in dry-aging ones (Table 1). This effect was partially due to differences in the initial pH of the samples (5.70 ± 0.21 for bone-in loins and 5.64 ± 0.12 for boneless loins). Li, Babol, Bredie, Nielsen, Tománková, and Lundström (2014) also reported lower pH values (5.57) in wet-aged samples compared to dry-aged ones (5.63) for 19 days, while Berger et al. (2018) did not detect significant differences in samples of grass-fed beef loins aged for 28 days in both systems. As for the effect of freezing, some authors observed lower pH values in frozen/thawed and wet-aged beef (Aroeira et al., 2016; Sales et al., 2020), while others also did not observe any effect (Carolino, Rodrigues, Bressan, Carolino, Espadinha, & Telo da Gama, 2009). Furthermore, Haddad et al. (2022) and Bernardo et al. (2020) also observed no effect of freezing on the pH values of dry-aged beefs for up to 28 days.

Table 1. Effects of the aging system (S), treatment (T), and aging time (D) on the pH values, total bacteria count (TBC), fragmentation index (FI), cooking loss (CL), shear force (SF), and sensory tenderness (TENDER) and juiciness (JUICY) of muscles (*L. lumbrorum*) from Nellore cattle.

Effects	Source of variation	pH	TBC (log CFU/g)	FI	CL (%)	SF (N)	TENDER [†]	JUICY [†]
Aging system	Dry aging	5.69 ^x	4.22 ^y	414 ^x	21.34	39.46	6.23	5.98
	Wet aging	5.58 ^y	4.87 ^x	373 ^y	22.30	40.85	5.70	5.86
Treatment	Non-frozen	5.64	4.07	413 ^x	22.35	44.18 ^x	5.89	6.13
	Frozen/Thawed	5.67	5.01	385 ^y	21.05	35.79 ^y	6.04	5.70
Aging time, days	0	5.66	3.36	460 ^a	22.62	61.31 ^a	4.54	5.58
	14	5.69	4.92	401 ^b	20.52	32.84 ^b	6.60	6.23
	28	5.61	5.35	335 ^c	21.96	25.79 ^c	6.75	5.95
	SEM	0.05	0.21	10	0.48	1.98	0.09	0.07
Pr > F [‡]	S	<0.001	0.004	0.013	0.289	0.555	<0.001	0.300
	T	0.503	<0.001	0.044	0.224	<0.001	0.082	0.003
	D	0.055	<0.001	<0.001	0.092	<0.001	<0.001	0.001
	SxT	0.070	0.694	0.201	0.389	0.376	0.828	0.505
	SxD	0.277	0.162	0.099	0.016	0.123	0.006	0.694
	TxD	0.701	0.020	0.329	0.023	0.373	0.001	0.045
	SxTxD	0.197	0.112	0.567	0.277	0.454	0.601	0.502

Non-frozen = fresh samples (control); Frozen/thawed = frozen (-18 °C for 7 days) and thawed (4 °C for 24 h) samples; CFU = colony forming unit; and SEM = standard error of the mean.

[†]Score on a structured 8-point scale (1 = extremely hard/slightly juicy; and 8 = extremely tender/juicy); $n = 360$.

[‡]Significant probabilities ($P < 0.05$) were highlighted in bold.

^{x,y}Means followed by different letters, between aging systems and between treatments, differ ($P < 0.05$) by F test; $n = 96$.

^{a-c}Means followed by different letters, between aging times, differ ($P < 0.05$) by Tukey test; $n = 96$.

The total bacteria count (TBC) was slightly higher ($P < 0.05$) in wet-aging samples than in dry-aging ones (Table 1). This was probably due to the crust formed on the surface of the meat in the dry-aging system, which hinders microbial development. In addition, the low water content in the formed crust also inhibits the development of microorganisms that infiltrate into the deep tissues (Haddad et al., 2022; Smith et al., 2008). Berger et al. (2018) obtained values close to those of the present study but did not observe a difference in TBC values inside the loins after 28 days of aging in the wet-aging system (4.67 log CFU/mL) when compared with the dry-aging (4.04 log CFU/mL).

Besides the aging system, the TBC was affected ($P < 0.05$) by the treatments (non-frozen and frozen/thawed) \times aging time interaction, with a greater ($P < 0.05$) microbial population being observed at zero and 14 days of aging in the frozen/thawed samples than in the non-frozen counterparts (Table 2). This corroborates the observations of Haddad et al. (2022) and Bernardo et al. (2020) that cell rupture and disruption of muscle fibers caused by cryogenic damage during freezing/thawing, with consequent release of exudate, creates favorable conditions for greater microbial proliferation initially. Despite this higher count in frozen/thawed samples, at the final aging time (28 days) there was no difference ($P > 0.05$) in TBC between frozen/thawed samples when compared to non-frozen ones. In both treatments, the samples were still acceptable from a microbiological point of view, since the TBC were below the recommended upper limit of 7 log CFU/g (ICMSF, 1986).

3.3 Fragmentation index, cooking loss and shear force

The myofibrillar fragmentation index (FI) was affected ($P < 0.05$) by all main factors (Table 1). As expected, the FI decreased ($P < 0.05$), i.e., muscle proteolysis increased with aging time. However, lower FI ($P < 0.05$) was observed in wet-aging samples, indicating greater proteolysis of the myofibrillar structure. On the contrary, Ha et al. (2019) observed greater myofibrillar fragmentation in samples aged for 35 and 56 days in the dry-aging system than in the wet-aging system, but the authors reported that this difference was not understood. Considering that in our study the samples of the two systems came from different groups of animals, it is likely that this difference comes from different intrinsic characteristics of the muscle or even from a different initial proteolysis stage.

In frozen/thawed samples the degree of myofibrillar proteolysis was higher (lower FI values) than in non-frozen samples (Table 1). This higher rate of proteolysis was also observed in wet-aged (Aroeira et al., 2016; Grayson et al., 2014) and dry-aged (Haddad et al., 2022) beef and has been justified by the combination of two effects (Grayson et al., 2014; Haddad et al., 2022; Sales et al., 2020): 1) the combined effect on the loss of myofibrillar structural integrity, caused by the formation of the crystals ice; and 2) the increased calpain activity, caused by the release of free calcium into the sarcoplasm and/or denaturation of the calpastatin inhibitor, both induced by freezing/thawing process.

Table 2. Aging system and treatment \times aging time effects on cooking loss (CL), sensory tenderness and juiciness and total bacteria count (TBC) of muscles (*L. lumbarum*) from Nellore cattle.

Characteristics	Treatment/System	Aging time (days)			Mean	SEM
		0	14	28		
Total bacteria count, TBC (log CFU/g)	Non-frozen	2.58 ^{bb}	4.35 ^{aB}	5.29 ^a	4.07	0.30
	Frozen/Thawed	4.14 ^{bA}	5.49 ^{aA}	5.42 ^a	5.01	0.26
	Mean	3.36	4.92	5.35		
	SEM	0.31	0.32	0.23		
Cooking loss, CL (%)	Non-frozen	21.31	22.00	23.74 ^A	22.35	0.58
	Frozen/Thawed	23.92 ^a	19.05 ^b	20.18 ^{bb}	21.05	0.75
	Mean	22.62	20.52	21.96		
	Dry aging	22.91	20.83	20.28 ^B	21.24	0.60
	Wet aging	22.00 ^{ab}	19.81 ^b	24.82 ^{aA}	22.20	0.78
	Mean	22.50	20.41	22.55		
	SEM	0.79	0.82	0.85		
	Tenderness [†]	Non-frozen	4.60 ^c	6.25 ^{bb}	6.82 ^a	5.89
Frozen/Thawed	4.48 ^b	6.95 ^{aA}	6.68 ^a	6.04	0.13	
Mean	4.54	6.60	6.75			
Dry aging	4.68 ^c	6.55 ^b	7.13 ^{aA}	6.12	0.13	
Wet aging	4.42 ^b	6.65 ^a	6.37 ^{aB}	5.70	0.14	
Mean	4.55	6.60	6.75			
SEM	0.17	0.13	0.11			
Juiciness [†]	Non-frozen	5.80 ^b	6.30 ^a	6.25 ^{aA}	6.12	0.10
	Frozen/Thawed	5.35 ^b	6.15 ^a	5.65 ^{abB}	5.72	0.10
	Mean	5.58	6.23	5.95		
	SEM	0.12	0.13	0.12		

Non-frozen = fresh samples (control); Frozen/thawed = frozen (-18 °C for 7 days) and thawed (4 °C for 24 h) samples; CFU = colony forming unit; and SEM = standard error of the mean.

[†]Score on a structured 8-point scale (1 = extremely hard/slightly juicy; and 8 = extremely tender/juicy).

^{A-B}Means followed by different letters, between aging systems and between treatments, differ ($P < 0.05$) by F test; $n = 32$ ($n = 120$ for sensorial scores).

^{a-c}Means followed by different letters, between aging times, differ ($P < 0.05$) by Tukey test; $n = 48$ ($n = 180$ for sensorial scores).

As for cooking loss (CL), there were interactions ($P < 0.05$) between the aging system and aging time and treatments and aging time (Table 1), which are decomposed and represented in Table 2. In general, CL values did not change ($P > 0.05$) during dry-aging, while higher values were observed ($P < 0.05$) only in wet-aging samples at 28 days compared to 14 days. Only at 28 days of aging the CL of the wet-aging samples was higher ($P < 0.05$)

than that of the dry-aging ones (Table 2). Foraker et al. (2020) also observed that 21 days dry-aged beef had less CL than beef from wet-aging treatments at equivalent aging time. The lower CL values of dry-aging samples at 28-days aging compared with wet-aged ones are possible due to greater weight loss (Figure 1) and, consequently, low moisture content, so that water loss during cooking was lower. This is corroborated by the similar behavior (greater weight loss; Figure 1) observed in the frozen/thawed samples, in which the CL values reduced after the 14th day of aging but were lower than non-frozen samples only on the 28th day of aging (Table 2). Haddad et al. (2022) and Bernardo et al. (2020) also observed lower CL values of frozen/thawed dry-aged beef when compared to non-frozen aged for 28 days.

As expected, there was a decrease ($P < 0.05$) in shear force (SF) values with aging time. However, the aging system did not affect ($P > 0.05$) the SF values of beef strip loins (Table 1). This is in line with studies comparing beef loins (Bernardo et al., 2020; Dikeman, Obuz, Gök, Akkaya, & Stroda, 2013; Laster et al., 2008), strip loins (Foraker et al., 2020; Lepper-Blilie et al., 2016), short loins (Smith et al., 2008) and ribeyes (Vilella et al., 2019) that also did not find differences in the results of shear force between wet- or dry-aged samples in the aging time. However, some studies comparing SF between systems have reported conflicting results. Studies on beef strip loins (Kim et al., 2016) and sirloins (Laster et al., 2008) reported a lower SF of dry-aged meats compared to wet-aged meats, while in beef ribeye Laster et al. (2008) observed that wet-aged samples had lower SF than dry-aged.

The SF values of the frozen/thawed samples were lower ($P < 0.05$) than those of the non-frozen ones (Table 1). Thus, as observed for the FI values, the frozen/thawed samples showed a higher tenderness rate (lower SF values), indicating that the reduction in SF with freezing/thawing occurred due to cryogenic damage and due to the increased proteolysis of meat during aging, as already mentioned. Lower SF values in frozen/thawed and aged samples have been reported by several studies with wet-aged (Aroeira et al., 2016; Grayson et al., 2014; Kim & Kim, 2017; Sales et al., 2020) and dry-aged beef (Bernardo et al., 2020; Haddad et al., 2022). Furthermore, the SF values of the frozen/thawed samples on day 14 (26.72 ± 8.72 N) were lower ($P < 0.05$) than the non-frozen samples on the same period (38.97 ± 10.15 N) and did not differ of non-frozen samples at 28 days of aging (28.35 ± 9.47 N), regardless of the aging system, allowing to reach the desired SF in a shorter aging time with the use of thawed beefs.

3.4 Sensorial tenderness and juiciness

The interactions between the aging system and time affected ($P < 0.05$) only tenderness, while the interaction treatments and aging time affected ($P < 0.05$) both tenderness and juiciness (Table 1). As with SF, sensory tenderness also improved with aging time, but was dependent on the aging system (Table 2): tenderness of wet-aged aged meats improved ($P > 0.05$) after 14 days of aging, but this did not differ ($P > 0.05$) at 28 days of aging; while in dry-aged meats, tenderness improved ($P > 0.05$) after 14 days and improved again ($P > 0.05$) at 28 days of aging. Thus, at 28 days of aging, the dry-aged meats were tender ($P < 0.05$) than the wet-aged ones. Furthermore, samples dry-aged meats and aged for 14 days had near sensory score of tenderness than the wet-aged meats at 28 days of aging. This is in line with Berger et al. (2018) and Li et al. (2014) observation that dry-aged beef loins had higher tenderness compared to wet-aged loins at the same aging time. However, the benefits of dry-aging on sensory attributes, especially tenderness, are inconsistent/conflicting in the literature. For example, no difference in sensory tenderness was observed in low-marbled beef loins (Dikeman et al., 2013; Lepper-Blilie et al., 2016) and beef ribeye steaks from grain-fed crossbred Zebu steers (Vilella et al., 2019), wet- or dry-aged, when evaluated by a trained panel. Differences in the aging time may be responsible for this inconsistent.

Although in this experiment the sensory tenderness scores were higher for dry-aged samples at 28 days, no significant difference ($P > 0.05$) was found in the SF values between aging systems (Table 1). Berger et al. (2018) also did not observe differences in SF values between dry- and wet-aged beef for 28 days, despite the better sensory tenderness for dry-aged samples. However, these authors observed better juiciness in the dry-aged samples, as also reported by Li et al. (2014). As observed at the present work, other studies (Dikeman et al., 2013; Laster et al., 2008; Lepper-Blilie et al., 2016; Smith et al., 2008) have also reported no differences in juiciness between dry- and wet-aged beef. Thus, the greater sensory tenderness of dry-aged meat at 28 days of aging may be linked to the synergistic impacts of improvements in overall palatability, mainly due to the development of unique flavors, which could result in an increase in perceived tenderness.

The freeze/thaw process prior to aging accelerated the beef tenderization process, corroborating the effects found for the SF values. Samples frozen/thawed and aged for 14 days were not only perceived as more tender ($P < 0.05$; higher scores) than their non-frozen counterparts but already had a similar sensory score of tenderness than both frozen/thawed and non-frozen samples at 28 days of aging (Table 2). This is particularly important for the dry-aged samples since at 14 days of aging the weight losses in the frozen/thawed samples

(19.97±0.73%) were similar to the non-frozen and aged for 28-day samples (21.72±2.50%; Figure 1). These results corroborate the observations of Haddad et al. (2022) that dry-aging of frozen/thawed beef is advantageous, as it reduces the time required to ensure the desired tenderness, without increasing costs with weight loss. However, this advantage does not occur in wet-aged beef since despite the tenderization time also being reduced by frozen/thawed process the weight losses were about 2.5x higher in samples frozen/thawed for 14 days (7.79±1.06%) than the non-frozen ones at 28 days (3.30±1.55%; Figure 1).

For the juiciness attribute, higher scores ($P < 0.05$) were observed at 14 days of aging, not changing at 28 days in both frozen/thawed and non-frozen samples (Table 2). According to Cross et al. (1978), the juiciness sensation is related to the marbling fat and the juices released during mastication. Thus, higher juiciness scores in the samples may be due to the concentration of fat through the loss of water during aging, as reported by Campbell, Hunt, Levis, and Chambers (2001) and Li et al. (2014). The lower ($P < 0.05$) juiciness in the frozen/thawed samples at 28 days may be due to greater water loss in the samples, releasing fewer juices during mastication and superimposing the effect of the marbling fat concentration. This effect was also observed by Haddad et al. (2022) when comparing the juiciness of dry-aged samples frozen/thawed with non-frozen ones for 42 days.

3.5 Myoglobin chemical forms and instrumental color

There were no ($P > 0.05$) interactions between the evaluated factors for myoglobin chemical forms, metmyoglobin-reducing capacity (MRA), and oxygen consumption rate (OCR) (Table 3). Meat color stability is directly related to muscle MRA and OCR (Faustman, Sun, Mancini, & Suman, 2010), which will influence the chemical forms of myoglobin.

Both initial metmyoglobin formed (IMetF) and OCR were ($P < 0.05$) affected only by the aging system, with higher ($P < 0.05$) levels of oxymyoglobin (OMB) and lower ($P < 0.05$) levels of deoxymyoglobin (DMB) being observed in wet-aged samples than in dry-aged ones. Lower OMB contents are consistent with lower ($P < 0.05$) IMetF values and higher ($P < 0.05$) OCR values observed in dry-aged samples and suggest lower oxygen penetration into wet-aged meat during blooming. OCR is related to residual mitochondrial respiration in postmortem muscle, which competes with myoglobin for atmospheric oxygen that diffuses into the meat, determining the oxygen concentration gradient from the air to the interior of the meat cut. (Aroeira et al., 2017; McKenna, Mies, Baird, Pfeiffer, Ellebracht, & Savell, 2005). Thus, the conditions inside the meat during wet-aging seem to have been less favorable to the maintenance of mitochondrial activity, with possible greater depletion of substrates and

coenzymes and/or degradation of important enzymes in respiration, such as succinate dehydrogenase and enzymes of the electron transport chain (O'Keeffe & Hood, 1982).

Table 3. Effects of the aging system (S), treatment (T), and aging time (D) on the metmyoglobin reducing activity (MRA), oxygen consumption rate (OCR) and myoglobin chemical forms of muscles (*L. lumbrorum*) from Nellore cattle.

Effects	Source of variation	MRA (%)		OCR (%)	Mb chemical forms (%)		
		NORA	IMetF		MMB	DMB	OMB
Aging system	Dry aging	28.04	68.75 ^x	85.25 ^x	21.96	12.26 ^x	65.78 ^y
	Wet aging	23.05	67.37 ^y	63.25 ^y	20.03	10.97 ^y	69.00 ^x
Treatment	Non-frozen	28.45 ^x	38.56	76.70	20.38 ^y	12.74	66.88
	Frozen/Thawed	22.08 ^y	38.64	69.35	22.11 ^x	10.81	67.09
Aging time, days	0	28.31	37.95	65.40	21.79	13.37	64.83 ^b
	14	23.47	39.54	72.97	20.82	10.44	68.75 ^a
	28	24.02	38.32	80.71	21.11	11.51	67.37 ^a
	SEM	1.40	0.59	2.89	0.61	0.82	0.71
Pr > F [†]	S	<i>0.059</i>	<0.001	<0.001	<i>0.137</i>	0.041	0.023
	T	0.015	<i>0.972</i>	<i>0.137</i>	0.008	<i>0.089</i>	<i>0.644</i>
	D	<i>0.254</i>	<i>0.407</i>	<i>0.055</i>	<i>0.834</i>	<i>0.231</i>	0.033
	SxT	<i>0.653</i>	<i>0.342</i>	<i>0.874</i>	<i>0.333</i>	<i>0.909</i>	<i>0.249</i>
	SxD	<i>0.429</i>	<i>0.578</i>	<i>0.723</i>	<i>0.696</i>	<i>0.109</i>	<i>0.062</i>
	TxD	<i>0.061</i>	<i>0.959</i>	<i>0.405</i>	<i>0.889</i>	<i>0.226</i>	<i>0.099</i>
	SxTxD	<i>0.678</i>	<i>0.952</i>	<i>0.682</i>	<i>0.834</i>	<i>0.381</i>	<i>0.154</i>

Non-frozen = fresh samples (control); Frozen/thawed = frozen (-18 °C for 7 days) and thawed (4 °C for 24 h) samples; NORA = nitric oxide metmyoglobin reducing activity; IMetF = initial metmyoglobin formed; MMB = metmyoglobin; DMB = deoxymyoglobin; OMB = oxymyoglobin; Mb = myoglobin; and SEM = standard error of the mean.

[†]Significant probabilities ($P < 0.05$) were highlighted in bold.

^{x,y}Means followed by different letters, between aging systems and between treatments, differ ($P < 0.05$) by F test; $n = 96$ ($n = 72$ for MRA and OCR analysis).

^{a,b}Means followed by different letters, between aging times, differ ($P < 0.05$) by Tukey test; $n = 96$.

