



Universidade Federal do Maranhão  
Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal  
Br 222, Km 74, Bairro Boa Vista, Chapadinha-MA  
Telefone (98) 32729902 E-mail: [ppgca@ufma.br](mailto:ppgca@ufma.br)  
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>



Universidade Federal do Maranhão

Programa de Pós-graduação em Ciência Animal

**ESTRESSE TÉRMICO EM OVINOS: ZONEAMENTO  
BIOCLIMÁTICO COM ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DO  
CONSUMO ALIMENTAR NO ESTADO DO MARANHÃO E  
AVALIAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA OCULAR**

CYNTIA AIRAGNA FORTES DOS SANTOS

Chapadinha

2026



Universidade Federal do Maranhão  
Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal  
Br 222, Km 74, Bairro Boa Vista, Chapadinha-MA  
Telefone (98) 32729902 E-mail: [ppgca@ufma.br](mailto:ppgca@ufma.br)  
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>



CYNTIA AIRAGNA FORTES DOS SANTOS

**ESTRESSE TÉRMICO EM OVINOS: ZONEAMENTO  
BIOCLIMÁTICO COM ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DO  
CONSUMO ALIMENTAR NO ESTADO DO MARANHÃO E  
AVALIAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA OCULAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Ciência Animal da Universidade Federal do  
Maranhão, como requisito parcial para obtenção do título  
de Mestre em Ciência Animal.

Orientador(a): Profa. Dra. Kamila Cunha de Meneses

Coorientador (a): Prof. Dr. Nitalo André Farias Machado

Chapadinha

2026



Universidade Federal do Maranhão  
Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal  
Br 222, Km 74, Bairro Boa Vista, Chapadinha-MA  
Telefone (98) 32729902 E-mail: [ppgca@ufma.br](mailto:ppgca@ufma.br)  
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>



## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Fortes dos Santos, Cyntia Airagna.

ESTRESSE TÉRMICO EM OVINOS: ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO COM  
ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DO CONSUMO ALIMENTAR NO ESTADO DO  
MARANHÃO E AVALIAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA OCULAR /  
Cyntia Airagna Fortes dos Santos. - 2026.  
116 f.

Coorientador(a) 1: Nitalo André Farias Machado.

Orientador(a): Kamila Cunha de Meneses.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em  
Ciência Animal/ccch, Universidade Federal do Maranhão,  
Chapadinha - Ma, 2026.

1. Biometeorologia Animal. 2. Ambiência Animal. 3.  
Modelagem Geoestatística. I. Cunha de Meneses, Kamila.  
II. Farias Machado, Nitalo André. III. Título.



Universidade Federal do Maranhão  
Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal  
Br 222, Km 74, Bairro Boa Vista, Chapadinha-MA  
Telefone (98) 32729902 E-mail: [ppgca@ufma.br](mailto:ppgca@ufma.br)  
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>

CYNTIA AIRAGNA FORTES DOS SANTOS

# **ESTRESSE TÉRMICO EM OVINOS: ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO COM ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DO CONSUMO ALIMENTAR NO ESTADO DO MARANHÃO E AVALIAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA OCULAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Ciência Animal da Universidade Federal do  
Maranhão, como requisito parcial para obtenção do título  
de Mestre em Ciência Animal

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Kamila Cunha de Meneses (Orientadora)  
Universidade Federal do Maranhão

---

Prof. Dr. Nítalo André Farias Machado (Coorientador)  
Universidade Federal do Maranhão

---

Prof. Dr. Raimundo Calixto Martins Rodrigues (1º Examinador)  
Universidade Estadual do Maranhão

---

Prof. Dr. Ivo Alexandre Leme da Cunha (2º Examinador)  
Universidade Federal do Maranhão

---

Dr. Ignacio Lund Gabriel da Silva Carmo (3º Examinador)  
Pesquisador Bolsista EMBRAPA





Universidade Federal do Maranhão  
Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal  
Br 222, Km 74, Bairro Boa Vista, Chapadinha-MA  
Telefone (98) 32729902 E-mail: [ppgca@ufma.br](mailto:ppgca@ufma.br)  
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>



## EPÍGRAFE

*"Jesus, He never allowed loneliness  
to weigh on my heart."*

*(Cyntia Airagna)*



Universidade Federal do Maranhão  
Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal  
Br 222, Km 74, Bairro Boa Vista, Chapadinha-MA  
Telefone (98) 32729902 E-mail: [ppgca@ufma.br](mailto:ppgca@ufma.br)  
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>



## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe  
Marilene e minha avó Lurdes, pelo  
amor, apoio e incentivo constantes ao  
longo desta jornada.

Dedico!



## AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda sabedoria, força e providência, A Ele, que é capaz de fazer infinitamente mais do que tudo o que pedimos ou pensamos, seja toda honra e toda glória eternamente. Pois dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas.

À minha família e aos meus amigos, pelo apoio incondicional em todos os momentos, fortalecendo minha determinação para seguir em frente.

À professora Kamila, agradeço a orientação, apoio, confiança e valiosos ensinamentos ao longo desta jornada. Ao professor Nítalo, minha sincera gratidão pela paciência, incentivo, sinceridade, apoio e acolhimento ao longo desta jornada. Sua trajetória profissional é uma inspiração e um exemplo a ser seguido. Agradeço por todos os ensinamentos e pela orientação dedicada; espero, no futuro, alcançar ao menos uma parte da excelência profissional que o senhor representa.

À Andressa Carvalho, pela amizade, companheirismo, incentivo e pelos momentos compartilhados ao longo desta jornada. Muito obrigada.

Aos membros do grupo INOVAR por toda a colaboração e apoio durante a condução do experimento. A contribuição de cada um foi fundamental para tornar essa etapa mais leve e eficiente, sendo indispensável para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal (PPGCA/UFMA), sou grata pelos ensinamentos e pela formação acadêmica, fundamentais para meu crescimento pessoal e profissional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. À Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro que viabilizou a execução desta pesquisa e contribuiu para o alcance dos resultados obtidos.



## RESUMO

O aquecimento global impõe desafios crescentes à pecuária, tornando o estresse térmico um dos principais fatores limitantes à produtividade e ao bem-estar animal. O objetivo com esta pesquisa foi investigar o risco climático e estratégias de adaptação na produção e bem-estar de ovinos no Maranhão em duas abordagens complementares. No Capítulo I, uma revisão de literatura sobre a temática é apresentada. No Capítulo II, realizou-se o zoneamento bioclimático do Maranhão via cálculo mensal do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e do Índice de Temperatura do Globo Negro e Umidade (ITGU), a partir de dados meteorológicos da plataforma *TerraClimate* (2014–2024). Utilizou-se modelagem geoestatística via krigagem ordinária para geração de mapas temáticos de distribuição espaço-temporal do risco de estresse térmico (ITU e ITGU) e estimativa de redução do consumo alimentar (RCA) associado. Os resultados evidenciaram elevada suscetibilidade ao estresse térmico anual em todo o território maranhense, com intensificação no segundo semestre, especialmente entre agosto e novembro. As mesorregiões Norte e Leste concentraram os maiores valores de ITU e ITGU, enquanto a mesorregião Sul apresentou a maior aptidão bioclimática relativa. A estimativa de RCA superou 4 kg animal<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> nas mesorregiões Central e Leste em outubro, evidenciando impactos produtivos severos. No Capítulo III, avaliou-se a eficiência da termografia infravermelha ocular como método não invasivo para detecção do estresse térmico. Seis ovelhas mestiças (Santa Inês × Dorper) foram submetidas a três temperaturas controladas (26, 29 e 34 °C) em câmara climática, com mensuração de frequência cardíaca (FC), temperatura retal (TR), além de parâmetros produtivos e temperaturas termográficas das regiões de interesse (ROI): ocular, pupilar e do saco lacrimal. A exposição a 34 °C provocou aumentos significativos da FR e da TR, como respostas termorregulatórias. Houve reduções no ganho de peso (21%) e no consumo de matéria seca (38%) e aumento na ingestão de água (39%). As temperaturas termográficas dos ROI responderam progressivamente ao incremento térmico. A temperatura ocular destacou-se como a estimativa mais acurada e concordante com a TR, demonstrando ser um método não invasivo, prático para o monitoramento do estresse térmico em ovinos.

**Palavras-chave:** Biometeorologia animal, Ambiência animal, Modelagem geoestatística.



## ABSTRACT

Global warming poses increasing challenges to livestock farming, making heat stress one of the main limiting factors to productivity and animal welfare. The objective of this research was to investigate climate risk and adaptation strategies in sheep production and welfare in Maranhão using two complementary approaches. In Chapter I, a literature review on the topic is presented. In Chapter II, the bioclimatic zoning of Maranhão was carried out via monthly calculation of the Temperature and Humidity Index (THI) and the Black Globe Temperature and Humidity Index (BGHI), using meteorological data from the TerraClimate platform (2014–2024). Geostatistical modeling via ordinary kriging was used to generate thematic maps of the spatio-temporal distribution of heat stress risk (THI and BGHI) and estimate the associated reduction in feed intake (RFI). The results showed high susceptibility to annual heat stress throughout the state of Maranhão, with intensification in the second half of the year, especially between August and November. The North and East mesoregions concentrated the highest values of ITU and ITGU, while the South mesoregion presented the highest relative bioclimatic suitability. The RCA estimate exceeded  $4 \text{ kg animal}^{-1} \text{ d}^{-1}$  in the Central and East mesoregions in October, evidencing severe productive impacts. In Chapter III, the efficiency of ocular infrared thermography as a non-invasive method for detecting thermal stress was evaluated. Six crossbred sheep (Santa Inês  $\times$  Dorper) were subjected to three controlled temperatures (26, 29, and  $34^\circ\text{C}$ ) in a climatic chamber, with measurement of heart rate (HR), rectal temperature (RT), in addition to productive parameters and thermographic temperatures of the regions of interest (ROI): ocular, pupillary, and lacrimal sac. Exposure to  $34^\circ\text{C}$  caused significant increases in RR and RT, as thermoregulatory responses. There were reductions in weight gain (21%) and dry matter intake (38%) and an increase in water intake (39%). The thermographic temperatures of the ROIs responded progressively to the thermal increase. Eye temperature stood out as the most accurate estimate and consistent with the RT, demonstrating that it is a non-invasive, practical method for the monitoring of heat stress in sheep.

**Keywords:** Animal biometeorology, Animal environment, Geostatistical modeling



## SUMÁRIO

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>                           | <b>17</b> |
| <b>2.OBJETIVOS.....</b>                                    | <b>19</b> |
| 2.1. Geral.....                                            | 19        |
| 2.2. Específicos .....                                     | 19        |
| <b>3. CAPÍTULO I: REVISÃO DE LITERATURA .....</b>          | <b>20</b> |
| 3.1 A cadeia produtiva da ovinocultura .....               | 20        |
| 3.2 Termorregulação e estresse térmico em ruminantes ..... | 22        |
| 3.3 Ferramentas para o zoneamento bioclimático .....       | 26        |
| 3.4 Estratégias para medição do estresse térmico .....     | 30        |
| REFERÊNCIAS.....                                           | 36        |
| <b>CAPÍTULO II .....</b>                                   | <b>44</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                  | <b>47</b> |
| <b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                         | <b>49</b> |
| 2.1 Área de estudo .....                                   | 49        |
| 2.2 Aquisição e processamento do banco de dados .....      | 50        |
| 2.3 Análise de dados .....                                 | 53        |
| <b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                     | <b>56</b> |
| <b>4. CONCLUSÃO.....</b>                                   | <b>72</b> |
| REFERÊNCIAS.....                                           | 73        |
| <b>CAPÍTULO III.....</b>                                   | <b>77</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                  | <b>80</b> |

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                             | <b>83</b> |
| 2.1 Localização .....                                                          | 83        |
| 2.2 Animais .....                                                              | 83        |
| 2.3 Delineamento experimental .....                                            | 83        |
| 2.4 Condições ambientais .....                                                 | 83        |
| 2.5 Comitê de ética .....                                                      | 83        |
| 2.6 Câmara climática .....                                                     | 83        |
| 2.7 Manejo pré-experimental, adaptação e higienização.....                     | 84        |
| 2.8 Alimentação e fornecimento de água.....                                    | 85        |
| 2.9 Protocolo experimental de exposição térmica e monitoramento ambiental..... | 85        |
| 2.10. Coleta de dados.....                                                     | 86        |
| 2.11. Análises estatísticas.....                                               | 89        |
| <b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                          | <b>89</b> |
| <b>4. CONCLUSÃO.....</b>                                                       | <b>96</b> |
| REFERÊNCIAS.....                                                               | 98        |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS.....                                                      | 102       |



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Representação da zona de termoneutralidade. Elaborado pela autora com base em Baêta e Souza (1977).....                                                                                                                                                                             | 23 |
| <b>Figura 2.</b> Resumo gráfico dos impactos do estresse térmico na produção de ruminantes. Elaborado pela autora na plataforma do google Notebook LM.....                                                                                                                                           | 26 |
| <b>Figura 3.</b> Representação do espectro eletromagnético e da região do infravermelho empregada na termografia Fonte: Adaptado de Castro (2024).....                                                                                                                                               | 32 |
| <b>Figura 4.</b> Área de estudo: classificação climática de Köppen-Geiger (a), localização geográfica no território brasileiro (b), modelo digital de elevação (c) e mesorregiões do Estado do Maranhão (d).....                                                                                     | 50 |
| <b>Figura 5.</b> Fluxograma metodológico: obtenção do banco de dados (1), processamento dos dados e cálculo do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e do Índice de Temperatura do Globo Negro e Umidade (ITGU) (2) e geração dos mapas por modelagem geoestatística via krigagem ordinária (3)..... | 51 |
| <b>Figura 6.</b> Mapas de krigagem mensal do ITU de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.....                                                                                                                                                  | 61 |
| <b>Figura 7.</b> Mapas de krigagem mensais do ITGU de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.....                                                                                                                                                | 67 |
| <b>Figura 8.</b> Mapas de krigagem mensais da estimativa de redução do consumo alimentar em ovinos de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.....                                                                                                | 68 |
| <b>Figura 9.</b> Câmara climática utilizada no experimento.....                                                                                                                                                                                                                                      | 84 |



**Figura 10.** Ovelha com cinta torácica com sensor de frequência cardíaca. Fonte: Autora.....87

**Figura 11.** Delimitação das regiões de interesse (ROIs) utilizadas na análise termográfica: (a) TO – temperatura ocular; (b) TP – temperatura pupilar, e (c) TSL – temperatura do saco lacrimal. Fonte: Autora .....88

**Figura 12.** Análise de Bland–Altman demonstrando a concordância entre a temperatura retal (TR) e (a) a temperatura pupilar (TP), (b) a temperatura ocular (TO), (c) a temperatura do saco lacrimal (TSL) e (d) a temperatura da superfície do pelame (TSP). Fonte: Autora.....95



## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Resumo das estatísticas descritivas para os valores mensais do ITU.....                                      | 56 |
| <b>Tabela 2.</b> Validação cruzada dos modelos geoestatísticos testados para valores mensais de ITU.....                      | 57 |
| <b>Tabela 3.</b> Parâmetros para os modelos de semivariograma ajustados e grau de dependência espacial.....                   | 58 |
| <b>Tabela 4.</b> Resumo das estatísticas descritivas para os valores mensais do ITGU.....                                     | 63 |
| <b>Tabela 5.</b> Validação cruzada dos modelos geoestatísticos testados para valores mensais de ITGU.....                     | 64 |
| <b>Tabela 6.</b> Parâmetros para os modelos de semivariograma ajustados e grau de dependência espacial.....                   | 65 |
| <b>Tabela 7.</b> Composição centesimal e química da dieta.....                                                                | 85 |
| <b>Tabela 8.</b> Médias $\pm$ erro padrão das variáveis avaliadas em diferentes temperaturas do ar.....                       | 90 |
| <b>Tabela 9.</b> Médias $\pm$ erro padrão das variáveis de desempenho animal submetidos em diferentes temperaturas do ar..... | 92 |
| <b>Tabela 10.</b> Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas.....                                           | 94 |



Universidade Federal do Maranhão  
Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal  
Br 222, Km 74, Bairro Boa Vista, Chapadinha-MA  
Telefone (98) 32729902 E-mail: [ppgca@ufma.br](mailto:ppgca@ufma.br)  
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>



## LISTA DE ABREVIÇÕES

- Am – Clima equatorial de monção (classificação de Köppen-Geiger)
- As – Clima tropical com estação seca no verão (classificação de Köppen-Geiger)
- Aw – Clima tropical com chuvas de verão (classificação de Köppen-Geiger)
- BGTHI - Globo Negro e Umidade
- ET - estresse térmico
- FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
- FC - Frequência Cardíaca
- FR – Frequência Respiratória
- GDE - Grau de Dependência Espacial
- GEE – Gases de Efeito Estufa
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICT - Índice de Carga Térmica
- ITGU – Índice de Temperatura do Globo Negro e Umidade
- ITU – Índice de Temperatura e Umidade
- LWSI – *Livestock Weather Safety Index*
- MAPA- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

NRC - *National Research Council*

Pv – Pressão de vapor

RCA - Redução do Consumo Alimentar

RMSE - Erro Quadrático Médio

ROIs – regiões de interesse

SAS - *Statistical Analysis System*

SIG – Sistema de Informação Geográfica

TA - Temperatura Média do Ar

TCI - Temperatura Crítica Inferior

TCS - Temperatura Crítica Superior

THI - Temperatura e Umidade

Tmax – Temperatura máxima do ar

Tmin – Temperatura mínima do ar

TO - Temperatura Ocular

TP - Temperatura Pupilar

TR - Temperatura Retal

TRI - Termografia Infravermelha

TSL - Temperatura do saco lacrimal

Vv – Velocidade do vento

ZTN – Zona Termoneutra

## 1.INTRODUÇÃO GERAL

A mudança climática e o aquecimento global representam um dos principais desafios para a pecuária mundial (Dahlberg, 2000; Zilli et al., 2020; Theusme et al., 2021), com impactos particularmente expressivos sobre regiões tropicais e países em desenvolvimento (Sejian et al., 2022), onde a demanda por proteína animal cresce em ritmo acelerado em razão do aumento populacional e da necessidade de melhoria das condições de vida. O Brasil possui cerca de 21,7 milhões de ovinos, dos quais mais de 15,5 milhões de cabeças estão na Região Nordeste, que concentra 71,2% do rebanho nacional, com destaque para a Bahia, detentora do maior efetivo do país. Nesse cenário, a ovinocultura assume papel de destaque, onde a atividade constitui importante fonte de renda e segurança alimentar para a agricultura familiar (Nunes de Sousa et al., 2025).

O estado do Maranhão apresenta diversidade climática marcante entre suas mesorregiões, com temperaturas médias anuais variando de 24°C a 40°C e ocorrências entre 1.000 e 1.850 mm/ano, refletindo sua posição de transição entre os biomas Amazônia, Cerrado e Caatinga. A umidade relativa, a variação e a temperatura variam significativamente entre as mesorregiões, com o norte mais úmido e o leste e o sul mais seco (Rufino et al., 2024; Lima et al., 2016), fatores que impõem desafios constantes à manutenção do conforto térmico dos rebanhos ovinos criados predominantemente em sistema extensivo. A exposição direta e contínua dos ovinos a essas condições climáticas adversas compromete os mecanismos de termorregulação dos animais, desencadeando respostas fisiológicas e comportamentais que, quando insuficientes para dissipar o excesso de calor, evoluem para o quadro de estresse térmico crônico (Mascarenhas et al., 2023).

Em geral, essa condição está associada a impactos multidimensionais sobre os sistemas de produção agrossilvipastoril, incluindo redução do consumo de matéria seca, queda no desempenho produtivo e reprodutivo, comprometimento do bem-estar animal e aumento da suscetibilidade a doenças (Sevi; Caroprese, 2012; Sejian et al., 2017; Jacobson et al., 2020; McManus et al., 2020). Diante da intensificação projetada das mudanças climáticas para as próximas décadas, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de ferramentas de detecção, monitoramento e adaptação que permitam antecipar cenários críticos e subsidiar estratégias de manejo direcionadas à sustentabilidade da ovinocultura regional.

Esta dissertação analisou o risco climático e as estratégias de adaptação da ovinocultura

no Maranhão em duas escalas complementares. Na primeira, foi realizado o zoneamento bioclimático do estado, com base nos índices ITU e ITGU e nos limites térmicos das principais raças ovinas. A análise permitiu identificar as regiões e os períodos mais vulneráveis ao estresse térmico, fornecendo subsídios ao planejamento territorial e às políticas públicas para a ovinocultura familiar.

Em uma escala complementar, de natureza experimental e individual, investigou-se a eficiência da termografia infravermelha como ferramenta não invasiva para a detecção precoce do estresse térmico em ovinos mantidos sob diferentes condições controladas de temperatura do ar. Partindo da premissa de que indicadores fisiológicos tradicionais, como frequência respiratória e temperatura retal, embora eficazes, apresentam limitações operacionais em relação à coleta de dados na rotina da fazenda (Hoffmann et al., 2020). Portanto, buscou-se avaliar o potencial da eficiência da temperatura ocular, obtida por meio de imagens termográficas, como indicador sensível e de fácil aplicação para o monitoramento do conforto térmico animal.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Realizar o zoneamento bioclimático para a ovinocultura no estado do Maranhão por meio de krigagem ordinária, avaliar a eficiência da termografia infravermelha ocular como método não invasivo para detecção e monitoramento do estresse térmico em ovinos mantidos em ambiente controlado, e estimar a redução do consumo alimentar decorrente do estresse térmico nesses animais.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Calcular e analisar os índices bioclimáticos mensais de Temperatura e Umidade (ITU) e de Temperatura do Globo Negro e Umidade (ITGU) para o estado do Maranhão;

Aplicar técnicas de geoestatística para modelar a dependência espacial dos índices bioclimáticos e elaborar mapas temáticos de distribuição espacial do risco de estresse térmico;

Identificar áreas e períodos de maior risco de estresse térmico para ovinos no estado do Maranhão;

Avaliar diferentes regiões de interesse (ROI's) na termografia infravermelha em ovinos submetidos a temperaturas de 26 °C, 29 °C e 34 °C em ambiente controlado;

Analisar as variações nos parâmetros fisiológicos em ovinos submetidos a temperaturas de 26 °C, 29 °C e 34 °C em ambiente controlado;

Analisar o desempenho animal de ovinos submetidos a temperaturas de 26 °C, 29 °C e 34 °C em ambiente controlado;

Avaliar as correlações e o grau de concordância entre os parâmetros fisiológicos e as temperaturas obtidas nas ROI's por termografia infravermelha.

### **3. CAPÍTULO I: REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1.A cadeia produtiva da ovinocultura**

O Maranhão apresenta condições edafoclimáticas favoráveis ao desenvolvimento da caprinovinocultura, incluindo produção constante de alimentos para consumo animal e tradição na bovinocultura, o que viabiliza a exploração consorciada de espécies. Associam-se a isso o interesse de produtores familiares e empresários, a articulação entre instituições públicas e privadas, e as próprias características de caprinos e ovinos, como docilidade, pequeno porte e rusticidade, que favorecem sua criação com mão de obra familiar e instalações simples e de baixo custo (Bandeira et al., 2007; Teixeira et al., 2015).

A mesorregião Oeste Maranhense passou a se destacar na ovinocultura a partir de 2004, consolidando-se como a principal região produtora de ovinos do estado. Esse crescimento pode estar relacionado à migração de criadores oriundos de estados tradicionalmente ligados à ovinocultura, como Sergipe, Alagoas, Ceará e Pernambuco, que se estabeleceram na região entre 2002 e 2004, contribuindo para a expansão do rebanho local (Martins; Ottati, 2020).

Em 2024, o Maranhão alcançou um efetivo ovino superior a 340 mil cabeças, ocupando a 11ª posição no ranking nacional e a 7ª no Nordeste, confirmando sua significativa contribuição para o setor pecuário regional. Os municípios com maiores rebanhos do estado são Amarante do Maranhão (9.850 cabeças), São Francisco do Maranhão (9.542), Açailândia (9.246), Santa Luzia (8.987) e Balsas (6.218).

Nos últimos anos, o Maranhão tem passado por intensa expansão agrícola, com destaque para a produção de commodities como soja e milho, impulsionada pelo avanço da fronteira agrícola, conhecida como MATOPIBA (Gomes et al., 2025). Esse crescimento econômico tem favorecido também a expansão da pecuária, criando condições propícias para o desenvolvimento da ovinocultura (Nunes de Sousa et al., 2025).

O Brasil possui 36 raças de ovinos registradas pela Associação de Criadores de Ovinos (ARCO), credenciada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Criam-se tanto ovinos de lã quanto de pelo e, com a expansão da produção ovina no Brasil, especialmente em áreas onde essa atividade não é tradicional (Hermuche et al., 2013).

Ovinos adaptados ao semiárido brasileiro, como Santa Inês, Soinga e Morada Nova,



além dos animais sem padrão racial definido (SPRD), são recursos genéticos valiosos por sua resistência, homeotermia e capacidade de prosperar em ambientes quentes e secos. A Santa Inês destaca-se na produção de carne pelo desempenho de crescimento, adaptabilidade e resistência a parasitas, apesar de maiores exigências nutricionais, enquanto os SPRD, mais diversos, são amplamente usados em sistemas de subsistência por sua alta adaptabilidade ambiental. Essa diversidade morfológica e adaptativa favorece o melhoramento genético e a criação sustentável em climas rigorosos, tornando esses genótipos mais adequados às condições semiáridas do que raças exóticas, com zona de conforto térmico entre 15 e 30 °C e menores perdas de produtividade (Santos e Cabral, 2021; Carabaño et al., 2022; Mascarenhas et al., 2023).

A climatologia maranhense é marcada pela ocorrência de duas estações bem definidas, uma chuvosa e outra seca, bem como por expressiva variação espacial da temperatura e da precipitação. Os totais anuais de chuva oscilam entre cerca de 1.040 e 2.210 mm, de acordo com os dados obtidos em quinze estações meteorológicas (Carvalho; Corrêa; Mendes, 2023). Nesse contexto, tais condições podem representar desafios significativos para a ovinocultura regional, especialmente em relação à disponibilidade e à qualidade das forragens, bem como ao suprimento hídrico. Estudos recentes realizados no Maranhão evidenciam elevados níveis de risco térmico em extensas áreas do estado, com reflexos já perceptíveis na produção e perspectivas de agravamento diante de cenários climáticos futuros (Sousa et al., 2025). De modo geral, os estudos indicam que o aumento da frequência e da intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor e secas prolongadas, tende a comprometer a capacidade produtiva das pastagens e a intensificar os problemas sanitários e reprodutivos dos rebanhos. Esse cenário reforça a necessidade de adoção de estratégias adaptativas, incluindo melhorias no manejo, investimentos em infraestrutura e a implementação de políticas públicas voltadas à resiliência da atividade pecuária (Nardone et al., 2010).

Além dos fatores históricos, produtivos e ambientais, a ovinocultura maranhense enfrenta desafios relacionados à manejo extensivo pouco tecnificadas, à degradação das pastagens e à necessidade de maior eficiência no uso dos recursos naturais. Evidências apontam que mais da metade das áreas de pastagem localizadas no bioma Amazônia e em zonas de transição com o Cerrado apresentam algum nível de degradação, comprometendo o desempenho de sistemas produtivos, incluindo aqueles presentes no Maranhão (Dias-Filho, 2014). Diante desse cenário, práticas voltadas à intensificação sustentável da produção, ao

manejo rotacionado de pastagens e à implementação de sistemas integrados, como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), têm sido amplamente recomendadas por seu potencial de elevar a produtividade e promover maior sustentabilidade e resiliência dos sistemas pecuários (Latawiec et al., 2017; Martha; Alves; Contini, 2012).

### **3.2 Termorregulação e estresse térmico em ruminantes**

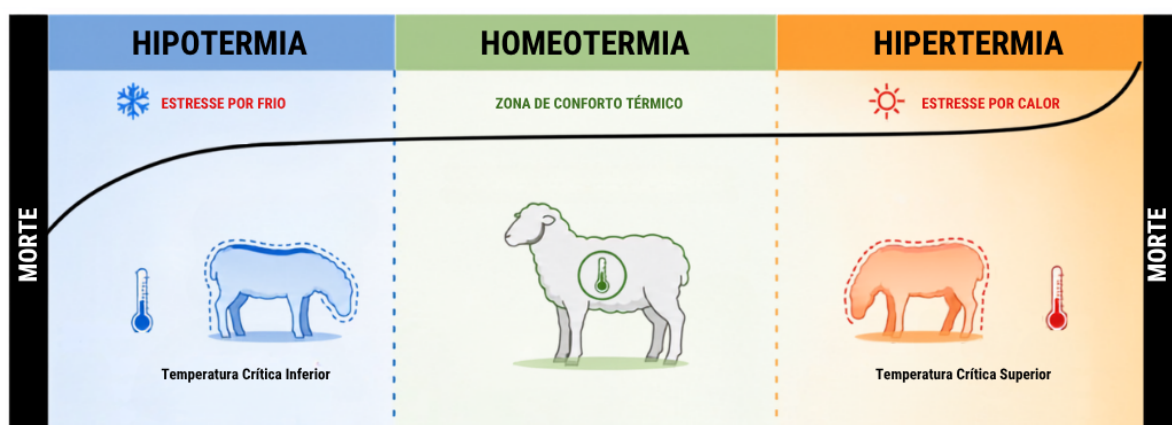
A homeotermia caracteriza-se pela manutenção relativamente constante da temperatura corporal interna dos animais, independentemente das oscilações térmicas do ambiente externo (Mitchell et al., 2018). Essa capacidade regulatória é determinante para a sobrevivência e para a expressão do potencial produtivo dos rebanhos (Maia et al., 2015). No entanto, justamente por dependerem desse equilíbrio, os animais homeotérmicos têm sua estabilidade térmica ameaçada quando submetidos a condições ambientais de calor ou frio excessivos. Diante dessas situações, são acionados mecanismos fisiológicos e comportamentais voltados à termorregulação, na tentativa de preservar a temperatura corporal dentro de limites adequados; quando esses mecanismos não conseguem mais compensar a carga térmica imposta, instala-se o quadro de estresse térmico (Silva e Maia, 2013).

Essa interação entre a temperatura interna do organismo e as variáveis climáticas externas torna-se mais clara quando analisada a partir do conceito de zonas térmicas, que descrevem as diferentes respostas fisiológicas adotadas pelos animais conforme a intensidade do desafio ambiental. Entre essas zonas, destaca-se a Zona de Termoneutralidade (ZTN), definida como o intervalo de temperatura ambiente no qual o animal sustenta a homeotermia recorrendo apenas à perda de calor sensível, sem necessidade de incrementar a taxa metabólica nem de acionar vias evaporativas de resfriamento. Os limites dessa faixa são estabelecidos pela temperatura crítica inferior (TCI) e pela temperatura crítica superior (TCS). Enquanto permanecem dentro desses limites, os animais encontram-se em situação de conforto térmico, caracterizada por baixo custo energético, uma vez que não há demanda adicional para geração ou dissipação de calor. Isso possibilita que a energia disponível seja destinada prioritariamente aos processos produtivos e reprodutivos, em vez de ser consumida por respostas adaptativas ao ambiente (Maray et al., 2007).

Do ponto de vista da fisiologia animal, o estresse pode ser definido como um estado no qual desafios ambientais ou de manejo ameaçam a homeostase do animal e desencadeiam

respostas neuroendócrinas, metabólicas e comportamentais coordenadas, visando restaurar o equilíbrio interno (Collier, 2017). Os estímulos que desencadeiam o estresse não são necessariamente dolorosos, mas estados psicológicos como medo ou ansiedade ativam respostas fisiológicas que podem impor um impacto deletério ao animal. Quando o animal percebe uma ameaça, ele desenvolve uma resposta comportamental, autonômica, endócrina ou imunológica para manter a homeostase (Kumar, 2012).

