



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
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>



Universidade Federal do Maranhão

Programa de Pós-graduação em Ciência Animal

ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO E IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A BOVINOCULTURA DE LEITE NO ESTADO DO MARANHÃO

ANDRESSA CARVALHO DE SOUSA

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
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>



ANDRESSA CARVALHO DE SOUSA

ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO E IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A BOVINOCULTURA DE LEITE NO ESTADO DO MARANHÃO

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): Prof. Dr. Nitalo André Farias Machado

Coorientador (a): Prof. Dr. Marcos Vinícius da Silva

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
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>



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

Carvalho de Sousa, Andressa.

Zoneamento bioclimático e impactos das mudanças climáticas para a bovinocultura de leite no estado do maranhão / Andressa Carvalho de Sousa. - 2026.

103 p.

Coorientador(a) 1: Marcos Vinícius da Silva.

Orientador(a): Nitalo André Farias Machado.

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

1. Biometeorologia Animal. 2. Estresse Térmico. 3. Modelagem Geoestatística. I. Vinícius da Silva, Marcos. II. André Farias Machado, Nitalo. 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
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>



ANDRESSA CARVALHO DE SOUSA

ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO E IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A BOVINOCULTURA DE LEITE NO ESTADO DO MARANHÃO

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 EXAMINADOR

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

Prof. Dr. José Antônio Delfino Barbosa Filho (1º Examinador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Danillo Marte Pereira (2º Examinador)
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Marcos Renan Lima Leite (3º Examinador)
Instituto Federal do Piauí



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
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>



*“Consagre ao Senhor tudo o que
você faz, e os seus planos serão bem-
sucedidos”.*

Provérbios 16:3



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
Homepage: <http://www.ppgca.ufma.br>



A minha mãe, Antônia Selma, pelo amor, apoio incondicional e por sempre fazer tudo o que foi possível para que eu chegasse até aqui.

Dedico!



AGRADECIMENTOS

A Deus, por seu amor, graça e misericórdia, e por ter me permitido viver os pedidos das minhas orações. Toda honra e toda glória sejam dadas a ti, Senhor.

À minha mãe, Antônia Selma, que mesmo com poucos recursos, sempre batalhou para me proporcionar o melhor. Em todos os momentos estive ao meu lado e tornou-se o motivo para eu nunca desistir dos meus sonhos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Nitalo André Farias Machado, que foi um pai e amigo desde a graduação. Seu incentivo, paciência, apoio constante e conhecimento, sem dúvida, foram fatores que moldaram a minha trajetória acadêmica. Deixo registrado meu eterno agradecimento pela sorte de ter sido sua orientada.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Marcos Vinícius da Silva, pelos ensinamentos, pela paciência e pelo empenho, que foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço também ao INOVAR por todas as experiências e oportunidades proporcionadas ao longo desses anos. Um agradecimento especial a Cyntia Airagna, Matheus Quariguasi, Maria Gabriela, que contribuíram de alguma forma para a realização desta conquista.

Às minhas companheiras de disciplinas, Joana Kellany e Thalia Caldas, por tornarem os momentos mais leves e agradáveis.

À Universidade Federal do Maranhão e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal – PPGCA/UFMA, minha gratidão pelos ensinamentos fundamentais para o 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. A 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 possibilitou a realização da presente pesquisa.



RESUMO

O zoneamento bioclimático é uma ferramenta importante para a bovinocultura leiteira, pois permite identificar áreas de maior vulnerabilidade ao estresse térmico e subsidiar estratégias de manejo, planejamento territorial e adaptação às mudanças climáticas. Assim, o objetivo com este foi realizar o zoneamento bioclimático e avaliar o impacto das mudanças climáticas para a bovinocultura de leite no Maranhão. Para isso, avaliou-se a variabilidade espacial e temporal da carga de calor ambiental e de seus efeitos sobre o risco de estresse térmico em bovinos via Índice de Temperatura e Umidade (ITU) calculado a partir de dados históricos (2012-2023) e projeções climáticas futuras sob os cenários intermediário (RCP4.5) e pessimista (RCP8.5), derivados do modelo Eta/INPE. Foram utilizados dados meteorológicos de temperatura do ar e velocidade do vento provenientes da plataforma *TerraClimate*. Também se estimou o Declínio da Produção de Leite (DPL) em vacas com potencial produtivo de 10 e 25 kg/vaca/dia. A variabilidade espacial foi avaliada por meio de técnicas de geoestatística, com ajuste de semivariogramas, interpolação por krigagem ordinária e elaboração de mapas temáticos. Os resultados de ITU evidenciaram um gradiente térmico decrescente no sentido norte-sul, apresentando as maiores extensões territoriais com ITU > 80, durante anos 2012, 2013, 2015 -2017, indicando um maior risco de estresse térmico. Além disso, os valores do DPL foram mais acentuadas em bovinos de leite de alta produção, devido à maior produção de calor metabólico e à maior demanda energética associada à lactação. As projeções climáticas indicaram que no cenário RCP4.5, mais de 60% do Maranhão poderá apresentar valores médios de ITU entre 78 e 81 até o final do século, com perdas superiores a 1,5 kg/vaca/dia para animais de produção moderada e 4 kg/vaca/dia para animais de alta produção no longo prazo. No cenário RCP8.5, projeta-se a expansão de áreas com ITU > 86, associadas a condições de emergência térmica, com perdas estimadas superiores a 4 kg/vaca/dia para animais de produção moderada e 9 kg/vaca/dia para animais de alta produção. Os resultados indicam elevada vulnerabilidade da bovinocultura leiteira maranhense ao estresse térmico e reforçam a necessidade de estratégias de adaptação, incluindo seleção de animais mais adaptados às condições climáticas locais, melhorias nas instalações, sombreamento, ventilação, disponibilidade adequada de água, ajustes no manejo alimentar e sistemas de resfriamento. Conclui-se que o zoneamento bioclimático pode subsidiar a identificação de áreas prioritárias e orientar estratégias de manejo e planejamento produtivo, contribuindo para aumentar a resiliência e a sustentabilidade da bovinocultura leiteira diante das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Biometeorologia animal, Estresse térmico, Modelagem geoestatística.



ABSTRACT

Bioclimatic zoning is an important tool for dairy cattle production, as it allows the identification of areas with greater vulnerability to heat stress and supports management strategies, territorial planning, and adaptation to climate change. Therefore, this study aimed to perform bioclimatic zoning and assess the impacts of climate change on dairy cattle production in Maranhão, Brazil. The spatial and temporal variability of environmental heat load and its effects on heat stress risk in cattle were evaluated using the Temperature-Humidity Index (THI), calculated from historical data (2012–2023) and future climate projections under the intermediate (RCP4.5) and pessimistic (RCP8.5) scenarios derived from the Eta/INPE model. Meteorological data on air temperature and wind speed were obtained from the TerraClimate platform. Decline in Milk Production (DMP) was also estimated for cows with production potentials of 10 and 25 kg cow⁻¹ day⁻¹. Spatial variability was assessed using geostatistical techniques, including experimental semivariogram fitting, ordinary kriging interpolation, and thematic mapping. The THI results revealed a decreasing thermal gradient from north to south, with the largest areas presenting THI values above 80 occurring in 2012, 2013, and 2015–2017, indicating a higher risk of heat stress. Furthermore, DMP was more pronounced in high-producing dairy cattle due to their greater metabolic heat production and higher energy requirements associated with lactation. Climate projections indicated that, under the RCP4.5 scenario, more than 60% of Maranhão may present mean THI values between 78 and 81 by the end of the century, with losses exceeding 1.5 kg cow⁻¹ day⁻¹ for moderately producing animals and 4 kg cow⁻¹ day⁻¹ for high-producing animals in the long term. Under the RCP8.5 scenario, the expansion of areas with THI values above 86 is projected, corresponding to emergency heat stress conditions, with estimated losses exceeding 4 kg cow⁻¹ day⁻¹ for moderately producing animals and 9 kg cow⁻¹ day⁻¹ for high-producing animals. The results indicate high vulnerability of dairy cattle production in Maranhão to heat stress and reinforce the need for adaptation strategies, including the selection of animals better adapted to local climatic conditions, improvements in housing facilities, shading, ventilation, adequate water availability, adjustments in feeding management, and cooling systems. It is concluded that bioclimatic zoning can support the identification of priority areas and guide management and production planning strategies, contributing to increased resilience and sustainability of dairy cattle production under climate change.

Keywords: Animal biometeorology, Thermal stress, Geostatistical modeling



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 Considerações sobre a bovinocultura no Maranhão	18
2.2 Estresse térmico em bovinos	21
2.3 Mudanças Climáticas	25
2.4 Geoprocessamento aplicado ao zoneamento bioclimático	27
2.5 Geoestatística	29
3. OBJETIVOS	32
3.1. Geral	32
3.2. Específicos	32
4. MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1 Caracterização da área de estudo	33
4.2 Coleta e Processamento de dados	34
4.3 Análise de dados	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 Análise de <i>Boxplot</i>	41
5.2 Cenário Histórico (Anual)	42
5.3 Cenários Futuros (RCP 4.5 e 8.5)	51
6. CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS	59



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição espacial do rebanho bovino por município no estado do Maranhão.....	18
Figura 2. Valor da produção de leite por município no estado do Maranhão	19
Figura 3. Diagrama da variação da temperatura corporal em relação ao aumento da temperatura. Fonte: Adaptado de (A. G. Ehrlemark; K. G. Sällvik, 1996).	22
Figura 4. Diagrama do modelo teórico de semivariograma. Fonte: Yu et al. (2025)...	30
Figura 5. Localização da área de estudo, (a) mapa do estado do Maranhão dividido segundo as zonas fisiográficas de suas mesorregiões (b) modelo digital de elevação (b), zonas climáticas segundo a classificação de Köppen–Geiger	34
Figura 6. Fluxograma metodológico do estudo, incluindo coleta de dados, interpolação, projeções climáticas e geração de mapas temáticos	36
Figura 7. Boxplot da distribuição anual do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) no período de 2012 a 2023.....	41
Figura 8. Mapas de krigagem do ITU de 2012 a 2023 nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.....	46
Figura 9. Mapas de krigagem do declínio da produção de leite (DPL) em relação à capacidade produtiva potencial em condições de conforto térmico por vaca: 10 kg dia ⁻¹ vaca ⁻¹ (PL10), de 2012 a 2023 nas mesorregiões do Maranhão.....	52
Figura 10. Mapas de krigagem do declínio da produção de leite (DPL) em relação à capacidade produtiva potencial em condições de conforto térmico por vaca: 25 kg dia ⁻¹ vaca ⁻¹ (PL25), de 2012 a 2023 nas mesorregiões do Maranhão.....	50
Figura 11. Mapas de krigagem das projeções futuras do ITU sob os cenários RCP4.5	



para os períodos de curto prazo (2011–2040), médio prazo (2041–2070) e longo prazo (2071–2100) nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.....52

