

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

EMANUEL MANICA

**Impacto das ondas de calor sobre a produção de leite e respostas  
termorregulatórias de vacas Holandesas**

---

Pirassununga

2022

EMANUEL MANICA

**Impacto das ondas de calor sobre a produção de leite e respostas termorregulatórias de vacas Holandesas**

**Versão Corrigida**

Tese apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências do programa de pós-graduação em Zootecnia.

Área de Concentração: Qualidade e produtividade animal

Orientador: Profa. Dra. Luciane Silva Martello

Ficha catalográfica elaborada pelo  
Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M278i      Manica, Emanuel  
             Impacto das ondas de calor sobre a produção de  
             leite e respostas termorregulatórias de vacas  
             Holandesas. / Emanuel Manica ; orientador Luciane  
             Silva Martello. -- Pirassununga, 2022.  
             97 f.

             Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em  
             Zootecnia) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia  
             de Alimentos, Universidade de São Paulo.

             1. Estresse térmico. 2. Índices de mudança  
             climática. 3. Frequência respiratória. 4.  
             Temperatura retal. 5. Produção de leite. I. Silva  
             Martello, Luciane, orient. II. Título.



## CERTIFICADO

Certificamos que a proposta intitulada "Efeito de ondas de calor sobre o estresse oxidativo, desenvolvimento da glândula mamária e parâmetros fisiológicos durante o período pré-parto de novilhas Holandesas", protocolada sob o CEUA nº 4859201219 (ID 001414), sob a responsabilidade de **Luciane Silva Martello e equipe; Emanuel Manica** - que envolve a produção, manutenção e/ou utilização de animais pertencentes ao filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto o homem), para fins de pesquisa científica ou ensino - está de acordo com os preceitos da Lei 11.794 de 8 de outubro de 2008, com o Decreto 6.899 de 15 de julho de 2009, bem como com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle da Experimentação Animal (CONCEA), e foi **aprovada** pela Comissão de Ética no Uso de Animais da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo - FZEA/USP (CEUA/FZEA) na reunião de 28/01/2020.

We certify that the proposal "Effect of heat wave on oxidative stress, mammary gland development and physiological parameters during the prepartum period of holstein heifers", utilizing 12 Bovines (12 females), protocol number CEUA 4859201219 (ID 001414), under the responsibility of **Luciane Silva Martello and team; Emanuel Manica** - which involves the production, maintenance and/or use of animals belonging to the phylum Chordata, subphylum Vertebrata (except human beings), for scientific research purposes or teaching - is in accordance with Law 11.794 of October 8, 2008, Decree 6899 of July 15, 2009, as well as with the rules issued by the National Council for Control of Animal Experimentation (CONCEA), and was **approved** by the Ethic Committee on Animal Use of the School of Animal Science and Food Engineering - (São Paulo University) (CEUA/FZEA) in the meeting of 01/28/2020.

Finalidade da Proposta: [Pesquisa \(Acadêmica\)](#)

Vigência da Proposta: de [01/2020](#) a [01/2021](#) Área: [Engenharia de Biosistemas](#)

Origem: [Prefeitura do Campus da FZEA da USP](#)

Espécie: [Bovinos](#)

sexo: [Fêmeas](#)

idade: [14 a 16 meses](#)

N: [12](#)

Linhagem: [Holandês](#)

Peso: [300 a 400 kg](#)

Local do experimento: 1) Câmara climática localizada no Departamento de Reprodução Animal da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo, Pirassununga. 2) Baias individuais localizadas no setor de bovinos de corte do Departamento de Zootecnia.

Pirassununga, 28 de janeiro de 2020

Profa. Dra. Daniele dos Santos Martins  
Coordenadora da Comissão de Ética no Uso de Animais  
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da  
Universidade de São Paulo - FZEA/USP

Profa. Dra. Cristiane Gonçalves Titto  
Vice-Coordenadora da Comissão de Ética no Uso de Animais  
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da  
Universidade de São Paulo - FZEA/USP



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos  
Comitê de Ética em Pesquisa da FZEA

Pirassununga, 15 de dezembro de 2020  
CEUA N 4859201219

Ilmo(a) Sr(a),  
Responsável: Luciane Silva Martello  
Área: Engenharia De Biosistemas

Título da proposta: "Efeito das ondas de calor sobre a produção de leite e respostas fisiológicas em vacas leiteiras."

**Parecer Consubstanciado da Comissão de Ética no Uso de Animais FZEA (03-001326)**

A Comissão de Ética no Uso de Animais da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo - FZEA/USP, no cumprimento das suas atribuições, analisou e **APROVOU** a Emenda (versão de 27/outubro/2020) da proposta acima referenciada.

Resumo apresentado pelo pesquisador: "Essa emenda é para informar a exclusão de animais (bovinos 14 a 16 meses) propostos no projeto inicial. Dessa forma, as novilhas serão excluídas desse projeto. Uma outra emenda foi encaminhada informando o uso de outra categoria animal (vacas lactantes)."

Comentário da CEUA: "Esta CEUA FZEA aprova a emenda do projeto."

Prof. Dra. Cristiane Gonçalves Titto  
Coordenadora da Comissão de Ética no Uso de Animais  
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da  
Universidade de São Paulo - FZEA/USP

Prof. Dra. Daniele dos Santos Martins  
Vice-Cordenadora da Comissão de Ética no Uso de Animais  
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da  
Universidade de São Paulo - FZEA/USP

EMANUEL MANICA

**Impacto das ondas de calor sobre a produção de leite e respostas  
termorregulatórias de vacas Holandesas**

Tese apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Qualidade e Produtividade Animal

**Data de aprovação: 24 / 06 / 2022**

Prof.(a) Dr.(a) Luciane Silva Martello  
Instituição: FZEA-USP  
Presidente da Banca Examinadora

Prof.(a) Dr.(a) Rafael Vieira de Sousa  
Instituição FZEA-USP

Prof.(a) Dr.(a) Diogo de Luca Sartori  
Instituição UNESP-Tupã

Prof.(a) Dr.(a) Lenira El Faro Zadra  
Instituição IZ-Sertãozinho

Prof.(a) Dr.(a) Priscila Pereira Coltri  
Instituição UNICAMP-Campinas

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho primeiramente a minha mãe, por ser essencial em minha vida, minha guia, socorro presente na hora da angústia. Aos meus avós, Adélia*

*Kunzler Schio, Pedro Schio (In memoriam), Alzira Locatelli Manica (In memoriam) e Emílio Manica (In memoriam) por serem meu grande exemplo de*

*vida.*

*Dedico.*

## AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos àqueles que fizeram tudo isso acontecer, meus pais, Lucimar Salete Manica e José Carlos Manica, à minha irmã Eduarda Manica. Agradeço por sempre acreditarem em mim. Nossa distância física nesses últimos 15 anos me fortaleceu e me fez tentar, não a ser o melhor, mas a fazer o melhor de mim a cada dia. Obrigado por tudo sempre!

À minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Luciane Silva Martello, não tenho palavras para expressar tamanha confiança, dedicação e ensinamentos. Agradeço pela oportunidade de compartilhar conhecimentos em seu laboratório. Agradeço pelo apoio e conselhos, isso fez a diferença no profissional que me tornei. Minha eterna admiração e agradecimento por tudo!

À Dr<sup>a</sup> Priscila Pereira Coltri, por toda paciência e dedicação em me auxiliar no decorrer do doutorado. Serei eternamente grato por cada ensinamento, conselho, ideias, discussões científicas e risadas. Hoje sou 1% meteorologista e você quase 99% zootecnista. Minha eterna admiração!

Ao professor Dr. Rafael Vieira de Sousa pela confiança, ajuda e em compartilhar conhecimentos do Laboratório de Robótica. Também, ao técnico de laboratório Edson por toda ajuda nas análises das imagens térmicas. Meus sinceros agradecimentos!

À minha amiga e irmã Gabi, com quem eu ri, chorei e me diverti muito. Aliás são 12 anos de amizade. Então, agradeço por toda força e ajuda em todos os momentos, alegrias e tristezas. Pelas festas surpresas de aniversário, pelo companheirismo de sempre. Te amo!

À minha amiga e irmã Pri, te agradeço pelos incansáveis dias de companhia no trabalho, pelas centenas de vezes que você me ouviu reclamar de tudo, me acalmando sempre. Pelas inúmeras orações que você fez para mim, você foi muito importante na minha trajetória em São Paulo, jamais esquecerei! Te amo!

Ao melhor quarteto que a FZEA construiu Dri, Gabi, Manu e Mel, vocês foram essenciais, me ouvindo, apoiando e muitas vezes puxando a orelha. Agradeço infinitamente!

Aos meus amigos, Vandi, Sandro, Jardel e Cássio. Vocês que mesmo estando longe, sempre foram presentes, ligando ou mandando uma simples mensagem. Vocês são essenciais para mim!

Obrigado por fazerem minhas férias sempre diferente! Cada um de vocês tem um espaço especial!

Aos meus amigos e colegas, Gabi e John! Que me receberam tão bem no laboratório e pela amizade construída no decorrer do doutorado, muito obrigado por tudo!

Aos meus colegas de casa, Carol e Dan! Agradeço por toda ajuda, boas risadas e por me atuar dois anos pandêmicos em casa. Vocês foram essenciais naquele momento tão incerto e de muito medo. Agradeço por sempre estarem ali, me ensinarem política e ciência. Ah! E também pelos melhores cafés da manhã (e meu café é melhor com açúcar)!

Aos meu familiares, especialmente minhas tias Heliane e Ione, por sempre estarem sempre presentes na vida, me aconselhando, me guiando e puxando minha orelha. Vocês são mais que importantes em minha vida, como minhas segunda mãe! Agradeço incondicionalmente!

Agradeço a toda equipe do laboratório de Zootecnia de Precisão, especialmente minhas colegas Verônica e Táisla, pelas parcerias nas pesquisas e ajuda nas análises de dados. À Verônica pela ajuda durante o período experimental a campo, meus sinceros agradecimentos!

Aos alunos Maria, Isabele (FZEA) e Caio (Unicamp), por toda ajuda com o processamentos dos dados, experimentos, análises, coletas! Sem vocês este trabalho não teria alcançado os objetivos, vocês foram essenciais! Meu profundo agradecimento!

Agradeço a Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, pela oportunidade de cursar tanto o mestrado quanto o doutorado, por todo suporte. À coordenação do PPG em Zootecnia. Ao CNPq (processo n°. 140252/2019-3). Agradeço!

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

Por fim, o meu profundo agradecimento a todos que contribuíram para a concretização desta tese, estimulando-me intelectual e emocionalmente. Agradeço!

## RESUMO

MANICA, E. **Impacto das ondas de calor sobre a produção de leite e respostas termorregulatórias de vacas Holandesas**. 2022. 95 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2022.

Estudar os eventos climáticos aplicados e seu comportamento ao longo dos anos é um grande desafio científico. As mudanças nos padrões das variáveis climáticas estão modificando a frequência, intensidade e duração das ondas de calor, prejudicando a saúde, bem-estar e produtividade de bovinos leiteiros. Este estudo teve como objetivo (i) avaliar a mudança na temperatura do ar e os impactos de diferentes ondas de calor nas respostas fisiológicas e produtivas de vacas Holandesas, e (ii) avaliar o efeito de ondas de calor longas e consecutivas sobre as respostas de frequência respiratória (FR), temperatura retal (TR), temperatura de superfície de pele (TSP) e produção de leite (PL). As ondas de calor foram determinadas usando seis Índices de Mudança Climática para temperatura mínima ( $T_{min}$ ) e temperatura máxima ( $T_{max}$ ) do ar da série 1981 a 2021 do modelo NASA POWER. Dados individuais de FR, TR, TSP e PL foram obtidos de 66 vacas Holandesas em lactação e 70 dias de coleta. Todos os Índices de Mudança Climática apresentaram tendência positiva e significativa ( $p < 0,01$ ) de aumento. Acentuado aumento no número de noites quentes ( $> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e de dias quentes ( $> 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) foram maiores a partir de 2010, em relação aos anos 1981 a 2010. Também, o número de dias em ondas de calor anual aumentou 127% na década de 2010. Durante as ondas de calor, a FR aumentou ( $p < 0,05$ ) até o quarto dia, enquanto a TR foi maior ( $p < 0,05$ ) a partir do quinto dia até o final da onda de calor. A queda da PL foi significativamente maior a partir do quarto ou quinto dia nas ondas de calor. Ondas de calor curtas ( $< 5$  dias) não foram suficientes para causar quedas significativas na PL. O maior tempo de exposição ao calor causou também maior variabilidade da FR, TR e TSP das vacas. Ondas de calor consecutivas e longas causaram queda na PL de 20%, sem recuperação após o final das ondas de calor. Por fim, o método de avaliação baseado em índices foi eficiente para demonstrar os efeitos negativos nos parâmetros fisiológicos e na produção de leite e pode ser indicado para avaliar o estresse térmico em vacas em lactação de ambientes tropicais e subtropicais.

**Palavras-chave:** Estresse térmico; frequência respiratória; índices de mudança climática; temperatura de superfície de pele; temperatura retal; produção de leite.

## ABSTRACT

MANICA, E. **Impact of heat waves on milk production and thermoregulatory responses in Holstein cows.** 2022. 95 f. Ph.D. – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2022.

The study of applied weather events and their behavior over the years is a great scientific challenge. The changes in the patterns of climatic variables are modifying the frequency, intensity and duration of heat waves, harming the health, welfare and performance of dairy cows. This study aimed to (i) evaluate the change in air temperature and the impacts of different heat waves on the physiological and productive responses of Holstein cows, and (ii) evaluate the effect of long and consecutive heat waves on the responses of respiratory rate (RR), rectal temperature (RT), skin surface temperature (SST) and milk yield (MY). Heat waves were determined using six Climate Change Indices for environment minimum temperature ( $T_{min}$ ) and maximum temperature ( $T_{max}$ ) from the 1981 to 2021 series of the NASA POWER model. Individual RR, RT, SST and MY data were obtained from 66 lactating Holstein cows at 70 days of collection. All Climate Change Indices showed a positive and significant trend ( $p < 0.01$ ) of increase. The number of hot nights ( $> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and hot days ( $> 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) were marked for increase from 2010 onwards, compared to the years 1981 to 2010. In addition, the number of days in heat waves increased 127% in the 2010s. During heat waves, RR increased ( $p < 0.05$ ) until the fourth day, while RT was higher ( $p < 0.05$ ) from the fifth day until the end of the wave of heat. The loss in MY was significantly greater from the fourth or fifth day onwards in the heat waves. Short heat waves ( $< 5$  days) were not enough to cause significant loss in WY. The longer exposure time to heat also caused greater variability in the RR, RT and SST of the cows. Consecutive and long heat waves caused a loss of 20% in MY, with no recovery after the end of the heat waves. Finally, the index-based evaluation method was efficient to demonstrate the negative effects on physiological parameters and milk yield and can be indicated to evaluate heat stress in lactating cows on tropical and subtropical environments.

**Keywords:** Climate change indices; heat stress; milk production; rectal temperature; respiratory frequency; skin surface temperature.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Sistema de classificação climática de Köppen-Geiger.....  | 18 |
| Figura 2. Ilustração da variação da temperatura do ar ao longo dos anos (1920-2000).....  | 19 |
| Figura 3. Índice de magnitude e duração das ondas de calor em três períodos, com dados de reanálise: (a – c) 1980–1990, (d – f) 1991–2001 e (g – i) 2002–2012. Os valores estão expressos como o número de ondas de calor. ....   | 22 |
| Figura 4. Zona de conforto térmico de vacas leiteiras.....  | 25 |
| Figura 5. Esquema da síntese e secreção de cortisol durante o estresse térmico por calor. ....  | 26 |
| Figura 6. Respostas fisiológicas e adaptativas de vacas leiteiras em estresse térmico por calor. ....   | 27 |
| Figura 7. Mecanismos de troca de calor entre o animal e o ambiente por convecção, condução, radiação e respiração. ....   | 28 |
| Figura 8. Fases na Gestão de Riscos Climáticos e Plano Nacional de Adaptação. ....  | 35 |
| Figura 9. Regressões lineares dos Índices de Mudança Climática desenvolvidas pelo <i>software</i> RCLimdex, com sua tendência de evolução de mudanças. ....   | 55 |
| Figura 10. Temperatura máxima diária (barras cinzas), frequência respiratória (linha pontilhada), temperatura retal (linha contínua) e produção de leite (barras cinza escuro) durante ondas de calor para o índice TX90P. ....   | 58 |
| Figura 11. Temperatura máxima diária (barras cinzas), frequência respiratória (linha pontilhada), temperatura retal (linha contínua) e produção de leite (barras cinza escuro) durante ondas de calor para o índice TX35. ....  | 59 |
| Figura 12. Identificação das ondas de calor nos meses de janeiro e fevereiro de 2019 pelo método percentil 90 da temperatura máxima diária. Os dados no gráfico constam a temperatura máxima (Tmax) e temperatura mínima (Tmin) diária. ....                                | 72 |
| Figura 13. Regiões de coleta da temperatura de superfície de pele. (A) região do olho, (B) região da frente, (C) região do flanco e (D) região da costela. ....   | 73 |
| Figura 14. Comportamento da temperatura média do ar (Ta), umidade relativa do ar (UR) e índice de temperatura e umidade (ITU) para todo período experimental das ondas de calor 1 (HW1) e ondas de calor 2 (HW2). Os dados estão descritos em média $\pm$ erro padrão. .... | 75 |
| Figura 15. Ciclo diário da temperatura do ar (Ta), umidade relativa do ar (UR) e índice de temperatura e umidade (ITU) durante onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2). Os dados estão descritos em média $\pm$ erro padrão. ....                                     | 77 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 16. Resultados da frequência respiratória ( $\text{mov}/\text{min}^{-1}$ ) média (A), mínima (B) e máxima (C) nos períodos pré, início e final da onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2). Os dados estão descritos em média $\pm$ erro padrão. ....                      | 79 |
| Figura 17. Resultados da temperatura retal ( $^{\circ}\text{C}$ ) média, mínima e máxima nos períodos pré-onda de calor, início e final da onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2). Os dados estão descritos em média $\pm$ erro padrão. ....                                    | 80 |
| Figura 18. Resultados da temperatura de pele média ( $^{\circ}\text{C}$ ) do olho (A), frente (B), costela (C) e flanco (D) nos períodos pré-onda de calor, início e final da onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2). Os dados estão descritos em média $\pm$ erro padrão. .... | 81 |
| Figura 19. Efeito do tempo de exposição ao calor em $T_a > 29^{\circ}\text{C}$ (A e C) e $T_a > 36^{\circ}\text{C}$ (B e D) nas respostas de frequência respiratória e temperatura retal durante as ondas de calor. ....   | 82 |
| Figura 20. Efeito do tempo de exposição ao calor em $T_a > 29^{\circ}\text{C}$ (coluna esquerda, A-G) e $T_a > 36^{\circ}\text{C}$ (coluna direita, B-H) nas temperaturas de superfície de pele durante as ondas de calor. ....  | 83 |
| Figura 21. Produção de leite média ( $\text{kg}^{-1}$ ) nos períodos pré-onda de calor, início e final da onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2). Os dados estão descritos em média $\pm$ erro padrão. ....   | 84 |
| Figura 23. Matriz de correlação de Pearson entre variáveis fisiológicas e ambientais para a onda de calor 1 (HW1). ....  | 85 |
| Figura 24. Matriz de correlação de Pearson entre variáveis fisiológicas e ambientais para a onda de calor 2 (HW2). ....  | 86 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1. Índices de mudança climática para análise da temperatura máxima (Tmax) e temperatura mínima (Tmin) diária (dados referencia 1981-2021). .....  | 51 |
| Tabela 2. Dados descritivos para dias em lactação (DEL), idade, paridade e produção de leite das vacas experimentais durante os três anos de coleta.....   | 52 |
| Tabela 3. Medidas de adequação entre os dados do modelo NASA POWER versus dados meteorológicos observados (XAVIER et a. 2016) para temperatura mínima (Tmin) e temperatura máxima (Tmax). .....  | 54 |
| Tabela 4. Analise de tendência climática anual e por estações do ano para temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax) e dias em onda de calor. ....   | 56 |
| Tabela 5. Dados médio, mínimo e máximo da temperatura do ar (Ta), umidade relativa do ar (UR) e índice de temperatura e umidade (ITU) para a onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2). Os dados estão descritos em média ± erro padrão. ....                | 75 |
| Tabela 6. Tempo (horas) e porcentagem do tempo (%) de exposição das vacas ao calor durante a onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2) nas categorias Ta > 29 °C, Ta > 36°C e ITU > 72. Os dados de porcentagem estão descritos em média ± erro padrão. .... | 78 |

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>  | <b>17</b> |
| 1.1      | Sistema Climático e Clima .....  | 17        |
| 1.2      | Mudanças climáticas.....   | 20        |
| 1.3      | Ondas de calor .....   | 21        |
| 1.4      | Fisiologia do estresse térmico.....  | 24        |
| 1.5      | Avaliação dos mecanismos fisiológicos da interação animal × ambiente .....   | 29        |
| 1.6      | Importância do manejo de risco climático .....   | 34        |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>38</b> |
| <b>2</b> | <b>CAPÍTULO II. MUDANÇAS NO PADRÃO DAS ONDAS DE CALOR E IMPACTOS EM VACAS LEITEIRAS.....</b>   | <b>46</b> |
| 2.1      | Introdução .....   | 46        |
| 2.2      | Material e métodos.....  | 48        |
| 2.3      | Resultados.....  | 54        |
| 2.4      | Discussão .....  | 60        |
| 2.5      | Conclusão.....   | 63        |
| 2.6      | Referências.....   | 64        |
| <b>3</b> | <b>CAPÍTULO III. EFEITOS DE ONDAS DE CALOR CONSECUTIVAS SOBRE AS RESPOSTAS DE FREQUÊNCIA RESPIRATÓRIA, TEMPERATURA RETAL, TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DE PELE E PRODUÇÃO DE LEITE DE VACAS HOLANDESAS.....</b> | <b>69</b> |
| 3.1      | Introdução .....   | 69        |
| 3.2      | Material e métodos.....  | 70        |
| 3.3      | Resultados.....  | 74        |
| 3.4      | Discussão .....  | 87        |
| 3.5      | Conclusão.....   | 92        |
| 3.6      | Referências.....   | 92        |
| <b>4</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>  | <b>97</b> |

# 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 1.1 Sistema Climático e Clima

O clima é formado pela interação de agentes causais que condicionam os elementos climáticos de uma região. Os fatores climáticos acontecem em diferentes escalas que interagem entre si, resultando em um determinado clima. O balanço de energia é fundamental nesse processo. A Terra recebe a energia solar na forma de ondas curtas e longas, em sua maioria infravermelho (50%), visível (40%) e ultravioleta (10%), além disso a quantidade de radiação solar incidente sobre a atmosfera depende de três fatores: o período do ano, do período do dia e da latitude (SEN et al., 2008). No balanço de energia global, parte da energia é transformada em calor latente, calor sensível, energia potencial e energia cinética, as quais são responsáveis pelos processos físicos e biológicos de fotossíntese, evaporação da água, degelo e aquecimento do sistema terrestre (SEN et al., 2008). As diversas formas de energia são redistribuídas pelo sistema climático (atmosfera, hidrosfera, criosfera, biosfera e litosfera), que em sua totalidade contribui para o estado de equilíbrio dinâmico do planeta, estabelecendo e mantendo, ao longo da história, a vida.

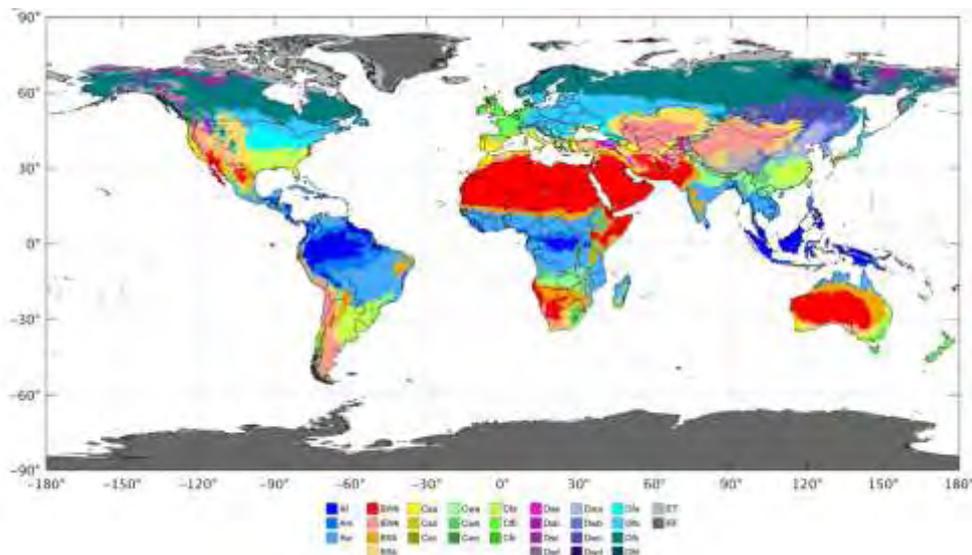
O sistema climático é altamente complexo e sofre variações de ordem natural ou antrópicas, como as forçantes externas, tais como erupções vulcânicas, variações solares e as influências das atividades humanas (THORNTON et al., 2014). O clima é um estado do sistema climático, o qual é comumente caracterizado por descrições estatísticas. As médias e as variabilidades dos elementos climáticos (da temperatura, umidade, precipitação e vento, por exemplo) são frequentemente utilizadas na descrição do padrão climático, sendo calculada em um intervalo de tempo (atualmente de 30 anos conforme a Organização Mundial de Meteorologia) (SEN et al., 2008). Considerando as possibilidades de interação, entre os fluxos de matéria/energia e os elementos condicionantes, o clima pode ser avaliado em três níveis: macroclima, mesoclima e microclima (SEN et al., 2008).

O macroclima está relacionado com a curvatura da Terra e os seus movimentos de rotação e translação. As variações climáticas são diretamente impulsionadas por uma forçante externa periódica, como o ciclo diurno e sazonal (FLAGG e KIRCHHOFF, 2018). Assim, as estações do ano são definidas pela inclinação (aproximadamente 23°) do eixo de rotação da Terra em relação ao plano definido pela sua órbita. Resultado disso é que, em determinadas partes do ano, algumas localidades recebem maior quantidade de energia por metro quadrado,

resultando em variações de temperatura, precipitação e outros elementos climáticos. Tais variações, ao longo de milênios, estabeleceram os diferentes climas existentes em torno do mundo. O mesoclima relaciona a interação entre a energia disponível (para o processo de evaporação e de geração de campos de pressão) e as feições do meio terrestre (FLAGG e KIRCHHOFF, 2018). Aqui as condições locais de clima são modificadas por variáveis como a vegetação, a topografia, o tipo de solo e a presença de obstáculos naturais ou artificiais. A avaliação do mesoclima é direcionado a áreas pequenas, em um raio de 10 a 100 quilômetros. Por fim, o microclima é a interação entre os sistemas ambientais particulares na modificação dos fluxos de energia, umidade e massa (FLAGG e KIRCHHOFF, 2018). É o estudo local de áreas muito pequenas, com menos de 100 metros de raio.

O clima das diferentes regiões do mundo pode ser classificado por Sistemas de Classificação do Clima, dos quais a classificação climática desenvolvida por Köppen (1936) tem sido amplamente utilizada. A Classificação de Köppen integra a vegetação local, demonstrando, de modo geral, que áreas com mais chuvas e temperaturas mais altas contêm mais florestas, enquanto regiões com menos chuvas tendem a ser desérticas. É bem estabelecido que a classificação climática de Köppen-Geiger é um meio altamente adequado para agregar gradientes climáticos complexos em um esquema de classificação simples, mas ecologicamente expressivo (BECK et al., 2018). Portanto, é frequentemente usado como entrada ao analisar a distribuição ou comportamento de crescimento de espécies, ou para configurar modelos dinâmicos de vegetação global (Figura 1).

Figura 1 - Sistema de classificação climática de Köppen-Geiger.

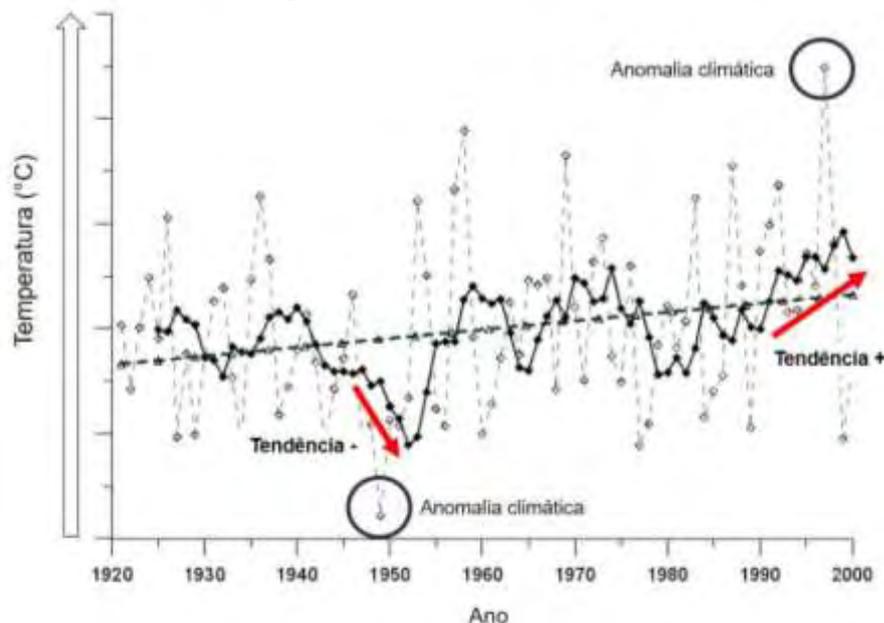


Fonte: Adaptado de BECK et al. **Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution**. Scientific data, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2018.

O clima, por si só, apresenta variações nas mais diferentes escalas cronológicas, de um ano para o outro, de uma década, século ou milênio para o seguinte. O estudo da variabilidade climática permite compreender o comportamento do clima ao longo do tempo, desde o passado longínquo (paleoclima) até o presente, além de, a partir de modelos, simular o clima futuro (WANG, 2019).

