



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ANÁLISE DO ESTRESSE TÉRMICO NA PRODUÇÃO DE LEITE EM VACAS
HOLANDESAS COM DADOS METEOROLÓGICOS DE ESTAÇÕES E
NASAPOWER**

MAGNO PEREIRA DAS NEVES

RONDONÓPOLIS – MT

2026



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ANÁLISE DO ESTRESSE TÉRMICO NA PRODUÇÃO DE LEITE EM VACAS
HOLANDESAS COM DADOS METEOROLÓGICOS DE ESTAÇÕES E
NASAPOWER**

**MAGNO PEREIRA DAS NEVES
ENGENHEIRO AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

Orientador: Prof. Dr. Mário Luiz Santana Júnior

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Annaiza Braga
Bignardi Santana

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Rondonópolis, Mato Grosso, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

RONDONÓPOLIS – MT

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte

Ficha Catalográfica elaborada de forma automática com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

N511a Neves, Magno Pereira das.
Análise do estresse térmico na produção de leite em vacas holandesas com dados meteorológicos de estações e NASAPOWER [recurso eletrônico] / Magno Pereira das Neves. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 54 f., il. color., pdf). – 2026.

Orientador(a): Mario Luiz Santana.
Coorientador(a): Annaiza Braga Bignardi Santana.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Rondonópolis, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Rondonópolis, 2026.
Inclui bibliografia.

1. Parâmetros genéticos. 2. Gado de leite. 3. Regressão segmentada. 4. Índice de temperatura e umidade. I. Santana, Mario Luiz, *orientador*. II. Santana, Annaiza Braga Bignardi, *coorientador*. III. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise do Estresse Térmico na Produção de Leite em Vacas Holandesas com Dados Meteorológicos de Estações e NASAPOWER

AUTOR : Magno Pereira das Neves

Dissertação defendida e aprovada em **06 de fevereiro de 2026**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Prof. Dr. Mário Luiz Santana Júnior (Presidente Banca / Orientador)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Rondonópolis

2. Prof. Dr. Rodrigo Junqueira Pereira (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Rondonópolis

3. Profa. Dra. Annaiza Braga Bignardi Santana (Membra Externa)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Rondonópolis

4. Profa. Dra. Lenira El Faro (Membra Externa)

INSTITUIÇÃO: Instituto de Zootecnia

Rondonópolis, 09/02/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Annaiza Braga Bignardi Santana, Docente - UFR**, em 10/02/2026, às 08:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mário Luiz Santana Júnior, Docente - UFR**, em 10/02/2026, às 08:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Junqueira Pereira, Docente - UFR**, em 10/02/2026, às 09:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufr.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0648189** e o código CRC **51099286**.

“Dedico esta dissertação aos meus pais, que com mãos calejadas empunharam enxadas, para que eu pudesse empunhar livros.”

AGRADECIMENTOS

Ao meu esposo, Valério de Souza Junior, pelo amor, paciência, incentivo diário e compreensão. Seu apoio foi fundamental para que este sonho se tornasse realidade.

Aos meus pais, Agustim Rosa das Neves e Dionestra da Silva Pereira, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos, valores e por nunca medirem esforços para me apoiar. Tudo o que sou devo, em grande parte, a vocês. À minha família, pelo carinho, incentivo e por acreditarem em mim ao longo de toda a minha trajetória.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mario Luiz Santana Junior, pela orientação, dedicação, confiança, paciência e pelos valiosos ensinamentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho. À minha coorientadora, Profa. Dra. Annaiza Braga Bignardi Santana, pela contribuição, apoio e disponibilidade, que foram essenciais para o aprimoramento desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional, e à Universidade Federal de Rondonópolis (UFR), pela estrutura, apoio institucional e por contribuir significativamente para minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a realização desta pesquisa. À Associação Brasileira de Criadores de Bovinos da Raça Holandesa (ABCBRH) e ao Dr. Claudio Nápolis Costa (EMBRAPA Gado de Leite), pelo acesso aos dados disponibilizados, os quais foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, tanto do programa quanto da vida, pelo companheirismo, apoio, trocas de conhecimento e momentos de descontração que tornaram essa caminhada mais leve.

A todos os professores que passaram pela minha vida, deixo meu sincero agradecimento pelos ensinamentos, inspirações e contribuições para minha formação pessoal e profissional. Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, minha eterna gratidão.

EPÍGRAFE

“A existência ganha sentido quando escolhemos não negar quem somos.”

RESUMO

O estresse térmico por calor representa um dos principais desafios para a produção leiteira em regiões tropicais, especialmente em vacas da raça Holandesa. Este estudo teve como objetivo analisar os efeitos do estresse térmico, mensurado pelo Índice de Temperatura e Umidade (THI), sobre a produção de leite no dia do controle (PLDC) em vacas Holandesas nas três primeiras lactações, utilizando dados meteorológicos provenientes de estações meteorológicas locais (WS) e da plataforma NASA POWER (NASAWS). A base de dados fenotípicos foi composta por 4.537.740 registros oriundos de 1.267 rebanhos distribuídos em dez estados brasileiros. Modelos de regressão aleatória que incorporaram simultaneamente os dias em lactação e o THI foram utilizados para estimar parâmetros genéticos e valores genéticos para tolerância ao calor. Estimativas divergentes de queda na produção de leite foram observadas entre as fontes de dados meteorológicos, com perdas variando de -0,70 a -0,93 kg·dia⁻¹ para WS e de -0,35 a -0,57 kg·dia⁻¹ para NASAWS. Foi identificado um limiar de estresse térmico entre 66,8 e 68,4 para NASAWS e entre 67,3 e 67,5 para WS. As estimativas de herdabilidade e correlações genéticas mostraram-se praticamente idênticas entre as diferentes fontes meteorológicas. As médias posteriores de herdabilidade (intervalos de alta densidade posterior de 95%) foram de 0,23 (0,21–0,24) para WS e 0,23 (0,21–0,24) para NASAWS. A correlação genética entre o intercepto e a inclinação foi consistentemente negativa, variando de -0,428 a -0,397, confirmando o antagonismo entre o nível geral de produção e a termotolerância. O uso dos dados da plataforma NASAPOWER viabilizou como fonte complementar, ampliando a cobertura espacial e temporal e contribuindo para maior robustez das predições genéticas, além de auxiliar na identificação dos limiares de estresse térmico e das perdas produtivas associadas. Esses resultados sustentam a adoção do NASA POWER como uma alternativa confiável e escalável para avaliações genéticas de tolerância ao calor, especialmente em regiões com infraestrutura meteorológica terrestre limitada.

Palavras-Chave: Parâmetros genéticos; Gado de leite; Regressão segmentada; Índice de temperatura e umidade.

ABSTRACT

Heat stress represents one of the main challenges to dairy production in tropical regions, particularly in Holstein cattle. This study aimed to analyze the effects of heat stress, measured by the Temperature–Humidity Index (THI), on test-day milk yield (PLDC) in Holstein cows during the first three lactations, using meteorological data derived from ground-based weather stations (WS) and the NASA POWER platform (NASAWS). The phenotypic dataset comprised 4.537.740 records from 1.267 herds distributed across ten Brazilian states. Random regression models simultaneously incorporating days in milk and THI were used to estimate genetic parameters and breeding values for heat tolerance. Divergent estimates of milk yield decline were observed between meteorological data sources, with losses ranging from -0,708 to -0,939 kg·day⁻¹ for WS and from -0.354 to -0.579 kg·day⁻¹ for NASAWS. Heat-stress thresholds were identified between 66,8 and 68,4 THI units for NASAWS and between 67.3 and 67.5 for WS. Estimates of heritability and genetic correlations were virtually identical across meteorological data sources. Posterior means of heritability (95% high posterior density intervals) were 0.23 (0.21–0.24) for WS and 0.23 (0.21–0.24) for NASAWS. The genetic correlation between the intercept and the slope was consistently negative, ranging from -0.428 to -0.397, confirming the antagonism between general production level and thermotolerance. The use of data from the NASA POWER platform proved to be feasible as a complementary source, expanding spatial and temporal coverage and contributing to greater robustness of genetic predictions, in addition to supporting the identification of heat stress thresholds and associated production losses. These results support the adoption of NASA POWER as a reliable and scalable alternative for genetic evaluations of heat tolerance, especially in regions with limited ground-based meteorological infrastructure.

Keywords: Genetic parameters; Dairy cattle; Segmented regression; Temperature and humidity index.

SUMÁRIO

30		
31		
32	1	INTRODUÇÃO 14
33	2	REVISÃO DE LITERATURA 16
34	2.1	Banco de Dados Meteorológicos no Brasil 16
35	2.2	Estações Meteorológicas Locais e NASA POWER 17
36	2.3	Efeito do Índice de Temperatura e Umidade no Manejo de Vacas Leiteiras 18
37	2.4	Melhoramento Genético como Ferramenta no Controle do Estresse Térmico
38	21	
39	2.5	Impacto das mudanças climáticas sobre a pecuária leiteira no Brasil23
40	3	MATERIAL E MÉTODOS25
41	3.1	Fonte de Dados de Produção Leiteira25
42	3.2	Descritor do Estresse Térmico.....27
43	3.3	Definindo o Número de Dias de Estresse Térmico29
44	3.4	Impactos do Estresse Térmico na Produção de Leite.....31
45	3.5	Estimação de Parâmetros Genéticos.....33
46	3.6	Validação Entre as Bases de Dados Meteorológicos35
47	4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....37
48	4.1	Análise da Média Móvel no Impacto do THI na PLDC37
49	4.2	Análise Fenotípica39
50	4.3	Parâmetros Genéticos43
51	4.4	Comparação entre as Bases de Dados Meteorológicos47
52	5	CONCLUSÃO.....49
53		REFERÊNCIAS50
54		

LISTA DE FIGURAS

55	
56	
57	Figura 1: Distribuição geográfica das fazendas brasileiras utilizadas no estudo
58	representados por pontos azuis.26
59	Figura 2: Distribuição da estimativa de mínimos quadrados (EMQ) da produção de
60	leite no dia do controle (PLDC) em kg/dia em função dos valores de THI
61	considerando os dias anteriores (0, -1, -2, -3 e -4).....38
62	Figura 3: Relação entre o índice de temperatura e umidade (THI) e a produção de
63	leite no dia do controle (PLDC) em vacas Holandesas nas três primeiras lactações,
64	utilizando dados meteorológicos de estações locais WS e da plataforma NASA
65	POWER.....40
66	Figura 4: Médias posteriores (pontos) e intervalos de alta densidade posterior de
67	95% (linhas horizontais) para componentes de (co)variância estimados usando
68	modelos de regressão aleatória que incorporam tanto os dias em lactação quanto o
69	índice de temperatura e umidade como covariáveis para dados de vacas da raça
70	Holandesa. i = intercepto; s = inclinação; cov = covariância genética entre o
71	intercepto e a inclinação; r = correlação genética entre o intercepto e a inclinação; s/i
72	= razão entre a inclinação e o intercepto.....44
73	Figura 5: Médias posteriores (símbolos) e intervalos de alta densidade posterior de
74	95% (linhas verticais) das estimativas de herdabilidade da produção de leite no dia
75	do controle, ao longo de combinações selecionadas de dias em lactação (DIM) e
76	índice de temperatura e umidade (THI).....45
77	Figura 6: Médias posteriores das estimativas de correlação genética da produção de
78	leite, ao longo de combinações selecionadas de dias em lactação (DIM) e índice de
79	temperatura e umidade (THI).46
80	

LISTA DE TABELA

81	
82	Tabela 1: Estatísticas descritivas dos dados de produção de leite no dia do controle
83	(PLDC).....27
84	Tabela 2: Estatísticas descritivas do THI por estado estimado pela plataforma NASA
85	POWER e por estações meteorológicas locais.29
86	Tabela 3: Estatísticas descritivas de THI nas diferentes janelas temporais para as
87	três primeiras lactações.....30
88	Tabela 4: DIC dos modelos ajustados considerando o efeito de dias anteriores do
89	THI sobre a produção de leite no dia do controle (PLDC).37
90	Tabela 5: Estimativas do Breakpoint (BP) intercepto (a) e dos coeficientes de
91	regressão (b1 e b2), que descrevem a relação entre as médias de produção de leite
92	estimadas por mínimos quadrados e o índice de temperatura e umidade, obtidas a
93	partir do modelo linear segmentado.42
94	
95	
96	
97	
98	
99	
100	
101	
102	
103	
104	
105	
106	
107	
108	
109	
110	
111	

112 1 INTRODUÇÃO

113

114 As fazendas brasileiras de pecuária leiteira enfrentam desafios significativos
115 na aquisição de dados climáticos em razão do número insuficiente de estações
116 meteorológicas terrestres e que possuam informações de domínio público. Fatores
117 como o elevado custo de implantação dessas estações, bem como, a distância em
118 que as fazendas se encontram das mesmas, prejudicam a obtenção das
119 informações e a confiabilidade das mesmas (SIQUEIRA *et al.*, 2018; DE AGUIAR;
120 LOBO, 2020).

121 A coleta e a disponibilização de dados meteorológicos são fundamentais para
122 áreas como as ciências agrárias e ambientais, sendo essenciais ao desenvolvimento
123 sustentável das atividades econômicas. Devido à extensão territorial e à diversidade
124 climática do Brasil, é necessário que as estações meteorológicas sejam bem
125 distribuídas e confiáveis (ESCADA *et al.*, 2021; SIQUEIRA *et al.*, 2018). No entanto,
126 ainda há grandes desafios, especialmente em regiões remotas ou de difícil acesso
127 (PUGAS, 2023).

128 A limitação de estações meteorológicas, principalmente em áreas remotas,
129 impacta a pesquisa agropecuária e a tomada de decisões que refletem diretamente
130 no conforto térmico e manejo dos animais, em especial se os animais passam por
131 algum tipo de estresse biótico ou abiótico (MBUTHIA *et al.*, 2022a; SEJIAN *et al.*,
132 2015). Cuellar *et al.* (2023) destacam que o estresse térmico aciona respostas
133 fenotípicas, genéticas, fisiológicas e comportamentais nos bovinos leiteiros, exigindo
134 um alto gasto energético para manutenção da homeotermia.

135 Os estudos sobre o impacto do estresse térmico em bovinos leiteiros da raça
136 Holandesa tornam-se essenciais devido à sensibilidade desses animais às variações
137 ambientais, que afetam diretamente sua produtividade e bem-estar. Esse impacto se
138 agrava em decorrência das mudanças climáticas, aumentando a necessidade de
139 estratégias eficazes para mitigar seus efeitos (AGUILAR; MISZTAL; TSURUTA,
140 2009; DALTRO *et al.*, 2020).

141 Métodos individuais de quantificação do estresse térmico foram sugeridos,
142 porém avaliar individualmente o estresse térmico em propriedades leiteiras torna
143 essas medidas impraticáveis (KADZERE *et al.*, 2002; POLSKY e VON
144 KEYSERLINGK, 2017). Alternativamente o índice de temperatura e umidade (THI)

145 tem sido aliado em avaliar as condições de conforto térmico dos animais utilizando-
146 se de variáveis meteorológicas coletadas facilmente. O incremento de unidades de
147 THI acima da zona de termoneutralidade reduz a produção de leite, gordura e
148 proteína sugerindo uma relação antagônica (RAVAGNOLO; MISZTAL;
149 HOOGENBOOM, 2000; BERNABUCCI *et al.*, 2014; HUT *et al.*, 2022).