Figura 12. Mapas de krigagem das projeções futuras do ITU sob os cenários RCP8.5 para os períodos de curto prazo (2011–2040), médio prazo (2041–2070) e longo prazo (2071–2100) nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.....58

Figura 13. Mapas de krigagem do declínio da produção de leite (DPL) em relação à capacidade produtiva potencial em condições de conforto térmico por vaca: 10 kg dia⁻¹ vaca⁻¹ (PL10) (a) e 25 kg dia⁻¹ vaca⁻¹ (PL25) (b), com base nas projeções futuras do ITU.....54

Figura 14. Mapas de krigagem do declínio da produção de leite (DPL) em relação à capacidade produtiva potencial em condições de conforto térmico por vaca: 10 kg dia⁻¹ vaca⁻¹ (PL10) (a) e 25 kg dia⁻¹ vaca⁻¹ (PL25) (b), com base nas projeções futuras do IT55



LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Índice de Temperatura e Umidade (ITU) para o início do nível de estresse em bovinos leiteiros, bovinos de corte e bovinos em geral, classificados como estresse térmico moderado, alto e extremo.	38
Tabela 2. Resumo das estatísticas descritivas para os valores anuais do ITU.....	44
Tabela 3. Validação cruzada do modelo esférico adotado para a construção dos mapas de krigagem do ITU no Maranhão.....	45
Tabela 4. Parâmetros para os modelos de semivariograma ajustados e grau de dependência espacial.	46



LISTA DE ABREVIACÕES

- Aw – Clima tropical com chuvas de verão (classificação de Köppen-Geiger)
- Am – Clima equatorial de monção (classificação de Köppen-Geiger)
- As – Clima tropical com estação seca no verão (classificação de Köppen-Geiger)
- ASE – Média do erro padronizado
- CMIP6 – Coupled Model Intercomparison Project – Phase 6
- DPL – Declínio da Produção de Leite
- ETA/INPE – Modelo climático regional Eta do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
- FR – Frequência Respiratória
- GEE – Gases de Efeito Estufa
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICA – Índice Climático Abrangente
- ICT – Índice de Carga Térmica
- IETV – Índice de Estresse Térmico em Vacas
- IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
- ITU – Índice de Temperatura e Umidade
- ITUadj – Índice de Temperatura e Umidade ajustado
- ITGU – Índice de Temperatura do Globo Negro e Umidade
- LWSI – Livestock Weather Safety Index
- MCGs – Modelos Climáticos Globais

ME – Erro médio

MSE – Erro quadrático médio

NP – Produção Normal de Leite

PL10 – Produção potencial de 10 kg de leite por vaca por dia

PL25 – Produção potencial de 25 kg de leite por vaca por dia

RMSE – Raiz do erro quadrático médio

RMSSE – Raiz do erro quadrático médio padronizado

RCP 4.5 – Representative Concentration Pathway 4.5

RCP 8.5 – Representative Concentration Pathway 8.5

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SSPs – Shared Socioeconomic Pathways

TA – Temperatura do ar

TCI – Temperatura Crítica Inferior

TCS – Temperatura Crítica Superior

Tmax – Temperatura máxima do ar

Tmin – Temperatura mínima do ar

TR – Temperatura Retal

UTCI – Universal Thermal Climate Index

Vv – Velocidade do vento

ZTN – Zona Termoneutra

1. INTRODUÇÃO

A mudança climática e o aquecimento global impõem desafios crescentes à pecuária, especialmente em países em desenvolvimento, onde o aumento populacional amplia a demanda por alimentos (FAO, 2018; Gershoni, 2023; Silveira *et al.*, 2026). Até 2050, a população global deverá aumentar mais de 30%, demandando maior produção de alimentos (FAO, 2009). Entretanto, esse aumento ocorrerá em um cenário de intensificação das mudanças climáticas, caracterizado pela elevação da temperatura do ar e maior frequência de ondas de calor, condições que intensificam o estresse térmico nos animais.

O estresse térmico é considerado um fator limitante para bovinocultura de leite. (Ji *et al.*, 2020; Cartwright *et al.*, 2023). Fisiologicamente, desencadeia respostas para manutenção da homeotermia, como aumento da frequência respiratória, vasodilatação e redução do consumo de matéria seca. A diminuição da ingestão de alimento reduz a disponibilidade de nutrientes para a síntese do leite, enquanto o redirecionamento do fluxo sanguíneo para a periferia favorece a dissipação de calor em detrimento de funções produtivas (Ji *et al.*, 2020; Roth, 2020). Impactando diretamente a lucratividade e a sustentabilidade da atividade pecuária (Broom, 2019; Wankar; Rindhe; Doijad, 2021).

Diante desses efeitos, torna-se necessário utilizar ferramentas capazes de caracterizar as condições ambientais às quais os animais estão expostos. Os índices bioclimáticos constituem ferramentas eficazes para avaliar a carga térmica ambiental e estimar níveis de conforto ou desconforto térmico (Herbut; Angrecka; Walczak, 2018; Sejian *et al.*, 2018). Entre esses indicadores, destaca-se o Índice de Temperatura e Umidade (ITU), que integra variáveis meteorológicas e permite avaliar a exposição dos animais ao estresse térmico (Hoffmann *et al.*, 2020). A associação desses índices a técnicas de análise espacial e modelagem geoestatística possibilita representar a distribuição do risco térmico e elaborar zoneamentos bioclimáticos.

No Brasil, o zoneamento bioclimático tem sido utilizado para identificar áreas suscetíveis ao estresse térmico e subsidiar o planejamento da produção animal (Silva *et al.*, 2022). Turco *et al.* (2006) desenvolveram um zoneamento bioclimático para vacas leiteiras no estado da Bahia, evidenciando diferenças regionais nas condições de conforto térmico. De forma semelhante, Aparecido *et al.* (2022) verificaram variações no estresse térmico e seus impactos sobre a produção de leite na região Centro-Oeste, demonstrando a influência das condições climáticas sobre a produtividade.

Diante desse contexto, parte-se da hipótese de que existem diferenças espaciais na carga térmica ambiental no estado do Maranhão e, conseqüentemente, áreas com maior probabilidade de ocorrência de estresse térmico para bovinos leiteiros. Assim, o objetivo com este estudo foi realizar o zoneamento bioclimático para a bovinocultura de leite no estado do Maranhão, integrando técnicas de análise *big data* e modelagem geoestatística. Adicionalmente, buscou-se avaliar os possíveis impactos das mudanças climáticas por meio de projeções para os períodos de curto (2011–2040), médio (2041–2070) e longo prazo (2071–2100), considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1.Considerações sobre a bovinocultura no Maranhão

A pecuária, em especial a bovinocultura, é uma atividade econômica com papel importante no estado do Maranhão. Suas origens remontam ao século XVII, especificamente a 1615, quando famílias portuguesas introduziram bovino do arquipélago dos Açores e posteriormente, foram difundidos pelos bandeirantes (Santos *et al.*, 2021). Atualmente, a bovinocultura maranhense é marcada por um modelo de produção predominantemente extensivo, com o uso de pastagens naturais e uma baixa taxa de tecnificação (Silva *et al.*, 2023).

Em 2024, o Maranhão alcançou um efetivo bovino superior a 10 milhões de cabeças, o que reforça sua expressiva relevância para a pecuária regional. Os municípios com maiores rebanhos do estado são Açailândia (425.312 cabeças), Amarante do Maranhão (359.816), Santa Luzia (358.417), Grajaú (237.361) e Bom Jardim (215.568),conforme ilustrado na Figura 1 (IBGE, 2024).

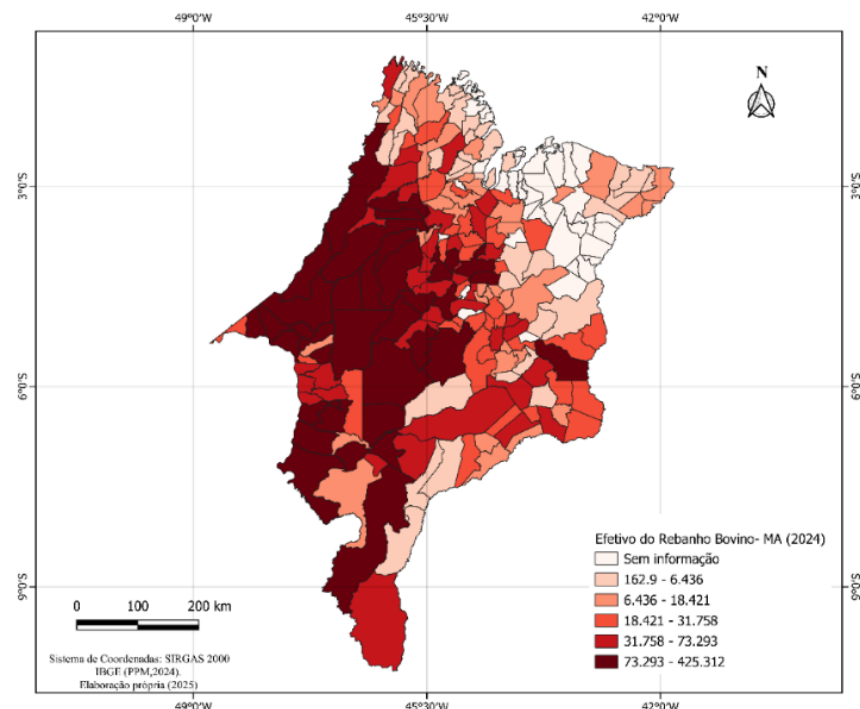


Figura 1.Distribuição espacial do rebanho bovino por município no estado do Maranhão

A distribuição espacial do rebanho bovino evidencia uma forte concentração nas regiões

centro-oeste e sul do estado, áreas historicamente associadas à pecuária extensiva (IBGE, 2024). Esse padrão é coerente com as análises de Dias-Filho (2014), que destacam que zonas de transição entre Cerrado e Amazônia oferecem condições favoráveis aos sistemas extensivos de cria e recria, influenciando diretamente a configuração territorial da bovinocultura.