Regarding treatment, only MRA, evaluated by nitric oxide metmyoglobin reducing activity (NORA), was affected ($P < 0.05$), being higher ($P < 0.05$) in non-frozen samples. This justifies the higher ($P < 0.05$) levels of metmyoglobin (MMB) in frozen/thawed samples compared to non-frozen ones, which was also reported by (Aroeira et al., 2017). This reduction in MRA may come from the loss of structural and functional integrity of the mitochondria due to freezing, as it is involved in the reduction of MMB by NADH regeneration or from the loss of the cofactor NADH by leaching during thawing and

exudation (O'Keeffe & Hood, 1982) and, or, by the action of the mitochondrial enzyme β -hydroxyacyl-CoA dehydrogenase (HADH), released into the sarcoplasm due to cryogenic damage (Ramos, Gomide, Ramos, & Peternelli, 2004). Sales et al. (2020) also observed lower MRA values in frozen/thawed and wet-aged samples for 14 days, when compared to non-frozen ones.

Regarding the aging time, the OMB content increases significantly in the first 14 days and did not change until the end of aging for all samples. However, except for the hue angle (h), the CIE color indices were affected ($P < 0.05$) by some interaction between the aging time and the other studied factors (Table 4), being decomposed and presented in Table 5.

Table 4. Effects of the aging system (S), treatment (T), and aging time (D) on the CIE color indices of muscles (*L. lumbrorum*) from Nellore cattle.

Effects	Source of variation	L^*	a^*	b^*	C^*	h (°)
Aging system	<i>Dry aging</i>	43.37	21.94	14.59	26.37	33.70
	<i>Wet aging</i>	46.42	22.70	14.79	27.10	32.95
Treatment	Non-frozen	45.73	22.65	14.81	27.08	33.06
	Frozen/Thawed	44.03	21.81	14.51	26.21	33.59
Aging time. days	0	43.82	21.39	14.12	25.64	33.34
	14	45.53	23.05	15.31	27.68	33.52
	28	45.35	22.26	14.56	26.61	33.12
	SEM	0.37	0.27	0.23	0.34	0.20
Pr > F [†]	S	<0.001	0.137	0.656	0.261	0.152
	T	0.316	0.072	0.439	0.136	0.158
	D	<0.001	0.022	0.056	0.025	0.891
	SxT	0.136	0.569	0.692	0.612	0.829
	SxD	0.005	0.157	0.058	0.100	0.210
	TxD	0.927	<0.001	<0.001	<0.001	0.663
	SxTxD	0.864	0.527	0.498	0.499	0.788

Non-frozen = fresh samples (control); Frozen/thawed = frozen (-18 °C for 7 days) and thawed (4 °C for 24 h) samples; L^* = lightness; a^* = redness; b^* = yellowness; C^* = chroma; and h = hue angle; and SEM = standard error of the mean ($n = 96$).

[†]Significant probabilities ($P < 0.05$) were highlighted in bold.

Table 5. Aging system and treatment × aging time effects on cooking loss (CL), sensory tenderness and juiciness and total bacteria count (TBC) of muscles (*L. lumbarum*) from Nellore cattle.

Characteristics	Treatment/System	Aging time (days)			Mean	SEM
		0	14	28		
Lightness, L^*	Dry aging	42.39	44.49 ^B	43.22 ^B	43.37	0.43
	Wet aging	43.54 ^b	47.26 ^{aA}	48.47 ^{aA}	46.42	0.55
	Mean	42.97	45.88	45.84		
	SEM	0.58	0.53	0.71		
Redness, a^*	Non-frozen	20.34 ^{bB}	23.99 ^{aA}	23.63 ^{aA}	22.65	0.39
	Frozen/Thawed	22.43 ^{aA}	22.11 ^{aB}	20.89 ^{bB}	21.81	0.38
	Mean	21.39	23.05	22.26		
	SEM	0.52	0.44	0.43		
Yellowness, b^*	Non-frozen	13.28 ^{bB}	15.75 ^a	15.41 ^{aA}	14.81	0.33
	Frozen/Thawed	14.96 ^A	14.87	13.70 ^B	14.51	0.31
	Mean	14.12	15.31	14.56		
	SEM	0.41	0.38	0.36		
Chroma, C^*	Non-frozen	24.31 ^{bB}	28.71 ^{aA}	28.22 ^{aA}	27.08	0.50
	Frozen/Thawed	26.97 ^A	26.66 ^B	25.00 ^B	26.21	0.47
	Mean	25.64	27.68	26.61		
	SEM	0.64	0.56	0.54		

Non-frozen = fresh samples (control); Frozen/thawed = frozen (-18 °C for 7 days) and thawed (4 °C for 24 h) samples; L^* = lightness; a^* = redness; b^* = yellowness; C^* = chroma; and SEM = standard error of the mean.

^{A-B} Means followed by different letters, between aging systems and between treatments, differ ($P < 0.05$) by F test; $n = 32$.

^{a-c} Means followed by different letters, between aging times, differ ($P < 0.05$) by Tukey test; $n = 48$.

The lightness (L^*) was affected ($P < 0.05$) only by the aging system x aging time interaction, with 14 and 28 days wet-aged samples being ($P < 0.05$) lighter (higher L^*) than unaged samples and their counterpart dry-aged ones. Other authors (Dikeman et al., 2013; Kim et al., 2016; Ribeiro, Lau, Pflanzler, Subbiah, & Calkins, 2021) had reported that dry-aged beef is darker and with less redness values (a^*) compared with wet-aged beef. This has been justified by the lower water content as the surface dries after aging, resulting in less light reflection. Moreover, according to Ribeiro et al. (2021), dry-aging results in shrinkage of myofibrils which increases the space available for light absorption, thus decreasing the light scattering power of the meat and contributing to darkening of color intensity. However, in this experiment, the L^* values of the dry-aged samples did not change ($P > 0.05$) during the entire aging period, while in the wet-aged samples, the values increased ($P < 0.05$; Table 5). Furthermore, a^* values were not affected ($P < 0.05$) by the aging system (Table 4). This

suggests that the greater luminosity in wet-aged samples is due to greater scattering on the surface, probably due to differences in the form of water loss. In dry-aged samples, water is lost by evaporation, while in wet-aged samples, in addition to water, solutes are lost in the exudate, including heme pigments, which probably alters the internal refractive/absorption indices, with a consequent increase in reflectivity. This hypothesis is reinforced by the observation that there was no difference ($P > 0.05$) in L^* values between treatments, where darkening due to shrinkage of myofibrils and less water in dry-aged meat would be counterbalanced by a greater loss of exudate in wet-aged meat.

Attention should be drawn to the fact that many authors mistakenly relate only a^* values directly to the red color. Although the a^* values have an excellent relationship with the red color of the meat (Holman, van de Ven, Mao, Coombs, & Hopkins, 2017; Mancini, Ramanathan, Hunt, Kropf, & Mafi, 2022), the real color also depends on the yellowness (b^* values). The a^* values do not describe the red color (neither b^* describe the yellow color) in the CIE system. The values of a^* and b^* are the chromaticity coordinates, which together describe the hue of the color (represented by h) and its intensity (represented by C^*) (Ramos & Gomide, 2017). In the present experiment, the chromaticity coordinates were affected only by the treatment x aging time interaction, as well as the C^* values (Table 4). The behavior of a^* and b^* across treatments with aging time was not similar: while a^* values decreased in the frozen/thawed treatment, b^* values were unaffected ($P > 0.05$; Table 5). Since the h values did not change (mean of $33.33 \pm 1.94^\circ$), the red hue of the samples was the same, but the color intensity was greater ($P < 0.05$; higher C^* values) in the samples non-frozen than frozen/thawed, after 14 days (Table 5). This lower intensity may be due to the greater instability of the myoglobin pigment in the frozen/thawed samples and consequent oxidation to MMB, as described by Aroeira et al. (2017) in wet-aged beefs, and which is consistent with the lower ($P < 0.05$) NORA values and higher ($P < 0.05$) proportions of MMB observed in these samples (Table 3).

3.6 Volatile compounds profile

The evaluation of the profile of volatile organic compounds (VOC) allowed the identification of 22 compounds, which were classified in the following groups: alcohols ($n = 5$), aldehydes ($n = 9$), ketones ($n = 2$), and hydrocarbons ($n = 6$). To verify the differences between aging times and treatments, in the different evaluated systems, the volatile compounds were described through principal component analysis (PCA; Figure 2).

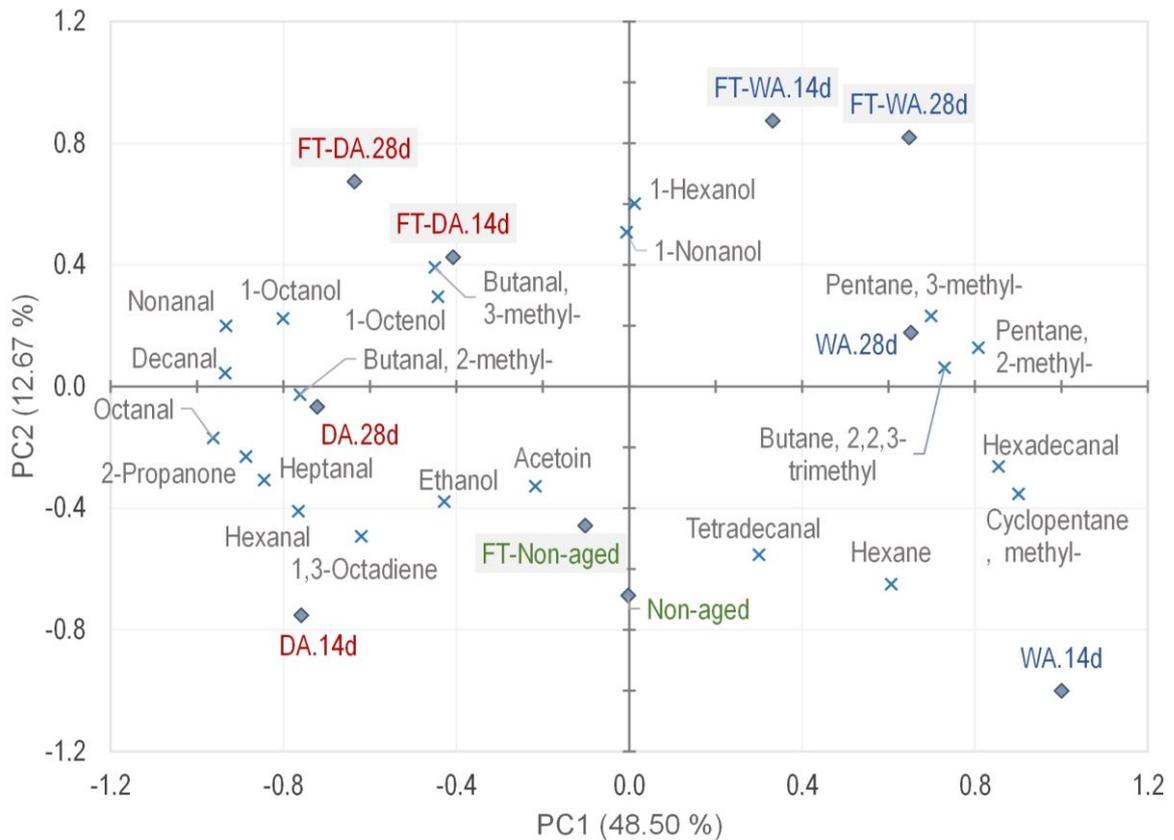


Figure 2. Bi-plot principal component analysis (PCA) of volatile compounds in frozen/thawed and non-frozen muscles (*L. lumbrorum*) from Nellore cattle during aging process (14 and 28 days) in different systems (DA = dry-aging; and WA = wet-aging). Non-aged = samples at day 0; and FT (filled in gray) = frozen (-18 °C for 7 days) and thawed (4 °C for 24 h) samples.

The first (PC1) and second (PC2) dimensions of the PCA represented 61.17% of the variability of the experimental data. In addition to representing the greatest variability in the data, PC1 clearly indicated a difference between the aging systems, with a group of dry-aged samples being formed on the left side, an opposite group composed of wet-aged samples on the right side, and a group of non-aged samples at the center. PC2 explained the differences between the non-frozen aged samples positioned in the lower half and the frozen/thawed aged samples positioned in the upper half (except the wet-aged 28 days, which was in the upper right quadrant, close to the lower quadrant limit). Thus, the four quadrants of Figure 2 can be used to distinguish the combinations of freezing/thawing treatment and aging systems with their respective VOC, which indicates that they modify this profile in a distinct way and, therefore, provide sensory attributes of distinct flavor and aroma.

Two compounds, 2-methylbutanal and 3-methylbutanal, were exclusively found in dry-aged samples (Figure 2), which are characteristic of these meats and reported by several authors (Bernardo et al., 2020; Gredell et al., 2018; Haddad et al., 2022; O'Quinn et al., 2016; Utama, Kim, Jeong, Kim, Barido, & Lee, 2020). According to O'Quinn et al. (2016), these aldehydes are products of the Strecker degradation of isoleucine and leucine in the interaction between the Maillard reaction and the products of lipid oxidation, being together with ketone 3-hydroxy-2-butanone (acetoin) highly correlated positively with grilled, beefy, buttery, and nutty flavors of dry-aged meats. Furthermore, according to these authors, samples with higher contents of acetoin and 3-methylbutanal have a sweeter taste. Of these, 3-methylbutanal was the most correlated with frozen/thawed dry-aged samples, as also observed by Haddad et al. (2022) and Bernardo et al. (2020).

By PC1, the compounds 3-methylbutanal, 1-octanol, 1-hexanol and nonanal were more correlated with frozen/thawed aged samples. According to Casaburi, Piombino, Nychas, Villani, and Ercolini (2015), these compounds, as well as heptanal and hexanal, are the most commonly occurring VOCs associated with microbial spoilage in meat. This is consistent with the higher TBC counts in the frozen/thawed samples in this experiment (Table 1) and for the higher counts of psychrotrophic and lactic acid bacteria observed by Haddad et al. (2022) in dry-aged frozen/thawed samples. Gredell et al. (2018) stated that both acetoin and 2-propanone (highly correlated to dry-aged non-frozen samples) are compounds related to acidic and earthy flavors. Higher amounts of 1,3-octadiene hydrocarbon were also more correlated to non-frozen dry-aged samples, which was also reported by Haddad et al. (2022) and Bernardo et al. (2020).

Overall, a higher concentration of aldehydes, alcohols, and ketones was correlated to dry-aged samples, while higher concentrations of hydrocarbons were observed in non-frozen wet-aged samples (Figure 2). This is in agreement with what was observed by Barragán-Hernández, Leighton, López-Campos, Segura, Aalhus, and Prieto (2022), who noted a difference in the profile of volatile compounds in the different aging systems, in which alcohols (1-decanol, 1-octen-3-ol, 1-octanol) and ketones were more concentrated in dry-aged meat, while aldehyde (hexadecanal), alkene (E-2-octene) and phenolic compounds showed higher concentrations in wet-aged meat.

The results of the volatile profile corroborate the observation by Haddad et al. (2022) that the VOCs associated with the characteristic flavors of dry-aged meat are more related to meat frozen/thawed and aged in this system. According to Foraker et al. (2020), the flavor of dry-aged meat is enhanced due to the concentration of flavor compounds as the meat loses

water during drying and the creation of new flavor compounds caused by changes in the chemical nature of proteins and fats through oxidation. Thus, water loss, despite being an economic obstacle, is extremely necessary for the development of flavors characteristic of dry-aged meat. In this context, the freezing/thawing process seems to allow this volatile profile to be achieved in a shorter aging time, probably by accelerating water losses in the process.

4 Conclusions

Even though freezing/thawing meat causes greater weight losses and lower color stability of aged beef, the process is feasible for use in the dry-aging system, since it allows the reduction of aging time to ensure the desired tenderness without increasing losses or compromising the microbiological quality, in addition to possibly improving the flavor and aroma with the concentration of volatile compounds. In the wet-aging system, however, the greater losses induced by freezing can make its use unfeasible, being its application very dependent on the cost-benefit with the reduction of aging time. However, despite its potential use in Zebu beef dry-aging, additional research is needed to better describe the effects of freezing/thawing/aging on the sensory profile and consumer acceptance.

Acknowledgments

The authors would like to thank the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq; 430206/2016-0) and the Research Support Foundation of the State of Minas Gerais (FAPEMIG; CVZ APQ 02904-17) for their financial support and to the CNPq for the doctorate scholarship (GD 144541/2019-0) granted to the first author. The authors also would like to thank the Central of Analysis and Chemical Prospecting of the Federal University of Lavras (UFLA) for supplying the equipment and technical support for experiments involving chromatographic analyzes.

References

- Aroeira, C.N., Torres Filho, R.A., Fontes, P.R., Gomide, L.A.M., Ramos, A.L.S., Ladeira, M.M., & Ramos, E.M. (2016). Freezing, thawing and aging effects on beef tenderness from *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle. *Meat Science*, *116*, 118-125.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.02.006>
- Aroeira, C.N., Torres Filho, R.A., Fontes, P.R., Ramos, A.L.S., Gomide, L.A.M., Ladeira, M.M., & Ramos, E.M. (2017). Effect of freezing prior to aging on myoglobin redox

- forms and CIE color of beef from Nellore and Aberdeen Angus cattle. *Meat Science*, *125*, 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.11.010>
- Barragán-Hernández, W., Leighton, P.L.A., López-Campos, O., Segura, J., Aalhus, J.L., & Prieto, N. (2022). Effect of in-the-bag dry-ageing on meat palatability and volatile compounds of cull cows and youthful steers. *Meat Science*, *188*, 108800. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108800>
- Berger, J., Kim, Y.H.B., Legako, J.F., Martini, S., Lee, J., Ebner, P., & Zuelly, S.M.S. (2018). Dry-aging improves meat quality attributes of grass-fed beef loins. *Meat Science*, *145*, 285-291. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.004>
- Bernardo, A.P.d.S., Silva, A.C.M., Francisco, V.C., Ribeiro, F.A., Nassu, R.T., Calkins, C.R., Nascimento, M.d.S., & Pflanzler, S.B. (2020). Effects of freezing and thawing on microbiological and physical-chemical properties of dry-aged beef. *Meat Science*, *161*, 108003. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108003>
- Campbell, R.E., Hunt, M.C., Levis, P., & Chambers, E. (2001). Dry-aging effects on palatability of beef longissimus muscle. *Journal of Food Science*, *66*(2), 196-199. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb11315.x>
- Carolino, M.I., Rodrigues, M.I., Bressan, M.C., Carolino, N., Espadinha, P., & Telo da Gama, L. (2009). The pH and shear force of beef from Alentejo and Mertolengo cattle (in Portuguese). *Archivos de Zootecnia*, *58*(1).
- Casaburi, A., Piombino, P., Nychas, G.J., Villani, F., & Ercolini, D. (2015). Bacterial populations and the volatilome associated to meat spoilage. *Food Microbiol*, *45*(Pt A), 83-102. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.02.002>
- Coombs, C.E.O., Holman, B.W.B., Friend, M.A., & Hopkins, D.L. (2017). Long-term red meat preservation using chilled and frozen storage combinations: A review. *Meat Science*, *125*, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.11.025>
- Cross, H.R., Moen, R., & Stanfield, M.S. (1978). Training and testing of judges for sensory analysis of meat quality. *Food Technology*, *37*, 48-54.
- Dikeman, M.E., Obuz, E., Gök, V., Akkaya, L., & Stroda, S. (2013). Effects of dry, vacuum, and special bag aging; USDA quality grade; and end-point temperature on yields and eating quality of beef Longissimus lumborum steaks. *Meat Science*, *94*(2), 228-233. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.02.002>
- Faustman, C., Sun, Q., Mancini, R.A., & Suman, S.P. (2010). Myoglobin and lipid oxidation interactions: Mechanistic bases and control. *Meat Science*, *86*(1), 86-94. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.025>