150 Diante da importância de compreender as respostas dos animais ao estresse
151 térmico, mas com os desafios inerentes à coleta de dados observacionais em
152 estações meteorológicas, plataformas como o NASA POWER (Prediction of
153 Worldwide Energy Resources) surgem como alternativas viáveis para monitoramento
154 climático em tempo real, oferecendo cobertura global e dados padronizados
155 (ROCKETT *et al.*, 2020; MBUTHIA *et al.*, 2022b). Essas descobertas enfatizam a
156 necessidade de validar fontes de dados meteorológicos para avaliação precisa do
157 estresse térmico em gado leiteiro e sugerem benefícios potenciais da incorporação
158 de dados baseados em satélite na seleção genética para tolerância ao calor
159 (ROCKETT *et al.*, 2020).

160 O presente estudo teve por objetivo examinar as respostas fenotípicas e
161 genéticas de vacas leiteiras da raça Holandesa ao estresse térmico durante as três
162 primeiras lactações, estimando parâmetros genéticos associados à produção de
163 leite, identificando o limiar crítico de THI e avaliando como as diferentes fontes de
164 dados influenciam essa análise. Adicionalmente, buscou-se validar os dados
165 climáticos do sistema NASA POWER com base em dados de estações
166 meteorológicas locais, comparando a precisão das duas fontes na análise do
167 impacto do estresse térmico em bovinos leiteiros da raça Holandesa.

168

169 2 REVISÃO DE LITERATURA

170

171 2.1 Banco de Dados Meteorológicos no Brasil

172

173 A coleta e a disponibilização de dados meteorológicos são essenciais para
174 diversas áreas de produção, incluindo as ciências agrárias e ambientais, que
175 desempenham um papel fundamental no desenvolvimento sustentável das
176 atividades econômicas do país. O Brasil, com seu extenso território de dimensões
177 continentais e grande diversidade climática, demanda uma infraestrutura robusta e
178 bem distribuída de estações meteorológicas para garantir uma cobertura adequada e
179 a confiabilidade dos dados (ESCADA *et al.*, 2021a; SIQUEIRA *et al.*, 2018b). No
180 entanto, essa realidade enfrenta desafios significativos, especialmente em locais de
181 difícil acesso (PUGAS, 2023).

182 O país conta com instituições responsáveis pela coleta e armazenamento de
183 dados meteorológicos, entre as quais se destacam o Instituto Nacional de
184 Meteorologia (INMET), o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
185 (CPTEC/INPE) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O INMET, por
186 exemplo, mantém uma ampla rede de estações meteorológicas, tanto automáticas
187 quanto convencionais, que disponibilizam gratuitamente dados sobre variáveis
188 climáticas como temperatura, umidade, precipitação e pressão atmosférica. Essas
189 informações são amplamente utilizadas por pesquisadores, pelo governo e pela
190 iniciativa privada na tomada de decisões, contribuindo para o desenvolvimento e a
191 eficiência de diversos setores (ESCADA *et al.*, 2021; PERAZZI *et al.*, 2021; RIBEIRO
192 *et al.*, 2017).

193 Apesar disso, as estações meteorológicas no Brasil enfrentam limitações
194 quanto à cobertura territorial. A maior parte está concentrada nas regiões mais
195 desenvolvidas e acessíveis, o que compromete a precisão e a confiabilidade dos
196 dados em áreas menos atendidas (BIER; FERRAZ, 2017). Regiões afastadas, como
197 propriedades rurais com características climáticas específicas, carecem de uma rede
198 de monitoramento adequada e de acesso público. Essa baixa densidade de
199 cobertura espacial, causada pelo número insuficiente de estações, resulta em uma
200 coleta de dados pouco representativa, dificultando a compreensão das condições
201 climáticas locais (VIANNA *et al.*, 2017). Em locais com microclimas distintos, a

202 ausência de estações meteorológicas pode prejudicar o planejamento e a gestão,
203 impactando negativamente atividades como a agricultura e a pecuária (BEZERRA *et*
204 *al.*, 2019b).

205 Além disso, há a necessidade de manutenção das estações e substituição de
206 sensores que apresentem alguma falha na leitura ou calibração em casos de erro na
207 precisão. Em regiões com alta variabilidade climática, os danos aos equipamentos
208 tendem a ser mais recorrentes (MARQUES; DERECZYNSKI, 2021; PERAZZI *et al.*,
209 2021). As condições adversas, como elevada umidade ou grandes variações de
210 temperatura, comprometem a durabilidade e a precisão dos instrumentos utilizados.
211 Ademais, a escassez de mão de obra qualificada para operar e manter essas
212 estações em pleno funcionamento representa um obstáculo ainda maior em
213 localidades isoladas. Essa carência de técnicos treinados contribui para a falta de
214 dados atualizados e confiáveis (BERNARDES *et al.*, 2023; BEZERRA *et al.*, 2019a).

215 Considerando as limitações enfrentadas pela rede de estações
216 meteorológicas no Brasil, sobretudo em relação à cobertura geográfica e à
217 manutenção dos equipamentos, torna-se necessário recorrer a fontes alternativas de
218 dados. Nesse contexto, existem as plataformas baseadas em sensoriamento remoto,
219 como o sistema NASA POWER, que oferece uma base complementar às medições
220 obtidas por estações locais. A análise comparativa entre essas fontes permite uma
221 compreensão mais abrangente das dinâmicas climáticas, especialmente em regiões
222 onde a infraestrutura convencional é limitada ou inexistente.

223

224 **2.2 Estações Meteorológicas Locais e NASA POWER**

225

226 A meteorologia é fundamental para diversos setores, como a agropecuária,
227 engenharia civil, gestão de recursos hídricos e planejamento urbano. Para que essas
228 atividades sejam desenvolvidas com base em informações climáticas confiáveis, é
229 essencial dispor de dados meteorológicos precisos. Entre as fontes disponíveis
230 destacam as estações meteorológicas locais e o sistema NASA POWER (Prediction
231 of Worldwide Energy Resources). As estações locais oferecem dados específicos de
232 determinadas regiões geográficas, enquanto o NASA POWER fornece informações
233 geradas a partir de modelos climáticos e observações por satélite (CARRARA *et al.*,
234 2023; ROSA *et al.*, 2023).

235 As estações meteorológicas locais são estruturas físicas equipadas com
236 sensores responsáveis por medir variáveis climáticas específicas. Elas fornecem
237 dados altamente precisos de uma determinada localidade, sendo essenciais para o
238 monitoramento climático e a previsão de eventos regionais. A qualidade das
239 informações geradas costuma ser elevada. No entanto, um dos principais desafios é
240 a distribuição desigual dessas estações, especialmente em países de grande
241 extensão territorial como o Brasil (CARRARA *et al.*, 2023).

242 A plataforma NASA POWER foi desenvolvida pela National Aeronautics and
243 Space Administration (NASA), esse sistema é amplamente utilizado no planejamento
244 agrícola e em pesquisas sobre o clima (MONTEIRO; SENTELHAS; GEORGE,
245 2018). Os dados disponibilizados abrangem períodos históricos e em tempo real,
246 com cobertura global, o que representa uma vantagem em relação às estações
247 locais (HALIMI; KARACA; BÜYÜKTAŞ, 2023). O uso do NASA POWER é crucial em
248 regiões com baixa densidade ou ausência total de estações físicas. Além disso, a
249 plataforma apresenta como diferencial a alta resolução espacial dos dados,
250 considerada adequada para análises detalhadas em pequena escala (SAYAGO *et*
251 *al.*, 2020).

252 Dessa forma, as estações meteorológicas locais e o NASA POWER
253 representam abordagens distintas, porém complementares, na coleta e análise de
254 dados climáticos (BARBOZA *et al.*, 2024). As estações locais oferecem elevada
255 precisão em áreas geográficas restritas, enquanto o NASA POWER proporciona
256 uma visão abrangente, essencial em regiões mal monitoradas (MONTEIRO;
257 SENTELHAS; GEORGE, 2018).

258 A integração entre essas duas fontes pode fortalecer significativamente as
259 estratégias de previsão climática e gestão ambiental, especialmente no contexto das
260 mudanças climáticas globais (CARRARA *et al.*, 2023). Além disso, o
261 desenvolvimento de técnicas de modelagem que utilizem dados de satélite surge
262 como uma área promissora para a compreensão das dinâmicas climáticas em
263 diferentes escalas (RIBEIRO *et al.*, 2017; RODRIGUES; BRAGA, 2021).

264

265 **2.3 Efeito do Índice de Temperatura e Umidade no Manejo de Vacas Leiteiras**

266

267 O manejo de vacas leiteiras representa um desafio constante, devido à

268 elevada sensibilidade de animais de raças especializadas para a produção de leite
269 ao estresse térmico (DALTRO *et al.*, 2020). A produtividade e o bem-estar estão
270 diretamente ligados às condições ambientais, sendo essencial o monitoramento
271 climático e o controle do Índice de Temperatura e Umidade (THI), métrica
272 amplamente utilizada para avaliar o conforto térmico dos bovinos, baseada na
273 combinação entre temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar (AGUILAR;
274 MISZTAL; TSURUTA, 2009; ROCKETT *et al.*, 2020).

275 A produção leiteira é altamente sensível às condições ambientais,
276 especialmente em regiões de clima tropical, onde o estresse térmico se torna um
277 fator limitante ao desempenho animal, afetando tanto raças mais adaptadas, como a
278 Gir, quanto raças de alta produção, como a Holandesa. De acordo com Kadzere *et*
279 *al.* (2002), quando o THI ultrapassa o valor de 78, há um aumento expressivo no
280 risco de estresse térmico, resultando em queda da produção leiteira, redução da
281 ingestão alimentar e comprometimento da função reprodutiva. Estudos recentes
282 confirmam que a produção leiteira tende a seguir uma resposta em parabólica ao
283 aumento do THI, com queda acentuada acima do limiar de 73 a 75 unidades,
284 variando de acordo com a região e as características genéticas dos animais
285 (CARABAÑO *et al.*, 2016).

286 Esses efeitos negativos ocorrem porque, em ambientes com calor excessivo,
287 os animais tendem a diminuir o consumo de alimentos como forma de reduzir a
288 produção interna de calor (BERNABUCCI *et al.*, 2010). Além disso, ocorrem
289 alterações fisiológicas importantes, como aumento da frequência respiratória e
290 cardíaca, bem como a redistribuição de recursos metabólicos, que passam a ser
291 priorizados para a manutenção da homeotermia, em detrimento do desempenho
292 produtivo. Modificações no metabolismo energético afetam diretamente a ação da
293 insulina, o metabolismo da glicose e a mobilização de tecidos adiposo e muscular
294 (ROCKETT *et al.*, 2023b). Essa redução alimentar é responsável por cerca de 35 a
295 50% da queda na produtividade.

296 O estresse térmico também compromete o sistema imunológico, com efeitos
297 profundos desde os estágios pré-natais até a lactação (DAHL *et al.*, 2020). Bezerros
298 oriundos de vacas expostas ao calor no final da gestação apresentam maior
299 suscetibilidade a doenças, menor transferência passiva de imunidade e alterações
300 epigenéticas que afetam a função imunológica a longo prazo (OUELLET; LAPORTA;

301 DAHL, 2020).

302 Além das perdas produtivas e sanitárias, a função reprodutiva é uma das mais
303 prejudicadas pelo estresse térmico. A elevação do THI compromete a taxa de
304 concepção, aumenta a incidência de distúrbios como retenção de placenta e eleva
305 as taxas de mortalidade embrionária. O impacto se intensifica quando a exposição
306 ocorre durante a concepção ou nas primeiras semanas de gestação, período crítico
307 para o sucesso reprodutivo (OUELLET; LAPORTA; DAHL, 2020).

308 Para mitigar os impactos do calor, estratégias específicas de manejo são
309 adotadas, como o uso de ventiladores, sombreamento, aspersores e sistemas de
310 resfriamento evaporativo. A combinação de ventiladores com aspersores, por
311 exemplo, tem se mostrado eficaz na redução do THI, promovendo melhorias no
312 bem-estar e na produtividade (BROUCEK *et al.*, 2007). Essas medidas, no entanto,
313 apresentam limitações, especialmente durante eventos climáticos extremos, como
314 ondas de calor prolongadas.

315 Nesse contexto, tecnologias de monitoramento em tempo real vêm ganhando
316 destaque, permitindo uma resposta mais rápida às variações do ambiente.
317 Dispositivos que medem continuamente a temperatura e a umidade no confinamento
318 possibilitam ajustes quase imediatos nas estratégias de resfriamento, contribuindo
319 para a redução dos efeitos do estresse térmico e a preservação da produção
320 (AGUILAR; MISZTAL; TSURUTA, 2009; DALTRO *et al.*, 2020; KADZERE *et al.*,
321 2002). Além disso, o uso de sensores em tempo real, integrados a softwares de
322 gestão, facilita a identificação de momentos críticos e contribui para a tomada de
323 decisão mais precisa e eficiente.

324 Entretanto, mesmo com os avanços nas estratégias de mitigação e nas
325 ferramentas de monitoramento, o impacto do THI elevado permanece um desafio
326 considerável, sobretudo em regiões tropicais e subtropicais. Diante da persistência
327 dos efeitos do estresse por calor, especialmente nas fases mais sensíveis do ciclo
328 produtivo, como o final da gestação e o período de lactação, torna-se evidente a
329 necessidade de novas abordagens para aumentar a resiliência dos sistemas
330 produtivos.

331

332 2.4 Melhoramento Genético como Ferramenta no Controle do Estresse 333 Térmico

334
335 Uma alternativa promissora para mitigar os efeitos do estresse térmico em
336 vacas leiteiras, além do manejo ambiental e nutricional, é o melhoramento genético.
337 A seleção de animais mais tolerantes ao calor tem ganhado destaque como
338 estratégia sustentável e de longo prazo, especialmente diante do aumento na
339 frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos. Estudos recentes
340 demonstram que há uma considerável variabilidade genética na resposta individual
341 ao estresse por calor, o que possibilita a seleção de indivíduos com maior resiliência
342 térmica sem comprometer os índices produtivos (CARABAÑO *et al.*, 2017;
343 SÁNCHEZ *et al.*, 2009).

344 Em pesquisa conduzida com vacas Holandesas nos Estados Unidos, Sánchez
345 *et al.* (2009) observaram que o limiar de tolerância ao THI possui um componente
346 genético substancial. Correlações genéticas significativas foram encontradas entre
347 esse limiar e a produção de leite, indicando que é viável selecionar animais capazes
348 de manter a produtividade mesmo em ambientes de alta carga térmica.

349 De maneira complementar, Carabaño *et al.* (2016, 2017) argumentam que a
350 adoção de modelos de norma de reação permite quantificar com maior precisão a
351 variação genética na tolerância ao calor, representada pela inclinação da curva de
352 resposta da produção leiteira à elevação do THI. No entanto, ressaltam que a
353 seleção orientada exclusivamente para altas produtividades pode comprometer a
354 termotolerância dos animais, uma vez que bovinos com maior produção tendem a
355 ser mais sensíveis ao estresse térmico. Dessa forma, torna-se imprescindível o uso
356 de índices de seleção equilibrados, que considerem simultaneamente o mérito
357 genético para produção e a capacidade adaptativa ao ambiente térmico.

358 Em seus estudos, Ravagnolo e Misztal (2000) demonstraram que o estresse
359 térmico possui herança genética mensurável e que a correlação genética entre a
360 produção de leite e a tolerância ao calor é geralmente negativa, ou seja, animais
361 mais produtivos tendem a apresentar menor tolerância ao calor. Além disso,
362 modelos que incorporam dados genômicos, fisiológicos e comportamentais vêm
363 sendo propostos para aumentar a acurácia dos valores genéticos estimados,
364 permitindo a seleção mais precisa de animais adaptados a diferentes ambientes

365 térmicos (MCWHORTER *et al.*, 2023).