No que se refere à produção de leite, o Maranhão totalizou 414.996 mil litros em 2024, gerando um valor estimado de R\$ 902.830 mil. Destaca-se especialmente o município de Açailândia, que apresenta o maior valor de produção do estado (69.109 mil reais), conforme representado na Figura 2 (IBGE, 2024). Além disso, o estado abriga uma importante bacia leiteira na região sudoeste, que contribui para a segurança alimentar na Amazônia (Silva *et al.*, 2012). Entretanto, apesar da relevância econômica, a pecuária leiteira maranhense ainda apresenta baixo nível tecnológico quando comparada a outras regiões do país. Esse cenário exige atenção dos formuladores de políticas públicas, considerando o papel estratégico da cadeia produtiva (Dantas *et al.*, 2018).

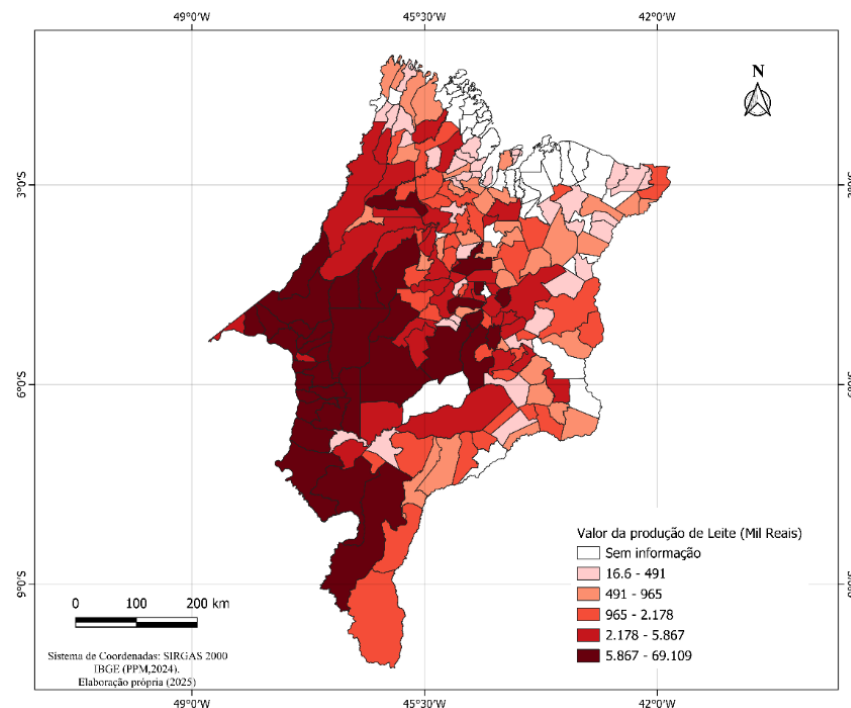


Figura 2. Valor da produção de leite por município no estado do Maranhão

A composição racial do rebanho bovino maranhense está relacionada aos diferentes sistemas de produção. Na pecuária de corte, destacam-se raças zebuínas, como Nelore e Guzerá, enquanto, na produção leiteira, são comuns animais mestiços de origem europeia e zebuína. Em propriedades do leste maranhense, o Girolando representou mais de 50% dos animais avaliados, evidenciando sua importância na produção leiteira regional (Alves, 2016). Silva (2025) também destaca Nelore, Gir, Guzerá e Girolando entre as principais raças utilizadas no estado.

O Girolando, resultado do cruzamento entre Holandês e Gir, apresenta características de interesse para regiões tropicais, associando potencial produtivo e adaptação às condições de calor (Carvalheira *et al.*, 2021). A utilização de animais adaptados às condições ambientais é particularmente relevante no Maranhão, onde a elevada temperatura do ar e a sazonalidade das chuvas podem influenciar o desempenho dos rebanhos.

A climatologia do Maranhão, é caracterizada por uma alternância bem definida entre estação chuvosa e estação seca e por forte variabilidade espacial da temperatura do ar e precipitação. As precipitações totais durante o ano apresentam variação aproximada de 1040 a 2210 mm, conforme as quinze estações avaliadas por Corrêa; Carvalho; Mendes (2023), essa situação pode comprometer a bovinocultura regional, sobretudo no que se refere à oferta e qualidade de forragens e à disponibilidade hídrica.

Na produção leiteira da Microrregião de Imperatriz, uma das principais bacias leiteiras do estado, predominam sistemas baseados em pastagens. Silva *et al.* (2012) verificaram o uso predominante de pastagens formadas por espécies de *Brachiaria*, além de redução da produção durante o período seco. Esses resultados evidenciam a influência da sazonalidade climática sobre a disponibilidade de alimento e o desempenho dos rebanhos.

Entre as forrageiras utilizadas no Maranhão, destacam-se espécies dos gêneros *Urochloa* e *Megathyrsus*, incluindo *Urochloa brizantha* cv. Marandu, *Urochloa ruziziensis*, *Megathyrsus maximus* cv. Tanzânia e cv. Massai. Essas espécies apresentam potencial para sistemas de pastejo e integração de atividades, embora seu desempenho dependa das condições ambientais e do manejo adotado (Araujo Neto *et al.*, 2023).

Além dos aspectos históricos, produtivos e ambientais, a bovinocultura maranhense também enfrenta desafios estruturais relacionados à baixa adoção de tecnologias, e a degradação de pastagens. Gomes *et al.* (2025) Em análise realizada com dados entre 2001 e 2023, identificaram processos de degradação no estado com cerca de 75% das pastagens no

Maranhão apresentaram sinais de degradação, com maior ocorrência nas regiões sul, centro-leste e noroeste

Esse cenário evidencia a necessidade de estratégias que conciliem adaptação genética, manejo das pastagens e adequação dos sistemas de produção às condições climáticas. A recuperação de áreas degradadas, o manejo adequado do pastejo e a adoção de sistemas integrados, como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), constituem alternativas para aumentar a eficiência produtiva e a resiliência dos sistemas pecuários. No contexto maranhense, essas estratégias são especialmente relevantes diante da sazonalidade climática e da ocorrência de áreas extensas de pastagens degradadas (Gomes *et al.*, 2025; Latawiec *et al.*, 2017; Martha; Alves; Contini, 2012)

2.2 Estresse térmico em bovinos

A homeotermia refere-se à capacidade dos animais de manter a temperatura corporal interna relativamente estável, mesmo diante de variações no ambiente (Mitchell *et al.*, 2018). Esse equilíbrio térmico é essencial para a sobrevivência e para o desempenho produtivo. Entretanto, por serem homeotérmicos, quando os animais são expostos a temperaturas do ar excessivamente altas ou baixas, essa estabilidade é comprometida. Nesses cenários, o organismo aciona mecanismos fisiológicos e comportamentais de termorregulação para tentar manter a temperatura corporal constante, porém, quando tais mecanismos se tornam insuficientes, pode ocorrer o estresse térmico (Godyń; Herbut; Angrecka, 2019; Oliveira *et al.*, 2025)

A relação entre a temperatura corporal central e as condições ambientais pode ser compreendida por meio de diferentes zonas térmicas, que orientam a resposta fisiológica dos animais. A mais conhecida é a Zona Termoneutra (ZTN), ilustrada na Figura 3, que corresponde à faixa de temperatura ambiental na qual o bovino mantém a homeotermia utilizando apenas mecanismos de perda de calor sensível, sem necessidade de elevar o metabolismo ou recorrer ao resfriamento evaporativo (Shephard; Maloney, 2023). A ZTN é limitada pela temperatura crítica inferior (TCI) e pela temperatura crítica superior (TCS) do ambiente. Dentro dessa faixa, os animais permanecem em conforto térmico, com mínimo custo fisiológico, pois não precisam ativar mecanismos adicionais para dissipar calor ou produzir calor metabólico. Assim, conseguem manter a temperatura corporal em equilíbrio com ambiente e direcionar sua energia

de forma eficiente para funções produtivas e reprodutivas (Gujar *et al.*, 2023; Kamal *et al.*, 2018).

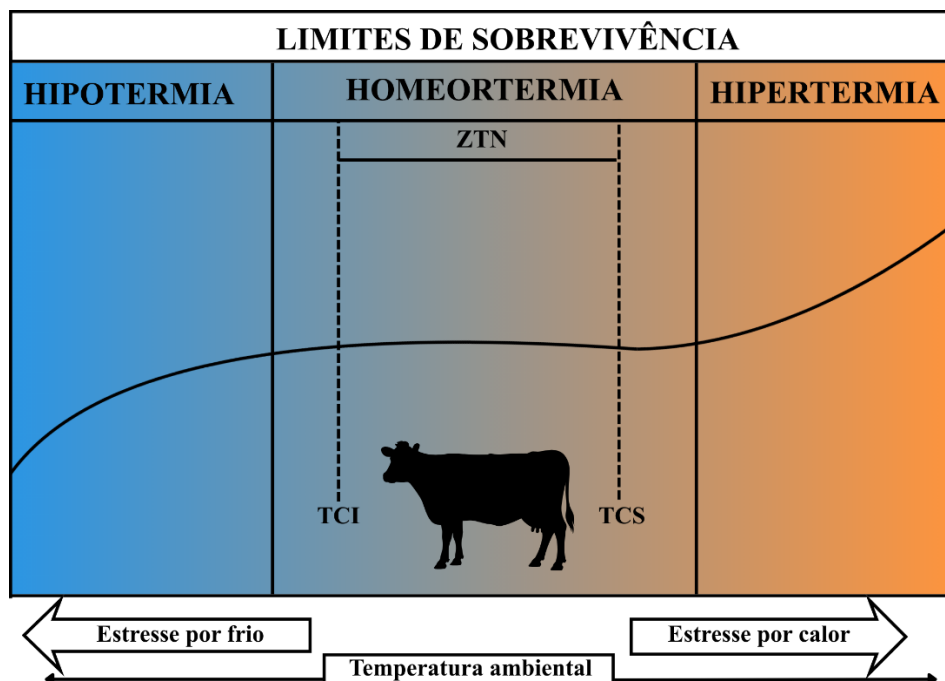


Figura 3. Zona de termoneutralidade. Fonte: Adaptado de Aparecido et al. (2022).