A temperatura ambiente e a umidade relativa são importantes fatores de estresse térmico (ET) na criação de ovinos. Pesquisas mostram que, quando os ovinos buscam mitigar os efeitos de um ambiente quente e aliviar o estresse térmico, eles inicialmente adotam comportamentos ativos para reduzir o ganho de calor e aumentar a perda de calor (Sejian et al., 2021). De acordo com Baêta e Souza (1997), a zona de conforto térmico para ovinos situa-se entre 20 e 30°C, sendo a temperatura crítica efetiva superior de 34°C. Para cordeiros recém-nascidos, os autores indicam temperatura crítica inferior de 6°C e temperatura crítica superior de 34°C, enquanto para ovinos adultos a temperatura crítica inferior é de 20°C e a superior de 35°C, com zona de conforto entre 15 e 30°C (Figura 3). Complementarmente, em condições ideais de temperatura, 20% das perdas de calor dos ovinos são realizadas por via respiratória, sendo que acima de 35°C a perda total de calor via respiração pode alcançar 60% do calor total dissipado.



**Figura 1.** Representação da zona de termoneutralidade. Elaborado pela autora com base em Baêta e Souza (1977).

No contexto da produção de pequenos ruminantes, os principais fatores de estresse incluem altas temperaturas ambientes, escassez de água, fornecimento de forragem insuficiente

ou variável e outras características de ambientes hostis. Quando esses fatores de estresse são intensos ou prolongados, podem exceder a capacidade adaptativa do animal, levando a comprometimento do bem-estar, redução do crescimento e do desempenho reprodutivo e maior mortalidade, enquanto raças adaptadas podem tolerar essas condições com menor perturbação da homeostase (Maldonado-Jaquez et al., 2025).

Diversos estudos na literatura científica têm demonstrado, de forma consistente, as respostas fisiológicas agudas desencadeadas pelo estresse térmico em ruminantes. Habeeb et al (2023) observaram, animais submetidos ao estresse calórico respondem com aumento da frequência respiratória, ofegação e elevação da temperatura retal, além de reduzirem a atividade e o consumo de alimento. Nesse mesmo contexto, Silanikove (2000) afirma que o estresse por calor compromete o bem-estar de ruminantes manejados extensivamente, desencadeando mecanismos termoregulatórios que incluem vasodilatação periférica e sudorese intensificada, visando aumentar a dissipação de calor para o ambiente. Berihulay et al. (2019) destacam que, do ponto de vista fisiológico, ovinos e caprinos respondem ao ambiente termicamente estressante por meio do aumento da frequência respiratória, da taxa de sudorese e de alterações na função endócrina, com redução da taxa metabólica. Tais respostas agudas, que compreendem o aumento da frequência respiratória, a ofegação, a sudorese, a vasodilatação periférica, a elevação da frequência cardíaca e o aumento da temperatura corporal, representam os principais mecanismos fisiológicos acionados pelo organismo animal na tentativa de manter a homeotermia frente à sobrecarga térmica (Silanikove, 2000; Berihulay et al., 2019; Habeeb et al., 2023).

O estresse térmico compromete igualmente os processos de ingestão e digestão. Habeeb et al. (2023) observaram que a redução no consumo de matéria seca constitui a principal resposta inicial dos animais às altas temperaturas, mediada por sinais inibitórios transmitidos ao centro hipotalâmico do apetite. Silanikove (2000) relata que o calor compromete diretamente a fermentação ruminal, reduzindo a ruminação e a motilidade do rúmen, alterando o pH, diminuindo as concentrações de  $\text{NH}_3\text{-N}$  e desequilibrando a microbiota, com aumento de produtores de lactato e redução de bactérias acetogênicas. Wang et al. (2020) reforçam que essas alterações na motilidade ruminal e na microbiota afetam diretamente a digestibilidade dos alimentos e a fermentação ruminal, deteriorando a eficiência nutricional e produtiva dos

ruminantes.

No plano metabólico sistêmico, o estresse térmico desencadeia alterações que comprometem a homeostase celular dos ruminantes. Chauhan et al. (2019) em seu estudo, demonstrou que a hipertermia eleva a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), promovendo degradação proteica, inibição da síntese proteica e ativação de vias inflamatórias via NF- $\kappa$ B e TNF- $\alpha$ . Kim et al. (2022) afirmam que o calor reduz a função tireoidiana e que a ativação de NF- $\kappa$ B é central nas respostas imune e inflamatória induzidas pelo estresse térmico. Habeeb et al. (2023) reforçam que a queda dos hormônios anabólicos (insulina, T3 e T4) compromete diretamente o metabolismo proteico e lipídico, resultando em catabolismo tecidual acentuado e balanço nitrogenado negativo. Assim, a redução da síntese proteica, o aumento da proteólise, o desequilíbrio hormonal e a amplificação das vias inflamatórias constituem os principais mecanismos sistêmicos pelos quais o estresse térmico deteriora o desempenho produtivo dos ruminantes (Chauhan et al., 2019; Kim et al., 2022; Habeeb et al., 2023).

Do ponto de vista reprodutivo, o estresse térmico compromete a eficiência produtiva dos ruminantes. Joy et al. (2020) argumenta que pequenos ruminantes expostos a temperaturas elevadas, ocorre redução dos hormônios reprodutivos, deterioração da competência dos oócitos e queda nas taxas de concepção, efeitos também documentados em bovinos e caprinos. Corroborando esses achados, Gupta et al. (2025) afirmam que o calor suprime o pulso de LH, reduz os níveis de FSH, estradiol e progesterona, prejudica o desenvolvimento folicular e aumenta a mortalidade embrionária em fêmeas, ao mesmo tempo que diminui a motilidade espermática, eleva os defeitos morfológicos dos espermatozoides e pode provocar degeneração testicular nos machos. Khan et al. (2023) contribui que, em bovinos, a taxa de concepção cai cerca de 4,6% para cada unidade de aumento no índice temperatura-umidade acima de 70, evidenciando o impacto direto do calor sobre a fertilidade.

No que diz respeito ao bem-estar, Polsky e von Keyserlingk (2017) destacam que animais sob estresse térmico manifestam fome e sede intensificadas, frustração, comportamentos alterados como ofegação excessiva, maior tempo em pé e busca por sombra, além de maior suscetibilidade a enfermidades como claudicação. Para ovinos e caprinos especificamente, van Wettere et al. (2021) observaram que além dos efeitos reprodutivos, o estresse térmico prejudica a produção e qualidade do leite, enquanto Gonzalez-Rivas et al. (2020) demonstraram que o calor resulta em carne com pH elevado, coloração mais escura e maior firmeza, comprometendo

a qualidade do produto. Considerando os efeitos das condições climáticas sobre os sistemas de produção animal, a Figura 2 apresenta os principais impactos do estresse térmico no desempenho produtivo e reprodutivo dos ovinos.



**Figura 2.** Resumo gráfico dos impactos do estresse térmico na produção de ovinos. Elaborado pela autora na plataforma do google Notebook LM e editado no Canva.

### 3.3 Ferramentas para o zoneamento bioclimático

A introdução e a consolidação dos índices bioclimáticos constituíram um importante avanço na avaliação do ambiente térmico, ao possibilitar a integração entre as condições meteorológicas e as respostas fisiológicas dos animais. Entre esses indicadores, destaca-se o Índice de Temperatura e Umidade (ITU), originalmente desenvolvido por Thom (1959) para mensurar o desconforto térmico humano e posteriormente adaptado para a produção animal pelo National Research Council (NRC, 1971). Devido à sua simplicidade de aplicação e interpretação, o ITU tornou-se um dos índices mais amplamente utilizados em estudos biometeorológicos, permitindo associar a temperatura do ar e a umidade relativa ao potencial de estresse térmico dos animais.

Além do ITU, outros índices foram desenvolvidos com o objetivo de representar de forma mais abrangente as condições ambientais. O Índice de Globo Negro e Umidade (ITGU) e o Índice de Carga Térmica (ICT), por exemplo, incorporam variáveis adicionais, como a radiação solar e os efeitos combinados da velocidade do vento, proporcionando uma estimativa mais realista das condições microclimáticas às quais os animais estão expostos. Dessa forma, esses índices contribuem para uma avaliação mais precisa do ambiente térmico e de seus potenciais impactos sobre o bem-estar e o desempenho animal (Buffington et al., 1981; Gaughan et al., 2008).

Sousa et al. (2025) realizaram um zoneamento bioclimático para bovinos leiteiros no estado do Maranhão e verificaram a ocorrência de elevados níveis de estresse térmico em grande parte do território estadual. Os autores identificaram um gradiente térmico decrescente no sentido norte-sul, com as mesorregiões Norte e Leste apresentando os maiores valores do ITU e, conseqüentemente, maior risco de desconforto térmico para os animais. Além disso, foram estimadas perdas produtivas superiores a 1,5 kg de leite vaca<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> para animais com potencial produtivo de 10 kg de leite por dia e superiores a 5 kg vaca<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> para vacas com potencial de 25 kg de leite por dia nas áreas mais críticas. As projeções climáticas indicaram agravamento dessas condições ao longo do século XXI, com expansão das áreas de elevado risco térmico e aumento das perdas produtivas, evidenciando a necessidade de adoção de estratégias de adaptação para a sustentabilidade da atividade leiteira no estado.

Marinho et al. (2023) caracterizaram as condições bioclimáticas para a exploração da ovinocultura no estado de Pernambuco. Os autores constataram que as condições de conforto térmico variam entre as mesorregiões do estado, sendo os menores valores do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) observados na região do Agreste e os maiores nas mesorregiões de São Francisco e Metropolitana. Os resultados indicaram que raças deslanadas, como Morada Nova, Santa Inês e Dorper, apresentam potencial de criação em praticamente todo o estado devido à sua maior tolerância ao calor. Por outro lado, raças lanadas mostraram melhor adaptação às áreas de menor ITU, especialmente na mesorregião do Agreste. O estudo evidenciou a importância do zoneamento bioclimático como ferramenta para orientar a escolha de raças mais adaptadas às condições ambientais de Pernambuco, contribuindo para o aumento da eficiência produtiva e do bem-estar animal.

Em um trabalho parecido Silva et al. (2023) no estado da Paraíba, em seu estudo com

codornas, verificaram que a criação dessas espécies é viável em todas as mesorregiões do estado, tanto nos períodos chuvosos quanto seco. No entanto, algumas áreas demandam medidas de manejo para mitigar os efeitos das elevadas temperaturas máximas e da umidade relativa do ar, especialmente nas mesorregiões do Sertão e Borborema. O estudo destacou que estratégias como sombreamento, fornecimento adequado de água e utilização de instalações suspensas podem contribuir para a manutenção do conforto térmico e do bem-estar animal, favorecendo a sustentabilidade dos sistemas de produção.

Furtado et al. (2018) compararam as temperaturas do globo negro (TBG) e do globo cinza (TGG) na produção de ovinos (Santa Inês e Dorper) em ambientes a pleno sol e sombreado, no semiárido brasileiro. A TBG atingiu máxima de 48,1 °C às 13h a pleno sol, com BGHI de 96,7, enquanto a TGG registrou máxima de 37,6 °C e BGHI de 86,2 nas mesmas condições, ambos os índices ultrapassando o limite de conforto térmico para ovinos. Na sombra, as temperaturas dos dois globos foram semelhantes; ao sol, divergiram, com valores mais altos no globo negro devido à maior absorção de radiação térmica. Os autores concluem que o globo cinza, em ambientes sombreados, apresenta boa acurácia para avaliar o conforto térmico, sendo uma alternativa viável ao globo negro.

Farias et al. (2017), ao realizarem o zoneamento bioclimático do estado do Maranhão para bovinos, suínos e aves, utilizando os índices ITU e ITGU, e verificaram que nenhuma das regiões avaliadas apresentou condições ideais de conforto térmico para as espécies estudadas. Os valores observados de ITU variaram entre 74,1 e 75,8, enquanto os de ITGU oscilaram entre 80,0 e 82,3, indicando situações de alerta e perigo térmico. Os autores concluíram que os sistemas de produção animal no estado necessitam de investimentos em estratégias de ambiência e correção do microclima, visando minimizar os efeitos do estresse térmico e melhorar o desempenho produtivo dos animais.

De acordo com o estudo de Ferreira et al. (2024), com base em quatro modelos climáticos do CMIP6, há uma tendência de aumento generalizado das temperaturas em todo o território brasileiro, com elevações médias próximas de 1 °C no curto prazo e projeções que podem alcançar até 4 °C nas regiões Norte e Centro-Oeste até o final do século. Corroborando esse cenário, Emediegwu e Ubabukoh (2023) projetaram que as mudanças climáticas poderão reduzir a produção animal em mais de 20% até meados do século e em cerca de 40% até seu final, caso não sejam implementadas estratégias adicionais de adaptação além daquelas



observadas historicamente.

O geoprocessamento compreende um conjunto de técnicas e tecnologias destinadas à coleta, armazenamento, processamento e análise de dados geográficos, sendo amplamente utilizado em estudos ambientais e agropecuários para compreender a distribuição espacial dos fenômenos e subsidiar a tomada de decisões (Campos; Souza; Freitas, 2024). Dentre suas principais ferramentas, destacam-se os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que permitem integrar e analisar dados georreferenciados por meio da sobreposição de informações espaciais, gerando produtos como mapas, tabelas, gráficos e relatórios, fundamentais para o planejamento e monitoramento do espaço geográfico (Zaidan, 2017).

As técnicas de geoprocessamento possuem ampla aplicação na pecuária, contribuindo para a identificação de áreas aptas à criação animal com base em fatores ambientais, edáficos, topográficos e hídricos (Denis et al., 2024). Estudos recentes evidenciam sua eficiência na delimitação de zonas favoráveis à produção animal, na avaliação da adequação de raças a diferentes condições agroecológicas e na análise da disseminação de doenças (Balew et al., 2022; Lozano-Jaramillo et al., 2019; Nong et al., 2024; Rana; Moniruzzaman, 2023; Di Lorenzo et al., 2023). Além disso, o geoprocessamento possibilita integrar e analisar informações ambientais espacialmente referenciadas, favorecendo a compreensão da variabilidade espacial das condições climáticas e bioclimáticas e subsidiando estudos de aptidão territorial e avaliação de riscos ambientais (Denis et al., 2024; Silva et al., 2023).

O zoneamento bioclimático associado ao geoprocessamento constitui uma importante ferramenta para integrar dados meteorológicos e gerar mapas temáticos capazes de identificar áreas de risco e monitorar condições climáticas. Estudos recentes demonstram sua aplicação na análise de variáveis térmicas e na avaliação dos impactos climáticos atuais e futuros sobre diferentes populações (Aparecido et al., 2022; Vinogradova; Titkova, 2025). Nesse contexto, geotecnologias como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o sensoriamento remoto e a modelagem espacial são fundamentais para o desenvolvimento de zoneamentos bioclimáticos e para a avaliação dos efeitos das mudanças climáticas, possibilitando a elaboração de mapas, modelos preditivos e análises de vulnerabilidade com elevada precisão espacial (Marinho et al., 2023; Vinogradova; Titkova, 2025; Scolaro; Martins Vaz; Ghisi, 2025).

A geoestatística surgiu a partir dos estudos de Krige (1951) sobre estimativas de reservas minerais e foi posteriormente consolidada por Matheron (1963), que estabeleceu os

fundamentos teóricos da teoria das variáveis regionalizadas. Atualmente, essa técnica é amplamente utilizada em diversas áreas das ciências da Terra para a análise e modelagem de fenômenos espaciais (Webster; Oliver, 2007). Baseada no princípio da autocorrelação espacial, a geoestatística permite descrever padrões espaciais e estimar valores em locais não amostrados a partir da dependência espacial entre observações, possibilitando a construção de superfícies contínuas e a quantificação das incertezas associadas às estimativas (Wani; Shaista; Wani, 2017).

O semivariograma é uma ferramenta fundamental da geoestatística, utilizada para descrever a dependência espacial dos dados e fornecer parâmetros essenciais para a interpolação espacial. Seu ajuste a modelos teóricos, como os esférico, exponencial e gaussiano, permite caracterizar a estrutura espacial dos fenômenos analisados (Yu; Zhao; Li, 2025; Sobjak et al., 2023). Entre seus principais parâmetros destacam-se o efeito pepita, o patamar e o alcance, que representam, respectivamente, a variabilidade não explicada, a variância máxima e o limite da dependência espacial entre as observações (Cambardella et al., 1994). A partir do semivariograma ajustado, métodos de interpolação como a krigagem podem ser aplicados, gerando estimativas espaciais mais precisas ao incorporar a estrutura de dependência dos dados (Belkhiri; Tiri; Mouni, 2020).

### **3.4 Estratégias para medição do estresse térmico**

A avaliação do estresse térmico em ovinos tem sido realizada por meio de indicadores baseados no animal e no ambiente. Os indicadores fisiológicos e comportamentais refletem diretamente a resposta dos animais às condições térmicas, enquanto os indicadores ambientais, baseados em variáveis meteorológicas, são amplamente utilizados para identificar condições de risco, definir limites críticos de estresse térmico e subsidiar o monitoramento preventivo do ambiente (Castro e Silva, 2021).

A temperatura retal é uma constante fisiológica que funciona como indicador de tolerância ao calor e estado de saúde. Apesar disso, o método tradicional para sua avaliação implica a inserção de um termômetro no reto do animal, sendo uma atividade invasiva, pois requer a contenção firme do animal (Idris et al., 2021; Hussein et al., 2025), o que causa estresse e pode levar à superestimação da temperatura retal, além de difícil aplicação em grandes rebanhos (Godyn et al., 2019). De acordo com Cunningham (2004), a temperatura retal normal

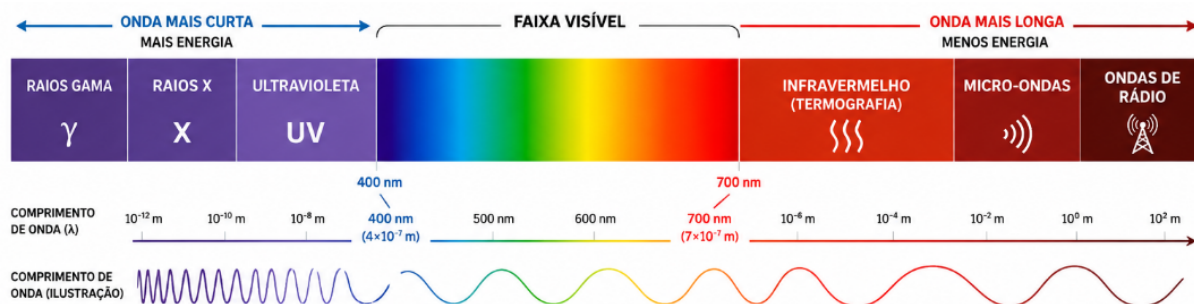
em ovinos varia de 38,5 a 39,9 °C, e vários fatores são capazes de causar variações na temperatura corporal, entre os quais: idade, sexo, estação do ano, período do dia, exercício, ingestão e digestão de alimentos

Em ovinos deslanados criados em regiões tropicais e semiáridas, a temperatura retal tende a se manter dentro dos limites fisiológicos normais para a espécie mesmo sob condições de calor moderado a intenso, graças à ativação de mecanismos compensatórios. Borges et al. (2020) observaram que ovinos da raça Dorper criados no Meio-Norte do Brasil, submetidos a ITGU médio de 86,75 (caracterizado como situação de emergência) mantiveram temperatura retal média de 38,37 °C, dentro dos limites basais para a espécie, enquanto o ajuste térmico ocorreu principalmente pelo aumento das frequências respiratória e cardíaca. De forma complementar, Rodrigues et al. (2024) afirmam que ovinos crioulos das raças Santa Inês, Morada Nova, Soinga e PRSN, avaliados em câmara climática entre 20 e 36 °C, apresentaram temperatura retal variando de 38,50 a 39,23 °C, permanecendo dentro dos limites considerados normais para a espécie mesmo nas temperaturas mais elevadas, o que reforça a capacidade adaptativa dessas raças ao calor.

A frequência respiratória também é amplamente empregada na avaliação do estresse térmico, destacando-se por ser uma medida de fácil obtenção, pouco invasiva e com reduzido potencial de causar estresse adicional aos animais (Hoffmann et al., 2020). Carabaño, Díaz e Ramón (2022) avaliaram a relação entre indicadores produtivos e fisiológicos de tolerância ao calor em 462 ovelhas leiteiras da raça Manchega. Os autores observaram que o aumento da carga térmica promoveu redução na produção e na qualidade do leite, enquanto a frequência respiratória e a temperatura retal aumentaram progressivamente. A temperatura do ar e o ITU registrados no momento da coleta apresentaram melhor capacidade de explicar as respostas dos animais ao estresse térmico do que medidas acumuladas ou médias diárias.

A termografia infravermelha (TRI) é uma ferramenta de medição de temperatura baseada na capacidade de todos os objetos emitirem radiação infravermelha característica em função de sua temperatura (Kastberger e Stachl, 2003). Essa radiação é proporcional à temperatura da superfície do corpo e é avaliada por meio de uma câmera termográfica, que produz imagens com diferentes padrões de cores dependendo da temperatura dos objetos imageados (Bitar et al., 2009; Cruz et. al., 2015). A radiação infravermelha faz parte do espectro eletromagnético e possui comprimento de onda superior ao da luz visível. Por estar associada

à emissão de calor, é amplamente utilizada em termografia para monitoramento térmico sem contato. A Figura 3 ilustra a posição da luz visível e do infravermelho no espectro eletromagnético.



**Figura 3.** Representação do espectro eletromagnético e da região do infravermelho empregada na termografia Fonte: Adaptado pela autora de Castro (2024).

Montanholi et al., (2008) acrescentam que a TRI é uma técnica moderna, não invasiva e segura, utilizada para medir a temperatura da superfície corporal dos animais. A capacidade do termógrafo infravermelho de detectar animais febris com manipulação mínima sugere seu potencial como uma ferramenta útil tanto na medicina veterinária preventiva quanto em modelos experimentais de doenças (Schaefer et al., 2004, Rainwater-Lovett et al., 2009). , Schaefer et al., 2012). Considerando que os animais reagem de forma diferente ao ambiente a que são expostos, essa tecnologia pode auxiliar na identificação de animais e raças de ovinos mais adaptados ao calor sob as mesmas condições de manejo (Cruz et. al., 2015)

Gómez Guzmán et al. (2024), ao avaliarem ovelhas Katahdin em região tropical do México, sem acesso à sombra, observaram que as temperaturas de superfície corporal (especialmente de nariz, cabeça, dorso e ventre) foram significativamente superiores no grupo experimental, refletindo alterações na temperatura central e no fluxo sanguíneo periférico. A temperatura da cabeça apresentou as correlações mais expressivas com os indicadores fisiológicos de estresse térmico, sendo apontada como variável de referência confiável para predição do estado térmico dos animais.

Inô et al. (2024) observaram, a temperatura da região da cabeça, especialmente a área ocular, pode ser utilizada como um indicador confiável de estresse térmico em ovinos, uma vez que apresenta associação direta com alterações fisiológicas. Nesse contexto, os autores

destacam que a termografia infravermelha permite identificar variações na temperatura superficial em diferentes regiões corporais, incluindo os olhos, refletindo mudanças no fluxo sanguíneo decorrentes do aumento da temperatura corporal em condições de estresse ambiental. Inô et al. (2024) afirmam ainda que essas alterações térmicas acompanham respostas fisiológicas clássicas, como o aumento da temperatura retal e modificações hematológicas, evidenciando a eficiência da avaliação da região cefálica como ferramenta não invasiva para monitoramento do bem-estar animal sob estresse térmico.

A termografia infravermelha ocular tem sido amplamente investigada como método não invasivo para o monitoramento fisiológico e avaliação do bem-estar em ruminantes. Minc et al. (2023) observaram elevações significativas nas temperaturas infravermelhas orbital e nasal de vacas leiteiras submetidas a isolamento social, evidenciando que as respostas de hipertermia induzida pelo estresse constituem parte integrante da reação fisiológica a estímulos negativos, e que as regiões ocular e nasal funcionam como janelas térmicas confiáveis para a avaliação do estresse em bovinos.

No contexto do estresse térmico, Idris et al. (2024) verificaram que, em bovinos de corte expostos a altas temperaturas ambientais, o aumento da temperatura ocular correlaciona-se positivamente com indicadores fisiológicos de sobrecarga calórica, como respiração ofegante e elevação da temperatura ruminal, reforçando o potencial diagnóstico dessa região corporal.

McManus et al. (2020), em revisão de escopo sobre o uso da termografia infravermelha na detecção de doenças em animais de produção, destacam que a região ocular figura entre as regiões de interesse (ROIs) mais frequentemente estudadas, sendo amplamente reconhecida como indicador de temperatura central, embora sua acurácia seja influenciada por fatores ambientais, equipamentos e protocolos de captura de imagem.

Os principais resultados do autor Marques et al. (2021) avaliaram a termografia infravermelha como ferramenta não invasiva para estimar a temperatura retal de caprinos mestiços Boer sob diferentes temperaturas do ar (26, 30 e 34 °C). Todas as temperaturas de superfície avaliadas (globo ocular, cabeça, paleta, garupa e IRMax) correlacionaram-se positiva e significativamente com a temperatura retal, destacando-se o globo ocular ( $r = 0,956$ ) e a IRMax ( $r = 0,951$ ). Pela análise de Bland-Altman, PT, HT, ST e HQ apresentaram vieses constantes frente à elevação da temperatura do ar, permitindo estimativa acurada da temperatura

retal ao somar os valores de superfície a seus respectivos vieses, sendo o globo ocular a variável mais indicada, com o menor erro de estimativa ( $\pm 0,27$  °C). Já a IRMax, apesar do menor viés absoluto, mostrou correlação entre erro e média das medidas, tornando-a inadequada para prever a temperatura retal em condições de estresse térmico.

Sob perspectiva reprodutiva, Ozaki et al. (2024) demonstraram que a temperatura da superfície ocular em vacas da raça Japanese Black apresenta variações mensuráveis ao longo do ciclo estral, diminuindo progressivamente do estro até a ovulação, o que sugere seu uso potencial como indicador não invasivo da dinâmica reprodutiva. Por fim, Nurhidayat et al. (2025) concluíram que, entre dez regiões corporais avaliadas por termografia em bovinos de corte sob diferentes condições de estresse ambiental, a região ocular apresentou a correlação mais forte com a temperatura retal e a mais fraca com a temperatura ambiente, indicando que a temperatura ocular pode constituir uma alternativa viável à mensuração retal convencional.

O estudo da autora Mascarenhas et al. (2023) mostra que, a partir da análise de componentes principais das variáveis fisiológicas de ovinos das raças Soinga, Morada Nova e Santa Inês, foi possível resumir essas respostas em um único componente principal, o qual explicou 81,88% da variância total dos dados. A partir desse componente, os autores desenvolveram, por meio de regressão múltipla com variáveis ambientais, o Índice de Estresse Térmico para ovinos (TSI), expresso pela equação  $TSI = 24,153 - (0,0523 \times AT) + (0,746 \times BGT) + (4,104 \times Vp)$ , que apresentou coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,668$ . Os resultados demonstraram que o TSI se correlacionou significativamente ( $P < 0,01$ ) com a temperatura retal e a frequência respiratória dos animais, variáveis consideradas indicadoras primárias do estresse térmico em ovinos, e apresentou alta correlação com os demais índices já consolidados na literatura, o que indicou sua elevada eficiência como preditor da resposta fisiológica dos animais ao ambiente térmico. Com base nas respostas fisiológicas observadas, os autores propuseram quatro faixas de classificação para o TSI: conforto ( $\leq 63$ ), desconforto leve a moderado (63,1 a 66), estresse (66,1 a 69) e alerta ( $\geq 70$ ), sugerindo, ainda, medidas de manejo como sombreamento, ventiladores e aspersores de água para amenizar o desconforto térmico dos animais em condições de TSI elevado.

A frequência cardíaca aumenta em condições de estresse térmico, e isso aumenta o fluxo sanguíneo do centro para a superfície do corpo, dando a oportunidade para que mais calor seja perdido por meios sensíveis (condução, convecção e radiação) e insensíveis (difusão de água

da pele) (Alexiev et al., 2004; Marai et al., 2007; Adedeji, 2012).

Em ovinos, acelerômetros e unidades de medição inercial (IMUs) acoplados a coleiras ou dispositivos vestíveis permitem monitorar posturas e atividades, evidenciando alterações comportamentais associadas ao estresse térmico, como o aumento do tempo em pé (REIS, 2023). Além disso, GPS/GNSS e acelerômetros têm sido utilizados para avaliar deslocamento, uso de sombra, ruminação e outros comportamentos relacionados à adaptação ao calor em ruminantes (Lewis, 2021; Tüfekci, 2023).

Sousa et al. (2025) destacam o uso de geotecnologias livres como ferramentas de apoio ao zoneamento bioclimático e à avaliação das condições ambientais na pecuária. Os autores enfatizam a utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), imagens de satélite, sensoriamento remoto e bases climáticas gratuitas para identificar áreas com diferentes níveis de adequação bioclimática, auxiliando na mensuração do estresse térmico e no planejamento de estratégias de manejo animal. Essas ferramentas permitem integrar variáveis como temperatura, umidade, radiação solar e características do relevo, contribuindo para a tomada de decisões mais precisas e sustentáveis nos sistemas de produção animal

## REFERÊNCIAS

APARECIDO, L. E. D. O. et al. Bioclimatic zoning for dairy cows in Brazil by statistical modeling. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 102, n. 9, p. 3847-3857, 2022.

BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. *Ambiência em edificações rurais: conforto animal*. Viçosa, MG: UFV, 1997.

BALEW, A. et al. Identification of Suitable Land for Livestock Production Using GIS-Based Multicriteria Decision Analysis and Remote Sensing in the Bale Lowlands, Ethiopia. **International Journal of Ecology**, v. 2022, n. 1, p. 9585552, 2022.

BANDEIRA, D. A. et al. Características de produção da caprinocultura leiteira na região do Cariri na Paraíba. *Ciência Veterinária nos Trópicos*, Recife, v. 10, n. 1, p. 29-35, 2007.

BELKHIRI, L. et al. Spatial distribution of the groundwater quality using kriging and Co-kriging interpolations. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 11, p. 100473, 2020.

BERIHULAY, H. et al. Adaptation mechanisms of small ruminants to environmental heat stress. *Animals*, v. 9, n. 3, p. 75, fev. 2019.

BUFFINGTON, D. E. et al. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. 1981.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil science society of America journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. N.; SOUZA, A. G. S. S.; FREITAS, R. M. O. Geoprocessamento aplicado a análise dos aspectos geoambientais do município de Almadina- Bahia. **Revista de Geografia**, v. 41, n. 5, p. 30–49, 23 dez. 2024.

CARABAÑO, M. J.; DÍAZ, C.; RAMÓN, M. Assessing heat tolerance through productive vs physiological indicators: data from dairy sheep under on-farm conditions.



**Animal**, v. 16, n. 12, p. 100662, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100662>

CARVALHO, M. W. L.; CORRÊA, W. C.; TEIXEIRA, M. A. D. C. M.; CORTEZ, C. T., DA SILVA, A. C. Variabilidade pluviométrica e índice de anomalia de chuvas em municípios do Piauí. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 27, p. e71043-e71043, 2023

CASTRO, H de. AEON SECURITY. Câmeras térmicas: o que são, sua importância e como funcionam. 2024. Disponível em: Aeon Security. Acesso em: 17 jun. 2026.