366 No Brasil, nos estudos de Santana *et al.* (2015), foi verificada a existência de
367 interação genótipo X ambiente para produção de leite sob diferentes condições
368 térmicas no Brasil. O estudo demonstrou que vacas expostas a ambientes mais
369 quentes apresentavam desempenho produtivo variável dependendo do genótipo,
370 reforçando a necessidade de adaptar a seleção ao ambiente de produção.

371 Em Santana *et al.* (2016), os autores aprofundaram a análise da influência do
372 estresse térmico no período de transição e início da lactação por meio de modelos
373 de regressão aleatória. Os resultados demonstraram que o estresse térmico no
374 periparto esteve associado à redução da produção de leite, sendo essa resposta
375 dependente do mérito genético para produção. Embora o estudo não tenha avaliado
376 diretamente parâmetros fisiológicos, os autores discutem que a maior sensibilidade
377 de vacas de alto mérito genético ao estresse térmico está relacionada a mecanismos
378 fisiológicos e metabólicos já descritos na literatura, indicando maior vulnerabilidade
379 desses animais às condições adversas de calor.

380 Outro avanço importante refere-se à caracterização climática com dados
381 ambientais de alta resolução. Nesse sentido, Rockett *et al.* (2023b) validaram o uso
382 de dados meteorológicos de sensoriamento remoto via satélite (NASA POWER),
383 mostrando que o THI estimado apresenta alta correlação com medições locais, o
384 que amplia a aplicabilidade de programas de melhoramento genético mesmo em
385 regiões onde não há estações meteorológicas instaladas. O uso de modelos de
386 regressão aleatória e análises longitudinais em múltiplas lactações tem contribuído
387 para capturar melhor a resposta dos animais ao longo do tempo e em diferentes
388 estágios produtivos, fortalecendo a precisão dos índices genéticos para tolerância ao
389 calor (ARAÚJO *et al.*, 2006)

390 Assim, o melhoramento genético direcionado à termotolerância configura-se
391 como uma ferramenta complementar essencial ao manejo térmico tradicional. Sua
392 adoção permite o avanço em sistemas mais resilientes, produtivos e sustentáveis,
393 especialmente em países de clima tropical, como o Brasil. A integração entre
394 estratégias de manejo, monitoramento climático e seleção genética baseada em
395 dados genômicos representa uma abordagem moderna e necessária para garantir a
396 sustentabilidade da cadeia produtiva do leite frente às mudanças climáticas globais.

397

398 **2.5 Impacto das mudanças climáticas sobre a pecuária leiteira no Brasil**

399

400 Estudos relatam que o aumento das temperaturas e as mudanças nos
401 padrões de precipitação no Brasil afetam negativamente a produção de leite. As
402 projeções climáticas indicam aumentos de temperatura de 0,26°C por década,
403 podendo chegar até 4°C até o final do século (BURNEY *et al.*, 2014; GORI MAIA,
404 2018).

405 Oliveira *et al.* (2018) observaram que na situação climática atual já é
406 identificado um THI superior a 72, considerado um alerta no conforto térmico de
407 bovinos leiteiros e simulando aumento de até 3°C na temperatura máxima para
408 criação de cenários de mudanças climáticas causaria estresse térmico significativo,
409 resultando em até 70% de declínio na produção. Maia *et al.* (2018) destacam que um
410 aumento superior a 2°C na temperatura média, aliado à redução de 30% na
411 precipitação, pode provocar uma queda de até 14% na produção leiteira. Outros
412 estudos documentam aumentos de temperatura entre 0,6°C e 2°C associados a
413 perdas de 2,8 a 4,6 kg de leite por vaca por dia (VASCONCELOS-MELO *et al.*,
414 2023), bem como quedas acentuadas durante secas severas (BURNEY *et al.*, 2014).
415 A redução da ingestão de alimentos e a alteração de áreas adequadas à criação de
416 gado também são consequências observadas (SILVA *et al.*, 2009).

417 Como resposta, diversos estudos relatam que intervenções técnicas, como
418 sistemas de irrigação, resfriamento evaporativo, sombreamento artificial,
419 ventiladores e aspersores e práticas de manejo, incluindo modificações estruturais,
420 regimes alimentares aprimorados, reflorestamento e programas de capacitação,
421 podem mitigar o estresse térmico e melhorar a qualidade e a produção do leite
422 (OLIVEIRA, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2018; KLOSOWSKI, 2002).

423 Pesquisas realizadas em diversas regiões brasileiras, como Nordeste,
424 Sudeste, Sul e Centro-Oeste, apontam que as mudanças climáticas, por meio dos
425 efeitos combinados de temperaturas elevadas e redução das chuvas, representam
426 desafios significativos para a produção leiteira, sendo que adaptações direcionadas
427 podem gerar benefícios mensuráveis (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

428 Prevê-se que as mudanças climáticas impactem de forma marcante a
429 pecuária leiteira no Brasil, especialmente nas regiões Nordeste e Sul. Estudos
430 indicam que o aumento da temperatura e da umidade acentua o estresse térmico em

431 vacas leiteiras, resultando em quedas substanciais na produção de leite e no
432 consumo de ração (DA SILVA *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2009). No estado de
433 Pernambuco, os cenários projetados indicam grandes alterações nas áreas aptas à
434 pecuária, afetando zonas importantes de produção (SILVA *et al.*, 2009). No Sul do
435 Brasil, espera-se um aumento considerável do estresse térmico, com possíveis
436 reduções de até 70% na produção leiteira sob cenários extremos (OLIVEIRA *et al.*,
437 2018). Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida identificaram as operações nas
438 propriedades leiteiras como principais fontes de emissões ambientais, especialmente
439 as entéricas, o uso de fertilizantes e a baixa produtividade animal (SEÓ *et al.*, 2017).
440 A intensificação de sistemas baseados em pastagens surge, portanto, como uma
441 estratégia promissora para mitigar esses impactos no contexto brasileiro (SEÓ *et al.*,
442 2017).

443 Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de adoção de
444 estratégias adaptativas e sustentáveis que permitam mitigar os impactos das
445 mudanças climáticas na pecuária leiteira. O uso de tecnologias, manejo eficiente e
446 políticas públicas voltadas à resiliência climática são fundamentais para garantir a
447 continuidade da produção e a segurança alimentar nas próximas décadas.

448 3 MATERIAL E MÉTODOS

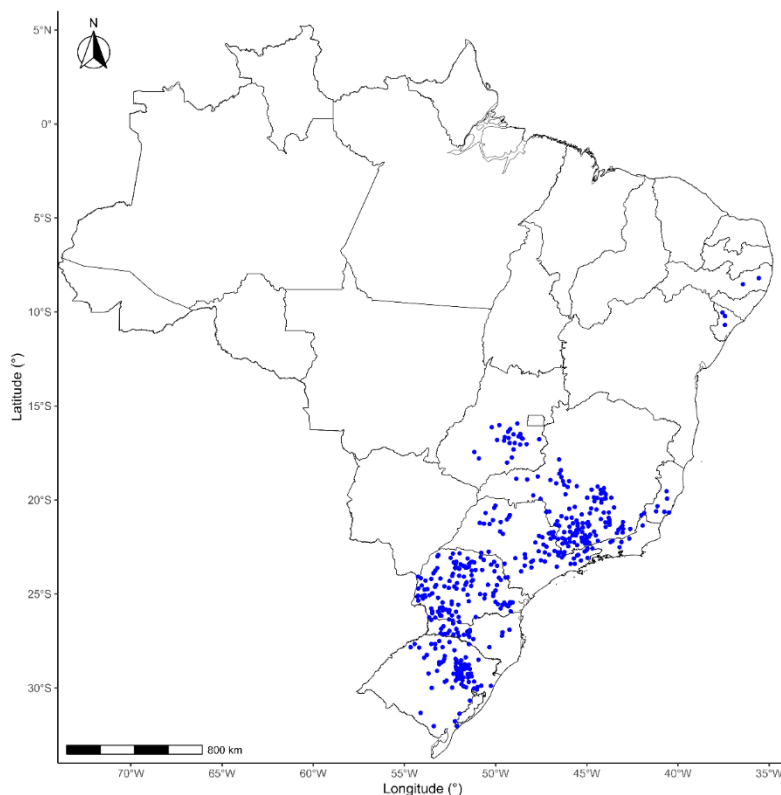
449

450 3.1 Fonte de Dados de Produção Leiteira

451

452 A base de dados utilizada no estudo foi obtida junto à Associação Brasileira
453 de Criadores de Bovinos da Raça Holandesa (ABCBRH) por meio de colaboração
454 com a EMBRAPA Gado de leite. O arquivo compreendeu 4.537.740 registros de
455 produção de leite no dia do controle das três primeiras lactações de vacas
456 Holandesas puras, paridas entre 1993 e 2021. Os dados abrangem 1.267 rebanhos
457 em 446 municípios de 10 estados brasileiros (Espírito Santo, 0,39%; Goiás, 1,94%;
458 Minas Gerais, 11,53%; Pernambuco, 0,18%; Paraná, 74,51%; Rio de Janeiro,
459 0,11%; Rio Grande do Sul, 3,55%; Santa Catarina, 0,53%; Sergipe, 0,03% e São
460 Paulo, 7,23%) do total de registros de PLDC.

461 A região Sul concentrou 78,59% dos registros, refletindo sua forte produção
462 leiteira em clima subtropical. O Sudeste, com clima tropical de planalto ou úmido,
463 representou 19,26% dos dados. Já as regiões Centro-Oeste e Nordeste, com
464 predominância de climas tropical semiúmido e atlântico/semiárido, responderam por
465 1,94% e 0,21% dos registros, respectivamente. A distribuição espacial desses dados
466 pode ser visualizada na Figura 1, que ilustra os locais das observações analisadas
467 neste estudo.



468
 469 **Figura 1:** Distribuição geográfica das fazendas brasileiras utilizadas no estudo representados por
 470 pontos azuis.
 471

472 Os sistemas de manejo adotados são predominantemente baseados em *free-*
 473 *stalls*, com fornecimento de concentrado, silagem de milho e cana-de-açúcar com
 474 ureia. Em estados como Minas Gerais e São Paulo, também é comum o uso de
 475 pastejo rotacionado com suplementação concentrada. Além disso, diversas fazendas
 476 utilizam ventilação forçada, e as mais tecnificadas contam com sistemas de
 477 aspersão, que auxiliam na redução do estresse térmico e contribuem para a
 478 produtividade dos animais.

479 Dentro desse contexto, foram consideradas apenas informações de vacas
 480 com idade ao parto entre 21 e 45 meses na primeira lactação, 31 e 55 meses na
 481 segunda e 42 e 65 meses na terceira. Foram utilizados registros de controle leiteiro
 482 entre os dias 5 e 305 da lactação, incluindo apenas vacas com pelo menos três
 483 controles, sendo o primeiro realizado até 45 dias após o parto. Os grupos de
 484 contemporâneos foram definidos como rebanho-data do controle leiteiro, com a
 485 restrição de que cada grupo deveria conter pelo menos quatro vacas.

486 A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas referentes às três primeiras
 487 lactações, comparando os registros de produção de leite no dia do controle (PLDC,

488 kg) em função da fonte das informações meteorológicas, provenientes de estações
 489 meteorológicas locais (WS) e da plataforma NASA POWER (NASAWS). Para cada
 490 lactação, são informados o número de vacas, rebanhos, registros de PLDC,
 491 municípios onde estão localizadas as fazendas e municípios onde há estações
 492 meteorológicas, além dos valores mínimo, máximo, média e desvio padrão (DP) da
 493 PLDC. Também são apresentadas as estatísticas sobre a distância (km) entre as
 494 fazendas e as estações meteorológicas.

495

496 **Tabela 1:** Estatísticas descritivas dos dados de produção de leite no dia do controle (PLDC).

Item	Lactação 1		Lactação 2		Lactação 3	
	WS	NASAWS	WS	NASAWS	WS	NASAWS
Vacas; n	190158	190158	131885	131885	76433	76433
Rebanhos; n	799	799	680	680	534	534
PLDC; n	1564612	1564612	1073228	1073228	614268	614268
Média PLDC; kg	29,19	29,19	33,34	33,34	34,59	34,59
Mediana PLDC; kg	29,30	29,30	33,51	33,51	34,80	34,80
DP PLDC; kg	7,00	7,00	9,11	9,11	9,75	9,75
Mínimo PLDC; kg	3,06	3,06	3,00	3,00	3,00	3,00
Máximo PLDC; kg	62,05	62,05	64,30	64,30	64,94	64,94
Municípios com fazendas; n	351	351	300	300	231	231
Municípios com estações; n	105	-	96	-	83	-
Distância média entre estações e fazendas; km	40,45	-	44,04	-	37,98	-
DP Distância; km	23,64	-	26,46	-	22,73	-
Distância máxima entre estações e fazendas; km	117	-	96	-	94	-

497

498 **3.2 Descritor do Estresse Térmico**

499

500 Foram construídas três bases de dados meteorológicos para o cálculo do THI.
 501 A primeira base (NASA) foi obtida a partir da plataforma NASAPOWER, sem
 502 restrição espacial, permitindo a extração de dados meteorológicos para todos os
 503 registros do banco de dados de PLDC, com coordenadas associadas a cada
 504 município avaliado. A segunda base (NASAWS) foi composta por dados do
 505 NASAPOWER extraídos em um ponto específico do município em estudo, sendo
 506 limitada aos municípios que possuíam dados correspondentes de estações
 507 meteorológicas disponíveis. A terceira base foi formada por dados provenientes de
 508 estações meteorológicas de superfície (WS), coletados nos municípios onde havia

509 estação instalada e, quando inexistente, utilizaram-se dados do município mais
510 próximo com estação meteorológica disponível, respeitando uma distância máxima
511 de 150 km. Entretanto, em aproximadamente 70% dos municípios analisados, não
512 havia estação meteorológica instalada no próprio município, o que exigiu a utilização
513 de dados provenientes do município mais próximo com estação meteorológica
514 disponível.

515 A primeira base de dados (WS) foi composta por dados de temperatura de
516 bulbo seco (T em °C) e umidade relativa (UR em %) registrados por estações
517 meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e armazenados no
518 Banco de Dados Meteorológicos BDMEP (<https://bdmep.inmet.gov.br/>). O
519 procedimento de registro de dados nas estações meteorológicas segue um padrão
520 nacional, conforme as recomendações da Organização Meteorológica Mundial
521 (WMO). Para este estudo, foram utilizadas as estações meteorológicas mais
522 próximas às fazendas avaliadas, cujas distâncias estão apresentadas na Tabela 1.
523 Nessas estações, T e UR foram registradas em quatro horários padronizados ao
524 longo do dia (03:00, 09:00, 15:00 e 21:00 h). A média diária de T e UR foi calculada
525 a partir dessas medições, e posteriormente, o THI médio diário correspondente foi
526 determinado.

527 A segunda e terceira base de dados (NASAWS e NASA) foram obtidas
528 através da plataforma NASA POWER (<https://power.larc.nasa.gov>), composto por
529 dados de temperatura de bulbo seco (T em °C) e umidade relativa (UR em %). Essa
530 plataforma foi desenvolvida para fornecer informações meteorológicas para uso
531 direto em arquitetura, geração de energia e agrometeorologia (NASA, 2025). A
532 plataforma de acesso aberto disponibiliza dados em diferentes escalas temporais.
533 Para este estudo, foram coletados a média diária de T e UR no município onde
534 estava localizada cada fazenda, possibilitando o cálculo do THI médio diário. O
535 acesso às informações foi realizado por meio de requisições à API do NASA
536 POWER, utilizando o pacote “nasapower” (SPARKS, 2024) no software R (v4.3.3; R
537 Core Team, 2024).