O estresse térmico representa uma das principais limitações para a eficiência dos sistemas de produção animal, resultando em inúmeros efeitos negativos (Santos *et al.*, 2021). Que provocam alterações profundas no metabolismo dos bovinos, manifestando-se em redução do consumo de matéria seca, perda de peso, atraso no desenvolvimento corporal e maior predisposição a distúrbios reprodutivos e doenças, o que eleva os custos com tratamentos veterinários (Cartwright *et al.*, 2023; Kamal *et al.*, 2018). Na pecuária leiteira, seus impactos são ainda mais evidentes, causando queda na produção de leite e menor ganho de peso (Sejian *et al.*, 2022). Esses efeitos, combinados, comprometem diretamente o bem-estar animal e a lucratividade dos produtores.

A intensidade da resposta ao estresse térmico e o ponto a partir do qual surgem perdas produtivas variam entre indivíduos (Hammami *et al.*, 2013). Essa variabilidade é influenciada por fatores como espécie, raça, idade, pigmentação, potencial genético, estado fisiológico, nutrição, tamanho corporal e histórico de exposição. Os animais de alto potencial produtivo são os mais sensíveis (Cartwright *et al.*, 2023; Godde *et al.*, 2021), uma vez que a produção de leite

eleva a carga metabólica de calor (Polsky; Von Keyserlingk, 2017).

As consequências econômicas do estresse térmico são amplamente reconhecidas. St-Pierre; Cobanov; Schnitkey (2003) estimaram que, nos Estados Unidos, as perdas anuais relacionadas ao estresse térmico variavam entre US\$ 897 milhões e US\$ 1,77 bilhão. Em escala global, o cenário é igualmente preocupante: estima-se que 22% do rebanho leiteiro africano enfrentará estresse térmico severo nas próximas décadas, o que pode resultar em redução de 200 a 400 kg de leite por vaca por ano até 2100 (Rahimi *et al.*, 2020; Rahimi *et al.*, 2021). O estresse térmico impõe à indústria mundial de laticínios mais de 2 bilhões de dólares em perdas anuais, decorrentes da queda de produtividade, maior incidência de doenças e necessidade de investimentos em sistemas de resfriamento, impactos que são particularmente intensos em regiões tropicais, onde as altas temperaturas do ar persistentes e as limitações de infraestrutura ampliam a vulnerabilidade dos sistemas produtivos (Sejian *et al.*, 2018; St-Pierre; Cobanov; Schnitkey, 2003).

A avaliação do estresse térmico em bovinos tem evoluído ao longo das últimas décadas, incluindo diferentes abordagens. De modo geral, essa avaliação pode ser realizada por meio de indicadores baseados no animal ou no ambiente. Os indicadores animais refletem respostas fisiológicas e comportamentais desencadeadas pela exposição ao calor, permitindo identificar alterações relacionadas à termorregulação, ao comportamento e ao desempenho produtivo (Herbut *et al.*, 2019; Sejian *et al.*, 2018)

A avaliação do estresse térmico em bovinos tem evoluído ao longo das últimas décadas, utilizando indicadores baseados no animal e no ambiente. Os indicadores animais refletem respostas fisiológicas e comportamentais relacionadas à manutenção da homeotermia, como aumento da frequência respiratória e da temperatura corporal, maior ingestão de água, redução do consumo de alimento, busca por sombra e alterações no padrão de atividade (West, 2003; Wankar; Rindhe; Doijad, 2021). Essas respostas constituem mecanismos de termorregulação que favorecem a dissipação do calor e a manutenção da temperatura corporal dentro dos limites fisiológicos.

Quando a carga térmica excede a capacidade de compensação do animal, o desequilíbrio térmico pode comprometer o consumo de alimento, a eficiência reprodutiva e o desempenho produtivo (West, 2003; Yan; Li; Shi, 2021). Por outro lado, os indicadores ambientais baseiam-se principalmente em parâmetros meteorológicos que atuam como fatores de risco e são

amplamente utilizados para estabelecer limiares críticos de estresse térmico e monitorar preventivamente as condições ambientais (Herbut; Angrecka; Walczak, 2018; Ouellet et al., 2021).

A temperatura retal (TR) permanece como o principal indicador fisiológico utilizado para estimar a temperatura corporal central de bovinos, sendo considerada o método de referência para a avaliação da resposta ao estresse térmico, apesar do crescente uso de técnicas menos invasivas, como a termografia infravermelha e sensores vaginais e ruminais (Godyń et al., 2019; Cai et al., 2023). A TR reflete, de forma direta, a temperatura corporal determinada pelo equilíbrio entre a perda e o ganho de calor (Cardoso *et al.*, 2015). O aumento da TR está associado à exposição dos animais a condições ambientais estressantes, sendo considerado indicativo de estresse térmico quando ultrapassa 39,2 °C, enquanto os valores de referência em condições de conforto situam-se entre 38,3 e 38,9 °C (Garcia *et al.*, 2015; Rashamol *et al.*, 2018). Apesar de sua confiabilidade, a técnica pode ser considerada invasiva, trabalhosa, estressante e pouco prática para grandes rebanhos, o que limita sua aplicação rotineira (Singaravadivelan *et al.*, 2025).

A frequência respiratória (FR) é outro indicador fisiológico frequentemente utilizado para avaliar o estresse térmico e a saúde em bovinos (Tresoldi; Hejazi; Tucker, 2025). A sua forma de mensuração pode ser por observação direta ou por sistemas de análise de vídeo, sendo expressa em movimentos respiratórios por minuto, podendo ser facilmente medida e com pouco risco de causar estresse adicional aos animais. (Gaughan *et al.*, 2000; Scharf *et al.*, 2012). Segundo Garcia et al. (2015), os valores de referência para bovinos variam entre 20–30 mov. /min, enquanto frequências acima de 60 mov. /min indicam polipneia associada ao estresse térmico.

A introdução e a consolidação dos índices bioclimáticos representaram um avanço importante ao permitir a integração entre condições ambientais e respostas fisiológicas. O Índice de Temperatura e Umidade (ITU), originalmente proposto por Thom (1959) para avaliar o desconforto térmico humano e posteriormente adaptado para a produção animal (NRC, 1971), tornou-se um dos indicadores mais utilizados por sua simplicidade. Esse índice permite relacionar a temperatura do ar e a umidade relativa com o risco de desconforto térmico, sendo amplamente empregado em estudos biometeorológicos. Entretanto, o ITU em sua formulação original não leva em consideração a influência da velocidade do vento e da radiação solar,

fatores que exercem impacto no balanço térmico dos bovinos (Mylostyvyi; Izhboldina, 2025; Yan *et al.*, 2021).

Para reduzir essas limitações, adaptações e novos índices foram propostos ao longo do tempo. Um exemplo é o ITU ajustado (ITUadj) definido por Mader; Davis; Brown-Brandl, (2006), como também Silva *et al.* (2020), apresentaram uma modificação do ITU ao incorporar a velocidade do vento na equação, aprimorando a representação do efeito do resfriamento convectivo. Além disso, índices como o Índice de Globo Negro e Umidade (ITGU) e o Índice de Carga Térmica (ICT) incorporam a radiação solar e o efeito combinado do vento na equação, proporcionando uma avaliação mais realista das condições microclimáticas às quais os animais estão expostos (Buffington *et al.*, 1981; Gaughan *et al.*, 2008).

Além desses, diversos outros índices têm sido desenvolvidos para caracterizar o grau de estresse térmico com base em diferentes combinações de variáveis meteorológicas, tais como, o Índice Climático Abrangente (ICA) (Mader; Johnson; Gaughan, 2010) e o Índice de Estresse Térmico em Vacas (IETV) (Silva; Maia; Macedo Costa, 2015), entre outros. Em conjunto, esses índices ampliam a capacidade de diagnóstico e monitoramento do estresse térmico, contribuindo para o planejamento e a adaptação dos sistemas de produção pecuária em ambientes tropicais.

Alguns estudos demonstram claramente a utilidade desses índices. Choi *et al.* (2024), compararam quatro índices térmicos (ITU, ITGU, ITUadj e ICA) em sistemas leiteiros dos EUA, revelando que estresse frio e calor reduzem a produção de leite em aproximadamente de 6%. Os autores demonstraram que a variabilidade na produção de leite foi mais bem explicada pelo ITUadj e ICA. De forma complementar, Yan *et al.* (2021), ao avaliarem diferentes índices em vacas leiteiras sob clima temperado no norte da China, verificaram que os índices mais abrangentes, como o ICA e o ETIC, apresentaram correlações mais elevadas com indicadores fisiológicos de estresse térmico.

2.3 Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas consistem em alterações persistentes nos padrões climáticos globais, evidenciadas pelo aumento na frequência e intensidade de eventos extremos como ondas de calor e períodos de alta umidade (Gershoni, 2023). Tais mudanças acarretam consequências ambientais, sociais e econômicas profundas, incluindo perdas de biodiversidade,

insegurança alimentar, elevação dos riscos à saúde e migração populacional, configurando-se como uma ameaça aos sistemas naturais (Calvin *et al.*, 2023). As mudanças climáticas são um desafio global complexo que afeta diferentes dimensões ecológicas, sociopolíticas e socioeconômicas, ambientais (Rawat; Kumar; Khati, 2024).

A intensificação das mudanças climáticas está diretamente relacionada ao aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), resultante de atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento e práticas agropecuárias intensivas (Thornton *et al.*, 2009). Esse acúmulo de GEE tem reforçado o efeito estufa natural, promovendo o aquecimento global e desencadeando alterações profundas no sistema climático. Entre os principais sinais desse processo destaca-se o aumento contínuo das temperaturas médias globais (Garcia-Soto *et al.*, 2021).

As evidências científicas mostram que a temperatura da superfície terrestre vem aumentando aproximadamente 0,13 °C por década desde 1950, refletindo a aceleração do aquecimento global (IPCC, 2021). As projeções indicam que, até o final do século XXI, a temperatura média global poderá subir entre 1,8 °C e 4 °C, dependendo do volume das emissões futuras de GEE e dos cenários socioeconômicos adotados. Independentemente do cenário, os estudos concordam quanto ao aumento contínuo do aquecimento nas próximas décadas, reforçando a urgência de estratégias de mitigação e adaptação (IPCC 2007).