- Foraker, B.A., Gredell, D.A., Legako, J.F., Stevens, R.D., Tatum, J.D., Belk, K.E., & Woerner, D.R. (2020). Flavor, Tenderness, and Related Chemical Changes of Aged Beef Strip Loins. *Meat and Muscle Biology*, 4(1).
<https://doi.org/10.22175/mmb.11115>
- Grayson, A.L., King, D.A., Shackelford, S.D., Koohmaraie, M., & Wheeler, T.L. (2014). Freezing and thawing or freezing, thawing, and aging effects on beef tenderness. *Journal of Animal Science*, 92(6), 2735-2740. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7613>
- Gredell, D., McHenry, J., Woerner, D., Legako, J., Engle, T., Brooks, J., Tatum, J., & Belk, K. (2018). Palatability Characterization of Fresh and Dry-Aged Ground Beef Patties. *Meat and Muscle Biology*, 2(1), 265-276. <https://doi.org/10.22175/mmb2018.04.0007>
- Grujić, R., Petrović, L., Pikula, B., & Amidžić, L. (1993). Definition of the optimum freezing rate—1. Investigation of structure and ultrastructure of beef M. longissimus dorsi frozen at different freezing rates. *Meat Science*, 33(3), 301-318.
[https://doi.org/10.1016/0309-1740\(93\)90003-Z](https://doi.org/10.1016/0309-1740(93)90003-Z)
- Ha, M., McGilchrist, P., Polkinghorne, R., Huynh, L., Galletly, J., Kobayashi, K., Nishimura, T., Bonney, S., Kelman, K.R., & Warner, R.D. (2019). Effects of different ageing methods on colour, yield, oxidation and sensory qualities of Australian beef loins consumed in Australia and Japan. *Food Research International*, 125, 108528.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108528>
- Haddad, G.B.S., Gomes, H.B., Buchili, A.F.M., Rodrigues, L.M., Fontes, P.R., Ramos, A.L., & Ramos, E.M. (2022). Accelerating the dry aging of bone-in beef from Nellore cattle by the freeze/thaw process. *Journal of Food Processing and Preservation*, e16573.
<https://doi.org/10.1111/jfpp.16573>
- Holman, B.W.B., van de Ven, R.J., Mao, Y., Coombs, C.E.O., & Hopkins, D.L. (2017). Using instrumental (CIE and reflectance) measures to predict consumers' acceptance of beef colour. *Meat Science*, 127, 57-62.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.01.005>
- ICMSF. (1986). *Sampling for microbiological Analysis: Principles and scientific applications* (2nd ed. Vol. 2). Toronto: University of Toronto Press.
- Kim, H.-W., & Kim, Y.H.B. (2017). Effects of aging and freezing/thawing sequence on quality attributes of bovine Mm. gluteus medius and biceps femoris. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 30(2), 254-261.
<https://doi.org/10.5713/ajas.16.0279>

- Kim, Y.H.B., Kemp, R., & Samuelsson, L.M. (2016). Effects of dry-aging on meat quality attributes and metabolite profiles of beef loins. *Meat Science*, *111*, 168-176. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.09.008>
- Krzywicki, K. (1979). Assessment of relative content of myoglobin, oxymyoglobin and metmyoglobin at the surface of beef. *Meat Science*, *3*(1), 1-10. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(79\)90019-6](https://doi.org/10.1016/0309-1740(79)90019-6)
- Laster, M.A., Smith, R.D., Nicholson, K.L., Nicholson, J.D.W., Miller, R.K., Griffin, D.B., Harris, K.B., & Savell, J.W. (2008). Dry versus wet aging of beef: Retail cutting yields and consumer sensory attribute evaluations of steaks from ribeyes, strip loins, and top sirloins from two quality grade groups. *Meat Science*, *80*(3), 795-804. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.03.024>
- Lepper-Blilie, A.N., Berg, E.P., Buchanan, D.S., & Berg, P.T. (2016). Effects of post-mortem aging time and type of aging on palatability of low marbled beef loins. *Meat Science*, *112*, 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.10.017>
- Li, X., Babol, J., Bredie, W.L.P., Nielsen, B., Tománková, J., & Lundström, K. (2014). A comparative study of beef quality after ageing longissimus muscle using a dry ageing bag, traditional dry ageing or vacuum package ageing. *Meat Science*, *97*(4), 433-442. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.03.014>
- Mancini, R.A., Ramanathan, R., Hunt, M.C., Kropf, D.H., & Mafi, G.G. (2022). Interrelationships between visual and instrumental measures of ground beef color. *Meat and Muscle Biology*, *6*(1), 1-8. <https://doi.org/10.22175/mmb.14040>
- McKenna, D.R., Mies, P.D., Baird, B.E., Pfeiffer, K.D., Ellebracht, J.W., & Savell, J.W. (2005). Biochemical and physical factors affecting discoloration characteristics of 19 bovine muscles. *Meat Science*, *70*(4), 665-682. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.02.016>
- NAMP. (2007). *The Meat Buyers Guide: Beef, Lamb, Veal, Pork, and Poultry* Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- O'Keeffe, M., & Hood, D.E. (1982). Biochemical factors influencing metmyoglobin formation on beef from muscles of differing colour stability. *Meat Science*, *7*(3), 209-228. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(82\)90087-0](https://doi.org/10.1016/0309-1740(82)90087-0)
- O'Quinn, T.G., Woerner, D.R., Engle, T.E., Chapman, P.L., Legako, J.F., Brooks, J.C., Belk, K.E., & Tatum, J.D. (2016). Identifying consumer preferences for specific beef flavor characteristics in relation to cattle production and postmortem processing parameters. *Meat Science*, *112*, 90-102. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.11.001>

- Ramos, E.M., & Gomide, L.A.M. (2017). *Meat quality assessment: fundamentals and methodologies (in portuguese)* (2nd ed.). Viçosa, MG, Brazil: Editora UFV.
- Ramos, E.M., Gomide, L.A.M., Ramos, A.L.S., & Peternelli, L.A. (2004). Effect of stunning methods on the differentiation of frozen-thawed bullfrog meat based on the assay of β -hydroxyacyl-CoA-dehydrogenase. *Food Chemistry*, 87(4), 607-611.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.01.013>
- Resconi, V.C., Bueno, M., Escudero, A., Magalhaes, D., Ferreira, V., & Campo, M.M. (2018). Ageing and retail display time in raw beef odour according to the degree of lipid oxidation. *Food Chemistry*, 242, 288-300.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.036>
- Rezende-de-Souza, J.H., Cardello, F.A.B., de Paula, A.P.M., Ribeiro, F.A., Calkins, C.R., & Pflanzler, S.B. (2021). Profile of Producers and Production of Dry-Aged Beef in Brazil. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/foods10102447>
- Ribeiro, F.A., Lau, S.K., Pflanzler, S.B., Subbiah, J., & Calkins, C.R. (2021). Color and lipid stability of dry aged beef during retail display. *Meat Science*, 171, 108274.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108274>
- Rodrigues, L.M., Sales, L.A., Fontes, P.R., Torres Filho, R.A., Andrade, M.P.D., Ramos, A.L.S., & Ramos, E.M.R. (2020). Combined effects of gamma irradiation and aging on tenderness and quality of beef from Nelore cattle. *Food Chemistry*, 313, 126137.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126137>
- Sales, L.A., Rodrigues, L.M., Silva, D.R.G., Fontes, P.R., Torres Filho, R.A., Ramos, A.L.S., & Ramos, E.M.R. (2020). Effects of freezing/irradiation/thawing processes and subsequent aging on tenderness, color and oxidative properties of beef. *Meat Science*, 163, 108078. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108078>
- Silva, D.R.G., de Moura, A.P.R., Ramos, A.L.S., & Ramos, E.M. (2017). Comparison of Warner-Bratzler shear force values between round and square cross-section cores for assessment of beef Longissimus tenderness. *Meat Science*, 125, 102-105.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.11.017>
- Silva, D.R.G., Torres Filho, R.A., Cazedey, H.P., Fontes, P.R., Ramos, A.L.S., & Ramos, E.M. (2015). Comparison of Warner-Bratzler shear force values between round and square cross-section cores from cooked beef and pork Longissimus muscle. *Meat Science*, 103, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.12.009>

- Silva, N., Junqueira, V.C.A., Silveira, N.F.A., Taniwaki, M.H., Gomes, R.A.R., & Okazaki, M.M. (2017). *Manual of methods for microbiological analysis of food and water (in portuguese)* (5 ed. ed.). São Paulo: Blucher.
- Smith, R.D., Nicholson, K.L., Nicholson, J.D.W., Harris, K.B., Miller, R.K., Griffin, D.B., & Savell, J.W. (2008). Dry versus wet aging of beef: Retail cutting yields and consumer palatability evaluations of steaks from US Choice and US Select short loins. *Meat Science*, 79(4), 631-639. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.10.028>
- USDA. (2023). Mixed Global 2023 Trade Outlook for Beef, Pork, and Chicken Meat In *Livestock and Poultry: World Markets and Trade*, (pp. 18): United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service.
- Utama, D.T., Kim, Y.J., Jeong, H.S., Kim, J., Barido, F.H., & Lee, S.K. (2020). Comparison of meat quality, fatty acid composition and aroma volatiles of dry-aged beef from Hanwoo cows slaughtered at 60 or 80 months old. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 33(1), 157-165. <https://doi.org/10.5713/ajas.19.0205>
- Vilella, G.d.F., Gomes, C.L., Battaglia, C.T., Pacheco, M.T.B., Silva, V.S.N.d., Rodas-González, A., & Pflanzler, S.B. (2019). Effects of combined wet- and dry-aging techniques on the physicochemical and sensory attributes of beef ribeye steaks from grain-fed crossbred Zebu steers. *Canadian Journal of Animal Science*, 99(3), 497-504. <https://doi.org/10.1139/cjas-2018-0127>
- Zhang, R., Yoo, M.J.Y., Ross, A.B., & Farouk, M.M. (2022). Mechanisms and strategies to tailor dry-aged meat flavour. *Trends in Food Science & Technology*, 119, 400-411. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.023>

ARTIGO 2

Artigo redigido conforme a norma do periódico *Journal of Texture Studies*

“Versão Preliminar”

**Perfis químicos e sensorial da carne bovina de Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore
maturadas à seco pelo processo convencional e acelerado**

*Chemical and sensorial profiles of beef from Nelore and F1 Angus x Nelore crossbred
dry-aged by conventional and accelerated processes*

RESUMO

Este estudo teve como objetivo descrever os perfis descritivos químicos (ácidos graxos, AG; compostos orgânicos voláteis, VOC; e aminoácidos; AA) e sensorial de contrafilés de carcaças bovinas da raça Nelore e de cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus), maturados à seco pelos processos convencional (por 28 dias; NF28d) e acelerado (congelamento/descongelamento e maturação por 14 dias; FT14d). As amostras foram caracterizadas tecnologicamente, com as carnes F1Angus tendo maior gordura de marmoreio. O processo FT14d induziu uma maior proteólise e amaciamento durante a maturação, com o perfil similar de AG na carne dos tratamentos. A maturação acelerada alterou o perfil de VOC tanto na carne grelhada quanto no exsudato do cozimento, mas o perfil do exsudato foi relacionado ao perfil sensorial. Amostras Nelore FT14d e F1Angus FT14d e NF28d foram relacionadas aos VOC acetoína, 2-metilbutanal e 3-metilbutanal e a uma maior variedade de AA no exsudato. Os processos de maturação geraram perfis sensoriais distintos para os diferentes tratamentos, mas o genótipo foi um fator determinante para discriminar as amostras, principalmente em relação aos atributos de textura e aparência. As notas de aceitação não foram afetadas ($P > 0,05$) pelos processos de maturação dentro de cada genótipo, mas maiores notas de aceitação global foram ($P < 0,05$) observadas para as carnes F1Angus e não diferiram ($P > 0,05$) das de Nelores FT14d. Pela análise de múltiplos fatores, as carnes de Nelores FT14d se aproximam das F1Angus pelos perfis químicos de AA, VOC e aceitação global. Concluiu-se que o tratamento acelerado proporcionou carnes maturadas com características químicas e sensoriais similares ao processo convencional, mas com uma melhora na qualidade sensorial das carnes de animais com menor teor de marmoreio

(Nelores), sendo uma alternativa viável e competitiva para comercialização da carne destes animais.

Palavras-chaves: Congelamento/descongelamento; compostos voláteis; ácidos graxos; perfil de aminoácidos; perfil sensorial descritivo; análise de múltiplos fatores.

1 INTRODUÇÃO

O interesse pelo processo de maturação à seco, ou *dry aging*, tem sido crescente por ser uma tendência do mercado de carnes e cortes especiais, sendo considerada um produto nobre (*gourmet* ou *premium*), que possui um preço mais alto no mercado, criando um nicho gastronômico exclusivo. Uma das razões para aplicação deste processo é aprimorar ou intensificar o sabor e aroma da carne, devido à concentração dos compostos químicos à medida que a umidade é perdida, resultando num perfil sensorial descritivo de sabor característico de carne (*meaty*) intenso, assado, umami, amanteigado, doce, acastanhado, noz e terroso (Laster et al., 2008; O'Quinn et al., 2016; Campbell et al., 2001).

O processo de maturação à seco consiste em manter a carne sem nenhum tipo de embalagem protetora em condições de refrigeração, com controle ambiental de temperatura, fluxo de ar e umidade relativa, para obter uma adequada qualidade do produto. O tempo em que a carne fica sob essas condições é variável, podendo ser de até 60 dias, embora períodos de maturação entre 28 e 35 dias parecem serem eficazes na obtenção dos efeitos desejados da maturação à seco, com a carne apresentando o equilíbrio ideal entre maciez, sabor e suculência (Savell, 2008; Dashdorj et al., 2016). Este intervalo de tempo também é sugerido pela Federação de Exportação de Carne dos Estados Unidos (USMEF, 2020) para comercialização de carne maturada à seco.

A maturação à seco é comumente feita em produtos de qualidade superior, sendo sugerido carnes de animais de raças Europeias (*Bos taurus*), por causa da maior deposição de gordura intramuscular (gordura de marmoreio), que garante produtos com sabor e suculência consistentes (Iida et al., 2016; Dashdorj et al., 2016). No entanto, o processo de maturação à seco tem sido sugerido como uma alternativa eficiente para melhoria da qualidade sensorial de carnes com grau de qualidade inferior (Smith et al., 2008; Berger et al., 2018; Guimarães et al., 2023), tais como a de animais zebuínos (*Bos indicus*). No Brasil, estima-se que 80% do rebanho bovino destinado a produção de carne ainda seja constituído por raças zebuínas, destacando a raça Nelore e seus cruzamentos, em razão da produtividade, resistência natural às doenças, parasitas e por tolerar as condições tropicais (ABCZ, 2023). Apesar disso, e da produção e comercialização brasileira de carnes maturadas à seco ainda ser muito incipiente,

uma pesquisa recente (Rezende-de-Souza et al., 2021) observou que 62% dos 37 produtores que relataram se preocupar com a genética do animal no processamento *dry-aging*, a grande maioria (96%) prefere cortes provenientes de animais de raças Europeias ou cruzas destas do que de animais de raças zebuínas.

Além do menor teor de gordura de marmoreio, a qualidade da carne de animais zebuínos é reconhecidamente menor que a carne de animais Europeus por causa da menor proteólise durante a maturação, necessitando de um maior tempo para alcançar a maciez desejada (Aroeira et al., 2016). Recentemente, foi proposto a maturação à seco de carnes congeladas/descongeladas previamente de animais zebuínos como forma de acelerar o processo, mantendo o perfil aromático característico e garantindo uma maciez instrumental e sensorial aos 14 dias comparáveis à carne maturada por 28 dias no processo convencional, sem, no entanto, aumentar as perdas de massa ou comprometer a segurança microbiológica (Guimarães et al., 2023; Haddad et al., 2022). Apesar desses autores observarem um amaciamento eficaz da carne em um menor tempo de maturação, os efeitos do processo acelerado no perfil sensorial descritivo e na aceitação do consumidor não foram avaliados.

Nesse contexto, a maturação à seco pelo processo acelerado pode ser uma alternativa para reduzir o tempo de amaciamento e atender às expectativas dos consumidores quanto às características de qualidade da carne, principalmente naquelas oriundas de animais zebuínos. Poucos trabalhos descreveram os atributos sensoriais e componentes aromáticos de carnes de animais zebuínos maturadas à seco, especialmente em carnes congeladas/descongeladas previamente. Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos do processo acelerado de maturação à seco no perfil sensorial descritivo e aceitabilidade da carne bovina de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore, dois tipos com diferentes graus de marmoreio e que abastecem diferentes mercados consumidores de carne no Brasil e no exterior. Além disso, o estudo propôs descrever a relação destes efeitos com parâmetros de qualidade como o perfil de aminoácidos, compostos voláteis e ácidos graxos.

2 MATERIAL E METÓDOS

O experimento foi realizado nos laboratórios de Tecnologia de Carnes e Derivados (LabCarnes) e de Análise Sensorial do Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA) e na Central de Análise e Prospecção Química (CAPQ) do Departamento de Química (DQI), da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Minas Gerais, Brasil.

2.1 Obtenção das amostras

Contrafilés (filés de lombos; corte entre a 10^a costela e a 1^a vértebra lombar), com a base óssea, de carcaças com alto grau de gordura de cobertura (> 10 mm) de três animais da raça Nelore (24 meses de idade e 305 kg de peso médio de carcaça) e de três animais de cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus; 30 meses de idade e 372 kg de peso médio de carcaça), criados a pasto, terminados em confinamento comercial (90 dias) e abatidos em condições semelhantes, foram coletados 48 h *post mortem* em um frigorífico comercial (Campo Belo, MG, Brasil), embalados em filme plástico (sem vácuo) e transportados em caixas térmicas com gelo para o LabCarnes na UFLA.

O pH de cada contrafilé foi medido por inserção direta, em quatro pontos ao longo do corte, com um pHmetro portátil (modelo Testo 206-pH2; Testo do Brasil, Campinas, SP, Brasil) e a parte posterior separada entre a 12^a e 13^a costelas (Figura 1) com auxílio de uma serra-fita (Modelo SFO 1.69; C.A.F. Máquinas; Rio Claro, SP, Brasil) para a caracterização das amostras não-maturadas. A espessura da gordura de cobertura (EGC) e a área do olho do lombo (AOL) foram aferidas conforme preconizado pela USDA (2017) e o músculo *longissimus* removido. Um bife de 2,5 cm de espessura foi obtido para avaliação da força de cisalhamento (FC) (item 2.3.8) e o restante triturado e analisado quanto ao índice de fragmentação miofibrilar (IFM), eletroforese em gel e oxidação lipídica, conforme descrito nos itens 2.3.3, 2.3.4 e 2.3.5.

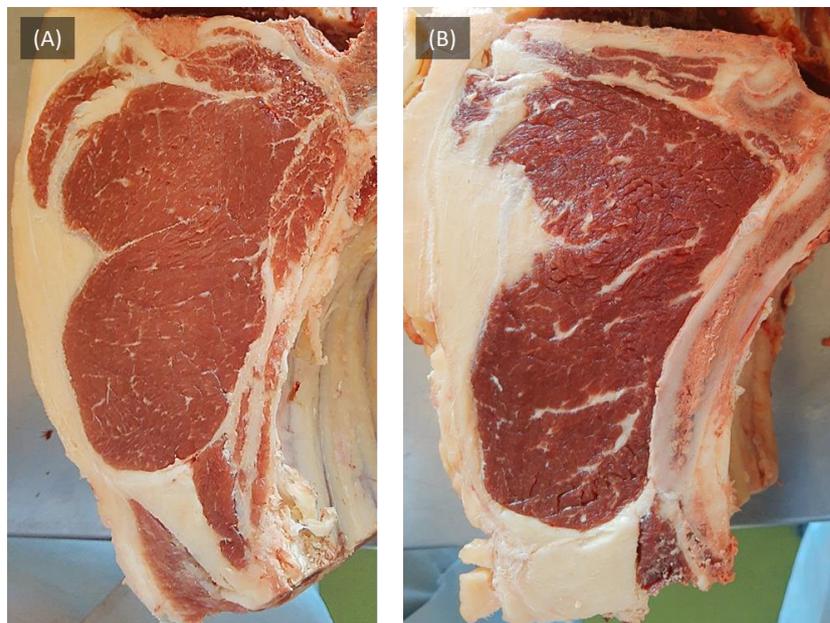


Figura 1. Cortes de contrafilés entre a 12^a e 13^a costelas para caracterização das carcaças de bovinos (A) Nelores e (B) cruzas F1 Angus x Nelore.