CHAUHAN, S. S. et al. Stress biomarkers and proteomics alteration to thermal stress in ruminants: a review. **Small Ruminant Research**, v. 173, p. 76–83, 2019.

COLLIER, R. J.; RENQUIST, B. J.; XIAO, Y. A 100-Year Review: Stress physiology including heat stress. *Journal of Dairy Science*, v. 100, n. 12, p. 10367–10380, 1 dez. 2017.

CRUZ JÚNIOR, C. A. et al. Laser and thermographic infrared temperatures associated with heat tolerance in adult rams. <sup>1</sup>, v. 132, p. 86–91, 1 nov. 2015

DAHLBERG, K. A. Agriculture, Food Systems, Energy, and Global Change. *Science*, v. 290, n. 5495, p. 1300–1300, 17 nov. 2000.

DE CASTRO JÚNIOR, S. L.; SILVA, I. J. O. D. The specific enthalpy of air as an indicator of heat stress in livestock animals. **International journal of biometeorology**, v. 65, n. 2, p. 149-161, 2021.

DENIS, L. et al. Leveraging Geospatial Technologies for Resource Optimization in Livestock Management. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 12, n. 10, p. 287-307, 2024.

DI LORENZO, A. et al. A web-based geographic information system monitoring wildlife diseases in Abruzzo and Molise regions, Southern Italy. **BMC Veterinary Research**,

v. 19, n. 1, p. 183, 2023.

DIAS-FILHO, M. B.; DIAS FILHO, M. B. Diagnóstico das pastagens no Brasil. 2014.

EMEDIEGWU, L. E.; UBABUKOH, C. L. Re-examining the impact of annual weather fluctuations on global livestock production. **Ecological Economics**, v. 204, p. 107662, 2023.

FARIAS DE OLIVEIRA, G. et al. Bioclimatic livestock zoning of Maranhão State, Brazil. **Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias**, v. 30, n. 4, p. 303–314, 2017.  
doi:10.17533/udea.rccp.v30n4a05.

FERREIRA, N. C. R. et al. Climate change impacts on livestock in Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 68, n. 12, p. 2693-2704, 2024.

FURTADO, D. A. et al. Ambience of sheep submitted to different breeding environments and global temperatures. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 38, n. 6, p. 829-834, nov./dez. 2018.

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

GODYŃ, D.; HERBUT, P.; ANGREGKA, S. Measurements of peripheral and deep body temperature in cattle—A review. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, p. 42-49, 2019.

GÓMEZ GUZMÁN, J. A. et al. Physiological response of Katahdin ewes to the absence of shadows in tropical region of Mexico, **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v. 12, n. 1, 2024.

GONZALEZ-RIVAS, P. A. et al. Effects of heat stress on animal physiology, metabolism, and meat quality: a review. **Meat Science**, v. 162, p. 108025, 2020.

HABEEB, A. A. et al. The detrimental impact of high environmental temperature on physiological response, growth, milk production, and reproductive efficiency of ruminants. **Tropical Animal Health and Production**, v. 55, n. 6, p. 388, dez. 2023

HOFFMANN, G. et al. Animal-related, non-invasive indicators for determining heat stress in dairy cows. **Biosystems Engineering**, 1 nov. 2020.

INÔ, C. F. A. et al. Termorregulação em ovinos, gradientes térmicos e termografia. **Revista Coopex.**, v. 15, n. 3, p. 5943–5959, 7 ago. 2024.

JACOBSON, C. et al. A review of dystocia in sheep. **Small Ruminant Research**, 1 nov. 2020.

JOY, A. et al. Resilience of small ruminants to climate change and increased environmental temperature: a review. **Animals**, v. 10, n. 5, p. 867, 2020.

KIM, S. H. et al. Heat stress: effects on rumen microbes and host physiology, and strategies to alleviate the negative impacts on lactating dairy cows. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, art. 804562, 2022. doi:10.3389/fmicb.2022.804562.

LATAWIEC, A. E. et al. Improving land management in Brazil: A perspective from producers. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 240, p. 276-286, 2017.

LEWIS BAIDA, B. E. et al. Technologies for the automated collection of heat stress data in sheep, **Animal Biotelemetry**, v. 9, n. 1, 2021.

LIMA, Gustavo Pereira; PEIXOTO NETO, Carlos Alberto Algarves; AMARAL, Yuri Teixeira; SIQUEIRA, Glécio Machado. Biogeographical characterization of the Maranhense Eastern Mesoregion (Brazil). *Journal of Geospatial Modelling*, v. 1, n. 1, p. 1–12, 2016.

LOZANO-JARAMILLO, M. et al. Use of geographic information system tools to predict animal breed suitability for different agro-ecological zones. **Animal**, v. 13, n. 7, p. 1536-1543, 2019.

MAIA, A. S. C. et al. Thermoregulatory responses of goats in hot environments. **International Journal of Biometeorology**, v. 59, p. 1025–1033, 2015.

MALDONADO-JÁQUEZ, J. A. et al. Adaptation to Stressful Environments in Sheep and Goats: Key Strategies to Provide Food Security to Vulnerable Communities. **Ruminants**.

1 dez. 2025.

MARAI, I. F. M. et al. Physiological traits as affected by heat stress in sheep: a review. **Small Ruminant Research**, v. 71, p. 1–12, 2007.

MARINHO, G. T. B. et al. Bioclimatic zoning for sheep breeds in Pernambuco State, Brazil. **Animals**, v. 13, n. 7, p. 1124, 2023.

MARQUES, J. I.; et al. Estimation of rectal temperature of goats based on surface temperature. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 41, n. 6, p. 591-598, nov./dez. 2021

MARTHA JR., G. B. et al. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. **Agricultural Systems**, v. 110, p. 173-177, 2012.

MARTINS, J. C.; OTTATI, A. M. A. dos Anjos. Análise da pecuária maranhense entre os anos de 1974 e 2017. In: EDITORA POISSON (org.). Tópicos em Ciências Agrárias. Belo Horizonte: Poisson, 2020. v. 5, p. 109-122.

MASCARENHAS, N. M. H. et al. Thermal stress index for native sheep. **Journal of Thermal Biology**, v. 115, jul. 2023

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, n. 8, p. 1246–1266, 1963.

MCMANUS, C. M. et al. Heat stress effects on sheep: are hair sheep more heat resistant? **Theriogenology**, out. 2020.

MITCHELL, D. et al. Revisiting concepts of thermal physiology: understanding negative feedback and set-point in mammals, birds, and lizards. **Biological Reviews**, v. 100, p. 1317–1346, 2025. doi:10.1111/brv.70002.

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

NONG, D. H. et al. A systematic review of GIS-based and AHP approaches for

identifying suitable locations for livestock farms. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2024. p. 012003.

NUNES DE SOUSA, M. et al. Ingestive behaviour, physiological parameters and carcase traits of lambs fed diets containing greasy babassu by-product. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 68, n. 2, p. 273–284, abr. 2025.

NURHIDAYAT, I. et al. Infrared Thermography for Non-invasive Temperature Monitoring in Smallholder Beef Farm. **BIO Web Conf.** In:2, 4 abr. 2025.

OZAKI, R.; KOIKE, K. et al. Capturing temperature changes on the ocular surface along with estrus and ovulation using infrared thermography in Japanese Black cows. **Journal of Reproduction and Development**, v. 65, n. 6, p. 515–521, 2019.

RANA, M. M. S. P.; MONIRUZZAMAN, M. Potential application of GIS and remote sensing to evaluate suitable site for livestock production in Northwestern part of Bangladesh. **Watershed Ecology and the Environment**, v. 5, p. 161–172, 2023.

RODRIGUES, R. C. M. et al. Thermoneutral temperature and thermal stress of sheep creole: physiological and ingestive behaviour. **Journal of Applied Animal Research**, v. 52, n. 1, 2024.

RUFINO, Daniele Costa; BARBOZA, Izabela da Rocha; RUBIM, Paulo Ricardo dos Santos; FEITOSA, Antonio Cordeiro. Reflections on the semi-arid climate in the state of Maranhão. *International Journal Semiarid*, v. 7, n. 7, 2024. DOI: <https://doi.org/10.56346/ijsa.v7i7.205>.

SCOLARO, T. P. et al. Assessing thermal comfort in naturally ventilated residential buildings under current and projected regional climates in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 349, p. 116566, dez. 2025.

SEJIAN, V. et al. Non-Invasive Methods of Quantifying Heat Stress Response in Farm Animals with Special Reference to Dairy Cattle. **Atmosphere**, 1 out. 2022.

SEJIAN, V. et al. *Sheep Production Adapting to Climate Change*. Singapore: Springer

Singapore, 2017.

SEVI, A.; CAROPRESE, M. Impact of heat stress on milk production, immunity and udder health in sheep: A critical review. **Small Ruminant Research**, set. 2012.

SILANIKOVE, N. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. **Livestock Production Science**, v. 67, n. 1–2, p. 1–18, 2000. doi:10.1016/S0301-6226(00)00162-7.

SILVA, R. G.; MAIA, A. S. C. **Principles of Animal Biometeorology**. 1. ed. Dordrecht: Springer, 2013. ISBN 978-94-007-5733-2.

SILVA, V. C. et al. Bioclimatic zoning for quails in the rain season in the state of Paraíba, Brazil. **Bioscience Journal**, v. 39, e39057, 2023.

SOBJAK, R. et al. Process improvement of selecting the best interpolator and its parameters to create thematic maps. **Precision Agriculture**, v. 24, n. 4, p. 1461–1496, 2023.

SOUSA, A. C. de. et al. **Geotecnologias livres para zoneamentos bioclimáticos**. In: ZANINE, Anderson de Moura et al. (org.). Anais da III Mostra de Difusão Tecnológica do Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal – PPGCA: contribuições do PPGCA para difusão tecnológica do Baixo Parnaíba Brasileiro. Chapadinha: PPGCA/UFMA, 2025. p. 242–259. DOI: <https://doi.org/10.29327/5718357.3-13>

SOUSA, A. C. et al. Bioclimatic Zoning and Climate Change Impacts on Dairy Cattle in Maranhão, Brazil. **Animals**, v. 15, n. 11, 1 jun. 2025.

TEIXEIRA, W. C. et al. Perfil zoonosológico dos rebanhos caprinos e ovinos em três mesorregiões do Estado do Maranhão, Brasil. *Acta Veterinaria Brasilica*, Mossoró, v. 9, n. 1, p. 34-42, 2015.

THEUSME, C. et al. Climate change vulnerability of confined livestock systems predicted using bioclimatic indexes in an arid region of México. **Science of the Total Environment**, v. 751, 10 jan. 2021.

- THOM, E. C. The discomfort index. **Weatherwise**, v. 12, n. 2, p. 57–61, abr. 1959.
- TÜFEKCI, H.; SEJIAN, V. Stress Factors and Their Effects on Productivity in Sheep, **Animals**, v. 13, n. 17, 2023.
- VINOGRADOVA, V. V.; TITKOVA, T. B. Bioclimatic zoning of Russia using the Universal Thermal Climate Index in present and future climates. **Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics**, v. 61, n. S1, p. S1–S9, dez. 2025.
- WANG, J. et al. Heat stress on calves and heifers: a review. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, v. 11, n. 79, 2020.
- WANI, M. A. et al. Spatial variability of some chemical and physical soil properties in Bandipora District of Lesser Himalayas. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 45, n. 4, p. 611–620, 2017.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. [s.l.]: Wiley, 2007.
- YU, S.; ZHAO, L.; LI, S. Leveraging deep learning for automated experimental semivariogram fitting. **Atmosphere**, v. 16, n. 2, p. 191, fev. 2025.
- ZAIDAN, R. T. Geoprocessamento: conceitos e definições. **Revista de Geografia – PPGeo – UFJF**, v. 7, n. 2, 2017
- ZILLI, M. et al. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 740, 20 out. 2020.

## **CAPÍTULO II**

### **ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO PARA OVINOCULTURA VIA MODELAGEM GEOESTATÍSTICA PARA O ESTADO DO MARANHÃO, BRASIL.**



## RESUMO

O objetivo com este estudo foi realizar o zoneamento bioclimático para a ovinocultura no estado do Maranhão, Brasil, mediante o cálculo mensal do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e do Índice de Temperatura do Globo Negro e Umidade (ITGU), utilizando modelagem geoestatística via krigagem ordinária. Foram utilizados dados meteorológicos mensais (2014–2024) de temperatura do ar, velocidade do vento e pressão de vapor, obtidos na plataforma TerraClimate, a partir dos quais o ITU e o ITGU foram calculados e classificados conforme os limiares críticos das principais raças ovinas criadas no estado (Santa Inês, Dorper, Morada Nova e Somali). Estimou-se também a Redução do Consumo Alimentar (RCA) associada ao estresse térmico. A análise geoestatística incluiu ajuste de semivariogramas, validação cruzada dos modelos esférico, exponencial e gaussiano, e elaboração de mapas temáticos no ArcGIS Pro. Os resultados evidenciaram sazonalidade térmica bem definida, com condições mais amenas no primeiro semestre e intensificação do risco de estresse térmico no segundo semestre, sobretudo entre agosto e novembro. As mesorregiões Norte e Leste apresentaram os maiores valores de ITU e ITGU, com predomínio das classes de alerta e perigo, e ocorrência de emergência térmica entre setembro e novembro, enquanto a mesorregião Sul destacou-se com a melhor aptidão bioclimática relativa. A RCA atingiu valores superiores a  $4 \text{ kg animal}^{-1} \text{ d}^{-1}$  nas mesorregiões Central e Leste em outubro. Em conclusão, o Maranhão possui condições bioclimáticas de suscetibilidade ao estresse térmico para criação de ovinos, com variabilidade espaço-temporal marcada no eixo leste-oeste, e entre os meses do ano, o que reforça a necessidade de estratégias de manejo e adaptação diferenciadas por mesorregião.

**Palavras-chave:** Bem-estar animal; Geoestatística; Índice de Temperatura e Umidade; Mudanças climáticas; Ovinos.

## ABSTRACT

This study aimed to perform bioclimatic zoning for sheep farming in the state of Maranhão, Brazil, by calculating the monthly Temperature and Humidity Index (THI) and Black Globe Temperature and Humidity Index (BGTHI) through geostatistical modeling using ordinary kriging. Monthly meteorological data (2014–2024) on air temperature, wind speed, and vapor pressure were obtained from the TerraClimate platform and used to calculate THI and BGTHI, which were classified according to the critical thresholds of the main sheep breeds raised in the state (Santa Inês, Dorper, Morada Nova, and Somali). Feed Intake Reduction (FIR) associated with heat stress was also estimated. The geostatistical analysis included semivariogram fitting, cross-validation of spherical, exponential, and Gaussian models, and the production of thematic maps in ArcGIS Pro. The results revealed well-defined thermal seasonality, with milder conditions in the first semester and intensified heat stress risk in the second semester, particularly between August and November. The northern and eastern mesoregions showed the highest THI and BGTHI values, predominantly in the alert and danger classes, with thermal emergency occurring between September and November, while the southern mesoregion stood out for its relatively better bioclimatic suitability. FIR exceeded  $4 \text{ kg animal}^{-1} \text{ day}^{-1}$  in the central and eastern mesoregions in October. In conclusion, Maranhão has bioclimatic conditions that make sheep farming susceptible to thermal stress, with marked spatio-temporal variability along the east-west axis and between months of the year, which reinforces the need for differentiated management and adaptation strategies by mesoregion.

**Keywords:** Animal welfare; Geostatistics; Temperature-Humidity Index; Climate change; Sheep.

## 1. INTRODUÇÃO

A ovinocultura representa uma atividade pecuária de expressiva relevância socioeconômica no estado do Maranhão, especialmente para a agricultura familiar, constituindo uma importante fonte de proteína animal e renda para pequenos produtores rurais (Farias Machado et al., 2020). O rebanho ovino maranhense insere-se em um contexto regional mais amplo, no qual o Nordeste brasileiro concentra cerca de 73% do efetivo nacional, com 16,6 milhões de cabeças (IBGE, 2024), evidenciando a tradição e a adaptação histórica dessa espécie às condições semiáridas e tropicais do país. No Maranhão, a criação de ovinos está amplamente distribuída entre os diferentes biomas do estado (Cerrado, Caatinga e Amazônia), o que torna a atividade ainda mais dependente de estratégias que considerem as distintas condições climáticas regionais.

As condições climáticas do estado, caracterizadas por elevadas temperaturas, alta umidade relativa do ar e intensa radiação solar, impõem desafios crescentes à manutenção do conforto térmico dos rebanhos ovinos, comprometendo o desempenho produtivo e reprodutivo dos animais. O Maranhão apresenta uma diversidade de tipos climáticos, com predomínio dos climas Am (equatorial de monção), Aw (tropical com chuvas de verão) e As (tropical com estação seca no verão), segundo a classificação de Köppen-Geiger (Aparecido et al., 2023), o que resulta em variabilidade espaço-temporal dos elementos meteorológicos e na necessidade de abordagens regionalizadas para o diagnóstico do risco térmico.

O estresse térmico em ovinos desencadeia respostas fisiológicas e comportamentais que resultam em redução do consumo de matéria seca, queda no ganho de peso, declínio nas taxas reprodutivas e aumento da suscetibilidade a doenças (Mascarenhas et al., 2023). Em termos fisiológicos, os animais sob estresse térmico aumentam a frequência respiratória e a temperatura retal, ativam mecanismos evaporativos e reduzem a atividade metabólica como estratégia de dissipação de calor, o que afeta diretamente a eficiência dos processos anabólicos e a produção animal (Dos Santos et al., 2021a). Esses efeitos são particularmente preocupantes em sistemas extensivos de criação, modalidade predominante no Maranhão (Farias Machado et al., 2020), nos quais os animais permanecem expostos diretamente à radiação solar e às variações climáticas ao longo do dia, sem acesso regular a recursos de sombreamento artificial ou ventilação forçada.

A intensificação das mudanças climáticas projeta um cenário ainda mais crítico para as próximas décadas (Sousa et al., 2025a), com projeções de aumento da temperatura média do ar, alterações nos padrões de precipitação e elevação da frequência de eventos climáticos extremos. Nesse contexto, as regiões tropicais, como o Maranhão, tendem a ser afetadas de forma

desproporcional, com ampliação dos períodos e das áreas sujeitas a condições de alerta e perigo para a produção animal. A antecipação desses cenários por meio de ferramentas de diagnóstico e monitoramento torna-se, portanto, indispensável para a formulação de estratégias de adaptação nos sistemas de criação de ovinos.

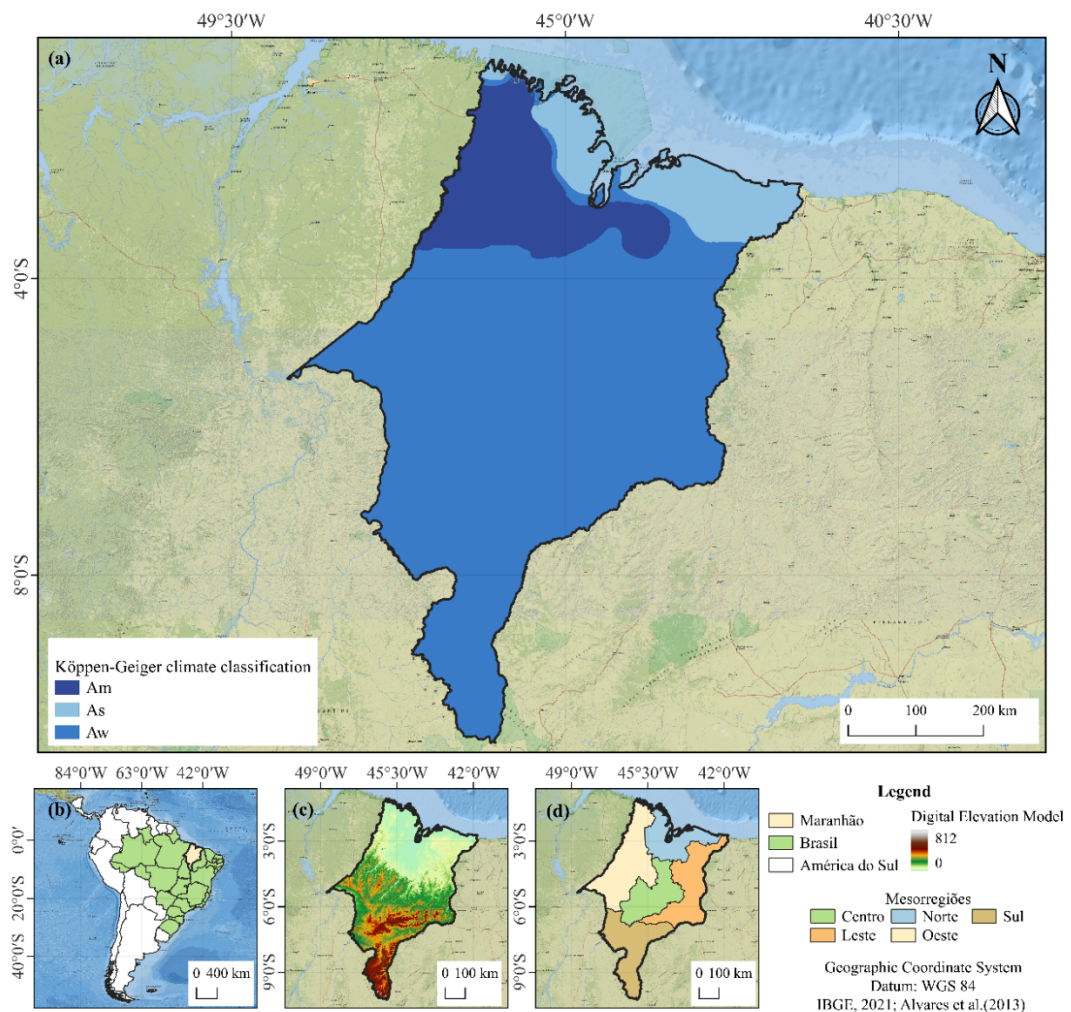
Os índices bioclimáticos, como o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e o Índice de Temperatura do Globo Negro e Umidade (ITGU), constituem instrumentos amplamente utilizados para a avaliação do conforto térmico em ruminantes, por integrarem variáveis meteorológicas diretamente relacionadas à carga térmica ambiental (De Castro Júnior; Silva, 2021). A associação desses índices às técnicas de geoestatística, por meio da krigagem ordinária e da elaboração de mapas temáticos, permite a caracterização espacialmente explícita da variabilidade térmica em escala regional, possibilitando a identificação de mesorregiões e períodos de maior vulnerabilidade climática para a ovinocultura (Marinho et al., 2023). Essa abordagem tem sido empregada com sucesso em estudos de zoneamento bioclimático para diferentes espécies e regiões do Brasil, demonstrando seu potencial como ferramenta de suporte ao planejamento territorial e à formulação de estratégias de adaptação nos sistemas de produção animal (Silva et al., 2022; Sousa et al., 2025).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi realizar o zoneamento bioclimático para a ovinocultura no estado do Maranhão, por meio do cálculo mensal do ITU e do ITGU, usando modelagem geoestatística via krigagem ordinária e da elaboração de mapas temáticos de distribuição espaço-temporal do risco de estresse térmico, considerando os limiares críticos das principais raças ovinas criadas no estado.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de Estudo

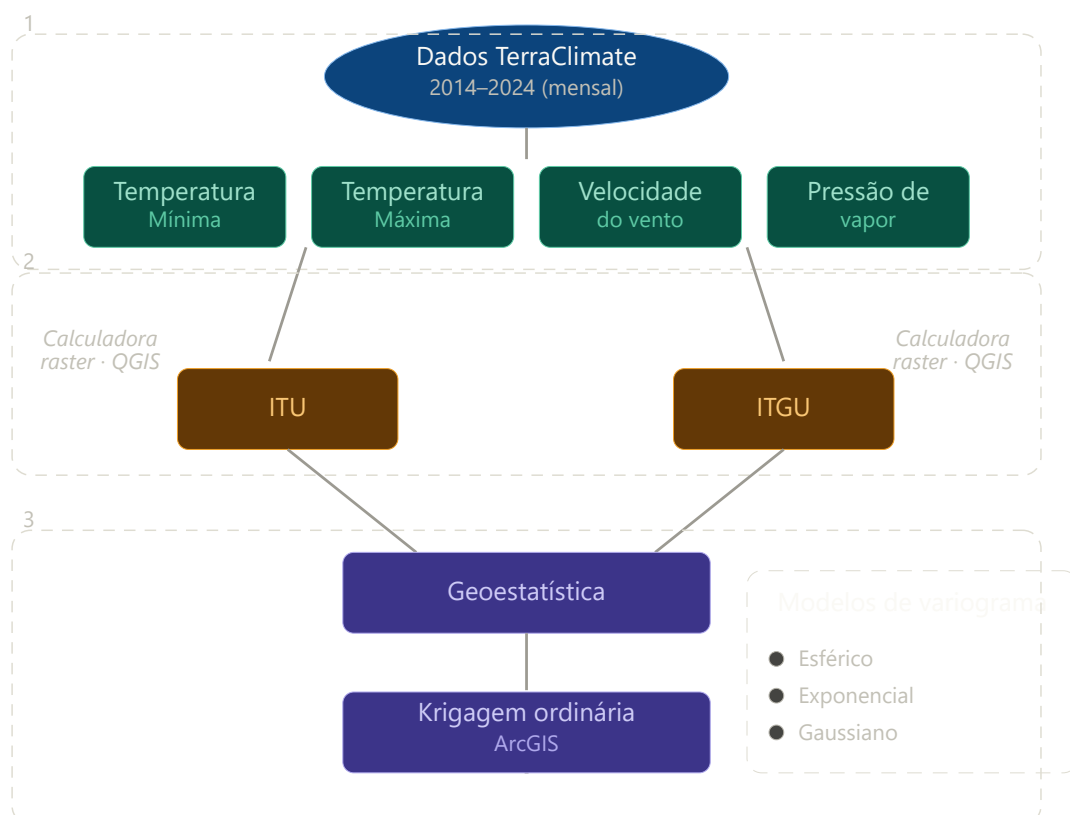
O estado do Maranhão (MA), área de estudo do presente trabalho, está situado na região Nordeste do Brasil, com extensão territorial de 331.936,949 km<sup>2</sup>, em zona de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado (Figura 4). O MA é dividido geograficamente pelo IBGE em cinco Mesorregiões Geográficas, a saber: Norte Maranhense, Oeste Maranhense, Centro Maranhense, Leste Maranhense e Sul Maranhense (IBGE, 2023). Conforme a classificação de Köppen-Geiger, o estado apresenta climas tropical com chuvas de verão (Aw), de monção (As) e equatorial (Am), com precipitação média anual de 1.630 mm e temperatura média de 27 °C (Alvares et al., 2013; Beck et al., 2023; Aparecido et al., 2023).



**Figura 4.** Área de estudo: classificação climática de Köppen-Geiger (a), localização geográfica no território brasileiro (b), modelo digital de elevação (c) e mesorregiões do Estado do Maranhão (d). Fonte: Autora

## 2.2. Aquisição e processamento do banco de dados

O fluxograma metodológico adotado neste estudo está apresentado na Figura 5. O banco de dados foi obtido na plataforma TerraClimate, um banco de dados de acesso público disponível em <https://www.climateengine.org/> (acesso em: 04 ago. 2025). Foram extraídas as variáveis temperatura mínima ( $T_{min}$ , °C), temperatura máxima ( $T_{max}$ , °C), velocidade do vento ( $V_v$ ,  $m\ s^{-1}$ ) e pressão de vapor ( $P_v$ , kPa), referentes à série histórica mensal compreendida entre 2014 e 2024. Todas as variáveis possuíam resolução espacial de 4 km ( $1/24^\circ$ ). Dessa forma, a malha amostral resultante foi composta por 20.746 pontos georreferenciados por variável, distribuídos ao longo da área de estudo. A seleção do TerraClimate justifica-se pela sua ampla cobertura espacial e pela disponibilidade de séries temporais consistentes para o estado do Maranhão. Ademais, sua adoção torna-se especialmente pertinente diante da insuficiência da rede de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no estado, cuja distribuição espacial irregular limita a representatividade dos dados observacionais convencionais e comprometeria a caracterização climática espacialmente abrangente requerida pela pesquisa.



**Figura 5.** Fluxograma metodológico: obtenção do banco de dados (1), processamento dos dados e cálculo do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e do Índice de Temperatura do Globo Negro e Umidade (ITGU) (2) e geração dos mapas por modelagem geoestatística via krigagem ordinária (3). Fonte: Autora

A partir dos dados de Tmin e Tmax, calculou-se a temperatura média do ar para região do estudo (TA, °C) para cada mês da série histórica. Posteriormente, calculou-se o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) mensal conforme a equação 1 (Silva et al., 2020). No entanto, o ITU apresenta limitações para a avaliação do conforto térmico de ovinos mantidos em sistema extensivo, modalidade predominante no estado do Maranhão. Isso acontece, pois, esse índice não incorpora o efeito da radiação solar direta, à qual esses animais estão continuamente expostos ao longo do dia. Por essa razão, calculou-se o Índice de Temperatura do Globo Negro e Umidade (ITGU), conforme a equação 2, adaptada da formulação originalmente proposta por

Buffington et al., (1981). Essa adaptação tornou-se necessária em razão da indisponibilidade, na plataforma TerraClimate, das variáveis convencionalmente utilizadas no cálculo do ITGU, a saber: a Temperatura do Globo Negro (TGN, °C) e a Temperatura do Ponto de Orvalho (Tpo °C). Para contornar essa limitação, a TGN foi estimada a partir da temperatura média do ar obtida na mesma plataforma, em condições de ambiente externo, conforme equação proposta por Abreu et al. (2011). A Tpo, por sua vez, foi derivada a partir dos dados de pressão de vapor, igualmente extraídos do TerraClimate, seguindo a metodologia de Allen et al. (1998). Como indicador complementar do impacto do estresse térmico sobre a produção ovina, estimou-se a Redução do Consumo Alimentar (RCA) por meio da equação 3, proposta por Silva et al. (2010), com o objetivo de quantificar os efeitos da carga térmica ambiental sobre o consumo de matéria seca dos animais. Mapas temáticos foram elaborados do software QGIS 3.22.6

$$ITU = (6,3952 + 0,08964 \times TA + 0,01018 \times Vv)^2 \quad (1)$$

$$ITGU = -0,9387 + 0,852 TA + 0,0162(TA)^2 + 0,36 \left( \frac{116,91 + 237,3 \ln(Vp)}{16,78 - \ln(Vp) + 41,5} \right)^3 \quad (2)$$

$$RCA = 28,23 + 0,391 \times ITU \quad (3)$$

Em que: ITU é o Índice de Temperatura e Umidade (adimensional); TA é a temperatura média do ar (°C); VV é a velocidade do vento (m·s<sup>-1</sup>); ITGU é o Índice de Temperatura do Globo Negro e Umidade (adimensional); Pv (kPa) é a pressão de vapor, e RCA é a Redução do Consumo Alimentar (kg·animal<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)

Para a avaliação do conforto térmico de ovinos no estado do Maranhão, os valores mensais do ITU foram categorizados com base no *Livestock Weather Safety Index* (LWSI), nas seguintes classes: normal (ITU ≤ 74), alerta (75 ≤ ITU ≤ 78), perigo (79 ≤ ITU ≤ 83) e emergência (ITU ≥ 84). Adicionalmente, foram adotados valores de limiar crítico de estresse térmico com base no ITU para as principais raças ovinas do rebanho maranhense, conforme apresentado no Quadro 1. Os valores do ITGU foram categorizados segundo os critérios do



*National Weather Service* (NWS) os Estados Unidos, nas seguintes classes: conforto térmico ( $ITGU \leq 74$ ), alerta ( $74 < ITGU \leq 78$ ), condição crítica ( $79 \leq ITGU \leq 84$ ) e emergência térmica ( $ITGU > 84$ ).