Para compreender e enfrentar os impactos das mudanças climáticas, pesquisadores têm utilizado diversas ferramentas analíticas e técnicas de modelagem capazes de simular o comportamento do sistema climático em diferentes cenários. Os modelos climáticos desempenham papel central nesse processo, permitindo projetar alterações em variáveis como temperatura do ar, precipitação, nível do mar e frequência de eventos extremos, além de estimar seus efeitos sobre setores sensíveis, como agricultura, recursos hídricos, silvicultura e saúde pública. Apesar de sua relevância, esses modelos ainda apresentam limitações relacionadas à disponibilidade de dados e às incertezas às simulações, o que exige uma interpretação cautelosa dos resultados, entendidos como estimativas aproximadas e não previsões determinísticas (Rawat; Kumar; Khati, 2024)

Entre as principais ferramentas disponíveis, destacam-se os Modelos Climáticos Globais (MCGs), amplamente reconhecidos como referência para avaliar os impactos das mudanças climáticas em variáveis atmosféricas, oceânicas e hidrológicas. Esses modelos

tridimensionais simulam processos físicos em escalas globais e continentais, permitindo análises de múltiplos cenários climáticos futuros (Chen *et al.*, 2019). O avanço das pesquisas culminou na sexta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6), lançado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Essa fase incorpora as Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs), que consideram fatores como urbanização, crescimento populacional e tendências econômicas, ampliando a capacidade de representar diferentes caminhos de desenvolvimento humano e seus possíveis efeitos sobre o clima futuro (Eyring *et al.*, 2016)

Alguns estudos têm buscado compreender como esses cenários projetados podem afetar a produção na pecuária nas próximas décadas. Ferreira *et al.*, (2026) utilizando quatro modelos do CMIP6, identificaram uma tendência de aumento generalizado das temperaturas no Brasil, com incrementos médios próximos de 1°C no curto prazo e projeções que podem atingir até 4°C em regiões como Norte e Centro-Oeste ao final do século. Além disso, Emediegwu; Ubabukoh, (2023) realizaram previsões que mostram que as mudanças climáticas reduzirão a produção animal em mais 20% em (2041–2060) e em outros 40% até o final do século (2081–2100), assumindo que não haja nenhuma adaptação além do grau de adaptação observado no período histórico.

Os principais impactos das mudanças climáticas sobre as atividades pecuárias podem ser classificados em diretos e indiretos. As mudanças climáticas afetam diretamente os bovinos comprometendo a ingestão de alimentos, produção de leite e carne, eficiência reprodutiva e o surgimento de novas doenças (Anuta; Wang; Kinay, 2025). Por exemplo, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) destaca que o aumento desfavorável das temperaturas pode causar estresse à saúde do gado e, tornando-os vulneráveis a patógenos e aumentando a disseminação de doenças por animais infectados (FAO, 2020). Além disso, Barati *et al.*(2008) também mostram que o estresse térmico exerce influência sobre o crescimento dos oócitos, a taxa de prenhez e o desenvolvimento embrionário, reforçando os efeitos negativos das condições ambientais na fisiologia animal. Os efeitos indiretos, por sua vez, estão associados às alterações na quantidade e qualidade das forragens (Polley *et al.*, 2013), à redução da disponibilidade hídrica (Nardone *et al.*, 2010). Em situações extremas, essas condições podem resultar em mortalidade animal (Vitali *et al.*, 2015), evidenciando a amplitude e a gravidade dos efeitos das mudanças climáticas sobre a pecuária. .

2.4 Geoprocessamento aplicado ao zoneamento bioclimático

O geoprocessamento refere-se ao conjunto de tecnologias e técnicas voltadas à coleta, armazenamento, manipulação, análise e visualização de dados geográficos, integrando princípios da ciência da informação geográfica aos recursos da tecnologia da informação. Seu uso tornou-se fundamental para estudos ambientais e agropecuários, pois permite compreender a distribuição espacial de fenômenos e subsidiar decisões baseadas no território (Campos; Souza; Freitas, 2024).

Entre as ferramentas mais utilizadas no geoprocessamento, destacam-se os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que funcionam como plataformas integradas para gerenciar bancos de dados espaciais e não espaciais, possibilitando a sobreposição de camadas, consultas espaciais e análises complexas. De modo geral, um SIG é constituído por componentes de software e hardware que operam sobre dados georreferenciados, viabilizando a coleta, o armazenamento, a edição, o processamento e a análise das informações. Como resultado, os SIGs possibilitam o planejamento e o monitoramento de fenômenos relacionados ao espaço geográfico, gerando produtos digitais como mapas, gráficos, tabelas e relatórios técnicos (Zaidan, 2017).

Essas abordagens têm aplicações amplas no manejo pecuário, auxiliando na identificação de áreas adequadas para criação animal ao considerar atributos como solo, topografia, recursos hídricos e condições ambientais (Denis *et al.*, 2024). Estudos recentes demonstram sua eficácia na definição de zonas favoráveis à produção animal (Balew *et al.*, 2022; Nong *et al.*, 2024; Rana; Moniruzzaman, 2023), bem como na compreensão da disseminação de doenças (Di Lorenzo *et al.*, 2023). Além disso, modelos preditivos de distribuição de habitat integrados ao SIG têm se mostrado eficientes para estimar a adequação de raças animais a diferentes zonas agroecológicas, permitindo alinhamento entre manejo, ambiente e características zootécnicas. (Lozano-Jaramillo *et al.*, 2019)

O uso do geoprocessamento permite organizar, integrar e analisar informações ambientais espacialmente referenciadas, constituindo a base metodológica para estudos que investigam a distribuição espacial de variáveis climáticas e bioclimáticas. Ao lidar com dados provenientes de diferentes fontes e escalas, essas técnicas possibilitam a compreensão da heterogeneidade espacial das condições ambientais, fornecendo subsídios essenciais para

análises integradas do ambiente físico e para a construção de abordagens espaciais voltadas à avaliação de riscos e aptidão territorial (Denis *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023)

Nesse contexto, o zoneamento bioclimático aliado às técnicas de geoprocessamento assume posição estratégica ao integrar séries históricas e dados meteorológicos para gerar mapas temáticos que monitoram condições climáticas e indicam áreas de risco. Alguns trabalhos demonstram esse potencial. Por exemplo, Aparecido *et al.* (2022) utilizaram SIG para elaborar zoneamentos focados em variáveis térmicas. Enquanto, Vinogradova; Titkova (2025) aplicaram zoneamento bioclimático com o índice UTCI para avaliar impactos climáticos atuais e futuros sobre populações humanas.

As geotecnologias, especialmente SIG, sensoriamento remoto e modelagem espacial, são ferramentas indispensáveis para o desenvolvimento de zoneamentos bioclimáticos e para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas (Marinho *et al.*, 2023; Vinogradova; Titkova, 2025). Em cenários futuros marcados por intensificação do aquecimento global, tais tecnologias tornam-se ainda mais relevantes, permitindo gerar mapas temáticos, modelos preditivos e análises de vulnerabilidade com elevada precisão espacial (Scolaro; Martins Vaz; Ghisi, 2025)

2.5 Geoestatística

A geoestatística teve início nos trabalhos desenvolvidos por Daniel G. Krige, na década de 1950, a partir de problemas relacionados à estimativa de reservas minerais. Nesses estudos, Krige demonstrou que a variabilidade dos dados não poderia ser adequadamente representada sem considerar a distância e a direção entre os pontos amostrados (Krige, 1951). Posteriormente, o matemático e geólogo Georges Matheron formalizou esses conceitos ao formular a teoria das variáveis regionalizadas, estabelecendo os fundamentos teóricos da geoestatística moderna (Matheron, 1963). Inicialmente aplicada às indústrias de mineração e petróleo, a geoestatística passou a ser amplamente empregada em diversas áreas das ciências da Terra, como hidrogeologia, hidrologia, meteorologia, oceanografia, geoquímica, ciência do solo, geografia e ecologia da paisagem, consolidando-se como uma ferramenta fundamental para a análise e modelagem de fenômenos espaciais e temporais (Webster; Oliver, 2007).

Do ponto de vista conceitual, a geoestatística constitui um ramo da estatística espacial dedicado à descrição de padrões espaciais e à estimativa de valores de atributos em locais não amostrados, com base na dependência espacial entre observações. Seu princípio fundamental

baseia-se na autocorrelação espacial, segundo a qual pontos próximos tendem a apresentar valores mais semelhantes do que pontos distantes. Essa premissa permite utilizar informações pontuais para inferir a continuidade espacial de um fenômeno, fornecendo estimativas acompanhadas de medidas de incerteza e possibilitando a construção de superfícies contínuas representativas da variável estudada (Wani; Shaista; Wani, 2017)

Nesse contexto, o semivariograma representa um dos elementos centrais da geoestatística, pois descreve quantitativamente a estrutura de dependência espacial dos dados. Além de seu papel exploratório, o semivariograma permite a estimação de parâmetros fundamentais para a interpolação espacial. O semivariograma experimental é obtido a partir das diferenças entre pares de observações em função da distância h , e, posteriormente, ajustado a modelos teóricos, amplamente empregados na descrição de fenômenos ambientais, entre os quais se destacam os modelos esférico, exponencial e gaussiano (Yu; Zhao; Li, 2025), conforme ilustrado na Figura 4. O ajuste desses modelos pode ser realizado por métodos visuais ou por critérios numéricos de otimização, avaliando-se a adequação da curva teórica ao comportamento do semivariograma experimental (Sobjak *et al.*, 2023).