2.2 Tratamentos e maturação

Cada contrafilé foi identificado, serrado ao meio com auxílio de uma serra-fita e distribuídos de forma aleatória nos dois tratamentos (não congelado, NF; e congelado/descongelado, FT). As seções do tratamento FT foram pesadas, embaladas individualmente em filme plástico (sem vácuo), congeladas em *freezer* comercial (-18 °C) por 14 dias e descongeladas (4 °C/24 h) para posterior maturação. As seções do tratamento NF foram pesadas e diretamente destinadas ao processo de maturação.

O processo de maturação à seco foi conduzido em câmara climática (Modelo EL 131/4; Eletrolab; São Paulo, SP, Brasil) com controle de temperatura ($4,29 \pm 0,67$ °C) e de umidade relativa ($79,81 \pm 9,35\%$), sem circulação de ar forçado ($< 0,2$ m/s). A temperatura e umidade relativa na câmara foram registradas durante todo processo por um termohigrômetro digital (Data Logger HT500; Instrutherm Instrumentos de Medição Ltda, São Paulo, SP, Brasil). O tratamento NF foi maturado por 28 dias (processo convencional; NF28d) e o tratamento FT foi maturado por 14 dias (processo acelerado; FT14d), conforme sugerido por Haddad et al. (2022). Durante o processo de maturação, a disposição das peças nas prateleiras da câmara foi alternada, aleatoriamente, a cada sete dias, a fim de evitar efeito da posição entre os tratamentos.

Após o tempo de maturação, as peças foram pesadas, a crosta externa formada foi removida (toaleta), e o valor de pH determinado pela inserção direta em três regiões diferentes. As peças foram então cortadas com auxílio de uma serra-fita, obtendo bifés de aproximadamente 2,50 cm de espessura de forma a simular o corte para venda com osso. Dois bifés foram utilizados para análise da cor instrumental, composição centesimal, atividade de água (A_w), oxidação lipídica, índice de fragmentação miofibrilar (IFM), eletroforese em gel e perfil de ácidos graxos (AG). Os demais bifés foram identificados, individualmente embalados a vácuo (embaladora TM-250; TecMaq, SP, Brasil), em embalagem de náilon-poliétileno, e mantidos congelados em *freezer* comercial (-18 °C) para posterior análise sensorial, ocorrida cerca de 80 dias após a maturação. No dia da análise sensorial, as amostras foram previamente descongeladas (4 °C/24 h) e analisadas quanto à perda de massa no cozimento (PMC), força de cisalhamento (FC) e perfis de compostos orgânicos voláteis (VOC) e de aminoácidos (AA).

2.3 Análises

2.3.1 Perdas de massa

As perdas de massa durante os processos de maturação foram avaliadas pesando as peças antes e após cada etapa e expressas como porcentagem do peso inicial. A perda por evaporação (PME) foi determinada pela diferença entre o peso no tempo zero (antes da etapa de congelamento/descongelamento nas amostras FT) e o peso após a maturação. A perda por toalete (PMT) foi calculado pela diferença entre os pesos antes e após a remoção da crosta externa. A perda de massa por cozimento (PMC) foi determinada nos bifes pela diferença de peso antes e após o cozimento durante a análise de FC (item 2.3.8).

2.3.2 Atividade de água e composição centesimal

Uma porção triturada de cerca de 100 g do músculo *L. lumborum* foi utilizada para determinação da composição centesimal (teor de umidade, proteína, gordura, colágeno e cinzas), utilizando infravermelho próximo (NIR; método AOAC 2007-04), em aparelho FoodScan™ (FOSS Analytical A/S, Hillerod, Dinamarca), e da atividade de água (Aw), utilizando aparelho Aqualab® CX2 (Decagon Devices Inc., Pullman, Estados Unidos).

2.3.3 Índice de fragmentação miofibrilar

O grau de fragmentação miofibrilar foi determinado pelo índice de fragmentação miofibrilar (IMF), descrito por Aroeira et al. (2020), com pequenas adaptações. Cerca de 3 g de amostra finamente picada foi homogeneizada (Turrtec TE 102; TECNAL, Piracicaba, SP, Brasil) em 15 mL de tampão de extração (100 mM de cloreto de potássio; 20 mM de fosfato de potássio; 1 mM de cloreto de magnésio; 1 mM de azida de sódio; 1mM de sal dissódico do ácido etilenodiaminotetracético; pH 7,0) refrigerado (4 °C) por 15-30 s. O homogenato foi centrifugado (Hettich-EBA 21; Nova Analítica Importação e Exportação Ltda., São Paulo, Brasil) a 3000×g por 5 min e o sobrenadante descartado. O resíduo foi suspenso em 10 mL do tampão de extração, homogeneizado em vórtex por 10 s e novamente centrifugado a 3000×g por 5 min. O sobrenadante foi novamente removido e este processo de extração repetido por mais duas vezes. Por fim, o resíduo foi suspenso em 10 mL de tampão de extração e a concentração de proteína determinada pelo método de Biureto (Ramos & Gomide, 2017).

Uma alíquota da suspensão de miofibrilas foi diluída com o tampão de extração para uma concentração final de proteína de 0,5 mg/mL. A leitura da absorvância foi feita em espectrofotômetro (Genesys 10 UV; ThermoScientific Varian, São Paulo, Brasil) a 540 nm, contra o branco de tampão de extração. A média das leituras foi multiplicada por 200 para

expandir as unidades de absorvância para uma faixa de 30 a 100 e esses valores foram denominados IMF, em que maiores valores indicam maior proteólise.

2.3.4 Eletroforese em gel

A fração de proteína miofibrilar foi separada por eletroforese em gel de sódio dodecil sulfato-poliacrilamida (SDS-PAGE) de acordo com Li et al. (2014), com pequenas modificações descrita por Rodrigues et al. (2022). Os extratos proteicos obtidos na análise de IFM (item 2.3.3) foram diluídos para 4 mg proteína/mL em tampão desnaturante/corante (tracking dye; Tris-HCl 62,5 mM, pH 6,8, glicerol 10%, SDS 2%, 2-mercaptoetanol 5% e azul de bromofenol 0,02%) e imediatamente desnaturados em banho-maria a 95 °C por 5 min. O extrato desnaturado foi resfriado e armazenado a -20 °C até o momento da análise.

Cerca de 20 µg do extrato desnaturado de cada amostra foram aplicados em géis de SDS-poliacrilamida 12 % (proporção de acrilamida:bisacrilamida de 29:1), dispostos em um sistema de eletroforese (Mini-PROTEAN® Tetra Cell System; Bio-Rad Laboratórios Brasil Ltda, São Paulo, SP, Brasil). O gel foi corrido em solução Tris-Base 25 mM (glicina 250 mM, EDTA 1mM e SDS 10%) em uma voltagem constante inicial de 30 V até as proteínas atingirem o gel de separação, quando a voltagem foi aumentada para 100 V e mantida até as proteínas atingirem o final do gel. SigmaMarker™ (200 kDa a 6,5 kDa; Sigma-Aldrich Brasil Ltda., São Paulo, SP, Brasil) foi utilizado como marcado de peso molecular. Após a corrida, os géis foram sequencialmente mantidos por 24 h nas soluções fixadora (metanol 48% e ácido tricloroacético 10%), corante (metanol 50%, ácido acético 10% e corante Comassie Brilliant Blue R250 0,25%) e descorante (metanol 30% e ácido acético 7%), quando foram removidos e fotografados para posterior análise.

2.3.5 Oxidação lipídica

A oxidação lipídica foi avaliada pela determinação das substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS), segundo modificações do método descrito por Pikul et al. (1989). Cerca de 5 g de amostra foram pesados e homogeneizados em 15 mL de ácido perclórico 3,86% e 1 mL de antioxidante hidroxibutiltolueno (BHT) 0,15% por aproximadamente 30 s. Em seguida, o homogenato foi filtrado em papel filtro e uma alíquota de 2 mL do filtrado foi adicionado de 2 mL de ácido tiobarbitúrico 0,02 M (TBA; em ácido perclórico 3,86%), homogeneizado em vórtex e aquecido em banho-maria a 90 °C por 30 min.

As substâncias reativas ao TBA foram monitoradas usando os índices de TBARS@532 (medido a 532 nm), que mede os cromógenos rosas formados nos estágios

iniciais da oxidação lipídica (principalmente da interação do malonaldeído. MDA, ou compostos insaturados com TBA), e TBARS@450 (medido a 450 nm), que mede os cromógenos amarelos formados nos estágios avançados da oxidação lipídica (resultante principalmente da interação de grandes produtos de oxidação, insaturados ou complexos com TBA), conforme proposto por del Olmo et al. (2013). Assim, após banho-maria, as amostras foram resfriadas em banho de gelo por 3 min e a leitura das absorvâncias a 532 e 450 nm obtidas. Os valores de TBARS@532 (mg MDA/Kg) foram expressos a partir de uma curva analítica com 1,1,3,3-tetraetoxipropano (TEP), e os de TBARS@450 (mg HEX/kg) a partir de uma curva analítica com hexanal (HEX).

2.3.6 Cor instrumental

Para avaliação da cor instrumental das amostras utilizou-se um espectrofotômetro portátil CM-700 (Konica Minolta Sensing Inc, Osaka, Japão), com porta de abertura de 8 mm, iluminante A, ângulo de 10° para o observador, no modo de luz especular excluída (SCE). Os índices luminosidade (L^*), índice de amarelo (b^*), índice de vermelho (a^*), saturação (C^*) e ângulo de tonalidade (h, graus) foram obtidos a partir da média de cinco leituras realizadas na superfície dos bifes de 2,50 cm de espessura, após 30 min de exposição ao ar atmosférico (*blooming*) à temperatura ambiente (Ramos & Gomide, 2017).

2.3.7 Perfil de ácidos graxos

A análise da composição de ácidos graxos (AG) foi realizada por cromatografia gasosa após a extração dos lipídeos em clorofórmio/metanol (2:1 v/v), conforme Folch et al. (1957) e a esterificação (FAME) com cloreto de amônio/ácido sulfúrico/metanol, de acordo com Hartman & Lago (1973). Uma alíquota (1 μ L) do extrato FAME em hexano foi injetado no cromatógrafo Shimadzu (GC-MS QP2010 Plus; Shimadzu, Japan), ajustado com a temperatura do injetor e detector de 260 °C, em modo split 1:20, a uma velocidade linear de 20 cm/s, com rampa de aquecimento à temperatura inicial de 140 °C (5 min), e uma taxa de aquecimento de 4 °C/min até 240 °C (30 min). A coluna utilizada foi a SP2560 (100 m x 0,25 mm diâmetro interno x 0,20 μ m de espessura de filme). A identificação dos AG foi realizada por meio da comparação com os tempos de retenção do padrão cromatográfico SupelcoTM37 FAME Mix (Supelco Inc., Bellefonte, PA, USA). Os dados foram expressos como porcentagens de área normalizadas dos AG e agrupados como total de saturados (SAT), monoinsaturados (MUFA), poli-insaturados (PUFA), insaturados (INS) e ômega-6 (n_6) e suas relações.

2.3.8 Cozimento dos bifés e força de cisalhamento

Bifes (*M. L. lumborum*) de 2,5 cm de espessura foram obtidos (desossados), pesados, polvilhados com 1,5% de sal refinado, envoltos em papel alumínio e cozidos em grelha elétrica pré-aquecida a 200 °C (Modelo SCGE; Croydon; Duque de Caxias, Rio de Janeiro, Brasil) até atingirem a temperatura interna de 70 °C, monitorada por um termômetro digital (Chugod-Smart Wireless BBQ Thermometer, China) inserido no centro geométrico de cada bife. Após o cozimento, as amostras foram resfriadas a 4 °C por aproximadamente 12 h para a análise de força de cisalhamento (FC) e avaliados sensorialmente imediatamente após o cozimento.

A FC foi realizada segundo método *Warner-Bratzler square Shear Force* (WBsSF) proposto por Silva et al. (2015). De cada amostra cozida retirou-se seis seções retangulares (1,0 x 1,0 x 2,5 cm) obtidas no sentido das fibras musculares, que foram cisalhadas transversalmente a uma velocidade de 3,33 mm/s por uma lâmina tipo V *Warner-Bratzler* acoplada a um texturômetro TA.XTplus (Stable Micro Systems Ltd., Godalming, Surrey, Reino Unido). A força máxima (N) necessária para cisalhar por completo cada amostra foi mensurada e as leituras médias foram feitas para cada amostra.

2.3.9 Perfil de compostos voláteis

A análise de perfil de compostos orgânicos voláteis (VOC) foi realizada na carne grelhada e no exsudato (obtido imediatamente após o cozimento dos bifés), preparados conforme descrito no item 2.3.8. A separação e identificação dos VOC foi conduzida em um cromatógrafo gasoso acoplado a um espectrômetro de massas (GC-MS QP2010 Plus; Shimadzu, Japan), equipado com injetor automático para líquidos e gases (AOC-5000; S Shimadzu, Japan) e uma coluna SLBTM (5% phenyl- 95% dimethylsiloxane; 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm), segundo metodologia adaptada de Haddad et al. (2022) e Gardner & Legako (2018).

As amostras (5 g da carne grelhada triturada ou 4 g do exsudato) foram pesadas e colocadas em um *vial* de 22 mL, que foi selado com um septo de silicone/PTFE. Os VOCs foram extraídos em *headspace* por microextração em fase sólida (SPME), utilizando-se uma fibra DVB/CAR/PDMS (*Divinylbenzene, Carboxen, and Polydimethylsiloxane*; 1 cm, 50-30 µm de espessura de filme; marca Supelco). As amostras foram pré-aquecidas por 5 min a 65 °C em bloco de aquecimento e a fibra exposta por 20 min no *vial* para a extração dos compostos. A fibra foi injetada no CG, onde permaneceu por 5 min para a dessorção. A

temperatura do injetor manteve-se à 250 °C e operado no modo *splitless*. O gás de arraste utilizado foi o He 5.0 com um fluxo de 1 mL/min. A temperatura do forno foi programada da seguinte forma: a 35 °C/2 min; 80 °C a uma taxa de 2 °C/min; 150 °C a uma taxa de 4 °C/min; 230 °C à uma taxa de 8 °C/min. O espectrômetro de massas utilizado foi o de impacto de elétrons (70 eV), no modo *scan* (45 a 350 Da), com um corte de solvente em 0,55 min. A temperatura da interface do detector e da fonte de íons permaneceu a 250 °C e 200 °C, respectivamente. Os compostos voláteis foram identificados comparando os espectros de massas obtidos com espectros de massas fornecidos pelo banco de dados do *software* (Wiley 8 e FFNSC 1.2) e os índices de retenção obtidos experimentalmente comparados a dados reportados na literatura, por meio da injeção de uma série homologa de alcanos (Supelco, Bellefonte, PA, EUA). A área de cada pico foi integrada usando o software GCMS Solutions (Shimadzu, Kyoto, Japão) e os dados apresentados como contagem total de íons $\times 10^4$.

2.3.10 Perfil de aminoácidos

O perfil de aminoácidos (AA) do exsudato das amostras grelhadas (obtido no item 2.3.8) foi determinado por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) em um cromatógrafo Shimadzu (Shimadzu Corporation, Tóquio, Japão). As amostras foram hidrolisadas com fenol 3% em HCl 6 M por 24 h a 110 °C e, em seguida, a derivatizadas em pré-coluna com isotiocinato de fenila. Os aminoácidos foram separados em fase reversa utilizando uma coluna Luna C-18 (100 Å, 5 µM, 250 x 4,6 mm; Phenomenex, Torrance, CA) a 50 °C e quantificados em um detector de UV a 254 nm (Hagen et al., 2020). O teor de triptofano foi determinado após hidrólise alcalina (hidróxido de bário 4 M), conforme metodologia proposta por Lucas & Sotelo (1980). O teor de cada AA foi expresso como mg/g de proteína.

2.3.11 Perfil sensorial e aceitabilidade

A percepção do consumidor referente às características sensoriais e qualidade das carnes maturadas à seco foi avaliada pelo teste descritivo *Check-All-That-Apply* (CATA) e pelo teste de aceitação, após aprovação pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da UFLA (CAAE: 36202520.0.0000.5148) e os voluntários assinarem o Termo de Consentimento Livre Esclarecido (TCLE).

Os testes CATA e de aceitação foram realizados em conjunto, conforme metodologia descrita por (Guimarães et al., 2022), com pequenas adaptações. Para o grupo de foco, os avaliadores foram selecionados por meio dos testes de reconhecimento de gostos e aromas

básicos (ISO 8586:2012) e testes triangulares (ISO 4120:2021) com duas amostras de carne bovina Nelore, com diferença significativa ($P < 0,05$) obtida por meio do teste de comparação pareada: congelada ($-18\text{ °C}/15$ dias), descongelada ($4\text{ °C}/24$ h) e maturada à seco e a vácuo a 4 °C por 15 dias. Subsequentemente, aplicou-se a análise sequencial de Wald para verificar a aptidão dos candidatos (Meilgaard et al., 1999), utilizando os valores de $P = 0,30$ (máxima inabilidade aceitável), $P_l = 0,70$ (mínima habilidade aceitável), e para os riscos $\alpha = 0,10$ (probabilidade de aceitar um candidato sem acuidade sensorial) e $\beta = 0,10$ (probabilidade de rejeitar um candidato com acuidade sensorial).

Após a seleção, 17 avaliadores realizaram o levantamento das características da ficha CATA no grupo de foco, utilizando bifes dos quatro tratamentos: carnes de animais Nelore e F1Angus maturados à seco no processo convencional (NF28d) e acelerado (FT14d). No grupo de foco os avaliadores identificaram um total de 26 características, que foram agrupadas por aparência, aroma, sabor e textura (Tabela 1).

Tabela 1. Lista de características por atributo da ficha CATA usada para caracterizar os diferentes tratamentos.

Aparência	Aroma	Sabor/Gosto	Textura
Uniforme	Grelhado/churrasco	Grelhado/churrasco	Firme
Grelhado/churrasco	Adocicado/caramelizado	Adocicado/caramelizado	Macia
Amarronzada	Gorduroso/amanteigado	Gorduroso/amanteigado	Suculenta
Pálida	Defumado	Defumado	Seca
Úmida	Acastanhado/nozes	Ácido	Fibrosa
Rosada no centro	Amadeirado	Metálico	
Fibras aparentes	De sangue	De sangue	

Para condução dos testes sensoriais, 104 consumidores, com idade entre 18 a 45 anos, foram recrutados aleatoriamente. Um total de 10% dos avaliadores relatou o consumo de carne bovina de uma a duas vezes no mês a raramente, 60% pelo menos de uma a duas vezes na semana e 30% diariamente.

Os testes sensoriais foram realizados em uma única sessão, conduzidos em cabines individuais, com iluminação adequada sob luz branca. Os avaliadores julgaram as quatro amostras de carnes codificadas em ordem balanceada e de forma monádica. Água foi fornecida para limpeza das papilas gustativas entre as avaliações. As amostras foram grelhadas envoltas em papel alumínio, conforme descrito no item 2.3.8, cortadas transversalmente em seções retangulares ($1,0 \times \sim 2,5$ cm), porcionadas em copos descartáveis, mantidas dentro de caixas térmicas e servidas ainda quentes ($\sim 40\text{ °C}$) no momento da análise.

Antes de iniciar a análise, os avaliadores foram instruídos à leitura dos atributos e, após experimentarem cada amostra, solicitados a indicar os atributos presentes na ficha CATA (Tabela 1) que fossem apropriados para descrever cada amostra. Os avaliadores foram instruídos de que não havia limite para o número de atributos selecionados e que poderiam selecionar uma ou mais opções de acordo com sua opinião em relação às amostras. Por fim, os avaliadores também foram solicitados que julgassem o quanto gostaram ou desgostaram das amostras (teste de aceitação), em relação aos atributos de aparência, aroma, sabor, textura e aspecto global, utilizando uma escala hedônica estruturada de 9 pontos (1 – desgostei extremamente a 9 – gostei extremamente).

2.4 Análises estatísticas

Os efeitos da raça (Nelore x F1Angus) e do tratamento (FT14d e NF28d) foram avaliados por análise descritiva, sendo reportados como médias e erro padrão da média (EPM). As relações entre as características físicas, químicas e físico-químicas dentro dos efeitos estudados (Nelore e F1Angus nos sistemas de maturação NF28d e FT14d) foram determinadas pela análise de componentes principais (PCA), sendo tabuladas no programa Statistica® 8.0 (StatSoft, Poland).