As flutuações climáticas ocorrem em diferentes formas ao longo dos meses e/ou anos como, por exemplo, as tendências (positivas ou negativas) e anomalias (THORNTON et al., 2014; WANG, 2019). As tendências climáticas ocorrerem em curtos períodos de tempo, e não devem ser caracterizadas como mudança climática, Figura 2 (OLIVEIRA et al., 2006). Por outro lado, as variáveis meteorológicas podem, em algum momento, apresentar maior flutuação, ou seja, um desvio acentuado do padrão observado para um determinado elemento meteorológico (ex.: temperatura do ar), isto caracteriza uma anomalia climática (Figura 2) (WALTHER et al., 2005). Os eventos anômalo estão normalmente associados com fatores causais, tal como El Niño e La Niña, por exemplo. No entanto, nos últimos anos, pesquisadores apontam que as mudanças climáticas estão associadas ao aumento na frequência, intensidade e duração de anomalias (MAZDIYASNI et al., 2019).

Figura 2 - Ilustração da variação da temperatura do ar na série 1920-2000 para um microclima na região de Manaus (AM), Brasil.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA et al. **Inferência de mudanças climáticas na região de Manaus (AM) usando dados geotermiais e meteorológicos**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 24, n. 2, p.169-187, 2006.

A natureza complexa da variabilidade climática ainda é um obstáculo para a confiabilidade das mudanças climáticas globais provocadas – no passado, presente ou futuro – pela presença e atividade humana (THORNTON et al., 2014). Alguns estudos apontam que as mudanças na variabilidade do clima, causada pelo aumento da temperatura global, já apresentam impactos severos sobre os ecossistemas, e especialmente para pequenos produtores rurais, comunidades e países que deles dependem (OLIVEIRA et al., 2006; SEAGER et al., 2019). A situação se agrava mais tanto para países tropicais e subtropicais, como o Brasil, que depende da agricultura e pecuária como impulso para o desenvolvimento econômico.

## 1.2 Mudanças climáticas

O clima está em constante mudança, que podem estar relacionadas com fatores naturais como o movimento das placas tectônicas, variações da atividade solar e vulcânica, alterações nos parâmetros orbitais da Terra, nas correntes oceânicas e na composição atmosférica, ou por fatores antropogênicos, como atividade industrial (SEN et al., 2008).

A partir da Revolução Industrial, devido à intensidade das atividades humanas, houve um aumento significativo na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, atingindo níveis nunca antes registrados, resultando na elevação da temperatura média da Terra (IPCC, 2021). Isto causa uma aceleração dos impactos sobre outros componentes climáticos, como o aumento da temperatura do oceano e do nível do mar, degelo e eventos extremos (IPCC, 2021).

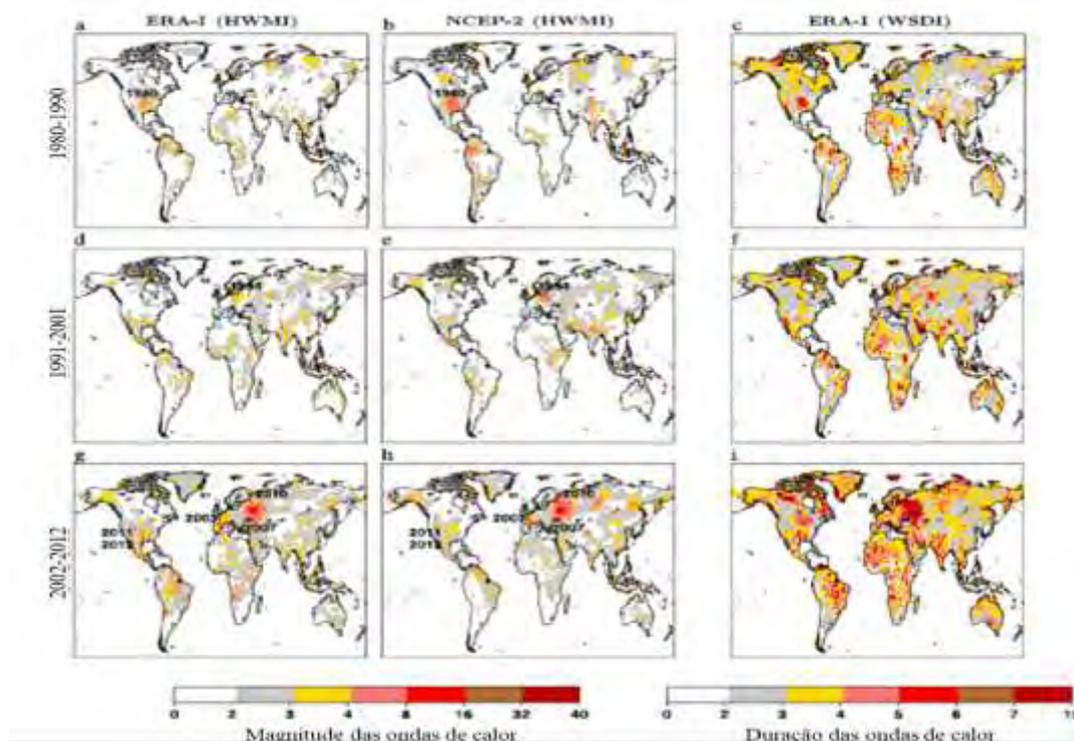
Conforme o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021), cada uma das últimas quatro décadas foi sucessivamente mais quente do que qualquer outra década que a precedeu desde 1850. A temperatura da superfície global nas primeiras duas décadas do século XXI (2001-2020) foi 0,99 °C mais alta que em 1850-1900. A temperatura da superfície global foi 1,09 °C mais alta no período 2011– 2020 em comparação a 1850–1900, com os maiores aumentos ocorrendo nos continentes (1,59 °C) que nos oceanos (0,88 °C). Ainda de acordo com os relatórios do IPCC (2021), projeta-se um aumento de 0,2 °C na temperatura média global por década, e na América do Sul estima-se um aumento que pode variar entre 2 a 5 °C até o final do século atual. Pesquisadores ainda apontam que as áreas tropicais e subtropicais, incluindo o Brasil, podem apresentar maior acréscimo na temperatura em relação a outros países norte-americanos e europeus (GUO et al., 2018). A cada incremento adicional de aquecimento global, as mudanças nos eventos extremos continuam a aumentar. Por exemplo, cada 0,5 °C adicional de aquecimento global causa aumentos claramente perceptíveis na intensidade e frequência de extremos de calor, incluindo ondas de calor e precipitação intensa, bem como

secas agrícola e ecológica (IPCC, 2021). Estima-se que os países da América do Sul apresentarão os maiores aumentos de temperatura nos dias mais quentes, cerca de 1,5 a 2 vezes mais que a taxa de aquecimento global (IPCC, 2021).

### **1.3 Ondas de calor**

Estudar os eventos climáticos é um grande desafio científico atual. As mudanças nos padrões das variáveis climáticas estão modificando a frequência, intensidade, extensão espacial, duração e período da ocorrência de fenômenos climáticos extremos, associados principalmente com a temperatura e precipitação (HAYLOCK et al., 2006; BITENCOURT et al., 2020; COSTA et al., 2020). Há anos, as diferentes regiões do mundo têm sofrido com longos períodos de seca e temperaturas extremas de calor, como as ondas de calor (MARENGO et al., 2018). A formação de ondas de calor, a partir de temperaturas extremas, tem recebido maior relevância da ciência nos últimos anos (RUSSO et al., 2014; GUO et al., 2018; GEIRINHAS et al., 2019). Entre os anos de 2002 a 2012, a porcentagem da área global afetada por ondas de calor foi três vezes maior quando comparado ao período referência de 1980 a 2001 (Figura 3) (RUSSO et al., 2014), tornando as ondas de calor mais frequentes, intensas e longas (MAZDIYASNI et al., 2019).

Figura 3 - Índice de magnitude e duração das ondas de calor em três períodos, com dados de reanálise: (a – c) 1980–1990, (d – f) 1991–2001 e (g – i) 2002–2012. Os valores estão expressos como o número de ondas de calor.



Fonte: Adaptado de RUSSO et al. **Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world**. *Journal Geophysical Research: Atmospheres*, v.119, n.22, p. 12.500-12.512, 2014.

As ondas de calor são caracterizadas como eventos climáticos de temperatura extrema, onde condições ambientais anômalas ocorrem por dias consecutivos (ROBINSON, 2001). Assim, as ondas de calor podem ser analisadas e avaliadas pela intensidade, frequência e duração relativas ao clima regional e à época do ano. As distinções das ondas de calor tendem a ter variabilidade interanual, conforme as condições físicas e meteorológicas do local (ROBINSON, 2001). Embora não tenha uma definição única para “ondas de calor” e nem limites amplamente definidos na literatura de amplitude da temperatura, alguns estudos apontam diferentes características independentes para o método de análise. Em geral, uma definição básica implica em um período prolongado, de 3 a 5 dias consecutivos, de estresse por calor incomumente alto relacionado à atmosfera, que causa modificações temporárias causando consequências adversas à saúde pública (ROBINSON, 2001; RUSSO et al., 2014; RAGONE; WOUTERS; BOUCHET, 2018; MAZDIYASNI et al., 2019). Outra definição, mais clássica, adotada pela *World Meteorological Organization* (WMO), explica que as ondas de calor são caracterizadas pela temperatura máxima diária de pelo menos 5 °C acima da temperatura máxima média anual, durante seis dias consecutivos. Já, Rusticucci et al. (2016) definem ondas

de calor como o tempo em que as temperaturas máximas e mínimas diárias estão acima do percentil 90, por mais de 3 dias consecutivos.

As ondas de calor impõem impactos mais devastadores do que as temperaturas extremas em um único dia (PERKINS-KIRKPATRICK; GIBSON, 2017). As taxas de morbidade e mortalidade humana estão altamente associadas a ondas de calor, com longos períodos de temperaturas extremas, assim como diminuição na produtividade de trabalho, aumento da demanda de eletricidade associada à diminuição da oferta, e danos potencialmente irreversíveis aos ecossistemas (COUMOU; RAHMSTORF, 2012; MATTHEWS; WILBY; MURPHY, 2017). Com isso, alguns estudos sugerem modelos matemáticos robustos para avaliar e caracterizar as temperaturas máximas e mínimas de uma onda de calor (RUSSO et al., 2014; PERKINS-KIRKPATRICK; GIBSON, 2017; RAGONE; WOUTERS; BOUCHET, 2018; MAZDIYASNI et al., 2019; McELROY et al., 2020). Esses modelos são baseados em dados diários de temperatura média, máxima e mínima, umidade relativa do ar e pluviosidade das diferentes regiões do mundo. A fim de analisar as tendências climáticas, inclusive de ondas de calor, a WMO desenvolveu 27 índices climáticos, dos quais 11 utilizam a variável de precipitação e 16 de temperatura, sendo alguns para ondas de calor. O objetivo principal é detectar as mudanças em variáveis climáticas e eventos extremos climáticos, sendo alguns desses índices correspondentes apenas para latitudes médias e trópicos, e outros validados para qualquer local.

Dentre as metodologias utilizados para avaliar ondas de calor, o método em percentil tem sido amplamente utilizado e bem descrito por diversos autores, incluindo trabalhos em animais (ROBINSON et al., 2001; VITALI et al., 2015; GEIRINHAS et al., 2019; McELROY et al., 2020). Esse método, consiste na análise da temperatura máxima e/ou temperatura mínima do dia útil em questão, com base em uma janela de 15 dias anteriores. Ou seja, existe um valor percentual diferente para cada dia do ano, a fim de levar em consideração o ciclo sazonal, em que a janela é centralizada no dia da análise (PERKINS-KIRKPATRICK; GIBSON, 2017). No entanto, a avaliação de índices e modelos, que possam abranger as diferentes regiões do mundo, é essencial para entender como as ondas de calor podem impactar os sistemas de produção agrícola. Em estudo recente, o método em percentil mostrou-se eficaz na definição e identificação de ondas de calor no Brasil, em termos de extensão espacial e variabilidade climática regional (GEIRINHAS et al., 2019; COSTA et al., 2020o).

Os modelos climáticos da WMO demonstram que o Brasil tem sido marcado pelo aumento nas temperaturas máximas e mínimas diárias desde a década de 60 (MARENGO e CAMARGO, 2008). As perspectivas projetadas do clima são de tendências crescentes na

temperatura, causando riscos severos às populações e ecossistemas. O relatório *The Global Climate 2001-2010, A Decade of Climate Extremes*, identificou no Brasil, que entre janeiro e março de 2006 ocorreu uma das ondas de calor mais significantes do mundo, com temperaturas máximas de 44,6 °C. No Estado de São Paulo, particularmente, até a década de 80 registravam-se cerca de 1 a 4 ondas de calor anuais e, entre 1980 e 2015 esse número passou para 4 a 10 ondas de calor anuais (GEIRINHAS et al., 2018).

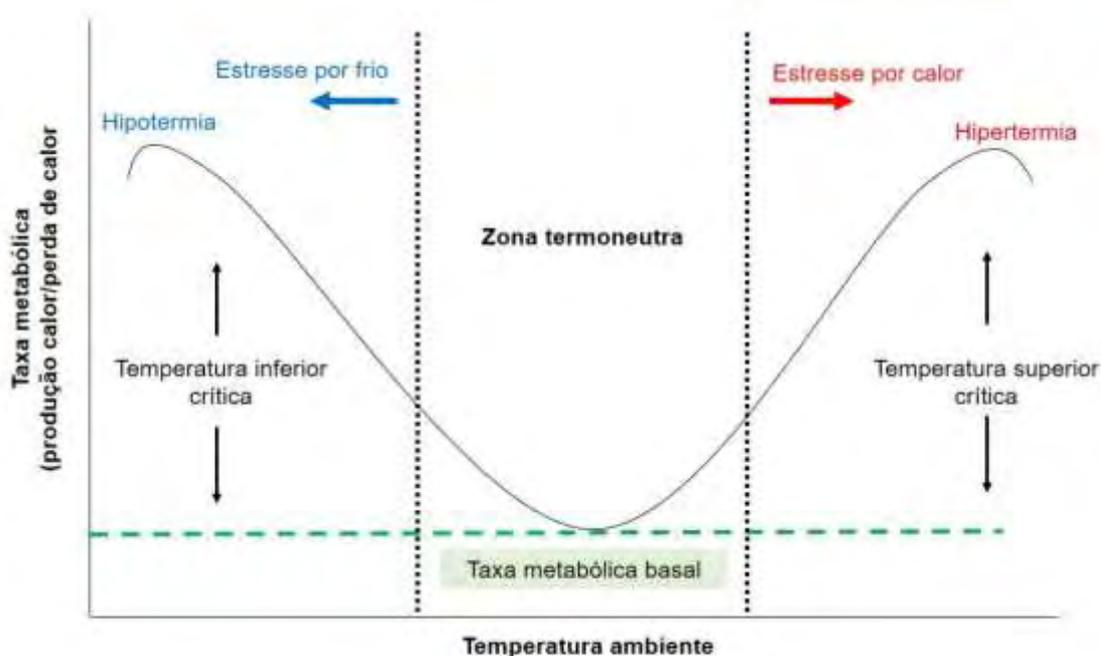
O monitoramento, detecção e atribuição das mudanças climáticas geralmente requerem dados meteorológicos diários e precisos (XAVIER; KING; SCANLON, 2015). Diversos estudos nas décadas passadas, abordaram as temperaturas médias como indicativos nas mudanças do clima. Atualmente, as temperaturas máximas e mínimas diárias ganham destaque nas análises climatológicas. Em estudo, HAYLOCK et al. (2006) avaliaram dados diários de temperaturas máximas e mínimas de diferentes estações meteorológicas localizadas em oito países da América do Sul. Os autores concluíram que as tendências mais importantes foram encontradas nas séries de temperaturas mínimas, com tendência crescente para noites quentes durante o verão. Esses eventos climáticos afetam diretamente os animais de produção, aumentando os riscos relacionados ao bem-estar animal e sua eficiência produtiva, e portanto, os limites pré-estabelecidos relacionados à zona de conforto térmico animal precisam ser revistos.

#### **1.4 Fisiologia do estresse térmico**

O estresse térmico (ou *Heat Stress* – HS) provoca consequências negativas sobre a fisiologia, bem-estar, saúde e reprodução de vacas leiteiras, especialmente com o aumento de longos períodos de calor e ondas de calor (TAO et al., 2020). Ao longo dos anos, o melhoramento genético tornou os sistemas de produção de leite altamente produtivos, isto coincide também com a maior produção de calor metabólico pelas vacas. Este é um problema, pois quando a temperatura e umidade relativa do ar estão altas, os animais não conseguem dissipar com eficiência o calor metabólico gerado e, assim, a temperatura corporal aumenta para níveis, em algumas vezes, de hipertermia (RHOADS et al., 2009).

De acordo com Berman et al. (1985), vacas leiteiras Holandesas submetidas à temperatura ambiente superior a 25 - 26 °C iniciam o estresse térmico, sendo esses valores caracterizados como o limite superior da zona de conforto de vacas, quando os animais experimentam elevadas temperaturas (Figura 4). Durante o estresse uma série de mecanismos fisiológicos são ativados como uma resposta adaptativa e de sobrevivência do animal.

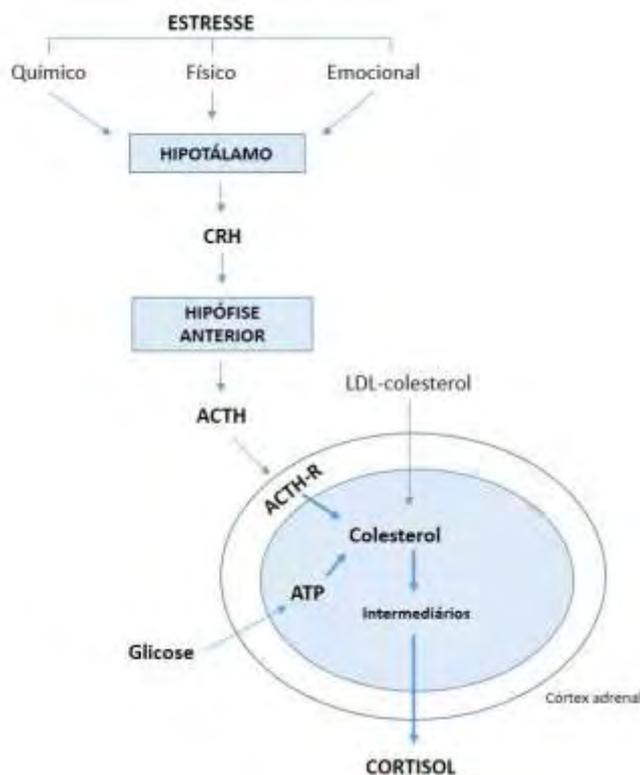
Figura 4 - Zona de conforto térmico de vacas leiteiras.



Própria autoria.

A partir disto, o estresse por calor pode ser classificado em: (i) estresse agudo, quando há um aumento abrupto na temperatura ambiente e (ii) estresse crônico, quando a temperatura ambiente permanece alta por um período de dias ou semanas (ABDELNOUR et al., 2019). Em ambos, os mecanismos para eliminar o excesso de calor produzido e o adquirido pelo ambiente são regulados pelo eixo hipotálamo-hipófise-adrenal (HHA). Como resposta ao estresse agudo, as alterações térmicas são identificadas pelo sistema nervoso periférico e assimiladas pelo sistema nervoso central. O hipotálamo recebe as informações sobre as flutuações de temperatura nos tecidos superficiais e profundos do corpo, esses receptores são componentes dos circuitos de *feedback* térmico, e o eixo HHA é estimulado a liberar o hormônio corticotrofina (CRH) (Figura 5). O CRH age sobre a hipófise anterior estimulando a síntese e liberação do hormônio adrenocorticotrófico (ACTH) (Figura 5). Por sua vez, o ACTH estimula o córtex supra-adrenal a liberar o cortisol no sangue para exercer suas ações fisiológicas nos tecidos-alvo (VAN DER KOLK, 1990; SANIN et al., 2016).

Figura 5 - Esquema da síntese e secreção de cortisol durante o estresse térmico por calor.



Fonte: adaptado de ENGELKING, L. **Fisiologia endócrina e metabólica em medicina veterinária**. 2 ed. São Paulo: Roca, 2010. 152 páginas.

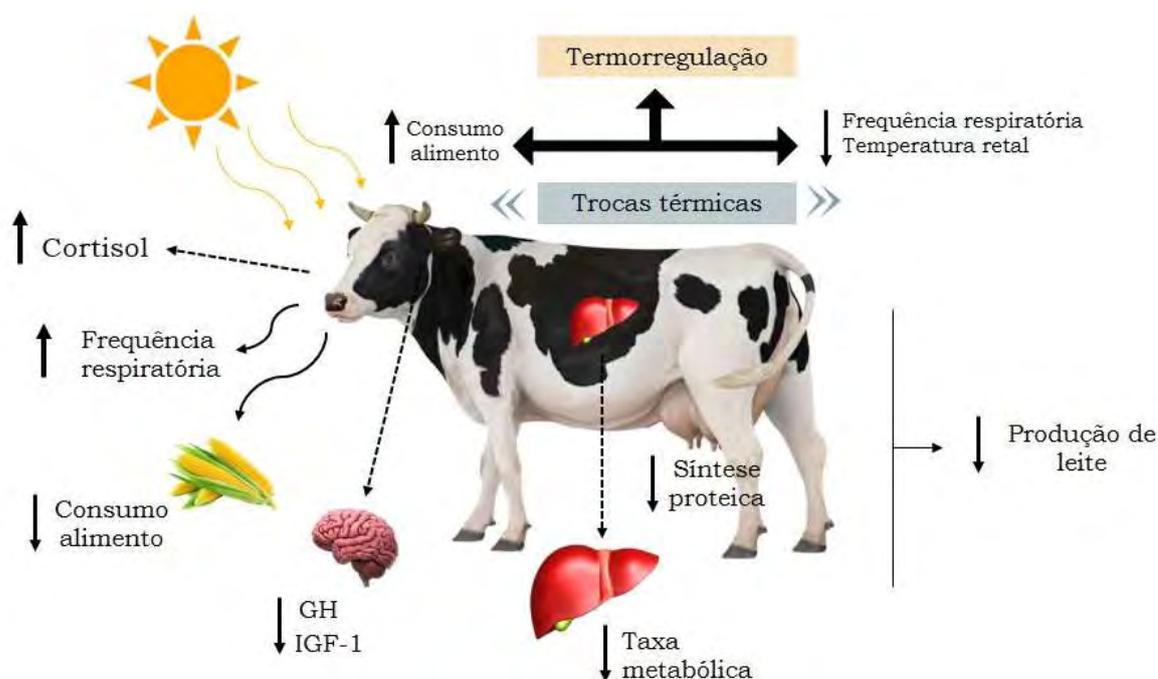
O aumento de cortisol estimula a glicólise e lipólise para aumentar os níveis de glicose e, assim, o suprimento de energia necessário para a termorregulação. Portanto, a liberação de cortisol também é importante para o processo de adaptação ao ambiente, e conseqüentemente o animal que vivencia uma exposição ao calor pode gerar respostas adaptativas para manter o equilíbrio térmico dentro da zona de conforto (SANIN et al., 2016).

A adaptação ao calor envolve diversos processos fisiológicos e celulares, pelos quais os agentes estressores são superados e repassados aos descendentes. Portanto, há duas formas de adaptação dos bovinos ao estresse por calor: a adaptação genética e a adaptação fisiológica e ambas são interligadas. A adaptação genética envolve mudanças na expressão de genes e modificações nas regiões de codificação do material genético e requer várias gerações para adquirir genes de termotolerância ao calor (HANSEN, 2004). Por outro lado, a adaptação fisiológica envolve respostas rápidas e eficientes (ex.: hormonais) na dinâmica de troca calor entre o animal-ambiente (AMAMOU et al., 2019), conhecida também como aclimação.

A aclimação é um processo fenotípico dos animais, que delonga dias ou semanas para ocorrer, envolvendo sinais hormonais que afetam a capacidade de resposta dos animais ao ambiente (BERNABUCCI et al., 2010). O principal efeito das respostas fisiológicas e

hormonais é coordenar o metabolismo para alcançar um novo equilíbrio térmico, ou seja, um novo estado fisiológico. Bernabucci et al. (2010) classificaram o processo de aclimatação ao calor em duas fases, curta e longa; a fase curta é caracterizada por aumento nos processos de dissipação de calor, redução no consumo de alimento, aumento no consumo de água e queda na produção de leite (Figura 6). Essa fase envolve sinalização celular, a qual causa distúrbios na homeostasia e inicia uma reprogramação das células (ex: ação de proteínas de choque térmico, HSPs) para sobreviverem aos efeitos do calor (Figura 6). Já a fase longa da aclimatação, é caracterizada pela reprogramação da expressão gênica e resposta celular, resultando na melhor eficiência na sinalização de processos metabólicos (ex.: estresse oxidativo) (Figura 6).

Figura 6 - Respostas fisiológicas e adaptativas de vacas leiteiras em estresse térmico por calor.



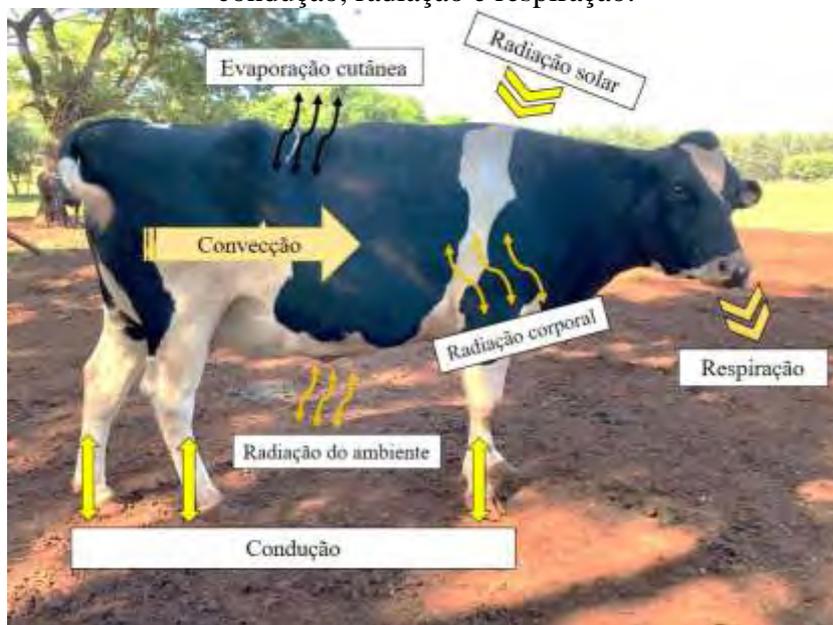
Fonte : Adaptado de: ABDELNOUR, S. A. et al. **Stress biomarkers and proteomics alteration to thermal stress in ruminants: A review**. Journal of Thermal Biology, v. 79, p. 120-134, 2019.

As respostas fisiológicas ao aumento de calor também incluem redução na taxa metabólica, alteração do sistema cardiovascular, alteração nas respostas da relação vasomotora/vasodilatadora, mudanças comportamentais e morfológica dos animais (WEST, 2003; COWLEY et al., 2015). É bem descrito que vacas leiteiras quando submetidas ao estresse térmico por calor diminuem significativamente a ingestão de alimentos, e por muito tempo acreditou-se que o baixo consumo causaria a queda na produção leiteira (WEST et al., 2003).

Mas, nos últimos anos, alguns autores têm apontado que a queda da produção de leite não está, exclusivamente, associada ao consumo de alimento, mas há outros fatores decorrentes da alteração metabólica (RHOADS et al., 2009; COWLEY et al., 2015). Esses fatores incluem desregulação na síntese de proteica na glândula mamária (BERNABUCCI et al., 2014; COWLEY et al., 2015) e no eixo somatotrófico (RHOADS et al., 2009), sendo o último ligado à síntese de leite e metabolismo celular (Figura 6).

A perda de calor entre animal-ambiente pode ocorrer por condução, convecção, radiação e evaporação (Figura 7). As três primeiras representam formas sensíveis e dependem do gradiente térmico de transferência de calor entre o animal e a temperatura ambiente (Figura 7). Quando a temperatura do ar aumenta e ultrapassa o limite de conforto térmico, a eficiência por perdas de calor sensível diminui, e assim os mecanismos evaporativos são acionados (MARTELLO et al., 2010). Portanto, manter a homeotermia sobre condições de extremo calor depende da habilidade do animal no balanço térmico e dissipação de calor (CARABAÑO et al., 2019).

Figura 7 - Mecanismos de troca de calor entre o animal e o ambiente por convecção, condução, radiação e respiração.



Fonte: própria autoria.

Quando os animais experimentam estresse térmico em países de clima temperado, as mudanças fisiológicas, comportamentais e imunológicas são de curto prazo e, devem ser eficazes para que os animais sobrevivam ao calor intenso, como aquele no qual os animais ficam submetidos em ondas de calor. Entretanto, o período noturno pode possibilitar que os

animais recuperarem o equilíbrio térmico, quando as temperaturas são amenas (VITALI et al., 2015; GAULY; AMMER, 2020). Por outro lado, em países tropicais e subtropicais, os animais essencialmente de climas temperados são desafiados ao calor na maior parte do ano, nos períodos diurnos ou noturnos, o que causa maior acionamento nas respostas fisiológicas durante os períodos de ondas de calor (SANTANA et al., 2017). Nesse caso, assumindo que não haja uma aclimação e adaptação do organismo ao aumento brusco da temperatura ambiente, a longa exposição de vacas leiteiras ao calor intenso pode causar aumento na taxa de mortalidade do rebanho (VITALI et al., 2015).

Quando se avalia os efeitos das ondas de calor e as respostas fisiológicas das vacas leiteiras, uma relevância deve ser dada ao aumento nas temperaturas mínimas (período noturno). Durante as ondas de calor, as temperaturas mínimas, ficam próximas ao limite superior da zona de conforto dos animais. Assim, quando as vacas leiteiras experimentam alta temperatura diurna, e a temperatura mínima noturna permanece acima de 20 °C, não há tempo suficiente para perder o calor ganho. E, se o dia seguinte continuar quente, elas podem iniciar o dia com uma carga calórica maior e, assim, serem susceptíveis ao estresse térmico em um limite menor de temperatura ambiente. Ao contrário, se o próximo dia estiver frio, as vacas recuperam sua homeostasia (SPIERS et al., 2004; VITALI et al., 2015).