538 Os dados de T e UR foram utilizados para o cálculo do THI separadamente
539 para cada uma das fontes, resultando em duas bases de dados distintas, uma para
540 cada fonte meteorológica, com o índice calculado conforme a equação 1 descrita
541 pelo NRC (1971).

542
$$THI = [(1.8 * T + 32) - (0.55 - (0.0055 * RH) * (1.8 * T - 26))] \quad \text{Eq. 1}$$

543 Onde, *THI* corresponde ao Índice de Temperatura e Umidade; *T* é
544 temperatura de bulbo seco em °C e *RH* é a Umidade Relativa do Ar em %.

545 Essa fórmula foi adotada por ser adequada com as variáveis climáticas
546 disponíveis nas estações meteorológicas brasileiras e adequada aos objetivos deste
547 estudo. (BOHMANOVA *et al.*, 2005; BRÜGEMANN *et al.*, 2012; SANTANA *et al.*,
548 2017; ROCKETT *et al.*, 2023b)

549 A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas do conjunto de dados,
550 comparando os valores de THI estimados pela plataforma NASA POWER (THI
551 NASA) com aqueles obtidos por estações meteorológicas locais (THI Estações).
552 Foram reportados para cada estado, o número de registros, os valores mínimo e
553 máximo, a média e o desvio padrão do THI em ambas as fontes de dados.

554

555 **Tabela 2:** Estatísticas descritivas do THI por estado estimado pela plataforma NASA POWER e por
556 estações meteorológicas locais.

Estado	Número de registros	THI NASAWS				THI WS			
		Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Espirito Santo	15447	61	77	70,65	3,49	54	77	67,63	5,66
Goiás	86883	61	77	70,09	3,30	60	77	68,39	3,29
Minas Gerais	514950	50	77	67,71	4,17	49	77	67,70	4,05
Pernambuco	7869	66	77	71,60	2,45	67	77	73,90	2,64
Paraná	3428117	47	77	65,01	5,90	47	77	63,27	5,59
Rio de Janeiro	3464	59	77	68,92	4,44	47	77	62,26	6,12
Rio Grande do Sul	125452	47	77	64,53	7,29	47	77	64,58	6,95
Santa Catarina	21204	47	77	64,19	6,79	47	77	63,93	6,10
Sergipe	936	70	77	75,16	1,89	70	77	75,48	1,87
São Paulo	333418	50	77	69,26	4,72	49	77	68,34	5,20

557

558 3.3 Definindo o Número de Dias de Estresse Térmico

559

560 Apesar de serem adotadas estratégias de manejo nas fazendas para mitigar o
561 impacto do estresse térmico, a variação das condições ambientais ainda pode
562 influenciar o desempenho produtivo das vacas. Estudos revelaram que não apenas o
563 ambiente térmico no dia do controle leiteiro afeta a produção, mas também as

564 condições dos dias anteriores (AGUILAR; MISZTAL; TSURUTA, 2009;
 565 BERNABUCCI *et al.*, 2014; BIFFANI *et al.*, 2016). Sendo assim, foi realizada uma
 566 análise afim de identificar o período anterior ao controle leiteiro que poderia
 567 influenciar a PLDC. Para a análise, foram utilizados os valores médios diários do THI
 568 obtidos via NASA POWER, devido à disponibilidade completa de dados, evitando a
 569 perda de informações fenotípicas.

570 Para cada registro PLDC, foi associado o THI médio diário correspondente à
 571 data do controle leiteiro (denominado THI 0). Além disso, foram calculadas médias
 572 móveis de THI considerando janelas de -1, -2, -3 e -4 dias em relação à data do
 573 controle. Por exemplo, o THI -3 foi calculado como a média do THI da data do
 574 controle leiteiro e dos três dias anteriores, ou seja, um total de quatro dias. Dessa
 575 forma, foram geradas cinco variáveis de THI: THI (dia 0), THI (dia -1), THI (dia -2),
 576 THI (dia -3) e THI (dia -4), cada uma representando médias móveis
 577 progressivamente mais amplas.

578 Nesta etapa foram considerados apenas registros de PLDC referentes à
 579 terceira lactação. Essa decisão foi baseada no fato de que vacas em terceira
 580 lactação são geralmente mais sensíveis ao estresse térmico do que animais
 581 primíparos, o que as torna indicadores mais sensíveis para avaliar os efeitos do
 582 estresse térmico sobre a produção leiteira (AGUILAR; MISZTAL; TSURUTA, 2010;
 583 SANTANA *et al.*, 2017)

584 A Tabela 3 apresenta as médias e desvio padrão (DP) do THI no dia do
 585 controle (dia 0) e para as médias móveis de -1 a -4 dias anteriores referentes às três
 586 primeiras lactações com dados de estações meteorológicas e da plataforma NASA
 587 POWER.

588

589 **Tabela 3:** Estatísticas descritivas de THI nas diferentes janelas temporais para as três primeiras
 590 lactações.

Item	Lactação 1		Lactação 2		Lactação 3	
	WS	NASAWS	WS	NASAWS	WS	NASAWS
Média THI (dia 0); un	64,61	65,98	64,45	65,86	64,22	65,72
DP THI (dia 0); un	6,13	6,15	6,13	6,17	6,11	6,17
Média THI (dia -1); un	64,63	65,99	64,46	65,87	64,23	65,72
DP THI (dia -1); un	5,97	6,01	5,97	6,02	5,95	6,03
Média THI (dia -2); un	64,66	65,99	64,49	65,87	64,26	65,72
DP THI (dia -2); un	5,82	5,88	5,81	5,88	5,79	5,89

Média THI (dia -3); un	64,66	65,99	64,49	65,87	64,25	65,72
DP THI (dia -3); un	5,69	5,75	5,68	5,76	5,66	5,77
Média THI (dia -4); un	64,65	66,00	64,48	65,87	64,25	65,72
DP THI (dia -4); un	5,62	5,67	5,60	5,67	5,58	5,67

591
592 A fim de avaliar o efeito dessas variáveis sobre a PLDC, foi utilizado um
593 modelo animal de repetibilidade, o modelo adotado pode ser descrito equação 2.

594
595
$$PLDC_{ikl}(d) = HTD_i + \beta_1 IP + \beta_1 IP^2 + THI_l + \sum_{m=0}^3 \beta_m \varphi_m(d) + a_c(d) + pe_c(d) +$$

596
$$e_{ikl}(d)$$

597 Eq. 2

598 Em que $PLDC_{ijkl}(d)$ representa a produção de leite no dia do controle; HTD_i
599 corresponde ao efeito fixo do i -ésimo grupo rebanho–data do controle leiteiro; IP
600 corresponde à idade ao parto, considerada como covariável β_1 e β_2 são os
601 coeficientes de regressão fixa associados aos efeitos linear e quadrático da idade ao
602 parto; THI_l corresponde ao efeito classificatório do índice de temperatura e umidade
603 médio observado nos dias 0, -1, -2, -3 ou -4 anteriores à data do controle leiteiro; β_m
604 é o m -ésimo coeficiente de regressão fixa associado aos dias em lactação (DIM) em
605 que $\varphi_m(d)$ corresponde ao m -ésimo polinômio ortogonal de Legendre; $a_c(d)$
606 representa o efeito genético aditivo aleatório do animal; $pe_c(d)$ corresponde ao efeito
607 aleatório de ambiente permanente da vaca; e $e_{ijkl}(d)$ representa o efeito residual
608 associado à observação.

609 Esse modelo foi ajustado à PLDC separadamente para cada variável THI,
610 com o objetivo de verificar seu efeito sobre o desempenho animal.

611 A qualidade de ajuste dos modelos foi avaliada por meio do Critério de
612 Informação da Deviance (DIC), conforme proposto por Spiegelhalter *et al.* (2002),
613 sendo que valores menores de DIC indicam melhor ajuste do modelo aos dados.

614

615 3.4 Impactos do Estresse Térmico na Produção de Leite

616

617 As perdas na produção de leite atribuídas ao estresse térmico foram
618 estimadas por meio do ajuste de um modelo de regressão aleatória para cada
619 lactação e conjunto de dados meteorológicos (WS, NASAWS). Utilizaram-se
620 polinômios ortogonais de Legendre cúbicos para modelar a variância genética

621 aditiva, a variância do ambiente permanente e a trajetória média da população em
 622 função dos dias em lactação (DIM). Os programas GIBBSF90+ e BLUPF90+ (Misztal
 623 *et al.*, 2014) foram empregados para estimar os componentes de (co)variância e
 624 obter estimativas dos quadrados mínimos (LSE) da produção de leite em função do
 625 THI. O modelo adotado pode ser descrito através da equação 2 a seguir:

$$\begin{aligned}
 627 \quad PLDC_{ijqo(d)} = & HTD_i + AD_{jo} + THI_q + \sum_{m=0}^3 \beta_m \varphi_m(d) + \sum_{m=0}^3 \alpha_{cm} \varphi_m(d) + \\
 628 \quad & \sum_{m=0}^3 p_{cm} \varphi_m(d) + e_{ijqo(d)}
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 3}$$

629
 630 Onde $PLDC_{ijqo(d)}$ foi o registro de produção de leite no dia do controle; HTD_i
 631 representou o efeito da i-ésima subclasse de rebanho-data de controle; AD_{jo} foi o
 632 efeito sistemático da j-ésima subclasse de idade ao parto, aninhada dentro da classe
 633 o de dias em lactação (DIM), sendo as classes de idade ao parto definidas em
 634 meses como: 18–20, 21–23, 24–26, 27–29, 30–32, 33–36, 37–39, 40–45 e 46–48
 635 meses; THI_q foi o efeito da q-ésima unidade do Índice de Temperatura e Umidade
 636 (THI) (47 a 77); β_m foi o m-ésimo coeficiente de regressão “fixo” sobre DIM; α_{cm} e p_{cm}
 637 foram os m-ésimos coeficientes de regressão para os efeitos aleatórios genético
 638 aditivo e ambiental permanente da vaca c, respectivamente; $\varphi_m(d)$ foi o m-ésimo
 639 polinômio ortogonal de Legendre correspondente ao dia d da lactação; e $e_{ijqo(d)}$ foi o
 640 efeito residual associado ao registro. Assumiu-se variância residual homogênea para
 641 simplificar as análises.

642 Na segunda etapa da análise, visando identificar o limiar no qual o THI
 643 começa a impactar a produção de leite, foi aplicada uma regressão linear
 644 segmentada utilizando o pacote “segmented” (MUGGEO, 2003) no software R. Essa
 645 abordagem é apropriada para detectar mudanças abruptas na inclinação da relação
 646 entre a variável ambiental (THI) e o desempenho produtivo (GAYARI, 2024;
 647 MUGGEO, 2008; ROCKETT *et al.*, 2023b)

648 A variável dependente utilizada foi a estimativa da PLDC, previamente
 649 ajustada por meio das estimativas de mínimos quadrados (EMQ) obtidas a partir das
 650 soluções do modelo de regressão aleatória, de modo a isolar os efeitos do THI sobre
 651 a produção. O modelo de regressão segmentada foi descrito pela equação 3 que
 652 descreve a relação linear entre a produção e o THI até o limiar de estresse térmico
 653 (Breakpoint, BP), enquanto a Equação 4 descreve uma mudança na inclinação da

654 reta a partir desse ponto, permitindo modelar adequadamente a sensibilidade da
655 produção a diferentes níveis de estresse térmico.

$$656 \quad y_i = a + b_1 X_i, \text{ quando } X_i \leq BP \quad \text{Eq. 4}$$

$$657 \quad y_i = a + b_1 X_i + b_2 (X_i - BP), \text{ quando } X_i > BP \quad \text{Eq. 5}$$

658 Onde y_i representa a PLDC, a é o intercepto, X_i é o valor do THI, b_1 e b_2 são
659 os coeficientes de regressão antes e após o BP respectivamente.

660 A análise de significância da mudança de inclinação foi avaliada pelo teste de
661 Davies, função disponível no pacote “segmented” utilizado para a modelagem.

662 A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar o valor limiar de THI a
663 partir do qual a produção de leite passa a ser negativamente afetada, contribuindo
664 para o entendimento dos efeitos do estresse térmico em vacas leiteiras sob
665 diferentes condições climáticas.

666

667 3.5 Estimação de Parâmetros Genéticos

668

669 A estimação dos parâmetros genéticos, dos componentes de (co)variância,
670 herdabilidade e correlação genética foram realizadas a partir de um modelo animal
671 de regressão aleatória semelhante ao da sessão anterior, no entanto, neste caso, o
672 efeito genético aditivo, o efeito permanente de ambiente e a trajetória média da
673 população foram adicionalmente modelados como funções do THI. Assim, os valores
674 genéticos (VG) foram expressos como função tanto do DIM quanto do THI, conforme
675 implementado previamente em estudos de Brüegemann *et al.* (2011), Bohlouli *et al.*
676 (2013) e Santana *et al.* (2017). O modelo adotado foi especificado como:

677

$$678 \quad MY_{ijo(d,q)} = HTD_i + AD_{jo} + \sum_{m=0}^3 \beta_m \varphi_m(d) + \sum_{m=0}^3 \alpha_{cm} \varphi_m(d) + \alpha_{c4} \psi_1(q) \\ 679 \quad + \sum_{m=0}^3 p_{cm} \varphi_m(d) + p_{c4} \psi_1(q) + e_{ijo(d,q)} \quad \text{Eq. 6}$$

680

681 onde $\psi_1(q)$ é o polinômio ortogonal de Legendre correspondente ao valor q do
682 THI; α_{c4} corresponde ao coeficiente de regressão aleatória para o efeito genético
683 aditivo da vaca c ; e p_{c4} representa o coeficiente de regressão aleatória para o efeito
684 de ambiente permanente da vaca c . Todos os demais termos foram definidos

685 conforme descrito anteriormente.

686 O vetor de coeficientes de regressão aleatória do efeito genético aditivo foi:

$$687 \quad \alpha_c = [\alpha_{c0} \quad \alpha_{c1} \quad \alpha_{c2} \quad \alpha_{c3} \quad \alpha_{c4}]'$$

688 representando o intercepto, os termos de primeira, segunda e terceira ordem
689 dos polinômios de Legendre para o DIM e o termo de primeira ordem para o THI,
690 respectivamente. Sua estrutura de (co)variância foi definida como $Var[\alpha_c] = G$ em
691 que G é uma matriz simétrica 5×5 :

$$692 \quad G = \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha 0}^2 & \sigma_{\alpha 0 \alpha 1} & \sigma_{\alpha 0 \alpha 2} & \sigma_{\alpha 0 \alpha 3} & \sigma_{\alpha 0 \alpha 4} \\ \sigma_{\alpha 0 \alpha 1} & \sigma_{\alpha 1}^2 & \sigma_{\alpha 1 \alpha 2} & \sigma_{\alpha 1 \alpha 3} & \sigma_{\alpha 1 \alpha 4} \\ \sigma_{\alpha 0 \alpha 2} & \sigma_{\alpha 1 \alpha 2} & \sigma_{\alpha 2}^2 & \sigma_{\alpha 2 \alpha 3} & \sigma_{\alpha 2 \alpha 4} \\ \sigma_{\alpha 0 \alpha 3} & \sigma_{\alpha 1 \alpha 3} & \sigma_{\alpha 2 \alpha 3} & \sigma_{\alpha 3}^2 & \sigma_{\alpha 3 \alpha 4} \\ \sigma_{\alpha 0 \alpha 4} & \sigma_{\alpha 1 \alpha 4} & \sigma_{\alpha 2 \alpha 4} & \sigma_{\alpha 3 \alpha 4} & \sigma_{\alpha 4}^2 \end{bmatrix}$$

693

694 Os coeficientes de ambiente permanente foram modelados com a mesma
695 estrutura 5×5 . Após a estimação das matrizes de (co)variância genética aditiva e de
696 ambiente permanente, as variâncias genética aditiva e de ambiente permanente
697 foram calculadas para cada combinação desejada de DIM e THI. Seja $z(d, q)$ o vetor
698 que reúne as funções de base ortogonais avaliadas em uma dada combinação de
699 DIM e THI: $z(d, q) = [0.7071 \quad \varphi_1(d) \quad \varphi_2(d) \quad \varphi_3(d) \quad \psi_1(q)]'$ a variância genética
700 aditiva e a variância de ambiente permanente para um ponto (d, q) foram calculadas
701 como: $\sigma_A^2(d, q) = \mathbf{z}'(d, q) \mathbf{G} \mathbf{z}(d, q)$ e $\sigma_P^2(d, q) = \mathbf{z}'(d, q) \mathbf{P} \mathbf{z}(d, q)$.