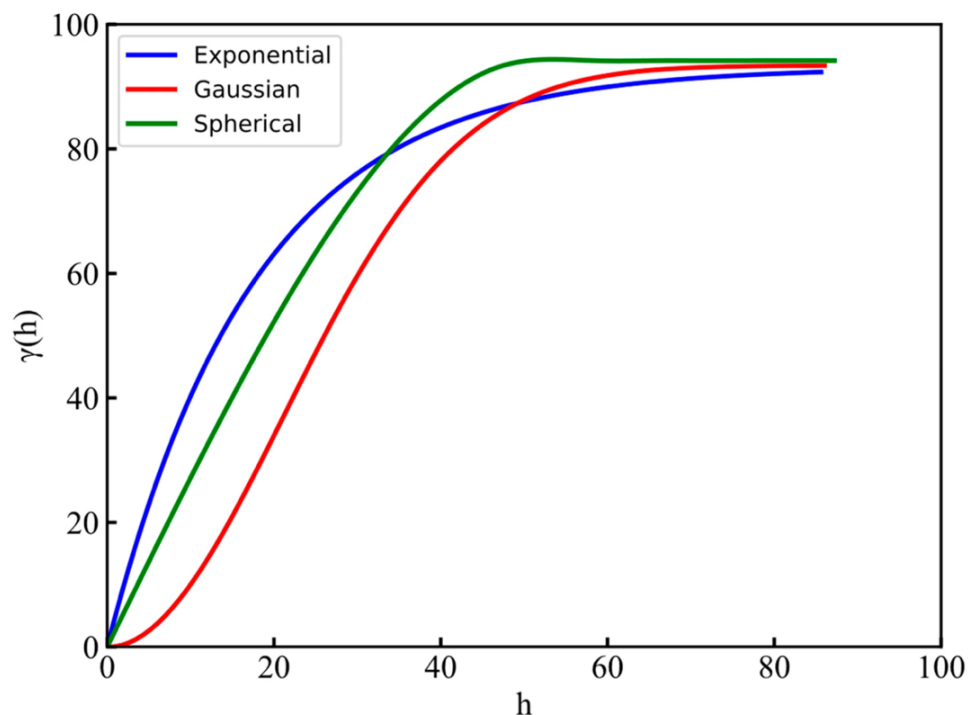


Figura 4. Diagrama do modelo teórico de semivariograma. Fonte: Yu *et al.* (2025)

Os principais parâmetros do semivariograma: efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$) e alcance (a) e possuem interpretações físicas relevantes. A semivariância aumenta com a distância entre as observações até atingir um valor máximo, denominado patamar. A distância correspondente a esse ponto é o alcance, que define o limite da dependência espacial. Já o efeito pepita representa a variância não explicada pela estrutura espacial, associada a erros de medição ou a variabilidade em escalas menores que a distância mínima de amostragem (Cambardella *et al.*, 1994).

Com o semivariograma devidamente ajustado e validado, torna-se possível gerar superfícies contínuas por meio de métodos de interpolação espacial. Dentre eles, a krigagem se destaca por incorporar explicitamente a estrutura de dependência espacial descrita pelo semivariograma, resultando em estimativas não tendenciosas e de variância mínima. Essa característica faz da krigagem um dos interpoladores mais robustos da geoestatística. Existem diferentes modalidades de krigagem, como a krigagem simples, ordinária, indicadora e a cokrigagem, cuja aplicação depende das características dos dados e dos objetivos da análise (Belkhiri; Tiri; Mouni, 2020)

No âmbito da produção animal, o uso da geoestatística tem se consolidado como uma ferramenta eficiente para a análise da variabilidade espacial associada ao conforto térmico. Estudos demonstram seu potencial tanto em sistemas extensivos quanto em ambientes confinados. Marinho *et al.* (2023) aplicaram técnicas geoestatísticas para mapear o estresse térmico em ovinos no Nordeste brasileiro, identificando áreas críticas associadas às condições climáticas regionais. (Ferraz *et al.*, 2018) utilizaram semivariogramas para caracterizar a variabilidade espacial da entalpia em aviários, evidenciando padrões térmicos heterogêneos e possíveis falhas nos sistemas de aquecimento. Queiroz *et al.* (2017) mostraram que mapas de krigagem são ferramentas eficazes para identificar áreas críticas de variabilidade microclimática em galpões. No contexto da pecuária leiteira, Silva *et al.* (2019) observaram diferenças espaciais na temperatura da superfície do úbere entre vacas saudáveis e animais com mastite, reforçando o potencial da geoestatística como suporte ao manejo térmico e sanitário dos rebanhos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

- ✓ Realizar o zoneamento bioclimático para a bovinocultura no estado do Maranhão utilizando modelagem geoestatística e avaliar o impacto das mudanças climáticas com projeções de cenários futuros.

3.2. Objetivos Específicos

- ✓ Calcular e analisar o Índice de Temperatura e Umidade para o estado do Maranhão;
- ✓ Aplicar técnicas de geoestatística para modelar a dependência espacial e elaboração de mapas temáticos;
- ✓ Identificar de áreas e períodos de maior risco de estresse térmico para bovinos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo foi o estado do Maranhão, situado na região Nordeste do Brasil (0,9° S e 10,47° S e 48,89° W e 41,68° W), que compreende uma área de 331.936,949 km² em uma região de transição entre as condições mais secas que caracterizam a região semiárida do Nordeste para as condições úmidas do Norte e da Amazônia (Figura 5). O estado do Maranhão é dividido geograficamente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística em cinco Mesorregiões Geográficas: Norte Maranhense, Oeste Maranhense, Centro Maranhense, Leste Maranhense e Sul Maranhense (IBGE, 2023).

O Maranhão apresenta elevada diversidade ambiental e hidrográfica, com ocorrência de rios, lagos, dunas e manguezais. Essa diversidade está relacionada, entre outros fatores, à posição do estado em uma faixa de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado (Valverde; Marengo, 2014). No extremo leste, os municípios de Araisos e Tutóia apresentam características associadas ao bioma Caatinga (Vommaro; Menezes; Barata, 2020).

Quanto às condições climáticas, o território maranhense apresenta predominância dos tipos (Aw) tropical com chuvas de verão, clima equatorial (Am) e clima de monção (As), de acordo com a classificação proposta por Köppen-Geiger, com precipitação e temperatura média do ar anual de aproximadamente 1.623 mm e 27,3 °C, respectivamente (Alvares *et al.*, 2013; Beck *et al.*, 2023).

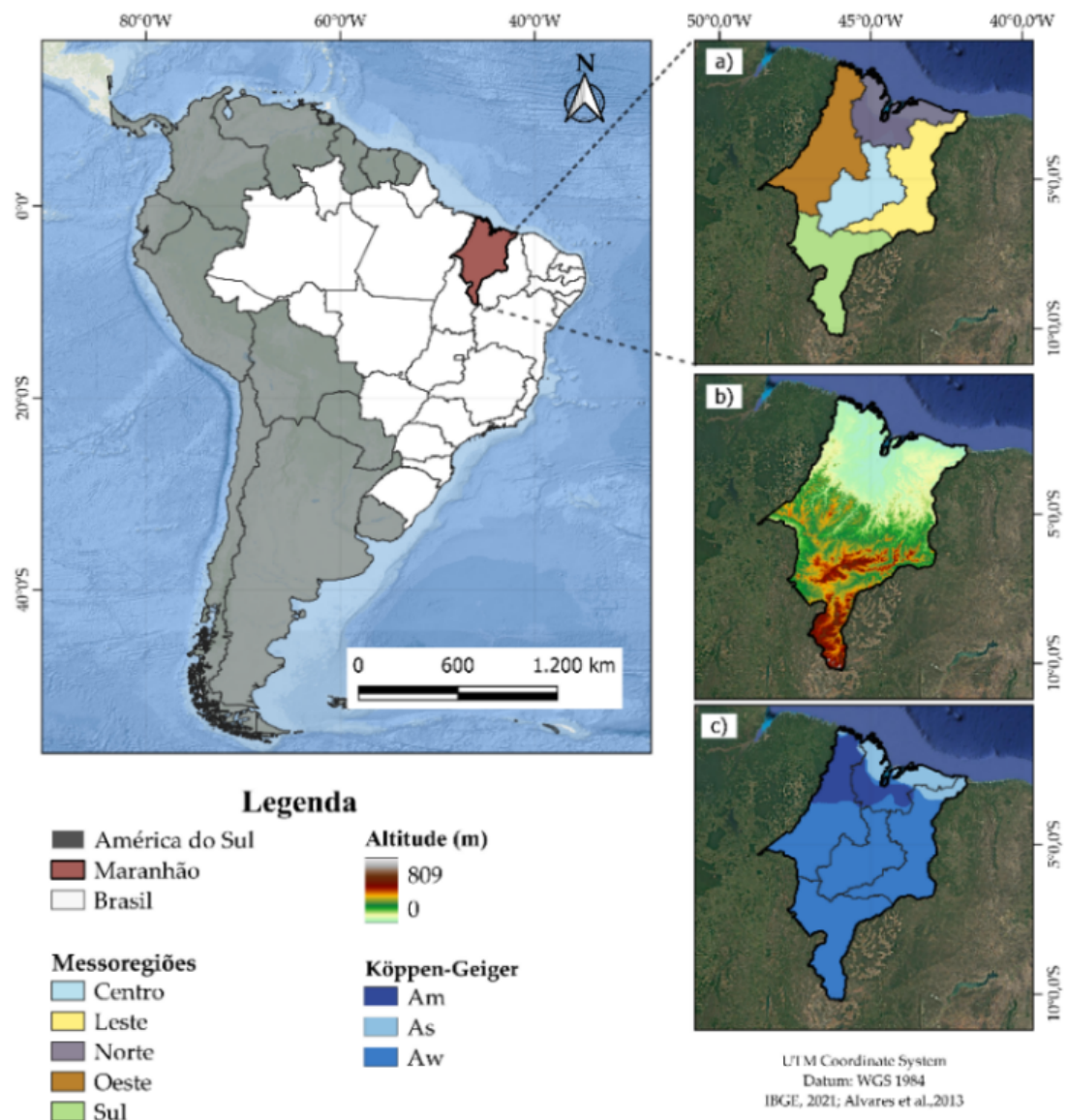


Figura 5. Localização da área de estudo, (a) mapa do estado do Maranhão dividido segundo as zonas fisiográficas de suas mesorregiões (b) modelo digital de elevação (c), zonas climáticas segundo a classificação de Köppen–Geiger .

4.2. Coleta e Processamento de Dados

Um fluxograma detalhando os procedimentos metodológicos pode ser visto na Figura 6. Os dados de temperatura mínima (T_{min} , °C), temperatura máxima (T_{max} , °C) e velocidade do vento (V_v , ms^{-1}) foram obtidos do banco de dados *TerraClimate*, um conjunto de dados climáticos globais de acesso livre (Abatzoglou *et al.*, 2018), com dados públicos acessíveis em:

<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html> (acessado em 20 de fevereiro de 2025). Esses dados foram obtidos para o período histórico de 2012 a 2023, com uma resolução espacial de aproximadamente 4 km (1/24°), totalizando 20.746 observações (pontos de amostragem georreferenciados) distribuídas por todo o estado do Maranhão.