### **1.5 Avaliação dos mecanismos fisiológicos da interação animal × ambiente**

Diversos fatores devem ser considerados durante a avaliação das respostas e condições térmicas dos animais, tais como raça, produção de leite, estado fisiológico, gestação e idade, uma vez que essas características influenciam diretamente na ambientação das vacas leiteiras (BERNABUCCI et al., 2010). Por sua vez, a seleção genética de bovinos leiteiros tem considerado ao longo dos anos a capacidade produtiva como característica principal para melhoramento, ou seja, animais altamente produtivos foram selecionados e acasalados, isto colocou em risco a capacidade dos animais em lidarem com as condições de extremo calor (CARABAÑO et al., 2019; AMAMOU et al., 2019).

O estresse térmico pode ser avaliado por meio de (i) dados meteorológicos do ambiente ao qual o animal está submetido; (ii) dados fisiológicos e produtivos dos animais e; (iii) uma combinação dos dados meteorológicos e dos animais (ZIMBELMAN et al., 2009; SCHÜTZ et al., 2011). Em relação as condições do ambiente, os dados de temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento, ponto de orvalho e precipitação podem ser utilizados como indicadores de conforto térmico (RENAUDEAU et al., 2012; MARTELLO et

al., 2010; VITALI et al., 2015). Com isso, diversos estudos desenvolveram índices térmicos, combinando dados meteorológicos, que são amplamente utilizados para mensurar o estado térmico e estimar a zona de conforto dos animais.

Em bovinos leiteiros, o Índice de Temperatura e Umidade (ITU, ou do inglês *THI*) é comumente utilizado para avaliar o estresse térmico, combina, em um único valor, as variáveis meteorológicas de temperatura e umidade relativa do ar (THOM, 1959; HAHN, 1999). Há diferentes fórmulas para mensurar o ITU, com maior ou menor priorização da umidade relativa do ar (BERMAN et al., 2016). No entanto, a temperatura e a umidade são expressas em unidades físicas diferentes, e a soma de ambos não possuem atributos físicos (BERMAN et al., 2016). Além disso, esta fórmula não considera dados fisiológicos dos animais dentro dos diferentes ambientes térmicos. Com isso, alguns autores apontam que os valores de ITU não são uniformemente associados aos efeitos do estresse térmico tanto para desempenho e reprodução de vacas leiteiras em clima tropical e subtropical (DIKMEN; HANSEN, 2009; BERMAN et al., 2016; SANTANA et al., 2017). Portanto, utilizar apenas o ITU como uma ferramenta para avaliar a ocorrência de estresse por calor, parece ainda ser questionável.

Os valores de ITU para identificar estresse térmico variam conforme o nível de tecnificação e modificações ambientais empregados e as raças de produção de leite, em geral para a raça Holandesa estão na faixa de 60 à 70 (DUNN et al., 2014; BRÜGEMANN et al., 2012; VITALI et al., 2015). Zimbelman et al. (2009) sugerem o limite do ITU de 68 para vacas de alta produção como início da redução da produção de leite, onde tipicamente o limite também utilizado é 72 (RAVAGNOLO et al., 2000). Há diferentes maneiras de avaliar o ITU dentro da média diária, de hora em hora, usando valores de  $T_{max}$  ou  $T_{med}$  (BERMAN et al., 2016; FODOR et al., 2018). Recentemente, estudos têm utilizado a metodologia de regressão segmentada (ou *broken-stick*) para encontrar valores críticos de ITU para a zona de conforto térmico de vacas leiteiras (PINTO et al., 2020; YAN et al., 2021); estes estudos sugerem que diferentes valores de ITU podem ocorrer conforme o estado fisiológico da vaca como, nível de produção de leite, dias em lactação, paridade e comportamento postural (em pé ou deitada). Assim, YAN et al. (2021) descreveram que vacas Holandesas em postura deitada, no início da lactação (< 60 dias em lactação), com maior produção de leite (> 39kg/dia) e paridade (> 3 partos), apresentaram aumento na frequência respiratória e temperatura retal com ITU entre 65 e 66, valores abaixo daqueles sugeridos por outros autores de 68 e 72 (DIKMAN; HANSEN, 2009; ZIMBELMAN et al., 2009; COLLIER et al., 2012).

Por outro lado, a temperatura do ar é uma mensuração fácil e eficaz para avaliar o estresse térmico em clima tropical e subtropical (DIKMEN; HANSEN, 2009). Dikmen e

Hansen (2009) avaliaram diferentes medidas meteorológicas na Flórida/EUA, clima quente e úmido. Os autores observaram que a temperatura do ar de 29,7 °C foi associada com temperatura retal de 39 °C, a qual representa a temperatura crítica para o início de hipertermia em vacas leiteiras. E, quando a temperatura do ar alcançou 35,2 °C a temperatura retal foi de 41 °C, o que representa estado de emergência para a saúde dos animais. Ainda, Martello et al. (2010) avaliaram as respostas de vacas leiteiras em clima tropical, com temperatura do ar acima do limite crítico para conforto térmico (31 °C) e constataram que a temperatura retal permaneceu dentro da faixa normal para vacas em lactação (38,6 °C). Os autores sugerem que as respostas fisiológicas dependem do ambiente noturno para recuperação da homeostasia, o nível de produção de leite das vacas e o processo adaptativo, no entanto, estudos adicionais são importantes para avaliar a interação entre todos esses fatores.

Quando vacas leiteiras são desafiadas ao estresse térmico por calor o organismo desencadeia diversos mecanismos fisiológicos com a finalidade dissipar o calor corporal (HAHN, 1999). Diversos autores têm avaliado as respostas fisiológicas dos animais a fim de determinar quais valores limites podem ser considerados como condição normal ou de estresse (SCHARF et al., 2011; TAO; DAHL, 2013; PACHECO et al., 2020). Com isso, formas de mensuração do estresse térmico são propostas na literatura, como: frequência respiratória (FR), temperatura retal (TR), temperatura de superfície de pele (TSP) e produção de leite (MARTELLO et al., 2010; SCHARF et al., 2011; AMAMOU et al., 2019; ABDELNOUR et al., 2019).

A habilidade dos animais em adaptar-se ao calor é proporcional à sua capacidade de eliminar o calor latente pela evaporação da água, o que ocorre tanto na superfície cutânea como no interior do sistema respiratório (GEBREMEDHIN; WU, 2001). O mecanismo de perda de calor por evaporação é responsável por cerca de 60% da perda total de calor. Assim, quando os animais experimentam estresse térmico, inicialmente aumentam a FR, como forma de dissipar o calor corporal adicional por meio da respiração.

A FR é uma mensuração fácil e não invasiva para avaliar o grau de estresse térmico em vacas leiteiras. É realizada, normalmente, pela contagem de movimentos da região do flanco do animal em um minuto. De modo geral, considera-se que bovinos leiteiros com frequência acima de 60 movimentos/min estão em um quadro estressor (SPIERS et al., 2004; COLLIER; DAHL; VANBAALE, 2006; AMAMOU et al., 2019). Esse valor aumenta conforme o acréscimo na temperatura do ar (BROWN-BRANDL et al., 2005). No entanto, quando a temperatura do ar continua aumentando, os mecanismos evaporativos não são mais suficientes

para a dissipação do calor, e assim ocorre a elevação da temperatura interna do animal (HAHN, 1999).

A TR representa a temperatura interna dos animais, ou seja, o balanço térmico diário (IGONO; JOHNSON et al., 1990). A TR possui um ciclo circadiano, apresentando o menor valor quando a temperatura do ar é mínima (início da manhã), e se eleva ao longo do dia, com o maior valor ao final do período vespertino (MARTELLO et al., 2010; SPIERS et al., 2018). Portanto, não é sugerido que a avaliação da TR seja realizada apenas uma vez no dia (SPIERS et al., 2018).

A TR tem sido amplamente utilizada na avaliação do conforto térmico animal. Em média é considerado que vacas leiteiras apresentem TR na faixa de 37,8 a 39,2 °C, acima desse valor há queda na ingestão de alimentos e na produção de leite (SILANIKOVE, 2000; SPIERS et al., 2004). Alguns autores têm observado que os bovinos tendem a ter diferentes valores de TR dentro de uma mesma temperatura ambiental, onde a TR permanece estável em alguns animais, ou seja, aqueles tolerantes ao calor (AMAMOU et al., 2019; PACHECO et al., 2020).

A TSP é um dos mais importantes componentes para avaliação do estado térmico animal. Assim, representa mais diretamente a condição do ambiente do que a temperatura interna do corpo, e pode ter um efeito mais direto na produtividade animal como agente de retroação (BERMAN, 2005). A superfície do animal está exposta às variações ambientais de radiação solar, temperatura, umidade e velocidade do vento. Portanto, temperaturas ambientes mais baixas e com maiores velocidades do vento, aumentam a perda de calor por convecção e, conseqüentemente, diminui a demanda de perda de calor por evaporação (BERMAN, 2005). Por outro lado, temperaturas ambiente elevadas tem sido associadas ao aumento da TSP, seguido do aumento na taxa de sudação em vacas leiteiras Holandesas (GEBREMEDHIN et al., 2010).

A termografia por infravermelho (TIV) tem sido estudada como um método não invasivo e acessível para avaliar a TSP. A TIV pode identificar pequenas mudanças no fluxo sanguíneo resultantes do aumento da TSP relacionada as condições ambientais (BROWN-BRANDL et al., 2005). Assim, temperaturas de áreas específicas do animal têm sido utilizadas para estimar os valores de TR e a FR de bovinos em estresse térmico (MARTELLO et al., 2016; SOUSA et al. 2018; PACHECO et al., 2020). Embora diferentes estudos (BROWN-BRANDL et al., 2005; SCHAEFER et al., 2012; NÄÄS et al., 2014; MARTELLO et al., 2016; SALLES et al., 2016) demonstrem o potencial no uso de imagens térmicas para inferir o conforto térmico, muitos aspectos relacionados ao uso da TIV para avaliar o estresse de animais ainda precisam ser elucidados. A região corporal mais adequada para a medida de TIV e que expresse de modo

fidedigno as trocas de calor com o ambiente ainda não são bem definidas, ou precisam ser validadas para bovinos leiteiros.

A produção de leite diária é diretamente impactada pelo clima. As vacas leiteiras que experimentam estresse térmico reduzem significativamente a sua produção de leite (SANTANA et al. 2017). Bernabucci et al. (2014) avaliaram a produção de leite durante e após períodos de extremo calor, e observaram declínio de 1kg/vaca/dia entre 2 a 4 dias após o estresse térmico. Outros autores (COWLEY et al., 2015), observaram queda de 20% na produção de leite quando as vacas foram submetidas ao estresse térmico por 7 dias. Santana et al. (2017), avaliaram vacas Holandesas em clima tropical e subtropical, e observaram queda 0,22 a 0,55kg/dia. Em cenários climáticos futuros, Fodor et al. (2018) verificaram redução de até 17% na produção de leite anual por vaca.

A resposta do estresse térmico na produção de leite parece ser mais tardia em relação a outras variáveis fisiológicas (FR, TR e TSP), e tem relação com o nível de estresse que o animal acumula durante o dia. Conforme Hansen (1994), a produção de leite é negativamente correlacionada quando a TR permanece acima de 39 °C. Recentemente, Spiers et al. (2018) não observaram diferença na produção de leite de vacas com TR acima de 39 °C, os autores argumentam pelo fato que os animais conseguem recuperar seu estado termoneutro no período noturno, quando a temperatura do ambiente diminui, ou o uso de estratégias de ventilação combinado com a baixa temperatura, reduzem os parâmetros fisiológicos.

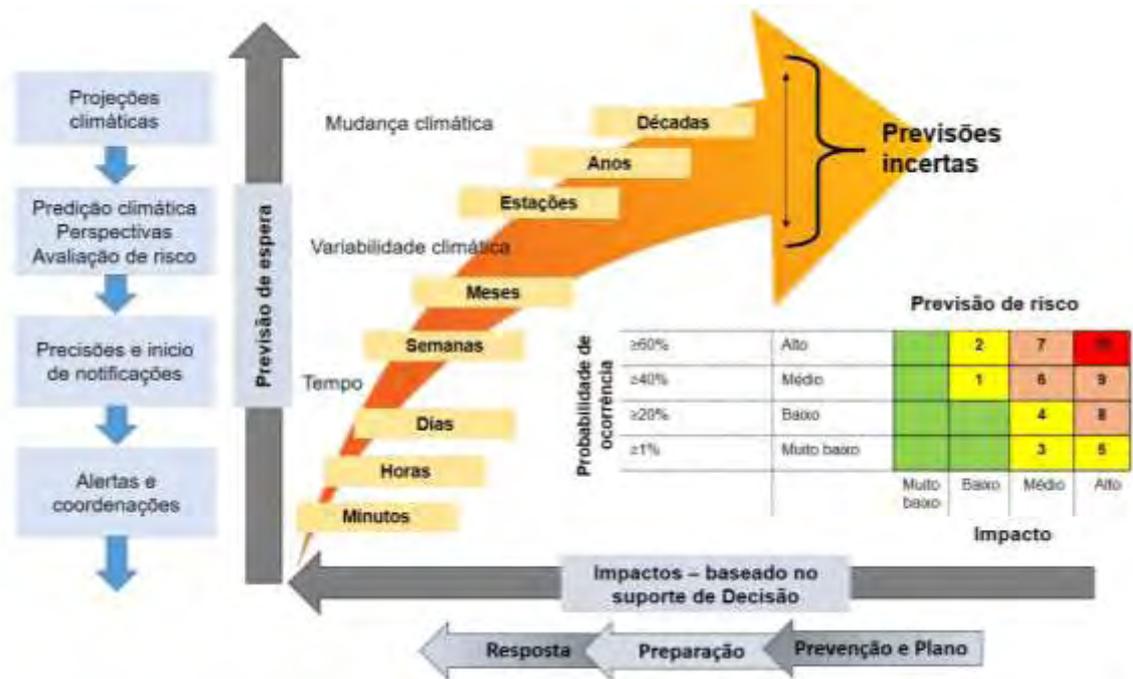
O uso de recursos climáticos nas instalações dos animais tem sido amplamente utilizado para amenizar os efeitos do estresse térmico em bovinos de leite. O emprego de ventiladores e aspersores em sistemas intensivos é uma boa ferramenta para manter a alta produtividade de vacas Holandesas (SPIERS et al., 2018; AMAMOU et al., 2019). Entretanto, as vacas Holandesas diminuem significativamente suas produções no Brasil durante os meses mais quentes do ano, indicando a baixa tolerância ao calor desses animais (SANTANA et al., 2017; NEGRI et al., 2021). Este é um problema recorrente para produtores que melhoram geneticamente o rebanho com animais de alta produção, uma vez que leva a uma deterioração na tolerância ao calor (SANTANA et al., 2017). Portanto, avaliar alternativas de prevenção aos efeitos negativos do estresse térmico com o uso de ferramentas climáticas aplicadas, tal como o manejo de risco climático, parece um bom meio para amenizar o estresse térmico em cenários climáticos futuros.

## 1.6 Importância do Manejo de Risco Climático

As projeções climáticas publicadas por pesquisadores (IPCC, 2021) são importantes para todos os ecossistemas e sistemas de produção animal. As mudanças nos padrões das variáveis climáticas, como temperatura e precipitação, podem resultar em efeitos negativos em toda a cadeia de produção de leite, que vai desde o plantio e colheita de forragem, passando pela produção e disponibilidade de grãos, até o desempenho animal (NARDONE et al., 2010). É estratégico para o setor analisar e entender como os animais reagirão às mudanças ambientais, orientando os sistemas de produção na tomada de decisões assertivas, gerindo e manejando os riscos climático.

O Manejo do Risco Climático (MRC) consiste em um processo empregado para reduzir os riscos associados com a variabilidade e mudança climática, para gerir oportunidades, na ordem de melhorar a resiliência dos sistemas sociais, econômicos e ambientais (UNFCCC, 2012). Isto inclui a coleta e análise de dados pré-existentes sobre tipos específicos de desastres que ocorreram no passado e a criação de projeção para possíveis impactos potenciais no futuro (UNFCCC, 2012). Desse modo, o MRC é um importante componente para a adaptação climática, pois está intimamente relacionado com a gestão de riscos na produção, que irá resultar em uma adaptação anterior aos impactos das mudanças climáticas (HAN et al., 2017). As atividades relacionadas ao MRC podem abordar várias fases de mitigação ou adaptação dos riscos, e como resposta: a preparação, prevenção e planejamento (Figura 8).

Figura 8 - Fases na Gestão de Riscos Climáticos e Plano Nacional de Adaptação.



Fonte: adaptado de: UNFCCC, NAP. **National Adaptation Plans: Technical Guidelines for the National Adaptation Plan Process**. In: United Nations Framework Convention on Climate Change: Bonn, Germany. 2012. 152 páginas.

As estações meteorológicas coletam dados meteorológicos e mantêm esses registros históricos, que contribuem para a compreensão de anomalias, extremos, gravidades e intensidade climáticas. Com isso, as projeções das ocorrências de perigos e tendências de mudança podem ocorrer em várias escalas temporais e espaciais, de curto prazo (dias a semanas) a longo prazo (meses a décadas) (Figura 8). Os índices de detecção de mudanças climáticas, derivados de registros históricos e projeções futuras, formam a base de informações, previsões e impactos personalizadas para a sociedade (Figura 8).

A execução do MRC em escalas nacionais dependem essencialmente de um Plano Nacional de Adaptação (PNA). O PNA emprega várias abordagens de avaliação, e uma delas é a construção de bancos de dados de impactos e vulnerabilidades climáticas, que podem ser utilizados para informar as avaliações de adaptação. Além das avaliações nacionais, as avaliações regionais também podem melhorar e compor os dados sobre os tipos de impactos climáticos esperados. O sexto relatório do IPCC (Grupo de Trabalho I, 2021), fornece resultados climáticos regionais, que podem orientar os esforços nacionais em relação as mudanças climáticas observadas e projetadas (disponível em: <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>).

Neste contexto, o Brasil é caracterizado como um país continental, devido a sua grande área territorial (~8.515.767 km<sup>2</sup>), apresentando uma ampla diversidade ambiental e climática,

além de oferecer extensivas áreas agricultáveis. Desse modo, o PNA deve ser desenvolvido em escalas regionais, a fim de obter a percepção das mudanças no clima e orientar os produtores rurais a curto e longo prazo, contribuindo para o estabelecimento de estratégias de gestão do sistema produtivo. Para isto, é necessário um esforço conjunto entre agentes e políticas públicas, instituições e produtores rurais.

O gerenciamento dos efeitos do estresse térmico em bovinos leiteiros é um fator chave no planejamento de estratégias para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas (AMAMOU et al., 2018). O estado de conforto térmico e produção animal tem sido foco de novos estudos para obtenção de sistemas de produção sustentáveis, resilientes e lucrativos na cadeia produtiva. Recentes projeções climáticas indicam que todas as regiões do Brasil poderão ser afetadas pela mudança no padrão da temperatura do ar e precipitação (BITENCOURT et al., 2020; COSTA et al., 2020), inclusive as áreas específicas de produção de leite. Assim, a gestão de risco climático na pecuária pode ser o primeiro passo para uma adaptação planejada e eficiente, evitando falhas no processo de adaptação (HAN et al., 2017).

Nos últimos anos, o MRC tem sido amplamente adotado por pesquisadores e agricultores como uma forma de reduzir o impacto climático sobre o desenvolvimento agrícola, tais como antecipar ou atrasar épocas de plantio e colheita conforme a precipitação local (HAN et al., 2017; AMAMOU et al., 2018; HANSEN et al., 2019). Na pecuária leiteira, informações de MRC ainda são escassas, há pouca abordagem sobre os impactos dos eventos extremos climáticos, especialmente ondas de calor, que podem prejudicar a produção leiteira e as respostas fisiológicas dos animais. Neste caso, é válido ressaltar que a expressão genética de raças de alta produção foi prejudicada ao longo do processo de seleção genética, e a capacidade de vacas leiteiras de alto potencial em lidar com condições climáticas adversas é ainda questionável.

Os cenários climáticos futuros tendem a agravar as condições de estresse térmico, prejudicando a produtividade (FODOR et al., 2018) e sustentabilidade dos sistemas de produção (AMAMOU et al., 2018). Assim, os desafios para a indústria de laticínios incluem distribuir leite ao consumidor à preços competitivos, enquanto a produção está sujeita a mudanças causadas pelos padrões climáticos, dinâmica do mercado (oferta/demanda) e nos preços (FAO, 2020). Ao mesmo tempo, há uma ênfase direcionada à sustentabilidade, onde as pessoas estão preocupadas com o meio ambiente, o bem-estar e a qualidade dos alimentos (FAO, 2018). E finalmente, tanto o consumo quanto a produção de leite crescem consideravelmente em todo o mundo (FAO, 2018).

Estudar e avaliar cenários de ondas de calor para a aplicação de um método eficaz de MRC, capaz de garantir uma boa eficiência da produção de leite, é um desafio a ser executado. Este processo requer a disponibilidade de grande volume de dados climáticos e modelos climáticos futuros, mão-de-obra qualificada para avaliações, operação computacional e planejamento assertivo. Portanto, as avaliações contínuas e o monitoramento das tendências climáticas são ferramentas importantes à tomada de decisão, para aprimorar ou ajustar a gestão de riscos e/ou ações de adaptação em locais, países ou regiões específicas.

## REFERÊNCIAS

ABDELNOUR, S. A. et al. **Stress biomarkers and proteomics alteration to thermal stress in ruminants: A review.** Journal of Thermal Biology, v. 79, p. 120-134, 2019.

AMAMOU, H. et al. **Thermotolerance indicators related to production and physiological responses to heat stress of holstein cows.** Journal of thermal biology, v. 82, p. 90-98, 2019.

BECK, H. E. et al. **Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution.** Scientific data, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2018.

BERMAN, A. **Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows.** Journal of Animal Science, v. 83, n. 6, p. 1377-1384, 2005.

BERMAN, A. et al. **A comparison of THI indices leads to a sensible heat-based heat stress index for shaded cattle that aligns temperature and humidity stress.** International Journal of Biometeorology, v. 60, n. 10, p. 1453-1462, 2016.

BERNABUCCI, U. et al. **Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants.** animal, v. 4, n. 7, p. 1167-1183, 2010.

BERNABUCCI, U. et al. **The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle.** Journal of Dairy Science, v. 97, n. 1, p. 471-486, 2014.

BITENCOURT, D. P. et al. **The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016.** International Journal of Climatology, v. 40, n. 4, p. 2464-2478, 2020.

BROWN-BRANDL, T. M. et al. **Analyses of thermoregulatory responses of feeder cattle exposed to simulated heat waves.** International Journal of Biometeorology, v. 49, n. 5, p. 285-296, 2005.

BRÜGEMANN, K. et al. **Defining and evaluating heat stress thresholds in different dairy cow production systems.** Archiv Tierzucht, v. 55, p. 13-24, 2012.

CARABAÑO, M. et al. **Modeling heat stress under different environmental conditions.** Journal of Dairy Science, v. 99, n. 5, p. 3798-3814, 2016.

CARABAÑO, M. J. et al. **Selecting for heat tolerance.** Animal Frontiers, v. 9, n. 1, p. 62-68, 2019.

COLLIER, R. J.; DAHL, G. E.; VANBAALE, M. J. **Major advances associated with environmental effects on dairy cattle.** Journal of Dairy Science, v. 89, n. 4, p. 1244-1253, 2006.

COLLIER, R. J. et al. **Quantifying heat stress and its impact on metabolism and performance.** Department of Animal Sciences University of Arizona, v. 68, 2012.

COSTA, R. L. et al. **Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014.** Weather and Climate Extremes, p. 100254, 2020.

COUMOU, D.; RAHMSTORF, S. **A decade of weather extremes.** Nature climate change, v. 2, n. 7, p. 491-496, 2012.

COWLEY, F. C. et al. **Immediate and residual effects of heat stress and restricted intake on milk protein and casein composition and energy metabolism.** Journal of Dairy Science, v. 98, n. 4, p. 2356-2368, 2015.

DIKMEN, S.; HANSEN, P. J. **Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment?** Journal of Dairy Science, v. 92, n. 1, p. 109-116, 2009.

DUNN, R. J. H. et al. **Analysis of heat stress in UK dairy cattle and impact on milk yields.** Environmental research letters, v. 9, n. 6, p. 064006, 2014.

FAO and GDP. **Climate change and the global dairy cattle sector – The role of the dairy sector in a low-carbon future.** Rome. 36 p., 2018. (Disponível em: <https://www.fao.org/3/CA2929EN/ca2929en.pdf>. Data de acesso: 25/03/2022).

FLAGG, J. A.; KIRCHHOFF, C. J. **Context matters: Context-related drivers of and barriers to climate information use.** *Climate Risk Management*, v. 20, p. 1-10, 2018.

FODOR, N. et al. **Spatially explicit estimation of heat stress-related impacts of climate change on the milk production of dairy cows in the United Kingdom.** *PloS One*, v. 13, n. 5, p. e0197076, 2018.

GAULY, M.; AMMER, S. **Challenges for dairy cow production systems arising from climate changes.** *animal*, v. 14, n. S1, p. s196-s203, 2020.

GEBREMEDHIN, K. G.; WU, B. **A model of evaporation cooling of the wet skin surface and fur layer.** *Journal of Thermal Biology*, v. 26, p. 537–545, 2001.

GEBREMEDHIN, K. G. et al. **Physiological responses of dairy cows during extended solar exposure.** *Transactions of the ASABE*, v. 53, n. 1, p. 239-247, 2010.

GEIRINHAS, J. L. et al. **Characterizing the atmospheric conditions during the 2010 heatwave in Rio de Janeiro marked by excessive mortality rates.** *Science of The Total Environment*, v. 650, p. 796-808, 2019.

GUO, Y. et al. **Quantifying excess deaths related to heatwaves under climate change scenarios: A multicountry time series modelling study.** *PLoS medicine*, v. 15, n. 7, p. e1002629, 2018.

HAHN, G. L. **Dynamic responses of cattle to thermal heat loads.** *Journal of Animal Science*, v. 77, n. suppl\_2, p. 10-20, 1999.

HAN, E.; INES, A. V.; BAETHGEN, W. E. **Climate-Agriculture-Modeling and Decision Tool (CAMDT): A software framework for climate risk management in agriculture.** *Environmental Modelling & Software*, v. 95, p. 102-114, 2017.

HANSEN, P. J. **Causes and possible solutions to the problem of heat stress in reproductive management of dairy cows.** In: *Proceedings of the National Reproductive Symposium*, 1994. p. 22-23.

HANSEN, P. J. **Physiological and cellular adaptations of zebu cattle to thermal stress.** *Animal Reproduction Science*, v. 82, p. 349-360, 2004.

HAYLOCK, M.R. et al. **Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature.** *Journal of Climate*. v. 19, p. 1490–1512, 2006.

IGONO, M. O.; JOHNSON, H. D. **Physiologic stress index of lactating dairy cows based on diurnal pattern of rectal temperature.** *Biological Rhythm Research*, v. 21, n. 4, p. 303-320, 1990.

IPCC, 2021. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press. *In Press*.

MARENGO, J. A. et al. **Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region.** *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 90, n. 2, p. 1973-1985, 2018.

MARENGO, J. A.; CAMARGO, C. C. **Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002.** *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 28, n. 7, p. 893-904, 2008.

MARTELLO, L. S. et al. **Alternative body sites for heat stress measurement in milking cows under tropical conditions and their relationship to the thermal discomfort of the animals.** *International Journal of Biometeorology*, v. 54, n. 6, p. 647-652, 2010.

MARTELLO, L. S. et al. **Infrared thermography as a tool to evaluate body surface temperature and its relationship with feed efficiency in *Bos indicus* cattle in tropical conditions.** *International Journal of Biometeorology*, v. 60, n. 1, p. 173-181, 2016.

MATTHEWS, T. K. R.; WILBY, R. L.; MURPHY, C. **Communicating the deadly consequences of global warming for human heat stress.** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 114, n. 15, p. 3861-3866, 2017.

MAZDIYASNI, O. et al. **Heat wave intensity duration frequency curve: A multivariate approach for hazard and attribution analysis.** Scientific reports, v. 9, n. 1, p. 1-8, 2019.

McELROY, S. et al. **Defining heat waves using sub-regional meteorological data to maximize benefits of early warning systems to population health.** Science of the total environment, p. 137678, 2020.

NÄÄS, I. A.; GARCIA, R. G.; CALDARA, F. R. **Infrared thermal image for assessing animal health and welfare.** JABB-Online Submission System, v. 2, n. 3, p. 66-72, 2014.

NARDONE, A. et al. **Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems.** Livestock Science, v. 130, n. 1-3, p. 57-69, 2010.

NEGRI, R. et al. **Selection for test-day milk yield and thermotolerance in Brazilian Holstein cattle.** Animals, v. 11, n. 1, p. 128, 2021.

OLIVEIRA, F. N. M. D. et al. **Inferência de mudanças climáticas na região de Manaus (AM) usando dados geotermiais e meteorológicos.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 24, n. 2, 169-187, 2006.

PACHECO, V. M. et al. **Thermal imaging combined with predictive machine learning based model for the development of thermal stress level classifiers.** Livestock Science, v. 241, p. 104244, 2020.

PERKINS-KIRKPATRICK, S. E.; GIBSON, P. B. **Changes in regional heatwave characteristics as a function of increasing global temperature.** Scientific Reports, v. 7, n. 1, p. 1-12, 2017.

PINTO, S. et al. **Critical THI thresholds based on the physiological parameters of lactating dairy cows.** Journal of Thermal Biology, v. 88, p. 102523, 2020.

RAGONE, F.; WOUTERS, J.; BOUCHET, F. **Computation of extreme heat waves in climate models using a large deviation algorithm.** Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 115, n. 1, p. 24-29, 2018.