Para os dados do teste CATA, a frequência de citação de cada atributo foi determinada para cada amostra pela contagem do número de vezes que cada termo foi usado pelos consumidores (matriz de contingência). A partir da matriz de contingência, as diferenças para cada atributo entre as amostras foram verificadas pelo teste *Q de Cochran* (Meyners et al., 2013), sendo excluídos os atributos sensoriais que apresentaram menos de 10% de citação pelos consumidores (Ares et al., 2010): aromas “acastanhado/nozes” e “de sangue”, “gosto ácido” e sabores “metálico” e “de sangue”. A análise de correspondência (CA) foi calculada sobre a matriz de contingência, a fim de obter o mapa sensorial dos tratamentos em relação às suas características (Guimarães et al., 2022). Os dados do teste de aceitação, em relação, aos atributos de aparência, aroma, sabor, textura e aspecto global foram avaliados pela análise de variância (ANOVA), considerando os consumidores como bloco e com um nível de significância de 5%. As médias do teste de aceitação foram comparadas pelo teste de Tukey.

Para entender as relações entre os conjuntos de dados químicos (AA e VOC) e sensorial (CATA e aceitação global), a Análise Fatorial Múltipla (MFA) foi aplicada nos quatro tratamentos de carnes bovinas. Na presença de tabelas de variáveis qualitativas e quantitativas, a análise global MFA foi realizada utilizando os PCA dos grupos de AA e VOC, a análise de correspondência (CA) para o grupo de atributos do CATA e as médias de

aceitação global. Portanto, essa análise foi realizada em uma tabela composta por quatro linhas, correspondentes aos quatro tratamentos e quatro grupos de colunas, correspondentes à 20 AA, 17 VOC (do exsudato), 21 atributos do CATA e as médias de aceitação global. O coeficiente RV que mede a proximidade entre duas matrizes de dados foi calculado com o objetivo de estabelecer uma relação entre os grupos de variáveis avaliadas. O coeficiente RV é uma estatística multivariada que varia de 0 (configurações ortogonais não correlacionadas) a 1 (concordância perfeita) (Rodrigues et al., 2020). Estas análises foram realizadas utilizando o software XLSTAT, versão 2022 (Addinsoft, Paris, França).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características das carcaças e carnes dos contrafilés utilizados no experimento são descritas na Tabela 2. Ambas as carcaças possuíam um teor de cobertura excessivo (> 10 mm), de princípio ideal para a produção de carnes maturadas à seco, mas as carnes de F1Angus possuíam um maior teor de gordura de marmoreio do que as de Nelore.

Tabela 2. Características (média \pm desvio padrão) de carcaça e da carne de contrafilés de animais da raça Nelore e da cruz F1 Angus x Nelore (F1Angus).

Característica	Nelore	F1Angus
Gordura de cobertura, EGC (mm)	10,46 \pm 0,16	12,89 \pm 0,19
Gordura de marmoreio (g/100g)	4,23 \pm 0,13	9,86 \pm 0,09
Área do olho do lombo, AOL (cm ²)	56,06 \pm 3,54	66,36 \pm 3,18
pH	5,53 \pm 0,06	5,51 \pm 0,03
Força de cisalhamento, FC (N)	64,43 \pm 3,43	51,03 \pm 1,45
Índice de fragmentação miofibrilar, IFM	17,70 \pm 0,14	24,70 \pm 0,15
Índice de TBARS@532 (mg MAD/kg)	0,37 \pm 0,08	0,35 \pm 0,02
Índice de TBARS@450 (mg HEX/kg)	50,94 \pm 4,30	43,04 \pm 2,77

MAD = Malonaldeído; e HEX = Hexanal.

Segundo Rezende-de-Souza et al. (2021), a maioria (48,6%) dos produtores de carne maturada à seco no Brasil preferem carcaças com gordura de cobertura (ECG) acima de 5 mm, mas 29,7% preferem ECG acima de 10 mm. No entanto, ainda segundo estes autores, a maioria dos produtores (56,8%) relataram não terem exigência específica quanto ao grau de marmoreio, apesar da maioria (59,5%) também relatar preferência por carnes de animais puros ou cruzas de *Bos taurus*.

A carne das carcaças F1Angus eram, ainda, mais macias (menor valor de FC) e com um grau de proteólise ligeiramente maior (maior valor de IFM). Estes fatores, juntamente com o teor de marmoreio, são determinantes para explicar as diferenças de qualidade das carnes

entre as raças, uma vez que uma redução no teor de marmoreio, assim como uma menor proteólise e maciez, é observada na carne de cruzas de animais Europeus com maior participação de sangue zebuino (Aroeira et al., 2016).

3.1 Caracterização físico-química

A Tabela 3 apresenta a caracterização físico-química dos contrafilés maturados à seco nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d). O maior teor de gordura das amostras F1Angus é oriunda da maior deposição de gordura de marmoreio destes animais (Tabela 2) e justifica os menores valores de umidade observado nestas carnes maturadas.

Tabela 3. Características físicas, químicas e físico-químicas de bifés de contrafilés (*M. L. lumborum*) de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).

Características	Nelore		F1Angus		Média	EPM
	FT14d	NF28d	FT14d	NF28d		
Composição centesimal (%)						
Umidade	69,35	69,46	65,51	67,69	68,00	0,42
Proteína	24,05	23,63	23,20	23,65	23,63	0,16
Colágeno	1,33	1,80	2,68	1,90	1,93	0,11
Gordura	4,33	5,05	10,06	7,33	6,69	0,59
Cinzas	2,28	1,87	1,22	1,33	1,67	0,12
Perdas de massa (%)						
Evaporação, PME	16,21	18,82	11,78	10,41	14,30	1,53
Toalete, PMT	17,27	17,17	18,43	16,16	17,26	0,46
Cozimento, PMC	19,78	20,20	16,31	20,18	19,12	0,80
Atividade de água, Aw	0,979	0,983	0,981	0,984	0,981	0,001
pH	5,73	5,57	5,59	5,59	5,62	0,02
Índice Fragmentação miofibrilar, IFM	43,80	36,80	44,00	40,10	41,18	3,01
Força de cisalhamento, FC (N)	22,50	33,70	20,94	24,52	25,41	5,08
Índice de TBARS						
TBARS@532 (mg MAD/kg)	0,49	0,51	0,41	0,37	0,44	0,03
TBARS@450 (mg HEX/kg)	78,92	76,48	56,97	52,59	66,24	5,18
Cor CIE						
Luminosidade, L^*	46,15	46,76	41,35	44,26	44,63	0,57
Índice de vermelho, a^*	22,24	22,76	24,27	25,58	23,71	0,34
Índice de amarelo, b^*	15,93	16,17	16,36	17,32	16,44	0,30
Saturação, C^*	27,36	27,92	29,26	30,89	28,86	0,43
Ângulo de tonalidade, h (°)	35,60	35,38	33,98	34,12	34,77	0,28

FT14d = amostras congeladas (-18 °C por 14 dias), descongeladas (4 °C por 24 h) e maturadas por 14 dias; NF28d = amostras (não congeladas) maturadas por 28 dias; MAD = malonaldeído; HEX = hexanal; e EPM = erro padrão da média ($n = 12$).

Não foram observadas variações para a maioria dos parâmetros avaliados das amostras maturadas no processo acelerado comparado ao processo convencional, exceto por maiores valores de IFM e menores valores de FC nas amostras FT14d do que nas NF28d, especialmente naquelas de animais Nelore. Estas diferenças quanto a raça, condiz com a condição inicial destas antes da maturação (Tabela 2) e que se mantiveram nas carnes maturadas no processo convencional (NF28d). No entanto, no processo acelerado (FT14d) estas diferenças foram eliminadas e podem ser associadas justamente à maior proteólise nas amostras FT14d, que também pode ser observada ao maior surgimento aparente de fragmentos de peptídeos menores (próximos a 24 kDa) nestas amostras na análise de SDS-PAGE (Figura 2).

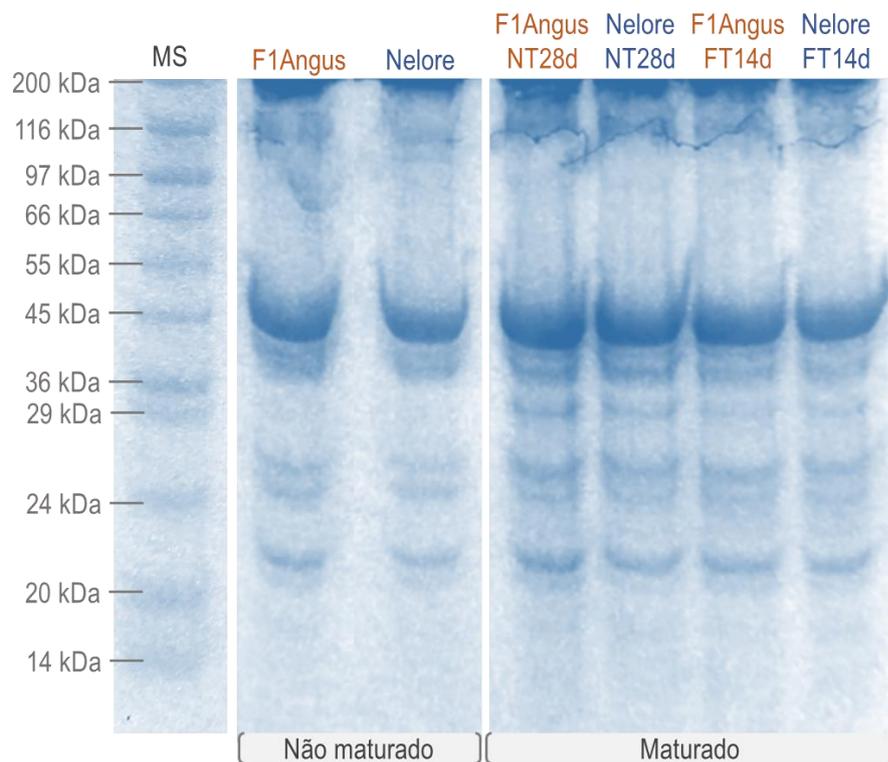


Figura 2. Perfil representativo das proteínas miofibrilares (separadas por 10% SDS-PAGE) do músculo bovino *L. lumborum* de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) não-maturados e maturados à seco nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d). MS = padrão molecular.

Nas carnes maturadas por ambos os processos (acelerado e convencional), é perceptível o aparecimento de bandas polipeptídicas com pesos moleculares (PM) nas faixas entre 29 e 45 kDa após a maturação, bem como maior intensidade das bandas na região de 24

kDa, em comparação às amostras não maturadas. O aumento da intensidade de bandas entre 45 e 36 kDa é atribuído a fragmentos de degradação da proteína desmina (PM ~50 kDa) durante o armazenamento *post mortem*, enquanto bandas com PM de 24 a 30 kDa aparecem gradualmente devido à degradação da troponina-T (PM ~36 kDa) (Huff-Lonergan et al., 1996; Rodrigues et al., 2022). Estas degradações são devidas a ação das proteases do complexo de calpaínas durante a maturação e exercem grande influência na taxa de amaciamento da carne (Koohmaraie & Geesink, 2006).

Apesar das diferenças observadas na FC e IFM, todas as amostras podem ser classificadas como “macias” ($WBS_f < 42 \text{ N} \equiv WBS_{SF} < 53 \text{ N}$) pela escala de classificação de Destefanis et al. (2008), convertendo os valores de WBSF para WBS_{SF} pela equação geral sugerida por Silva et al. (2015). Importante observar também que, apesar das maiores perdas na maturação comumente induzidas pelo processo de congelamento/descongelamento (Aroeira et al., 2016; Sales et al., 2020), as perdas de massa de ambos os processos de maturação foram similares, tanto para as perdas por evaporação (PME) quanto para as perdas na toailete para remoção da crosta formada (PMT). Isto corrobora as observações de Haddad et al. (2022) e Guimarães et al. (2023) de que o congelamento/descongelamento acelera a maturação à seco, permitindo se obter a maciez desejada em um menor tempo, porém sem acarretar maiores perdas de massa no processo.

Um gráfico de PCA foi gerado (Figura 3) com as características físico-químicas para discriminar as amostras quanto aos tratamentos (raça e sistema de maturação). O primeiro (PC1) e o segundo (PC2) componentes do PCA representaram 85,34% da variabilidade dos dados experimentais. Os tratamentos foram separados por raça pelo PC1, que explica a maior variação dos dados (60,32%), posicionando à esquerda a cruz F1Angus e à direita os animais Nelore, enquanto a separação por sistema de maturação foi possível pelo PC2 (25,02% da variabilidade dos dados), com o processo acelerado posicionadas na parte superior. Isto reforça a observação de que o processo acelerado pouco alterou as características das carnes maturadas à seco quando comparado ao processo convencional.

As características determinantes na discriminação das raças foram os teores de gordura e colágeno, mais relacionados aos F1Angus, e as perdas de massa por evaporação (PME), oxidação lipídica e a menor maciez (FC), relacionados aos Nelores. Para o processo de maturação, os parâmetros de IFM e perdas de massa por toailete (PMT) tiveram maior contribuição para discriminar as amostras congeladas/descongeladas das não-congeladas, caracterizadas principalmente pela FC. Maior proteólise e maior maciez (menor FC), são justificadas pelos danos criogênicos induzidos no congelamento/descongelamento, conforme

reportado por vários estudos com carne maturada a vácuo (Sales et al., 2020; Aroeira et al., 2016) e à seco (Guimarães et al., 2023; Haddad et al., 2022). Por fim, é possível observar que a oxidação lipídica (testes de TBARS) contribuiu para a caracterização da maturação à seco pelo processo acelerado, sendo também justificado pelos danos celulares sofridos pela presença dos cristais de gelo, que aumenta o contato dos lipídios com substâncias catalisadoras da oxidação (Sales et al., 2020), tornando as amostras congeladas mais susceptíveis à esta alteração.

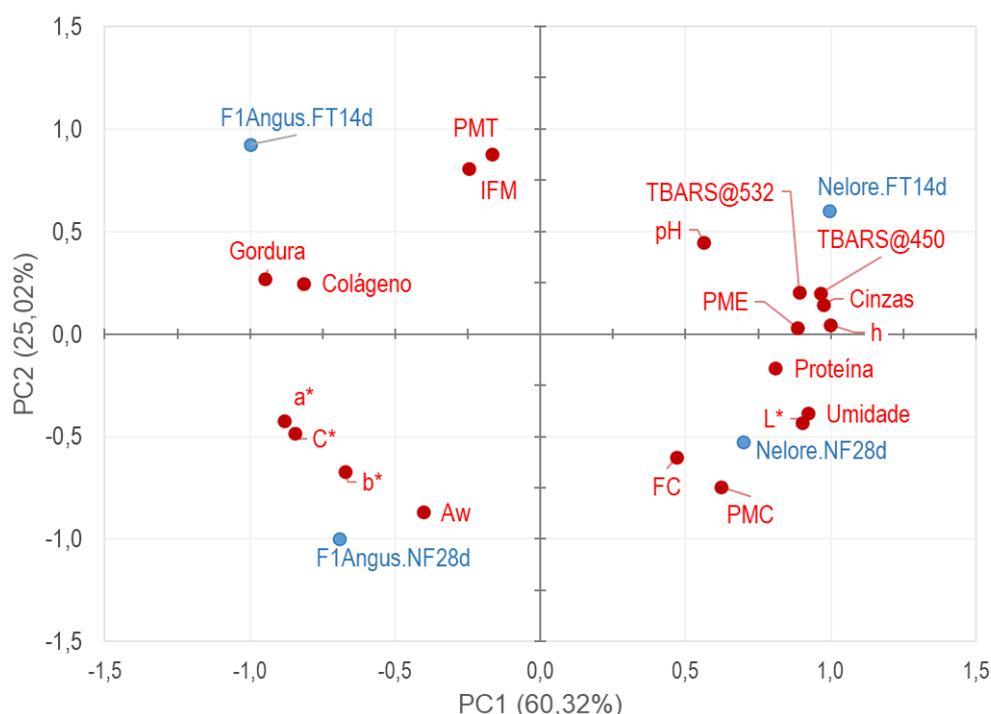


Figura 3. Análise de componentes principais (PCA) das características físico-químicas na carne (*L. lumbrorum*) de animais Nelore e cruza F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d). As siglas das características estão descritas na Tabela 3.

3.2 Perfil de ácidos graxos

Na Tabela 4 são descritos o perfil de ácidos graxos (% das áreas normalizadas), os somatórios e suas relações, dos contrafilés de animais Nelore e F1Angus maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d). A carne de F1Angus apresentou uma maior relação PUFA/SFA do que a de Nelores, sendo maior do que a proporção mínima (0,40) considerada adequada na determinação da qualidade e o valor nutricional da carne (Wood et al., 2004).

Tabela 4. Perfil de ácidos graxos (% das áreas normalizadas) de contrafilés (*M. L. lumbrorum*) de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) e maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).

Ácido graxo		Nelore		F1Angus		Média	EPM
		FT14d	NF28d	FT14d	NF28d		
Mirístico	C14:0	/	1,76	0,75	0,95	1,15	0,14
Pentadecanóico	C15:0	5,69	4,65	4,22	4,10	4,67	0,34
Palmítico	C16:0	24,32	27,77	23,41	23,28	24,70	0,69
Palmitoleico	C16:1	2,71	2,47	1,81	1,71	2,18	0,16
heptadecanóico	C17:0	3,86	2,48	3,47	3,88	3,42	0,20
Esteárico	C18:0	12,43	14,06	14,30	14,38	13,79	0,43
Oleico	C18:1n9c	34,21	34,94	35,16	33,42	34,43	0,52
Linoleico	C18:2n6c	10,85	9,25	13,05	14,13	11,82	0,81
Eicosatrienoico	C20:3n6	1,84	nd	1,59	2,04	1,82	0,12
Aracdônico	C20:4n6	5,01	3,50	4,32	4,45	4,32	0,22
Σ Saturados	SFA	46,30	49,83	45,78	46,11	47,01	0,81
Σ Monoinsaturados	MUFA	36,92	37,42	36,06	34,28	36,17	0,51
Σ Poli-insaturados	PUFA	16,78	12,75	18,16	19,61	16,83	1,05
Σ Insaturados	UFA	53,70	50,17	54,22	53,89	53,00	0,81
Σ Ômega-6	n6	16,78	12,75	18,16	19,61	16,83	1,05
	UFA/SFA	1,16	1,01	1,19	1,17	1,13	0,04
	PUFA/SFA	0,36	0,26	0,40	0,43	0,36	0,03

FT14d = amostras congeladas (-18 °C por 14 dias), descongeladas (4 °C por 24 h) e maturadas à seco por 14 dias; NF28d = amostras (não congeladas) maturadas por 28 dias; EPM = erro padrão da média ($n = 12$); e / = não detectado.

Quanto aos sistemas de maturação, as carnes de ambos os processos (NF28d e FT14d) possuíam perfis de ácidos graxos similares. Um gráfico de PCA também foi gerado com os ácidos graxos para avaliação dos efeitos (Figura 4). O primeiro (PC1) e o segundo (PC2) componentes do PCA representaram 93,84% da variabilidade dos dados experimentais. Pelo PC1, que descreveu uma variabilidade dos dados acima de 70%, as amostras puderam ser agrupadas em dois grupos: um composto pela amostra Nelore maturada pelo processo convencional (NF28d), que foi caracterizado pela maioria dos ácidos graxos saturados (especialmente o palmítico e o esteárico) e monoinsaturados (oleico); e outro grupo composto pelos demais tratamentos e que foram caracterizados pelos ácidos graxos insaturados.

Sabe-se que as composições de ácidos graxos na carne estão associadas a perfis sensoriais de sabor (Wood et al., 2004), mas poucos trabalhos foram conduzidos para investigar a causa da mudança nos ácidos graxos como resultado da maturação à seco da

carne bovina. De forma geral, Gredell et al. (2018) observaram maiores proporções do ácido graxo C18:0 e menores dos C14:0, C15:0 e C16:0 nas amostras maturadas à seco (por 21 dias) quando comparadas às carnes frescas (não-maturadas), enquanto os ácidos graxos mono- e poli-insaturados reduziram com a maturação. Já Kim et al. (2019) verificaram que a proporção de PUFA/SFA aumentou (0,20 para 0,38) com o processo de maturação à seco. Considerando que o grupo genético também pode influenciar a proporção do perfil de ácidos graxos durante a maturação (Barcellos et al., 2017), pode-se considerar que o processo FT14d aproximou as carnes de Nelores maturadas daquelas das cruzas F1Angus maturadas por ambos os sistemas.