702 A herdabilidade pontual foi calculada como:

703

$$704 \quad h^2(d, q) = \frac{\sigma_A^2(d, q)}{\sigma_A^2(d, q) + \sigma_P^2(d, q) + \sigma_e^2} \quad \text{Eq. 7}$$

705

706 A correlação genética entre a PLDC em (d_1, q_1) e (d_2, q_2) foi obtida como:

707

$$708 \quad r_g[(d_1, q_1), (d_2, q_2)] = \frac{\mathbf{z}'(d_1, q_1) \mathbf{G} \mathbf{z}(d_2, q_2)}{\sqrt{[\mathbf{z}'(d_1, q_1) \mathbf{G} \mathbf{z}(d_1, q_1)] [\mathbf{z}'(d_2, q_2) \mathbf{G} \mathbf{z}(d_2, q_2)]}} \quad \text{Eq. 8}$$

709

710 As análises foram realizadas sob abordagem Bayesiana. Cadeias compostas
 711 por 350.000 amostras foram geradas, com descarte inicial (*burn-in*) de 50.000
 712 amostras e intervalo de descarte amostral igual a 50. A convergência foi avaliada
 713 visualmente por meio de gráficos de trajetória (*trace plots*) para verificar a mistura
 714 das cadeias. As 6.000 amostras restantes foram usadas para calcular os parâmetros
 715 genéticos. A estimação dos componentes de (co)variância e dos parâmetros
 716 genéticos foi realizada utilizando o programa GIBBSF90+ (Misztal *et al.*, 2014).

717

718 3.6 Validação Entre as Bases de Dados Meteorológicos

719

720 Para quantificar o nível de concordância entre os valores de THI médio
 721 calculados a partir de dados oriundos de estações meteorológicas e aqueles obtidos
 722 junto à plataforma NASA POWER, foram calculados diferentes parâmetros
 723 estatísticos, incluindo a correlação de Pearson descrito pela equação 9 e o Índice de
 724 Concordância de Willmott descrito pela equação 10.

725

$$726 \quad r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}) - (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad \text{Eq. 9}$$

727

728 Onde r representa o coeficiente de correlação de Pearson, P_i são os valores
 729 previstos, O_i são os valores observados, \bar{P} é a média dos valores previstos, \bar{O} é a
 730 média dos valores observados e n é o número total de observações.

731

$$732 \quad d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad \text{Eq. 10}$$

733

734 Onde d representa o índice de concordância de Willmott, P_i são os valores
 735 estimados, O_i são os valores observados, \bar{O} corresponde à média dos valores
 736 observados e n é o número total de observações. Esse índice é utilizado para avaliar
 737 o grau de concordância entre valores observados e previstos, indicando a
 738 capacidade do modelo em reproduzir os dados reais.

739 Além disso, a precisão dos dados foi analisada por meio das medidas de erro

740 médio (BEM) descrito pela equação 11 e erro médio absoluto (MAE) descrito pela
741 equação 12.

742

$$743 \quad BEM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad \text{Eq. 11}$$

744

745 Onde, *BEM* representa o erro médio do modelo, P_i são os valores estimados
746 e O_i são os valores observados considerando n como o número total de
747 observações. Valores positivos indicam tendência do modelo de superestimar,
748 enquanto valores negativos indicam subestimação da PLDC.

749

$$750 \quad MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad \text{Eq. 12}$$

751

752 Onde, *MAE* representa o erro médio absoluto, P_i são os valores estimados e
753 O_i são os valores observados considerando n como o número total de observações.
754 Este índice reflete a magnitude média do erro sem considerar sua direção, sendo útil
755 para avaliar a precisão do modelo de forma geral.

756 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

757

758 4.1 Análise da Média Móvel no Impacto do THI na PLDC

759

760 Entre os modelos avaliados para os diferentes dias anteriores entre a
761 ocorrência do estresse térmico e o impacto na PLDC, o modelo referente ao dia -2
762 apresentou o menor valor de DIC (0), indicando o melhor ajuste estatístico conforme
763 apresentado na Tabela 4.

764

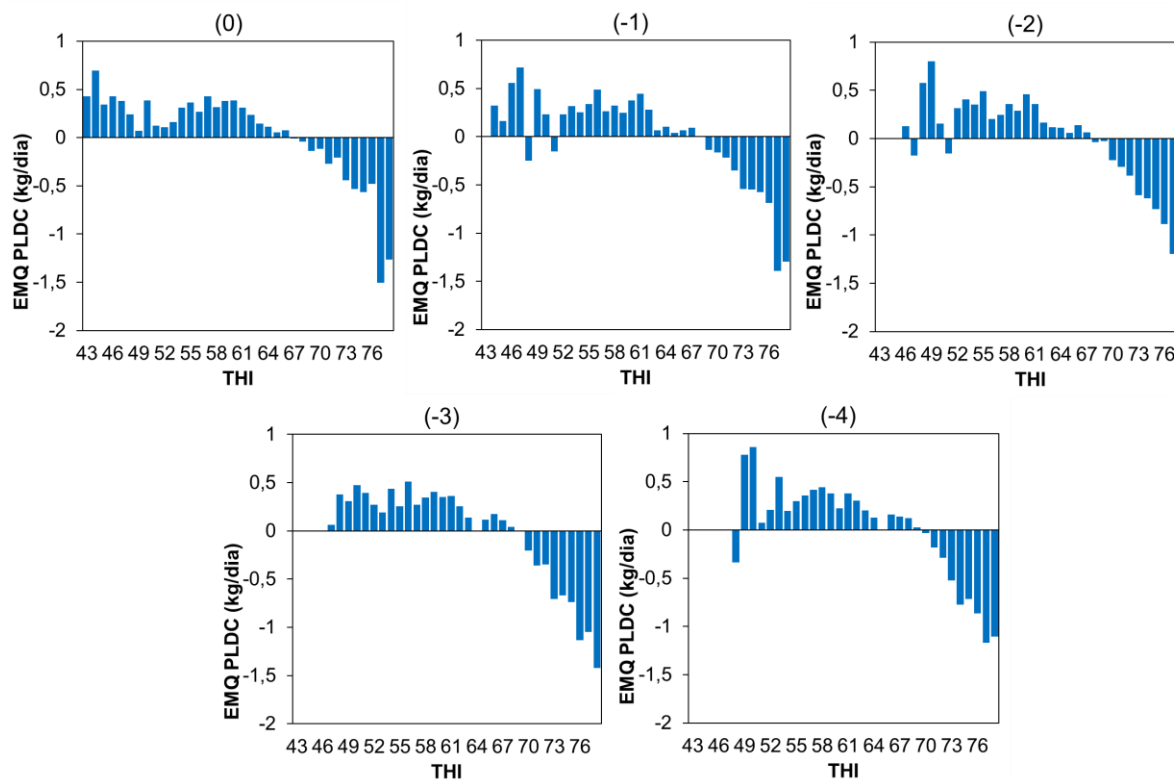
765 **Tabela 4:** DIC dos modelos ajustados considerando o efeito de dias anteriores do THI sobre a
766 produção de leite no dia do controle (PLDC).

Período (dia)	DIC
-2	0
0	35,3
-1	35,6
-4	73,6
-3	104,9

767

768 A Figura 2 ilustra a estimativa de mínimos quadrados (EMQ) da PLDC em
769 função do THI para os cinco dias analisados. Nota-se que, a partir do dia -2, os
770 efeitos do estresse térmico sobre a produção tornam-se mais evidentes, com
771 maiores reduções de PLDC observadas em valores elevados de THI. Esse padrão
772 reforça a importância de se considerar janelas temporais apropriadas ao avaliar os
773 efeitos do estresse térmico, dado seu impacto defasado sobre a produtividade.

774



775

776 **Figura 2:** Distribuição da estimativa de mínimos quadrados (EMQ) da produção de leite no dia do
 777 controle (PLDC) em kg/dia em função dos valores de THI considerando os dias anteriores (0, -1, -2, -
 778 3 e -4).
 779

780 Os resultados indicam que a média do THI calculada para os dois dias
 781 anteriores à data do controle leiteiro (THI -2) foi a mais sensível para detectar os
 782 efeitos do estresse térmico sobre a produção de leite de vacas Holandesas em
 783 terceira lactação. Esse achado reforça a noção de que o impacto do calor sobre a
 784 fisiologia dos bovinos ocorre de forma cumulativa, e não imediata corroborando
 785 evidências de estudos anteriores (AGUILAR; MISZTAL; TSURUTA, 2009;
 786 BERNABUCCI *et al.*, 2014; BIFFANI *et al.*, 2016; SANTANA *et al.*, 2017), que
 787 apontam efeitos retardados do estresse térmico sobre o metabolismo, ingestão de
 788 matéria seca e rendimento produtivo.

789 Assim, existe uma janela de sensibilidade térmica de 48 horas antes da coleta
 790 do dado produtivo. Isso pode ser explicado pelo tempo necessário para que o
 791 estresse térmico afete o comportamento ingestivo, a digestão e o metabolismo dos
 792 nutrientes, culminando na redução da produção leiteira em um curto intervalo de
 793 tempo (BECKER; COLLIER; STONE, 2020; ROCKETT *et al.*, 2023a). Desta forma,
 794 as análises foram realizadas utilizando-se como descritor ambiental o THI -2.
 795

796 4.2 Análise Fenotípica

797

798 O ambiente térmico onde as vacas leiteiras estão expostas é influenciado
799 principalmente pela temperatura do ar (T), umidade relativa (UR), velocidade do
800 vento e radiação solar (Bianca, 1961). A elevação da T aumenta a carga térmica
801 sobre o animal, enquanto a alta UR dificulta a perda de calor por evaporação,
802 prejudicando mecanismos como o suor e a respiração.

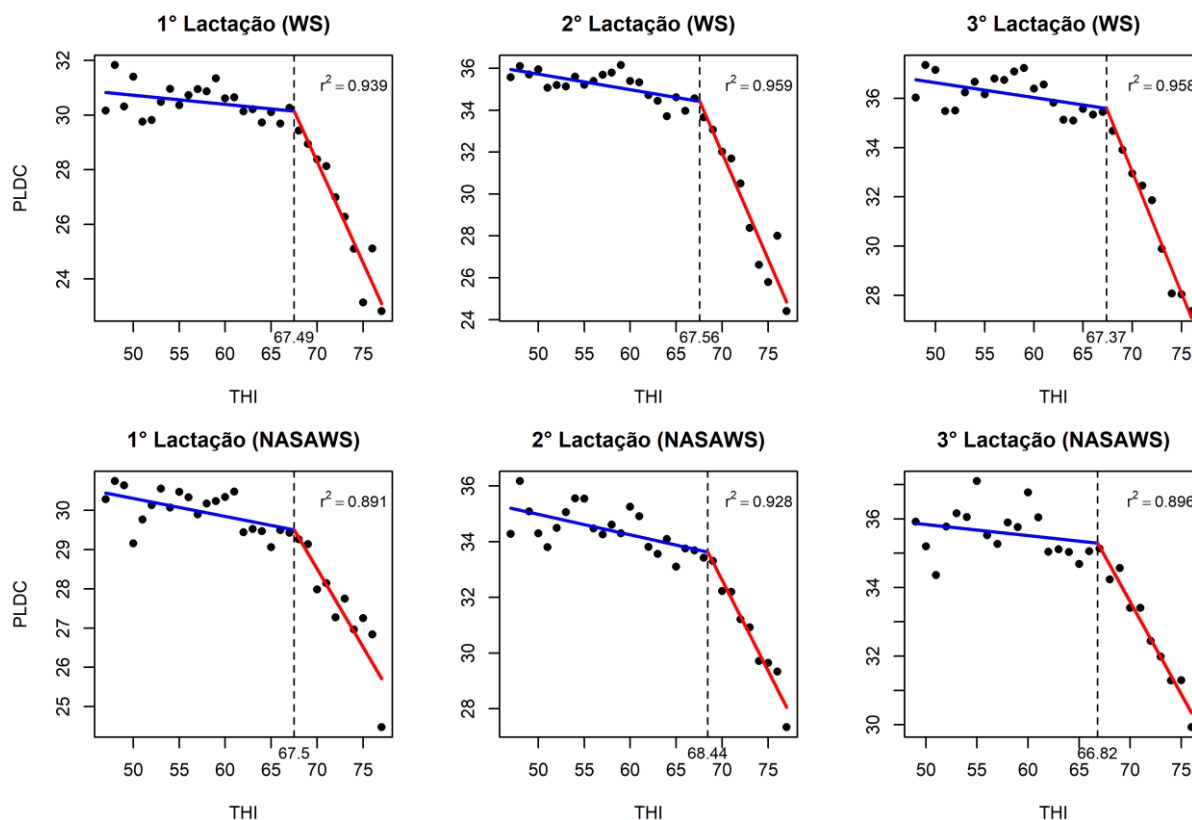
803 Nesse contexto, o THI é amplamente utilizado como indicador indireto de
804 estresse térmico em bovinos, por refletir o efeito combinado de T e UR tendo
805 associação com variações na produção e fertilidade em condições de estresse
806 térmico. Embora não considere diretamente fatores como radiação e vento, o THI é
807 uma ferramenta prática e de fácil aplicação em estudos de larga escala,
808 especialmente quando comparado a indicadores fisiológicos diretos, que exigem
809 maior custo e logística (ROCKETT et al, 2023a; SANTANA et al, 2017; STEFANI et
810 al, 2022).

811 Os resultados das análises fenotípicas evidenciaram que a produção de leite
812 das vacas Holandesas, em suas três primeiras lactações, apresentou uma tendência
813 de queda à medida que os valores de THI aumentaram. Esse comportamento
814 reforça o impacto negativo do estresse térmico sobre o desempenho produtivo,
815 demonstrando que ambientes com carga térmica elevada comprometem a
816 homeostase dos animais (SANTANA et al, 2017).

817 Por meio da análise de regressão segmentada, foi possível identificar limiares
818 críticos de THI, a partir dos quais a redução na produtividade, já significativa, torna-
819 se mais acentuada. Esses limiares representam o ponto a partir do qual o efeito do
820 estresse térmico sobre a produção passa a se intensificar de forma mais
821 pronunciada.