**Quadro 1.** Valor crítico do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) para as principais raças de ovinos criadas no Maranhão.

| Raça        | ITU   |
|-------------|-------|
| Santa Inês  | 78,27 |
| Dorper      | 78,26 |
| Morada Nova | 80,81 |
| Somali      | 80,64 |

Fonte: McManus et al. (2014).

### 2.3 Análise de Dados

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, com obtenção de medidas de tendência central e dispersão, incluindo média, valores mínimo e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV, %), calculados a partir dos valores mensais ao longo da série histórica analisada. O CV foi classificado em baixo ( $CV < 12\%$ ), médio ( $12\% \leq CV \leq 24\%$ ) e alto ( $CV > 24\%$ ), conforme Warrick e Nielsen (1980). A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, adotando-se nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ). Técnicas de geoestatística foram aplicadas para exploração da variabilidade espacial dos dados, permitindo a gerando mapas temáticos usando krigagem ordinária (Equação 4). As análises geoestatísticas foram realizadas no software ArcGIS Pro versão 3.4 do *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), no qual a dependência espacial foi caracterizada a partir do semivariograma experimental (Equação 5).

$$\bar{Z}(x_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (4)$$

Onde:  $\bar{Z}(x_o)$  é o valor estimado (interpolado) na posição  $x_o$ ;  $\lambda_i$  é o peso atribuído ao valor amostrado  $Z(x_i)$  na posição  $x_i$ ;  $Z(x_i)$  é o valor amostrado no ponto  $x_i$ ;  $n$  é o número de

pontos amostrais usados para interpolação do ponto; e a soma dos pesos  $\lambda_i$  deve ser igual a 1.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (5)$$

Onde:  $\gamma(h)$  é o estimador de semivariância experimental, obtido pelos valores amostrados  $Z(X_i)$ ,  $Z(X_i + h)$ ;  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos separados pelo vetor ou distância de defasagem;  $h$  é a distância entre pares de amostras; e  $Z(X_i)$  e  $Z(X_i + h)$  são os valores da  $i$ -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos  $X_i$  e  $X_i + h$  ( $i = 1, \dots, n$ ), separados pelo vetor  $h$ .

O grau de dependência espacial (GDE) foi classificado neste estudo como forte quando inferior a 25%, moderado entre 25% e 75%, e fraco quando superior a 75% (Cambardella et al., 1994). Os três modelos de variogramas (esférico, exponencial e gaussiano) foram ajustados ao semivariograma experimental, conforme as equações (6), (7) e (8), respectivamente.

Modelo esférico

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], \text{ for } 0 \leq h \leq a \quad C_0 + C, \text{ for } h > a \quad (6)$$

Modelo Exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right] \quad (7)$$

Modelo Gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right) \right] \quad (8)$$

Onde  $\gamma(h)$  é o estimador da semivariância experimental;  $C_0 + C$  é o sill;  $C_0$  é o efeito

pepita; C é a dispersão da variância; h é a distância entre os pares de amostras; e a é o alcance (m).

O desempenho e a precisão dos modelos foram avaliados por meio de validação cruzada, comparando as previsões com os dados medidos. Para isso, foram empregados cinco métricas estatísticas: erro médio (ME), erro quadrático médio (MSE), erro padronizado médio (ASE), erro quadrático médio (RMSE) e erro quadrático médio padronizado (RMSSE), conforme as equações 9, 10, 11, 12 e 13, respectivamente.

$$\mathbf{ME} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)] \quad (9)$$

$$\mathbf{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)}{\sigma_1} \right)^2 \quad (10)$$

$$\mathbf{ASE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_1)} \quad (11)$$

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)]^2} \quad (12)$$

$$\mathbf{RMSSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)}{\sigma_1} \right\}^2} \quad (13)$$

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estatísticas descritivas dos valores mensais do ITU (2014–2024) permitem identificar os padrões de sazonalidade e os meses críticos de estresse térmico ao longo do ano. Os principais resultados indicam que, embora o ITU tenha se mantido relativamente estável ao longo do ano, com baixa dispersão dos dados, evidenciada pelos coeficientes de variação inferiores a 2,4%, houve uma nítida diferenciação sazonal entre o primeiro e o segundo semestre, com condições mais amenas no início do ano e agravamento progressivo das

condições térmicas a partir do segundo semestre, culminando em valores máximos que caracterizam situações de “emergência” de estresse térmico. A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas dos valores mensais do ITU para os anos de 2014 a 2024. De modo geral, observa-se uma variação sazonal bem definida ao longo do ano, com valores médios mensais do ITU oscilando de  $76,446 \pm 1,692$  (julho) a  $80,827 \pm 1,509$  (outubro). Os coeficientes de variação (CV) permaneceram baixos, entre 1,32% e 2,33% indicando baixa dispersão dos dados e um padrão térmico relativamente homogêneo nesse período. Durante os meses do 1º semestre (janeiro a junho), os valores médios do ITU variaram entre  $76,528 \pm 1,785$  (junho) e  $77,283 \pm 1,394$  (maio), caracterizando um período relativamente mais ameno. Em contraste, no 2º semestre (julho a dezembro) observa-se a intensificação das condições térmicas adversas, com valores registrados de  $76,446 \pm 1,692$  (julho) e  $80,827 \pm 1,509$  (outubro). Os valores de temperatura máxima atingindo 84,669 em outubro, caracterizando condições de emergência de estresse térmico ( $ITU \geq 84$ ) segundo o LWSI. Informações a temperatura média do ar e velocidade do vento podem ser encontradas no Apêndice 1 e 2 desta dissertação.

**Tabela 1.** Resumo das estatísticas descritivas para os valores mensais do ITU

| Mês       | Média  | Min <sup>1</sup> | Max <sup>2</sup> | DP <sup>3</sup> | CV (%) <sup>4</sup> |
|-----------|--------|------------------|------------------|-----------------|---------------------|
| Janeiro   | 77,130 | 72,884           | 80,379           | 1,449           | 1,87865             |
| Fevereiro | 76,726 | 72,651           | 79,725           | 1,202           | 1,56661             |
| Março     | 76,584 | 72,571           | 79,222           | 1,119           | 1,46114             |
| Abril     | 77,016 | 73,049           | 79,331           | 1,018           | 1,32180             |
| Maio      | 77,283 | 72,090           | 80,525           | 1,394           | 1,80376             |
| Junho     | 76,528 | 70,154           | 80,264           | 1,785           | 2,33248             |
| Julho     | 76,446 | 69,677           | 79,901           | 1,692           | 2,21333             |
| Agosto    | 77,821 | 71,758           | 81,015           | 1,233           | 1,58441             |
| Setembro  | 79,783 | 75,104           | 83,282           | 1,364           | 1,70964             |
| Outubro   | 80,827 | 76,972           | 84,669           | 1,509           | 1,86695             |
| Novembro  | 79,723 | 74,407           | 83,600           | 1,684           | 2,11231             |
| Dezembro  | 78,812 | 74,179           | 82,418           | 1,632           | 2,07075             |

<sup>1</sup>Mínimo. <sup>2</sup> Máximo. <sup>3</sup> Desvio padrão. <sup>4</sup> Coeficiente de variação.

A fim de selecionar o modelo geoestatístico mais adequado para a espacialização dos valores mensais do ITU, foi realizada a validação cruzada dos semivariogramas ajustados pelos modelos esférico, gaussiano e exponencial, com base nas métricas RMSE (erro quadrático médio), ASE (erro padrão médio) e RMSSE (erro quadrático médio padronizado). Essa etapa é fundamental para garantir a confiabilidade das estimativas antes da geração dos mapas de

krigagem. De modo geral, os resultados mostraram desempenho satisfatório do modelo esférico frente aos demais, sendo este o critério determinante para a escolha do método de interpolação utilizado no estudo. A Tabela 2 apresenta os resultados da validação cruzada dos modelos geoestatísticos aplicados aos valores de ITU mensais. Entre os modelos testados, o esférico mostrou o melhor desempenho, com valores de RMSSE entre 0,70 e 0,95 indicando boa precisão e ajuste adequado entre valores observados e estimados. Além disso, apresentou maior proximidade entre RMSE e ASE. O modelo gaussiano apresentou subestimação, refletida nos menores valores de RMSSE (0,48–0,65) e na maior discrepância entre RMSE e ASE. O modelo exponencial apresentou desempenho intermediário, com RMSSE (0,51–0,98) e algumas divergências entre RMSE e ASE, indicando menor estabilidade. Diante desses resultados, o modelo esférico foi considerado o mais adequado e, portanto, adotado para a geração dos mapas mensais de krigagem do ITU.

**Tabela 2.** Validação cruzada dos modelos geoestatísticos testados para valores mensais de ITU

| Esférico  |                 |                   |                  |                    |                  |
|-----------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Mês       | ME <sup>1</sup> | RMSE <sup>2</sup> | MSE <sup>3</sup> | RMSSE <sup>4</sup> | ASE <sup>5</sup> |
| Janeiro   | -0,000211295    | 0,1339691         | 0,01794772       | 0,8078833          | 0,1657624        |
| Fevereiro | -7,88972E-05    | 0,1452507         | 0,021097766      | 0,7436887          | 0,1951458        |
| Março     | -0,000245078    | 0,1349133         | 0,018201599      | 0,9519450          | 0,1416640        |
| Abril     | -3,48306E-05    | 0,1475367         | 0,021767078      | 0,7390450          | 0,1994642        |
| Maio      | -0,000343657    | 0,1275747         | 0,016275304      | 0,8509448          | 0,1499527        |
| Junho     | -0,000334198    | 0,1244638         | 0,015491238      | 0,7037688          | 0,1768717        |
| Julho     | -0,000353713    | 0,1244513         | 0,015488126      | 0,7287009          | 0,1707926        |
| Agosto    | -0,000319505    | 0,1277629         | 0,016323359      | 0,8729135          | 0,1463719        |
| Setembro  | -0,000308024    | 0,1326629         | 0,017599445      | 0,7463756          | 0,1777717        |
| Outubro   | -0,000282485    | 0,1344963         | 0,018089255      | 0,7140915          | 0,1883926        |
| Novembro  | -0,000298112    | 0,1336176         | 0,017853663      | 0,7178924          | 0,1861508        |
| Dezembro  | -0,000303301    | 0,1301789         | 0,016946546      | 0,7545628          | 0,1725332        |
| Gaussiano |                 |                   |                  |                    |                  |
| Mês       | ME              | RMSE              | MSE              | RMSSE              | ASE              |
| Janeiro   | 0,000148313     | 0,2022866         | 0,042364425      | 0,6011483          | 0,3421903        |
| Fevereiro | -0,000520663    | 0,2022866         | 0,040661472      | 0,5871043          | 0,3432071        |
| Março     | 0,000116203     | 0,2022866         | 0,043577523      | 0,617504           | 0,3378633        |
| Abril     | -0,001196618    | 0,2022866         | 0,042442057      | 0,5089642          | 0,4045398        |
| Maio      | -0,000666798    | 0,2022866         | 0,039020985      | 0,4967313          | 0,3974502        |
| Junho     | -0,001102689    | 0,2022866         | 0,040017962      | 0,4978865          | 0,4015709        |
| Julho     | -0,000421327    | 0,2022866         | 0,03689100       | 0,5513858          | 0,3481019        |
| Agosto    | 6,79322E-05     | 0,2022866         | 0,036392354      | 0,6208506          | 0,3070429        |
| Setembro  | -0,001195377    | 0,2022866         | 0,041229952      | 0,4810705          | 0,4218538        |

| Outubro     | -0,000834498 | 0,2022866 | 0,038400518 | 0,4968563 | 0,3941736 |
|-------------|--------------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| Novembro    | -0,000529695 | 0,2022866 | 0,04343419  | 0,5181913 | 0,4019511 |
| Dezembro    | 6,48246E-05  | 0,2022866 | 0,04091986  | 0,6541280 | 0,3090193 |
| Exponencial |              |           |             |           |           |
| Mês         | ME           | RMSE      | MSE         | RMSSE     | ASE       |
| Janeiro     | -0,000425601 | 0,1295479 | 0,01678     | 0,6788837 | 0,19079   |
| Fevereiro   | -0,000389297 | 0,1323553 | 0,01752     | 0,7540569 | 0,17549   |
| Março       | -0,000343607 | 0,131157  | 0,0172      | 0,9877731 | 0,13278   |
| Abril       | -0,000349284 | 0,1303451 | 0,01699     | 0,881771  | 0,14784   |
| Maio        | -0,00036491  | 0,1276024 | 0,01628     | 0,6467168 | 0,19734   |
| Junho       | -0,000366867 | 0,1245098 | 0,0155      | 0,51137   | 0,24349   |
| Julho       | -0,000385929 | 0,1244968 | 0,0155      | 0,5371823 | 0,23175   |
| Agosto      | -0,000360634 | 0,1270579 | 0,01614     | 0,7089808 | 0,17923   |
| Setembro    | -0,000327707 | 0,1326896 | 0,01761     | 0,6248588 | 0,21238   |
| Outubro     | -0,000299307 | 0,1345192 | 0,0181      | 0,5842554 | 0,23029   |
| Novembro    | -0,000318259 | 0,1336435 | 0,01786     | 0,544331  | 0,24554   |
| Dezembro    | -0,00034028  | 0,130235  | 0,01696     | 0,5609732 | 0,23215   |

<sup>1</sup>. Erro médio. <sup>2</sup>. Raiz do erro quadrático médio. <sup>3</sup>. Erro quadrático médio. <sup>4</sup>. Raiz do erro quadrático médio padronizado. <sup>5</sup>. Média do erro padronizado. Fonte: Dados da pesquisa

Com base na seleção do modelo esférico como o mais adequado, foram ajustados os semivariogramas mensais do ITU para obtenção dos parâmetros geoestatísticos que descrevem a estrutura de dependência espacial dos dados. Esses parâmetros são essenciais para avaliar o grau de continuidade espacial do fenômeno e subsidiar a interpolação por krigagem. Os resultados evidenciam, de modo geral, forte a moderada dependência espacial ao longo dos meses, reforçando a adequação do modelo adotado para a geração dos mapas do ITU. A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros do modelo geoestatístico adotado, incluindo o efeito pepita, o patamar e o alcance, bem como o grau de dependência espacial, que é essencial para caracterizar a estrutura de variabilidade dos dados. Informações sobre a validação cruzada dos modelos geoestatísticos testados para os valores mensais de temperatura e velocidade do vento podem ser encontradas no Apêndice 3 e 4.

**Tabela 3.** Parâmetros para os modelos de semivariograma ajustados e grau de dependência espacial.

| Mês       | Modelo   | Efeito Pepita | Patamar  | Alcance  | <sup>1</sup> GDE |
|-----------|----------|---------------|----------|----------|------------------|
| Janeiro   | Esférico | 0,00647       | 0,446980 | 10197,16 | 1,4470           |
| Fevereiro | Esférico | 0,01771       | 0,679810 | 12097,16 | 3,7850           |
| Março     | Esférico | 0,00407       | 1,604391 | 47997,16 | 0,2540           |
| Abril     | Esférico | 0,02222       | 0,901476 | 29297,16 | 2,4650           |

|          |          |         |          |           |         |
|----------|----------|---------|----------|-----------|---------|
| Maio     | Esférico | 0,00001 | 2,316044 | 46137,16  | 0,0004  |
| Junho    | Esférico | 0,00001 | 2,304464 | 32997,16  | 0,0004  |
| Julho    | Esférico | 0,00001 | 2,344156 | 35997,16  | 0,0004  |
| Agosto   | Esférico | 0,00104 | 1,480769 | 32997,16  | 0,0702  |
| Setembro | Esférico | 0,00001 | 2,424285 | 41181,97  | 0,0004  |
| Outubro  | Esférico | 0,00001 | 0,033935 | 35007,16  | 0,0294  |
| Novembro | Esférico | 0,00001 | 4,099884 | 52997,163 | 0,00024 |
| Dezembro | Esférico | 0,00001 | 2,392179 | 35997,163 | 0,00042 |

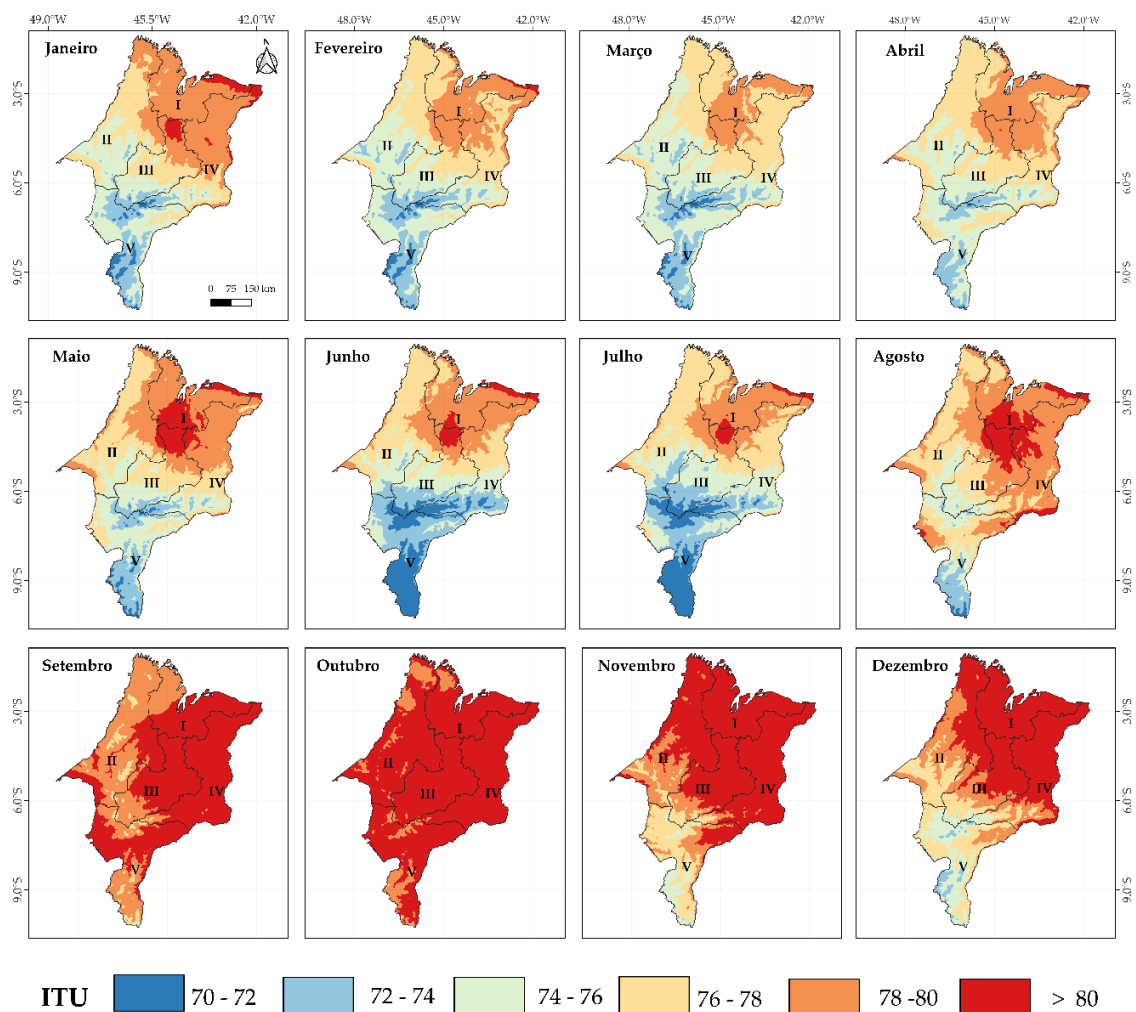
<sup>1</sup>. Grau de dependência espacial (%). Fonte: Dados da pesquisa

Os mapas de krigagem da distribuição espaço-temporal do ITU mensal no estado do Maranhão são apresentados na Figura 6. Os resultados evidenciam marcada variabilidade espaço-temporal das condições térmicas entre as mesorregiões do estado. A qualidade da interpolação espacial foi assegurada pelo ajuste de semivariogramas experimentais e pela validação cruzada dos modelos geoestatísticos, conforme detalhado no Apêndice 5. De maneira geral, os mapas temáticos revelam um padrão sazonal bem definido, com condições relativamente mais amenas no primeiro semestre (janeiro a junho) e intensificação do estresse térmico no segundo semestre (julho a dezembro). As mesorregiões Norte e Leste, concentraram de forma recorrente os maiores valores de ITU, com amplas áreas atingindo a classe de perigo ( $79 \leq \text{ITU} \leq 83$ ), especialmente entre setembro e dezembro. Na mesorregião Central, observou-se um padrão sazonal bem definido do ITU ao longo do período analisado. Nos meses de janeiro a abril, correspondentes ao período chuvoso, a região apresentou valores predominantemente nas faixas intermediárias de 74-76 e 76-78, evidenciando condições de alerta térmico associadas à elevada umidade relativa característica desse período. Entre maio e agosto, período de transição para a estação seca, verificou-se uma redução do ITU, com predomínio da faixa de 74-76, indicando uma janela de menor risco de estresse térmico para os animais, decorrente da diminuição da umidade relativa mesmo diante da manutenção de temperaturas elevadas. Já no intervalo de setembro a dezembro, correspondente à transição seco-chuvosa, a região Central registrou os valores mais críticos do ano, com deslocamento progressivo para as faixas de 78-80 e, principalmente entre outubro e dezembro, para valores superiores a 80, caracterizando condição de perigo segundo os limiares de classificação do ITU.

Esse comportamento é atribuído à combinação simultânea de temperaturas elevadas remanescentes do período seco com o aumento da umidade relativa proveniente das primeiras chuvas, configurando o trimestre outubro-dezembro como o de maior risco de estresse térmico

para a produção animal na mesorregião Central do Maranhão. Nesses períodos e regiões, os valores de ITU superam os limiares críticos estabelecidos para as principais raças ovinas do rebanho maranhense, a saber: Santa Inês (ITU = 78,27), Dorper (ITU = 78,26), Morada Nova (ITU = 80,81) e Somali (ITU = 80,64). Isso indica que as raças Santa Inês e Dorper, por apresentarem limiares críticos mais baixos, são as primeiras a ser afetadas pelo estresse térmico, sendo impactadas já nas condições de alerta ( $75 \leq \text{ITU} \leq 78$ ), enquanto as raças Morada Nova e Somali, embora mais resistentes, também são afetadas durante os meses de maior intensidade térmica, quando o ITU atinge a classe de perigo. A mesorregião Oeste apresentou valores entre 74 e 78 na maior parte do ano, enquadrando-se predominantemente na classe de alerta ( $75 \leq \text{ITU} \leq 78$ ), o que já representa risco de estresse térmico para as raças Santa Inês e Dorper durante praticamente todo o período analisado. A partir do mês de setembro, observou-se expansão das áreas com ITU entre 79 e 83 nessa mesorregião, configurando condições de perigo e ampliando o risco para todas as raças estudadas. Em contraste, a mesorregião Sul manteve os menores valores de ITU ao longo do período analisado, com condições majoritariamente classificadas como normal ( $\text{ITU} \leq 74$ ) e alerta ( $75 \leq \text{ITU} \leq 78$ ), especialmente nos meses de junho e julho, quando foram registrados valores de ITU próximos a 72. Dessa forma, a mesorregião Sul destaca-se como a região de melhor aptidão bioclimática relativa para a ovinocultura no estado, representando menor risco de estresse térmico para todas as raças analisadas.





**Figura 6.** Mapas de krigagem mensal do ITU de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul. Fonte: Autora

O estresse térmico em ovinos compromete de forma significativa os principais índices produtivos e reprodutivos do rebanho. Quando o ITU supera os limiares críticos das raças, observa-se redução no consumo de matéria seca, queda na produção de leite, piora na eficiência alimentar e declínio nos parâmetros reprodutivos, como taxa de concepção e qualidade seminal dos reprodutores (Marai et al., 2007; McManus et al., 2020). Adicionalmente, o estresse térmico prolongado eleva a frequência respiratória, a temperatura retal e a temperatura superficial dos animais, comprometendo a homeotermia e aumentando a demanda energética para termorregulação em detrimento dos processos produtivos (Dikmen; Hansen, 2009; Dos Santos

et al., 2021). Do ponto de vista do manejo, o primeiro semestre representa uma janela estratégica que deve ser aproveitada para intensificar práticas de manejo alimentar e reprodutivo, além da realização de procedimentos potencialmente estressantes, como vacinação, transporte e inseminação artificial. É também o período mais indicado para a manutenção preventiva de instalações, incluindo sistemas de sombreamento, bebedouros e ventilação, preparando as propriedades para o período de maior carga térmica (Collier; Renquist; Xiao, 2017). No segundo semestre, com a predominância das classes de alerta e perigo, torna-se essencial adotar estratégias de mitigação do estresse térmico, como sombreamento natural ou artificial, ventilação forçada e sistemas de resfriamento evaporativo, capazes de reduzir a carga térmica, a frequência respiratória e a temperatura corporal dos animais. Recomenda-se ainda o ajuste do manejo alimentar para os horários mais frescos do dia, a garantia de oferta abundante de água e a redução da lotação animal, medidas fundamentais para preservar o bem-estar e a produtividade dos rebanhos durante o período de maior risco térmico (Marai et al., 2007; Dikmen; Hansen, 2009; McManus et al., 2020; Dos Santos et al., 2021).

Complementando a análise do ITU, foram calculadas as estatísticas descritivas dos valores mensais do Índice de Temperatura de Globo Negro e Umidade (ITGU) para o período de 2014 a 2024, índice que incorpora o efeito da radiação térmica e é amplamente utilizado na avaliação do conforto térmico animal em ambientes externos. Os resultados seguem o mesmo padrão sazonal identificado anteriormente, com baixa variabilidade mensal dos dados e agravamento progressivo das condições térmicas ao longo do segundo semestre. A Tabela 4 apresenta as estatísticas descritivas dos valores mensais do ITGU para os anos de 2014 a 2024. Os valores médios mensais do ITGU variaram de  $75,781 \pm 2,095$  (julho) a  $79,247 \pm 1,523$  (setembro, outubro e novembro). Durante o 1º semestre, os valores médios oscilaram entre  $75,782 \pm 2,095$  (junho) e  $76,603 \pm 1,525$  (janeiro), caracterizando um período relativamente mais ameno. Os coeficientes de variação mantiveram-se baixos, variando entre 1,62% e 2,76%, o que indica baixa dispersão dos dados e um padrão térmico mensal relativamente homogêneo. Em contraste, no 2º semestre observa-se a intensificação das condições térmicas, com destaque para setembro a novembro, dezembro cujos valores médios se aproximam ou superam 79, e valores máximos que atingem 83,275, caracterizando um período de maior carga térmica ambiental. Esses resultados indicam que, embora as médias mensais sejam relativamente

próximas, há um aumento progressivo do ITGU a partir do 2º semestre, refletindo o intervalo mais crítico do ano em termos de estresse térmico potencial. Resumo das estatísticas descritivas para os valores mensais da pressão de vapor pode ser encontrado no Apêndice 6.

**Tabela 4.** Resumo das estatísticas descritivas para os valores mensais do ITGU.

| Mês       | Média  | Min <sup>1</sup> | Max <sup>2</sup> | DP <sup>3</sup> | CV (%) <sup>4</sup> |
|-----------|--------|------------------|------------------|-----------------|---------------------|
| Janeiro   | 76,603 | 71,832           | 80,011           | 1,525           | 1,99078             |
| Fevereiro | 76,183 | 71,481           | 79,319           | 1,344           | 1,76417             |
| Março     | 76,087 | 71,584           | 78,835           | 1,241           | 1,63103             |
| Abril     | 76,086 | 71,869           | 78,825           | 1,235           | 1,62316             |
| Maio      | 76,086 | 71,793           | 78,829           | 1,237           | 1,62579             |
| Junho     | 75,782 | 68,513           | 79,897           | 2,095           | 2,76451             |
| Julho     | 75,781 | 68,537           | 79,897           | 2,095           | 2,76455             |
| Agosto    | 77,043 | 69,937           | 80,607           | 1,494           | 1,93918             |
| Setembro  | 79,247 | 73,632           | 83,275           | 1,523           | 1,92184             |
| Outubro   | 79,247 | 73,65            | 83,275           | 1,523           | 1,92184             |
| Novembro  | 79,247 | 73,655           | 83,275           | 1,523           | 1,92184             |
| Dezembro  | 78,361 | 73,151           | 82,268           | 1,776           | 2,26643             |

<sup>1</sup>Mínimo. <sup>2</sup> Máximo. <sup>3</sup> Desvio padrão. <sup>4</sup> Coeficiente de variação. Fonte: Dados da pesquisa

Assim como realizado para o ITU, procedeu-se à validação cruzada dos modelos geoestatísticos ajustados para os valores mensais do ITGU, com o objetivo de identificar o modelo de melhor desempenho preditivo para a geração dos mapas de krigagem. Os resultados, apresentados na Tabela 5, confirmam a tendência observada anteriormente, com o modelo esférico apresentando o ajuste mais consistente entre os índices avaliados. A Tabela 6 apresenta os resultados da validação cruzada dos modelos geoestatísticos aplicados aos valores de ITGU. Observa-se que o modelo esférico apresentou o melhor desempenho preditivo, evidenciado por valores de RMSSE (0,67–0,99) próximos 1, indicando boa calibração e ausência de viés sistemático. O modelo exponencial, embora tenha apresentado desempenho intermediário (0,48–0,80), com RMSE semelhantes aos do modelo esférico, mostrou RMSSE mais distantes da unidade e maiores valores de ASE. Em contraste, o modelo gaussiano apresentou valores de RMSSE inferiores (0,44–0,64) indicando superestimação da variância preditiva e menor capacidade de ajuste aos dados observados. Dessa forma, com base no conjunto de métricas avaliadas, o modelo esférico foi selecionado como o mais adequado para a krigagem mensal do ITGU, garantindo maior confiabilidade na representação da variabilidade espacial do índice.