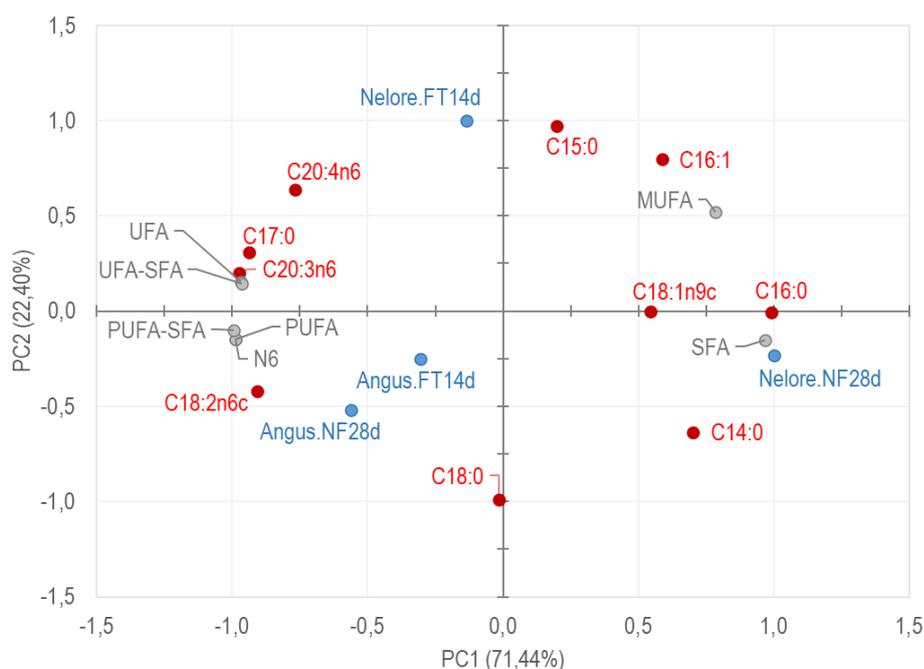


Figura 4. Análise de componentes principais (PCA) do perfil de ácidos graxos na carne (*L. lumbrorum*) de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d). Somatório de ácidos graxos: SFA = saturados; MUFA = monoinsaturados; PUFA = poli-insaturados; UFA = insaturados; e N6 = ômega 6. As nomenclaturas dos ácidos graxos estão descritas na Tabela 4.

3.3 Perfil de compostos voláteis

O perfil de compostos orgânicos voláteis (VOC) na carne e no exsudato obtido durante o cozimento das amostras maturadas à seco está descrito na Tabela 5.

Tabela 5. Perfil de compostos voláteis (contagem de íons totais $\times 10^4$) da carne e do exsudato de contrafilés (*M. L. lumborum*) grelhados de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d). (continua)

Cod	Compostos	Carne					Exsudato				
		Nelore		F1Angus		EPM	Nelore		F1Angus		EPM
		FT14d	NF28d	FT14d	NF28d		FT14d	NF28d	FT14d	NF28d	
ACIDS											
Ac1	n-Decanoic acid	/	/	/	/		23,73	35,61	/	33,11	7,37
Ac2	n-Nonanoic acid	/	/	/	/		28,17	285,6	25,25	135,64	71,83
ALCOOIS											
Al	1-Octanol	7,34	18,44	5,91	15,87	4,51	/	44,8	20,58	29,92	9,28
	1-Octen-3-ol	/	19,14	/	7,82	5,4	/	/	/	/	
	1-Pentanol	/	5,45	/	6,81	2,57	/	/	/	/	
	2-Ethylhexanol	/	2,16	/	3,59	2,97	/	/	/	/	
ALDEÍDOS											
Ad1	Benzaldehyde	23,20	20,57	26,97	31,80	1,83	44,01	50,52	37,15	144,81	16,93
Ad2	Benzaldehyde, 2,3-dimethyl-	/	/	/	/		5,37	16,48	/	/	2,67
Ad3	Benzeneacetaldehyde (Hyacinthin)	16,22	/	19,23	/	1,12	304,14	223,34	320,27	322,58	33,55
Ad4	Butanal	10,39	8,88	12,07	11,74	0,86	510,94	405,52	384,82	7,1	58,1
Ad5	Butanal, 2-methyl-	35,86	57,74	33,91	38,27	4,7	113,85	70,34	112,83	120,74	13,3
Ad6	Butanal, 3-methyl-	26,33	34,47	27,97	31,38	2,35	96,6	59,64	98,24	101,3	11,47
Ad7	Decanal	4,68	5,65	3,48	5,73	0,77	14,91	34,96	23,77	16,4	4,05
Ad8	Heptanal	3,77	23,65	7,24	25,88	4,66	6,83	90,25	16,53	35,53	10,5
Ad9	Hexanal	20,10	181,03	25,23	70,00	29,23	4,56	20,75	10,06	10,27	1,89
Ad10	Nonanal	120,60	282,71	151,77	260,49	34,03	159,2	546,12	382,93	577,22	92,1
Ad11	Octanal	20,60	65,91	30,34	67,60	10,49	10,67	205,58	28,86	69,52	26,61
	Pentanal	/	5,48	2,74	7,67	4,46	/	/	/	/	
Ad12	Propanal, 3-(methylthio)-	/	/	/	/		148,53	/	148,06	207,25	17,93
CETONAS											
Ke	2-Butanone, 3-hydroxy (Acetoin)	9,25	/	27,23	23,09	3,92	/	/	14,51	11,23	2,14

Tabela 5. Perfil de compostos voláteis (contagem de íons totais $\times 10^4$) da carne e do exsudato de contrafilés (*M. L. lumbrorum*) grelhados de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d). (conclusão)

Cod	Compostos	Carne					Exsudato				
		Nelore		F1Angus		EPM	Nelore		F1Angus		EPM
		FT14d	NF28d	FT14d	NF28d		FT14d	NF28d	FT14d	NF28d	
	Octane-2,3-dione	/	/	/	42,84		/	/	/	/	
	PIRAZINA										
Py	Pyrazine, 2-ethyl-3,5-dimethyl-	8,33	7,78	2,62	/	1,25	20,19	26,8	13,57	18,07	3,3
	Σ ÁCIDOS	0,00	0,00	0,00	0,00		51,90	321,21	25,25	168,75	
	Σ ALCOOÍIS	7,34	45,20	5,91	34,10		0,00	44,80	20,58	29,92	
	Σ ALDEÍDOS	281,74	686,09	340,94	550,56		1419,61	1723,50	1563,52	1612,72	
	Σ CETONAS	9,25	0,00	27,23	65,93		0,00	0,00	14,51	11,23	
	Σ PIRAZINA	8,33	7,78	2,62	/		20,19	26,80	13,57	18,07	
	Σ TOTAIS	306,66	739,07	376,71	650,58		1491,70	2116,31	1637,43	1840,69	

FT14d = amostras congeladas (-18 °C por 14 dias), descongeladas (4 °C por 24 h) e maturadas a seco por 14 dias; NF28d = amostras (não congeladas) maturadas por 28 dias; EPM = erro padrão da média ($n = 12$); e / = não detectado.

Na carne grelhada foram identificados 18 compostos, classificados nos seguintes grupos: álcoois ($n = 4$), aldeídos ($n = 11$), cetonas ($n = 2$) e pirazina ($n = 1$). Exceto pirazina, o somatório de todas as classes de compostos foi maior no tratamento NF28d. Em relação ao perfil de compostos voláteis do exsudato dos contrafilés grelhados, apesar de ter sido identificados um número de compostos (17) similar à carne, o perfil foi diferente, sendo observado compostos ácidos ($n = 2$), além dos grupos álcool ($n = 1$), aldeídos ($n = 12$), cetona ($n = 1$) e pirazina ($n = 1$) também identificados na carne grelhada. Além disso, a concentração (contagem de íons totais) dos compostos, especialmente de aldeídos, foi maior no exsudato do que na carne grelhada, possivelmente devido a uma maior concentração e volatilização dos compostos aromáticos, incluindo aqueles oriundos da fração lipídica da carne.

Os VOC identificados na carne e no exsudato foram discriminados nos tratamentos pela análise de PCA (Figura 5), em que o primeiro (PC1) e o segundo (PC2) componentes representaram 95,58% da variabilidade dos dados experimentais para a carne grelhada e 89,01% para o exsudato.

Na carne, o processo acelerado de maturação à seco modificou o perfil de VOC, sendo as amostras FT14d separadas em lados opostos ao longo do PC1 em relação as amostras NF28d e as raças Nelore e F1Angus ao longo do PC2 (Figura 5A). Maior desenvolvimento de VOC foi observado no processo de maturação convencional (NF28d), sendo que o processo acelerado (FT14d) foi caracterizado pelos compostos pyrazine-2-ethyl-3,5-dimethyl, hyacinthin, butanal e acetoína. Uma alta presença da cetona acetoína em amostras maturadas à seco foi reportado por O'Quinn et al. (2016), sendo que Bernardo et al. (2020) também observaram a formação deste composto em carnes de Nelore maturadas à seco por 28 dias, congeladas/descongeladas ou não. Haddad et al. (2022), no entanto, relatou uma maior correlação de acetoína com as amostras congeladas/descongeladas e maturadas por até 14 dias do que nas amostras não congeladas e maturadas por tempo maiores (até 42 dias).

Grande quantidade de aldeídos presentes na carne grelhada foram relacionados às amostras maturadas pelo processo convencional. Dois compostos, em especial, o 2-metilbutanal e 3-metilbutanal são relatados por diversos autores como característicos de carnes maturadas à seco (Haddad et al., 2022; Guimarães et al., 2023; Bernardo et al., 2020; Gredell et al., 2018; O'Quinn et al., 2016; Utama et al., 2020). Estes compostos, juntamente com a pyrazine-2-etil-3,5-dimetil e o benzaldeído, são produtos da reação de Strecker da isoleucina (ILE), leucina (LEU) e fenilalanina (PHE). Já o heptanal, octanal, nonanal, decanal e octanol são derivados da oxidação do ácido graxo oleico, enquanto os compostos butanal e pentanal têm origem no ácido graxo linoleico (Domínguez et al., 2019; O'Quinn et al., 2016;

Watanabe et al., 2015). Portanto, os principais compostos formados na maturação convencional foram produtos das reações de oxidação lipídica, Maillard e de Strecker e suas interações.

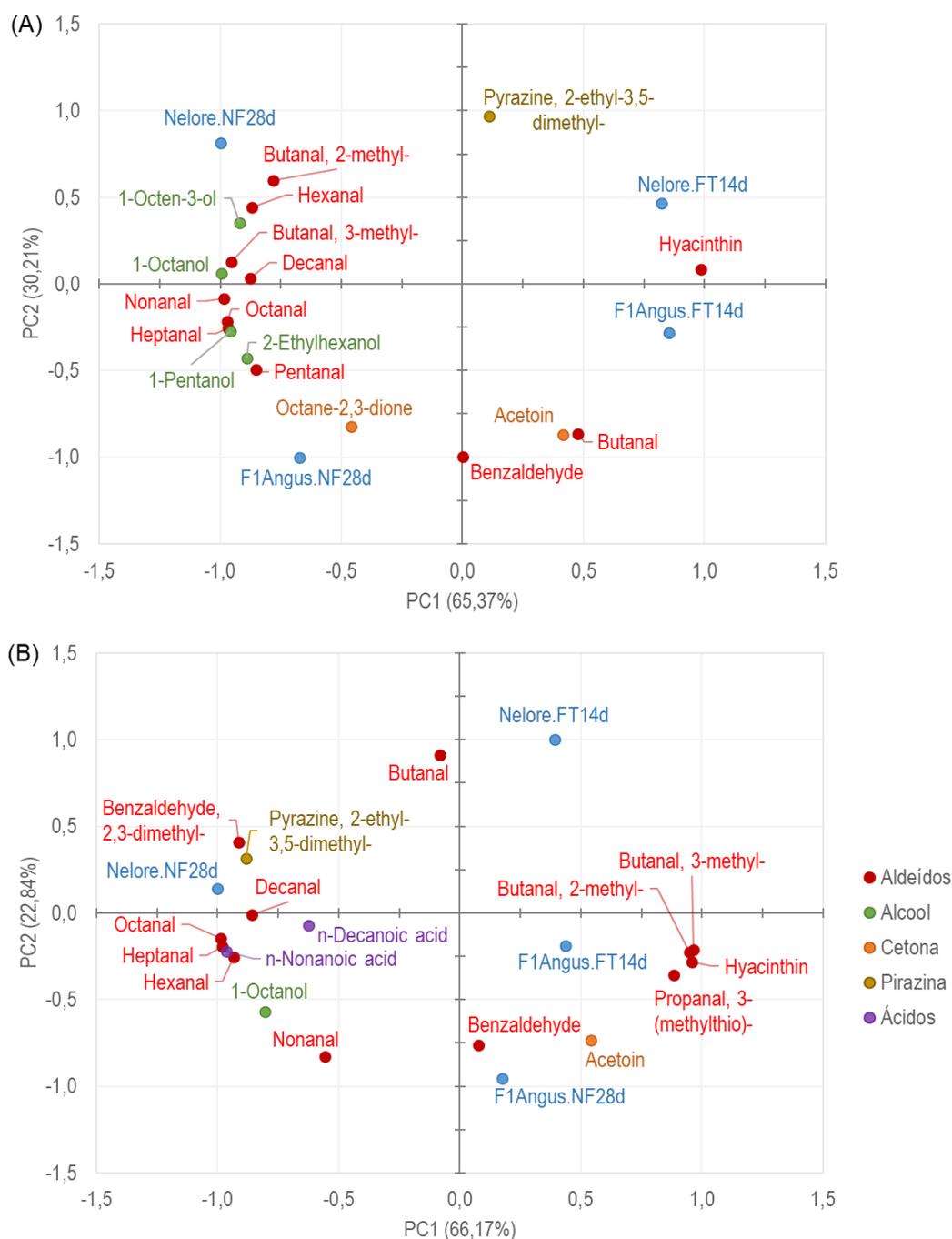


Figura 5. Análise de componentes principais (PCA) do perfil de compostos orgânicos voláteis na (A) carne e no (B) exsudato de contrafilés (*L. lumbrorum*) grelhados de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).

Bernardo et al. (2020), Haddad et al. (2022) e Guimarães et al. (2023) também verificaram diferenças do perfil de compostos voláteis de carnes de Nelores não-congeladas maturadas à seco comparadas às amostras congeladas/descongeladas e maturadas. Haddad et al. (2022) relataram que, além da acetoína, o 2-metilbutanal e 3-metilbutanal foram altamente correlacionados com carne congelada/descongelada e maturada por até 42 dias. Bernardo et al. (2020), no entanto, encontraram esses compostos na carne bovina maturada por 28 dias, submetida ou não ao processo prévio de congelamento/descongelamento. Já Guimarães et al. (2023), além do 3-metilbutanal, observaram que os compostos 1-octanol, 1-hexanol e nonanal foram mais correlacionados nas amostras congeladas/descongeladas e maturada por 14 dias do que nas não congeladas e maturadas por 28 dias. No presente trabalho, no entanto, diferentemente da cetona acetoína, os aldeídos 2-metilbutanal e 3-metilbutanal não foram relacionados ao processo acelerado.

Interessante observar que no perfil de VOC do exsudato além de diferente da carne, discriminou as amostras pelo PC1 (que explicou a maior variabilidade, 66,17%) em grupos diferentes daqueles observados no perfil da carne, com as amostras Nelore maturada no processo acelerado (FT14d) agrupada junto com as amostras de F1Angus maturadas em ambos os sistemas (Figura 5B). Além disso, esse grupo foi caracterizado pelos compostos acetoína, 3-metilbutanal, 2-metilbutanal, característicos na carne grelhada maturada à seco e em que os dois últimos foram característicos do processo convencional no perfil da carne grelhada. Em relação ao genótipo, estes foram novamente separados em dois grupos distintos como no perfil da carne, com as amostras de Nelores nos quadrantes superiores do PCA em oposição ao grupo com amostras da cruz F1Angus nos quadrantes inferiores. Neste caso, a acetoína e o benzaldeído em contraste com a pyrazine, 2-ethyl-3,5-dimethyl foram os VOC que permitiram esta discriminação, em ambos PCA (carne e exsudato): os primeiros relacionados às carnes maturada da cruz F1Angus e os demais relacionados as de Nelores.

3.4 Perfil de aminoácidos

O perfil de aminoácidos dos exsudatos obtidos das amostras maturadas à seco grelhadas é descrito na Tabela 6. Foram identificados 18 aminoácidos-padrão, além da taurina (TAU) e da hidroxiprolina (HYP), sendo que este último foi detectado apenas nos animais Nelore. A HYP é o aminoácido presente no colágeno.

Tabela 6. Perfil de aminoácidos (mg/g de proteína) de exsudatos de contrafilés (*M. L. lumborum*) grelhados de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).

Aminoácido		Nelore		F1Angus		Média	EPM
		FT14d	NF28d	FT14d	NF28d		
Ác. aspártico	ASP	30,19	24,36	32,30	28,34	28,80	1,69
Ác. glutâmico	GLU	74,21	64,62	68,82	60,73	67,10	2,89
Alanina	ALA	35,22	32,84	33,71	32,39	33,54	0,62
Arginina	ARG	21,38	18,01	22,47	20,24	20,53	0,95
Cisteína	CYS	6,29	4,24	7,02	5,40	5,74	0,60
Fenilalanina	PHE	11,32	59,32	12,64	10,80	23,52	1,94
Glicina	GLY	36,48	33,90	33,71	32,39	34,12	0,86
Hidroxiprolina	HYP	2,52	3,18	/	/	2,85	0,33
Histidina	HYS	183,65	199,15	185,39	201,08	192,32	4,53
Isoleucina	ILE	12,58	nd	12,64	10,80	12,01	0,60
Leucina	LEU	21,38	nd	23,88	20,24	21,83	1,07
Lisina	LYS	35,22	nd	39,33	33,74	36,09	1,67
Metionina	MET	7,55	5,30	8,43	6,75	7,00	0,66
Prolina	PRO	22,64	22,25	21,07	21,59	21,89	0,35
Serina	SER	16,35	13,77	16,85	16,19	15,79	0,69
Taurina	TAU	6,29	7,42	4,21	6,75	6,17	0,69
Tirosina	TYR	10,06	9,53	11,24	10,80	10,41	0,38
Treonina	THR	15,09	12,71	15,45	14,84	14,53	0,62
Triptofano	TRP	2,52	2,12	5,62	1,35	2,90	0,94
Valina	VAL	21,38	16,95	22,47	20,24	20,26	1,19

FT14d = amostras congeladas (-18 °C por 14 dias), descongeladas (4 °C por 24 h) e maturadas à seco por 14 dias; NF28d = amostras (não congeladas) maturadas por 28 dias; e EPM = erro padrão da média ($n = 12$). / = não detectado.

Um gráfico de PCA foi gerado com os aminoácidos para discriminar os tratamentos (Figura 6), sendo que o primeiro (PC1) e o segundo (PC2) componentes representaram 91,77% da variabilidade dos dados experimentais. Similarmente ao PCA do perfil de voláteis para os exsudatos (Figura 5B), o PCA para o perfil de aminoácidos agrupou as amostras F1Angus no mesmo quadrante, discriminando-as como similares, ficando, pelo PC1, a amostra Nelore FT14d agrupada a estas e a NF28d em um grupo isolado. Esta relação faz sentido uma vez que a concentração de aminoácidos livres serve como substrato para VOC por meio das reações de Maillard e degradação de Strecker (Mottram, 1998). Isto sugere que o exsudato durante o cozimento pode desempenhar um papel importante na percepção e preferência do sabor da carne pelo consumidor.