822 Vale destacar que as análises consideraram duas fontes distintas de dados
823 ambientais, sendo uma composta por informações locais provenientes de WS e
824 outra por dados remotos extraídos remotamente (NASAWS). Apesar de pequenas
825 variações nos valores dos pontos de quebra, ambas as fontes apresentaram
826 resultados consistentes e elevados coeficientes de determinação (R^2), reforçando a
827 confiabilidade dos modelos ajustados. A fonte WS capturou de forma ligeiramente
828 mais precisa o impacto do estresse térmico, possivelmente por refletir com maior

829 fidelidade as condições microclimáticas reais enfrentadas pelos animais. Por outro
 830 lado, os dados da NASAWS demonstraram ser uma alternativa robusta e aplicável,
 831 especialmente em cenários onde não há estações meteorológicas disponíveis,
 832 ampliando o potencial de uso do THI em regiões remotas ou com limitações de
 833 infraestrutura. A Figura 3 revela as relações entre o aumento do THI e a redução da
 834 PLDC.
 835



836
 837 **Figura 3:** Relação entre o índice de temperatura e umidade (THI) e a produção de leite no dia do
 838 controle (PLDC) em vacas Holandesas nas três primeiras lactações, utilizando dados meteorológicos
 839 de estações locais WS e da plataforma NASA POWER.
 840

841 De maneira geral, observa-se que, em todos os casos, ocorre uma alteração
 842 significativa na inclinação da curva de produção a partir de um determinado limiar de
 843 estresse térmico (Breakpoint, BP), indicando o limiar de tolerância térmica dos
 844 animais. A partir desse ponto, o impacto do estresse térmico sobre a produção
 845 leiteira torna-se acentuado, evidenciado pela inclinação negativa mais intensa no
 846 segundo segmento da regressão.

847 Nas três lactações, tanto com dados WS quanto com NASAWS, a tendência é
 848 consistente, ou seja, antes do BP, a produção se mantém relativamente estável,
 849 enquanto depois desse ponto ocorre queda acentuada da PLDC. Essa resposta

850 fisiológica é típica de vacas sob estresse térmico, onde há redirecionamento
851 metabólico para dissipação de calor ao invés de manutenção da homeostase.

852 Em um estudo realizado com um extenso conjunto de registros de vacas
853 Holandesas no Brasil pertencentes a um único rebanho comercial, Santana et al.
854 (2016) identificaram um valor de THI igual a 66 como limiar crítico para a produção
855 de leite em vacas primíparas, apontando esse ponto como o início dos efeitos
856 negativos do estresse térmico sobre o desempenho produtivo. De forma semelhante,
857 os resultados deste estudo revelaram valores de limiar de THI variando entre 66,82 e
858 68,44 para os dados da NASAWS e entre 67,37 e 67,56 para os dados provenientes
859 de WS, nas três primeiras lactações avaliadas. Esses achados reforçam a
860 consistência dos efeitos do estresse térmico identificados na literatura, além de
861 confirmar a aplicabilidade do THI calculado a partir dos dados da NASA POWER
862 como uma ferramenta viável e eficiente para a avaliação das condições ambientais
863 que afetam a produção de leite em regiões tropicais, especialmente na ausência de
864 estações meteorológicas locais.

865 Os coeficientes de determinação (r^2) foram elevados em todos os modelos,
866 variando de 0,89 a 0,95, indicando que a regressão segmentada explica grande
867 parte da variabilidade observada na produção de leite em função do THI, resultados
868 que estão em consonância com os obtidos por Rockett *et al.* (2023b) e Gaiary *et al.*
869 (2021), que também relataram bons ajustes em modelos que avaliam o impacto do
870 estresse térmico sobre a produção leiteira.

871 Os detalhes estatísticos dos modelos ajustados por regressão segmentada
872 para cada lactação, com base nos dados das duas fontes meteorológicas, estão
873 apresentados na Tabela 5. Os valores de BP encontrados foram similares entre os
874 dois conjuntos de dados variando na fonte de dados de WS entre 67.37 e 67.56 para
875 as três lactações e na fonte de dados NASAWS entre 66.82 e 68.44. O valor de p
876 refere-se ao teste de Davies, utilizado para avaliar a significância estatística da
877 presença de um limiar na relação entre THI e a PLDC, testando a hipótese nula de
878 ausência de mudança na inclinação da regressão.

879

880

881

882

883 **Tabela 5:** Estimativas do Breakpoint (BP) intercepto (a) e dos coeficientes de regressão (b1 e b2),
 884 que descrevem a relação entre as médias de produção de leite estimadas por mínimos quadrados e o
 885 índice de temperatura e umidade, obtidas a partir do modelo linear segmentado.

Fonte Dados	Lactação	BP	a	b ₁	b ₂	p-valor
WS	1	67,49 (0,67)	32,39 (1,27)	-0,03 (0,02)	-0,70 (0,07)	<0,0005
	2	67,56 (0,57)	39,45 (1,45)	-0,07 (0,02)	-0,93 (0,08)	<0,0005
	3	67,36 (0,55)	39,65 (1,42)	-0,06 (0,02)	-0,92 (0,08)	<0,0005
NASAWS	1	67,50 (1,10)	32,59 (1,04)	-0,04 (0,01)	-0,35 (0,06)	<0,0005
	2	68,44 (0,81)	38,65 (1,15)	-0,07 (0,02)	-0,57 (0,08)	<0,0005
	3	66,82 (0,92)	37,45 (1,58)	-0,03 (0,02)	-0,50 (0,07)	<0,0005

886 a = intercepto; b₁ e b₂ = coeficientes lineares para cada segmento

887

888 Em todos os cenários avaliados, a produção de leite diminuiu com o aumento
 889 do THI. Foi identificado de forma consistente um limiar claro de estresse térmico, em
 890 torno de 67 unidades de THI, independentemente da fonte de dados meteorológicos
 891 utilizada. Já a constante de inclinação após o BP mostrou-se marcadamente mais
 892 negativa, sobretudo nos modelos baseados em dados WS, particularmente na
 893 segunda e terceira lactações, o que sugere um impacto mais severo do estresse
 894 térmico captado por dados de WS.

895 A intensificação das perdas produtivas observada após o limiar de estresse
 896 térmico tem sido amplamente reportado na literatura. Essas perdas foram
 897 consistentes com as relatadas por Carabaño et al. (2016), que encontraram perdas
 898 médias de -0,010 a -0,100 kg·dia⁻¹ por unidade de THI em populações leiteiras
 899 europeias, com valores atingindo -0,100 kg·dia⁻¹ sob THI 73 na Bélgica e na
 900 Espanha.

901 O estudo realizado por Freitas *et al.* (2006), identificaram perdas variando de
 902 -0.150 a -0.360 kg/dia por unidade de THI em vacas primíparas, e Hammami *et al.*
 903 (2013), observaram perdas de -0,164 kg/THI por dia em vacas Holandesas. Esses
 904 achados reforçam o padrão observado no presente estudo, em que vacas em
 905 lactações mais avançadas são mais sensíveis ao estresse térmico, especialmente
 906 quando analisadas sob condições locais detalhadas.

907 Essa diferença reforça a ideia de que, embora os dados remotos da NASAWS
 908 sejam uma ferramenta confiável e útil para regiões sem cobertura meteorológica
 909 direta, os dados locais podem refletir com maior precisão os efeitos microclimáticos,
 910 permitindo detecção mais sensível das perdas produtivas sob estresse térmico.

911 Essas pequenas variações podem ser atribuídas às diferenças na resolução

912 espacial e temporal das fontes meteorológicas. Os dados WS tendem a refletir de
913 forma mais precisa as condições microclimáticas enfrentadas pelos animais,
914 enquanto os dados da NASA, apesar de cobrirem lacunas em locais sem medição
915 direta, podem apresentar pequenas divergências devido à sua natureza estimada e
916 interpolada. Além disso, fatores como o tipo de alojamento, estratégias de
917 resfriamento, como ventiladores e aspersores, e o manejo nutricional também
918 influenciam a resposta ao estresse térmico, podendo atenuar ou acentuar seus
919 efeitos dependendo das práticas adotadas (WEST, 2003; KADZERE *et al.*, 2002).

920 Ainda assim, a concordância entre os limiares identificados nas duas bases
921 valida a robustez do uso de dados remotos para estimativa do estresse térmico em
922 regiões onde não há dados meteorológicos locais disponíveis, sendo uma alternativa
923 viável para estudos em larga escala ou em zonas remotas.

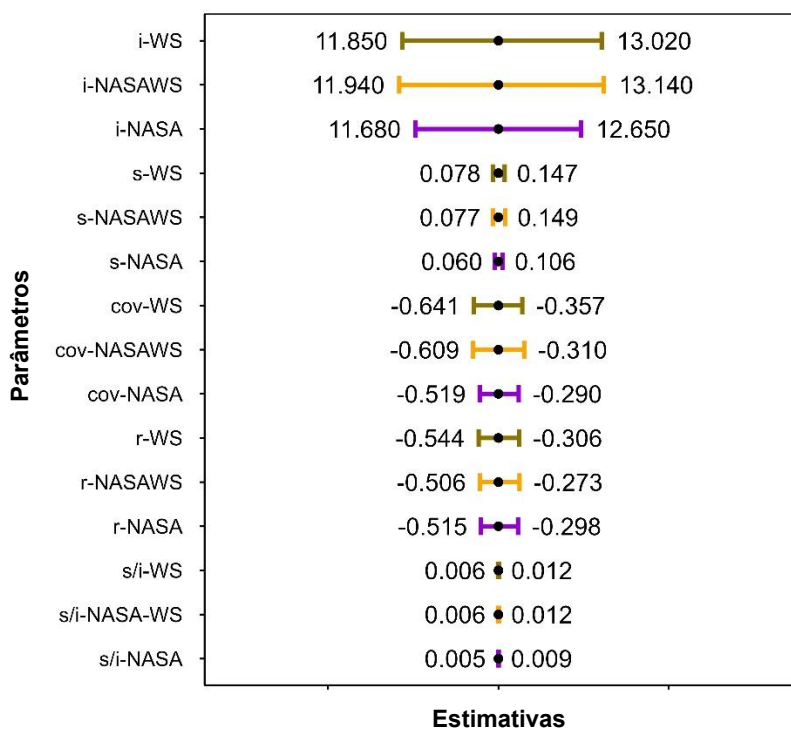
924 A identificação de limiares críticos de THI é extremamente relevante para o
925 manejo térmico de rebanhos leiteiros. A partir desses valores, medidas de mitigação
926 como ventilação, aspersão e sombreamento devem ser implementadas ou
927 intensificadas, a fim de minimizar perdas produtivas e prejuízos econômicos. Além
928 disso, esses limiares podem ser utilizados em modelos de previsão de desempenho,
929 em políticas públicas de bem-estar animal e desenvolvimento sustentável e até em
930 programas de melhoramento genético com foco em resiliência ao calor.

931

932 **4.3 Parâmetros Genéticos**

933

934 Os intervalos de alta densidade posterior (HPD) de 95% estimados para os
935 componentes de (co)variância apresentaram ampla sobreposição entre as diferentes
936 fontes de dados meteorológicos avaliadas para a raça Holandesa, indicando
937 robustez das estimativas independentemente da origem das informações climáticas
938 conforme ilustrado na Figura 4. Os resultados são apresentados para três fontes de
939 dados meteorológicos: estações meteorológicas terrestres (WS), NASAPOWER
940 restrito ao domínio espacial das WS (NASAWS) e NASA POWER com cobertura
941 completa (NASA).



942

943 **Figura 4:** Médias posteriores (pontos) e intervalos de alta densidade posterior de 95% (linhas
 944 horizontais) para componentes de (co)variância estimados usando modelos de regressão aleatória
 945 que incorporam tanto os dias em lactação quanto o índice de temperatura e umidade como
 946 covariáveis para dados de vacas da raça Holandesa. i = intercepto; s = inclinação; cov = covariância
 947 genética entre o intercepto e a inclinação; r = correlação genética entre o intercepto e a inclinação; s/i
 948 = razão entre a inclinação e o intercepto.

949

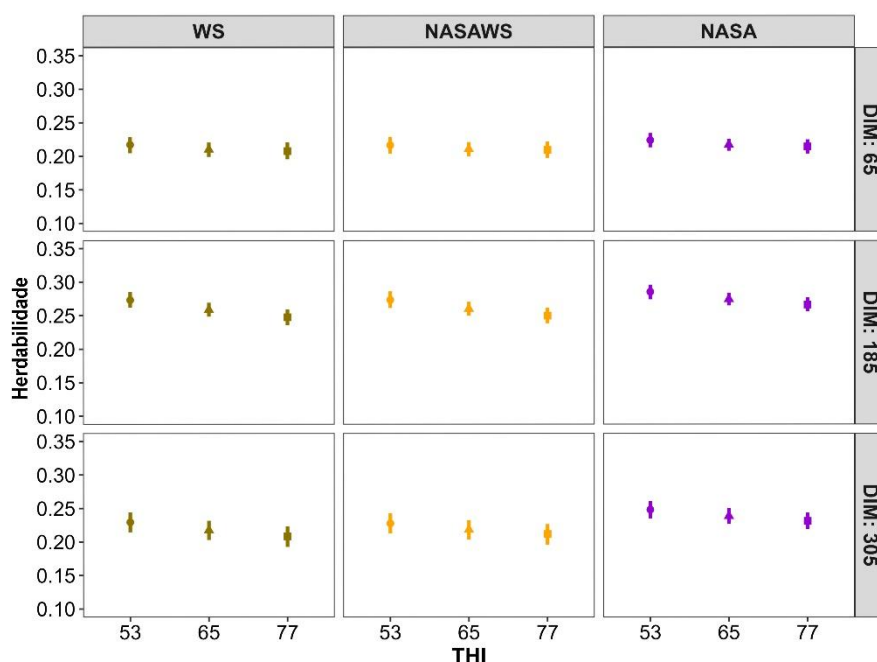
950

951 A correlação genética entre o intercepto, que representa o nível médio de
 952 produção de leite dos animais, e a inclinação, associada à resposta genética ao
 953 estresse térmico, foi consistentemente negativa, isso evidencia um antagonismo
 954 genético, revelando que animais com maior potencial produtivo tendem a apresentar
 955 maior sensibilidade ao aumento do THI. As médias posteriores dessas correlações
 956 foram de -0,428, -0,397 e -0,413 para os dados de WS, NASAWS e NASA,
 957 respectivamente, e a razão média entre a inclinação genética e o intercepto foi de
 958 0,008.

959 A relação antagônica entre o nível geral de produção e a resposta ao estresse
 960 térmico foi ainda corroborada pela correlação genética negativa observada entre o
 961 intercepto e o coeficiente linear associado ao estresse térmico. As estimativas
 962 obtidas no presente estudo mostraram-se consistentes com aquelas previamente
 963 reportadas em diferentes populações leiteiras (MCWHORTER *et al.*, 2023;
 964 ROCKETT *et al.*, 2023a; CARABAÑO *et al.*, 2025). Esse antagonismo expressa um
 965 custo-benefício metabólico, no qual a seleção para maiores níveis de produção de

966 leite compromete a termotolerância, uma vez que animais mais produtivos geram
 967 maior calor metabólico e, conseqüentemente, apresentam maior suscetibilidade ao
 968 estresse térmico (KADZERE *et al.*, 2002). Dessa forma, raças leiteiras,
 969 especialmente aquelas submetidas a seleção intensiva para o aumento da produção,
 970 tendem a exibir maior sensibilidade às condições de estresse térmico.

971 As estimativas de herdabilidade também apresentaram uma leve tendência de
 972 redução com o aumento do THI em todas as fontes de dados meteorológicos
 973 consideradas conforme apresentado pela Figura 5. Os resultados são apresentados
 974 para três fontes de dados meteorológicos: estações meteorológicas de superfície
 975 (WS), dados do sistema NASA POWER restritos ao domínio espacial das WS
 976 (NASAWS) e dados completos do sistema NASA POWER (NASA).