**Tabela 5.** Validação cruzada dos modelos geoestatísticos testados para valores mensais de ITGU

| Esférico    |                 |                   |                  |                    |                  |
|-------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Mês         | ME <sup>1</sup> | RMSE <sup>2</sup> | MSE <sup>3</sup> | RMSSE <sup>4</sup> | ASE <sup>5</sup> |
| Janeiro     | -0,000357336    | 0,1460            | 0,0213           | 0,9453             | 0,1545           |
| Fevereiro   | -0,000336318    | 0,1502            | 0,0226           | 0,9943             | 0,1510           |
| Março       | -0,000248578    | 0,1533            | 0,0235           | 0,9359             | 0,1637           |
| Abril       | -4,60621E-05    | 0,1639            | 0,0269           | 0,7672             | 0,2135           |
| Mai         | -9,93515E-05    | 0,1600            | 0,0256           | 0,8183             | 0,1954           |
| Junho       | -0,00037518     | 0,1401            | 0,0196           | 0,6714             | 0,2088           |
| Julho       | -0,000368649    | 0,1402            | 0,0197           | 0,7086             | 0,1980           |
| Agosto      | -0,000379557    | 0,1442            | 0,0208           | 0,8999             | 0,1603           |
| Setembro    | -0,000352503    | 0,1521            | 0,0231           | 0,7696             | 0,1976           |
| Outubro     | -0,000329201    | 0,1521            | 0,0231           | 0,7642             | 0,1991           |
| Novembro    | -0,000341126    | 0,1526            | 0,0233           | 0,7532             | 0,2027           |
| Dezembro    | -0,000345025    | 0,1481            | 0,0219           | 0,8205             | 0,1805           |
| Gaussiano   |                 |                   |                  |                    |                  |
| Mês         | ME              | RMSE              | MSE              | RMSSE              | ASE              |
| Janeiro     | -0,000830357    | 0,2277            | 0,0518           | 0,5885             | 0,3866           |
| Fevereiro   | -0,001242002    | 0,2314            | 0,0535           | 0,5265             | 0,4391           |
| Março       | -0,001426226    | 0,2288            | 0,0524           | 0,4586             | 0,4987           |
| Abril       | -0,000838002    | 0,2274            | 0,0517           | 0,5384             | 0,4222           |
| Mai         | -0,001142195    | 0,2280            | 0,0520           | 0,4783             | 0,4764           |
| Junho       | -0,00051024     | 0,215             | 0,0462           | 0,5471             | 0,3927           |
| Julho       | 0,000413708     | 0,2133            | 0,0455           | 0,6401             | 0,3331           |
| Agosto      | -0,001050201    | 0,2241            | 0,0502           | 0,447              | 0,5011           |
| Setembro    | 0,000298855     | 0,2327            | 0,0541           | 0,6124             | 0,3797           |
| Outubro     | -3,36484E-05    | 0,2353            | 0,0554           | 0,5568             | 0,4225           |
| Novembro    | -9,78362E-05    | 0,2369            | 0,0561           | 0,6216             | 0,3808           |
| Dezembro    | -0,000270358    | 0,2302            | 0,053            | 0,86227            | 0,3694           |
| Exponencial |                 |                   |                  |                    |                  |
| Mês         | ME              | RMSE              | MSE              | RMSSE              | ASE              |
| Janeiro     | -0,0004         | 0,1461            | 0,0213           | 0,6767             | 0,2159           |
| Fevereiro   | -0,0004         | 0,1489            | 0,0222           | 0,7725             | 0,1927           |
| Março       | -0,0004         | 0,1480            | 0,0219           | 0,7739             | 0,1912           |
| Abril       | -0,0004         | 0,1480            | 0,0219           | 0,8000             | 0,1851           |
| Mai         | -0,0004         | 0,1480            | 0,0219           | 0,7866             | 0,1882           |
| Junho       | -0,0004         | 0,1402            | 0,0197           | 0,4941             | 0,2838           |
| Julho       | -0,0004         | 0,1403            | 0,0197           | 0,4890             | 0,2869           |
| Agosto      | -0,0004         | 0,1443            | 0,0208           | 0,6220             | 0,2320           |
| Setembro    | -0,0004         | 0,1521            | 0,0231           | 0,5563             | 0,2735           |
| Outubro     | -0,0004         | 0,1521            | 0,0231           | 0,6012             | 0,2532           |
| Novembro    | -0,0004         | 0,1481            | 0,0219           | 0,5745             | 0,2579           |
| Dezembro    | -0,0004         | 0,1527            | 0,0233           | 0,5337             | 0,2862           |

<sup>1</sup>. Erro médio. <sup>2</sup>. Raiz do erro quadrático médio. <sup>3</sup>. Erro quadrático médio. <sup>4</sup>. Raiz do erro

quadrático médio padronizado. <sup>5</sup> Média do erro padronizado. Fonte: Dados da pesquisa

Da mesma forma que para o ITU, foram obtidos os parâmetros geoestatísticos dos semivariogramas mensais ajustados para o ITGU, permitindo caracterizar a estrutura de dependência espacial do índice ao longo do ano e subsidiar a geração dos mapas de krigagem. A Tabela 6 apresenta os parâmetros do semivariograma ajustado para o ITGU, evidenciando que o modelo esférico foi adequado para representar a estrutura espacial em todos os meses analisados. Os baixos valores do efeito pepita em relação ao patamar indicam que a maior parte da variabilidade do ITGU é explicada pela dependência espacial, com influência limitada de erros de medição ou variabilidade. Os valores do grau de dependência espacial (GDE) foram predominantemente muito baixos, caracterizando dependência espacial forte ao longo do ano (Cambardella et al., 1994).

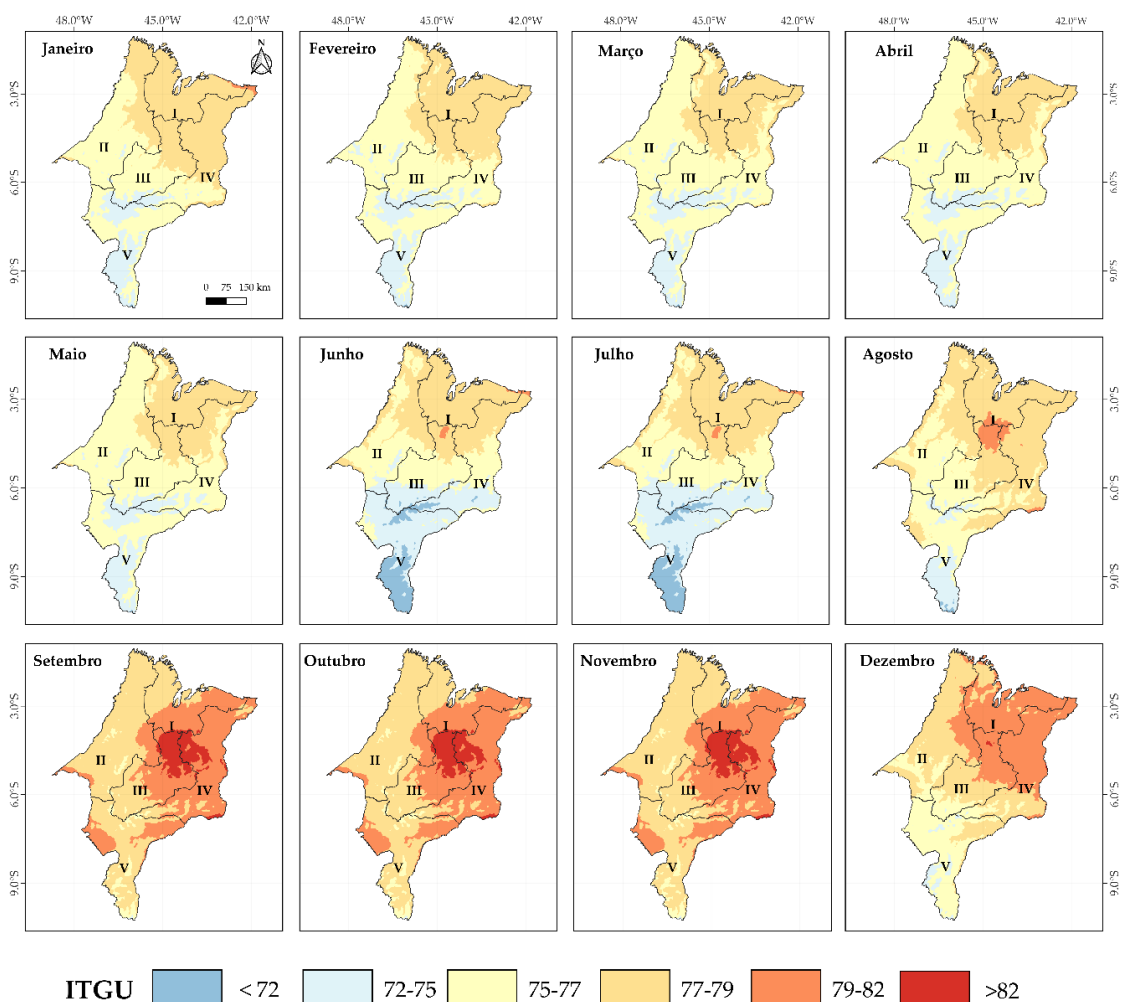
**Tabela 6.** Parâmetros para os modelos de semivariograma ajustados e grau de dependência espacial.

| Mês       | Modelo   | Efeito Pepita | Patamar | Alcance | <sup>1</sup> GDE |
|-----------|----------|---------------|---------|---------|------------------|
| Janeiro   | Esférico | 0,00001       | 1,2928  | 24259   | 0,0008           |
| Fevereiro | Esférico | 0,00166       | 1,4861  | 32145   | 0,1119           |
| Março     | Esférico | 0,00656       | 2,0573  | 49444   | 0,3187           |
| Abril     | Esférico | 0,02280       | 1,7024  | 41266   | 1,3393           |
| Maio      | Esférico | 0,01630       | 2,0255  | 49032   | 0,8046           |
| Junho     | Esférico | 0,00001       | 3,6577  | 37591   | 0,0003           |
| Julho     | Esférico | 0,00001       | 2,0116  | 23007   | 0,0005           |
| Agosto    | Esférico | 0,00001       | 2,6390  | 46013   | 0,0004           |
| Setembro  | Esférico | 0,00001       | 3,0296  | 38125   | 0,0003           |
| Outubro   | Esférico | 0,00001       | 2,8331  | 32018   | 0,0004           |
| Novembro  | Esférico | 0,00001       | 1,9481  | 21239   | 0,0005           |
| Dezembro  | Esférico | 0,00001       | 1,4701  | 20210   | 0,0007           |

1. Grau de dependência espacial (%). Fonte: Dados da pesquisa.

Os mapas de krigagem mensal do ITGU evidenciam um padrão espacial e sazonal bem definido no estado do Maranhão (Figura 7). O ITGU, por incorporar o efeito da radiação solar direta, constitui um indicador mais sensível e realista das condições de conforto térmico para ovinos criados em sistema extensivo, sendo especialmente relevante para o contexto do Maranhão, onde os animais permanecem expostos à radiação solar durante a maior parte do dia. Durante o primeiro semestre, predominam valores de ITGU entre 75 e 77, caracterizando

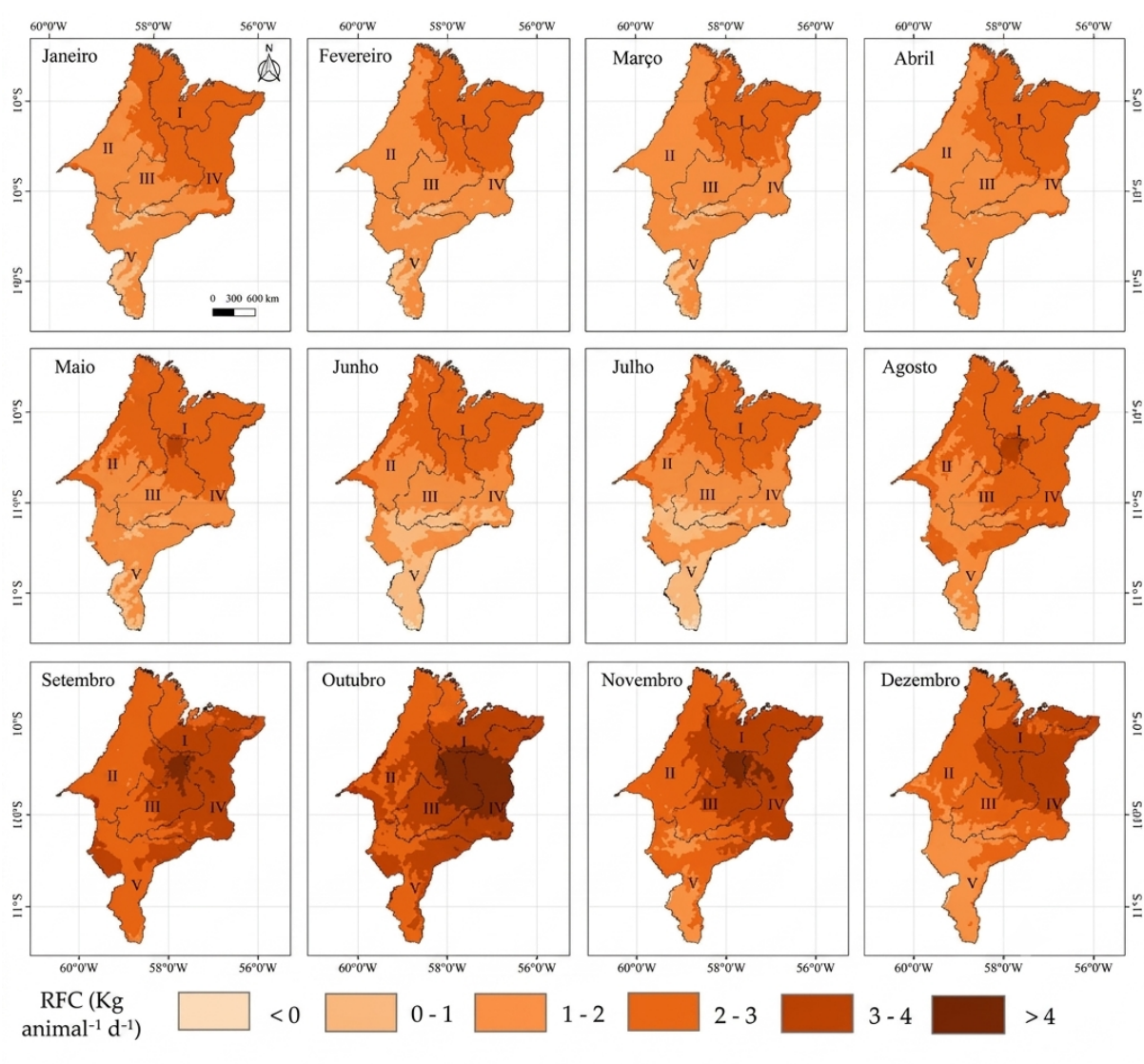
condições de alerta ( $74 < ITGU \leq 78$ ), com extensas áreas ainda próximas ao conforto térmico ( $ITGU \leq 74$ ), especialmente nas mesorregiões Sul e porções da Central. Nesse período, as mesorregiões Norte, Leste e Oeste apresentam distribuição relativamente homogênea, com baixa ocorrência de áreas classificadas como condição crítica ( $79 \leq ITGU \leq 84$ ), indicando menor carga térmica ambiental sobre os animais. No segundo semestre, observa-se intensa expansão espacial das classes de alerta ( $74 < ITGU \leq 78$ ) e condição crítica ( $79 \leq ITGU \leq 84$ ), sobretudo nas mesorregiões Norte, Leste e Central. Entre setembro e novembro, essas regiões concentram os maiores valores de ITGU, com núcleos persistentes classificados como emergência térmica ( $ITGU > 84$ ), refletindo a combinação de altas temperaturas, elevada radiação solar e condições atmosféricas desfavoráveis à dissipação de calor. Nesses núcleos de emergência térmica, os riscos para a produção ovina são severos, podendo ocasionar quadros de hipertermia, redução drástica do consumo alimentar, queda acentuada na produção e, em casos extremos, mortalidade dos animais (McManus et al., 2009; Sevi; Caroprese, 2012; Ben Moula et al., 2024). Em contraste, a mesorregião Sul mantém, ao longo de todo o ano, os menores valores de ITGU, predominantemente nas classes de conforto térmico ( $ITGU \leq 74$ ) e alerta ( $74 < ITGU \leq 78$ ), confirmando o gradiente espacial de risco térmico identificado também pelo ITU, com maior severidade nas regiões Norte e Leste durante o segundo semestre. Esse padrão reforça a importância de políticas de apoio à ovinocultura diferenciadas por mesorregião, priorizando investimentos em infraestrutura de conforto térmico e adaptação de sistemas de produção nas regiões de maior vulnerabilidade climática. Os mapas de krigagem das variáveis meteorológicas, os semivariogramas experimentais e os resultados da validação cruzada encontram-se apresentados no Apêndice desta dissertação.



**Figura 7.** Mapas de krigagem mensais do ITGU de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul. Fonte: Autora

A partir dos mapas de krigagem do ITGU, foi possível estimar os efeitos do estresse térmico sobre o desempenho produtivo dos rebanhos, especificamente quanto à Redução do Consumo Alimentar ( $RCA^{-1} d^{-1}$ ) em ovinos. Essa variável permite traduzir a variabilidade espacial e sazonal dos índices térmicos em um indicador de impacto zootécnico direto, evidenciando as mesorregiões e períodos do ano mais críticos para a produção animal no Maranhão conforme figura 8. O padrão espacial e sazonal identificado reflete diretamente os valores do ITU. No primeiro semestre, observa-se menor impacto sobre o consumo alimentar,

com destaque para os meses de fevereiro a junho, período em que a mesorregião Sul, apresenta os valores mais favoráveis, com RCA predominantemente negativa ou entre 0 e 1 kg animal<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, indicando ausência ou baixo impacto do estresse térmico sobre a ingestão. As mesorregiões Norte, Oeste e Central apresentam valores entre 1 e 2 kg animal<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> nesse período, refletindo um impacto moderado sobre o consumo dos rebanhos.



**Figura 8.** Mapas de krigagem mensais da estimativa de redução do consumo alimentar em ovinos de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul. Fonte: Autora.

A partir do segundo semestre, observa-se progressiva intensificação da RCA em todo o



estado, com agravamento expressivo entre agosto e novembro. O período de máximo impacto ocorre em outubro, quando as mesorregiões Central e Leste, atingem valores superiores a 4 kg animal<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, evidenciando redução severa na ingestão de matéria seca pelos ovinos nessas localidades. Esse cenário é particularmente preocupante sob o aspecto produtivo, uma vez que a redução acentuada no consumo alimentar compromete diretamente o balanço energético dos animais, resultando em perda de peso corporal, queda no desempenho reprodutivo e maior suscetibilidade a doenças, com reflexos negativos sobre a rentabilidade dos sistemas de produção ovina (Marai et al., 2007; McManus et al., 2020). Em dezembro, observa-se leve atenuação dos valores de RCA nas mesorregiões Sul e partes da Oeste, sinalizando o início de uma transição para condições térmicas menos severas, embora as demais mesorregiões ainda permaneçam com RCA entre 2 e 3 kg animal<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>.

Em geral, os valores do ITU e ITGU no estado do Maranhão sinalizam consequências de amplo espectro para a ovinocultura maranhense. Por exemplo, a intensificação da carga térmica tende a deteriorar a qualidade e a produtividade das pastagens nativas, comprometer a capacidade de suporte das áreas de criação e acelerar processos de degradação da vegetação, com potencial impacto sobre a biodiversidade regional (Rahimi et al., 2022; Srivastava et al., 2025). Para os ovinos criados em sistema extensivo, predominante no Maranhão, esse cenário é particularmente preocupante, pois a base forrageira constitui o principal recurso alimentar do rebanho e sua degradação compromete diretamente a eficiência dos sistemas de produção. Além disso, a exposição prolongada a condições térmicas acima dos limiares críticos identificados para as raças Santa Inês, Dorper, Morada Nova e Somali desencadeia uma cascata de respostas fisiológicas e comportamentais que culminam em perdas expressivas de desempenho. Exemplos incluem (mas não se limitam) a redução voluntária do consumo de matéria seca, o comprometimento da conversão alimentar, o declínio nas taxas reprodutivas e o aumento da suscetibilidade a doenças são consequências bem documentadas do estresse térmico crônico em ovinos, com reflexos diretos sobre a rentabilidade dos sistemas de produção (Macías-Cruz et al., 2018; Marai et al., 2007; Rashamol et al., 2018; Silva et al., 2024).

Os pequenos produtores rurais configuram o segmento mais vulnerável a esses impactos, em virtude do acesso restrito a tecnologias de mitigação, à assistência técnica e ao crédito rural, o que pode induzir o abandono da atividade e intensificar o êxodo rural nas regiões de maior risco térmico (Sousa et al., 2025). No entanto, cabe reconhecer que a utilização isolada

do ITU impõe limitações à avaliação do conforto térmico de ovinos em sistemas extensivos. Embora a adoção complementar do ITGU neste estudo represente um avanço metodológico importante, ao incorporar de forma indireta a radiação solar e oferecer uma estimativa mais fiel da carga térmica efetivamente suportada pelos animais em condições de campo. Ainda assim, reconhece-se que o estresse térmico em ovinos é um fenômeno multifatorial, resultante da interação entre variáveis ambientais, fisiológicas, genéticas e de manejo (Foroushani; Amon, 2022; Rahimi et al., 2022), o que reforça a necessidade de abordagens integradas e multidimensionais em estudos futuros. Apesar dessas limitações inerentes à escala e à abordagem adotadas, os resultados deste estudo constituem uma contribuição inédita ao conhecimento bioclimático da ovinocultura maranhense, oferecendo subsídios concretos para a formulação de estratégias de adaptação regionalmente orientadas. A

identificação das mesorregiões Norte e Leste como zonas de maior vulnerabilidade térmica, e da mesorregião Sul como área de maior aptidão bioclimática relativa, fornece um referencial espacial objetivo para o direcionamento de investimentos em infraestrutura de conforto animal, programas de melhoramento genético voltados à termotolerância e políticas públicas de apoio à ovinocultura familiar. O monitoramento contínuo e regionalizado dos índices bioclimáticos emerge, nesse contexto, como ferramenta estratégica para a antecipação de cenários críticos e para o aprimoramento da tomada de decisão no setor. Com as projeções climáticas apontando para a intensificação das secas e a elevação das temperaturas em grande parte do Brasil nas próximas décadas (Sousa et al., 2025), é razoável esperar que o estresse térmico sobre os rebanhos ovinos maranhenses se agrave progressivamente, impondo desafios crescentes à segurança alimentar e à sustentabilidade da cadeia produtiva regional. Nesse cenário, a incorporação da previsão bioclimática ao planejamento setorial representa uma oportunidade estratégica para a construção de sistemas de produção ovina mais resilientes, eficientes e adaptados aos desafios climáticos que se avizinham.

Este estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A base de dados climáticos utilizada (TerraClimate) possui resolução espacial relativamente baixa (~4 km), o que pode suavizar extremos locais e microclimas específicos, subestimando ou superestimando o risco de estresse térmico em determinadas áreas. Além disso, a estimativa de perda de produção foi calculada de forma generalizada, para níveis padronizados de potencial produtivo por ovelha, sem considerar a variabilidade individual entre

animais ou entre propriedades nas respostas às condições ambientais, não captando diferenças de raça, estágio fisiológico (lactação, gestação) ou práticas de manejo específicas, como acesso à sombra, sistemas de resfriamento e ajustes na dieta. Por fim, o estudo baseia-se inteiramente em modelagem geoestatística e dados climáticos secundários, sem validação a campo por meio de medições fisiológicas diretas nos animais (como temperatura retal ou frequência respiratória) que confirmassem os níveis de estresse térmico estimados pelos mapas.

#### 4. CONCLUSÃO

O estado do Maranhão apresenta elevada suscetibilidade ao estresse térmico para ovinos ao longo de todo o ano, com sazonalidade térmica caracterizada por condições relativamente mais amenas no primeiro semestre e intensificação do risco no segundo semestre, principalmente entre agosto e novembro; As mesorregiões Norte e Leste concentraram, de forma recorrente, os maiores valores de ITU e ITGU, com predomínio das classes de alerta e perigo, e registros de emergência térmica entre setembro e novembro, representando as regiões de maior vulnerabilidade climática para a ovinocultura no estado; A Redução do Consumo Alimentar estimada evidenciou impactos produtivos severos nas mesorregiões Central e Leste, com valores superiores a  $4 \text{ kg animal}^{-1} \text{ d}^{-1}$  em outubro, reforçando a necessidade de estratégias de mitigação do estresse térmico nessas regiões; A mesorregião Sul destacou-se como a área de maior aptidão bioclimática relativa para a ovinocultura no Maranhão, com os menores valores de ITU e ITGU registrados ao longo do ano, predominando condições de conforto térmico e alerta, especialmente nos meses de junho e julho.

## REFERÊNCIAS

ABREU, P. G. et al. Estimativa da temperatura de globo negro a partir da temperatura de bulbo seco. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, v. 19, n. 6, p. 557-563, dez. 2011.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**: FAO irrigation and drainage paper. Rome: [s.n.], [19--].

ALVARES, C. A. et al. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, n. 3-4, p. 407-427, ago. 2013.

BECK, H. E. et al. High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901-2099 based on constrained CMIP6 projections. **Scientific Data**, v. 10, n. 1, dez. 2023.

BEN MOULA, A. et al. Climate change impacts on sheep and goat production and reproduction. **Journal of Central European Agriculture**, v. 25, n. 4, p. 910-918, 2024.

BUFFINGTON, D. E. et al. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. **Transactions of the ASAE**, v. 24, n. 3, p. 711-714, 1981.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, set. 1994.

COLLIER, R. J.; RENQUIST, B. J.; XIAO, Y. A 100-year review: stress physiology including heat stress. **Journal of Dairy Science**, v. 100, n. 12, p. 10367-10380, dez. 2017.

DE CASTRO JÚNIOR, S. L.; SILVA, I. J. O. The specific enthalpy of air as an indicator of heat stress in livestock animals. **International Journal of Biometeorology**, fev. 2021.

DE OLIVEIRA APARECIDO, L. E. et al. Climate classification by Thornthwaite (1948) humidity index in future scenarios for Maranhão State, Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 25, n. 1, p. 855-878, jan. 2023.

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

DOS SANTOS, M. M. et al. An updated review on cattle thermoregulation: physiological responses, biophysical mechanisms, and heat stress alleviation pathways. **Environmental Science and Pollution Research**, jun. 2021a.

FARIAS MACHADO, N. A. et al. Biological rhythm of goats and sheep in response to heat stress. **Biological Rhythm Research**, v. 51, n. 7, p. 1044-1052, out. 2020.

FOROUSHANI, S.; AMON, T. Thermodynamic assessment of heat stress in dairy cattle: lessons from human biometeorology. **International Journal of Biometeorology**, v. 66, n. 9, p. 1811-1827, ago. 2022.

GOMES, A. M. N. et al. Assessment of land degradation in the State of Maranhão to support Sustainable Development Goal 15.3.1 in the agricultural frontier of MATOPIBA, Brazil. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 14, n. 9, set. 2025.

MACÍAS-CRUZ, U. et al. Thermoregulatory response to outdoor heat stress of hair sheep females at different physiological state. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, n. 12, p. 2151-2160, dez. 2018.

MARAI, I. F. M. et al. Physiological traits as affected by heat stress in sheep - a review. **Small Ruminant Research**, ago. 2007.

MASCARENHAS, N. M. H. et al. Thermal stress index for native sheep. **Journal of Thermal Biology**, v. 115, jul. 2023.

MCMANUS, C. et al. Geographical distribution of sheep breeds in Brazil and their relationship with climatic and environmental factors as risk classification for conservation. **Brazilian Journal of Science and Technology**, v. 1, n. 1, p. 3, 2014.

MCMANUS, C. et al. Heat tolerance in Brazilian sheep: physiological and blood parameters. **Tropical Animal Health and Production**, v. 41, n. 1, p. 95-101, jan. 2009.

MCMANUS, C. M. et al. Heat stress effects on sheep: are hair sheep more heat resistant? **Theriogenology**, out. 2020.

NUNES DE SOUSA, M. et al. Ingestive behaviour, physiological parameters and carcass traits of lambs fed diets containing greasy babassu by-product. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 68, n. 2, p. 273-284, abr. 2025.

RAHIMI, J. et al. A shift from cattle to camel and goat farming can sustain milk production with lower inputs and emissions in north sub-Saharan Africa's drylands. **Nature Food**, v. 3, n. 7, p. 523-531, jul. 2022.

RASHAMOL, V. P. et al. Physiological adaptability of livestock to heat stress: an updated review. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v. 6, n. 3, p. 62-71, jul. 2018.

SEVI, A.; CAROPRESE, M. Impact of heat stress on milk production, immunity and udder health in sheep: a critical review. **Small Ruminant Research**, set. 2012.

SILVA, M. V. et al. Spatial variability and exploratory inference of abiotic factors in barn compost confinement for cattle in the semiarid. **Journal of Thermal Biology**, v. 94, p. 102782, dez. 2020.

SILVA, R. S. et al. Physiological variables and estimates of heat exchange in sheep kept at thermoneutral and thermal stress temperatures. **Small Ruminant Research**, v. 237, ago. 2024.

SILVA, T. G. F. et al. Cenários de mudanças climáticas e seus impactos na produção leiteira em estados nordestinos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 8, p. 863-870, 2010.

SOUSA, A. C. et al. Bioclimatic zoning and climate change impacts on dairy cattle in Maranhão, Brazil. **Animals**, v. 15, n. 11, jun. 2025.

SRIVASTAVA, A. K. et al. Modelling mixed crop-livestock systems and climate impact assessment in sub-Saharan Africa. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, dez. 2025.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. **In:** HILLEL, D. (ed.). **Applications of soil physics**. Amsterdam: Elsevier, 1980. p. 319-344.



### **CAPÍTULO III**

## **TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA OCULAR NA AVALIAÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO EM OVINOS**

## RESUMO

O estresse térmico compromete o desempenho produtivo e o bem-estar de ovinos demandando estratégias de monitoramento para tomadas de decisão mais assertivas. Objetivou-se avaliar a eficiência da termografia infravermelha ocular como método não invasivo para detecção e monitoramento do estresse térmico em ovinos mantidos em ambiente controlado. Seis ovelhas (Santa Inês × Dorper) foram submetidas a três temperaturas do ar (26, 29 e 34 °C) em câmara climática, em delineamento inteiramente casualizado com medidas repetidas, durante oito dias consecutivos por tratamento, com intervalo de recuperação de três dias entre eles. Foram mensuradas a frequência cardíaca (FC), a temperatura retal (TR) e, por termografia infravermelha, as temperaturas da região ocular (TO), pupilar (TP) e do saco lacrimal (TSL), além de parâmetros de desempenho animal. Houve efeito significativo da temperatura sobre todas as variáveis ( $P < 0,05$ ), sem efeito do dia ou interação. A FC aumentou de  $69,00 \pm 1,97$  bpm (26 °C) para  $82,00 \pm 1,79$  bpm (34 °C;  $P < 0,001$ ), e a TR elevou-se de  $38,15 \pm 0,23$  °C para  $39,26 \pm 0,26$  °C ( $P = 0,010$ ). A elevação da temperatura reduziu o ganho de peso (~21%) e o consumo de matéria seca (~38%) dos animais, mecanismo compensatório para o controle do calor corporal. A conversão alimentar melhorou com o calor, indicando adaptação do grupo genético avaliado, enquanto a ingestão de água aumentou expressivamente (~39%), refletindo seu papel na termorregulação. A TP e a TSL diferiram entre todos os tratamentos, enquanto a TO diferiu apenas a 34 °C. A TO e a TP correlacionaram-se fortemente entre si ( $r = 0,92$ ;  $P < 0,01$ ) e moderadamente com a TR ( $r = 0,45$  e  $r = 0,43$ , respectivamente;  $P < 0,05$ ). A análise de Bland-Altman revelou a menor discrepância entre TR e TO (viés  $\approx 0,12$  °C; LC 95%:  $-1,05$  a  $+1,35$  °C), seguida pela TP (viés  $\approx 0,45$  °C), enquanto a TSL apresentou maior viés ( $\approx 2,58$  °C) e maior amplitude de concordância. Conclui-se que a termografia infravermelha ocular, sobretudo nas regiões ocular e pupilar, constitui ferramenta não invasiva eficiente para a detecção precoce e o monitoramento do estresse térmico em ovinos, sendo a temperatura ocular a medida mais concordante com a temperatura retal.