RAVAGNOLO, O; MISZTAL, I; HOOGENBOOM, G. **Genetic component of heat stress in dairy cattle, development of heat index function.** Journal of Dairy Science, v. 83, n. 9, p. 2120-2125, 2000.

RENAUDEAU, D. et al. **Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production.** Animal: an international journal of animal bioscience, v. 6, n. 5, p. 707, 2012.

RHOADS, M. L. et al. **Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism, and aspects of circulating somatotropin.** Journal of dairy science, v. 92, n. 5, p. 1986-1997, 2009.

ROBINSON, P. J. **On the definition of a heat wave.** Journal of Applied Meteorology, v. 40, n. 4, p. 762-775, 2001.

RUSSO, S. et al. **Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world.** Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 119, n. 22, p. 12.500-12.512, 2014.

RUSTICUCCI, M. et al. **Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires.** Theoretical and Applied Climatology, v. 124, n. 3-4, p. 679-689, 2016.

SALLES, M. S. V. et al. **Mapping the body surface temperature of cattle by infrared thermography.** Journal of Thermal Biology, v. 62, p. 63-69, 2016.

SANIN, Y. L.; CABRERA, A. M. Z.; MORALES, A. M. T. **Adaptive responses to thermal stress in mammals.** Revista de Medicina Veterinária, n. 31, p. 121-135, 2016.

SANTANA, M. L. et al. **Genetics of heat tolerance for milk yield and quality in Holsteins.** animal, v. 11, n. 1, p. 4-14, 2017.

SCHAEFER, A. L. et al. **The non-invasive and automated detection of bovine respiratory disease onset in receiver calves using infrared thermography.** Research in Veterinary Science, v. 93, n. 2, p. 928-935, 2012.

SCHARF, B. et al. **Determinants of bovine thermal response to heat and solar radiation exposures in a field environment.** International Journal of Biometeorology, v. 55, n. 4, p. 469-480, 2011.

SCHÜTZ, K. E. et al. **Dairy cattle prefer shade over sprinklers: Effects on behavior and physiology.** Journal of Dairy Science, v. 94, n. 1, p. 273-283, 2011.

SEAGER, R. et al. **Climate variability and change of Mediterranean-type climates.** Journal of Climate, v. 32, n. 10, p. 2887-2915, 2019.

SEGNALINI, M. et al. **Temperature humidity index scenarios in the Mediterranean basin.** International Journal of Biometeorology, v. 57, n. 3, p. 451-458, 2013.

SEN, Z. **Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy.** Springer Science & Business Media, 2008.

SILANIKOVE, N. **Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants.** Livestock Production Science, v. 67, n. 1-2, p. 1-18, 2000.

SOERENSEN, D. D.; PEDERSEN, L. J. **Infrared skin temperature measurements for monitoring health in pigs: a review.** Acta Veterinaria Scandinavica, v. 57, n. 1, p. 5, 2015.

SOUSA, R. V. de. et al. **Predictive model based on artificial neural network for assessing beef cattle thermal stress using weather and physiological variables.** Computers and Electronics in Agriculture, v. 144, p. 37-43, 2018.

SPIERS, D. E. et al. **Use of physiological parameters to predict milk yield and feed intake in heat-stressed dairy cows.** Journal of Thermal Biology, v. 29, n. 7-8, p. 759-764, 2004.

TAO, S. et al. **Impact of heat stress on lactational performance of dairy cows.** Theriogenology, v. 150, p. 437-444, 2020.

TAO, S.; DAHL, G. E. **Invited review: heat stress effects during late gestation on dry cows and their calves.** Journal of Dairy Science, v. 96, n. 7, p. 4079-4093, 2013.

THOM, E. C. **The discomfort index.** Weatherwise, v. 12, n. 2, p. 57-61, 1959.

THORNTON, P. K. et al. **Climate variability and vulnerability to climate change: a review.** *Global Change Biology*, v. 20, n. 11, p. 3313-3328, 2014.

UNFCCC, NAP. **National Adaptation Plans: Technical Guidelines for the National Adaptation Plan Process.** In: United Nations Framework Convention on Climate Change: Bonn, Germany. 2012. p. 1-152.

VAN DER KOLK, J. H. **The bovine pituitary-adrenocortical axis and milk yield.** *Veterinary Quarterly*, v. 12, n. 2, p. 114-120, 1990.

VITALI, A. et al. **The effect of heat waves on dairy cow mortality.** *Journal of Dairy Science*, v. 98, n. 7, p. 4572-4579, 2015.

WALTHER, G. et al. **Consensus on climate change.** *Trends in Ecology & Evolution*, v. 20, n. 12, p. 648-649, 2005.

WANG, C. **Three-ocean interactions and climate variability: a review and perspective.** *Climate Dynamics*, v. 53, n. 7, p. 5119-5136, 2019.

WEST, J. W.; MULLINIX, B. G.; BERNARD, J. K. **Effects of hot, humid weather on milk temperature, dry matter intake, and milk yield of lactating dairy cows.** *Journal of Dairy Science*, v. 86, n. 1, p. 232-242, 2003.

WEST, J. W. **Effects of heat-stress on production in dairy cattle.** *Journal of Dairy Science*, v. 86, n. 6, p. 2131-2144, 2003.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. **Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013).** *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.

YAN, G. et al. **The effects of cow-related factors on rectal temperature, respiration rate, and temperature-humidity index thresholds for lactating cows exposed to heat stress.** *Journal of Thermal Biology*, v. 100, p. 103041, 2021.

ZIMBELMAN, R. B. et al. **A re-evaluation of the impact of temperature humidity index (THI) and black globe humidity index (BGHI) on milk production in high producing dairy cows.** In: Proceedings of the 24th Southwest Nutrition and Management conference. 2009. p. 158-169.

## 2 CAPÍTULO II. MUDANÇAS NO PADRÃO DAS ONDAS DE CALOR E IMPACTOS EM VACAS LEITEIRAS.

Este capítulo faz parte do artigo “*Changes in the pattern of heat waves and the impacts on Holstein cows in a subtropical region.*” enviado para publicação na *International Journal of Biometeorology*.

### 2.1 Introdução

Há uma preocupação mundial com as mudanças nos padrões da temperatura global e com as novas projeções climáticas. O sexto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) destaca que, já no início de 2030, a temperatura média global deve ultrapassar o nível do aquecimento de 1,5 °C quando comparado aos níveis pré-industriais (IPCC, 2021). O Brasil, que está localizado na região tropical do globo, pode ser mais susceptível ao aumento da temperatura média do ar, podendo variar entre 2 e 5 °C até o final do século atual (IPCC, 2021). Pesquisas têm demonstrado o aumento de eventos extremos de calor, como as ondas de calor (RUSSO et al. 2014; GUO et al. 2018) e, na última década, o Brasil tem sido acometido fortemente pelo aumento da frequência, duração e intensidade das ondas de calor (BITENCOURT et al. 2020; COSTA et al. 2020).

As definições atribuídas às ondas de calor são amplas e variam de acordo com os objetivos dos estudos (PERKINS; ALEXANDER, 2013) e, portanto, não há uma metodologia única para sua definição e identificação. Dentre as metodologias para avaliar ondas de calor, o método em percentil 90 tem sido amplamente utilizado e bem descrito por diversos autores, incluindo trabalhos com animais (VITALI et al., 2015; GUO et al., 2018; COSTA et al., 2020). O uso de índices para ondas de calor tem se destacado (PERKINS; ALEXANDER, 2013) e o *Climate Changes Indices*, desenvolvido pelo *Expert Team on Climate Change Detection and Indices*, tem a capacidade de abranger diferentes regiões do mundo, e tem sido essencial para entender a extensão espacial e variabilidade climática regional relacionadas às ondas de calor. Para entender melhor, essas análises utilizam banco de dados climáticos com mais de 30 anos, sendo essencial para caracterizar o padrão climático local, considerando a variabilidade natural do clima (BITENCOURT et al., 2020) bem como no impacto das ondas de calor nos sistemas de produção animal.

Em climas tropicais, as vacas Holandesas são expostas ao estresse térmico a maior parte do ano, aumentando a preocupação com o bem-estar e redução da produção de leite

(MARTELLO et al., 2010; DALTRO et al., 2017; SANTANA et al., 2017; MBUTHIA et al., 2021). A raça holandesa tem sido amplamente utilizada para aumentar a produtividade nas fazendas leiteiras brasileiras, incluindo o tradicional cruzamento Gir × Holandês (DA COSTA et al., 2015). Assim, as vacas Holandesas estão presente no Brasil há muitos anos, porém, ainda são observadas significativas perdas produtivas e reprodutivas quando esses animais experimentam estresse térmico (BARUSELLI et al., 2020). Alguns estudos demonstraram perda de produção de leite de 18 (GARCIA et al., 2015) e 16% (NEGRI et al., 2021) quando os animais passaram por estresse térmico. Além disso, a última década foi a mais quente já registrada na história (IPCC, 2021) e levanta questões sobre a tolerância ao calor das vacas Holandesas em clima subtropical.

Os efeitos deletérios do estresse térmico em vacas leiteiras têm sido amplamente estudados, por meio do monitoramento da temperatura do ar e de diversas fórmulas do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) (WEST, 2003; SPIERS et al. 2004; ROADS et al. 2009). Embora o uso da temperatura do ar e ITU sejam as metodologias mais utilizadas, há uma lacuna na utilização da combinação dos dados climáticos com dados fisiológicos dos animais em pesquisas considerando os extremos climáticos. Assim, sugere-se que dados diários de temperatura mínima (Tmin) e máxima (Tmax) do ar, e indicativos do estresse térmico, como frequência respiratória (FR), temperatura retal (TR) e a produção de leite (PL), podem ser avaliados de acordo com a ocorrência de índices de ondas de calor, melhorando a forma de entender a resposta termorregulatória dos animais sob ambiente estressante. Diversos autores têm estudado quais os valores limites da temperatura ambiental e dos parâmetros fisiológicos (especialmente FR e TR) que podem ser considerados como uma condição normal ou de estresse térmico (MARTELLO et al., 2010; DA COSTA et al. 2015; DALTRO et al. 2017; FERRAZZA et al. 2017; PACHECO et al. 2020), mas ainda é pouca elucidada essa questão durante as ondas de calor.

Entender como as vacas leiteiras Holandesas respondem ao estresse térmico por meio das características fisiológicas e produtivas, e como identificar as respostas adaptativas durante as ondas de calor, além do padrão das ondas de calor ao longo dos anos, podem auxiliar no desenvolvimento de estratégias para mitigar o impacto do calor extremo sobre os animais e sua produção. Neste contexto, a hipótese deste estudo foi que a intensidade e duração de ondas de calor causam diferentes respostas fisiológicas e produtivas em vacas lactantes. Para tal, o objetivo inicial foi (i) estudar a mudança no padrão de temperatura do ar e caracterizar as ondas de calor por meio de Índices de Mudanças Climáticas e em seguida (ii) avaliar o efeito das

ondas de calor no ambiente produtivo, nas condições fisiológicas e respostas produtivas de vacas Holandesas em clima subtropical.

## 2.2 Material e métodos

Os procedimentos experimentais foram aprovados pelo Comitê de Ética Animal (protocolo 4859201219) da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), de acordo com a Lei Federal Brasileira.

### *Área de estudo*

O município de Pirassununga está localizado a uma latitude 21° 59' 46" Sul, longitude 47° 25' 33" Oeste e altitude de 627 metros, na região sudeste do Brasil. Conforme a classificação climática de Köppen-Geiger o município possui clima Cwa, caracterizado por ser subtropical/tropical de altitude, com temperatura média anual variando entre 23,1 °C no verão a 16,9 °C no inverno.

### *Dados climáticos*

No presente estudo foram usados dois bancos de dados de temperaturas do ar: o Prediction of Worldwide Energy Resources (NASA POWER) e Xavier et al. (2016). O primeiro foi usado para estudar, avaliar e caracterizar o padrão da T<sub>min</sub> e T<sub>max</sub> e dias em ondas de calor (série histórica de temperatura 1981-2021) e o segundo (série histórica de temperatura 1981-2013) foi usado para validar os dados do modelo NASA POWER, descrito a seguir.

Dados diários de T<sub>min</sub> e T<sub>max</sub> do ar da região de Pirassununga-SP (período de 1981-2021) foram extraídos do banco de dados do NASA POWER (disponível em: <https://power.larc.nasa.gov>). Tais dados oferecem duas características únicas: são globais e contínuos no tempo. Os dados meteorológicos do NASA POWER são derivados do modelo de *Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications* (MERRA-2) e *GMAO Forward Processing - Instrument Teams* (FP-IT) GEOS 5.12.4 produzidos em tempo quase real. Os dados são fornecidos em uma grade global de resolução espacial de 0.5° de latitude/longitude, permitindo análises em escalas espaciais regionais (MARZOUK, 2021). A base de dados NASA POWER demonstrou reproduzir os dados meteorológicos (T<sub>min</sub> e T<sub>max</sub>) satisfatoriamente para o território brasileiro (MONTEIRO et al. 2018). Para a validação dos

dados climáticos provenientes do modelo NASA POWER na região de Pirassununga-SP foram usados dados diários de Tmin e Tmax observados de Xavier et al. (2016) (período de 1981-2013). Os dados de Xavier et al. (2016) são derivados de observações de estações meteorológicas do Brasil interpoladas para uma grade regular com uma resolução horizontal de 0.25° em latitude/longitude (disponível em: <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA>). Medidas de adequação incluindo o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (equação 1), erro quadrático médio (RMSE) (equação 2), erro quadrático médio normalizado (NRMSE) (equação 3), Viés médio (MB) (equação 4) e índice de concordância de Willmott (d) (equação 5) foram usados para avaliar o desempenho do conjunto de dados de temperatura da NASA POWER em comparação os dados observados de Xavier et al. (2016).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (3)$$

$$MB = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (4)$$

$$d = \frac{1 - (\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2)}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (5)$$

Onde  $O_i$  é o valor observado;  $P_i$  é o valor predito;  $\bar{O}$  é a média do valor observado;  $\bar{P}$  é a média do valor predito.

#### *Análise de tendência da temperatura do ar*

Para estudar tendências no padrão da Tmin e Tmax e dias em ondas de calor, o método não-paramétrico de Mann-Kendall foi utilizado para a série histórica de 1981-2021, do modelo da NASA POWER. Esse método é indicado para analisar tendências em séries temporais climatológicas, por ser robusto, sequencial, não requer distribuição normal dos dados e pouco influenciado por mudanças abruptas ou séries não homogêneas (SALVIANO et al. 2016). O

coeficiente de correlação Kendall  $\tau$  (tau) foi determinado (COSTA et al. 2020), o qual é uma medida de associação para variáveis ordinais não influenciada por variância ou *outliers*. Seguindo, o teste de Pettitt foi utilizado para verificar a quebra na homogeneidade da série 1981-2021. Este também é um teste não paramétrico que utiliza a estatística de Mann-Whitney, a qual verifica se duas amostras  $x_1, \dots, x_t$  e  $x_{t+1}, \dots, x_N$ , são da mesma população ou não. Os dados foram avaliados usando o *software* R.

### *Índices de onda de calor*

O *software* RClindex (1.0) foi utilizado para calcular e indicar os índices de ondas de calor através de uma abordagem *bootstrap* proposta por Zhang e Yang (2004). Os eventos de ondas de calor para a série de dados de 1981–2021 foram determinados com base na análise dos dados diários de temperatura mínima e máxima, conforme a Tabela 1. No total, foram utilizados seis Índices de Mudanças Climáticas, desenvolvidos pelo *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI) ([http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml)). Por meio do *software* RClindex é possível identificar o *sloot* e a significância das regressões lineares, que foram consideradas como possível mudança no padrão das ondas de calor quando estatisticamente significantes ( $P < 0,05$ ) (ZHANG; YANG, 2004).

Tabela 1 - Índices de mudança climática para análise da temperatura máxima (Tmax) e temperatura mínima (Tmin) diária (série 1981-2021).

| Índice | Nome                       | Definição   | Unidade |
|--------|----------------------------|---|---------|
| SU     | Dias quentes               | Contagem anual de dias com Tmax > 25 °C.  | Dias    |
| TR     | Noite tropical             | Contagem anual de dias com Tmin > 20 °C.  | Dias    |
| TX90P  | Dias de calor              | Porcentagem de dias quando a Tmax >90 percentil.<br>TX90P é o percentil 90 do dia do calendário centrado em uma janela de 5 dias. | % Dias  |
| TN90P  | Noites de calor            | Porcentagem de dias quando Tmin >90 percentil.<br>TN90P é o percentil 90 do dia do calendário centrado em uma janela de 5 dias.   | % Dias  |
| TX35   | Dias muito quentes         | O limite é fixado em 35 °C para Tmax.   | Dias    |
| WSDI   | Índice de duração de calor | Contagem anual de dias com 6 consecutivos dias quando a Tmax >90 percentil.   | Dias    |

Própria autoria.

### Dados dos animais

Os dados fisiológicos e de produção de leite das vacas foram coletados durante três verões dos anos 2018, 2019 e 2021 (Tabela 2), obtidos do rebanho leiteiro da FZEA/USP, Pirassununga, São Paulo. As vacas Holandesas lactantes, primíparas e multíparas, saudáveis, sem histórico de mastite clínica, claudicações, secas com 60 dias na última lactação, com parto normal e fecundadas (156,1 ± 114,4 dias em lactação) permaneceram alojadas em sistema *free-stall* equipado com ventiladores ligados 24h. A alimentação e a ordenha era realizada duas vezes ao dia, às 7h e 15h. A dieta dos animais foi composta por silagem de milho (30%), feno de Tifton 85 (10%) e concentrado (60%), que continha 76% de nutrientes digestíveis totais e 18% de proteína bruta. A dieta foi oferecida com 20% de sobra de cocho.

A FR e TR foram coletadas durante os meses de janeiro, fevereiro e março, totalizando 70 dias (20 dias de 2018, 20 dias de 2019 e 30 dias de 2021) às 5, 13 e 19h. Inicialmente, a FR foi determinada contando o tempo para cada dez movimentos do flanco, e o número de movimentos por minuto foi calculado. Em seguida, a TR foi registrada manualmente com termômetro digital (VMDT01, Viomed, China). A PL foi registrado o total das duas ordenhas (kg/dia).

Tabela 2 - Dados descritivos para dias em lactação (DEL), idade, paridade e produção de leite das vacas experimentais durante os três anos de coleta.

| Item                   | Ano  | Média ± Desvio Padrão |
|------------------------|------|-----------------------|
| DEL (dias)             | 2018 | 242,80 ± 90,28        |
|                        | 2019 | 361,95 ± 129,57       |
|                        | 2021 | 216,02 ± 179,11       |
| Idade (meses)          | 2018 | 53,00 ± 16,34         |
|                        | 2019 | 63,22 ± 17,41         |
|                        | 2021 | 49,10 ± 18,93         |
| Paridade (número)      | 2018 | 2,37 ± 1,0            |
|                        | 2019 | 2,37 ± 1,0            |
|                        | 2021 | 2,29 ± 1,4            |
| Produção de leite (kg) | 2018 | 21,50 ± 6,61          |
|                        | 2019 | 15,93 ± 4,01          |
|                        | 2021 | 20,36 ± 6,26          |

Própria autoria.

Assim, o banco de dados inicial foi composto de um total de 5.883 dados fisiológicos. A partir disso, os animais foram classificados conforme os dias em lactação (DEL), divididos em sete classes definidas como 1 (1 a 30), 2 (31 a 60), 3 (61 a 90), 4 (91 a 120), 5 (121 a 180), 6 (181 a 300) e 7 (>301). As vacas também foram categorizadas por paridade como primeiro, segundo e terceiro ou mais partos. Ao final, animais com dados ausentes ou falhas foram removidos do banco, totalizando 4.048 dados de FR e TR de 52 vacas.

#### *Análise estatística*

A avaliação dos índices de ondas de calor nos anos 2018, 2019 e 2021, período em que os dados fisiológicos foram coletados, foi identificado a ocorrência dos índices TX90P e TX35 (Tabela 1). A relação entre os dados de FR e TR com os índices foram investigados usando o procedimento MIXED do SAS (versão 9.4). Todas as variáveis e suas interações foram incluídas no modelo inicial para ajustar a melhor representação das respostas de FR e TR durante ondas de calor. Em seguida, foi realizada uma seleção manual e as variáveis com valores de  $p < 0,05$  foram incluídas no modelo final. Dentre todas as estruturas de erros investigadas, a estrutura de simetria composta (CS) foi a melhor de acordo com o critério de

informação bayesiano (BIC). O modelo final usado para descrever a relação entre as respostas de FR e TR com os índices TX90P e TX35 foi:

$$Y_{ijklmno} = HWC_i + dia_j + DEL_k + lact_l + HWC_i \times dia_j + HWC_i \times DEL_k + HWC_i \times lact_l + ano(parto_{mês})_m + animal(hora)_n + animal(ano \times parto_{mês} \times parto_{ano} \times lact_l)_o + e_{ijklmno} \quad (6)$$

Onde  $Y_{ijklmno}$  é a mensuração fisiológica de FR ou TR;  $HWC_i$  é o efeito fixo do índice de ondas de calor TX90P ou TX35;  $dia_j$  é o efeito fixo da duração da onda de calor dentro do índice TX90P ou TX35;  $DEL_k$  é o efeito fixo das classes de dias em lactação;  $lact_l$  é o efeito fixo das classes de paridade;  $HWC_i \times dia_j$ ,  $HWC_i \times DEL_k$  e  $HWC_i \times lact_l$  são os efeitos fixo de interação;  $ano(parto_{mês})_m$  é o efeito aleatório do ano aninhado ao mês do parto da vaca;  $animal(hora)_n$  é o efeito aleatório da vaca aninhada a hora da coleta (5, 13 e 19h);  $animal(ano \times parto_{mês} \times parto_{ano} \times lact_l)$  é o efeito aleatório da vaca aninhada as interações entre o ano de coleta (2018, 2019 e 2021), mês do parto, ano do parto e classe de paridade; e  $e_{ijklmno}$  é o efeito residual aleatório. Os resíduos foram testados quanto à normalidade. As médias dos mínimos quadrados foram estimadas para os dias nos índices de onda de calor, TX90P ou TX35, e as diferenças foram testadas no LSMEANS considerando significativo  $p < 0,05$  pelo teste de Fisher.

A queda da produção de leite em relação aos dias de onda de calor identificados com os índices TX90P ou TX35 foi testada usando o procedimento GLIMMIX do SAS (versão 9.4) e as diferenças foram testadas no LSMEANS considerando significativo  $p < 0,05$  pelo teste de Fisher. A queda de produção de leite diária por vaca foi calculada a partir da fórmula (queda na produção de leite = produção de leite atual – produção de leite dia anterior). Similar a equação (6), o modelo final para verificar a queda na produção de leite foi:

$$Y_{ijklm} = dia_i + DEL_j + lact_k + dia_i \times DEL_j + dia_i \times lact_k + parto_{ano}(parto_{mês})_l + animal(ano \times parto_{mês} \times parto_{ano} \times lact_k)_m + e_{ijklm} \quad (7)$$

Onde  $Y_{ijklm}$  representa a queda de produção de leite, e as demais variáveis estão descritas na equação (6).

## 2.3 Resultados

### *Análise da mudança no padrão da temperatura do ar e caracterização das ondas de calor*

O modelo NASA POWER teve um desempenho aceitável na validação com os dados observados de estações (XAVIER et al. 2016). As medidas de adequação de  $R^2$ , RMSE, NRMSE, Viés e índice de concordância de Willmott, estão apresentados na Tabela 3. Os resultados demonstram que o modelo NASA POWER foi capaz de representar os dados de T<sub>min</sub> e T<sub>max</sub> da área de estudo. Embora a T<sub>max</sub> tenha apresentado erros um pouco superior a T<sub>min</sub> (RMSE=2,27 °C e  $R^2=0,60$ ) o viés foi baixo (0,27) e o índice de concordância “d” foi de 0,87, indicando que o modelo representou o comportamento e a sazonalidade da temperatura do ar na região de estudo. Por causa dessa similaridade entre os dados de temperatura do ar de Xavier et al. (2016) e NASA POWER, foi possível utilizar o modelo NASA POWER para as análises deste trabalho.

Tabela 3 - Medidas de adequação entre os dados do modelo NASA POWER versus dados meteorológicos observados (XAVIER et a. 2016) para temperatura mínima (T<sub>min</sub>) e temperatura máxima (T<sub>max</sub>).

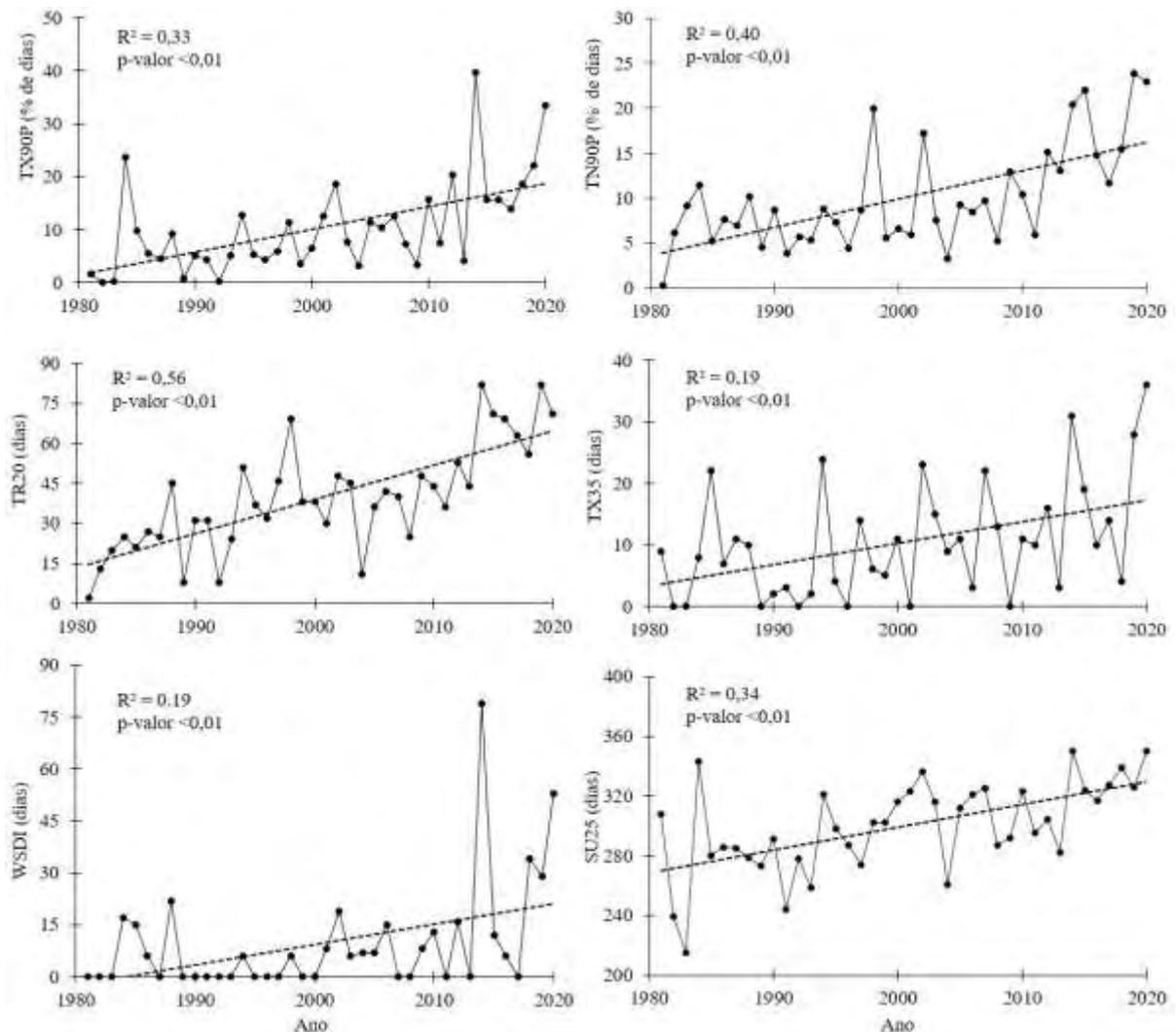
| Parâmetro | T <sub>max</sub> | T <sub>min</sub> |
|-----------|------------------|------------------|
| $R^2$     | 0.60             | 0.86             |
| RMSE      | 2.27             | 1.35             |
| NRMSE     | 0.08             | 0.09             |
| Viés      | 0.27             | 0.26             |
| d         | 0.87             | 0.96             |

Legenda: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro quadrático médio (RMSE), erro quadrático médio normalizado (NRMSE), viés médio (Viés) e índice de concordância (d). Fonte: Própria autoria.

Quando analisadas as tendências das séries de T<sub>min</sub> e T<sub>max</sub>, observou-se resposta significativa para aumento, com tendência positiva na série histórica 1981-2021 (Tabela 4). O teste de Pettitt confirmou a quebra na homogeneidade da série da T<sub>max</sub> e T<sub>min</sub> na escala anual e na escala sazonal (quando considerado as estações do ano). As diferenças entre as médias antes e após a quebra da homogeneidade da série indicaram que a T<sub>max</sub> e T<sub>min</sub> foram significativamente aumentadas em todas as estações do ano, com exceção da T<sub>min</sub> do outono. Os maiores aumentos observados foram na T<sub>max</sub> do inverno (1,9 °C) e na primavera (2,8 °C)

e na Tmin do inverno (1,0 °C) e primavera (0,8 °C) (Tabela 4). O número de dias em ondas de calor também aumentou significativamente na série 1981-2021 (Figura 9 e Tabela 4). Todos os índices de ondas de calor indicaram curva crescente ( $p < 0,05$ ) entre os anos 1981 e 2021 (Figura 9). Os índices TX90P e TN90P exibiram tendências significativas para o aumento de número de dias e noites mais quentes na série 1981-2021, também observado para os índices TR20, TX35 e WSDI (Figura 9). O índice SU demonstrou que cerca de 98,6% (300 dias) do ano a Tmax excedeu o limiar de 25 °C.

Figura 9 - Regressões lineares dos Índices de Mudança Climática desenvolvidas pelo *software* RClindex, com sua tendência de evolução de mudanças.



Fonte: própria autoria.