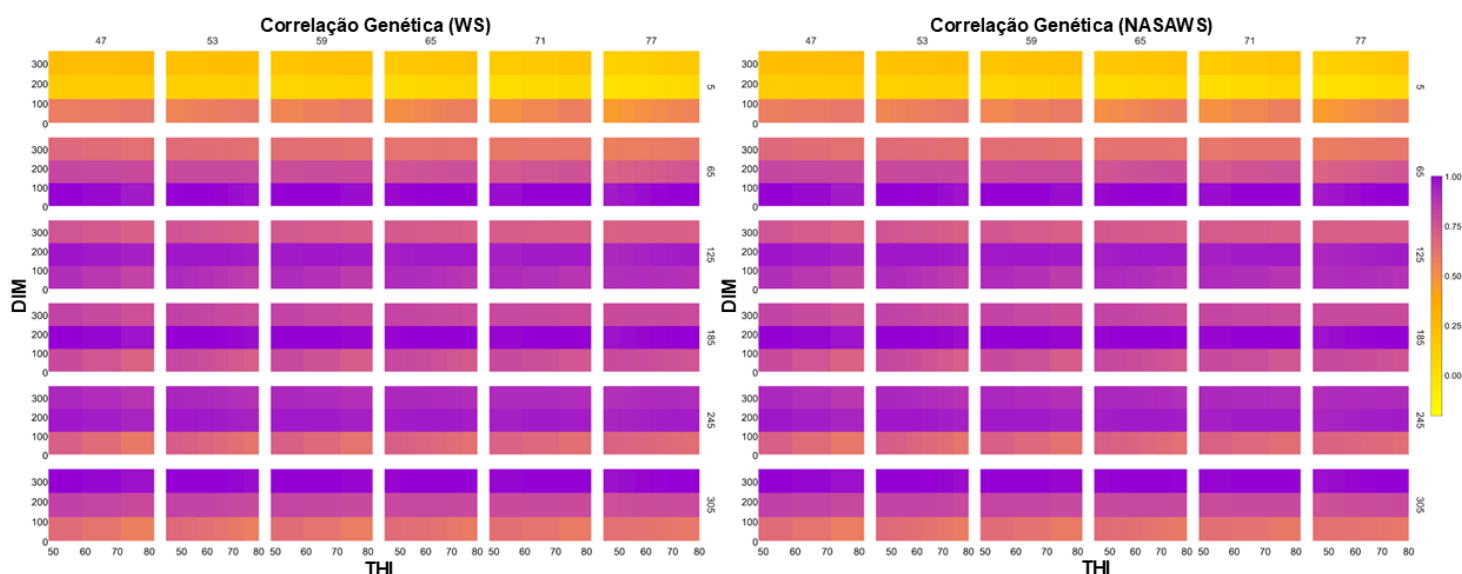
977 **Figura 5:** Médias posteriores (símbolos) e intervalos de alta densidade posterior de 95% (linhas
 978 verticais) das estimativas de herdabilidade da produção de leite no dia do controle, ao longo de
 979 combinações selecionadas de dias em lactação (DIM) e índice de temperatura e umidade (THI).
 980

981 As estimativas de herdabilidade baseadas nos dados WS e NASA
 982 apresentaram uma elevada concordância, com correlações simples de 0,99 para as
 983 médias posteriores da variância genética aditiva e da herdabilidade ao longo das
 984 combinações DIM–THI. As médias posteriores e os intervalos HPD de 95% para a
 985 herdabilidade de 0,23 (0,21 a 0,24) para WS, 0,23 (0,21 a 0,24) para NASAWS e
 986 0,24 (0,23 a 0,25) para NASA.
 987

988 Estudos anteriores relataram que valores mais elevados de herdabilidade em

989 estágios mais avançados da lactação e sob condições ambientais mais amenas,
 990 favorecem a expressão fenotípica do potencial genético e aumentam a diferenciação
 991 entre indivíduos (BRÜEGEMANN *et al.*, 2011; BOHLOULI *et al.*, 2013; NEGRI *et al.*,
 992 2021). Em contraste, sob valores elevados de THI no início da lactação, quando as
 993 demandas fisiológicas são mais elevadas, as estimativas de herdabilidade
 994 diminuíram, principalmente em decorrência da redução da variância genética aditiva,
 995 enquanto a variância residual permaneceu relativamente estável (Kadzere *et al.*,
 996 2002).

997 As estimativas das correlações genéticas para a PLDC obtidas a partir das
 998 duas fontes de dados meteorológicos, WS e NASAWS, apresentaram padrões claros
 999 e consistentes conforme ilustra a Figura 6.



1000 **Figura 6:** Médias posteriores das estimativas de correlação genética da produção de leite, ao longo
 1001 de combinações selecionadas de dias em lactação (DIM) e índice de temperatura e umidade (THI).
 1002

1003 A correlação de Pearson entre as estimativas de correlação genética obtidas
 1004 a partir dos dados WS e NASAWS foi elevada, atingindo valor de 0,99, o que indica
 1005 forte concordância entre as fontes de dados meteorológicos.

1006 Dentro de cada fonte de dados, foram observadas correlações genéticas mais
 1007 altas para comparações envolvendo combinações semelhantes de DIM e THI, com
 1008 redução progressiva à medida que as diferenças entre DIM ou THI se tornaram
 1009 maiores. As correlações genéticas estimadas com dados WS permaneceram com
 1010 valores próximos de 1 quando as combinações de DIM e THI eram idênticas ou
 1011 muito semelhantes. Como exemplo, a correlação entre DIM 65 e THI 53 com DIM 65

1012 e THI 59 foi de 0,998 utilizando dados WS. Em contrapartida, à medida que as
1013 discrepâncias em DIM e THI aumentaram, as estimativas de correlação genética
1014 diminuíram de forma acentuada. Nesse sentido, a correlação entre DIM 65 e THI 47
1015 e DIM 305 e THI 77 foi substancialmente menor, atingindo 0,639 com dados WS. O
1016 mesmo padrão foi observado quando se utilizaram dados derivados da NASA
1017 (NASAWS), em que a correlação entre DIM 65 e THI 53 e DIM 305 e THI 77 foi de
1018 0,633, valor muito próximo ao obtido com dados WS.

1019 Esses resultados indicam que o NASA POWER é uma alternativa confiável
1020 para avaliações genéticas, sendo um achado particularmente relevante para países
1021 como o Brasil, onde a cobertura de estações meteorológicas é limitada. Conforme
1022 destacado por Rockett et al. (2023b) e Carrara et al. (2023), estações
1023 meteorológicas de superfície frequentemente apresentam limitações devido a falhas
1024 nos dados, indisponibilidade e grandes distâncias em relação às propriedades rurais.
1025 Dessa forma, a validação do uso de dados do NASA POWER representa um avanço
1026 importante para o progresso da seleção genética para tolerância ao calor em
1027 sistemas leiteiros tropicais.

1028

1029 **4.4 Comparação entre as Bases de Dados Meteorológicos**

1030

1031 A fim de avaliar o desempenho do modelo utilizado para estimar a produção
1032 leiteira sob condições de estresse térmico, foram calculadas métricas estatísticas de
1033 ajuste e precisão como a correlação de Pearson e o Índice de Concordância de
1034 Willmott.

1035 De acordo com os resultados obtidos, a equação linear desenvolvida a partir
1036 dos dados do NASA POWER apresentou bom desempenho na estimativa do THI em
1037 relação aos dados observados em estações meteorológicas locais. A precisão do
1038 modelo foi elevada, com coeficiente de correlação r de 0,93, indicando forte
1039 associação positiva.

1040 A acurácia do modelo também foi considerada excelente, com d igual a 0,95,
1041 indicando elevado grau de concordância entre os valores estimados e observados.
1042 Em relação aos erros, o modelo apresentou um MAE de 1,97 indicando que, em
1043 média, a diferença entre os valores estimados e observados do THI foi de
1044 aproximadamente 2 unidades de THI um valor considerado baixo para aplicações

1045 agroclimáticas práticas. Por outro lado o BEM de 1,38 revelou uma superestimação
1046 por parte do modelo. Ou seja, o modelo tem uma tendência a estimar valores de THI
1047 um pouco acima dos observados nas estações meteorológicas, essa
1048 superestimação implica que, ao usar os dados do NASA POWER, o THI pode
1049 parecer ligeiramente mais alto.

1050 **5 CONCLUSÃO**

1051

1052 Este estudo demonstrou que vacas da raça Holandesa possuem elevada
1053 sensibilidade ao estresse térmico sob as condições climáticas predominantes no
1054 Brasil, apresentando perdas significativas na produção de leite em resposta ao
1055 aumento do THI. A análise permitiu identificar limiares de estresse térmico mais
1056 claramente definidos.

1057 Os valores de THI derivados dos dados da NASA produziram estimativas de
1058 parâmetros genéticos praticamente idênticas às obtidas a partir de fontes
1059 convencionais baseadas em estações meteorológicas, ao mesmo tempo em que
1060 possibilitaram maior cobertura espacial e melhor acurácia de predição, em função da
1061 disponibilidade completa dos dados.

1062 As estimativas de perdas na produção de leite atribuídas ao estresse térmico
1063 não foram totalmente consistentes entre os dados provenientes de estações
1064 meteorológicas e aqueles derivados da NASA, entretanto, diante da escassez e da
1065 distribuição limitada de estações meteorológicas no território brasileiro, o uso de
1066 dados climáticos provenientes da plataforma NASA POWER mostrou-se uma
1067 alternativa viável e eficiente. Os achados fornecem uma base robusta para a seleção
1068 sob estresse térmico e ressaltam a viabilidade de expandir programas de avaliação
1069 genética para regiões onde as informações meteorológicas de superfície são
1070 limitadas ou inexistentes.

1071 REFERÊNCIAS

1072

1073 AGUILAR, I.; MISZTAL, I.; TSURUTA, S. Genetic components of heat stress for dairy
1074 cattle with multiple lactations. **Journal of Dairy Science**, v. 92, n. 11, p. 5702–5711,
1075 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1928>

1076

1077 AGUILAR, I.; MISZTAL, I.; TSURUTA, S. Genetic trends of milk yield under heat
1078 stress for US Holsteins. **Journal of Dairy Science**, v. 93, n. 4, p. 1754-1758, 2010.
1079 Disponível em: <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2756>

1080

1081 ARAÚJO, Cláudio Vieira de *et al.* Uso de modelos de regressão aleatória para
1082 descrever a variação genética da produção de leite na raça Holandesa. **Revista**
1083 **Brasileira de Zootecnia**, v. 35, p. 975-981, 2006. Disponível em:
1084 <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000400006>

1085

1086 BARBOZA, T. O. C. *et al.* Advanced Farming Strategies Using NASA POWER Data
1087 in Peanut-Producing Regions without Surface Meteorological Stations.
1088 **AgriEngineering**, v. 6, n. 1, p. 438–454, 2024. Disponível em:
1089 <https://doi.org/10.3390/agriengineering6010027>

1090

1091 BECKER, C. A.; COLLIER, R. J.; STONE, A. E. Invited review: Physiological and
1092 behavioral effects of heat stress in dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 103, n.
1093 8, p. 6751-6770, 2020. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17929>

1094

1095 BERNABUCCI, U. *et al.* Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in
1096 domesticated ruminants. **Animal**, v. 4, n. 7, p. 1167–1183, 2010. DOI:
1097 <https://doi.org/10.1017/S175173111000090X>

1098

1099 BERNABUCCI, U. *et al.* The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle.
1100 **Journal of Dairy Science**, v. 97, n. 1, p. 471–486, 2014. Disponível em:
1101 <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6611>

1102

1103 BERNARDES, G. F. L. R. *et al.* Prototyping low-cost automatic weather stations for
1104 natural disaster monitoring. **Digital Communications and Networks**, v. 9, n. 4, p.
1105 941–956, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.05.002>

1106

1107 BEZERRA, D. *et al.* Availability analysis of the Brazilian's national weather
1108 measurement system. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, v. 11, n. 3, p.
1109 146–154, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.5335/rbca.v11i3.10026>

1110

1111 BEZERRA, D. *Et al.* Avaliação de disponibilidade de estações de medição
1112 meteorológica. *In*: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO APLICADA À GESTÃO DO
1113 MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (WCAMA), 10. , 2019b,
1114 Belém. **Anais [...]**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2019 . p. 1-
1115 10. ISSN 2595-6124. DOI: <https://doi.org/10.5753/wcama.2019.6414>.

1116

1117 BIANCA, W. Heat tolerance in cattle-its concept, measurement and dependence on
1118 modifying factors. *International Journal of Biometeorology*, v. 5, p. 5-30, 1961.

- 1119 <https://doi.org/10.1007/BF02186917>
1120
- 1121 BIER, A. A.; FERRAZ, S. E. T. Comparação de Metodologias de Preenchimento de
1122 Falhas em Dados Meteorológicos para Estações no Sul do Brasil. **Revista Brasileira**
1123 **de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 215–226, 2017. Disponível em:
1124 <https://doi.org/10.1590/0102-77863220008>
1125
- 1126 BIFFANI, S.; BERNABUCCI, U.; VITALI, A.; LACETERA, N.; NARDONE, A. Effect of
1127 heat stress on nonreturn rate of Italian Holstein cows. **Journal of Dairy Science**, v.
1128 99, n.7, p. 5837-5843, 2016. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10491>
1129
- 1130 BOHMANOVA, J. *et al.* National genetic evaluation of milk yield for heat tolerance of
1131 United States Holsteins. *Interbull Bulletin*, v. 33, p. 160, 2005.
1132
- 1133 BOHLOULI, Mehdi *et al.* The relationship between temperature-humidity index and
1134 test-day milk yield of Iranian Holstein dairy cattle using random regression
1135 model. **Livestock Science**, v. 157, n. 2-3, p. 414-420, 2013. Disponível em:
1136 <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.09.005>
1137
- 1138 BROUCEK, J.; RYBA, S.; MIHINA, S.; UHRINCAT, M.; KISAC, P. Impact of thermal-
1139 humidity index on milk yield under conditions of different dairy management. **Journal**
1140 **of Animal and Feed Sciences**, v. 16, p. 329–344, 2007.
1141
- 1142 BRÜEGEMANN, Kerstin *et al.* Genetic analyses of protein yield in dairy cows
1143 applying random regression models with time-dependent and temperature x
1144 humidity-dependent covariates. **Journal of Dairy Science**, v. 94, n. 8, p. 4129-4139,
1145 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.3168/jds.2010-4063>
1146
- 1147 BURNEY, Jennifer *et al.* Climate change adaptation strategies for smallholder
1148 farmers in the Brazilian Sertão. **Climatic Change**, v. 126, p. 45-59, 2014.
1149 <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1186-0>
1150
- 1151 CARABAÑO, M. J.; DÍAZ, C.; RAMÓN, M. Breeding for thermotolerance in dairy
1152 cattle: Production versus fertility traits. **Journal of Dairy Science**, 2025. Disponível
1153 em: <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26258>
1154
- 1155 CARABAÑO, M. J. *et al.* Breeding and genetics symposium: Breeding for resilience
1156 to heat stress effects in dairy ruminants. A comprehensive review. **Journal of**
1157 **Animal Science**, v. 95, n. 4, p. 1813-1826, 2017.
1158 <https://doi.org/10.2527/jas.2016.1114>
1159
- 1160 CARABAÑO, M. J. *et al.* Modeling heat stress under different environmental
1161 conditions. **Journal of Dairy Science**, v. 99, n. 5, p. 3798-3814, 2016.
1162 <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10212>
1163
- 1164 CARRARA, E. R. *et al.* NASA POWER satellite meteorological system is a good tool
1165 for obtaining estimates of the temperature-humidity index under Brazilian conditions
1166 compared to INMET weather stations data. **International Journal of**
1167 **Biometeorology**, v. 67, n. 7, p. 1273-1277, 2023. [https://doi.org/10.1007/s00484-](https://doi.org/10.1007/s00484-023-02493-5)
1168 [023-02493-5](https://doi.org/10.1007/s00484-023-02493-5)