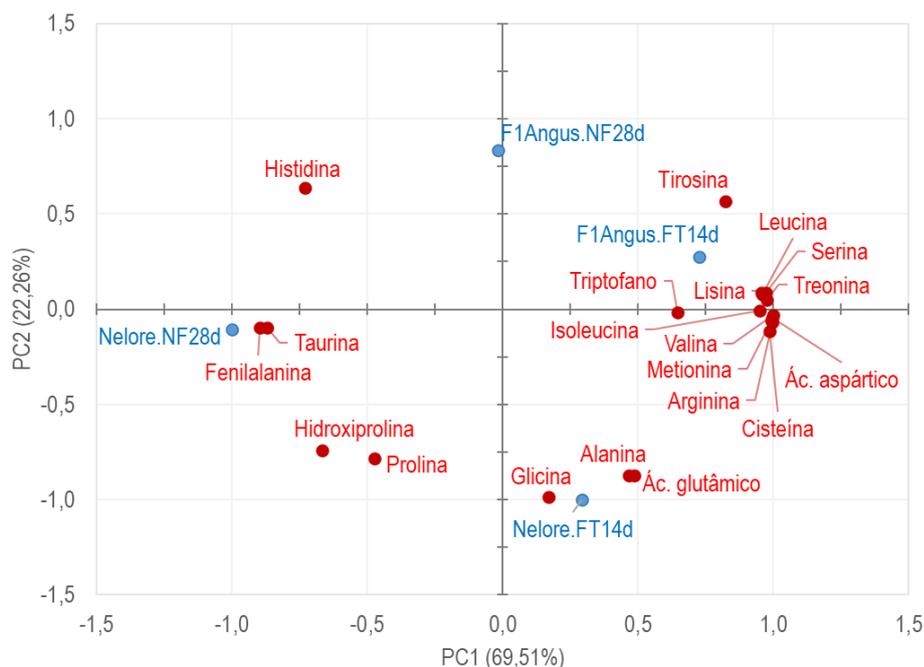


Figura 6. Análise de componentes principais (PCA) do perfil de aminoácidos no exsudato de contrafilés grelhados de animais Nelores e cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).

Ao decorrer do tempo de maturação, ocorre a decomposição química dos constituintes de proteínas e lipídios da carne pela ação de várias hidrolases, alterando o nível dos precursores de sabor e aroma (Bischof et al., 2022; Dashdorj et al., 2016). Kim et al. (2016) identificaram 32 metabólitos, entre eles, aminoácidos (alanina, leucina, glutamina, glutamato, valina, metionina, tirosina, isoleucina e fenilalanina), metabólitos conhecidos por serem altamente abundantes em carnes (creatina, carnitina, carnosina e creatinina), lactato, açúcares (glicose, glicose-1-fosfato, glicose-6-fosfato), nucleotídeos (glutaciona, inosina 5-monofosfato, guanosina 5-monofosfato). Todos estes metabólitos aprimoram o desenvolvimento do sabor isoladamente ou como precursores nas reações químicas.

No presente estudo, em um menor tempo de maturação à seco (processo acelerado) favoreceu uma maior liberação de aminoácidos no exsudato, quando comparado ao processo convencional. Iida et al. (2016) verificaram que o conteúdo de aminoácido livres aumentou ligeiramente nos primeiros 20 dias e significativamente ao decorrer da maturação à seco por 60 dias. Estes autores observaram um aumento na intensidade *umami*, induzida pelo efeito sinérgico do aminoácido ácido glutâmico (GLU) e o nucleotídeo inosina 5-monofosfato (5'-IMP), com o decorrer da maturação, sendo significativamente maiores a partir do 40º dia. Kim et al. (2017) também observaram que o tempo de maturação (20 e 40 dias) teve efeito

significativo na concentração dos aminoácidos, além do teor de ácido glutâmico (GLU) e ácido aspártico (ASP) ter sido maior em carne maturada à seco do que em amostras maturadas a vácuo, contribuindo para melhorar o sabor umami da carne.

O GLU é o principal composto associado ao sabor *umami* desejável (também referido como *meaty* em carnes), sendo encontrado em níveis significativamente mais altos em amostras maturadas à seco do que a vácuo (Kim et al., 2016; Iida et al., 2016). No entanto, segundo Wu et al. (2016), além do GLU o sabor de carne (*meaty*) está associado aos aminoácidos livres β -alanina (ALA) e glicina (GLI). No presente experimento, estes três aminoácidos foram altamente relacionados às amostras Nelore FT14d (Figura 6). Pelo PC1, as amostras de F1Angus se diferenciam das Nelore NF28d também pela relação com estes aminoácidos.

De forma geral, o PC2 separou as raças em dois grupos distintos, os animais Nelores, localizado na parte inferior do PCA, e os animais F1Angus no quadrante superior, sendo estes últimos discriminados por uma maior relação de aminoácidos, em especial LEU e ILE. Isto está de acordo com a maior relação dos VOC 2-metilbutanal e 3-metilbutanal, característicos de carnes maturadas à seco, observada nos exsudatos das carnes grelhadas de animais F1Angus (Figura 5B), uma vez que estes aminoácidos são precursores destes compostos pela reação de Strecker, conforme anteriormente discutido. Interessante observar que também pelo PC2, as amostras Nelore FT14d foram mais relacionadas aos aminoácidos (GLU, ALA e GLI) associados ao sabor *umami* desejável do que as Nelore NF28d, evidenciando as diferenças oriundas do sistema de maturação.

3.5 Perfil sensorial e aceitabilidade

Para o teste sensorial descritivo, um gráfico de análise de correspondência (CA) foi gerado com todas as características do teste CATA a partir da tabela de contingência (Figura 7). O primeiro (PC1) e o segundo (PC2) componentes do gráfico de CA representaram 92,16% da variabilidade dos dados experimentais.

Das 21 características (com maior do que 10% de citação pelos consumidores) avaliadas no CATA, 11 não contribuíram ($P \geq 0.05$) para a discriminação das amostras pelo teste *Q de Cochran*: aparência “uniforme”, “grelhado/churrasco” e “fibras aparente”; aroma “grelhado/churrasco”, “adocicado/caramelizado”, “gorduroso/amanteigado” e “amadeirado”; sabor/gosto “grelhado/churrasco”, “adocicado/caramelizado” e “defumado”; e textura “fibrada”. Isto demonstra o potencial do processo acelerado para redução do tempo de maturação à seco, por não ocasionar grandes impactos nesses atributos sensoriais.

Pelo teste de aceitação, todos os atributos avaliados foram sensorialmente bem aceitos pelos consumidores (Tabela 7), com notas entre “gostei moderadamente” (7) e “gostei muito” (8), exceto para a aparência da carne de Nelore (notas 6). As amostras apresentaram diferenças significativas ($P < 0.05$) apenas nos escores hedônicos para aparência, textura e aspecto global.

Tabela 7. Pontuações (médias \pm desvio-padrão) do teste de aceitação de contrafilés (*M. L. lumborum*) grelhados de animais Nelores cruzas F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturados à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).

Raça	Maturação	Aparência	Aroma	Sabor	Textura	Aspecto Global
F1Angus	FT14d	7,38 \pm 1,32 ^a	7,22 \pm 1,53	7,72 \pm 1,13	7,85 \pm 1,40 ^a	7,76 \pm 1,19 ^a
	NF28d	7,15 \pm 1,47 ^{ab}	7,27 \pm 1,33	7,67 \pm 1,22	7,92 \pm 1,15 ^a	7,64 \pm 1,13 ^a
Nelore	FT14d	6,72 \pm 1,62 ^c	7,45 \pm 1,36	7,69 \pm 1,25	7,35 \pm 1,27 ^b	7,48 \pm 1,17 ^{ab}
	NF28d	6,86 \pm 1,34 ^{bc}	7,45 \pm 1,21	7,39 \pm 1,37	7,09 \pm 1,63 ^b	7,29 \pm 1,22 ^b
Média		7,03 \pm 1,36	7,35 \pm 1,25	7,62 \pm 1,41	7,55 \pm 1,19	7,54 \pm 1,46

FT14d = amostras congeladas (-18 °C por 14 dias), descongeladas (4 °C por 24 h) e maturadas à seco por 14 dias; e NF28d = amostras (não congeladas) maturadas por 28 dias.

¹Pontuações em uma escala de 9 pontos (1 – desgostei extremamente a 9 – gostei extremamente).

^{a-c}Médias seguidas por letras diferentes, na coluna, diferem ($P < 0,05$) pelo teste de Tukey.

Em relação à aparência, não houve diferença ($P > 0.05$) na aceitação entre as amostras maturadas FT14d e NF28d dentro de cada raça (Nelore e da F1Angus). No entanto, as amostras de Nelore foram menos preferidas ($P < 0.05$) do que as de F1Angus na maturação acelerada (FT14d), enquanto esta diferença não foi significativa na maturação convencional (NF28d). Isto pode ser justificado, por aquelas terem sido caracterizadas no CATA como de aparência pálida pelos consumidores (Figura 7). Já para a textura, não foi verificada diferença ($P > 0.05$) na aceitação entre os sistemas de maturação; maiores notas foram ($P < 0.05$) atribuídas à carne da cruzada F1Angus do que as de Nelore, também corroborando a descrição no CATA pelos consumidores como amostras “macias” e “suculentas” (Figura 7).

Por fim, para o aspecto global, verificou-se comportamento similar ($P > 0.05$) aos atributos anteriores entre os tratamentos FT14d e NF28d para ambas as raças, mas as amostras FT14d da raça Nelore obtiveram notas iguais ($P > 0.05$) às da cruzada F1Angus (FT14d e NF28d). Isto comprova o potencial de uso do processo acelerado, que além de permitir uma redução do tempo de maturação, não alterou a aceitabilidade em relação a todos os atributos

sensoriais quando comparado ao processo convencional. Ainda, permitiu aprimorar das características sensoriais (maiores notas de aceitação global) de carnes de animais com menores teores de marmoreio (Nelores), aproximando-as daquelas com maior qualidade.

3.5.1 Análise fatorial múltipla

As coordenadas, respectivas contribuições e cossenos quadrados dos grupos de variáveis (aminoácidos, VOC e os testes sensoriais descritivo CATA e aceitação global) das duas primeiras dimensões do MFA são apresentados na Tabela 8. O primeiro autovalor do MFA foi de 3,41, sendo muito próximo do máximo autovalor que poderia ser alcançado (4,00). O segundo autovalor do MFA foi de 1,32. As coordenadas dos quatro conjuntos de dados foram altamente relacionadas a dimensão D1, e com uma contribuição similar para a formação das dimensões D1 (20,36 – 28,76%) e D2 (31,58 – 34,88%), exceto a aceitação global para D2 (0,50%).

Tabela 8. Coordenadas, contribuições dos fatores (%) e valores do cosseno ao quadrado (\cos^2) dos grupos de variáveis pela Análise Fatorial Múltipla (MFA).

Conjunto de dados ativos	Coordenadas		Contribuições (%)		\cos^2	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
Aminoácidos (AA)	0,87	0,43	25,68	33,04	0,68	0,17
Compostos Voláteis (VOC)	0,86	0,42	25,20	31,58	0,64	0,15
CATA	0,70	0,46	20,36	34,88	0,46	0,20
Aceitação global (AG)	0,98	0,007	28,76	0,50	0,96	0,00

Na análise global das variáveis aminoácidos, VOC, e dos testes sensoriais descritivo CATA e aceitação global pelo MFA, a primeira (D1) e segunda (D2) dimensões representaram 90,60% da variância total dos dados experimentais (Figura 8). Considerando as duas dimensões, observa-se a formação de quatro grupos com cada tratamento localizado em um quadrante diferente (Figura 8A). Em geral, as amostras F1Angus (FT14d e NF28d) foram avaliadas pelos consumidores como tendo os descritores sensoriais de aparência “amarronzada”, “úmida” e “rosada no centro”, aroma “adocicado/caramelizado” e “gorduroso/amanteigado”, sabor “gorduroso/amanteigado” e textura “macia” e “suculenta”.

A percepção sensorial destas características parece ser devido ao fato de estar associadas a presença dos aminoácidos cisteína (CYS), tirosina (TYR), arginina (ARG), isoleucina (ILE), metionina (MET), valina (VAL), leucina (LEU), ácido aspártico (ASP), treonina (THR), serina (SER) e lisina (LSY) e dos VOC 3-methylthiopropional (Ad12), 2-methylbutanal (Ad5), 3-methylbutanal (Ad6), benzaldehyde (Ad1), hiacitina (Ad3) e acetoína (Ke) (Figura 8B) mensurados no exsudato da carne grelhada. Assim, este perfil de composto contribuiu para que essas amostras fossem altamente correlacionadas com a aceitação global (AG).

Dos VOC relacionados às carnes F1Angus, a acetona acetoína e os aldeídos 2-metilbutanal e 3-metilbutanal parecem ter uma contribuição importante quanto ao sabor e aroma destas carnes, uma vez que são altamente correlacionados com sabores grelhados, amanteigados e de nozes em carnes maturadas à seco (O'Quinn et al., 2016). Da mesma forma, a relação destas carnes com os aminoácidos ILE, LEU e PHE tem importância, uma vez 2-metilbutanal e 3-metilbutanal são produtos da reação de Strecker destes (Watanabe et al., 2015). Portanto, as diferenças no teor destes aldeídos e aminoácidos no exsudato de carnes de animais de diferentes graus de marmoreio e maturadas em diferentes sistemas podem desempenhar um papel importante na criação de um aroma característico.

Outra característica que pode ter contribuído pela preferência das carnes maturadas de F1Angus em ambos os sistemas é o teor de gordura de marmoreio, maior nestas amostras (Tabela 2). Segundo Dashdorj et al. (2016), a gordura de marmoreio agrega sabor, uma vez que, quando a carne é grelhada a gordura se funde na carne e a torna macia e succulenta, com um sabor característico de amanteigado. Sabor e aroma “gorduroso/amanteigado” foram atribuídas à estas carnes. Além disso, as carnes de F1Angus maturadas foram mais relacionadas à presença de ácidos graxos insaturados (UFA), especialmente os poli-insaturados (PUFA) (Figura 4). Segundo O'Quinn et al. (2016), além do aumento do teor de gordura de marmoreio estar positivamente correlacionado com o sabor, a concentração total de MUFA, principalmente o ácido oleico (C18:1n9), foi correlacionada com as intensidades de sabores *meaty*, dourado/grelhado, amanteigado/gorduroso, nozes e doces. Ainda segundo estes autores, o aumento da concentração do ácido graxo saturado (SFA) esteárico (C16:0) foi associado a sabores mais intensos de sangue/metálico, peixe, semelhante a grama/feno, azedo e amargo. No presente trabalho, as carnes de Nelore NF28d tiveram maior relação com SFA e C16:0, mas também foram as mais relacionadas aos MUFA e C18:1n9. Estas diferenças nos ácidos graxos entre os tratamentos não foram, no entanto, discrepantes em termos absolutos (Tabela 4).

Em relação às amostras de Nelore, estas claramente foram mais afetadas pelo sistema de maturação. As amostras FT14d destes animais foram descritas pelos consumidores como tendo um aroma “defumado” e sabor “adocicado/caramelizado” e “defumado”, estando associados principalmente aos aminoácidos GLU, ALA e GLY e ao VOC butanal (Ad4). A relação com estes aminoácidos, conforme discutido anteriormente, é interessante por estarem associados ao sabor *meaty* da carne. O GLU é o principal aminoácido associado ao gosto *umami* (Kim et al., 2016; Iida et al., 2016), enquanto os aminoácidos ALA e GLI estão associados ao sabor doce (Kim et al., 2016). Segundo Iida et al. (2016), em carnes com alto teor de marmoreio (gado japonês; *Wagyu*), a intensidade *umami* (induzida pelo efeito sinérgico dos compostos GLU e 5'-IMP) e de sabor aumentam a partir do 40º dia de maturação a seco, sendo este o menor tempo considerados por estes autores para a duração da maturação à seco nestas carnes. Isto pode explicar por que o aminoácido GLU não foi fortemente relacionado às amostras F1Angus, mas reforça a observação de que para carnes menos marmorizadas, como a de Nelores, o processo de maturação acelerado permite aprimorar as suas características sensoriais.

Por fim, as amostras de Nelores maturadas no processo convencional (NF28d) foram associadas principalmente aos descritores aparência, aroma e sabor de “grelhado/churrasco”, além da textura “firme”. A percepção sensorial destas características parece estar associada principalmente aos aminoácidos fenilalanina (PHE) e taurina (TAU) e dos VOC hexanal (Ad9), heptanal (Ad8), octanal (Ad11), nonanal (Ad10), benzaldehyde-2,3-dimethyl (Ad2), decanal (Ad7), nonanoic acid (Ac2), decanoic acid (Ac1), 1-octanol (Al) e pyrazine-2-ethyl-3,5-dimethyl (Py). Em temperaturas mais altas, os produtos da reação de Maillard, como as pirazinas, são importantes para desenvolver o sabor torrado e nozes (Ha et al., 2019; Watanabe et al., 2015), de forma que neste trabalho os consumidores possam ter identificado o sabor e aroma torrado como sendo “grelhado/churrasco”.

Uma característica marcante das amostras de Nelore (FT14d 4 NF28d) é a relação com compostos ácidos e com os aldeídos mais relacionados com a oxidação lipídica do que as amostras F1Angus. O hexanal é formado a partir da oxidação/degradação de ácido graxo linoleico (C18:2n-6), enquanto o heptanal, octanal e nonanal são derivados do oleico (C18:1n-9) (Van Ba et al., 2012; Domínguez et al., 2019). No entanto, apesar dos aldeídos serem importantes compostos de sabor, estes possuem baixo limiar de detecção de aroma e sabor, sendo a importância de cada composto nos atributos sensoriais dependente da concentração e do limiar de percepção sensorial de cada indivíduo. Por exemplo, o hexanal pode promover notas de sabores desejáveis, mas ao mesmo tempo, pode produzir sabores indesejáveis em

concentrações mais altas; já o octanal e o nonanal, com notas de aroma agradáveis (gorduroso, doce, verde, oleoso), são importantes para os sabores da carne cozida (Van Ba et al., 2012; Ha et al., 2019).

É importante ressaltar que os consumidores que participaram da análise sensorial neste experimento não foram treinados, não estando acostumados com a descrição das principais características atribuídas na literatura à carne maturada à seco. Além disso, no Brasil a carne maturada à seco ainda é uma iguaria pouco difundida, e a maioria dos consumidores não estavam acostumados com carnes com perfis de sabor tão ricos. No entanto, o objetivo da análise CATA foi justamente descrever o que estes consumidores percebem e como esta percepção influencia na aceitação das carnes; mais ainda, tinha-se o intuito de observar se as diferenças induzidas pelos tratamentos eram perceptíveis na descrição e aceitação de consumidores em potencial.

De forma geral, a análise de MFA corrobora que o processo acelerado pode contribuir com o perfil sensorial de carnes de animais com baixo teor de marmoreio (animais Nelore) de forma a aproximá-las daquelas com maior qualidade (cruzas F1Angus). Isto é claramente observado no centróide que representa as coordenadas resultantes do MFA (Figura 9). Os pontos conectados ao centróide representam as coordenadas das projeções de cada grupo de variáveis formadas pelo PCA de aminoácidos e VOC dos exsudatos de carne e da análise de correspondência (CA) do teste descritivo CATA e da aceitação global (AG). Quanto mais próximas essas projeções do PCA e CA estiverem do centróide, maior será a semelhança entre as descrições obtidas pelo PCA e CA e pelo MFA (Pagés & Husson, 2005).

Observa-se na Figura 9 que os grupos de variáveis tiveram diferentes influências nas amostras. O coeficiente de RV (um análogo multivariado do coeficiente de correlação em MFA) entre os aminoácidos e VOC (0,92), foi maior que os coeficientes de RV entre os aminoácidos e CATA (0,56) ou entre VOC e CATA (0,57). Coeficientes de RV intermediários a estes foram observados entre a aceitação e os aminoácidos (0,79), os VOC (0,71) e o CATA (0,76).

A maior diferença entre as descrições do MFA e PCA/CA foi encontrada quando as amostras foram descritas com base na análise descritiva CATA, principalmente, para as amostras Nelore maturadas em ambos os sistemas (FT14d e NF28d). As amostras Nelore maturadas no processo convencional (NF28d) estão bem separadas das amostras F1Angus, sendo as que mais se diferenciam, em função dos perfis químicos (AA e VOC) e sensoriais (CATA e AG); já as amostras Nelore no processo acelerado (FT14d), se aproximam das F1Angus pelos perfis químicos e pela aceitação global.