Tabela 4 - Análise de tendência climática anual e por estações do ano para temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax) e dias em onda de calor.

| Parâmetro                          | Teste de Kendall |         |           | Teste de Pettit <sup>2</sup> |                   |               |         |
|------------------------------------|------------------|---------|-----------|------------------------------|-------------------|---------------|---------|
|                                    | <i>tau</i>       | Valor-p | Tendência | Antes                        | Após              | Ano de quebra | Valor-p |
| Tmin                               | 0,07             | <,0001  | Positiva  | 15,8 <sup>b</sup>            | 16,5 <sup>a</sup> | 1997          | <,0001  |
| Tmax                               | 0,12             | <,0001  | Positiva  | 27,2 <sup>b</sup>            | 28,4 <sup>a</sup> | 1997          | <,0001  |
| Dias em onda de calor <sup>1</sup> | 0,44             | <,0001  | Positiva  | -                            | -                 | -             | -       |
| <i>Verão</i>                       |                  |         |           |                              |                   |               |         |
| Tmin                               | 0,16             | <,0001  | Positiva  | 18,8 <sup>b</sup>            | 19,3 <sup>a</sup> | 2005          | <,0001  |
| Tmax                               | 0,13             | <,0001  | Positiva  | 27,5 <sup>b</sup>            | 28,8 <sup>a</sup> | 2012          | <,0001  |
| Dias em onda de calor <sup>1</sup> | 0,38             | <,0001  | Positiva  | -                            | -                 | -             | -       |
| <i>Outono</i>                      |                  |         |           |                              |                   |               |         |
| Tmin                               | 0,02             | 0,10    | -         | 14,9 <sup>a</sup>            | 14,8 <sup>a</sup> | -             | 0,18    |
| Tmax                               | 0,14             | <,0001  | Positiva  | 25,3 <sup>b</sup>            | 26,4 <sup>a</sup> | 2000          | <,0001  |
| Dias em onda de calor <sup>1</sup> | 0,43             | <,0001  | Positiva  | -                            | -                 | -             | -       |
| <i>Inverno</i>                     |                  |         |           |                              |                   |               |         |
| Tmin                               | 0,15             | <,0001  | Positiva  | 12,6 <sup>b</sup>            | 13,6 <sup>a</sup> | 1997          | <,0001  |
| Tmax                               | 0,16             | <,0001  | Positiva  | 26,8 <sup>b</sup>            | 28,7 <sup>a</sup> | 1997          | <,0001  |
| Dias em onda de calor <sup>1</sup> | 0,39             | <,0001  | Positiva  | -                            | -                 | -             | -       |
| <i>Primavera</i>                   |                  |         |           |                              |                   |               |         |
| Tmin                               | 0,13             | <,0001  | Positiva  | 17,5 <sup>b</sup>            | 18,3 <sup>a</sup> | 2001          | <,0001  |
| Tmax                               | 0,08             | <,0001  | Positiva  | 27,4 <sup>b</sup>            | 30,2 <sup>a</sup> | 1984          | <,0001  |
| Dias em onda de calor <sup>1</sup> | 0,20             | 0,07    | -         | -                            | -                 | -             | -       |

<sup>1</sup>Numero de dias quando a Tmax >90 percentil (TX90P) centrada em uma janela de 5 dia.

<sup>2</sup>Representa a quebra na homogeneidade da Tmin e Tmax.

<sup>a,b</sup> Médias dentro de uma linha com diferentes letras diferem significativamente ( $p \leq 0,05$ ).

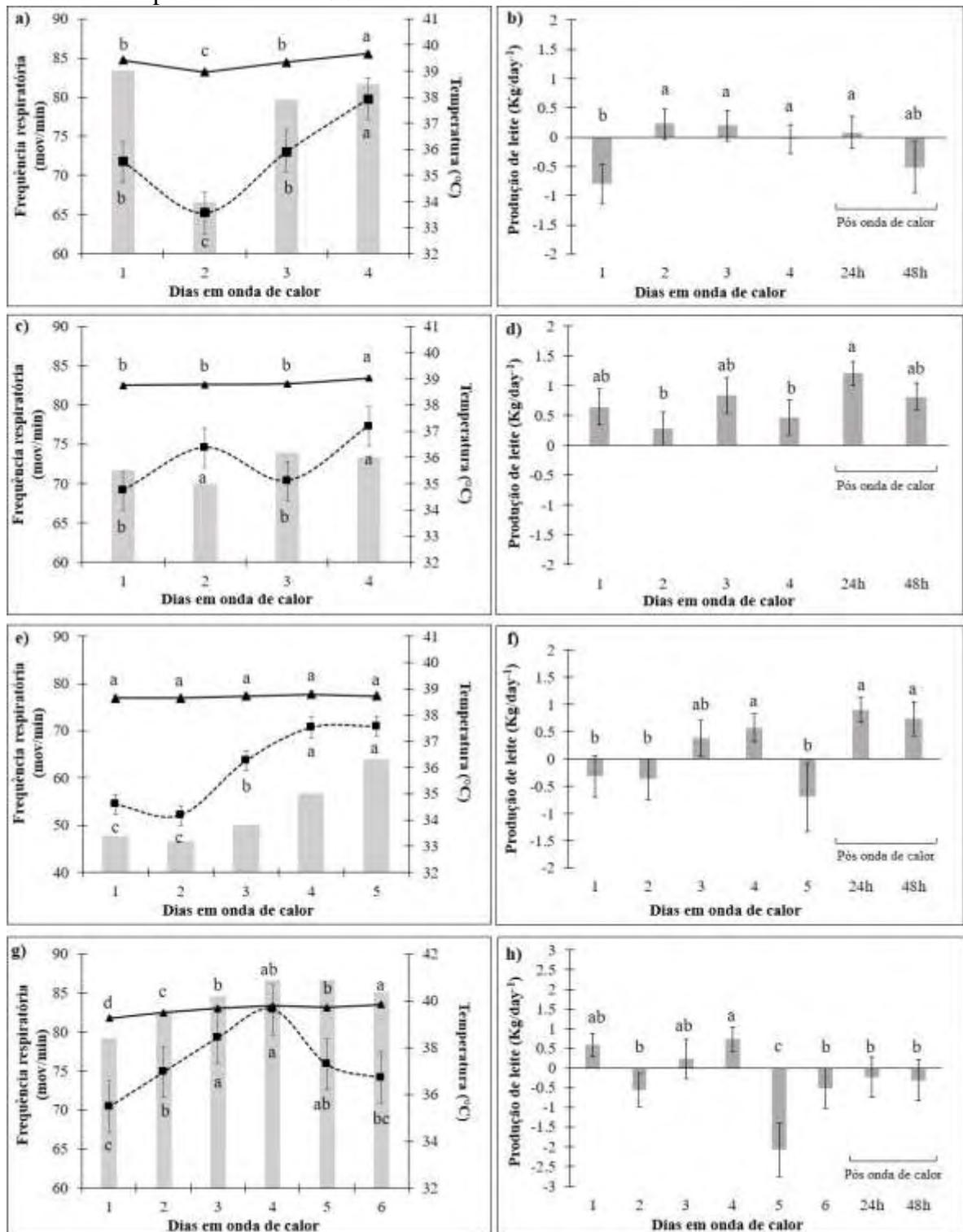
Fonte: Própria autoria.

*Respostas fisiológicas e produtivas durante as ondas de calor*

A avaliação das respostas fisiológicas e produtivas das vacas durante as ondas de calor, caracterizada pelos índices TX90P e TX35, foram classificadas de acordo com sua duração e intensidade da onda: curta duração (até 5 dias); longa duração (mais de 5 dias); menor intensidade ( $T_{max} < 36\text{ °C}$ ) e maior intensidade ( $T_{max} > 36\text{ °C}$ ). Observamos que quando as vacas experimentaram ondas de calor de curta duração e alta intensidade caracterizadas pelo índice TX90P, as respostas de FR e TR foram elevadas ( $p < 0,01$ ) para níveis de estresse térmico moderado e intenso (Figura 10a). Além disso, perdas significativas na PL ( $p < 0,01$ ) foram observadas no 1º dia e 48h após o término da onda de calor (Figura 10b). Por outro lado, ondas de calor curtas e de baixa intensidade não foram suficientes para alterar a FR e TR ( $p > 0,05$ ), mas causaram diminuição na PL ( $p < 0,01$ ) (Figura 10f). Durante uma onda de calor de curta duração e menor intensidade caracterizada pelo índice TX35 (Figura 11a e 11c), a FR oscilou levemente, enquanto a TR foi maior ( $p < 0,01$ ) apenas no 4º dia (Figura 11c), comparado com os dias anteriores. Pequenas reduções na PL também foram observadas (Figura 11b e 11d).

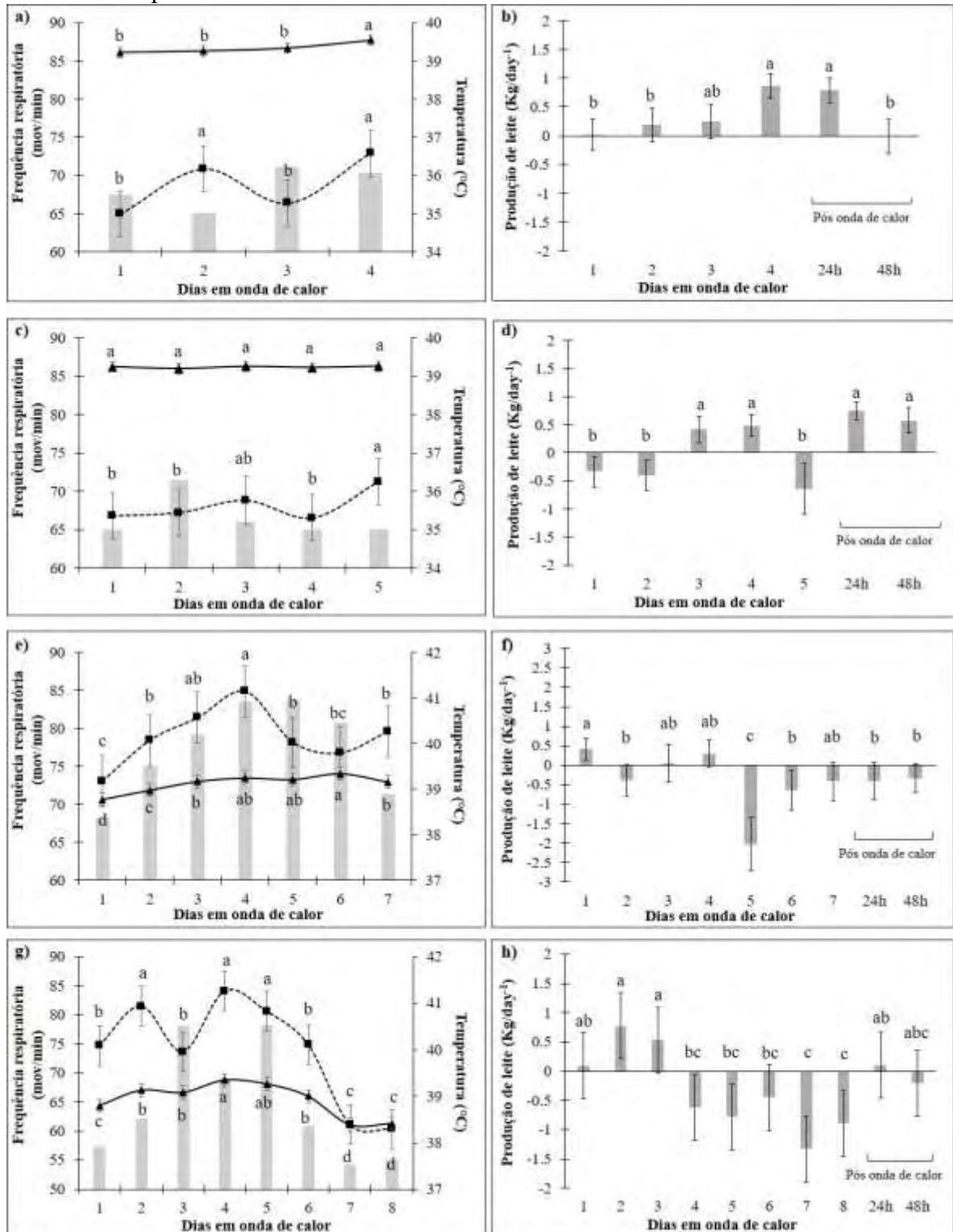
Durante uma onda de calor de longa duração e maior intensidade pelos índices TX90P e TX35 (Figura 10g e 11e), em que a  $T_{max}$  foi superior a  $36\text{ °C}$ , a FR aumentou gradativamente até o 4º dia (Figura 10g). A TR foi maior ( $p < 0,01$ ) do 3º ao 5º dia, aumentando para hipertermia no 6º dia (Figura 10g). A diminuição da PL ( $p < 0,01$ ) ocorreu a partir do 5º dia até 48h após a onda de calor (Figura 10h). Em outra onda de calor de longa duração e maior intensidade pelo índice TX35 (Figura 10g) provocou respostas adaptativas e fisiológicas a partir do 6º dia, com diminuição da FR e TR ( $p < 0,01$ ). Além disso, a  $T_{max}$  diminuiu a partir do 6º dia, mas permaneceu acima de  $36\text{ °C}$  (Figura 11g) e uma queda na PL foi observada a partir do 4º dia.

Figura 10 - Temperatura máxima diária (barras cinzas), frequência respiratória (linha pontilhada), temperatura retal (linha contínua) e produção de leite (barras cinza escuro) durante ondas de calor para o índice TX90P.



Os dados são apresentados como média  $\pm$  erro padrão da média. As médias dentro de uma linha com diferentes sobrescritos diferem ( $p \leq 0,05$ ). Fonte: própria autoria.

Figura 11 - Temperatura máxima diária (barras cinzas), frequência respiratória (linha pontilhada), temperatura retal (linha contínua) e produção de leite (barras cinza escuro) durante ondas de calor para o índice TX35.



Os dados são apresentados como média  $\pm$  erro padrão da média. As médias dentro de uma linha com diferentes sobrescritos diferem ( $p \leq 0,05$ ). Fonte: própria autoria.

## 2.4 Discussão

Um dos fatores limitantes para a pecuária leiteira é o clima, aspecto crucial quando se estuda estresse térmico em climas tropicais e subtropicais (DA COSTA et al., 2015). No Brasil ainda há carência de dados informativos de animais nas fazendas leiteiras, devido à extensão territorial (PARENTE et al., 2019), sistemas de manejo (TRAMONTINI et al., 2021), raças, rebanhos e cruzamentos (DA COSTA et al., 2015) e diversidade climática (MARINHO et al., 2020). Considerando a heterogeneidade das fazendas leiteiras e as diferenças climáticas, estudos regionais devem ser conduzidos para melhorar as propostas de ação de risco climáticos, e os produtores possam ser melhor orientados.

Neste estudo, o primeiro objetivo foi avaliar a mudança no padrão de temperatura do ar e caracterizar as ondas de calor por meio de Índices de Mudanças Climáticas. Neste sentido, foi demonstrado que na série histórica 1981-2021 houve aumento na Tmax e Tmin para a região de estudo. Em consequência, houve aumento expressivo na incidência de eventos extremos de calor e, as ondas de calor foram mais frequentes, duradouras e intensas a partir do ano de 2010. Os resultados mostraram que cerca de 88,1% dos dias entre 2010-2020 ultrapassaram 25°C pelo índice SU25, um aumento de 14% em relação ao período 1981-2000. Ainda, nos anos de 2018, 2019 e 2020 apresentaram 93, 89 e 96% dos dias acima de 25°C. Esta temperatura ambiente de 25 °C é considerada o limite superior para o estresse térmico em vacas Holandesas (BERMAN et al., 1985). Ao longo dos meses do ano, as vacas leiteiras adaptam-se à variabilidade climática e passam por um processo de aclimatação e adaptação ao clima quente (COLLIER et al., 2019). No entanto, embora as vacas Holandesas sejam aclimatadas a climas tropicais e subtropicais, alguns autores indicam que esses animais apresentam baixa tolerância ao calor e perdas significativas na produção de leite são recorrentes (SANTANA et al., 2016; SANTANA et al., 2017; NEGRI et al., 2021).

O número de dias do ano em onda de calor, com base no índice TX35, aumentou 60% na década de 2010, em relação à década de 2000. Também foi observado que a porcentagem de dias em ondas de calor indicadas pelo índice TX90P aumentou 92% e o índice TR20 indicou que o número de noites quentes aumentou 69%. O aumento das noites quentes (>20°C) é um problema para o gado leiteiro, dificultando a dissipação de calor dos animais (VITALI et al., 2015). Durante os dias quentes, o período noturno é crucial para que as vacas recuperem o equilíbrio térmico e não prejudiquem sua saúde, bem-estar e desempenho (DA COSTA et al., 2015; AVENDAÑO-REYES et al., 2021; MBUTHIA et al., 2021). Esses resultados corroboram as observações do IPCC (2021) considerando as mudanças aceleradas nos padrões

de temperatura da última década, causando uma preocupação global sobre a resiliência dos sistemas de produção leiteira e os impactos no desempenho e produtividade animal em um clima futuro mais quente (FODOR et al., 2018).

O Brasil tem sido afetado pelo aumento do número e gravidade das ondas de calor (BITENCOURT et al., 2020; COSTA et al., 2020). Assim, analisar o comportamento da temperatura do ar em uma série de dados em diferentes regiões produtoras é essencial, para planejar e auxiliar nas estratégias de gestão que busquem minimizar os efeitos negativos do ambiente térmico. Vários índices de ITU têm sido usados para caracterizar o ambiente térmico e identificar o grau de estresse térmico experimentado por vacas leiteiras, mas de acordo com Dikmen e Hansen (2009) não é adequado para ambientes de clima subtropical. No presente estudo, foi demonstrado que durante a ocorrência de ondas de calor (índices TX90P e TX35) a Tmax diária de 36 °C foi um limiar para alterar as respostas fisiológicas das vacas.

Nos primeiros 4 dias de ondas de calor de longa duração, observou-se um aumento significativo nas respostas ao calor como, a elevação da FR (> 80 mov/min), quando a Tmax continuou a aumentar a partir do 4º dia (> 36 °C) as vacas não conseguiam mais dissipar calor apenas pela respiração, com resposta inversa à TR. Então, a TR aumentou devido à hipertermia a partir do 5º dia. A TR segue um ritmo circadiano diário, sendo menor no início da manhã e maior no final da tarde (MARTELLO et al. 2010), conseqüentemente, as maiores Tmin e Tmax durante as ondas de calor (especialmente no período da tarde) causam um aumento significativo da temperatura corporal durante a noite. É importante enfatizar que para países de clima quente, um programa de melhoramento genético para animais de alta produtividade e tolerantes ao calor deve considerar as informações de FR e TR. Além disso, destacamos também que, diferentemente da maioria dos estudos, este estudo utilizou dados empíricos coletados em fazenda, durante eventos de ondas de calor, dificultando a comparação entre nossos resultados e outros estudos realizados em câmaras climáticas.

Neste estudo, as ondas de calor de longa duração causaram o maior declínio na PL em 24 a 48 h após o FR e o TR atingirem os maiores valores. Assim, os maiores decréscimos na PL foram observados a partir do 5º dia quando a PL não foi recuperada até o final da onda de calor. Nesse caso, as vacas podem ter passado menos tempo alimentando-se, na tentativa de restaurar o equilíbrio térmico (WEST et al., 2003; SPIERS et al., 2004; RHOADS et al., 2009). Além disso, o alto custo fisiológico do processo adaptativo parece ter causado uma queda na PL de -1,33 (Figura 11h) e -2,00kg/vaca (Figura 10h e 11f). Outros estudos também detectaram queda na PL de 0,25 à 4,62kg/vaca durante o estresse térmico de vacas Holandesas no Brasil, mas estes autores não avaliaram a PL considerando períodos de ondas de calor (SANTANA et

al., 2017; NEGRI et al., 2021). Até o presente momento, não há registros sobre os efeitos do estresse térmico em vacas Holandesas em lactação submetidas a ondas de calor em clima subtropical. Por outro lado, observou-se que ondas de calor de curta duração (até 5 dias) e menos intensas, não causaram diminuição significativa na PL. Em contraste, Garner et al. (2017) observaram em uma onda de calor simulada de 4 dias (temperatura máxima de 33°C) valores de FR e TR semelhantes ao deste estudo, e as reduções na PL continuaram até 4-5 dias após o final da onda de calor.

Em uma onda de calor longa de 8 dias (Figura 11g), a FR e TR aumentaram significativamente para níveis de estresse térmico, com Tmax diária atingindo 40,5 °C no 3° e 5° dia. No entanto, após o 5° dia pode ter ocorrido respostas adaptativas nas vacas, uma vez que uma redução significativa no FR e TR foram observadas a partir do 6° dia, para os níveis de conforto térmico, mesmo com Tmax maior que 36 °C. Além disso, neste mesmo ambiente, a PL começou a diminuir a partir do 4° dia, e os maiores decréscimos foram observados nos dias 7 e 8, elevando novamente a PL somente 48 h após o final da onda de calor. Este resultado sugere que a magnitude das ondas de calor foi um fator importante no processo de adaptação ao calor de vacas Holandesas. É interessante que dias únicos de calor extremo ou ondas curtas de calor não foram suficientes para causar desconforto térmico nas vacas. Vitali et al. (2015) encontraram alta mortalidade de vacas Holandesas na Itália (clima temperado) com apenas 3 dias de onda de calor. Assim, os resultados deste estudo reforçam que vacas Holandesas em climas subtropicais passaram por um processo de aclimação ao longo dos anos, mas que ainda é insuficiente para manter a alta produção durante ondas de calor intensas. Portanto, a duração e intensidade da onda de calor é um aspecto importante e deve ser considerado na avaliação do estresse térmico em vacas leiteiras em clima tropical e subtropical. Assim, meios para mitigar o estresse térmico na pecuária leiteira são urgentes e necessários.

Uma estratégia comum para minimizar os efeitos negativos do estresse térmico de vacas em lactação é empregar sistemas de ventilação nas instalações (SPIERS et al., 2018) que podem reduzir o impacto da magnitude das ondas de calor. No presente estudo, as vacas tiveram ventilação artificial por 24 h durante as ondas de calor, o que foi insuficiente para manter o equilíbrio térmico, demonstrando que o excesso de calor não é um problema simples de resolver. Outros autores também demonstraram que ventilação e aspersores foram insuficientes para manter a termorregulação e a produção de leite durante altas temperaturas em clima subtropical (SANTANA et al., 2016; DIKMEN et al., 2020). O objetivo não foi avaliar metodologias de ventilação, entretanto, o ambiente ventilado pode ter favorecido o conforto térmico dos animais durante ondas de calor de curta duração. Por outro lado, as ondas de calor

longas tiveram impactos negativos na FR, TR e PL. Sistemas e opções de gestão de adaptação a altas temperaturas, que já são recorrentes em cenários climáticos atuais (como demonstrado neste estudo), e em cenários futuros de mudanças climáticas (FODOR et al., 2018; IPCC, 2021) devem ser repensados, avaliando o sistema como um todo, em âmbito regional ou local, de acordo com as condições do produtor de leite (CLAESSENS et al., 2012; HARRISON et al., 2017) e não tratado genericamente (KALAUGHER et al., 2017). Apesar dos esforços para empregar mecanismos para diminuir o estresse térmico, perdas produtivas e reprodutivas em vacas leiteiras ainda são frequentes durante o calor extremo (BARUSELLI et al., 2020; AVENDAÑO-REYES et al., 2021; MBUTHIA et al., 2021).

Finalmente, este estudo demonstrou que as vacas Holandesas experimentaram intenso estresse térmico durante longas ondas de calor (> 5 dias) no local de estudo. O método de avaliação baseado em índices de ondas de calor e Tmax, a partir de dados de modelo (NASA POWER) foi eficiente para demonstrar os efeitos negativos sobre as respostas fisiológicas e PL. Este método é uma nova abordagem que pode ajudar produtores, a gestão pública e os sistemas de laticínios a buscar novas formas de melhorar o manejo animal.

## **2.5 Conclusão**

Este estudo apresentou uma abrangente pesquisa climática local e os efeitos das ondas de calor sobre a fisiologia e produção de leite de vacas leiteiras. Os resultados confirmam o aumento da temperatura máxima e mínima diária na série 1981-2021, com expressivo aumento no número e intensidade das ondas de calor na última década (2010-2020). O maior impacto na frequência respiratória e temperatura retal das vacas leiteiras foi durante as ondas de calor de longa duração e maior intensidade, porém, houve um limiar de 36 °C de temperatura do ar para alcançar o estresse térmico severo e respostas adaptativas. As ondas de calor causaram quedas na produção de leite quando também os parâmetros fisiológicos alcançaram os maiores valores, não ocorrendo recuperação da produção de leite após o 5º dia durante as ondas de calor de longa duração.

## 2.6 Referências

AVENDAÑO-REYES, L. et al. **Impacts on two dairy breeds of adding a third (night) cooling event under extreme ambient heat.** International Journal of Biometeorology, v. 65, p. 1443-1450, 2021.

BERMAN, A. et al. **Upper Critical Temperatures and Forced Ventilation Effects for High-Yielding Dairy Cows in a Subtropical Climate.** Journal Dairy Science, v. 68, n.6, p. 1488-1495, 1985.

BARUSELLI, P. S. et al. **Use of embryo transfer to alleviate infertility caused by heat stress.** Theriogenology, v. 155, p.1-11, 2020.

BITENCOURT, D. P. et al. **The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016.** International Journal Climatology, v. 40, n.4, p. 2464-2478, 2020.

CLAESSENS, L. et al. **A method for evaluating climate change adaptation strategies for small-scale farmers using survey, experimental and modeled data.** Agriculture Systems, v. 111, p. 85-95, 2020.

COSTA, R. L. et al. **Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014.** Weather Climate Extremes, v. 28, p. 100254, 2020.

COLLIER, R. J. et al. **Heat stress: physiology of acclimation and adaptation.** Animal Frontiers, v. 9, n. 1, p. 12-19, 2019.

DA COSTA, A. N. L. et al. **Hormonal profiles, physiological parameters, and productive and reproductive performances of Girolando cows in the state of Ceará-Brazil.** International Journal of Biometeorology, v. 59, n.2, p. 231-236, 2015.

DALTRO, D. D. S. et al. **Infrared thermography as a method for evaluating the heat tolerance in dairy cows.** Revista Brasileira de Zootecnia, v. 46, p. 374-383, 2017.

DIKMEN, S.; HANSEN, P. J. **Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment?** Journal Dairy Science, v. 92, n.1, p. 109-116, 2009.

DIKMEN, S. et al. **Effectiveness of tunnel ventilation as dairy cow housing in hot climates: rectal temperatures during heat stress and seasonal variation in milk yield.** Tropical Animal Health and Production, v. 52, n. 5, p. 2687-2693, 2020.

FERRAZZA, R. A. et al. **Thermoregulatory responses of Holstein cows exposed to experimentally induced heat stress.** Journal Thermal Biology, v. 66, p. 68-80, 2017.

FODOR, N. et al. **Spatially explicit estimation of heat stress-related impacts of climate change on the milk production of dairy cows in the United Kingdom.** PLoS One, v. 13, n. 5, p. e0197076, 2018.

GARCIA, A. B. et al. **Relationships between heat stress and metabolic and milk parameters in dairy cows in southern Brazil.** Tropical Animal Health and Production 47:889–894, 2015.

GARNER, J. B. et al. **Responses of dairy cows to short-term heat stress in controlled-climate chambers.** Animal Production Science, v. 57, n.7, p. 1233-1241, 2017.

GUO, Y. et al. **Quantifying excesso deaths related to heatwaves under climate change scenarios: A multicountry time series modelling study.** PLoS medicine, v. 15, n.7, p. e1002629, 2018.

HARRISON, M. T.; CULLEN, B. R.; ARMSTRONG, D. **Management options for dairy farms under climate change: Effects of intensification, adaptation and simplification on pastures, milk production and profitability.** Agriculture Systems, v. 155, p. 19-32, 2017.

IPCC, 2021. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. *In Press.*

- KALAUGHER, E. et al. **Modelling farm-level adaptation of temperate, pasture-based dairy farms to climate change**. *Agriculture Systems*, v. 153, p. 53-68, 2017.
- MARINHO, K. F. S. et al. **Climate profiles in Brazilian microregions**. *Atmosphere*, v. 11, n.11, p. 1217.
- MARTELLO, L. S. et al. **Alternative body sites for heat stress measurement in milking cows under tropical conditions and their relationship to the thermal discomfort of the animals**. *International Journal Biometeorology*, v. 54, p. 647-652, 2010.
- Marzouk, O. A. (2021) **Assessment of global warming in Al Buraimi, sultanate of Oman based on statistical analysis of NASA POWER data over 39 years, and testing the reliability of NASA POWER against meteorological measurements**. *Heliyon*, v. 7, n.3, p. e06625, 2021.
- MBUTHIA, J. M.; MAYER, M.; REINSCH, N. (2021) **Modeling heat stress effects on dairy cattle milk production in a tropical environment using test-day records and random regression models**. *Animal*, v. 15, n.8, p. 100222, 2021.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; PEDRA, G. U. **Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation**. *International Journal of Climatology*, v. 38, n.3, p. 1571-1581, 2018.
- NEGRI, R. et al. **Selection for test-day milk yield and thermotolerance in Brazilian Holstein cattle**. *Animals*, v. 11, n.1, p. 128, 2021.
- PACHECO, V. M. **Thermal imaging combined with predictive machine learning based model for the development of thermal stress level classifiers**. *Livestock Production Science*, v. 241, p. 104244, 2020.
- PARENTE, L. et al. **Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing**. *Remote Sensing Environment*, v. 232, p. 111301, 2019.

PERKINS, S. E.; ALEXANDER, L. V. **On the measurement of heat waves.** Journal of Climatology, v. 26, n.13, p. 4500-4517, 2013.

RHOADS, M. L. et al. **Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism, and aspects of circulating somatotropin.** Journal of Dairy Science, v. 92, n.5, p. 1986–1997, 2009.

RUSSO, S. **Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world.** Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 119, n.22, p. 12.500-12.512, 2014.

SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. **Trends Analysis of Precipitation and Temperature Data in Brazil.** Revista brasileira de meteorología, v. 31, n.1, p. 64-73, 2016.