A escolha do *TerraClimate* se deu devido à sua disponibilidade de séries temporais contínuas e espacialmente consistentes, o que é especialmente relevante em regiões como o Maranhão, onde a rede de estações meteorológicas apresenta lacunas na cobertura temporal e espacial (Araújo et al., 2024). Assim, a utilização deste conjunto de dados assegurou uma base sólida para análises regionais, embora a sua resolução espacial relativamente grosseira possa limitar a representação precisa das características microclimáticas locais. Não obstante, a sua escala e consistência metodológica tornam-no adequado para o tipo de análise proposto, permitindo a ava

Em seguida, calculou-se a T_a (°C), a partir das T_{min} e T_{max} (°C). Para cada ponto amostral, a T_a foi obtida pela média aritmética entre esses dois valores, conforme a Equação (1). Posteriormente, a T_a (°C), e V_v (m s⁻¹) foram utilizadas para o cálculo do ITU anual utilizando a Equação (2), conforme proposto por Silva et al.(2020).

$$T_a = T_{min} + T_{max} / 2 \quad (1)$$

$$ITU = (6,3952 + 0,08964 T_a + 0,01018 V_v)^2 \quad (2)$$

em que: T_a é a temperatura média do ar (°C); T_{min} é a temperatura mínima do ar (°C); T_{max} é a temperatura máxima do ar (°C); ITU é o Índice de Temperatura e Umidade; T_a é a média anual da temperatura do ar (°C); V_v é a média anual da velocidade do vento (m s⁻¹); 6,3952 é o termo constante da equação; 0,08964 é o coeficiente associado à T_a ; e 0,01018 é o coeficiente associado a V_v .

Adicionalmente, foi estimado o Declínio da Produção de Leite (DPL) por meio da Equação (3) proposta por Berry *et al.* (1964). No presente estudo, o DPL foi estimado para dois níveis padrão de capacidade potencial de produção de leite em condições de conforto térmico (CT) por vaca: 10 kg dia⁻¹ vaca⁻¹ (PL10) e 25 kg dia⁻¹ vaca⁻¹ (PL25).

$$DMP = -1,075 - 1,736 \times NP + 0,02474 \times NP \times ITU \quad (4)$$

em que: DPL é o declínio da produção de leite ($\text{kg dia}^{-1} \text{ vaca}^{-1}$); NP é a produção normal de leite em condições de conforto térmico ($\text{kg dia}^{-1} \text{ vaca}^{-1}$); ITU é o Índice de Temperatura e Umidade; $-1,075$ é o termo constante da equação; $-1,736$ é o coeficiente associado à produção normal de leite (NP); e $0,02474$ é o coeficiente associado à interação entre a produção normal de leite e o ITU ($NP \times ITU$). Para NP, foram utilizados os valores de $10 \text{ kg dia}^{-1} \text{ vaca}^{-1}$ (PL10) e $25 \text{ kg dia}^{-1} \text{ vaca}^{-1}$ (PL25).

Os mapas temáticos foram elaborados do software QGIS 3.22.6. Embora essa abordagem permita avaliações regionais abrangentes do risco de estresse térmico, ela apresenta limitações não considerar a variabilidade individual dos animais e as condições específicas das propriedades, como manejo, genética, instalações e disponibilidade de recursos para mitigação do estresse térmico.

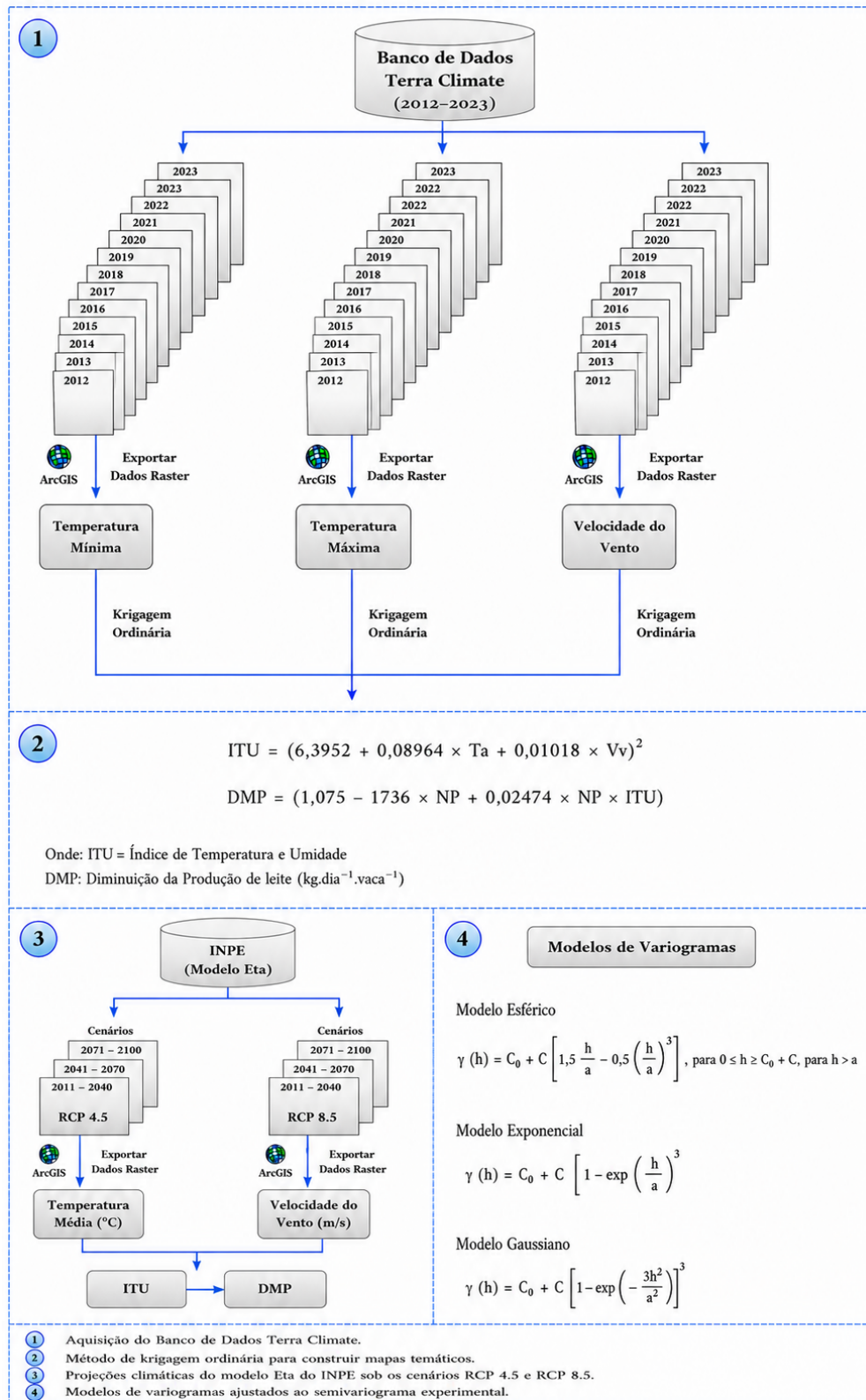


Figura 6. Fluxograma metodológico do estudo, incluindo coleta de dados, interpolação,

projeções climáticas e geração de mapas temáticos.

Neste estudo, a interpretação dos valores de ITU foi orientada por limiares consolidados da literatura, conforme resumido na Tabela 1. Adicionalmente, foram considerados os limiares definidos pelo *Livestock Weather Safety Index* (LWSI), que categoriza o estresse térmico em bovinos da seguinte forma: normal ($ITU \leq 74$), associada ao conforto térmico e à manutenção da homeotermia; alerta ($74 < ITU < 79$), caracterizada pelo início do estresse térmico, com possíveis alterações comportamentais e redução do consumo de alimento; perigo ($79 \leq ITU < 84$), relacionada ao agravamento do estresse, com aumento da frequência respiratória e da temperatura corporal e possível redução da produção de leite; e emergência ($ITU \geq 84$), correspondente ao estresse térmico extremo, com maior dificuldade de dissipação do calor e necessidade de medidas de mitigação (Mader et al., 2006).

Tabela 1. Índice de Temperatura e Umidade (ITU) para o início do nível de estresse em bovinos leiteiros, bovinos de corte e bovinos em geral, classificados como estresse térmico moderado, alto e extremo.

Item	Início do nível de estresse			Referências
	Moderado	Alto	Extremo	
Bovino em geral	72	78	90	Fuquay (1981)
Bovino leiteiro	72	79	89	(Rahimi et al., 2022) e (Pinto et al., 2020)

É importante destacar que essas estimativas fornecem respostas generalizadas ao estresse térmico. Portanto, elas não consideram explicitamente as diferenças relacionadas à raça, ao estado fisiológico (por exemplo, estágio de lactação, gestação) ou a práticas específicas de manejo (por exemplo, acesso à sombra, sistemas de resfriamento, dieta). Além disso, o modelo ITU não incorpora a carga térmica radiativa (radiação solar) ou adaptações comportamentais, como o comportamento de busca por sombra, que são fatores críticos que influenciam o estresse térmico real experimentado pelos animais em condições de campo.

Também avaliou-se os impactos das mudanças climáticas utilizando projeções climáticas do modelo Eta, obtidas na plataforma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais — INPE (disponível em <http://etamodel.cptec.inpe.br/>, acesso em 10 de fevereiro de 2025). O

modelo Eta foi selecionado devido à sua capacidade de representar, com maior detalhe, fenômenos atmosféricos associados a frentes, efeitos orográficos, brisas marítimas, tempestades severas e, de forma mais ampla, sistemas mesoescala organizados relevantes para a dinâmica climática regional.

A versão operacional utilizada pelo INPE é um modelo hidrostático com resolução horizontal de 40 km, 38 camadas verticais e cobertura espacial que abrange quase toda a América do Sul, tornando-o adequado para estudos climáticos em escala regional. Para os modelos de projeção futura sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, as variáveis de temperatura média (T_{med} , °C) e velocidade do vento (V_v , ms^{-1}) foram obtidas para os períodos de curto prazo (2011–2040), médio prazo (2041–2070) e longo prazo (2071–2100). Essas variáveis foram processadas utilizando os mesmos métodos aplicados à série histórica anual (2012–2023), incluindo o cálculo do ITU e do DPM.