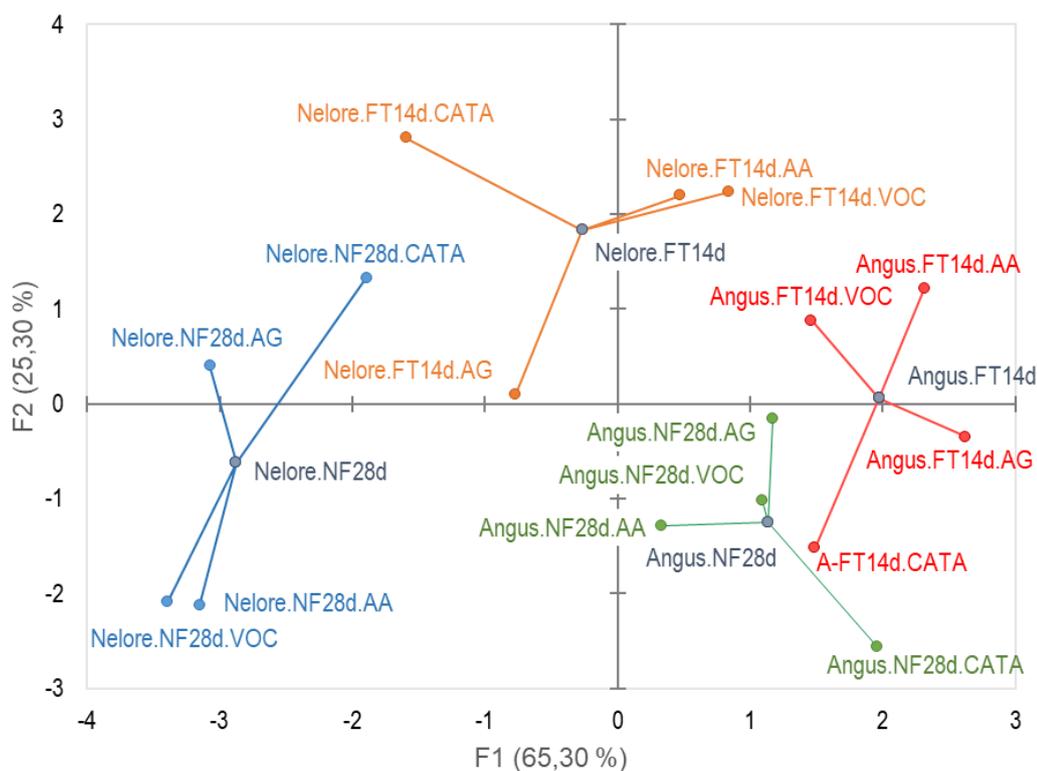


Figura 9. Representação das coordenadas dos pontos projetados dos grupos de variáveis do MFA global para as carnes da raça Nelore e F1 Angus x Nelore (F1Angus) maturadas à seco, nos processos acelerado (FT14d) e convencional (NF28d).

Legenda: FT14d = amostras congeladas (-18 °C por 14 dias), descongeladas (4 °C por 24 h) e maturadas por 14 dias; NF28d = amostras (não congeladas) maturadas por 28 dias; VOC = compostos orgânicos voláteis; AA = aminoácidos; AG = aceitação global; CATA = teste *check-all-that-apply*.

4 CONCLUSÃO

De forma geral, as perdas de massa e as características físico-químicas dos tratamentos (genótipo e sistema de maturação) foram similares, mas a atividade proteolítica e maciez foram maiores no processo de maturação à seco acelerado (congelamento/descongelamento maturado por 14 dias) do que no convencional (não-congelado maturado por 28 dias). No entanto, o processo acelerado influenciou mais as características da carne de animais com menor teor de marmoreio (Nelore) do que as carnes de cruzas F1Angus. Na carne de Nelores, o processo acelerado favoreceu a concentração de ácidos graxos insaturados e a liberação de uma maior variedade de aminoácidos livres e de compostos voláteis característicos da maturação à seco no exsudato da carne grelhada do que no processo convencional.

Os perfis sensoriais das carnes maturadas à seco foram distintos para os diferentes tratamentos, mas o genótipo foi um fator limitante para discriminar as amostras, principalmente em relação aos atributos de textura e aparência. A aceitação das amostras não

foi afetada pelo sistema de maturação dentro de cada genótipo, mas carnes da raça Nelore maturadas pelo processo acelerado tiveram a mesma aceitação quanto ao aspecto global do que carnes das cruzas F1Angus de maturação acelerada e convencional. Além disso, os perfis sensoriais descritivos destas carnes foram mais próximos do que as carnes de Nelore maturadas no processo convencional.

Concluiu-se que os perfis químicos e sensoriais foram afetados tanto pelo sistema de maturação à seco quanto pelo genótipo e características da carne utilizada. A maturação acelerada pelo congelamento/descongelamento prévios é um processo viável que permite a redução do tempo de maturação a seco, sem acarretar diferenças na qualidade da carne de animais com alto teor de marmoreio. Além disso, o processo acelerado permite o aprimoramento das características sensoriais de carnes com menor teor de marmoreio, como as de zebu, sendo uma alternativa viável e competitiva para comercialização da carne destes animais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; 430206/2016-0) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG; CVZ APQ 02904-17) pelo apoio financeiro e ao CNPq pela bolsa de doutorado concedida a primeira autora. Os autores também agradecem à Central de Análise e Prospecção Química da Universidade Federal de Lavras (UFLA) pelo fornecimento de equipamentos e suporte técnico para experimentos envolvendo análises cromatográficas.

REFERÊNCIAS

- ABCZ (2023). Brazilian livestock (in Portuguese). Uberaba, MG: Associação Brasileira dos Criadores de Zebu.
- Ares, G., Deliza, R., Barreiro, C., Giménez, A. & Gámbaro, A. (2010). Comparison of two sensory profiling techniques based on consumer perception. *Food Quality and Preference*, 21, 417-426. doi: 10.1016/j.foodqual.2009.10.006.
- Aroeira, C. N., Torres Filho, R. A., Fontes, P. R., Gomide, L. A. M., Ramos, A. L. S., Ladeira, M. M. & Ramos, E. M. (2016). Freezing, thawing and aging effects on beef tenderness from *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle. *Meat Science*, 116, 118-125. doi: 10.1016/j.meatsci.2016.02.006.
- Aroeira, C. N., Torres Filho, R. A., Fontes, P. R., Ramos, A. L. S., Contreras Castillo, C. J., Hopkins, D. L. & Ramos, E. M. (2020). Comparison of different methods for

- determining the extent of myofibrillar fragmentation of chilled and frozen/thawed beef across postmortem aging periods. *Meat Science*, *160*, 107955. doi: 10.1016/j.meatsci.2019.107955.
- Barcellos, V. C., Mottin, C., Passetti, R. A. C., Guerrero, A., Eiras, C. E., Prohman, P. E., Vital, A. C. P. & Prado, I. N. d. (2017). Carcass characteristics and sensorial evaluation of meat from Nellore steers and crossbred Angus vs. Nellore bulls. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, *39*. doi: 10.4025/actascianimsci.v39i4.36692.
- Berger, J., Kim, Y. H. B., Legako, J. F., Martini, S., Lee, J., Ebner, P. & Zuelly, S. M. S. (2018). Dry-aging improves meat quality attributes of grass-fed beef loins. *Meat Science*, *145*, 285-291. doi: 10.1016/j.meatsci.2018.07.004.
- Bernardo, A. P. d. S., Silva, A. C. M., Francisco, V. C., Ribeiro, F. A., Nassu, R. T., Calkins, C. R., Nascimento, M. d. S. & Pflanzler, S. B. (2020). Effects of freezing and thawing on microbiological and physical-chemical properties of dry-aged beef. *Meat Science*, *161*, 108003. doi: 10.1016/j.meatsci.2019.108003.
- Bischof, G., Witte, F., Terjung, N., Januschewski, E., Heinz, V., Juadjur, A. & Gibis, M. (2022). Effect of sampling position in fresh, dry-aged and wet-aged beef from M. Longissimus dorsi of Simmental cattle analyzed by ¹H NMR spectroscopy. *Food Research International*, *156*, 111334. doi: 10.1016/j.foodres.2022.111334.
- Campbell, R. E., Hunt, M. C., Levis, P. & Chambers, E. (2001). Dry-aging effects on palatability of beef longissimus muscle. *Journal of Food Science*, *66*, 196-199. doi: 10.1111/j.1365-2621.2001.tb11315.x.
- Dashdorj, D., Tripathi, V. K., Cho, S., Kim, Y. & Hwang, I. (2016). Dry aging of beef; Review. *Journal of animal science and technology*, *58*, 20-20. doi: 10.1186/s40781-016-0101-9.
- del Olmo, A., Calzada, J. & Nuñez, M. (2013). Lipolysis, Lipid Peroxidation, and Color Characteristics of Serrano Hams from Duroc and Large White Pigs during Dry-Curing. *Journal of Food Science*, *78*, C1659-C1664. doi: 10.1111/1750-3841.12281.
- Destefanis, G., Brugiapaglia, A., Barge, M. T. & Dal Molin, E. (2008). Relationship between beef consumer tenderness perception and Warner-Bratzler shear force. *Meat Science*, *78*, 153-156. doi: 10.1016/j.meatsci.2007.05.031.
- Domínguez, R., Pateiro, M., Gagaoua, M., Barba, F. J., Zhang, W. & Lorenzo, J. M. (2019). A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products. *Antioxidants (Basel)*, *8*. doi: 10.3390/antiox8100429.

- Folch, J., Lees, M. & Sloane Stanley, G. H. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *Journal of Biological Chemistry*, 226, 497-509. doi.
- Gardner, K. & Legako, J. F. (2018). Volatile flavor compounds vary by beef product type and degree of doneness. *Journal of Animal Science*, 96, 4238-4250. doi: 10.1093/jas/sky287.
- Gredell, D., McHenry, J., Woerner, D., Legako, J., Engle, T., Brooks, J., Tatum, J. & Belk, K. (2018). Palatability Characterization of Fresh and Dry-Aged Ground Beef Patties. *Meat and Muscle Biology*, 2, 265-276. doi: 10.22175/mmb2018.04.0007.
- Guimarães, A. S., Guimarães, J. S., Rodrigues, L. M., Fontes, P. R., Ramos, A. d. L. S. & Ramos, E. M. (2022). Assessment of Japanese radish derivatives as nitrite substitute on the physicochemical properties, sensorial profile, and consumer acceptability of restructured cooked hams. *Meat Science*, 192, 108897. doi: 10.1016/j.meatsci.2022.108897.
- Guimarães, A. S., Haddad, G. B. S., Guimarães, J. S., Torres Filho, R. A., Fontes, P. R., Ramos, A. L. S. & Ramos, E. M. (2023). Effects of accelerated aging by the freezing/thawing process on the quality of Nellore wet- and dry-aged beef. *Meat Science (submitted for publication)* doi.
- Ha, M., McGilchrist, P., Polkinghorne, R., Huynh, L., Galletly, J., Kobayashi, K., Nishimura, T., Bonney, S., Kelman, K. R. & Warner, R. D. (2019). Effects of different ageing methods on colour, yield, oxidation and sensory qualities of Australian beef loins consumed in Australia and Japan. *Food Research International*, 125, 108528. doi: 10.1016/j.foodres.2019.108528.
- Haddad, G. B. S., Gomes, H. B., Buchili, A. F. M., Rodrigues, L. M., Fontes, P. R., Ramos, A. L. & Ramos, E. M. (2022). Accelerating the dry aging of bone-in beef from Nellore cattle by the freeze/thaw process. *Journal of Food Processing and Preservation*, e16573. doi: 10.1111/jfpp.16573.
- Hagen, S. R., Frost, B. & Augustin, J. (2020). Precolumn Phenylisothiocyanate Derivatization and Liquid Chromatography of Amino Acids in Food. *Journal of Association of Official Analytical Chemists*, 72, 912-916. doi: 10.1093/jaoac/72.6.912.
- Hartman, L. & Lago, R. C. (1973). Rapid preparation of fatty acid methyl esters from lipids. *Laboratory Practice*, 22, 475-476. doi.
- Huff-Lonergan, E., Mitsuhashi, T., Beekman, D. D., Parrish, F. C., Jr., Olson, D. G. & Robson, R. M. (1996). Proteolysis of specific muscle structural proteins by μ -calpain

- at low pH and temperature is similar to degradation in postmortem bovine muscle. *Journal of Animal Science*, 74, 993-1008. doi: 10.2527/1996.745993x.
- Iida, F., Miyazaki, Y., Tsuyuki, R., Kato, K., Egusa, A., Ogoshi, H. & Nishimura, T. (2016). Changes in taste compounds, breaking properties, and sensory attributes during dry aging of beef from Japanese black cattle. *Meat Science*, 112, 46-51. doi: 10.1016/j.meatsci.2015.10.015.
- Kim, J. H., Jeon, M. Y. & Lee, C. H. (2019). Physicochemical and sensory characteristics of commercial, frozen, dry, and wet-aged Hanwoo sirloins. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 32, 1621-1629. doi: 10.5713/ajas.18.0610.
- Kim, J. H., Kim, D. H., Ji, D. S., Lee, H. J., Yoon, D. K. & Lee, C. H. (2017). Effect of aging process and time on physicochemical and sensory evaluation of raw beef top round and shank muscles using an electronic tongue. *Korean J Food Sci Anim Resour*, 37, 823-832. doi: 10.5851/kosfa.2017.37.6.823.
- Kim, Y. H. B., Kemp, R. & Samuelsson, L. M. (2016). Effects of dry-aging on meat quality attributes and metabolite profiles of beef loins. *Meat Science*, 111, 168-176. doi: 10.1016/j.meatsci.2015.09.008.
- Koohmaraie, M. & Geesink, G. H. (2006). Contribution of postmortem muscle biochemistry to the delivery of consistent meat quality with particular focus on the calpain system. *Meat Science*, 74, 34-43. doi: 10.1016/j.meatsci.2006.04.025.
- Laster, M. A., Smith, R. D., Nicholson, K. L., Nicholson, J. D. W., Miller, R. K., Griffin, D. B., Harris, K. B. & Savell, J. W. (2008). Dry versus wet aging of beef: Retail cutting yields and consumer sensory attribute evaluations of steaks from ribeyes, strip loins, and top sirloins from two quality grade groups. *Meat Science*, 80, 795-804. doi: 10.1016/j.meatsci.2008.03.024.
- Li, P., Wang, T., Mao, Y., Zhang, Y., Niu, L., Liang, R., Zhu, L. & Luo, X. (2014). Effect of ultimate pH on postmortem myofibrillar protein degradation and meat quality characteristics of Chinese Yellow crossbreed cattle. *The Scientific World Journal*, 2014, 174253. doi: 10.1155/2014/174253.
- Lucas, B. & Sotelo, A. (1980). Effect of different alkalies, temperature, and hydrolysis times on tryptophan determination of pure proteins and of foods. *Analytical Biochemistry*, 109, 192-197. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0003-2697\(80\)90028-7](http://dx.doi.org/10.1016/0003-2697(80)90028-7).
- Meilgaard, M., Civille, G. V. & Carr, B. T. (1999). *Sensory evaluation techniques* Pp. 387.

- Meyners, M., Castura, J. C. & Carr, B. T. (2013). Existing and new approaches for the analysis of CATA data. *Food Quality and Preference*, 30, 309-319. doi: 10.1016/j.foodqual.2013.06.010.
- Mottram, D. S. (1998). Flavour formation in meat and meat products: a review. *Food Chemistry*, 62, 415-424. doi: 10.1016/S0308-8146(98)00076-4.
- O'Quinn, T. G., Woerner, D. R., Engle, T. E., Chapman, P. L., Legako, J. F., Brooks, J. C., Belk, K. E. & Tatum, J. D. (2016). Identifying consumer preferences for specific beef flavor characteristics in relation to cattle production and postmortem processing parameters. *Meat Science*, 112, 90-102. doi: 10.1016/j.meatsci.2015.11.001.
- Pagés, J. & Husson, F. (2005). Multiple factor analysis with confidence ellipses: a methodology to study the relationships between sensory and instrumental data. *Journal of Chemometrics*, 19, 138-144. doi: 10.1002/cem.916.
- 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*, 37, 1309-1313. doi: 10.1021/jf00089a022.
- Ramos, E. M. & Gomide, L. A. M. (2017). *Meat quality assessment: fundamentals and methodologies (in portuguese)*. Viçosa, MG, Brazil, Editora UFV.
- Rezende-de-Souza, J. H., Cardello, F. A. B., de Paula, A. P. M., Ribeiro, F. A., Calkins, C. R. & Pflanzler, S. B. (2021). Profile of Producers and Production of Dry-Aged Beef in Brazil. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10. doi: 10.3390/foods10102447.
- Rodrigues, J. F., Mangia, B. A., e Silva, J. G., Lacorte, G. A., Coimbra, L. O., Esmerino, E. A., Freitas, M. Q., Pinheiro, A. C. M. & da Cruz, A. G. (2020). Sorting task as a tool to elucidate the sensory patterns of artisanal cheeses. *Journal of Sensory Studies*, 35, e12562. doi: 10.1111/joss.12562.
- Rodrigues, L. M., Guimarães, A. S., Ramos, J. L., Fontes, P. R., Ramos, A. L. S. & Ramos, E. M. R. (2022). Application of gamma radiation in the beef texture development during accelerated aging. *Journal of Texture Studies*, 53, 923-934. doi: 10.1111/jtxs.12714.
- Sales, L. A., Rodrigues, L. M., Silva, D. R. G., Fontes, P. R., Torres Filho, R. A., Ramos, A. L. S. & Ramos, E. M. R. (2020). Effects of freezing/irradiation/thawing processes and subsequent aging on tenderness, color and oxidative properties of beef. *Meat Science*, 163, 108078. doi: 10.1016/j.meatsci.2020.108078.
- Savell, J. W. (2008). *Dry-aging of Beef*. Pp. 12. Cattlemen's Beef Board and National Cattlemen's Beef Association. .

- Silva, D. R. G., Torres Filho, R. A., Cazedey, H. P., Fontes, P. R., Ramos, A. L. S. & Ramos, E. M. (2015). Comparison of Warner–Bratzler shear force values between round and square cross-section cores from cooked beef and pork Longissimus muscle. *Meat Science*, *103*, 1-6. doi: 10.1016/j.meatsci.2014.12.009.
- Smith, R. D., Nicholson, K. L., Nicholson, J. D. W., Harris, K. B., Miller, R. K., Griffin, D. B. & Savell, J. W. (2008). Dry versus wet aging of beef: Retail cutting yields and consumer palatability evaluations of steaks from US Choice and US Select short loins. *Meat Science*, *79*, 631-639. doi: 10.1016/j.meatsci.2007.10.028.
- USDA (2017). United States Standards for Grades of Carcass Beef. In: Livestock, Poultry, and Seed Program. Pp. 8. United States Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service.
- USMEF (2020). Guidelines for U.S. dry aged beef for international markets. Meat Export Federation of USA.
- Utama, D. T., Kim, Y. J., Jeong, H. S., Kim, J., Barido, F. H. & Lee, S. K. (2020). Comparison of meat quality, fatty acid composition and aroma volatiles of dry-aged beef from Hanwoo cows slaughtered at 60 or 80 months old. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, *33*, 157-165. doi: 10.5713/ajas.19.0205.
- Van Ba, H., Hwang, I., Jeong, D. & Touseef, A. (2012). *Principle of meat aroma flavors and future prospect*. In: Latest Research into Quality Control (edited by AKYAR, I.). December, 12th: IntechOpen.
- Watanabe, A., Kamada, G., Imanari, M., Shiba, N., Yonai, M. & Muramoto, T. (2015). Effect of aging on volatile compounds in cooked beef. *Meat Science*, *107*, 12-9. doi: 10.1016/j.meatsci.2015.04.004.
- Wood, J. D., Richardson, R. I., Nute, G. R., Fisher, A. V., Campo, M. M., Kasapidou, E., Sheard, P. R. & Enser, M. (2004). Effects of fatty acids on meat quality: a review. *Meat Science*, *66*, 21-32. doi: 10.1016/S0309-1740(03)00022-6.
- Wu, G., Cross, H. R., Gehring, K. B., Savell, J. W., Arnold, A. N. & McNeill, S. H. (2016). Composition of free and peptide-bound amino acids in beef chuck, loin, and round cuts1,2. *Journal of Animal Science*, *94*, 2603-2613. doi: 10.2527/jas.2016-0478.