- 1169
1170 CUELLAR, C. J. *et al.* Differences in body temperature regulation during heat stress
1171 and seasonal depression in milk yield between Holstein, Brown Swiss, and crossbred
1172 cows. **Journal of Dairy Science**, v. 106, n. 5, p. 3625–3632, 2023. Disponível em:
1173 <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22725>
1174
- 1175 DA SILVA, Thieres GF *et al.* Cenários de mudanças climáticas e seus impactos na
1176 produção leiteira em estados nordestinos. **Revista Brasileira de Engenharia**
1177 **Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 863-870, 2010. [https://doi.org/10.1590/S1415-](https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000800011)
1178 [43662010000800011](https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000800011)
1179
- 1180 DAHL, G. E. *et al.* Heat stress impacts immune status in cows across the life
1181 cycle. **Frontiers In Veterinary Science**, v. 7, p. 116, 2020.
1182 <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00116>
1183
- 1184 DALTRO, A. M. *et al.* Efeito do estresse térmico por calor na produção de vacas
1185 leiteiras. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 26, n. 1, p. 288–311, 2020 a.
1186 Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.36812/paq.2020261288-311>
1187
- 1188 DE AGUIAR, Jordene Teixeira; LOBO JR, Murillo. Reliability and discrepancies of
1189 rainfall and temperatures from remote sensing and Brazilian ground weather
1190 stations. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, p.
1191 100301, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100301>
1192
- 1193 ESCADA, P. *et al.* Climate services in Brazil: Past, present, and future perspectives.
1194 **Climate Services**, v. 24, p. 100276, 2021 a. Disponível em:
1195 <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100276>
1196
- 1197 FREITAS, M. S. *et al.* Regional differences in heat stress in US Holsteins. Commun.
1198 No. 01–11 in Proc. 8th World Congr. **World Congress on Genetics Applied to**
1199 **Livestock Production**, Belo Horizonte, Brazil, 2006.
1200
- 1201 GAYARI, Indrajit *et al.* Elucidating the effect of heat stress on milk production and
1202 composition in Jersey crossbred cows using test day records integrated with NASA
1203 POWER satellite data. **International Journal of Biometeorology**, v. 68, n. 12, p.
1204 2641-2651, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02774-7>
1205
- 1206 GHAVI HOSSEIN-ZADEH, N.; MOHIT, A.; AZAD, N. Effect of temperature-humidity
1207 index on productive and reproductive performances of Iranian Holstein cows. **Iranian**
1208 **Journal of Veterinary Research**, v. 14, n. 2, p. 106-112, 2013.
1209
- 1210 GORI MAIA, Alexandre *et al.* Climate change and farm-level adaptation: the Brazilian
1211 Sertão. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, v.
1212 10, n. 5, p. 729-751, 2018. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-04-2017-0088>
1213
- 1214 HALIMI, A. H.; KARACA, C.; BÜYÜKTAŞ, D. Evaluation of NASA POWER Climatic
1215 Data against Ground-Based Observations in the Mediterranean and Continental
1216 Regions of Turkey. **Journal of Tekirdag Agricultural Faculty**, v. 20, n. 1, p. 104–
1217 114, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33462/jotaf.1073903>
1218

- 1219 HAMMAMI, Hedi *et al.* Evaluation of heat stress effects on production traits and
1220 somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. **Journal of Dairy**
1221 **Science**, v. 96, n. 3, p. 1844-1855, 2013. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5947>
1222
- 1223 HUT, P. R. *et al.* Heat stress in a temperate climate leads to adapted sensor-based
1224 behavioral patterns of dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 105, n. 8, p. 6909–
1225 6922, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21756>
1226
- 1227 KADZERE, Charles T. *et al.* Heat stress in lactating dairy cows: a review. **Livestock**
1228 **production science**, v. 77, n. 1, p. 59-91, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0301-
1229 6226\(01\)00330-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(01)00330-X)
1230
- 1231 KLOSOWSKI, Elcio Silvério *et al.* Estimativa do declínio na produção de leite, em
1232 período de verão, para Maringá-PR. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.
1233 10, n. 2, p. 283-288, 2002.
1234
- 1235 MARQUES, V. D. S.; DERECHYNSKI, C. Weather Forecasting in Brazil: A Concise
1236 Historical Review. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021. Disponível
1237 em: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_45358
1238
- 1239 MBUTHIA, Jackson M. *et al.* A review of methods for improving resolution of milk
1240 production data and weather information for measuring heat stress in dairy
1241 cattle. **Livestock Science**, v. 255, p. 104794, 2022a.
1242 <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104794>
1243
- 1244 MBUTHIA, Jackson M. *et al.* Comparison of high resolution observational and grid-
1245 interpolated weather data and application to thermal stress on herd average milk
1246 production traits in a temperate environment. **Agricultural and Forest Meteorology**,
1247 v. 322, p. 108923, 2022b.
1248
- 1249 MCWHORTER, T. M. *et al.* Single-step genomic predictions for heat tolerance of
1250 production yields in US Holsteins and Jerseys. **Journal of Dairy Science**, v. 106, n.
1251 11, p. 7861-7879, 2023. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-23144>
1252
- 1253 MENÉNDEZ-BUXADERA, A. *et al.* Genotype by environment interaction due to heat
1254 stress during gestation and postpartum for milk production of Holstein cattle. **Animal**,
1255 v. 14, n. 10, p. 2014-2022, 2020. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001068>
1256
- 1257 MISZTAL, Ignacy *et al.* Manual for BLUPF90 Family of Programs. 2014.
1258
- 1259 MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; GEORGE, U. P. Assessment of
1260 NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact
1261 on sugarcane yield simulation. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 3, p.
1262 1571–1581, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.5282>
1263
- 1264 MUGGEO, V. M. R. Estimating regression models with unknown break-
1265 points. **Statistics in Medicine**, v. 22, n. 19, p. 3055-3071, 2003.
1266 <https://doi.org/10.1002/sim.1545>
1267
- 1268 MUGGEO, V. M. R. *segmented: an R package to fit regression models with broken-*

- 1269 *line relationships*. **R News**, v. 8, n. 1, p. 20–25, 2008. Disponível em: [https://cran.r-](https://cran.r-project.org/web/packages/segmented/)
1270 [project.org/web/packages/segmented/](https://cran.r-project.org/web/packages/segmented/)
1271
- 1272 NASA – National Aeronautics and Space Administration. *POWER Project:*
1273 *Methodology and Data Sources*. Disponível em:
1274 <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/data/sources/>. Acesso em: 1 abr.
1275 2025.
- 1276
- 1277 NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). *A guide to environmental research on*
1278 *animals*. Washington, D.C.: **National Academy of Sciences**, 1971.
- 1279
- 1280 NEGRI, Renata *et al.* Selection for test-day milk yield and thermotolerance in
1281 Brazilian Holstein cattle. **Animals**, v. 11, n. 1, p. 128, 2021. Disponível em:
1282 <https://doi.org/10.3390/ani11010128>
1283
- 1284 OLIVEIRA, Z. B. *et al.* Climate change scenarios and their impacts on dairy
1285 production in southern Brazil. **Braz J Biosyst Eng**, v. 12, n. 2, p. 110-121, 2018.
1286 <https://doi.org/10.18011/BIOENG2018V12N2P110-121>
1287
- 1288 OLIVEIRA, Z. B. *et al.* Zoneamento bioclimático para vacas leiteiras no estado do
1289 Rio Grande do Sul. **Energia na Agricultura**, v. 32, n. 3, p. 221-228, 2017.
1290 <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2017v32n3p221-228>
1291
- 1292 OUELLET, V.; LAPORTA, J.; DAHL, G. E. Late gestation heat stress in dairy cows:
1293 Effects on dam and daughter. **Theriogenology**, v. 150, p. 471–479, 2020. Disponível
1294 em: <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.03.011>
1295
- 1296 PERAZZI, P. R.; PASSAMANI, M.; THIELEN, D.; PADOVANI, C. O Tradicional ou o
1297 Moderno? Uma Visão da Informação da Rede de Estações Meteorológicas
1298 Brasileiras. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3, p. 351–366, 2021.
1299 Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-77863630115>
1300
- 1301 PUGAS, A. F. The hunt for data: obstacles faced by researchers in the search for
1302 accurate information on precipitation in Brazil. **International Journal of Hydrology**,
1303 v. 7, n. 2, p. 88–91, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.15406/ijh.2023.07.00344>
1304
- 1305 R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R
1306 Foundation for Statistical Computing, 2024.
- 1307
- 1308 RAVAGNOLO, O.; MISZTAL, I. Genetic component of heat stress in dairy cattle,
1309 parameter estimation. **Journal of Dairy Science**, v. 83, n. 9, p. 2126-2130, 2000.
1310 [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75095-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75095-8)
1311
- 1312 RAVAGNOLO, O.; MISZTAL, I.; HOOGENBOOM, G. Genetic Component of Heat
1313 Stress in Dairy Cattle, Development of Heat Index Function. **Journal of Dairy**
1314 **Science**, v. 83, n. 9, p. 2120–2125, 2000. Disponível em:
1315 [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75094-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75094-6)
1316
- 1317 RIBEIRO, A A. *et al.* Comparação entre dados meteorológicos obtidos por estações
1318 convencionais e automáticas no estado do Piauí, Brasil. **Irriga**, v. 22, n. 2, p. 220-

- 1319 235, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n1p220-235>
1320
- 1321 ROCKETT, P. L. *et al.* Genetic analysis of heat tolerance in Holsteins using test-day
1322 production records and satellite-based meteorological data. **Journal of Animal**
1323 **Science**, v. 98, n. Supplement_4, p. 229–230, 2020. Disponível em:
1324 <https://doi.org/10.1093/jas/skaa278.422>
1325
- 1326 ROCKETT, P. L. *et al.* Genetic evaluation of heat tolerance in Holsteins using test-
1327 day production records and NASA POWER weather data. **Journal of Dairy Science**,
1328 v. 106, n. 10, p. 6995–7007, 2023a. Disponível em: [https://doi.org/10.3168/jds.2022-](https://doi.org/10.3168/jds.2022-22776)
1329 [22776](https://doi.org/10.3168/jds.2022-22776)
1330
- 1331 ROCKETT, P. L. *et al.* Phenotypic analysis of heat stress in Holsteins using test-day
1332 production records and NASA POWER meteorological data. **Journal of dairy**
1333 **science**, v. 106, n. 2, p. 1142-1158, 2023b. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22370>
1334
- 1335 RODRIGUES, G. C.; BRAGA, R. P. Evaluation of nasa power reanalysis products to
1336 estimate daily weather variables in a hot summer mediterranean climate. **Agronomy**,
1337 v. 11, n. 6, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11061207>
1338
- 1339 ROSA, S. L. K.; DE SOUZA, J. L. M.; DOS SANTOS, A. A. Data from NASA Power
1340 and surface weather stations under different climates on reference
1341 evapotranspiration estimation. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 58, 2023.
1342 Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.PAB2023.V58.03261>
1343
- 1344 SÁNCHEZ, J. P. *et al.* Genetic determination of the onset of heat stress on daily milk
1345 production in the US Holstein cattle. **Journal of Dairy Science**, v. 92, n. 8, p. 4035-
1346 4045, 2009. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1626>
1347
- 1348 SANTANA JR, M. L. *et al.* Detrimental effect of selection for milk yield on genetic
1349 tolerance to heat stress in purebred Zebu cattle: Genetic parameters and
1350 trends. **Journal of Dairy Science**, v. 98, n. 12, p. 9035-9043, 2015.
1351 <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9817>
1352
- 1353 SANTANA, M. L. *et al.* Genetics of heat tolerance for milk yield and quality in
1354 Holsteins. **Animal**, v. 11, n. 1, p. 4-14, 2017.
1355 <https://doi.org/10.1017/S1751731116001725>
1356
- 1357 SANTANA, M. L. *et al.* Random regression models to account for the effect of
1358 genotype by environment interaction due to heat stress on the milk yield of Holstein
1359 cows under tropical conditions. **Journal of Applied Genetics**, v. 57, p. 119-127,
1360 2016. <https://doi.org/10.1007/s13353-015-0301-x>
1361
- 1362 SAYAGO, S. *et al.* Daily solar radiation from NASA-POWER product: assessing its
1363 accuracy considering atmospheric transparency. **International Journal of Remote**
1364 **Sensing**, v. 41, n. 3, p. 897–910, 2020. Disponível em:
1365 <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1650986>
1366
- 1367 SEJIAN, V. *et al.* Strategies for alleviating abiotic stress in livestock. In: **Livestock**
1368 **Production And Climate Change**. Wallingford UK: CABI, 2015. p. 25-60. Acesso

- 1369 em: 28/03/2025. <https://doi.org/10.1079/9781780644325.0025>
1370
- 1371 SEÓ, H. L. S. *et al.* Avaliação do Ciclo de Vida na bovinocultura leiteira e as
1372 oportunidades ao Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 221–237,
1373 mar. 2017. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016149096>
1374
- 1375 SILVA, Thieres GF *et al.* Impacts of the climate change on regional variation of milk
1376 production in the Pernambuco state, Brazil: analysis for the B2 and A2 IPCC
1377 scenarios. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 489-501, 2009.
1378 <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000400010>
1379
- 1380 SIQUEIRA, A. A. *et al.* Análise da representatividade estatística de dados
1381 meteorológicos para uma região do Submédio São Francisco. **Revista Brasileira de**
1382 **Geografia Física**, v. 11, n. 2, p. 798–813, 2018. Disponível em:
1383 <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.6.p798-813>
1384
- 1385 SPARKS, A. nasapower: NASA-POWER Data from R. Versão 4.2.1, 2024.
1386 Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1040727>.
1387
- 1388 SPIEGELHALTER, D. J. *et al.* Bayesian measures of model complexity and
1389 fit. **Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology**, v.
1390 64, n.4, p. 583-639, 2002.
1391
- 1392 STEFANI, Gabriela *et al.* Genetics of tolerance to heat stress in milk yield of dairy
1393 buffaloes assessed by a reaction norm model. **Journal of Animal Breeding and**
1394 **Genetics**, v. 139, n. 2, p. 215-230, 2022. <https://doi.org/10.1111/jbg.12654>
1395
- 1396 VASCONCELOS-MELO, Thiago *et al.* The climate and its implications for milk
1397 production in the Brazilian cerrado. **Revista MVZ Córdoba**, v. 28, n. 1, p. e2838-
1398 e2838, 2023. <http://doi.org/10.21897/rmvz.2838>
1399
- 1400 VIANNA, L. F. de N.; PERIN, E. B.; RICCE, W. da S.; MASSIGNAN, A. M.;
1401 PANDOLFO, C. Bancos de Dados Meteorológicos: Análise dos Metadados das
1402 Estações Meteorológicas no Estado de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de**
1403 **Meteorologia**, v. 32, n. 1, p. 53–64, 2017. Disponível em:
1404 <https://doi.org/10.1590/0102-778632120150119>
1405
- 1406 WEST, Joe W. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. **Journal of Dairy**
1407 **Science**, v. 86, n. 6, p. 2131-2144, 2003. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X)
1408