SANTANA, M. L. et al. **Random regression models to account for the effect of genotype by environment interaction due to heat stress on the milk yield of Holstein cows under tropical conditions.** Journal Applied Genetics, v. 57, n.1, p. 119-127.

SANTANA, M. L. et al. **Genetics of heat tolerance for milk yield and quality in Holsteins.** Animal, v. 11, n.1, p. 4-14, 2017.

SPIERS, D. E. Et al. **Strategic application of convective cooling to maximize the thermal gradient and reduce heat stress response in dairy cows.** Journal of Dairy Science, v. 101, n.9, p. 8269-8283, 2018.

SPIERS, D. E. et al. **Use of physiological parameters to predict milk yield and feed intake in heat-stressed dairy cows.** Journal of Thermal Biololy, v. 29, n. 7-8, p. 759-764, 2004.

TRAMONTINI, R. D. C. M. et al. **Typology of dairy production systems based on management strategies in Paraná State, Brazil.** Tropical Animal Science Journal, v. 44, n.1, p. 123-130, 2021.

VITALI, A. et al. **The effect of heat waves on dairy cow mortality.** Journal of Dairy Science, v. 98, n.7, p. 4572-4579, 2015.

XAVIER, A. C.; KING, C.W.; SCANLON, B. R. **Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013).** International Journal of Climatology, v. 36, n.6, p. 2644-2659, 2016.

WEST, J. W. (2003) **Effects of heat-stress on production in dairy cattle.** Journal of Dairy Science, v. 86, n.6, p. 2131-2144, 2003.

Zhang, X.; Yang, F. **RClimDex (1.0) User Manual. Climate Research Branch.** Environment Canada, Ontario, p. 22, 2004.

### **3 CAPÍTULO III. EFEITOS DE ONDAS DE CALOR CONSECUTIVAS SOBRE AS RESPOSTAS DE FREQUÊNCIA RESPIRATÓRIA, TEMPERATURA RETAL, TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DE PELE E PRODUÇÃO DE LEITE DE VACAS HOLANDESAS.**

#### **3.1 Introdução**

O aumento da temperatura média global é uma preocupação atual e futura da indústria láctea, especialmente com o bem-estar, conforto e produtividade de vacas leiteiras (GAULY; AMMER et al. 2020). As drásticas mudanças nos padrões climáticos após a industrialização, aceleraram o aquecimento global previsto de 1,5 °C em 2030 (IPCC, 2021). Tais mudanças tendem a alterar os padrões de eventos extremos, como o aumento na frequência de ondas de calor.

As ondas de calor são eventos anômalos climáticos caracterizados por um acelerado aumento na temperatura ambiente por mais de 3 dias consecutivos (RUSSO et al. 2014). Partindo do ponto de que não há uma adaptação dos animais ao aumento abrupto da temperatura, consequências adversas causadas pelo calor extremo podem ocorrer, tal como mortalidade. Hahn e Mader (1997) observaram mortalidade de mais de 4.000 bovinos nos Estados Unidos durante uma onda de calor; enquanto Morignat et al. (2014) identificaram mais de 8.000 e 6.000 mortes de bovinos em duas ondas de calor nos anos 2003 e 2006, respectivamente.

Vacas leiteiras são mais susceptíveis aos efeitos das ondas de calor. Vitali et al. (2015) reportaram mais de 46.000 mortes de vacas em lactação na Itália, entre os anos 2002 a 2007. Portanto, alguns autores apontam que o risco de mortalidade de vacas leiteiras aumenta conforme a duração e a intensidade da exposição ao calor (VITALI et al., 2015; MORIGNAT et al., 2018), esse número pode ser maior em vacas com mais de 60 meses de idade (VITALI et al., 2015).

De fato, vacas leiteiras estarão mais susceptíveis ao estresse térmico em um futuro próximo, uma vez que o processo de adaptação e aclimatização dos animais delonga de semanas a meses para ocorrer. Embora sejam necessários para a sobrevivência do animal, as respostas de aclimação ao calor causam prejuízos na produção de leite e fertilidade de vacas leiteiras (WEST, 2003; BARUSELLI et al., 2020), pois envolvem uma ação conjunta de mecanismos fisiológicos, fenotípicos e genéticos (TAO et al., 2020; NEGRI et al., 2021). Em clima tropical e subtropical, é característico que o verão apresente ambiente quente e úmido, dificultando o

processo de perda de calor pelos animais (SANTANA et al., 2017; DIKMEN et al., 2020), causando elevação da frequência respiratória (FR), temperatura retal (RT) e temperatura de superfície de pele (TSP) (DALTRO et al., 2017; PACHECO et al., 2020).

Estudos recentes têm demonstrado que períodos de ondas de calor causam queda na produção de leite de vacas leiteiras em clima temperado (FODOR et al., 2018; OUELLET et al., 2019). Porém, os efeitos das ondas de calor em vacas Holandesas adaptadas à clima tropical/subtropical ainda são pouco elucidados. Diversos estudos têm utilizado variáveis ambientais de temperatura do ar ( $T_a$ ), umidade relativa do ar (UR) e o índice de temperatura e umidade (ITU) como indicadores de estresse térmico em bovinos leiteiros (MARTELLO et al., 2010; PACHECO et al., 2020) e poucos estudos avaliam sob o aspecto da incidência de ondas de calor. Além disso, alguns estudos indicam que em vacas leiteiras manejadas sob clima tropical/subtropical e as previsões do ITU estão subestimando a gravidade do estresse térmico nas respostas fisiológicas e produtivas (DICKMEN et al., 2009).

Sob o aspecto das ondas de calor, torna-se interessante avaliar as respostas fisiológicas (FR, TR e TSP) e produtivas (produção de leite) sobre o âmbito de ondas de calor, considerando o tempo de exposição dos animais a altas temperaturas, uma vez que estes eventos estão cada vez mais frequentes, longos e intensos na zona tropical do globo (IPCC, 2021). Neste contexto, este estudo teve por objetivo avaliar o efeito do tempo de exposição ao calor sobre as respostas termorregulatórias e produtivas de vacas Holandesas submetidas a duas ondas de calor consecutivas durante o verão.

### **3.2 Material e métodos**

Este estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética do Uso de Animais, da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, protocolo 4859201219, o qual está de acordo com a Legislação Federal brasileira.

#### *Local*

O experimento foi conduzido no setor de bovinocultura de leite da Prefeitura do Campus USP Fernando Costa – PUSP – FC da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, localizado na cidade de Pirassununga-SP, região Sudeste do Brasil (21° 59' 46" S, 47° 25' 33" W). De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a cidade de Pirassununga possui clima Cwa, ou seja, subtropical/tropical de altitude, com temperatura ambiental média

variando entre 23,1 °C no verão (quente e úmido) a 16,9 °C no inverno (estação seca). O experimento foi realizado durante 20 dias consecutivos do verão de 2019 (janeiro e fevereiro).

### *Animais e manejo*

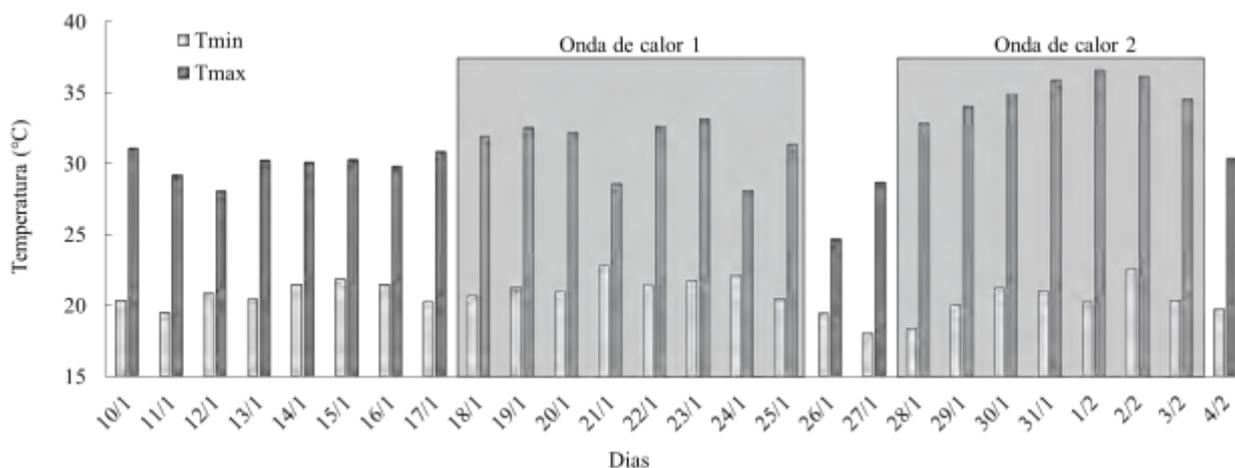
O experimento foi conduzido com 14 vacas da raça Holandesa, pretas e brancas, primíparas e múltiparas ( $2,4 \pm 1,09$  partos), com fase de lactação tardia ( $363,1 \pm 118,4$  dias em lactação) e produção de leite média de 20kg/dia. Os animais permaneceram alojados em sistema de *free-stall*, equipado com ventiladores ligados por 24 horas. A alimentação e a ordenha foram realizadas duas vezes ao dia, às 7h e às 15h. A produção de leite diária foi medida pelo sistema automático DeLaval®.

A dieta dos animais foi composta da mistura de silagem de milho (30%), feno de tifton 85 (10%) e ração concentrada (60%), contendo 76% de nutrientes digestíveis totais e 18% de proteína bruta, com sobra residual de 5%. Sal mineral foi fornecido à vontade.

### *Coleta dos dados ambientais*

Para a identificação das ondas de calor, foi utilizado o banco de dados de temperaturas do ar NASA POWER de um período de 40 anos (1981-2021), numa resolução 0,5° de latitude/longitude. Assim, as ondas de calor para os meses de janeiro e fevereiro de 2019 foram localizadas pelo método de percentil 90 para temperatura máxima diária – este método é baseado no valor de percentil 90 do dia do calendário, centrado em uma janela de 15 dias anteriores – considerando 3 ou mais dias com o valor percentual acima de 90 (Figura 12). Então, duas ondas de calor consecutivas e longas foram identificadas nos dias 18 a 25/01 (onda de calor 1, HW1) e 28/01 a 03/02 (onda de calor 2, HW2) (Figura 12).

Figura 12 - Identificação das ondas de calor nos meses de janeiro e fevereiro de 2019 pelo método percentil 90 da temperatura máxima diária. Os dados no gráfico constam a temperatura máxima (Tmax) e temperatura mínima (Tmin) diária.



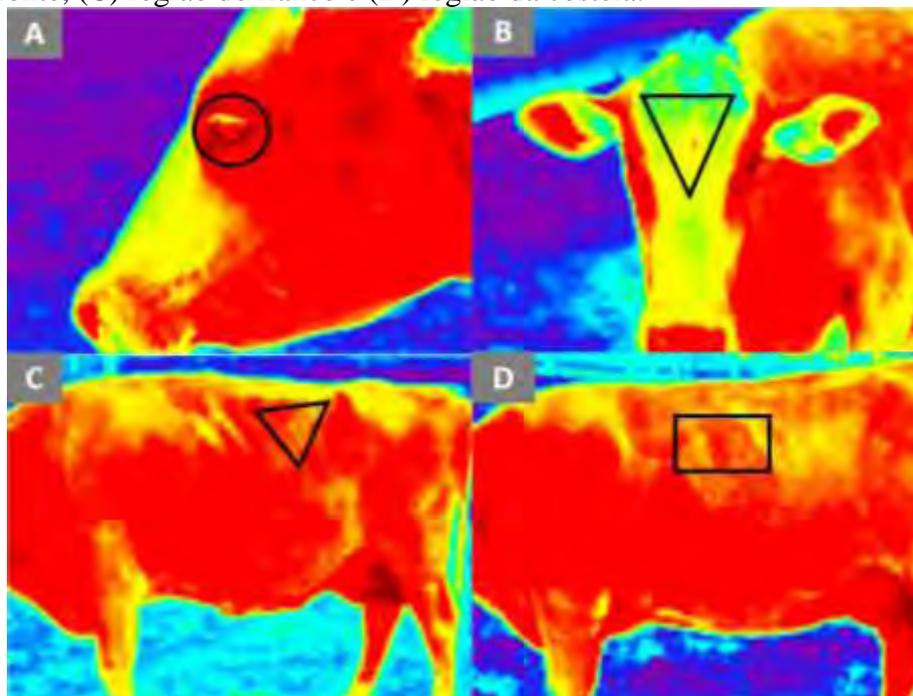
Fonte: própria autoria.

Após a identificação das ondas de calor (NASA POWER), a Ta e a UR do ambiente interno do *free-stall* (microclima) foram obtidas de dois registradores de dados *datalogger* (HOBO U12, Onset Computer Corporation, EUA), o qual foi fixado no centro do *free-stall* a 3 m acima do piso. As variáveis de Ta e UR foram registradas automaticamente por 24 horas em intervalos de 30 min. A partir destes dados, foi calculado o ITU com a fórmula  $ITU = [(1,8 \times Ta + 32) - (0,55 - (0,0055 \times UR) \times (1,8 \times Ta - 26))]$  (NRC, 1971).

#### Coleta dos dados fisiológicos

Os dados fisiológicos de FR, TR e TSP foram obtidos de um total de 19 dias, coletadas três vezes ao dia: às 5h, 13h e 19h. A TR foi registrada manualmente com termômetro digital (VMDT01, Viomed, China). A FR foi determinada através da contagem do tempo de dez movimentos respiratórios (flanco), e foi calculado para número de movimentos por minuto. A TSP foi registrada por meio da termografia por infravermelho, com uma câmera termográfica (875-2, Testo SE & Co. KGaA, Alemanha), com emissividade de 0,98, a uma distância de aproximadamente 2 m do animal. Foram selecionadas quatro áreas relacionadas com a termorregulação de bovinos: olho, fronte, costela e flanco (Figura 13). A área do olho e fronte são duas regiões próximas ao sistema termorregulador do animal (hipotálamo). E a área da costela e flanco permitem contato direto com o interior dos animais. Para analisar as imagens foi utilizado o *software* IRSoft o qual forneceu os valores da TSP média de cada área selecionada. Para a área do olho foi utilizada apenas a TSP máxima.

Figura 13 - Regiões de coleta da temperatura de superfície de pele. (A) região do olho, (B) região da frente, (C) região do flanco e (D) região da costela.



Fonte: própria autoria.

### *Análises estatísticas*

A análise estatística foi dividida em duas partes, a primeira (1) consta do efeito das ondas de calor sobre as respostas de FR, TR, TSP e produção de leite, e a segunda (2) do efeito do tempo de exposição das vacas ao calor durante as ondas de calor.

(1) O estado térmico e as respostas de produção de leite das vacas leiteiras, durante a exposição às ondas de calor, foram divididos em três períodos, sendo eles: pré-onda de calor (2 dias antes da onda), início da onda (2 primeiros dias em onda) e final da onda de calor (os dias seguintes). Em cada período, os valores médio, mínimo e máximo da FR, TR, TSP e a produção de leite diária foram determinados para cada animal, em cada dia e horário. A relação das variáveis FR, TR, TSP e produção de leite entre o período (pré-onda de calor, início e final) e a hora da coleta (5, 13 e 19h), dentro da HW1 e HW2, foram investigadas usando o procedimento GLIMMIX do SAS (versão 9.4). A normalidade dos dados foi confirmada usando o teste Shapiro-Wilk. Assim, no modelo foi considerado como efeito fixo as ondas de calor (HW1 e HW2), o período (pré, início e final) e a hora da coleta (5, 13 e 19h) e suas interações. As variáveis de dias em lactação, número de partos e mês e ano do parto foram consideradas

como efeitos aleatórios. As diferenças estatísticas foram determinadas usando o teste de Fisher ( $p \leq 0,05$ ).

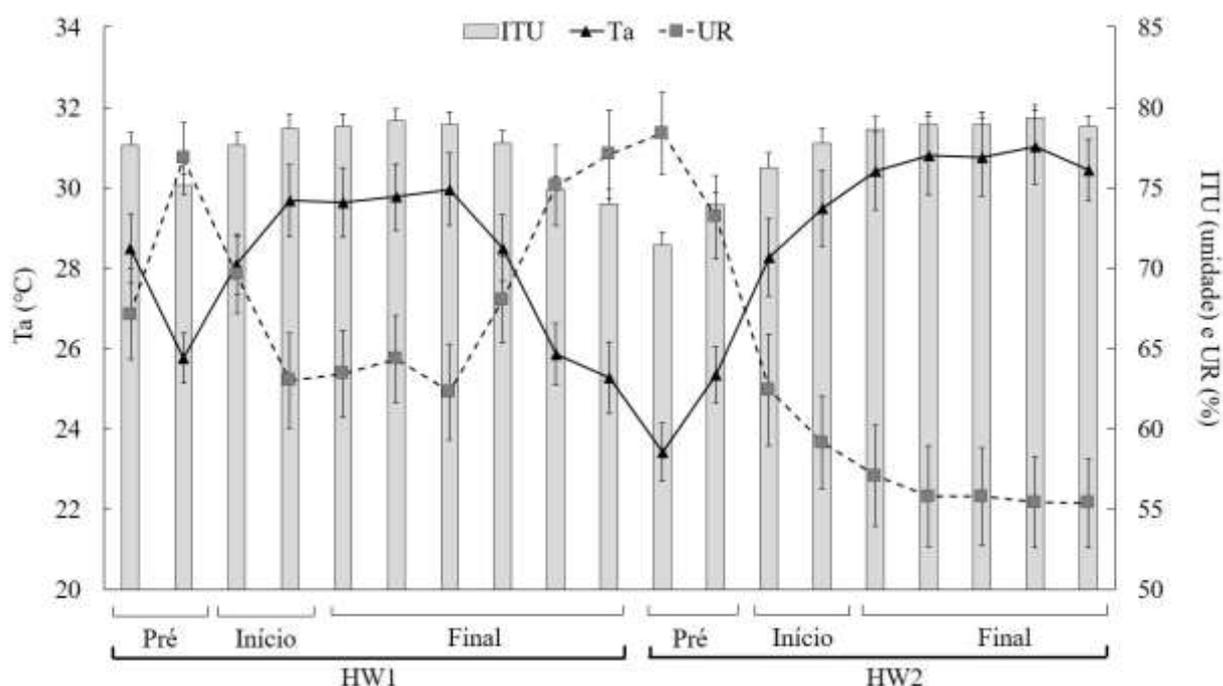
(2) Para avaliar e determinar o efeito do tempo de exposição (em horas) das vacas ao calor durante as ondas de calor, a  $T_a$  foi dividida em duas categorias, (i)  $T_a > 29$  °C: o tempo que as vacas foram expostas a  $T_a$  maior que 29 °C. Alguns autores apontam que vacas leiteiras Holandesas diminuem significativamente a produção de leite após  $T_a$  de 29 °C (Dikmen e Hansen, 2009). E, (ii)  $T_a > 36$  °C: o tempo que as vacas foram expostas a  $T_a$  maior que 36 °C. Esta última foi determinante para desconforto térmico durante períodos de ondas de calor (indicado no Capítulo 2). Nestas análises foram consideradas apenas as horas de exposição ao calor, independentemente da onda de calor (HW1 e HW2). Assim, os dados foram avaliados por meio de análise de regressão pelo procedimento REG do SAS e foram testados modelos lineares e quadráticos entre as horas e as variáveis de FR, TR e TSP. Finalmente, foram realizadas as correlações de Pearson utilizando o pacote “ggplot2” do R entre as variáveis ambientais e variáveis fisiológicas e produtivas.

### 3.3 Resultados

#### *Ambiente climático e ondas de calor*

Os resultados relacionados aos dados meteorológicos diários (temperatura média, umidade relativa média e ITU médio) durante todo o período experimental estão descritos na Figura 14.

Figura 14 - Comportamento da temperatura média do ar (Ta), umidade relativa do ar (UR) e índice de temperatura e umidade (ITU) para todo período experimental das ondas de calor 1 (HW1) e ondas de calor 2 (HW2).



Fonte: própria autoria.

Durante a HW1 e HW2 foram observadas características distintas para as condições ambientais de estresse térmico (Figura 14; Tabela 5). A Ta média e máxima diária foram 1,8 °C ( $p < 0,05$ ) e 1,1 °C ( $p = 0,08$ ) maior durante a HW2, em relação a HW1 (Tabela 5). Também, a UR média, mínima e máxima foram significativamente menores durante a HW2 ( $p < 0,05$ ) (Tabela 5). Em relação ao ITU médio, mínimo e máximo não houve diferença ( $p > 0,05$ ) entre as ondas de calor, HW1 e HW2 (Tabela 5).

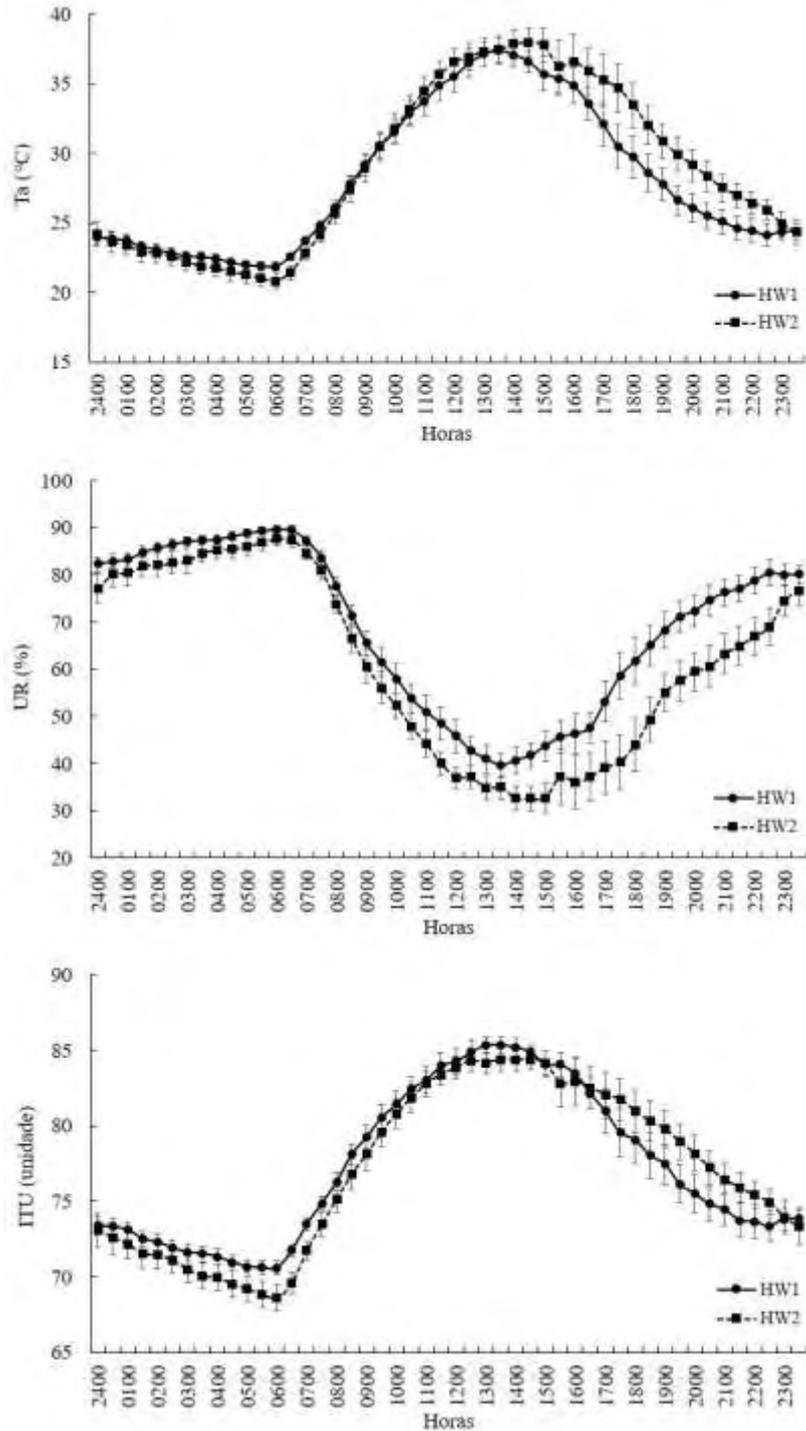
Tabela 5 - Dados médio, mínimo e máximo da temperatura do ar (Ta), umidade relativa do ar (UR) e índice de temperatura e umidade (ITU) para a onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2).

| Item   | Ta        |           |      | UR        |           |       | ITU       |           |      |
|--------|-----------|-----------|------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|------|
|        | HW1       | HW2       | p    | HW1       | HW2       | p     | HW1       | HW2       | p    |
| Média  | 28,4±0,65 | 30,2±0,37 | 0,04 | 67,9±2,01 | 57,3±0,99 | <0,01 | 77,5±0,70 | 78,4±0,39 | 0,31 |
| Mínimo | 21,6±0,36 | 21,3±0,49 | 0,66 | 35,5±1,43 | 27,2±0,58 | <0,01 | 70,1±0,58 | 69,4±0,70 | 0,42 |
| Máximo | 38,8±0,43 | 39,9±0,38 | 0,08 | 89,9±0,90 | 85,9±1,28 | 0,02  | 86,6±0,19 | 86,0±0,36 | 0,20 |

Fonte: própria autoria.

Os resultados relacionados ao ciclo diário da Ta, UR e ITU durante as ondas de calor podem ser visualizados na Figura 15. Em relação a Ta, foi observado um rápido aumento da temperatura entre às 6h30 e 13h30 e uma queda mais lenta até o período noturno, para ambas ondas de calor (Figura 15). A maior temperatura (pico) foi observada às 13h30 (37,4 °C) e às 14h00 (37,9 °C) para HW1 e HW2, respectivamente (Figura 15). Após o pico da Ta, ambas HW1 e HW2 apresentaram perfil semelhante. No entanto, a HW1 exibiu uma queda com valores de Ta menores, em relação a HW2 (Figura 15). Como esperado, a UR apresentou ciclo diário contrário à Ta. Quando a Ta alcançou o maior valor, a UR teve o menor valor durante a HW1 (39,6%) e HW2 (32,7%), aumentando proporcionalmente conforme a diminuição da Ta (Figura 15). Em relação ao ITU, os menores valores foram observados às 6h00 para HW1 (70,6) e HW2 (68,6), e os maiores valores às 13h30 de 85,4 (HW1) e 84,3 (HW2) (Figura 15).

Figura 15 - Ciclo diário da temperatura do ar ( $T_a$ ), umidade relativa do ar (UR) e índice de temperatura de umidade (ITU) durante onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2).



Fonte: própria autoria.

Em relação a duração das horas de exposição das vacas em  $T_a > 29$  °C e  $T_a > 36$  °C, as vacas foram submetidas em 22% a mais em  $T_a > 29$  °C e 40% em  $T_a > 36$  °C na HW2, em relação HW1, o que indicou a maior severidade de calor na segunda onda de calor (Tabela 6; Figura 15). Quando analisamos o acúmulo de calor pelo ITU ( $ITU > 72$ ), o percentual de horas

sob condições de estresse térmico foi ainda maior na HW1 (78,6%) e HW2 (83,3%) (Tabela 6; Figura 15).

Tabela 6 - Tempo (horas) e porcentagem do tempo (%) de exposição das vacas ao calor durante a onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2) nas categorias  $T_a > 29\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a > 36\text{ }^\circ\text{C}$  e  $ITU > 72$ .

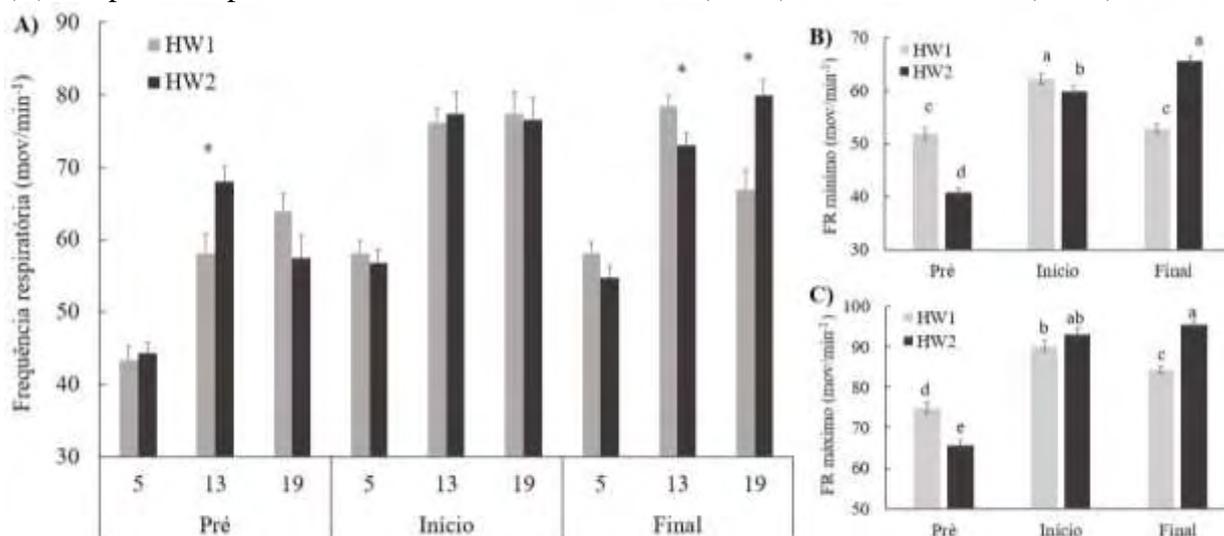
| Item  | $T_a > 29\text{ }^\circ\text{C}$ |          |       | $T_a > 36\text{ }^\circ\text{C}$ |          |       | ITU > 72 |          |      |
|-------|----------------------------------|----------|-------|----------------------------------|----------|-------|----------|----------|------|
|       | HW1                              | HW2      | p     | HW1                              | HW2      | p     | HW1      | HW2      | p    |
| Horas | 77,5                             | 87,5     | -     | 31,0                             | 45,0     | -     | 151      | 140      | -    |
| %     | 40,4±3,3                         | 52,1±1,2 | <0,01 | 16,1±2,4                         | 26,8±1,9 | <0,01 | 78,6±7,6 | 83,3±3,9 | 0,60 |

Fonte: própria autoria.