**Palavras-chave:** bioclimatologia, bem-estar, imagens térmicas

## ABSTRACT

Heat stress compromises homeothermy, productive performance, and the well-being of sheep worldwide, demanding rapid, accurate, and non-invasive monitoring tools. This study aimed to evaluate the efficiency of ocular infrared thermography as a non-invasive method for the detection and monitoring of heat stress in sheep kept under controlled environmental conditions. Six crossbred ewes (Santa Inês × Dorper) were submitted to three air temperatures (26, 29, and 34 °C) in a climatic chamber, in a completely randomized design with repeated measures, for eight consecutive days per treatment, with a three-day recovery interval between treatments. Heart rate (HR) and rectal temperature (RT) were measured, along with ocular (OT), pupillary (PT), and lacrimal caruncle (LCT) temperatures obtained by infrared thermography. Data were analyzed using linear mixed-effects models, Pearson correlation, and Bland-Altman agreement analysis. There was a significant effect of temperature on all variables ( $P < 0.05$ ), with no effect of day or interaction. HR increased progressively from  $69.00 \pm 1.97$  bpm (26 °C) to  $82.00 \pm 1.79$  bpm (34 °C;  $P < 0.001$ ), and RT rose from  $38.15 \pm 0.23$  °C to  $39.26 \pm 0.26$  °C ( $P = 0.010$ ). PT and LCT differed among all treatments, whereas OT differed only at 34 °C. OT and PT were strongly correlated with each other ( $r = 0.92$ ;  $P < 0.01$ ) and moderately correlated with RT ( $r = 0.45$  and  $r = 0.43$ , respectively;  $P < 0.05$ ). Bland-Altman analysis revealed the smallest discrepancy between RT and OT (bias  $\approx 0.12$  °C; 95% LoA:  $-1.05$  to  $+1.35$  °C), followed by PT (bias  $\approx 0.45$  °C), while LCT showed the greatest bias ( $\approx 2.58$  °C) and the widest limits of agreement. It is concluded that ocular infrared thermography, particularly at the ocular and pupillary regions, constitutes an efficient non-invasive tool for the early detection and monitoring of heat stress in sheep, with ocular temperature being the measure most concordant with rectal temperature.

**Keywords:** bioclimatology, animal welfare, thermal imaging

## 1. INTRODUÇÃO

A ovinocultura brasileira concentra-se principalmente na região Nordeste, com 16 milhões de ovinos, representando 75% do rebanho nacional. O estado do Maranhão ocupa a 11ª posição no *ranking* nacional, com um efetivo de 347.511 cabeças, enquanto a Bahia lidera a produção com 5.140.794 cabeças (IBGE, 2024). Além de sua relevância econômica, a criação de ovinos desempenha importante papel na agricultura sustentável, fornecendo uma valiosa fonte de alimento e contribuindo para a segurança alimentar (Sejian et al., 2017).

Manter a temperatura do núcleo corporal constante representa um desafio permanente para os ovinos criados, especialmente em regiões de clima tropical, onde os animais permanecem diretamente expostos às condições climáticas, sobretudo aos efeitos deletérios da radiação solar e do binômio temperatura-umidade relativa do ar (Jacobson et al., 2020; McManus et al., 2020). Nessas condições, os animais ativam mecanismos fisiológicos e comportamentais de termorregulação na tentativa de manter a homeotermia, como o aumento da frequência respiratória, da temperatura retal, da sudorese e a redistribuição do fluxo sanguíneo periférico (Fonsêca et al., 2019). Contudo, quando esses mecanismos se tornam insuficientes para dissipar o excesso de calor, instala-se o estresse térmico, condição associada a impactos relevantes e multidimensionais nos sistemas de produção animal (Collier; Renquist; Xiao, 2017; Berihulay et al., 2019; Brown-Brandl, 2018).

O estresse térmico é considerado uma das principais ameaças à produtividade pecuária mundial, gerando perdas econômicas expressivas que se manifestam em diversas dimensões da produção (Sejian et al., 2015). Entre os principais impactos, destacam-se a redução das taxas de crescimento, queda na fertilidade, deterioração da qualidade e quantidade do leite produzido, composição irregular de carcaças, diminuição do peso corporal, elevação dos custos veterinários e agravamento dos problemas relacionados ao bem-estar animal (Berihulay et al., 2019; Habeeb et al., 2023; Jongbo et al., 2026). Embora os ovinos apresentem boa adaptabilidade e certa resistência a condições ambientais adversas, o estresse térmico compromete diretamente o estado de bem-estar, a produção e a eficiência reprodutiva desses animais (Sejian et al., 2017).

A avaliação do estado térmico dos animais tem sido realizada tradicionalmente por meio de indicadores fisiológicos como frequência respiratória e temperatura retal, os quais, embora

eficazes, são métodos invasivos da perspectiva da zootecnia de precisão, de aplicação trabalhosa e potencialmente estressantes para os animais, podendo comprometer a fidedignidade das mensurações (Hoffmann et al., 2020). Diante dessas limitações, ferramentas que permitam a avaliação rápida, não invasiva e acurada do estado térmico animal ganham relevância crescente na pesquisa em bioclimatologia animal e no manejo prático dos rebanhos.

Nesse contexto, a termografia infravermelha (TRI) surge como uma ferramenta promissora para a identificação do estado térmico animal, por se tratar de uma técnica não invasiva, rápida e de fácil aplicação em campo (Sutherland et al., 2020; Čukić et al., 2023). A TRI opera com base na detecção da radiação infravermelha emitida pela superfície corporal dos animais, convertendo-a em imagens termográficas que refletem a distribuição de temperatura na superfície corporal (Mota-Rojas et al., 2024). A detecção precoce de animais sob estresse térmico é fundamental para possibilitar intervenções adequadas e subsidiar estratégias de adaptação e mitigação, como o fornecimento de sombra, sistemas de resfriamento evaporativo, ventilação forçada e disponibilidade adequada de água. Dessa forma, a TRI pode auxiliar técnicos e produtores na quantificação objetiva das respostas fisiológicas ao estresse térmico, servindo como ferramenta de suporte ao manejo ambiental e à promoção do bem-estar animal.

Embora a TRI tenha sido utilizada para detectar variações na temperatura da superfície em diferentes regiões corporais de ovinos (McManus et al., 2016; Sutherland et al., 2020; Mota-Rojas et al., 2022), a região ocular tem sido apontada como uma das mais adequadas para estimar alterações na temperatura corporal central, devido à ausência de cobertura de lã, à riqueza de leitos capilares superficiais e à elevada sensibilidade às variações do fluxo sanguíneo periférico. Especificamente, estruturas como a carúncula lacrimal têm demonstrado potencial como indicadores precoces de estresse, uma vez que respondem rapidamente à estimulação simpática dos vasos sanguíneos próximos à superfície ocular, induzida por estados de estresse fisiológico ou térmico (Tan et al., 2009).

Essa característica torna a temperatura ocular um candidato sensível e minimamente influenciado por variáveis de confundimento relacionadas à pelagem ou à espessura do tecido subcutâneo. A hipótese deste estudo é que a temperatura ocular obtida por meio da termografia infravermelha apresenta associação significativa com as respostas fisiológicas de termorregulação em ovinos submetidos a diferentes condições térmicas, constituindo um indicador não invasivo, sensível e eficaz para a detecção e o monitoramento precoce do estresse

térmico. Assim, o objetivo com este estudo foi avaliar a eficiência da termografia infravermelha ocular como método não invasivo para detecção e monitoramento do estresse térmico em ovinos mantidos em ambiente controlado.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Localização**

O experimento foi realizado no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente, vinculado ao Centro de Ciências de Chapadinha da Universidade Federal do Maranhão, localizado no município de Chapadinha, Brasil (03°44'33" S, 43°21'21" O; altitude de 100 m).

### **2.2 Animais**

Um total de seis ovelhas mestiças (Santa Inês e Dorper), com cerca de sete meses de idade e peso corporal médio de  $23,70 \pm 5,73$  kg, foram utilizadas no experimento.

### **2.3 Delineamento experimental**

O estudo seguiu delineamento inteiramente casualizado com medidas repetidas. Os animais foram submetidos a diferentes temperaturas em ambiente controlado, com temperaturas-alvo de 26, 29 e 34 °C, selecionadas para representar, respectivamente, condições de conforto térmico, zona de transição e estresse térmico, conforme Eustáquio Filho et al. (2011).

### **2.4 Condições ambientais**

As temperaturas efetivamente registradas durante o experimento (média  $\pm$  erro padrão da média) foram de  $26,00 \pm 0,48$  °C,  $29,03 \pm 0,53$  °C e  $34,00 \pm 0,28$  °C, para cada tratamento, respectivamente. Em todos os tratamentos, a umidade relativa do ar e a velocidade do ar foram mantidas em  $65,08 \pm 3,12\%$  e  $1,00 \pm 0,30$  m/s (média  $\pm$  erro padrão da média), respectivamente.

### **2.5 Comitê de ética**

Todos os procedimentos experimentais foram aprovados e seguiram as instruções estabelecidas pelo Comitê de Ética no Uso de Animais da Universidade Federal do Maranhão (protocolo nº 23115.007741/2024-13).

### **2.6 Câmara climática**

O estudo foi conduzido em uma câmara climática com área de 20 m<sup>2</sup>, disponível no laboratório (Figura 9), cujo piso é revestido com azulejos cerâmicos para facilitar os procedimentos de higienização. A estrutura é composta por painéis sanduíche de isolamento térmico, formados por chapas de aço galvanizado pré-pintadas e núcleo de poliestireno expandido com propriedades retardantes de chama (densidade aparente  $\geq 13$  kg m<sup>-3</sup>; condutividade térmica:  $0,026$  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), dotada de porta pré-fabricada com vedação

perimetral. Para o controle das condições microclimáticas, a câmara conta com aparelhos de ar-condicionado (Ecoswing Smart R-32, 18.000 BTU, Daikin, Japão), desumidificadores comerciais (Pure Ion Max 3 L, Relaxmedic, Brasil), umidificadores (Comfort Air UA-07, Mondial, Brasil) e aquecedores elétricos com potência de 2.000 W.



**Figura 9.** Câmara climática utilizada no experimento. Fonte: Autora

## **2.7 Manejo pré-experimental, adaptação e higienização**

Dez dias antes do experimento, as ovelhas foram vermifugadas por administração subcutânea de ivermectina a 2% e permaneceram em baias em uma área adjacente ao laboratório por três dias. Após esse período, iniciou-se a fase de adaptação dos animais, com duração de quinze dias. Durante esse período, os animais foram alojados individualmente em baias ( $1,30 \times 0,65 \times 0,70$  m; comprimento  $\times$  largura  $\times$  altura), equipadas com comedouros e bebedouros, instaladas no interior da câmara climática com ambiente controlado e monitorado. As atividades de limpeza foram realizadas imediatamente antes de cada oferta de alimento, e consistiram na retirada manual das fezes e na lavagem dos baldes coletores posicionados sob as baias. A câmara climática foi higienizada periodicamente por meio de raspagem do piso, seguida de lavagem com detergente neutro.



## 2.8 Alimentação e fornecimento de água

O fornecimento de alimento era realizado duas vezes ao dia (07h00 e 17h00). O ajuste de alimento oferecido foi realizado diariamente com base nas sobras do dia anterior, visando manter um percentual de refugo de aproximadamente 10% em relação à quantidade total fornecida. A dieta ofertada foi formulada com base nas recomendações do *National Research Council* (NRC, 2007), cuja composição está apresentada na Tabela 7. O fornecimento de água foi mantido ad libitum ao longo de todo o período experimental.

**Tabela 7.** Composição centesimal e química da dieta

| Ingredientes                        | Composição centesimal (%) |
|-------------------------------------|---------------------------|
| Silagem de milho                    | 70,00                     |
| Milho moído                         | 10,80                     |
| Farelo de soja                      | 8,56                      |
| Farelo de trigo                     | 10,07                     |
| Suplemento Mineral <sup>1</sup>     | 0,560                     |
| Composição química (% da MS)        |                           |
| Matéria seca (MS)                   | 51,20                     |
| Proteína bruta (PB)                 | 12,10                     |
| Extrato etéreo (EE)                 | 3,10                      |
| Cinza                               | 4,71                      |
| Fibra detergente neutra (FDN)       | 36,82                     |
| Fibra detergente ácida (FDA)        | 20,61                     |
| Nutrientes digestíveis totais (NDT) | 72,35                     |

<sup>1</sup>Cálcio 200 g/kg; Fósforo 75 g/kg; Sódio 90 g/kg; Enxofre 10 g/kg; Magnésio 5 g/kg; Ferro 400 mg/kg; Manganês 1.848 mg/kg; Zinco 3.060 mg/kg; Iodo 40 mg/kg; Cobalto 20 mg/kg; Selênio 24 mg/kg; Vitamina A 312.500 UI/kg; Vitamina D<sub>3</sub> 50.000 UI/kg; Vitamina E 437 UI/kg. Fonte: Dados da pesquisa

## 2.9 Protocolo experimental de exposição térmica e monitoramento ambiental

O protocolo experimental da câmara climática consistiu na ativação do sistema de climatização às 06h00, com período de estabilização de duas horas, de modo que a exposição controlada ocorreu efetivamente das 08h00 às 16h00, totalizando oito horas de exposição diária. Dessa forma, estabeleceu-se um ciclo diário de 8/16 horas (temperatura controlada/temperatura ambiente), conforme Marques et al. (2018). Cada tratamento, ou seja, temperatura, teve duração de oito dias consecutivos, sendo adotado um intervalo de recuperação fisiológica de três dias entre tratamentos. O monitoramento contínuo da temperatura e da umidade relativa do ar no interior da câmara climática foi realizado por meio de um controlador (MT-530 PLUS, Full Gauge Controls, Brasil), configurado via software SITRAD para registrar e armazenar os dados

em intervalos de 15 minutos. O sistema operava de forma automatizada, à exceção dos umidificadores e desumidificadores, que eram ajustados manualmente conforme a necessidade. Diariamente, previamente ao fechamento da câmara, os valores de temperatura e umidade relativa do ar eram aferidos e conferidos com o auxílio de um psicrômetro portátil (ITWG-2000, Instrutemp, Brasil).

#### **2.10. Coleta de dados**

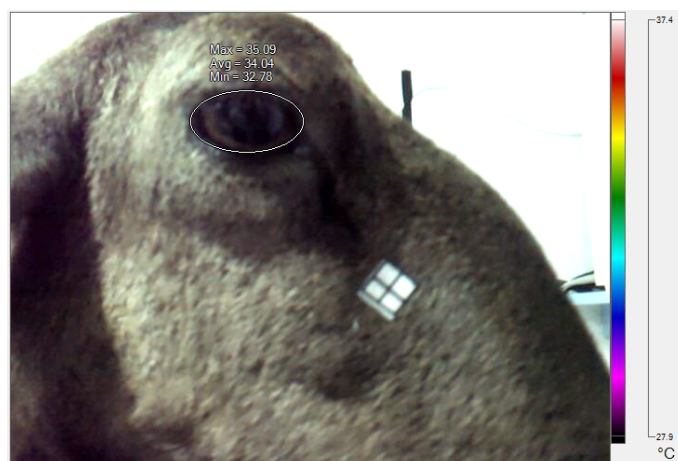
A frequência cardíaca (batimentos /min<sup>-1</sup>) foi monitorada continuamente por meio de um sensor de frequência cardíaca sem fio com cinta torácica (XOSS X2, XOSS, China), fixado individualmente em cada ovelha e conectado a um microcontrolador para aquisição de dados em tempo real (Figura 10). Os sensores eram ajustados diariamente antes do fechamento da câmara climática (07:00 h), sempre que necessário, sendo esse procedimento realizado em aproximadamente  $3 \pm 1$  minuto por animal. As informações de frequência cardíaca foram monitoradas por meio do aplicativo XOSS, utilizando um smartphone android Redmi Note 13 Pro 5G. Os dados obtidos eram registrados e organizados em planilhas eletrônicas para posterior análise estatística.



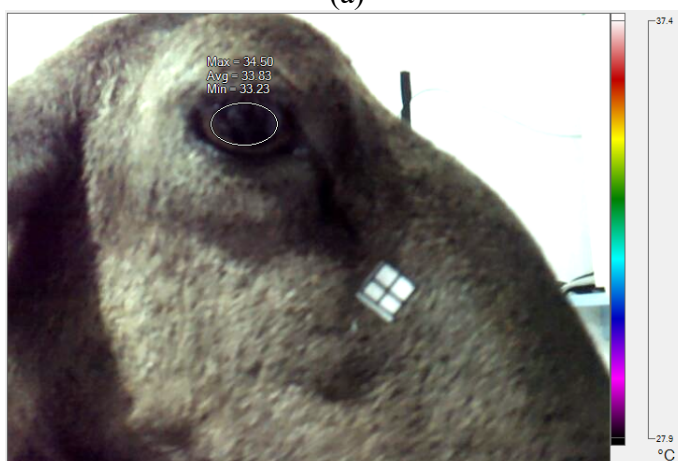
**Figura 10.** Ovelha com a cinta torácica com sensor de frequência cardíaca. Fonte: Autora

As 15:30 horas, imagens termográficas foram obtidas utilizando uma câmera termográfica Fluke TiS10 (resolução de 4.800 pixels). Antes de cada coleta, o equipamento foi calibrado de acordo com a temperatura ambiente e a emissividade ajustada para 0,98. As imagens foram capturadas, a uma distância padronizada de 0,5 m das ovelhas, em posição lateral da cabeça, buscando minimizar interferências causadas por movimentação, reflexos e variações de ângulo de captura. Durante a aquisição das imagens, evitou-se a incidência direta de radiação externa e o contato físico prévio com os animais, a fim de não alterar a temperatura superficial da região avaliada. Posteriormente, os termogramas foram analisados no software Fluke Connect (TiS10, Everett, WA, EUA), no qual foram delimitadas manualmente as regiões de interesse (ROIs), correspondentes à região ocular, à pupila e ao canto lacrimal (Figura 11) conforme metodologia proposta por Arfuso et al. 2022. A partir dessas áreas, foram obtidos os valores de temperatura máxima, sendo utilizada para análise a temperatura média máxima de cada região anatômica avaliada. Após a aquisição das imagens termográficas, realizou-se a mensuração da temperatura retal dos animais com o auxílio de termômetro clínico digital,

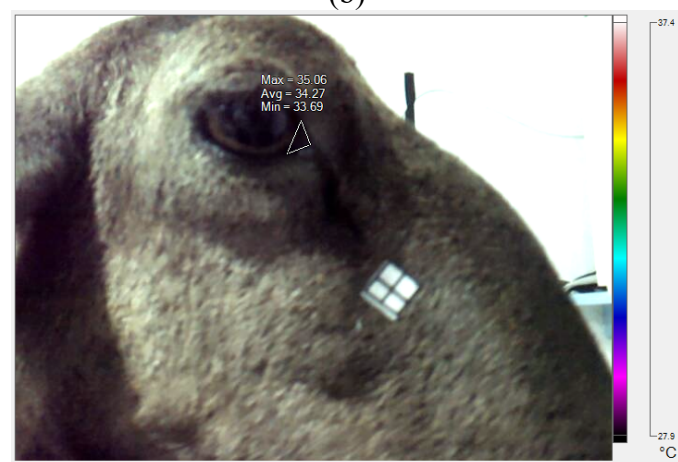
introduzido diretamente no reto até a estabilização da leitura.



(a)



(b)



(c)

**Figura 11.** Delimitação das regiões de interesse (ROI's) utilizadas na análise termográfica: (a)

TO – temperatura ocular; (b) TP – temperatura pupilar, e (c) TSL – temperatura do saco lacrimal. Fonte: Autora

### 2.11. Análises estatísticas

As análises foram realizadas no *Statistical Analysis System (SAS) OnDemand for Academics*. Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk ( $P < 0,05$ ), e posteriormente os dados foram analisados utilizando modelos lineares de efeitos mistos ajustados com o procedimento PROC MIXED de acordo com o seguinte modelo estatístico:  $Y_{ijk} = \mu + T_i + D_j + (TD)_{ij} + A_k + \varepsilon_{ijk}$ , em que:  $Y_{ijk}$  é a variável dependente observada no  $i$ -ésimo tratamento, no  $j$ -ésimo dia e no  $k$ -ésimo animal;  $\mu$  é a média geral;  $T_i$  é o efeito fixo do tratamento ( $i = 1, 2, 3$ );  $D_j$  é o efeito fixo do dia da coleta (tempo) ( $j = 1, \dots, 8$ );  $TD_{ij}$  é o efeito de interação entre o tratamento e o dia da coleta;  $A_k$  é o efeito aleatório do animal ( $j = 1, \dots, 6$ ); e  $\varepsilon_{ijk}$  é o erro residual aleatório. As medições repetidas ao longo do tempo (dia) foram modeladas como observações repetidas no animal utilizando uma estrutura de covariância autorregressiva de primeira ordem [AR(1)], selecionada com base no Critério de Informação de Akaike (Burnham; Anderson, 1998). As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). As correlações entre variáveis foram estimadas pelo coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) ( $P < 0,05$ ), sendo a magnitude das correlações interpretada como muito forte ( $|r| = 0,90-1,00$ ), forte ( $0,70-0,89$ ), moderada ( $0,40-0,69$ ), fraca ( $0,20-0,39$ ) e insignificante ( $0,00-0,19$ ) (Schober; Boer; Schwarte, 2018). A concordância entre a temperatura retal e as estimativas obtidas por termografia infravermelha foi avaliada pela análise de Bland-Altman.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A exposição dos ovinos a diferentes temperaturas do ar (26, 29 e 34 °C) evidenciou um padrão consistente de ativação dos mecanismos termorreguladores conforme o aumento da carga térmica. Os resultados apresentados na Tabela 8 demonstram o efeito significativo da temperatura do ar sobre os parâmetros fisiológicos e termográficos avaliados nos ovinos ( $P < 0,05$ ), sem que houvesse influência significativa do dia de avaliação e da interação entre temperatura e dia de coleta. A frequência cardíaca (FC) respondeu de forma progressiva e significativa ao incremento térmico ( $P < 0,001$ ), passando de  $69,00 \pm 1,97$  bpm a 26 °C para  $76,00 \pm 1,45$  bpm a 29 °C e  $82,00 \pm 1,79$  bpm a 34 °C, com diferença estatística entre todos os

tratamentos. Esse padrão de taquicardia reflexa representa uma resposta cardiovascular clássica ao estresse térmico em pequenos ruminantes. Quando a carga térmica ultrapassa os limites da zona de termoneutralidade, os ovinos ativam o eixo simpático-adrenomedular, promovendo taquicardia concomitante à vasodilatação periférica com o objetivo aumentar a perfusão cutânea para favorecer a dissipação de calor pela superfície corporal (Mota-Rojas et al., 2022). Liang et al. (2025) ressaltam que, em ambientes intensivos de ovinocultura, alterações cardiovasculares dessa natureza constituem os primeiros sinais detectáveis de estresse térmico, sendo passíveis de captura por sistemas de monitoramento não invasivo baseados em sensores fisiológicos e termografia.

**Tabela 8.** Médias  $\pm$  erro padrão das variáveis avaliadas em diferentes temperaturas do ar

| Item     | Média             |                    |                   | P-valor |       |       |
|----------|-------------------|--------------------|-------------------|---------|-------|-------|
|          | 26°C              | 29 °C              | 34°C              | (T)     | (D)   | T x D |
| FC (bpm) | 69,00 $\pm$ 1,97c | 76,00 $\pm$ 1,45b  | 82,00 $\pm$ 1,79a | <,001   | 0,271 | 0,488 |
| TR (°C)  | 38,15 $\pm$ 0,23b | 38,75 $\pm$ 0,25ab | 39,26 $\pm$ 0,26a | 0,010   | 0,180 | 0,367 |
| TO (°C)  | 38,29 $\pm$ 0,11b | 38,43 $\pm$ 0,61b  | 39,07 $\pm$ 0,25a | <,001   | 0,654 | 0,392 |
| TP (°C)  | 37,75 $\pm$ 0,52c | 38,28 $\pm$ 0,18b  | 39,01 $\pm$ 0,20a | 0,012   | 0,290 | 0,463 |
| TSL (°C) | 34,01 $\pm$ 0,47c | 36,10 $\pm$ 0,20b  | 37,45 $\pm$ 0,27a | <,001   | 0,189 | 0,340 |

Letras diferentes na mesma linha indicam diferenças pelo teste Tukey ( $P < 0,05$ ). T: tratamento, D: dia. FC: frequência cardíaca; TR: temperatura retal; TO: temperatura ocular; TP: temperatura pupilar; TSL: temperatura do saco lacrimal. Fonte: Dados da pesquisa

A temperatura retal (TR), padrão-ouro para avaliação da temperatura corporal central em medicina veterinária, elevou-se significativamente de  $38,15 \pm 0,23$  °C a 26 °C para  $39,26 \pm 0,26$  °C a 34 °C ( $P = 0,010$ ). Não houve diferença estatística entre os grupos de 26 °C e 29 °C. As temperaturas obtidas por termografia infravermelha nas regiões ocular (TO), do saco lacrimal (TSL) e pupilar (TP) responderam de forma significativa ao incremento da temperatura ambiental ( $P < 0,05$ ). A TP e a TSL apresentaram diferença estatística entre todos os tratamentos avaliados, evidenciando uma resposta gradual. Para a TO, a elevação significativa foi observada apenas no tratamento de 34 °C em relação às temperaturas de 26 °C e 29 °C, que não diferiram entre si, padrão compatível com o observado para a TR.

De maneira geral, esses registros termográficos relevaram padrão coerente aos indicadores fisiológicos, como a TR e FR. Isso ocorreu porque há uma alteração no fluxo sanguíneo periférico induzida pelo calor, resultante da vasodilatação simpática mediada pelo hipotálamo para favorecer a termólise, esse processo é detectável pela termografia infravermelha na superfície ocular (Mota-Rojas et al., 2024). A região ocular é considerada uma janela térmica privilegiada por ser desprovida de pelagem e por apresentar densa vascularização capilar na carúncula lacrimal e no fundo de saco palpebral, innervada pelo sistema nervoso simpático, o que a torna particularmente responsiva às flutuações hemodinâmicas autonômicas (Arfuso et al., 2022). A região do saco lacrimal é uma área onde o calor interno do corpo pode ser dissipado e medido com mais facilidade. Isso ocorre porque é uma área com muitos vasos sanguíneos superficiais que respondem à ativação do sistema nervoso autônomo (SNA). Quando a temperatura ambiente sobe, o corpo tenta se resfriar aumentando a circulação sanguínea nessa região para liberar calor. Por isso, a temperatura do saco lacrimal aumenta e se correlaciona com o aumento da temperatura central do corpo, sendo um bom indicador de estresse calórico (Yu et al. 2014; Bitjel et al. 2024; Ooi et al, 2026).

Os resultados de desempenho dos animais submetidos aos diferentes ciclos de temperatura do ar estão apresentados na Tabela 9. O ganho médio diário (GMD) reduziu progressivamente com a elevação da temperatura, representando queda de aproximadamente 21% no ganho de peso dos animais submetidos a 34 °C em relação aos mantidos em condição termoneutra (26°C). Essa redução acompanhou a queda no consumo de matéria seca (CMS), que diminuiu de 841,98 g/d a 26°C para 520,52 g/d a 34°C (~ 38%), evidenciando que o menor desempenho dos animais expostos ao calor decorreu, em grande parte, da menor ingestão voluntária de alimento. Por outro lado, a conversão alimentar (CA) reduziu com o aumento da temperatura do ar, provavelmente pelo menos consumo visando reduzir o incremento calórico. Ressalta-se que, como a avaliação durou apenas 8 dias, os dados obtidos têm caráter inferencial e não são conclusivos.

**Tabela 9.** Médias  $\pm$  erro padrão das variáveis de desempenho animal submetidos em diferentes temperaturas do ar

| Item      | Médias                          |                                 |                                | P Valor |       |       |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------|-------|-------|
|           | 26°C                            | 29 °C                           | 34°C                           | (T)     | (D)   | T x D |
| GMD (g/d) | 132,50 $\pm$ 6,43 <sup>a</sup>  | 120,96 $\pm$ 4,79 <sup>b</sup>  | 105,09 $\pm$ 1,75 <sup>c</sup> | <,001   | 0,562 | 0,365 |
| CMS (g/d) | 841,98 $\pm$ 22,42 <sup>a</sup> | 583,53 $\pm$ 10,70 <sup>b</sup> | 520,52 $\pm$ 6,55 <sup>c</sup> | <,001   | 0,252 | 0,346 |
| CA        | 5,08 $\pm$ 0,23 <sup>a</sup>    | 4,87 $\pm$ 0,14 <sup>b</sup>    | 4,66 $\pm$ 0,12 <sup>c</sup>   | <,001   | 0,480 | 0,122 |
| IA (L/d)  | 2,77 $\pm$ 0,07 <sup>c</sup>    | 3,56 $\pm$ 0,08 <sup>b</sup>    | 3,86 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup>   | <,001   | 0,683 | 0,456 |

Letras diferentes na mesma linha indicam diferenças pelo teste Tukey ( $P < 0,05$ ). T: tratamento, D: dia. GMS: ganho médio diário; CMS: consumo médio matéria seca; CA: conversão alimentar; IA: ingestão de água. Fonte: Dados da pesquisa

A redução do consumo sob temperaturas elevadas é um mecanismo comportamental esperado, uma vez que ao reduzir a quantidade de alimento ingerido, o animal diminui o incremento calórico associado à digestão e ao metabolismo dos nutrientes, atenuando o acúmulo de calor corporal, ainda que às custas do menor aporte de energia e nutrientes disponíveis para o crescimento. A redução do consumo de alimento sob condições de estresse térmico é um mecanismo comportamental amplamente relatado em ruminantes. Chauhan et al. (2014), avaliando ovinos submetidos a condições de estresse térmico (28-40°C) em comparação à termoneutralidade (18-21°C), observaram declínio de 13% no consumo de alimento dos animais não suplementados com antioxidantes, corroborando resultados prévios que também identificaram reduções de magnitude semelhante em carneiros expostos a 35°C. Os autores destacam que essa resposta compromete os esforços de dissipação de calor, uma vez que a redução da ingestão está associada ao aumento da taxa respiratória e da temperatura retal, evidenciando a tentativa do animal de reduzir a produção de calor metabólico associado à digestão e absorção dos nutrientes. O resultado obtido para conversão alimentar pode ser atribuído à redução proporcionalmente maior do consumo em relação à queda no ganho de peso. Vale destacar como fator limitante que o presente estudo avaliou apenas 8 dias consecutivos de coleta de dados, incluindo de parâmetros produtivos.

A ingestão de água (IA) aumentou de forma expressiva com a elevação da temperatura, passando de 2,77 L/d a 26°C para 3,86 L/d a 34°C (~ 39%) (Tabela 9). Esse comportamento é



esperado, uma vez que a água exerce papel central na dissipação do calor corporal, seja pelo incremento das perdas evaporativas (respiração e evaporação cutânea) sob temperaturas elevadas, seja pela necessidade de repor o volume hídrico perdido por essas vias. Mehaba et al. (2021), avaliando ovelhas leiteiras da raça Lacaune submetidas a condições de estresse térmico (28-35°C) em comparação à termoneutralidade (15-20°C) em câmara climática controlada, observaram aumento de 28% no consumo de água (9,14 vs. 7,14 L/d), concomitante ao incremento de 0,77°C na temperatura retal e de 90 incursões respiratórias por minuto na frequência respiratória dos animais. Segundo os autores, essa maior ingestão hídrica ocorreu principalmente para atender ao aumento das exigências de água relacionadas à dissipação de calor por evaporação, uma vez que parte expressiva da perda de calor corporal em ovinos ocorre pela via respiratória durante a hipertermia. O maior consumo de água funciona, portanto, como mecanismo compensatório de termorregulação, proporcional à intensidade do estresse térmico imposto aos animais.

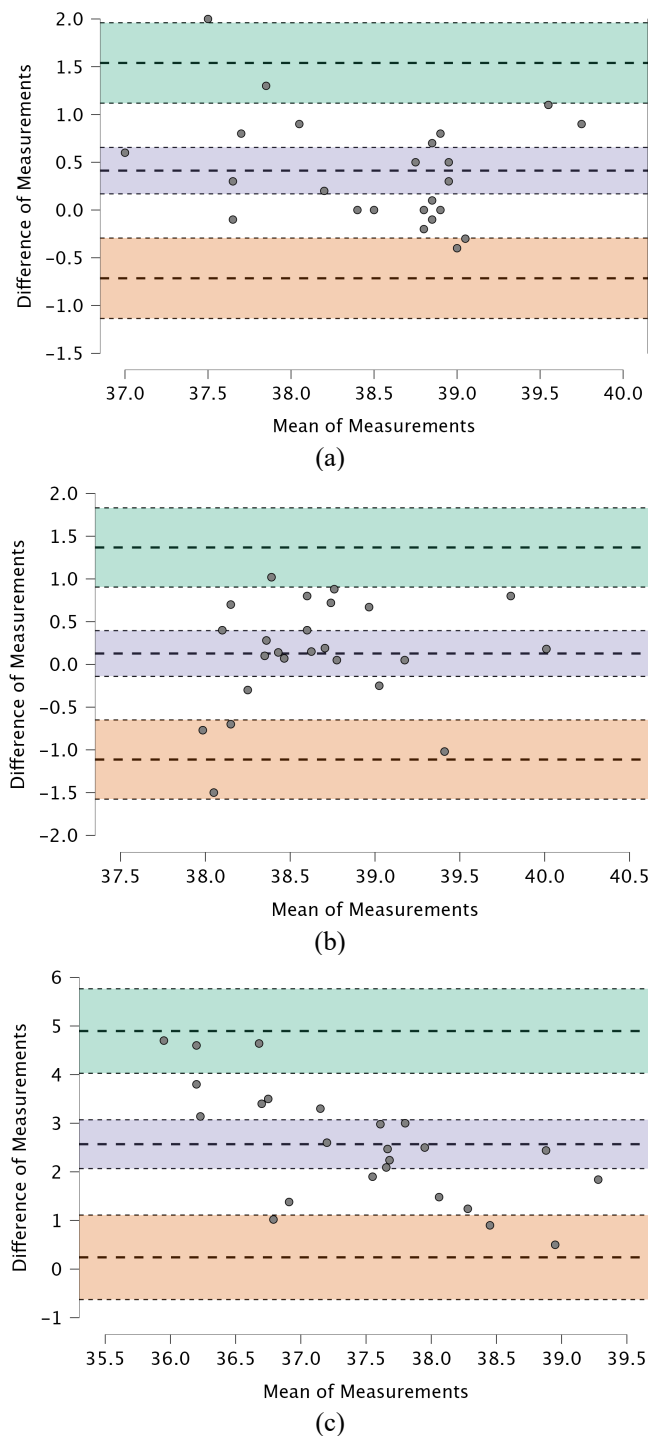
A matriz de correlação de Pearson (Tabela 10) evidencia a estrutura das relações entre os parâmetros avaliados. A FC apresentou correlação moderada e significativa com TR ( $r = 0,59$ ;  $P < 0,05$ ) e com TSL ( $r = 0,37$ ;  $P < 0,05$ ), mas não com TO ( $r = 0,27$ ; ns) nem com TP ( $r = 0,25$ ; ns). A TR correlacionou-se positiva e significativamente com todas as medidas termográficas: TO ( $r = 0,45$ ;  $P < 0,05$ ), TP ( $r = 0,43$ ;  $P < 0,05$ ) e TSL ( $r = 0,57$ ;  $P < 0,05$ ). A correlação mais expressiva do conjunto foi observada entre TO e TP ( $r = 0,92$ ;  $P < 0,01$ ), indicando forte correlação entre essas duas medidas de termografia ocular. A TSL correlacionou-se moderadamente com TP ( $r = 0,47$ ;  $P < 0,05$ ), mas não apresentou correlação significativa com TO ( $r = 0,30$ ; ns), sugerindo que a TSL captura um componente da resposta térmica parcialmente distinto daquele mensurado pelas regiões oculares mais internas, mais diretamente relacionado à vasomotricidade cutânea periférica do que à temperatura corporal central. Tan et al. (2009), em revisão sobre termografia da superfície ocular em humanos, já haviam demonstrado que fatores como temperatura ambiente, fluxo de ar e movimentação exercem maior influência sobre as regiões mais expostas do olho, o que é plenamente aplicável à TSL em contextos de avaliação em campo.

**Tabela 10.** Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas.

|          | FC     | TR    | TO     | TP    | TSL |
|----------|--------|-------|--------|-------|-----|
| FC (bpm) | -      |       |        |       |     |
| TR (°C)  | 0,59*  | -     |        |       |     |
| TO (°C)  | 0,27ns | 0,45* | -      |       |     |
| TP (°C)  | 0,25ns | 0,43* | 0,92** | -     |     |
| TSL (°C) | 0,37*  | 0,57* | 0,30ns | 0,47* | -   |

\*P < 0,05; \*\*P < 0,01; \*\*\*P < 0,001; ns: não significativo. FC: frequência cardíaca; TR: temperatura retal; TO: temperatura ocular; TP: temperatura pupilar; TSL: temperatura do saco lacrimal. Fonte: Dados da pesquisa

A análise de Bland-Altman (Figura 12) quantifica o grau de concordância entre TR e as medidas termográficas de modo independente da magnitude dos valores, sendo metodologicamente mais rigorosa do que a correlação de Pearson isolada, pois informa sobre viés sistemático e intercambiabilidade entre métodos. A TP apresentou viés de 0,45 °C em relação à TR Figura 12a, com intervalo de confiança de 95% entre -0,70 °C e +1,55 °C. A concordância entre TR e TO (Figura 12b) revelou o menor viés médio ( $\approx 0,12$  °C) e os limites de concordância de 95% (LC 95%) mais estreitos (LC 95%: -1,05 °C a +1,35 °C), indicando que a temperatura ocular é a medida termográfica com maior acurácia para estimativa da temperatura corporal central dos ovinos. A concordância entre TR e TSL (Figura 12c) revelou viés expressivamente maior ( $\approx 2,58$  °C) e limites amplos (LC 95%: -0,65 °C a +5,80 °C), confirmando que, embora a TSL responda ao estresse térmico, ela não substitui a TR para estimativa da temperatura corporal central. A TSL deve ser empregada como indicador complementar de variação relativa do estado de estresse. Esses resultados são comparáveis aos de Arfuso et al. (2022), que encontraram concordância entre temperatura total do olho e TR em ovelhas, enquanto o saco lacrimal apresentou concordância com TR, porém com maior amplitude de variação. Esses dados indicam que TO captura primariamente a temperatura central, ao passo que a TSL reflete a ativação do eixo autonômico de estresse, com maior variabilidade individual.



**Figura 12.** Análise de Bland–Altman demonstrando a concordância entre a temperatura retal (TR) e (a) a temperatura pupilar (TP), (b) a temperatura ocular (TO), (c) a temperatura do saco lacrimal (TSL). Fonte: Autora

A termografia de infravermelho permite a captura de imagens a distância, sem contato,

em condições próximas às do manejo habitual do rebanho. Essa característica é especialmente relevante em sistemas de ovinocultura intensiva, nos quais a avaliação individual de grande número de animais é operacionalmente inviável por métodos convencionais. Os resultados deste estudo demonstram que a temperatura ocular e pupilar obtidas por termografia podem ser usados na estimativa da temperatura corporal e do estado de estresse térmico em ovinos. Liang et al. (2025), em revisão sistemática sobre tecnologias não invasivas na ovinocultura intensiva, posicionam a termografia como ferramenta central para monitoramento de indicadores fisiológicos em tempo real, com acurácia entre 80 e 85% para detecção de temperatura corporal em condições controladas. Mota-Rojas et al. (2024) acrescentam que a termografia permite inferir indiretamente a integridade vascular periférica, podendo detectar processos de vasodilatação e vasoconstrição, o que amplia seu potencial diagnóstico além do monitoramento térmico rotineiro.

Este estudo apresenta limitações relacionadas ao delineamento experimental que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A amostra avaliada foi reduzida e pouco representativa, composta por apenas seis animais, todas fêmeas, de raças mestiças e faixa etária estreita, o que restringe a generalização dos resultados para outras raças, para o sexo masculino, categorias fisiológicas (fêmeas em lactação ou gestação) e faixas etárias. Além disso, os animais foram submetidos a cada condição térmica por um curto período de exposição diária ao longo dos dias de coleta, o que pode não capturar respostas de aclimação ou adaptação fisiológica a exposições térmicas crônicas de longo prazo, como ocorreria em sistemas de produção reais.

#### **4. CONCLUSÃO**

A exposição de ovinos a temperaturas crescentes do ar provocou alterações fisiológicas e termográficas consistentes com a instalação progressiva de estresse térmico, evidenciadas pelo aumento significativo da frequência cardíaca e da temperatura retal, especialmente a partir de 34 °C. A elevação da temperatura reduziu o desempenho dos animais, com queda de cerca de 21% no ganho de peso e 38% no consumo de matéria seca, mecanismo que auxilia no controle do calor corporal às custas do aporte de nutrientes. A termografia infravermelha das regiões ocular, pupilar e do saco lacrimal mostrou-se sensível a essas variações térmicas. Entre as três regiões de interesse avaliadas, a temperatura ocular destacou-se como a estimativa mais acurada e concordante com a temperatura retal. Portanto, conclui-se que a termografia infravermelha

ocular constitui método não invasivo, prático para a detecção do estresse térmico em ovinos, com aplicabilidade direta no manejo bioclimático de rebanhos e no avanço da pecuária de precisão, contribuindo para a tomada de decisão objetiva quanto à adoção de estratégias de mitigação do calor e à promoção do bem-estar animal.

## REFERÊNCIAS

- ARFUSO, F. et al. Eye surface infrared thermography usefulness as a noninvasive method of measuring stress response in sheep during shearing: correlations with serum cortisol and rectal temperature values. **Physiology and Behavior**, v. 250, jun. 2022.
- BERIHULAY, H. et al. Adaptation mechanisms of small ruminants to environmental heat stress. **Animals**, v. 9, n. 3, p. 75, fev. 2019.
- BITHEL, M. et al. Pupillometry as a Potential Objective Measurement of Pain Assessment in Healthy Volunteers. **Journal of Pain Research**, v. 17, p. 2037-2042, 2024. DOI: 10.2147/JPR.S461906.
- BROWN-BRANDL, T. M. Understanding heat stress in beef cattle. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 47, 2018.
- BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. **Model selection and inference**. New York: Springer, 1998.
- Chauhan, S. S.; Celi, P.; Leury, B. J.; Clarke, I. J.; Dunshea, F. R. Dietary antioxidants at supranutritional doses improve oxidative status and reduce the negative effects of heat stress in sheep. *Journal of Animal Science*, v. 92, n. 8, p. 3364–3374, 2014.
- COLLIER, R. J.; RENQUIST, B. J.; XIAO, Y. A 100-year review: stress physiology including heat stress. **Journal of Dairy Science**, v. 100, n. 12, p. 10367-10380, dez. 2017.
- ČUKIĆ, A. et al. Influence of heat stress on body temperatures measured by infrared thermography, blood metabolic parameters and its correlation in sheep. **Metabolites**, v. 13, n. 8, p. 957, ago. 2023.
- EUSTÁQUIO FILHO, A. et al. Zona de conforto térmico de ovinos da raça Santa Inês com base nas respostas fisiológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 8, p. 1807-1814, 2011.

FLORES, D. F. et al. Application of infrared thermography to assess the effect of different types of environmental enrichment on the ocular, auricular pavilion and nose area temperatures of weaned piglets. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 156, p. 136-142, 2019.

FONSÊCA DE FRANÇA CARVALHO, V. et al. Bio-thermal responses and heat balance of a hair coat sheep breed raised under an equatorial semi-arid environment. **Journal of Thermal Biology**, v. 84, p. 83-91, ago. 2019.

HABEEB, A. A. et al. The detrimental impact of high environmental temperature on physiological response, growth, milk production, and reproductive efficiency of ruminants. **Tropical Animal Health and Production**, v. 55, n. 6, p. 388, dez. 2023.

HOFFMANN, G. et al. Animal-related, non-invasive indicators for determining heat stress in dairy cows. **Biosystems Engineering**, nov. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa da Pecuária Municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

JACOBSON, C. et al. A review of dystocia in sheep. **Small Ruminant Research**, nov. 2020.

JONGBO, A. O. et al. Heat stress in livestock under tropical climates: impacts and mitigation strategies. **Tropical Animal Health and Production**, v. 58, n. 2, p. 65, mar. 2026.

KUNZ, M. et al. Pain or nociception? Subjective experience mediates the effects of acute noxious heat on autonomic responses - corrected and republished. **Pain**, v. 160, n. 6, p. 1469-1481, 2019.

LIANG, J. et al. Application of non-invasive monitoring technology in intensive sheep farming: a review. **Smart Agricultural Technology**, dez. 2025.

MARQUES, J. I. et al. Pupillary dilation as a thermal stress indicator in boer crossbred goats maintained in a climate chamber. **Small Ruminant Research**, v. 158, p. 26-29, jan. 2018.

MCMANUS, C. et al. Infrared thermography in animal production: an overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 10-16, abr. 2016.

MCMANUS, C. M. et al. Heat stress effects on sheep: are hair sheep more heat resistant? **Theriogenology**, out. 2020.

Mehaba, N.; Coloma-Garcia, W.; Such, X.; Caja, G.; Salama, A. A. K. Heat stress affects some physiological and productive variables and alters metabolism in dairy ewes. *Journal of Dairy Science*, v. 104, n. 1, p. 1099–1110, 2021.

MOTA-ROJAS, D. et al. Figure 3: Facial thermal windows in the dog and cat. **Animals**, v. 12, n. 7, 2022.

MOTA-ROJAS, D. et al. Thermal imaging as a method to indirectly assess peripheral vascular integrity and tissue viability in veterinary medicine: animal models and clinical applications. **Animals**, jan. 2024.

MOTA-ROJAS, D. et al. Thermal imaging to assess the health status in wildlife animals under human care: limitations and perspectives. **Animals**, dez. 2022.

Ooi, et al. *In-silico* study of physiological and environmental factors influencing the ocular thermal profile. **Journal of Thermal Biology**, v. 118, 2026. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2026.103845.

SCHOBER, P.; BOER, C.; SCHWARTE, L. A. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. **Anesthesia & Analgesia**, v. 126, n. 5, p. 1763-1768, maio 2018.

SEJIAN, V. et al. **Climate change impact on livestock: adaptation and mitigation**. New Delhi: Springer India, 2015.

SEJIAN, V. et al. **Sheep production adapting to climate change**. Singapore: Springer Singapore, 2017.



SUTHERLAND, M. A. et al. Evaluation of infrared thermography as a non-invasive method of measuring the autonomic nervous response in sheep. **PLOS ONE**, v. 15, n. 5, p. e0233558, maio 2020.

TAN, J. H. et al. Infrared thermography on ocular surface temperature: a review. **Infrared Physics and Technology**, jul. 2009.

YU, Z. et al. Ocular temperature elevation induced by threshold in vivo exposure to 1090-nm infrared radiation and associated heat diffusion. **Journal of Biomedical Optics**, v. 19, n. 10, p. 105008, 2014. DOI: 10.1117/1.JBO.19.10.105008.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

No âmbito regional, o zoneamento bioclimático desenvolvido para o estado do Maranhão, permitiu evidenciar que a atividade ovinocultura está sujeita a elevada suscetibilidade térmica ao longo de praticamente todo o ano, com padrão de sazonalidade caracterizado por condições relativamente amenas no primeiro semestre e intensificação do risco térmico no segundo semestre. A identificação das mesorregiões Norte e Leste como áreas de maior vulnerabilidade climática, em contraposição à mesorregião Sul, que apresentou as condições bioclimáticas mais favoráveis, fornece subsídios técnico-científicos relevantes para o planejamento territorial da ovinocultura, para a definição de períodos críticos de manejo e para a priorização de investimentos em estratégias de mitigação do estresse térmico nas regiões mais suscetíveis. Além disso, o presente estudo demonstrou que a termografia infravermelha da região ocular pode ser utilizada como método não invasivo de avaliação do estresse térmico de ovinos. Portanto, essa ferramenta pode auxiliar pecuaristas e técnicos para o monitoramento das condições de estresse térmico, especialmente no cenário atual de preço mais acessíveis do equipamento em decorrência do avanço significativo para a pecuária de precisão. Por fim, recomenda-se que estudos futuros avancem na calibração de modelos preditivos que associem dados de sensoriamento remoto, variáveis meteorológicas em tempo real e respostas termográficas, permitindo o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce e suporte à decisão em propriedades rurais. A pesquisa reafirma, portanto, que o enfrentamento do estresse térmico na ovinocultura demanda uma abordagem multidimensional, na qual o planejamento territorial, o manejo adaptativo e a inovação tecnológica atuam de forma sinérgica para assegurar a sustentabilidade da atividade em cenários de mudanças climáticas cada vez mais desafiadores.

## APÊNDICES

Apêndice 1 - Resumo das estatísticas descritivas para os valores médios mensais da temperatura do ar.

| Ano       | Média  | Min <sup>1</sup> | Max <sup>2</sup> | SD <sup>3</sup> | CV <sup>4</sup> |
|-----------|--------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Janeiro   | 26,475 | 23,746           | 28,431           | 0,877           | 3,313           |
| Fevereiro | 26,220 | 23,530           | 28,035           | 0,8             | 2,941           |
| Março     | 26,149 | 23,570           | 27,753           | 0,713           | 2,727           |
| Abril     | 26,421 | 23,913           | 27,815           | 0,645           | 2,441           |
| Maiο      | 26,574 | 23,212           | 28,640           | 0,892           | 3,357           |
| Junho     | 26,076 | 21,909           | 28,381           | 1,153           | 4,422           |
| Julho     | 26,030 | 21,569           | 28,208           | 1,099           | 4,222           |
| Agosto    | 26,903 | 22,966           | 28,908           | 0,795           | 2,955           |
| Setembro  | 28,122 | 25,133           | 30,316           | 0,868           | 3,087           |
| Outubro   | 28,758 | 26,312           | 31,122           | 0,946           | 3,290           |
| Novembro  | 28,091 | 24,724           | 30,481           | 1,049           | 3,734           |
| Dezembro  | 28,091 | 24,724           | 30,481           | 1,049           | 3,734           |

<sup>1</sup>Mínimo. <sup>2</sup> Máximo. <sup>3</sup> Desvio padrão. <sup>4</sup> Coeficiente de variação.

Apêndice 2- Resumo das estatísticas descritivas para os valores mensais de velocidade do vento.

| Ano       | Média | Min <sup>1</sup> | Max <sup>2</sup> | SD <sup>3</sup> | CV <sup>4</sup> |
|-----------|-------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Janeiro   | 1,320 | 0,965            | 2,260            | 0,210           | 15,909          |
| Fevereiro | 1,306 | 1,018            | 2,147            | 0,196           | 15,008          |
| Março     | 1,149 | 0,649            | 1,817            | 0,230           | 20,017          |
| Abril     | 1,177 | 0,849            | 1,797            | 0,194           | 16,483          |
| Maio      | 1,307 | 0,857            | 2,0490           | 0,200           | 15,302          |
| Junho     | 1,440 | 0,945            | 2,017            | 0,201           | 13,958          |
| Julho     | 1,393 | 0,882            | 2,090            | 0,259           | 18,593          |
| Agosto    | 1,251 | 0,833            | 1,889            | 0,198           | 15,827          |
| Setembro  | 1,526 | 1,153            | 2,427            | 0,241           | 15,793          |
| Outubro   | 1,628 | 1,256            | 2,680            | 0,206           | 12,654          |
| Novembro  | 1,432 | 0,922            | 2,408            | 0,237           | 16,550          |
| Dezembro  | 1,510 | 1,128            | 2,869            | 0,272           | 18,013          |

<sup>1</sup>Mínimo. <sup>2</sup> Máximo. <sup>3</sup> Desvio padrão. <sup>4</sup> Coeficiente de variação.

Apêndice 3 - Validação cruzada dos modelos geoestatísticos testados para valores médios mensais de temperatura do ar.

| Esférico    |                 |                   |                  |                    |                  |
|-------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Mês         | ME <sup>1</sup> | RMSE <sup>2</sup> | MSE <sup>3</sup> | RMSSE <sup>4</sup> | ASE <sup>5</sup> |
| Janeiro     | -0,000201502    | 0,08312656        | 0,006910025      | 0,9234846          | 0,0900238        |
| Fevereiro   | -0,000197313    | 0,08558185        | 0,007324253      | 0,9985561          | 0,0856922        |
| Março       | -0,000181732    | 0,08589571        | 0,007378073      | 0,9978596          | 0,0860502        |
| Abril       | -1,22695E-05    | 0,0978457         | 0,009573781      | 0,7149501          | 0,1367315        |
| Mai         | -0,000218042    | 0,08199621        | 0,006723378      | 0,8456338          | 0,0969777        |
| Junho       | -0,000214047    | 0,08035097        | 0,006456278      | 0,7212908          | 0,1114026        |
| Julho       | -0,000224992    | 0,08042383        | 0,006467992      | 0,7276088          | 0,1105299        |
| Agosto      | -0,000211751    | 0,08099711        | 0,006560532      | 0,8936235          | 0,0906503        |
| Setembro    | -0,000190838    | 0,08349842        | 0,006971986      | 0,7423367          | 0,112493         |
| Outubro     | -0,000175679    | 0,08413947        | 0,00707945       | 0,7110526          | 0,1183519        |
| Novembro    | -0,000186571    | 0,08439915        | 0,007123217      | 0,7133582          | 0,11832          |
| Dezembro    | -0,000191047    | 0,08277255        | 0,006851295      | 0,7772116          | 0,1064989        |
| Gaussiano   |                 |                   |                  |                    |                  |
| Mês         | ME              | RMSE              | MSE              | RMSSE              | ASE              |
| Janeiro     | -0,000522153    | 0,1299986         | 0,01689964       | 0,575305           | 0,225812         |
| Fevereiro   | -0,000671474    | 0,132415          | 0,01753373       | 0,536641           | 0,246596         |
| Março       | -0,000672225    | 0,1306845         | 0,01707844       | 0,520189           | 0,251077         |
| Abril       | -0,000689046    | 0,1286825         | 0,01655919       | 0,504033           | 0,255166         |
| Mai         | -0,000234226    | 0,1255446         | 0,01576145       | 0,585196           | 0,214393         |
| Junho       | 0,000523758     | 0,1224614         | 0,01499679       | 0,714225           | 0,171331         |
| Julho       | 0,000453799     | 0,1232055         | 0,0151796        | 0,694827           | 0,177183         |
| Agosto      | -0,000445183    | 0,1259893         | 0,0158733        | 0,491087           | 0,256407         |
| Setembro    | 9,92335E-05     | 0,1295618         | 0,01678626       | 0,605398           | 0,213884         |
| Outubro     | 0,000151355     | 0,1304376         | 0,01701397       | 0,649333           | 0,20076          |
| Novembro    | 0,000266897     | 0,1307524         | 0,01709619       | 0,688215           | 0,189859         |
| Dezembro    | -0,000332699    | 0,1292249         | 0,01669907       | 0,570765           | 0,226254         |
| Exponencial |                 |                   |                  |                    |                  |
| Mês         | ME              | RMSE              | MSE              | RMSSE              | ASE              |
| Janeiro     | -0,000229023    | 0,08316869        | 0,00691703       | 0,6835976          | 0,1216643        |
| Fevereiro   | -0,000229828    | 0,08508374        | 0,00723924       | 0,7647356          | 0,1112453        |
| Março       | -0,000246308    | 0,08452567        | 0,00714459       | 0,7754533          | 0,1089809        |
| Abril       | -0,000221803    | 0,08381094        | 0,00702427       | 0,8852187          | 0,0946899        |
| Mai         | -0,000232626    | 0,08201598        | 0,00672662       | 0,6436314          | 0,1274379        |
| Junho       | -0,000237026    | 0,08038519        | 0,00646178       | 0,5105547          | 0,157438         |
| Julho       | -0,000253417    | 0,08046722        | 0,00647497       | 0,5400042          | 0,1489932        |
| Agosto      | -0,00022857     | 0,0810206         | 0,00656434       | 0,6874133          | 0,1178701        |
| Setembro    | -0,000204218    | 0,08351697        | 0,00697508       | 0,6014255          | 0,1388741        |
| Outubro     | -0,000187133    | 0,08415549        | 0,00708215       | 0,5653348          | 0,1488804        |
| Novembro    | -0,000201098    | 0,08441905        | 0,00712658       | 0,5352064          | 0,1577344        |
| Dezembro    | -0,000213035    | 0,08280745        | 0,00685707       | 0,5613332          | 0,1475068        |

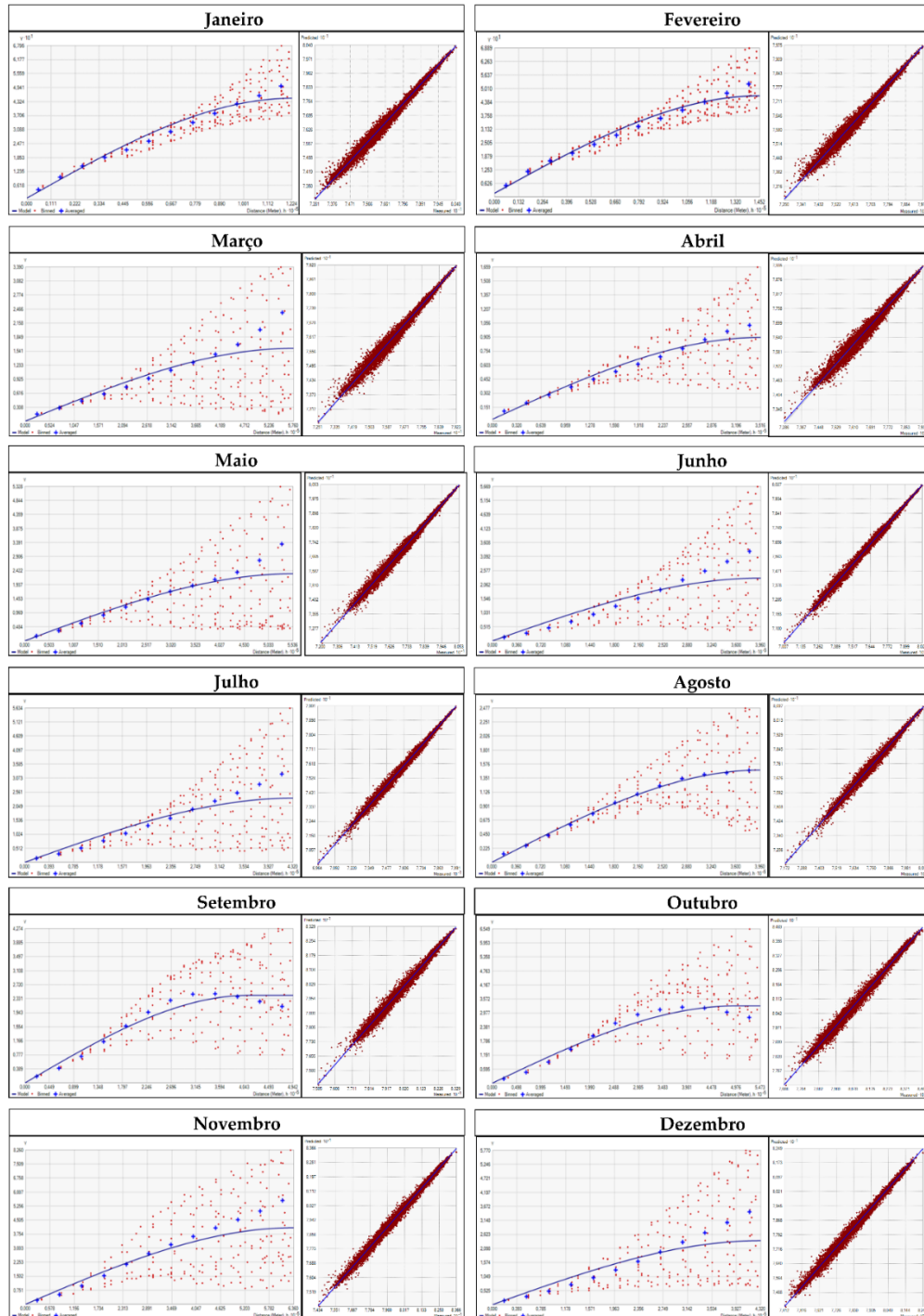
<sup>1</sup>. Erro médio. <sup>2</sup>. Raiz do erro quadrático médio. <sup>3</sup>. Erro quadrático médio. <sup>4</sup>. Raiz do erro quadrático médio padronizado. <sup>5</sup>. Média do erro padronizado.

Apêndice 4 - Validação cruzada dos modelos geoestatísticos testados para valores médios mensais de velocidade do vento.

| Esférico    |                 |                   |                  |                    |                  |
|-------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Mês         | ME <sup>1</sup> | RMSE <sup>2</sup> | MSE <sup>3</sup> | RMSSE <sup>4</sup> | ASE <sup>5</sup> |
| Janeiro     | -3,92491E-06    | 0,01339777        | 2,80067E-05      | 0,573303           | 0,0233698        |
| Fevereiro   | -6,22486E-06    | 0,01191942        | 8,78197E-05      | 0,5182915          | 0,0229604        |
| Março       | 4,86747E-06     | 0,0131188         | -1,72979E-05     | 0,5087994          | 0,0257043        |
| Abril       | -5,87522E-06    | 0,01385462        | -4,25053E-05     | 0,6234682          | 0,0221719        |
| Maio        | -4,9955E-06     | 0,01356403        | -8,33563E-07     | 0,5521299          | 0,0244929        |
| Junho       | -1,55657E-06    | 0,01255034        | 0,000195433      | 0,5360852          | 0,0233074        |
| Julho       | -1,09085E-05    | 0,01332062        | -0,000124727     | 0,4617769          | 0,0287699        |
| Agosto      | -9,76111E-06    | 0,01130117        | -0,000131992     | 0,4832855          | 0,0233306        |
| Setembro    | -8,31443E-06    | 0,01388976        | -0,000107861     | 0,4959312          | 0,0279297        |
| Outubro     | 3,24388E-06     | 0,01414713        | 0,000283977      | 0,6074532          | 0,0232069        |
| Novembro    | -3,75631E-06    | 0,01358362        | 1,99441E-05      | 0,514957           | 0,0263275        |
| Dezembro    | -5,20299E-06    | 0,01296761        | 0,000174165      | 0,4391057          | 0,0293977        |
| Gaussiano   |                 |                   |                  |                    |                  |
| Mês         | ME              | RMSE              | MSE              | RMSSE              | ASE              |
| Janeiro     | 2,50641E-05     | 0,01861372        | 0,000346         | 0,35335            | 0,05265          |
| Fevereiro   | 1,98124E-05     | 0,01723401        | 0,000297         | 0,346949           | 0,049633         |
| Março       | 2,0447E-05      | 0,01829995        | 0,000335         | 0,431741           | 0,042353         |
| Abril       | -9,23143E-06    | 0,01918219        | 0,000368         | 0,293464           | 0,065326         |
| Maio        | 1,84188E-05     | 0,01878745        | 0,000353         | 0,274722           | 0,068296         |
| Junho       | 2,22532E-05     | 0,01825587        | 0,000333         | 0,335909           | 0,054294         |
| Julho       | -5,52677E-06    | 0,01952777        | 0,000381         | 0,21922            | 0,089015         |
| Agosto      | -1,25886E-05    | 0,01605527        | 0,000258         | 0,22682            | 0,070729         |
| Setembro    | -2,32588E-05    | 0,0202446         | 0,00041          | 0,238957           | 0,084658         |
| Outubro     | -9,12268E-06    | 0,0202548         | 0,00041          | 0,253591           | 0,079817         |
| Novembro    | 8,72762E-06     | 0,01981118        | 0,000392         | 0,29493            | 0,067121         |
| Dezembro    | 2,96886E-06     | 0,01921674        | 0,000369         | 0,274062           | 0,070031         |
| Exponencial |                 |                   |                  |                    |                  |
| Mês         | ME              | RMSE              | MSE              | RMSSE              | ASE              |
| Janeiro     | -5,12099E-06    | 0,01339909        | -8,52618E-06     | 0,4432476          | 0,0302286        |
| Fevereiro   | -7,51079E-06    | 0,01192104        | 3,28184E-05      | 0,386486           | 0,0307935        |
| Março       | 4,81894E-06     | 0,01312035        | -1,14308E-05     | 0,3732104          | 0,0350458        |
| Abril       | -6,2014E-06     | 0,01385623        | -3,96812E-05     | 0,4484289          | 0,0308292        |
| Maio        | -5,99463E-06    | 0,01356718        | -2,46611E-05     | 0,4326932          | 0,0312589        |
| Junho       | -2,92563E-06    | 0,01255199        | 0,000113975      | 0,4034302          | 0,0309747        |
| Julho       | -1,25831E-05    | 0,01332371        | -1,22014E-05     | 0,3332227          | 0,0398757        |
| Agosto      | -1,07798E-05    | 0,01130381        | -0,000117775     | 0,3398702          | 0,0331812        |
| Setembro    | -9,34384E-06    | 0,01389127        | -3,0593E-05      | 0,3930715          | 0,035241         |
| Outubro     | 1,91012E-06     | 0,01414824        | 0,000171672      | 0,4377589          | 0,032205         |
| Novembro    | -4,54853E-06    | 0,01358586        | -2,2633E-06      | 0,3900799          | 0,0347599        |
| Dezembro    | -7,66469E-06    | 0,01297176        | 7,95104E-05      | 0,3250049          | 0,0397283        |

<sup>1</sup>. Erro médio. <sup>2</sup>. Raiz do erro quadrático médio. <sup>3</sup>. Erro quadrático médio. <sup>4</sup>. Raiz do erro quadrático médio padronizado. <sup>5</sup>. Média do erro padronizado.