#### *Efeito das ondas de calor nas respostas fisiológicas de FR, TR, TSP e produção de leite*

Neste estudo, houve efeito significativo para FR média para HW ( $p < 0,0001$ ), período ( $p < 0,0001$ ), hora da coleta ( $p < 0,0001$ ) e da interação HW  $\times$  período  $\times$  hora ( $p < 0,0001$ ), Figura 16. As diferenças significativas foram observadas no período final, sendo a maior FR às 13h na HW1 e às 19h na HW2 (Figura 16A). Também, a FR foi significativamente maior durante os períodos início e final para todos os horários de coleta, em relação aos períodos pré-onda de calor (Figura 16A). Ainda, durante os períodos início e final, os animais apresentaram os valores de FR próximos do limite de estresse térmico (60 mov/min) às 5h, aumentando significativamente para níveis de estresse térmico ( $> 70$  mov/min) às 13 e 19h, em ambas HW1 e HW2 (Figura 16A).

Figura 16 - Resultados da frequência respiratória ( $\text{mov}/\text{min}^{-1}$ ) média (A), mínima (B) e máxima (C) nos períodos pré, início e final da onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2).



\*houve diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre a HW1 e HW2.

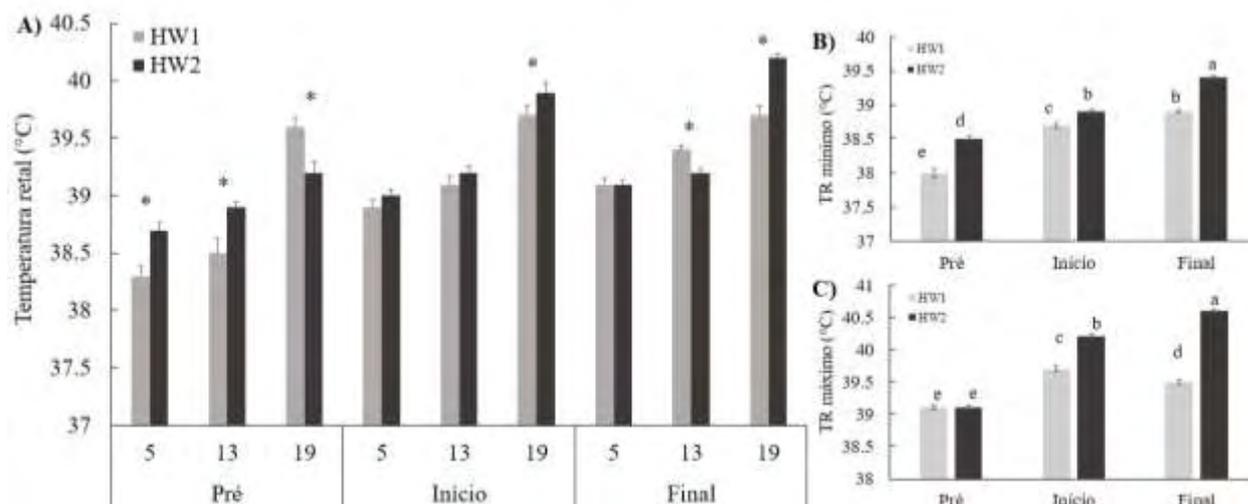
Letras diferentes diferem significativamente entre o período e ondas de calor.

Fonte: própria autoria.

Para FR mínima (Figura 16B) e máxima (Figura 16C) houve efeito significativo do período ( $p < 0,0001$ ) e da interação HW  $\times$  período ( $p < 0,0001$ ), não foi observado efeito significativo de HW em ambas FR mínima e máxima (Figura 16). Assim, a FR mínima apresentou os valores mais elevados ( $62,2\text{mov}/\text{min}$ ) no período início da HW1, enquanto na HW2 os maiores valores ( $65,5\text{mov}/\text{min}$ ) foram observados no período final. Já a FR máxima, apresentou valores entre 90 a  $95,3\text{mov}/\text{min}$  para a HW1 e HW2, quando também houve redução significativa no período final da HW1 ( $84\text{mov}/\text{min}$ ).

A TR média apresentou efeito significativo para HW ( $p < 0,01$ ), período ( $p < 0,0001$ ), hora da coleta ( $p < 0,0001$ ) e interação HW  $\times$  período  $\times$  hora ( $p < 0,0001$ ), Figura 17. Os maiores valores de TR média foram observados durante os períodos início e final, em relação ao período pré-onda de calor (Figura 17A). O período início apresentou um rápido aumento da TR média ( $p < 0,0001$ ) para todos horários de coleta, caracterizando assim a fase aguda do estresse térmico (Figura 17A). Em ambas HW1 e HW2, o horário das 19h teve a maior TR (Figura 17A), sendo significativamente mais alta na HW2 nos períodos início e final. No período final, a HW1 e HW2 apresentaram diferença significativa na TR às 13h ( $39,4$  vs  $39,2^\circ\text{C}$ ;  $p < 0,0001$ ) e 19h ( $39,7$  vs  $40,2^\circ\text{C}$ ;  $p < 0,0001$ ), respectivamente (Figura 17A).

Figura 17 - Resultados da temperatura retal (°C) média, mínima e máxima nos períodos pré-onda de calor, início e final da onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2).



\*houve diferença estatística ( $p > 0,05$ ) entre a HW1 e HW2.

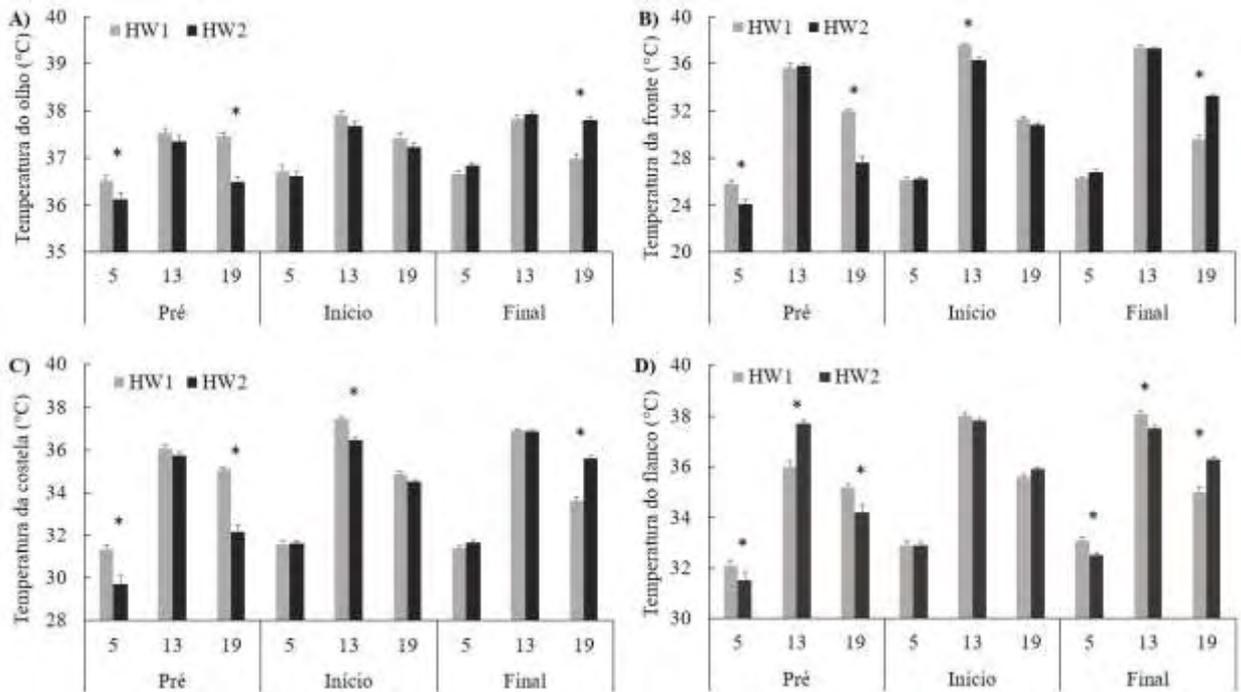
Letras diferentes diferem significativamente entre o período e ondas de calor.

Fonte: própria autoria.

Em relação a TR mínima (Figura 17B) e máxima (Figura 17C), houve efeito significativo para HW ( $p < 0,0001$ ), período ( $p < 0,0001$ ) e interação HW  $\times$  período ( $p < 0,0001$ ). No período inicial, a HW2 foi 0,2 °C maior na TR mínima ( $p = 0,003$ ) e 0,5 °C maior na TR máxima ( $p < 0,0001$ ), em relação a HW1 (Figura 17B e C). Igualmente, no período final, a HW2 foi maior na TR mínima (0,5°C;  $p < 0,0001$ ) e na TR máxima (1,1°C;  $p < 0,0001$ ), em relação a HW1 (Figura 17B e C).

Os resultados referentes as TSP estão descritos na Figura 18. Todas TSP apresentaram um mesmo padrão de comportamento, sendo os menores valores às 5h, os maiores às 13h, e com redução às 19h (Figura 18 A-D). Assim, houve efeito significativo de HW ( $p < 0,01$ ), período ( $p < 0,0001$ ), hora da coleta ( $p < 0,0001$ ) e interação HW  $\times$  período  $\times$  hora ( $p < 0,0001$ ) para as temperaturas do olho (A), frente (B), costela (C) e flanco (D) (Figura 18).

Figura 18 - Médias estimadas da temperatura de pele do olho (A), frente (B), costela (C) e flanco (D) nos períodos pré-onda de calor, início e final da onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2).



\*houve diferença estatística ( $p > 0,05$ ) entre a HW1 e HW2.

Fonte: própria autoria.

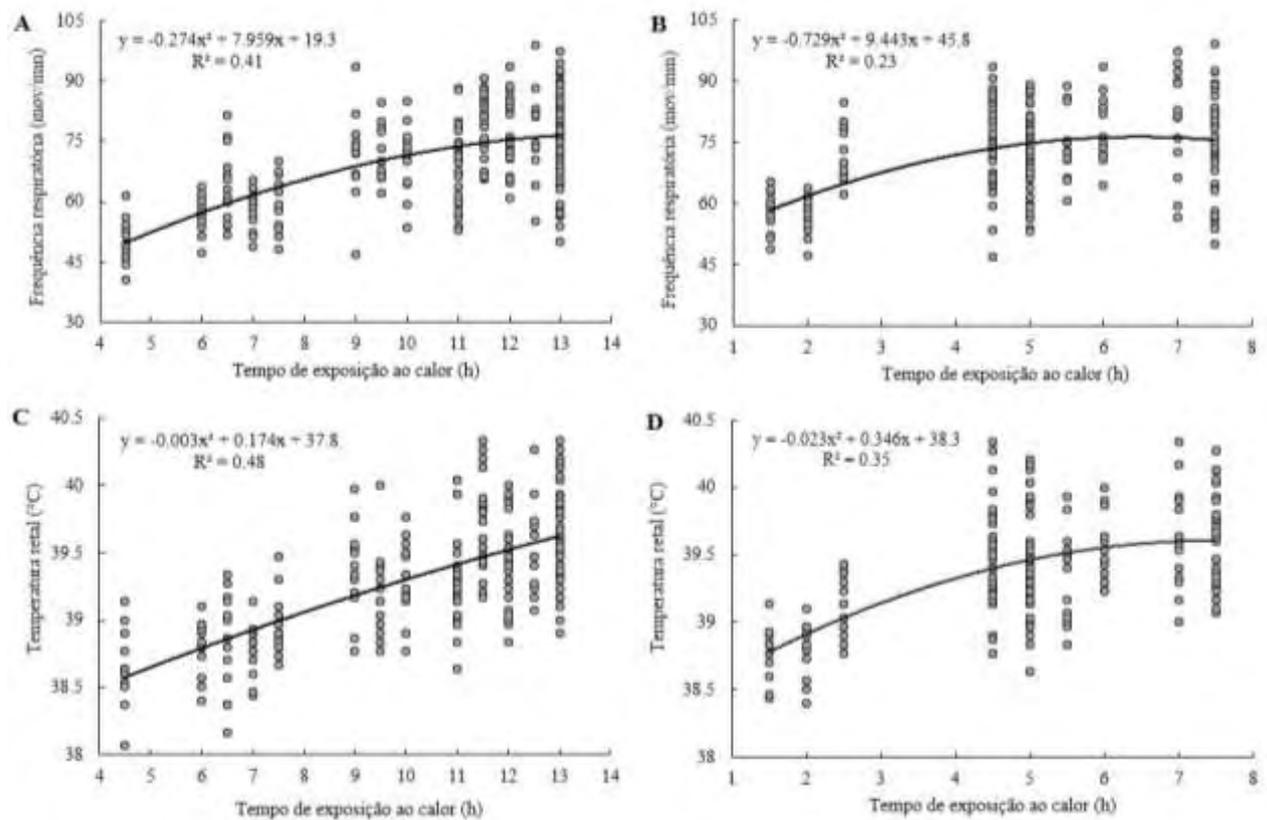
As maiores valores de TSP foram observadas durante os períodos início e final (HW1 e HW2) das ondas de calor, em comparação ao período pré-onda de calor (Figura 18). No período início foram observadas diferenças ( $p < 0,0001$ ) de 1,3 °C na temperatura da frente e de 0,9 °C entre a HW1 e HW2 às 13h (Figura 18). E no período final foram observadas diferenças ( $p < 0,0001$ ) de 0,8 °C, 3,6 °C, 2 °C e 1,3°C para a TSP do olho, frente, costela e flanco entre a HW2 e HW1 às 19h, respectivamente (Figura 18).

*Efeito do tempo de exposição dos animais em ambiente com temperatura do ar maior que 29 e 36 °C sobre as variáveis fisiológicas*

O tempo de exposição ao calor apresentou efeito quadrático ( $p < 0,01$ ) para as variáveis FR ( $R^2 = 0,23$  e  $0,41$ ) e TR ( $R^2 = 0,35$  e  $0,48$ ) (Figura 20). Diferenças foram observadas no desvio padrão (DP) dos dados, os quais variaram para a FR em HS29 e HS36 (DP = 4,5 a 11,7), quando os menores valores foram encontrados em até 2 horas de exposição em 36 °C e 7,5 horas em 29 °C (Figura 19). Desse modo, o DP foi aumentando conforme o maior tempo de exposição dos animais ao calor. Também, para a TR o DP apresentou variação durante HS29 e

HS36 (DP = 0,18 a 0,38), conforme o aumento das horas de exposição ao calor os animais foram mais dispersos em relação à média amostral (Figura 19). Ambas FR e TR exibiram curva similar, com o aumento das horas de exposição em Ta (> 29 °C e > 36 °C), maiores valores de FR e TR foram observados (Figura 19 A e C). Enquanto que baixa exposição ao calor (até 2h em Ta > 36 °C) foi suficiente para alterar a FR e TR (Figura 19 B e D).

Figura 19 - Efeito do tempo de exposição ao calor em Ta > 29 °C (A e C) e Ta > 36 °C (B e D) nas respostas de frequência respiratória e temperatura retal durante as ondas de calor.

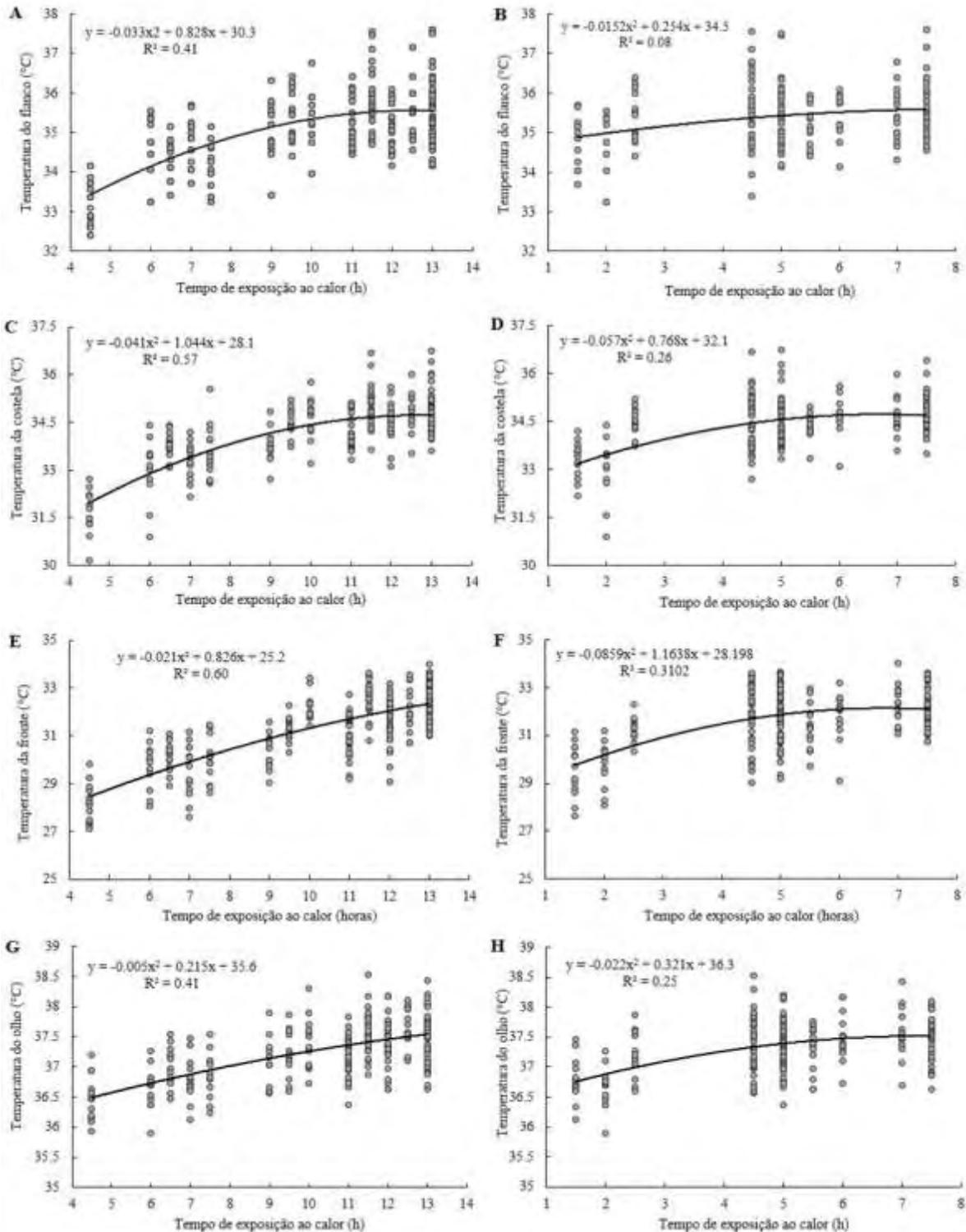


Os dados não compõem o período pré-onda de calor ao calor. Os dados representam a frequência respiratória e temperatura retal média diária.

Fonte: própria autoria.

Em relação as TSP, o tempo de exposição ao calor apresentou efeito quadrático para todas TSP (Figura 20). As mais altas relações foram encontradas entre a Ta > 29 °C e a temperatura da frente ( $R^2 = 0,60$ ) e da costela ( $R^2 = 0,57$ ), enquanto a temperatura do flanco e olho apresentaram  $R^2 = 0,41$  (Figura 20). O DP variou entre 0,36 a 1,57 para todas TSP, sendo o menor DP encontrado abaixo de 7,5 horas de exposição ao calor em HS29 e 2 horas de exposição em HS36 (Figura 20). Isto indica uma variabilidade das respostas nos mecanismos de transferência de calor pela pele das vacas leiteiras.

Figura 20 - Efeito do tempo de exposição ao calor em  $T_a > 29^\circ\text{C}$  (coluna esquerda, A-G) e  $T_a > 36^\circ\text{C}$  (coluna direita, B-H) nas temperaturas de superfície de pele durante as ondas de calor.



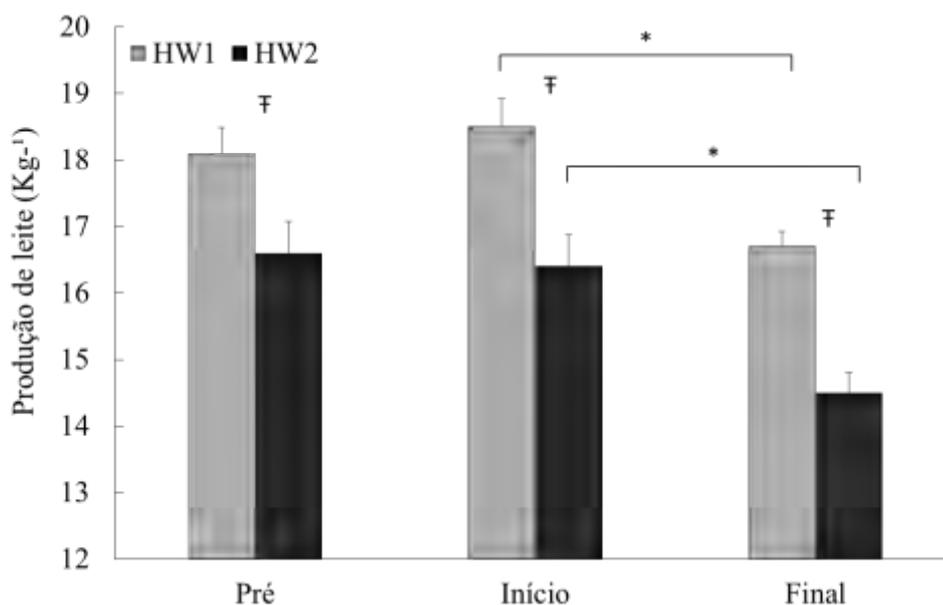
Os dados não compõem o período pré-onda de calor ao calor. Os dados representam as temperaturas de superfície de pele média diária.

Fonte: própria autoria.

### *Produção de leite*

A produção de leite diária foi significativamente diferente entre as HW ( $p < 0,0001$ ) e o período ( $p < 0,0001$ ), não foram observadas diferenças na interação HW  $\times$  período ( $p = 0,24$ ) (Figura 21). Ambas ondas de calor (HW1 e HW2) apresentaram o mesmo comportamento. A maior produção de leite foi registrada nos períodos pré-onda de calor e Início, enquanto a menor produção no período Final (Figura 21). Houve uma redução significativa na produção de leite nos período pré-onda de calor (-1,5kg/vaca), Início (-2,1kg/vaca) e Final (-2,2kg/vaca) entre a HW1 e HW2. A HW2 teve a menor produção ( $p < 0,0001$ ) quando comparada a HW1 (Figura 21). Em relação ao período pré-onda de calor da HW1 com o período Final da HW2, ou seja, a diferença total das duas ondas de calor, a queda na produção de leite foi de -3,6kg/vaca.

Figura 21 - Produção de leite média ( $\text{kg}^{-1}$ ) nos períodos pré-onda de calor, início e final da onda de calor 1 (HW1) e onda de calor 2 (HW2).



F= médias diferem estatisticamente ( $p > 0,0001$ ) entre as ondas de calor HW1 e HW2.  
 \*= médias diferem estatisticamente ( $p > 0,0001$ ) entre os períodos para cada onda de calor HW1 e HW2.

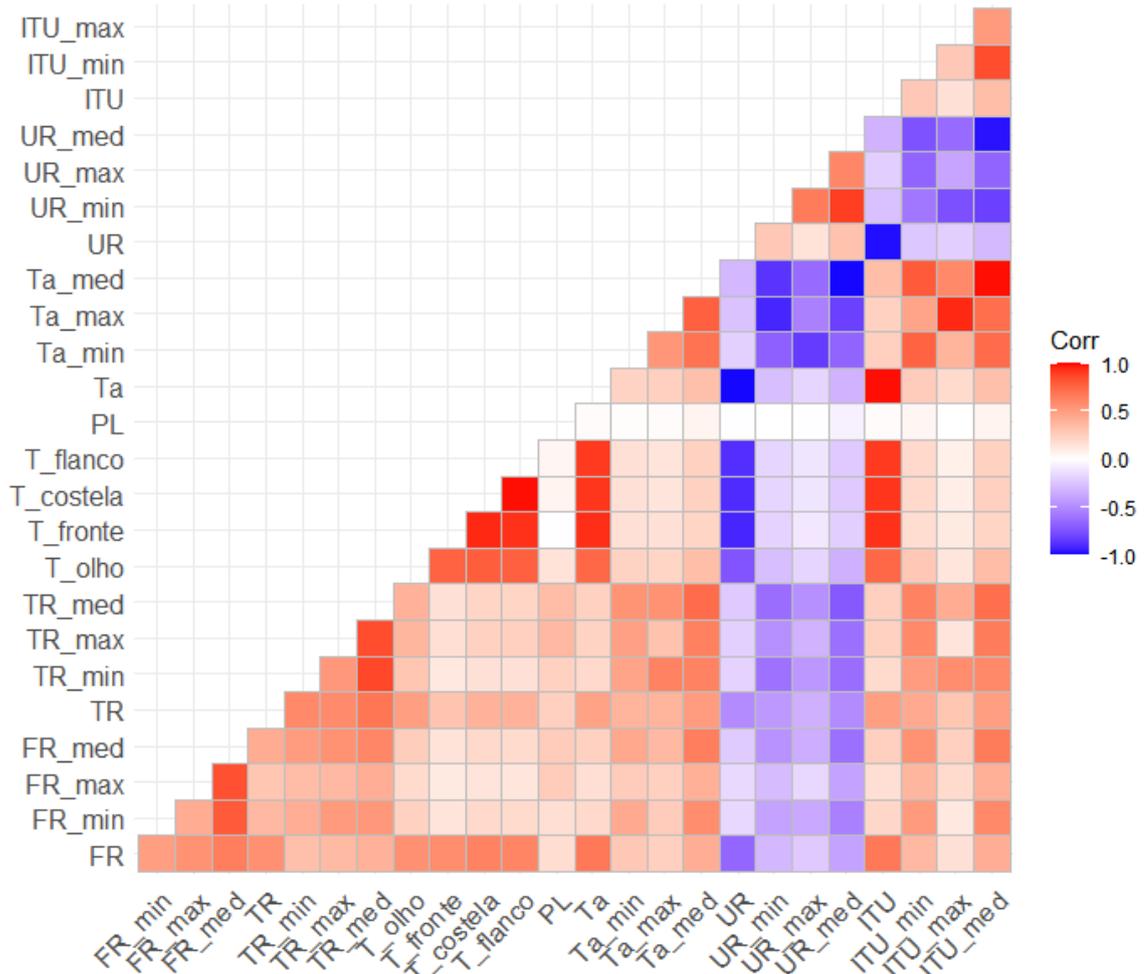
Fonte: própria autoria.

### *Correlações entre as variáveis ambientais e variáveis fisiológicas durante as ondas de calor*

As correlações estão demonstradas nas Figuras 23 e 24 para a HW1 e HW2, respectivamente. As mais altas correlações foram observadas entre as TSP e a Ta ( $r = 0,64$  e

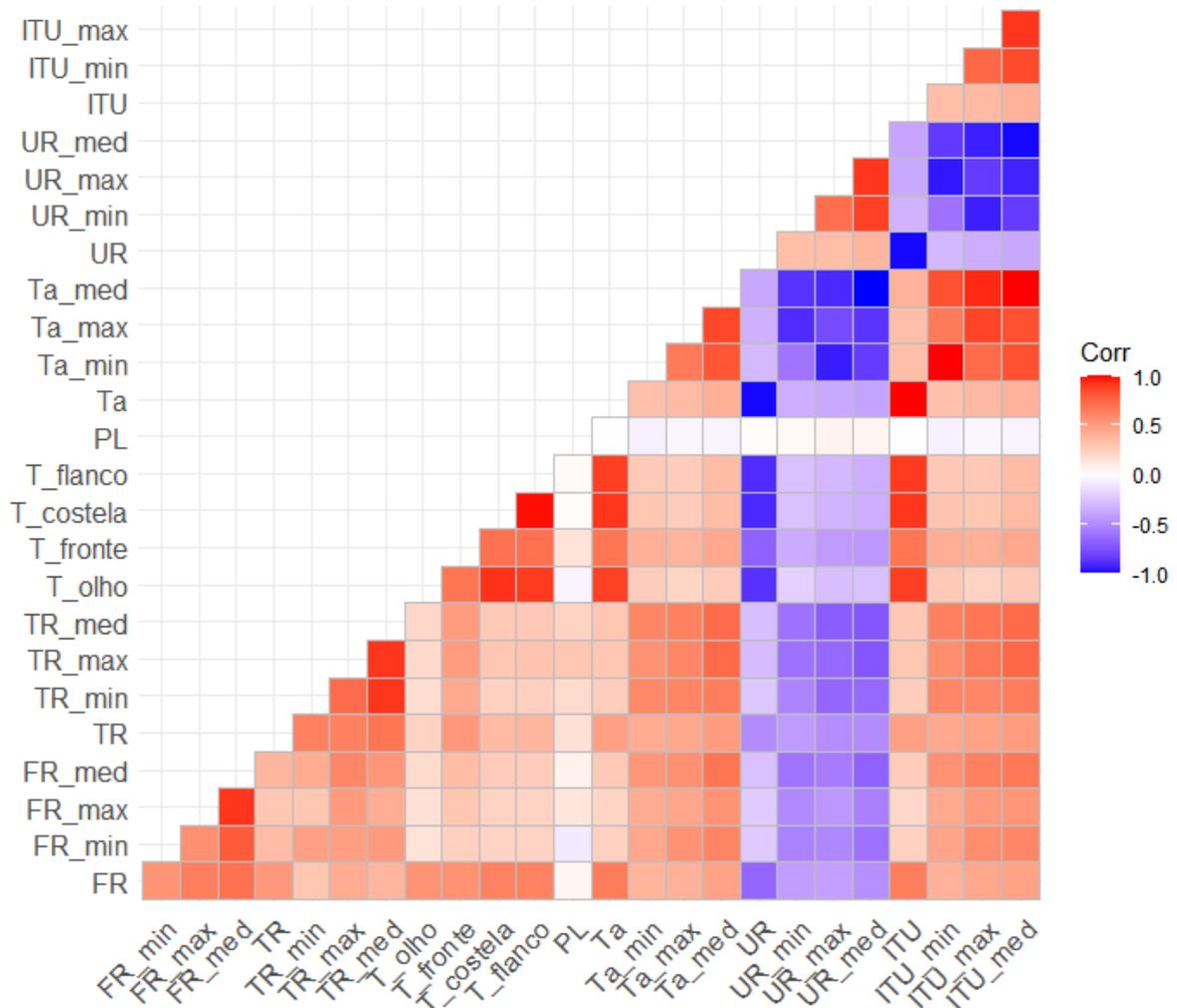
0,94), UR ( $r = -0,68$  a  $-0,92$ ) e ITU ( $r = 0,69$  a  $0,93$ ). Correlações médias foram encontradas entre as TSP e FR ( $r = 0,55$  a  $0,68$ ) e TR ( $r = 0,24$  a  $0,52$ ). A produção de leite apresentou correlação moderada com a TR média diária ( $r = 0,36$  e  $0,23$ ) e TR máxima diária ( $r = 0,39$  e  $0,30$ ) para a HW1 e HW2, respectivamente.