Apêndice 5 - Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas mensais de krigagem do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão



Apêndice 6 - Resumo das estatísticas descritivas para os valores mensais da pressão de vapor.

| Ano       | Média | Min <sup>1</sup> | Max <sup>2</sup> | SD <sup>3</sup> | CV <sup>4</sup> |
|-----------|-------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Janeiro   | 2,781 | 2,409            | 3,005            | 0,099           | 3,560           |
| Fevereiro | 2,813 | 2,396            | 3,006            | 0,108           | 3,839           |
| Março     | 2,865 | 2,428            | 3,066            | 0,098           | 3,421           |
| Abril     | 2,848 | 2,416            | 3,083            | 0,124           | 4,354           |
| Maiο      | 2,848 | 2,416            | 3,0830           | 0,124           | 4,354           |
| Junho     | 2,533 | 1,859            | 3,015            | 0,268           | 10,580          |
| Julho     | 2,353 | 1,633            | 2,980            | 0,333           | 14,152          |
| Agosto    | 2,533 | 1,859            | 3,015            | 0,268           | 10,580          |
| Setembro  | 2,425 | 1,759            | 2,907            | 0,265           | 10,928          |
| Outubro   | 2,594 | 2,088            | 2,911            | 0,170           | 6,554           |
| Novembro  | 2,701 | 2,348            | 2,984            | 0,089           | 3,295           |
| Dezembro  | 2,704 | 2,353            | 3,015            | 0,118           | 4,364           |

<sup>1</sup>Mínimo. <sup>2</sup> Máximo. <sup>3</sup> Desvio padrão. <sup>4</sup> Coeficiente de variação.

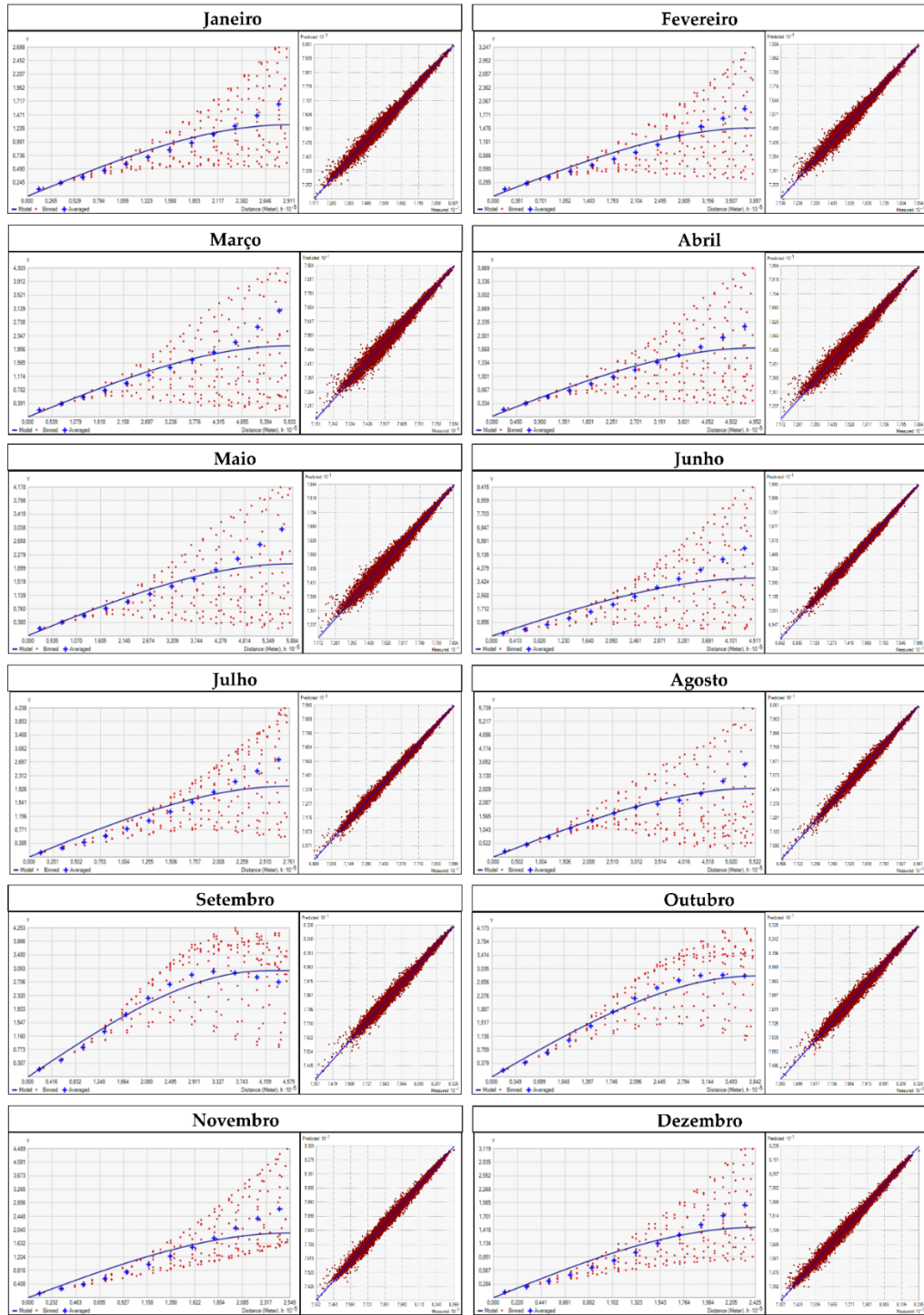


Apêndice 7 - Validação cruzada dos modelos geoestatísticos testados para valores médios mensais da pressão de vapor.

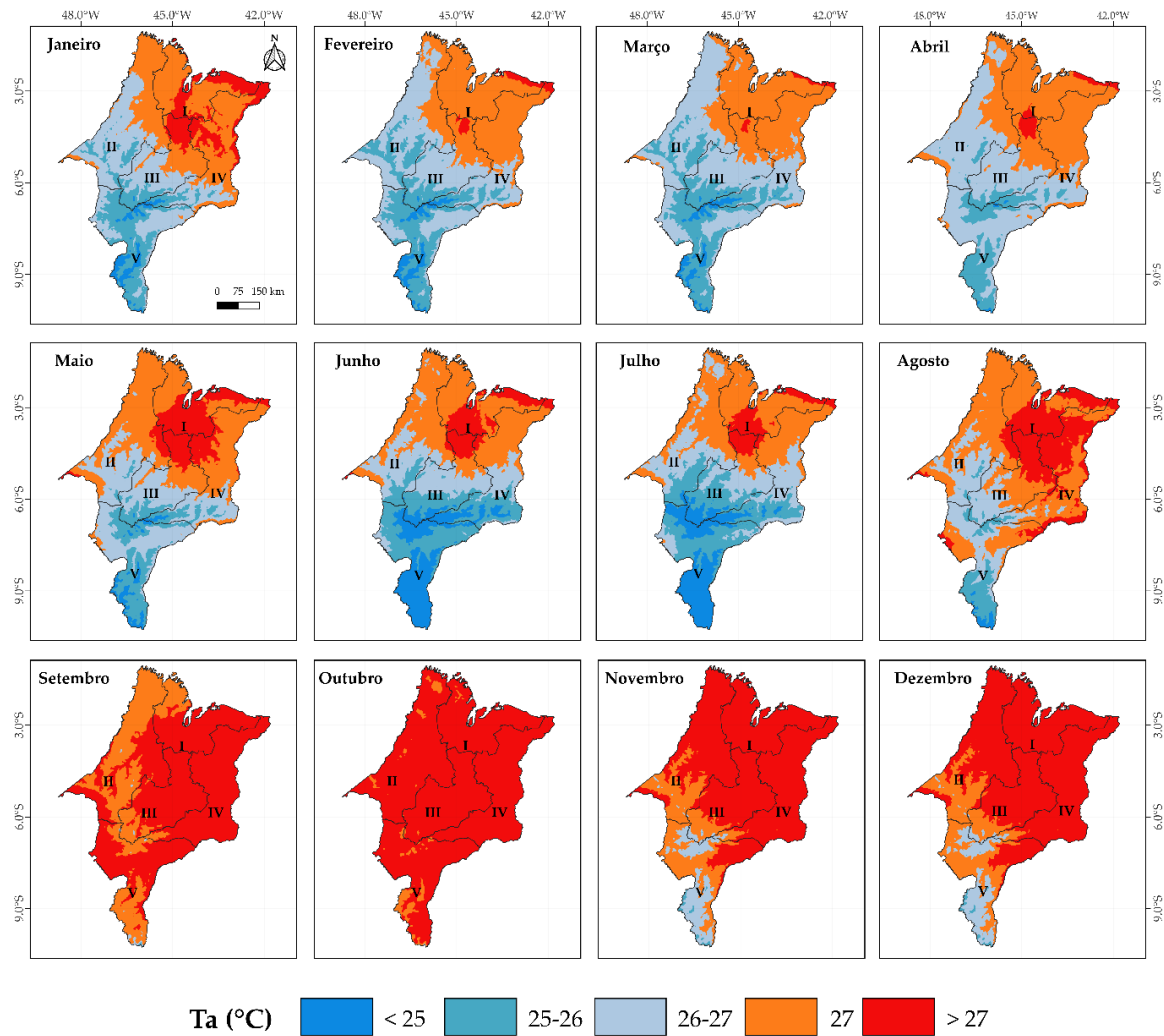
| Esférico    |                 |                   |                  |                    |                  |
|-------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Mês         | ME <sup>1</sup> | RMSE <sup>2</sup> | MSE <sup>3</sup> | RMSSE <sup>4</sup> | ASE <sup>5</sup> |
| Janeiro     | -2,50434E-05    | 0,01046219        | 0,000109457      | 0,9722524          | 0,0107654        |
| Fevereiro   | -2,52511E-05    | 0,01081014        | 0,000116859      | 0,9310882          | 0,0116164        |
| Março       | -2,57124E-05    | 0,01117997        | 0,000124992      | 1,049323           | 0,0106624        |
| Abril       | -2,5949E-05     | 0,01110964        | 0,000123424      | 0,849666           | 0,0130841        |
| Maio        | -2,36067E-05    | 0,01111084        | 0,000123451      | 0,8814519          | 0,0126198        |
| Junho       | -2,41701E-05    | 0,009607198       | 0,000092298      | 0,5009042          | 0,0191938        |
| Julho       | -2,14193E-05    | 0,00872981        | 0,000076209      | 0,3956043          | 0,0220863        |
| Agosto      | -2,41606E-05    | 0,009607234       | 0,000092299      | 0,4918873          | 0,0195457        |
| Setembro    | -2,19381E-05    | 0,008616251       | 0,00007424       | 0,420707           | 0,0204953        |
| Outubro     | -2,21952E-05    | 0,009251353       | 0,000085588      | 0,5864533          | 0,0157857        |
| Novembro    | -2,43021E-05    | 0,009845644       | 0,000096937      | 0,9691324          | 0,0101635        |
| Dezembro    | -2,49198E-05    | 0,01015189        | 0,000103061      | 0,7690587          | 0,0132062        |
| Gaussiano   |                 |                   |                  |                    |                  |
| Mês         | ME              | RMSE              | MSE              | RMSSE              | ASE              |
| Janeiro     | -3,99472E-05    | 0,0156156         | 0,000244         | 0,663815           | 0,023512         |
| Fevereiro   | -2,35359E-05    | 0,01611531        | 0,00026          | 0,6901             | 0,023334         |
| Março       | -6,11321E-05    | 0,0167139         | 0,000279         | 0,604693           | 0,027627         |
| Abril       | -1,41777E-05    | 0,01654423        | 0,000274         | 0,691278           | 0,02392          |
| Maio        | 1,23146E-05     | 0,01647073        | 0,000271         | 0,714986           | 0,023027         |
| Junho       | 0,000176499     | 0,01410855        | 0,000199         | 1,138935           | 0,012385         |
| Julho       | 0,000198437     | 0,01276739        | 0,000163         | 0,996977           | 0,012806         |
| Agosto      | 0,000183125     | 0,01410181        | 0,000199         | 1,179105           | 0,011958         |
| Setembro    | 0,000179839     | 0,01262849        | 0,000159         | 1,07475            | 0,01175          |
| Outubro     | 0,000120062     | 0,01356726        | 0,000184         | 0,876431           | 0,015475         |
| Novembro    | -7,57928E-05    | 0,01471286        | 0,000216         | 0,505718           | 0,029079         |
| Dezembro    | 5,34284E-05     | 0,0150231         | 0,000226         | 0,776308           | 0,019342         |
| Exponencial |                 |                   |                  |                    |                  |
| Mês         | ME              | RMSE              | MSE              | RMSSE              | ASE              |
| Janeiro     | -2,65347E-05    | 0,01046392        | 0,000109494      | 0,7285915          | 0,0143674        |
| Fevereiro   | -2,66591E-05    | 0,01081202        | 0,0001169        | 0,7012913          | 0,015425         |
| Março       | -2,81966E-05    | 0,01118328        | 0,000125066      | 0,7670186          | 0,01459          |
| Abril       | -2,74523E-05    | 0,01111116        | 0,000123458      | 0,6301376          | 0,0176448        |
| Maio        | -2,48683E-05    | 0,01111308        | 0,000123501      | 0,6429567          | 0,0173032        |
| Junho       | -2,77669E-05    | 0,00961339        | 9,24173E-05      | 0,3533305          | 0,0272242        |
| Julho       | -2,56364E-05    | 0,00873723        | 7,63402E-05      | 0,2870384          | 0,0304604        |
| Agosto      | -2,79379E-05    | 0,00961376        | 9,24244E-05      | 0,3601715          | 0,026708         |
| Setembro    | -2,59058E-05    | 0,00862303        | 7,43566E-05      | 0,3262601          | 0,0264446        |
| Outubro     | -2,57214E-05    | 0,00925698        | 8,56916E-05      | 0,4346668          | 0,0213083        |
| Novembro    | -2,56919E-05    | 0,00984751        | 9,69734E-05      | 0,7522628          | 0,0130954        |
| Dezembro    | -2,62099E-05    | 0,01015349        | 0,000103093      | 0,5942725          | 0,0170925        |

<sup>1</sup>. Erro médio. <sup>2</sup>. Raiz do erro quadrático médio. <sup>3</sup>. Erro quadrático médio. <sup>4</sup>. Raiz do erro quadrático médio padronizado. <sup>5</sup>. Média do erro padronizado.

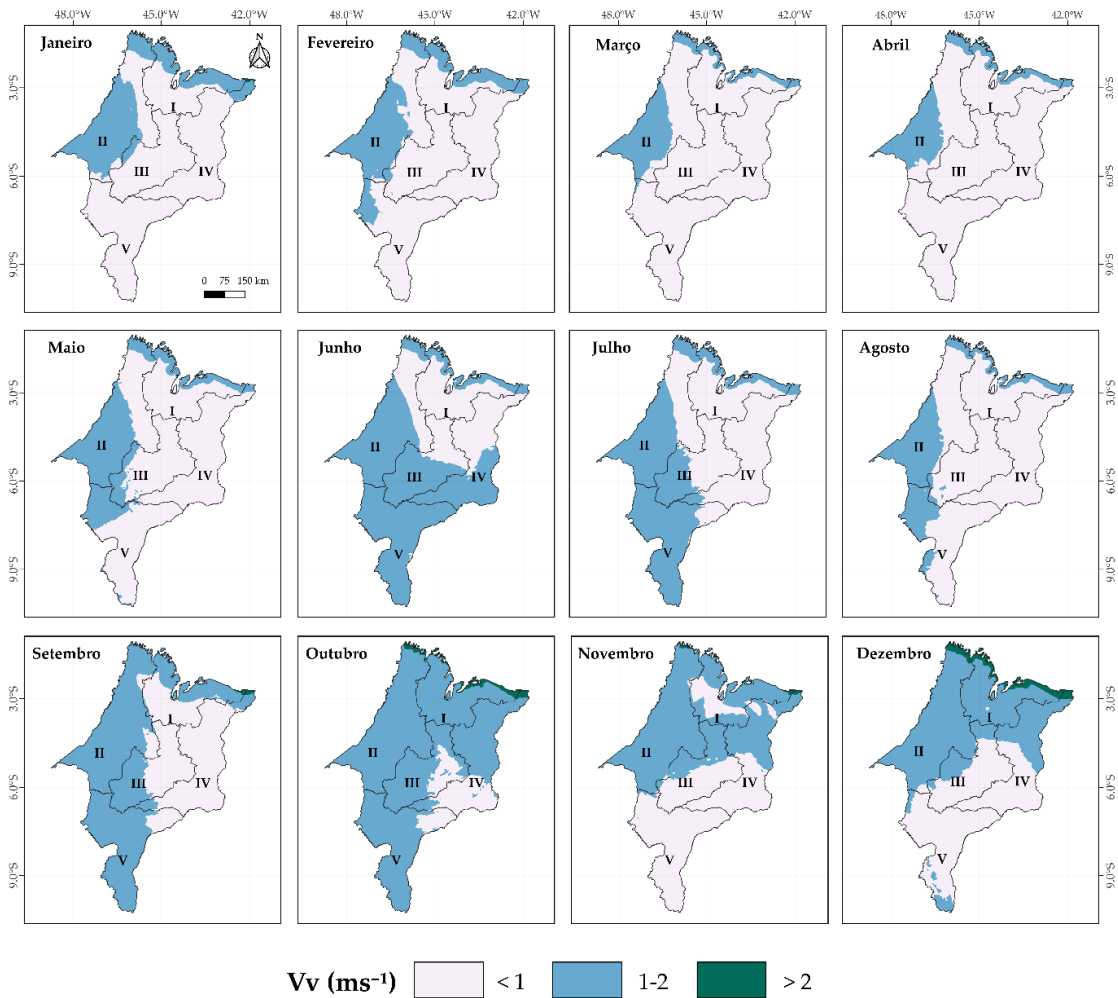
Apêndice 8 - Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas mensais de krigagem do Índice de Temperatura do Globo e Umidade (ITGU) de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão



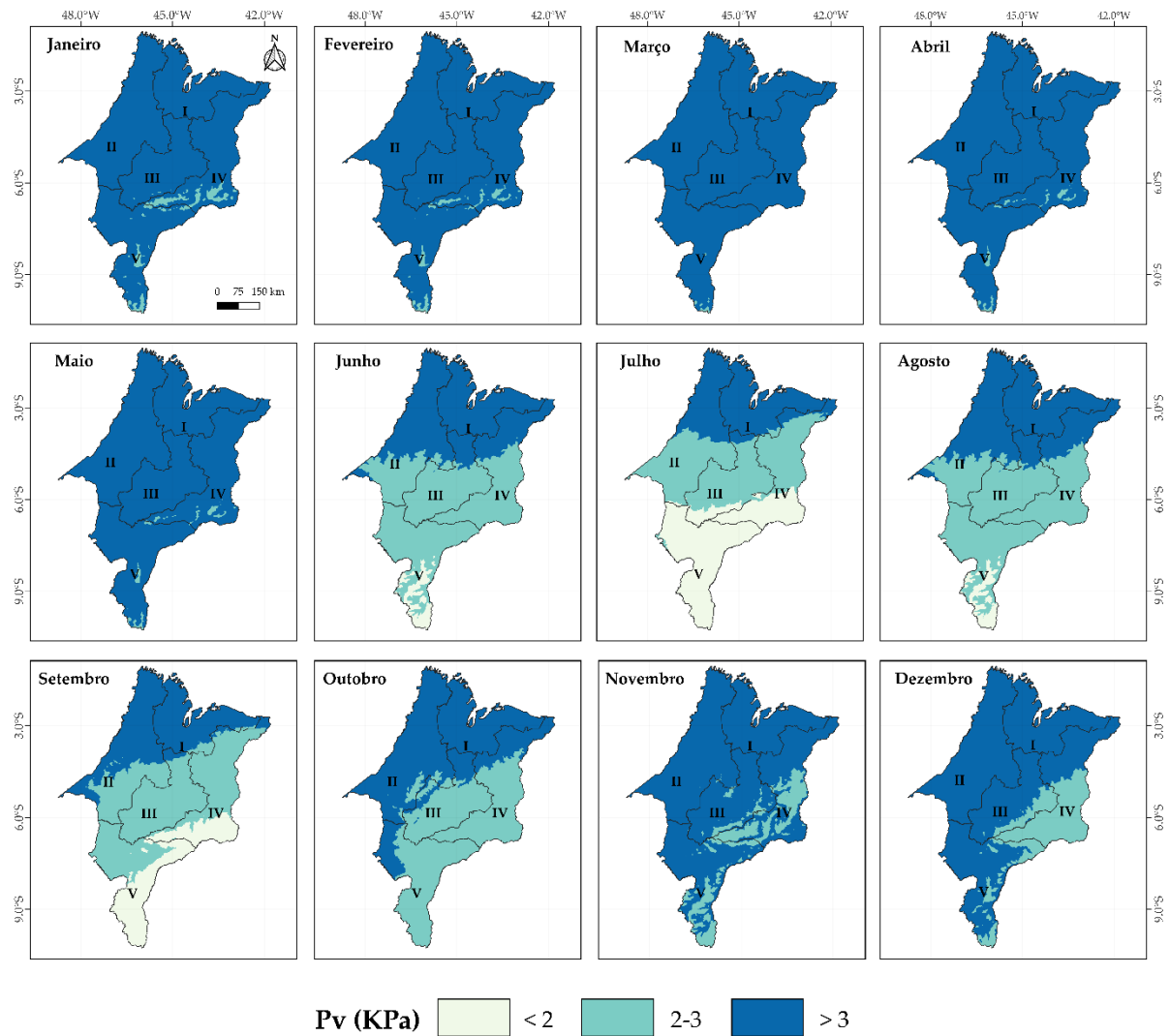
Apêndice 9 - Mapas de krigagem dos valores mensais de temperatura do ar de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.



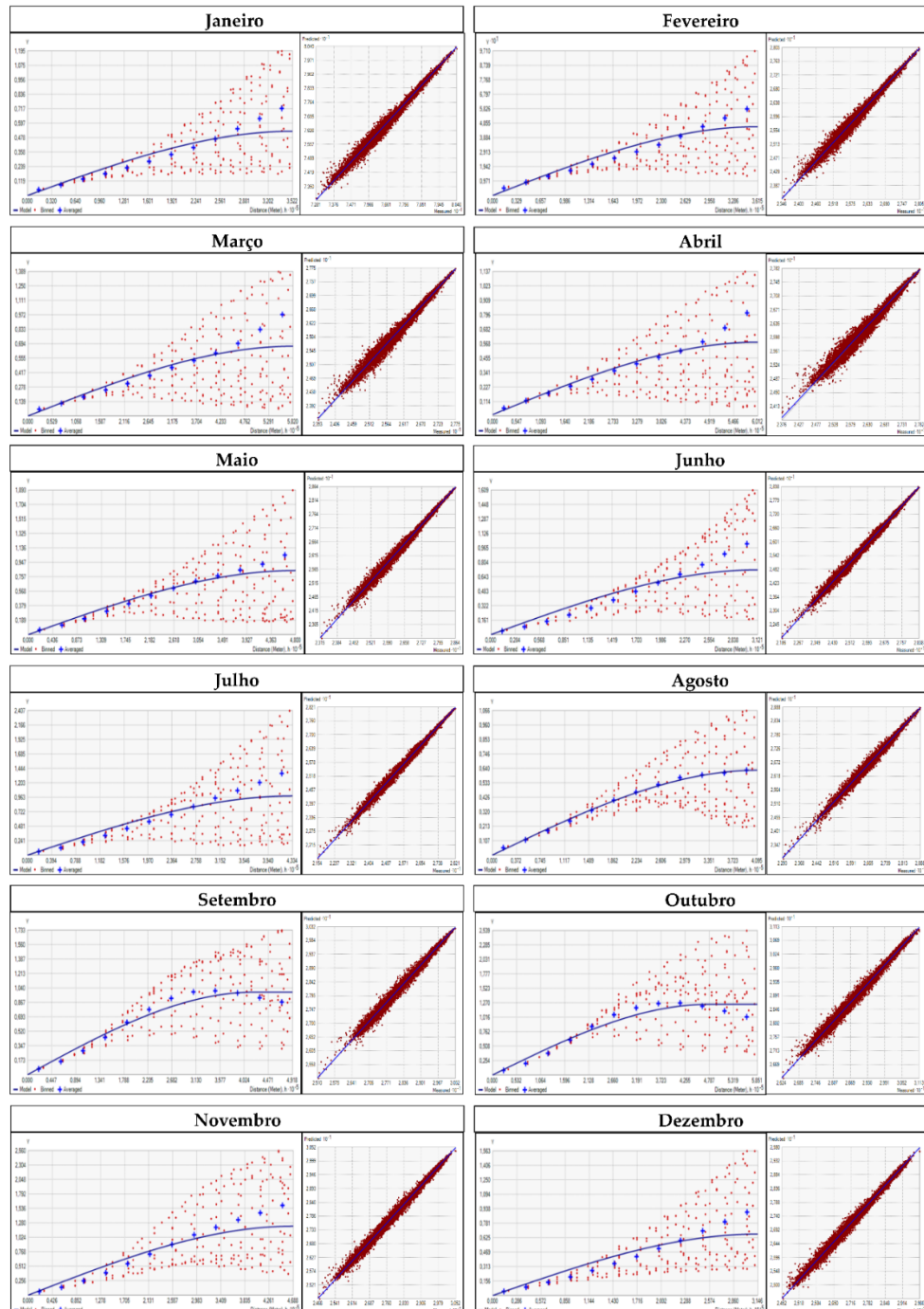
Apêndice 10 - Mapas de krigagem dos valores mensais velocidade do vento de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.



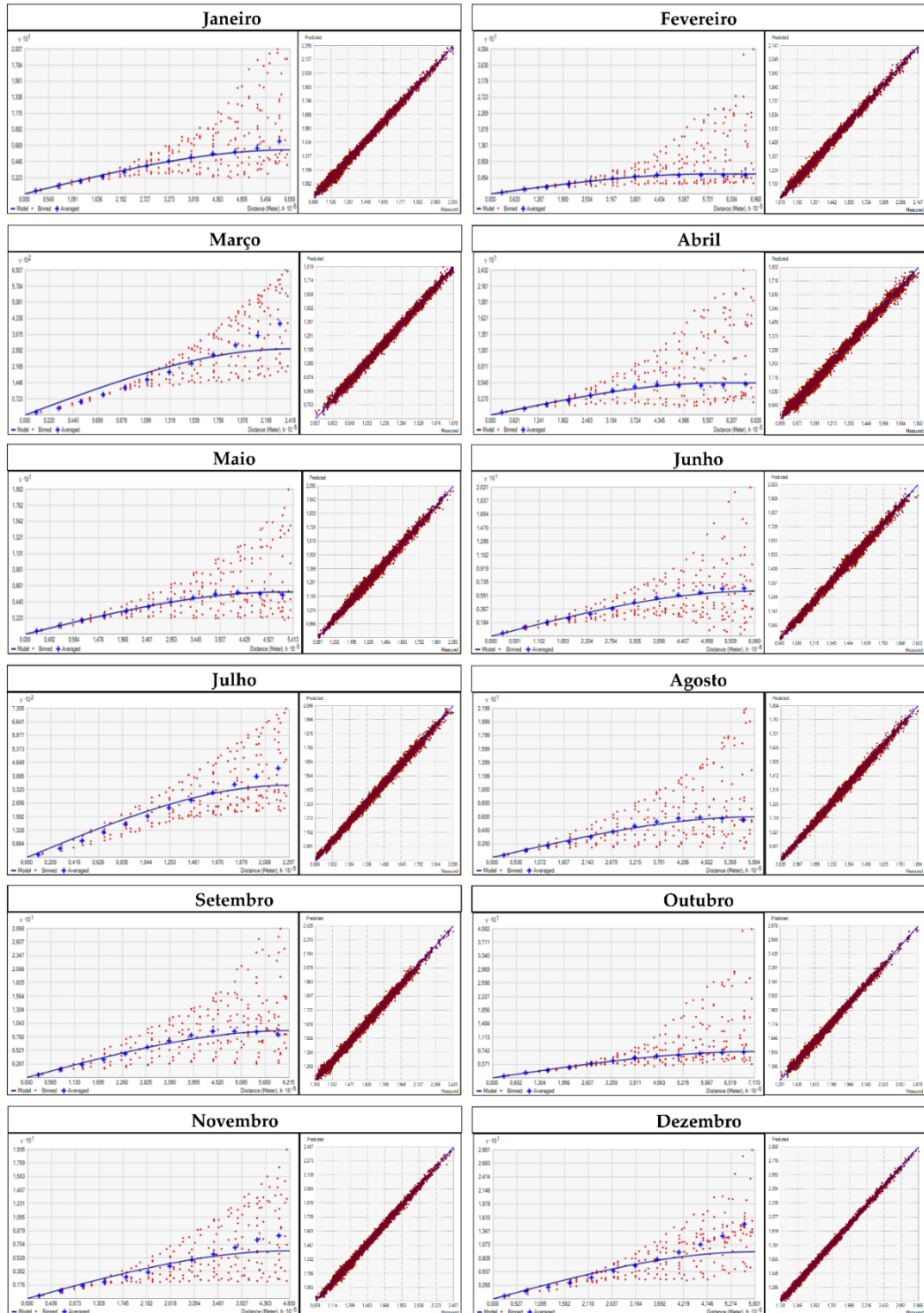
Apêndice 11 -Mapas de krigagem dos valores mensais pressão de vapor de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.



Apêndice 12- Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas de krigagem mensais da temperatura do ar de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão.



Apêndice 13 -Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas de krigagem mensais da velocidade do vento de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão.





Apêndice 14 - Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas de krigagem mensais da pressão de vapor de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão.