Figura 22 - Matriz de correlação de Pearson entre variáveis fisiológicas e ambientais para a onda de calor 1 (HW1).



Legenda: Frequência respiratória durante a coleta (FR), frequência respiratória mínima diária (FR\_min), frequência respiratória máxima diária (FR\_max), frequência respiratória média diária (FR\_med); temperatura retal durante a coleta (TR), temperatura retal mínima diária (TR\_min), temperatura retal máxima diária (TR\_max), temperatura retal média diária (TR\_med); temperatura de superfície de pele do olho (T\_olho), frente (T\_frente), costela (T\_costela), flanco (T\_flanco); produção de leite (PL); temperatura do ar durante a coleta (Ta), temperatura do ar mínima diária (T\_min), temperatura do ar máxima diária (T\_max), temperatura do ar média diária (T\_med); umidade do ar durante a coleta (UR), umidade do ar mínima diária (UR\_min), umidade do ar máxima diária (UR\_max), umidade do ar média diária (UR\_med); índice de temperatura e umidade durante a coleta (ITU), índice de temperatura e umidade mínima diária (ITU\_min), índice de temperatura e umidade máxima diária (ITU\_max), índice de temperatura e umidade média diária (ITU\_med). Fonte: própria autoria.

Figura 23 - Matriz de correlação de Pearson entre variáveis fisiológicas e ambientais para a onda de calor 2 (HW2).



Legenda: Frequência respiratória durante a coleta (FR), frequência respiratória mínima diária (FR\_min), frequência respiratória máxima diária (FR\_max), frequência respiratória média diária (FR\_med); temperatura retal durante a coleta (TR), temperatura retal mínima diária (TR\_min), temperatura retal máxima diária (TR\_max), temperatura retal média diária (TR\_med); temperatura de superfície de pele do olho (T\_olho), frente (T\_frente), costela (T\_costela), flanco (T\_flanco); produção de leite (PL); temperatura do ar durante a coleta (Ta), temperatura do ar mínima diária (T\_min), temperatura do ar máxima diária (T\_max), temperatura do ar média diária (T\_med); umidade do ar durante a coleta (UR), umidade do ar mínima diária (UR\_min), umidade do ar máxima diária (UR\_max), umidade do ar média diária (UR\_med); índice de temperatura e umidade durante a coleta (ITU), índice de temperatura e umidade mínima diária (ITU\_min), índice de temperatura e umidade máxima diária (ITU\_max), índice de temperatura e umidade média diária (ITU\_med). Fonte: própria autoria.

### 3.4 Discussão

O estresse térmico é responsável pela diminuição da produtividade, reprodução e eficiência alimentar de vacas leiteiras em todo o mundo. A preocupação sobre os efeitos negativos do calor intenso, tem aumentado consideravelmente na indústria animal, diante dos cenários futuros de aquecimento global (FODOR et al., 2018; IPCC, 2021). Com isso, são emergentes o desenvolvimento de estratégias de mitigação do calor em vacas leiteiras, especialmente na região tropical do globo, que considerem as adaptações fisiológicas e metabólicas dos animais. Este estudo avaliou o efeito de ondas de calor e o tempo de exposição ao calor nas respostas termorregulatórias de vacas Holandesas em lactação, com a finalidade de elucidar os mecanismos adaptativos de dissipação de calor durante ondas de calor consecutivas.

A intensidade do estresse térmico é dependente da flutuação da Ta diária, bem como do tempo de exposição dos bovinos ao calor (HAHN et al., 1999). Neste estudo, durante as ondas de calor a Ta média foi significativamente maior na HW2 (30,2 °C) em relação a HW1 (28,4°C), e a UR foi 10,6% menor na HW2. Assim, a HW2 apresentou característica climática de calor intenso e mais seco. Assim, a Ta média máxima também foi maior durante a HW2, em relação a HW1 (39,9 vs 38,8 °C, respectivamente). As vacas leiteiras estiveram submetidas a 26,8% (45h) do tempo total da onda de calor HW2 em Ta > 36°C e 52,1% (87,5h) em Ta > 29°C; enquanto na HW1 foram 16,1% (31h) em Ta > 36°C e 40,4% (77,5h) em Ta > 29°C. Os resultados demonstraram que os animais experimentaram Ta maior que 29 °C das 9h30 às 19h durante ambas ondas de calor, no entanto, a Ta > 36 °C foi 1h a mais na HW2 (11h30 às 16h30). Isto indica que a intensidade das ondas de calor foi diferente, limitando a zona de conforto térmico das vacas leiteiras. É importante enfatizar que a Ta média mínima foi semelhante para ambas HW1 e HW2 (~21,5 °C), ou seja, no ambiente noturno a Ta ainda permaneceu muito próxima do limite máximo de conforto térmico de vacas Holandesas (25-26 °C; BERMAN et al., 1985). Em dias muito quentes, os animais tem a oportunidade de recuperar o balanço térmico durante a noite, quando as temperaturas diminuem e a UR aumenta, proporcionando um ambiente de termoneutralidade (MARTELLO et al., 2010; VITALI et al., 2015).

O comportamento da Ta média foi similar para os períodos pré-onda de calor e início. Como esperado, o período pré-onda de calor apresentou os menores valores da Ta média na HW1 (27,2 °C) e HW2 (24,3 °C), enquanto para o período início houve um aumento (28,8 °C) para ambas HW1 e HW2. O período final apresentou valores inversos para a Ta, ou seja, durante a HW1 a Ta média foi diminuindo ao longos dos dias da onda de calor, passando de 30 °C (pico) para 25,3 °C (último dia). Enquanto, na HW2 a Ta média permaneceu alta e constante

(~30,4°C). Estes resultados demonstram que magnitude das ondas de calor deve ser considerada nas avaliações fisiológicas de vacas Holandesas em clima tropical/subtropical.

O ITU combina os efeitos da temperatura e umidade do ar, e tem sido amplamente usado para descrever os níveis de estresse térmico em vacas leiteiras. Neste estudo, foi considerado como estresse térmico  $ITU > 72$ , valor no qual as vacas leiteiras começam apresentar alterações fisiológicas (DIKMEN e HANSEN, 2009). O ITU médio não apresentou diferença significativa entre as ondas de calor HW1 e HW2 (77,5 vs 78,4, respectivamente), e ambos valores foram superiores a 72. As diferenças significativas para ITU foram observadas entre os períodos, no período pré-onda de calor as vacas experimentaram condições leves de estresse térmico (ITU entre 72 a 76) (SPIERS et al., 2018), com alguns sinais de alterações fisiológicas, especialmente no aumento na TR (~39.2°C) ao final do dia. Nos períodos início e final, o ITU médio foi considerado de estresse térmico intenso na HW1 (ITU: 78,1 e 77,2) e HW2 (ITU: 77 e 78,9), respectivamente. Porém, os animais experimentaram estresse térmico severo em algumas horas do dia (~5h/dia com  $ITU > 84$ ; HAHN et al., 1999), em ambas HW1 e HW2. Hahn et al. (1999) classificou as ondas de calor (> 3 dias) a partir do tempo de exposição (horas) de bovinos ao  $ITU \geq 79$  e o tempo de recuperação noturna com  $ITU < 72$ , então: ondas de calor leves apresentam 18-40h de  $ITU \geq 79$  e  $< 72$  por 3-10h/noite; forte, 33-65h de  $ITU \geq 79$  e  $< 72$  por 0-4h/noite; grave, 40-80h de  $ITU \geq 79$  e  $< 72$  por 0-2h/noite; extrema, 50-100h de  $ITU \geq 79$  e  $< 72$  por < 1h/noite durante 3 dias ou mais. Assim, as ondas de calor do presente estudo podem ser classificadas como grave (HAHN et al., 1999), pois, as vacas experimentaram intenso estresse térmico diário com pouca recuperação noturna por 7 e 8 dias. Os resultados sugerem que as faixas de ITU, embora sejam adequadas para identificar estresse térmico de vacas em lactação, ainda não parecem apropriados para uso de vacas aclimatadas ao clima tropical. As faixas de ITU neste estudo podem ser consideradas de alta mortalidade para vacas Holandesas, conforme alguns autores (HAHN e MADER, 1997; VITALI et al., 2015).

A termorregulação das vacas foi avaliada para entender como ocorrem as mudanças relacionadas ao estresse térmico em ondas de calor consecutivas. Dentre as formas de perda de calor, o mecanismo por evaporação é responsável por cerca de 60% da perda total de calor em vacas leiteiras (GAUGHAN et al., 2000). Assim, quando vacas leiteiras experimentam estresse térmico, inicialmente aumentam a FR como forma de dissipar o calor corporal adicional, por meio da vaporização no ambiente (GAUGHAN et al., 2000). Maia et al. (2005) sugerem que a evaporação cutânea é a via dominante para a perda de calor em  $T_a$  maior que 30 °C, sendo responsável por cerca de 85% da perda total de calor. Os 15% restantes foram atribuídos à perda de calor por evaporação respiratória (MAIA et al., 2005). Independentemente da região

corporal, há um consenso científico de que a perda de calor por respiração é extremamente importante para vacas leiteiras em estresse térmico, além de fácil mensuração (GAUGHAN et al., 2000; HOFFMANN et al., 2020). Neste estudo, foi observado valores mais altos de FR às 13 e 19h em todos períodos (pré-onda de calor, início e final) da HW1 e HW2. Durante o período início houve um aumento significativo da FR ( $> 60\text{mov/min}$ ) em todos horários de coleta, comparados ao período pré-onda de calor. Assim, o período inicial das ondas de calor foi caracterizado por apresentar respostas fisiológicas de estresse térmico agudo para ambas HW1 e HW2, como demonstrado por outros autores (FERRAZZA et al., 2017; SPIERS et al., 2018). No período final, a maior intensidade da Ta na HW2 causou um aumento significativo de 20% na FR ( $80\text{mov/min}$ ) às 19h, em relação a HW1 ( $67\text{mov/min}$ ). Assim, os resultados indicam que a HW1 não foi suficiente para desenvolver respostas adaptativas na FR, durante a HW2. Isto pode ter ocorrido por duas situações: a primeira pelo fato que durante o período final da HW1 houve uma redução da Ta e menor tempo de exposição ao calor, consequentemente a redução da FR. A segunda, durante a HW2, além da maior intensidade da Ta, houve maior tempo de exposição das vacas ao calor, demandando maior esforço fisiológico dos animais em tentar dissipar calor pela via respiratória. No entanto, a diminuição da FR nem sempre é uma indicação de que o animal está perdendo calor, e pode ser devido a alterações na dinâmica respiratória, associadas à mudança de um estado de respiração rápida para respiração mais lenta e profunda (GAUGHAN et al., 2000).

Houve uma relação positiva e significativa entre a FR e o tempo de exposição das vacas ao calor durante as ondas de calor, no entanto, essa relação foi diminuindo com o maior tempo ( $> 7,5\text{h}$  em HS29 e  $> 2\text{h}$  em HS36) de exposição ao calor. Berman et al. (2005) demonstraram que a FR aumenta exponencialmente quando a Ta passa de 25 para 35 °C. Mas isto nem sempre indica que o animal está dissipando mais calor, pois deve-se ter cuidado ao equacionar a FR com o fluxo de calor respiratório, uma vez que a troca de calor por essa via depende diretamente do volume de ar nas vias respiratórias, ou seja o volume corrente, que é individual para cada animal (BERMAN et al. 2005). Isto explica, em partes, a maior variação do DP encontrado ao longo das horas de exposição das vacas na HS29 e HS36.

O rápido aumento e a variação considerável da FR observada neste estudo não foram suficientes para prevenir a hipertermia nas vacas. A TR média observada durante as ondas de calor foi de 39,3 e 39,4 °C para HW1 e HW2, respectivamente. Esta diferença de 0,1 °C pode ser insignificante do ponto de vista termorregulador do animal. No entanto, quando observamos a TR máxima, é notório o estado de hipertermia durante a HW2 (40,4 °C), em relação a HW1 (39,6 °C). Essa diferença foi ainda maior no período final das ondas de calor, de 39,5 °C na

HW1 para 40,6 °C na HW2. Ou seja, o balanço térmico dos animais foi desafiado a limites muito superiores do estado de conforto para TR (37,8 – 39,2 °C; HOUSTON; RADOSTITS, 2000). Hansen (1994) observou que a temperatura corporal foi determinante no desempenho animal durante o estresse térmico por calor, sendo a produção de leite negativamente correlacionada com o aumento da TR acima de 39 °C (SILANKOVE, 2000; SPIERS et al., 2004; AMAMOU et al., 2019). Os resultados do presente estudo corroboram com outros autores, onde ressaltam que longos períodos de ondas de calor são prejudiciais para o processo de termorregulação dos animais (VITALI et al., 2015). Neste caso, mesmo o rebanho apresentando características homogêneas (raça, dias em lactação e produção de leite) e aclimatados ao ambiente tropical, a variabilidade das respostas de FR e TR ainda foi alta entre os animais. Isto também indica, que alguns animais não conseguiram perder, totalmente, calor por via respiratória no período diurno, e entraram no período noturno com maior carga térmica, que coincidentemente também apresentou maior Ta (> 21 °C), dificultando ainda mais a homeostasia no dia seguinte (AVENDAÑO-REYES et al., 2021).

Salientamos que, a flutuação diária da FR e TR foi um fator importante para avaliarmos os efeitos do tempo de exposição e carga de calor na termorregulação das vacas durante as ondas de calor. Neste sentido, deve-se considerar o tempo de resfriamento dos animais no período noturno, pois, a baixa temperatura corporal diária absoluta (retal ou cutânea) é determinante na produção de leite (SPIERS et al., 2018; AVENDAÑO-REYES et al., 2021).

A TSP é um dos mais importantes componentes para avaliação do estado térmico animal, a qual representa uma integração de vários fatores físicos (ex: Ta, UR e velocidade do vento) e fisiológicos (ex: ação de receptores termosensores) (BERMAN et al., 2005). Neste estudo, a TSP foi coletada de quatro áreas corporais: frente da cabeça, costela, flanco e olho; essas regiões representaram melhor o estado térmico de bovinos em clima subtropical/tropical (MARTELLO et al., 2016; SALLES et al., 2016; ANZURES-OLVERA et al., 2019; PACHECO et al., 2020). Assim, as TSP foram significativamente maiores nos períodos início e final das ondas de calor HW1 e HW2, em relação ao período pré-onda de calor. Também, a maior TSP foi observada às 13h para todas as áreas e períodos, quando também apresentou a maior Ta ( $r = 0,64$  e  $0,94$ ). Em razão da alta Ta e maior tempo de exposição ao calor durante a HW2, houve um aumento significativo para todas áreas da TSP às 19h. De fato, a maior Ta causa maior fluxo sanguíneo direcionado para a pele, para melhorar a dissipação do calor interno dos animais, o qual é positivamente correlacionado com o aumento na taxa de sudação (BLAZQUEZ et al., 1994). Do mesmo modo, que o aumento na temperatura da pele também

está associado a um aumento na taxa de sudorese em vacas leiteiras (SHEARER e BEEDE, 1990).

A perda de calor via cutânea aumenta conforme a  $T_a$ , até um valor máximo, determinado pela taxa máxima de perda de água na pele do animal ( $\sim 220\text{g/m}^2\cdot\text{h}$ ) (BERMAN et al., 2005). Spiers et al. (2018) reportaram que vacas ventiladas no período noturno apresentaram maior eficiência na perda de calor cutânea, do que vacas ventiladas durante o dia. No presente estudo, foi utilizada ventilação por ventiladores ligados 24h, isto pode ter auxiliado os animais na perda de calor por evapotranspiração da pele durante o período noturno. Porém, foi insuficiente para manter a produtividade das vacas leiteiras, já que vacas Holandesas são menos adaptadas às mudanças no ambiente climático (ondas de calor), por apresentarem maior taxa metabólica e, conseqüentemente problemas na perda de calor (DALTRO et al., 2017).

A produção de leite foi diretamente influenciada pela variação diária da  $T_a$  durante as ondas de calor. Os valores da produção total de leite diária diminuiu significativamente durante ambas ondas de calor HW1 e HW2. O período final das ondas de calor causou redução de 9 e 12% na produção de leite na HW1 e HW2, respectivamente. Assim, como nas respostas termoregulatórias de FR, TR e TSP, os efeitos da intensidade do estresse térmico na produção de leite foram mais sensíveis durante a HW2. Os resultados demonstraram que a diferença na queda da  $T_a$  em dois dias entre a HW1 e HW2, não foi suficiente para reestabelecer a produção de leite. Então, as vacas iniciaram a HW2 com menor produção (16,6kg/vaca) em relação a HW1 (18,1kg/vaca). Os mecanismos pelo qual há diminuição na produção de leite durante intenso estresse térmico ainda não são totalmente esclarecidos. Neste estudo, a menor produção no período final das ondas de calor, pode estar associada com o menor aporte energético recebido nas células epiteliais mamárias, ou seja, vacas em estresse térmico alteram o metabolismo energético para utilizar menos energia na síntese de leite, e direcionar mais energia na dissipação de calor (AVENDAÑO-REYES et al., 2021). Assim, o fluxo sanguíneo é redistribuído da glândula mamária para a superfície da pele, aumentando a taxa de sudação, o que leva a uma redução na eficiência mamária (OUELLET et al. 2020). Isto pode explicar os valores mais altos de TSP durante a HW1 e HW2, quando comparada aos períodos pré-onda de calor, com destaque para a maior TSP na HW2.

O maior tempo de exposição ao calor ( $T_a > 36\text{ }^\circ\text{C}$ ) durante as ondas de calor pode ter reduzido o consumo de alimentos e conseqüente, o menor aporte de nutrientes para a síntese de leite. Porém, alguns estudos apontam que apenas 35 a 50% da redução na produção de leite pode ser atribuída ao consumo alimentar durante o estresse térmico (RHOADS et al., 2009;

WHEELOCK et al., 2010), e que outros mecanismos relacionados ao processo de adaptação ao calor causam significativa queda na produção de leite de vacas Holandesas (TAO et al., 2020).

A importância da regulação eficaz da temperatura corporal para prevenir os efeitos do estresse térmico sobre os parâmetros fisiológicos e de produção de leite, se reflete nas características genéticas que aumentam a capacidade dos animais em se adaptar a condições do ambiente mais quente. Neste estudo, o aumento da FR, TR e TSP em função do tempo de exposição ao calor durante as ondas de calor causaram significativa queda na produção de leite. A produção de leite não foi recuperada quando a Ta diminuiu após a HW1, e os animais iniciaram a segunda onda de calor (HW2) com menor capacidade produtiva, redução de 20% ao final do experimento.

Finalmente, estratégias para mitigar o estresse térmico em vacas Holandesas no Brasil são importantes, modificações nos ambientes dos animais, como o uso de ventiladores, amenizam os impactos das temperaturas, mas são insuficientes durante as ondas de calor. Desse modo, alternar períodos de ventilação durante o dia pode ser uma forma eficiente para minimizar o estresse térmico nas vacas. Tal como, a ventilação noturna descrita por Spiers et al. (2018) e Avendaño-Reyes et al. (2021). Mais estudos são necessários para elucidar as respostas fisiológicas de vacas Holandesas durante períodos de ondas de calor em clima tropical/subtropical.

### 3.5 Conclusão

Este estudo demonstrou que as ondas de calor causaram intenso estresse térmico nas vacas Holandesas e não geraram respostas adaptativas ao calor a curto tempo (~8 dias). O tempo de exposição ao calor foi determinante, quando a Ta foi maior que 29 °C por 7,5h/dia e maior que 36 °C por 2h/dia, para aumentar os mecanismos de FR, TR e TSP, sendo importante considerar o tempo de recuperação térmica noturna. Uma redução contínua na produção de leite ocorreu entre as duas ondas de calor, sendo a produção de leite 20% menor ao final das duas ondas de calor.

### 3.6 Referências

AMAMOU, H. et al. **Thermotolerance indicators related to production and physiological responses to heat stress of holstein cows.** Journal of Thermal Biology, v. 82, p. 90-98, 2019.

ANZURES-OLVERA, F. et al. **The impact of hair coat color on physiological variables, reproductive performance and milk yield of Holstein cows in a hot environment.** Journal of Thermal Biology, v. 81, p. 82-88, 2019.

AVENDAÑO-REYES, L. et al. **Impacts on two dairy breeds of adding a third (night) cooling event under extreme ambient heat.** International Journal of Biometeorology, v.65, p. 1443-1450, 2021.

BARUSELLI, P. S. et al. **Use of embryo transfer to alleviate infertility caused by heat stress.** Theriogenology, v. 155, p. 1-11, 2020.

BERMAN, A. **Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows.** Journal of Animal Science, v. 83, n. 6, p. 1377-1384, 2005.

BLAZQUEZ, N. B. et al. **Rate of discharge and morphology of sweat glands in the perineal, lumbodorsal and scrotal skin of cattle.** Research in Veterinary Science, v. 57, n. 3, p. 277-284, 1994.

DALTRO, D. S. et al. **Infrared thermography as a method for evaluating the heat tolerance in dairy cows.** Revista Brasileira de Zootecnia, v. 46, p. 374-383, 2017.

DIKMEN, S. et al. **Effectiveness of tunnel ventilation as dairy cow housing in hot climates: rectal temperatures during heat stress and seasonal variation in milk yield.** Tropical Animal Health Production, v. 52, n. 5, p. 2687-2693, 2020.

FERRAZZA, R. A. et al. **Thermoregulatory responses of Holstein cows exposed to experimentally induced heat stress.** Journal Thermal Biology, v. 66, p. 68-80, 2017.

FODOR, N. et al. **Spatially explicit estimation of heat stress-related impacts of climate change on the milk production of dairy cows in the United Kingdom.** PloS one, v. 13, n. 5, p. e0197076, 2018.

GAUGHAN, J. B. et al. **Respiration rate: Is it a good measure of heat stress in cattle?**. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, v. 13, n. Supplement Vol C, p. 329-332, 2000.

GAULY, M.; AMMER, S. **Challenges for dairy cow production systems arising from climate changes**. animal, v. 14, n. S1, p. s196-s203, 2020.

HAHN, G. L. **Dynamic responses of cattle to thermal heat loads**. Journal of Animal Science, v. 77, n. suppl\_2, p. 10-20, 1999.

HAHN, G. L.; MADER, T. L. **Heat waves in relation to thermoregulation, feeding behavior and mortality of feedlot cattle**. In: Proceedings, Fifth International Livestock Environment Symposium. 1997.

HOFFMANN, G. et al. **Animal-related, non-invasive indicators for determining heat stress in dairy cows**. Biosystems Engineering, v. 199, p. 83-96, 2020.

HOUSTON, D. M.; RADOSTITS, O. M. **The clinical examination**. Veterinary Clinical Examination and Diagnosis, p. 91-124, 2000.

IPCC, 2021: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press. *In Press*.

MAIA, A. S. C.; da SILVA, R. G.; LOUREIRO, B. **Sensible and latent heat loss from the body surface of Holstein cows in a tropical environment**. International Journal of Biometeorology, v. 50, n. 1, p. 17-22, 2005.

MARTELLO, L. S. et al. **Alternative body sites for heat stress measurement in milking cows under tropical conditions and their relationship to the thermal discomfort of the animals**. International Journal of Biometeorology, v. 54, n. 6, p. 647-652, 2010.

MARTELLO, L. S. et al. **Infrared thermography as a tool to evaluate body surface temperature and its relationship with feed efficiency in *Bos indicus* cattle in tropical conditions**. International Journal of Biometeorology, v. 60, n. 1, p. 173-181, 2016.

MORIGNAT, E. et al. **Assessment of the Impact of the 2003 and 2006 Heat Waves on Cattle Mortality in France.** PLoS ONE, v.9, n. 3, p. e93176, 2014.

NEGRI, R. et al. **Selection for test-day milk yield and thermotolerance in Brazilian Holstein cattle.** Animals, v. 11, n. 1, p. 128, 2021.

NRC, National Research Council. **A Guide to Environmental Research on Animals.** Natl. Acad. Sci., Washington, DC (1971).

OUELLET, V. et al. **The relationship between the number of consecutive days with heat stress and milk production of Holstein dairy cows raised in a humid continental climate.** Journal of Dairy Science, v. 102, n. 9, p. 8537-8545, 2019.

OUELLET, V.; LAPORTA, J.; DAHL, G. E. **Late gestation heat stress in dairy cows: Effects on dam and daughter.** Theriogenology, v. 150, p. 471-479, 2020.

PACHECO, V. M. et al. **Thermal imaging combined with predictive machine learning based model for the development of thermal stress level classifiers.** Livestock Science, v. 241, p. 104244, 2020.

RHOADS, M. L. et al. **Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism, and aspects of circulating somatotropin.** Journal of Dairy Science, v. 92, n. 5, p. 1986-1997, 2009.

ROMANOVSKY, A. A. **Skin temperature: its role in thermoregulation.** Acta physiologica, v. 210, n. 3, p. 498-507, 2014.

RUSSO, S. et al. **Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world.** Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 119, n. 22, p. 12.500-12.512, 2014.

SALLES, M. S. V. et al. **Mapping the body surface temperature of cattle by infrared thermography.** Journal of Thermal Biology, v. 62, p. 63-69, 2016.

SANTANA, M. L. et al. **Genetics of heat tolerance for milk yield and quality in Holsteins.** *animal*, v. 11, n. 1, p. 4-14, 2017.

SHEARER, J. K., BEEDE, D. K. **Thermoregulation and physiological responses of dairy cattle in hot weather.** *Agri-practice*, v. 11, n. 4, p. 5-17, 1990.

SILANIKOVE, N. **Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants.** *Livestock Production Science*, v. 67, n. 1-2, p. 1-18, 2000.

SPIERS, D. E. et al. **Strategic application of convective cooling to maximize the thermal gradient and reduce heat stress response in dairy cows.** *Journal Dairy Science*, v. 101, n. 9, p. 8269-8283, 2018.

SPIERS, D. E. et al. **Use of physiological parameters to predict milk yield and feed intake in heat-stressed dairy cows.** *Journal of Thermal Biology*, v. 29, n. 7-8, p. 759-764, 2004.

TAO, S. et al. **Impact of heat stress on lactational performance of dairy cows.** *Theriogenology*, v. 150, p. 437-444, 2020.

VITALI, A. et al. **The effect of heat waves on dairy cow mortality.** *Journal of Dairy Science*, v. 98, n. 7, p. 4572-4579, 2015.

WEST, J. W. **Effects of heat-stress on production in dairy cattle.** *Journal of Dairy Science*, v. 86, n. 6, p. 2131-2144, 2003.

WHEELOCK, J. B. et al. **Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holstein cows.** *Journal of Dairy Science*, v. 93, n. 2, p. 644-655, 2010.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho partiu da premissa de que o clima da região de estudo já está mudando, com aumento da temperatura local e por consequência, maior intensidade e frequência das ondas de calor. Essa mudança, causa impactos na produção animal, como por exemplo:

- Aumento da temperatura do ar no período de 40 anos (1981-2021) analisados. Com aumento de 0,7 °C e 1,7 °C da temperatura mínima e máxima diária, respectivamente, após a quebra na série histórica. A temperatura máxima diária apresentou impacto direto na formação de ondas de calor.
- As ondas de calor foram mais frequentes, intensas e longas a partir da década de 2010, comparadas aos anos 1981-2000. Foram observadas em média 30,2 dias anuais em onda de calor entre 1981-2010, passando para 68,6 dias entre 2010-2021 (TX90P).
- Ondas de calor longas (> 5 dias) e intensas (> 36 °C) causaram aumento expressivo da FR, TR e TSP para níveis de estresse térmico severo. Ao contrário, ondas de calor curtas não apresentaram impactos negativos sobre as respostas termorregulatórias das vacas. A utilização de ventilação artificial pode ter amenizado o calor durante as ondas de calor curtas, mas foi insuficiente nas ondas de calor longas.
- O tempo de exposição ao calor das vacas Holandesas causou maior variabilidade nas respostas fisiológicas de FR, TR e TSP, demonstrando que alguns animais foram mais susceptíveis aos efeitos da alta temperatura nas ondas de calor. De modo geral, os animais deste estudo ainda são vulneráveis ao estresse térmico, mesmo com anos no processo de aclimação.
- A produção de leite foi negativamente impactada pelas ondas de calor longas e intensas, com quedas entre 0,20 a 2,06kg/dia/vaca. Além disso, a produção de leite não foi recuperada até 48 horas após o final das ondas de calor. Também, ondas de calor longas e consecutivas causaram maior queda na produção de leite, com redução de 20% na produção total.
- Estratégias para mitigar o calor nos sistemas de produção de leite devem ser desenvolvidas com urgência. O Brasil, em geral, tem sofrido com períodos de secas prolongadas e aumento na frequência de ondas de calor nos últimos anos. Conforme os resultados deste estudo, animais da raça holandesa experimentaram desconforto térmico, em ambiente intensivo (*free-stall*) com ventilação artificial, durante ondas de calor. Portanto, medidas que englobem questões de sustentabilidade, ambiente térmico e produção de leite devem ser aprimorados com base na genética e adaptabilidade dos animais ao clima mais quente no futuro.