Os *Representative Concentration Pathways* (RCPs) são cenários de emissão de gases de efeito estufa que refletem diferentes trajetórias de forçamento radiativo, com base em diversas trajetórias de emissão futuras. O cenário RCP4.5 representa desafios moderados em termos de mitigação e adaptação, juntamente com o desenvolvimento contínuo de recursos de combustíveis fósseis em escala global. Em contraste, o cenário RCP8.5 indica desafios significativos relacionados à mitigação e sugere uma abordagem menos intensiva para a adaptação às mudanças climáticas. Vale ressaltar que os cenários climáticos apresentam incertezas, principalmente devido às diferenças entre os modelos utilizados, o que exige cautela na interpretação dos resultados como estimativas aproximadas em vez de previsões exatas (Evin et al., 2019)

4.3 Análise de Dados

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva para obtenção de média, valores extremos, desvio padrão e coeficiente de variação (CV, %), categorizado como baixo ($CV < 12\%$), médio ($CV = 12\text{--}24\%$) ou alto ($CV > 24\%$), conforme Warrick e Nielsen (1980). A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$).

Técnicas de geoestatística foram aplicadas para exploração da variabilidade espacial

dos dados meteorológicos, ITU e DMP. A interpolação para a construção dos mapas temáticos foi realizada utilizando o método da krigagem ordinária (Equação 4). O software ArcGIS Pro versão 3.4 do *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) foi utilizado para determinação da dependência espacial entre os pares de observações por meio do semivariograma experimental (Equação 5), partindo das pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca. A krigagem é um método avançado de interpolação geoestatística que estima valores desconhecidos em locais não amostrados com base na estrutura de correlação espacial dos dados medidos (Hohn, 1991). Ao contrário de métodos mais simples, a krigagem não considera apenas a distância entre os pontos, mas também o grau de variabilidade espacial, produzindo estimativas mais precisas e confiáveis. Além disso, a krigagem fornece uma estimativa da incerteza associada aos valores interpolados, o que é particularmente importante em estudos ambientais e climáticos (Marinho et al. 2023; Johnston, 2001; Hohn, 1991).

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

em que: $\bar{Z}(x_o)$ é o valor estimado (interpolado) na posição x_o ; λ_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 λ_i deve ser igual a 1.

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

em que: $\gamma(h)$ 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%, conforme estabelecido por 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

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

em que: $\gamma(h)$ 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.

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

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

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

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

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

em que: $\hat{Z}(x_i)$ é o valor previsto, $Z(x_i)$ é o valor observado, N é o número de valores, e σ_1 é o erro padrão para localização (x_i).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise de Boxplot

Para identificar possíveis valores discrepantes e caracterizar a distribuição dos dados, foi realizada a análise por boxplot da série histórica do ITU entre 2012 e 2023 (Figura 7). O boxplot resume a distribuição dos dados por meio dos cinco números descritivos: valores mínimo e máximo, primeiro quartil (Q1), mediana e terceiro quartil (Q3), permitindo avaliar a tendência central, a dispersão e a presença de valores atípicos.

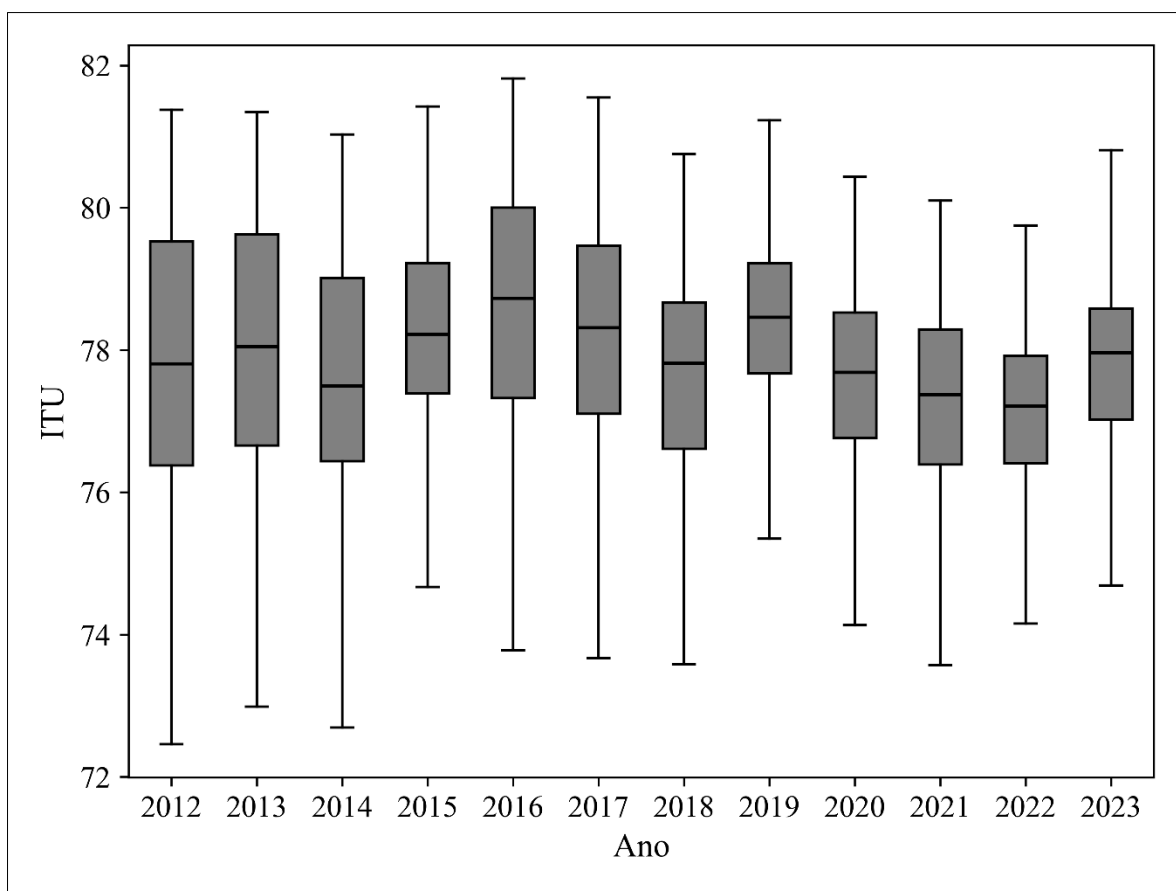


Figura 7. Boxplot da distribuição anual do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) no período de 2012 a 2023.

O *boxplot* evidenciou uma distribuição relativamente homogênea ao longo do período analisado, com o ano de 2016 destacando-se por apresentar a maior mediana de toda a série histórica, concentrando as observações em patamares térmicos mais elevados. Contudo, a maior amplitude total de dispersão foi registrada nos primeiros anos da série (2012 a 2014), devido aos menores limites mínimos observados. O ano de 2019 caracterizou-se pelo menor intervalo

interquartil (IQR), evidenciado pelo achatamento vertical de sua caixa, o que reflete uma maior uniformidade e menor variabilidade na distribuição dos dados centrais de ITU (Figura 7).

5.2.Cenário Histórico (Anual)

A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas dos valores anuais do ITU para o período de 2012 a 2023. De modo geral, os valores médios anuais do ITU variaram de 77,117 (2022) a 78,584 (2016), os valores medianos foram semelhantes, indicando um comportamento relativamente estável ao longo da série histórica, sem variações interanuais expressivas. Essa estabilidade também é evidenciada pelos baixos valores de desvio padrão, que oscilaram entre 1,131 (2022) e 1,579 (2016), refletindo uma distribuição homogênea dos dados em cada ano analisado.

Tabela 2.Resumo das estatísticas descritivas para os valores anuais do ITU.

Ano	Média	Med ¹	Min ²	Max ³	DP ⁴	CV ⁵
2012	77.81	77.81	72.457	81.37	1.79	2.30
2013	78.03	78.05	72.934	81.34	1.64	2.10
2014	77.59	77.50	72.692	81.02	1.47	1.90
2015	78.26	78.22	73.393	81.42	1.30	1.67
2016	78.58	78.73	73.778	81.81	1.57	2.00
2017	78.17	78.31	72.885	81.54	1.53	1.96
2018	77.61	77.82	72.638	80.75	1.34	1.73
2019	78.37	78.46	73.690	81.22	1.17	1.49
2020	77.59	77.69	72.579	80.43	1.24	1.59
2021	77.26	77.37	72.179	89.09	1.27	1.64
2022	77.11	77.21	71.980	79.74	1.13	1.46
2023	77.79	77.97	73.088	80.80	1.20	1.54

¹ Mediana. ²Mínimo. ³ Máximo. ⁴ Desvio padrão. ⁵Coefficiente de variação.

O coeficiente de variação (CV) manteve-se consistentemente baixo em todo o período, variando de 1,467% (2022) a 2,009% (2016), o que caracteriza baixa dispersão dos valores anuais de ITU (Hillel, 1980), e reforça a homogeneidade térmica anual observada no estado do Maranhão. Esse padrão indicou que, embora existam variações espaciais e temporais, o ambiente térmico anual apresenta comportamento relativamente uniforme em escala estadual. Apesar da homogeneidade dos valores médios, os máximos anuais de ITU superaram 79 na maioria dos anos, com exceção de 2022, variando de 80,435 (2020) a 81,817 (2016). Esses valores caracterizam condições de perigo, associadas a estresse térmico moderado a severo em

bovinos leiteiros. Nessa faixa, os animais podem apresentar aumento da frequência respiratória e da temperatura corporal, redução do consumo de alimento e queda acentuada da produção de leite, além de prejuízos à eficiência reprodutiva (Mader; Davis; Brown-Brandl, 2006).

Diante desse cenário, a adoção de medidas de mitigação é fundamental para reduzir os impactos sobre a produção. Entre as principais estratégias estão a oferta de sombra natural ou artificial, o aumento da ventilação e o uso de sistemas de resfriamento, como aspersores e nebulizadores, especialmente nos períodos de maior carga térmica. O manejo dos horários de alimentação e ordenha também pode contribuir para reduzir a exposição dos animais ao calor. Essas medidas podem minimizar os efeitos do estresse térmico e, conseqüentemente, reduzir as perdas associadas ao declínio da produção de leite (West, 2003; Gaughan; Mader; Holt, 2008).

Um resumo das estatísticas descritivas para a temperatura do ar (T_a , °C) e a velocidade do vento (V_v , ms^{-1}) pode ser encontrado nos Apêndices 1 e 2, respectivamente. De maneira geral, a T_a média anual variou de 26,468 °C (2022) a 27,374 °C (2016), com valores mínimos entre 23,133 °C (2022) e 24,308 °C (2019) e valores máximos de 28,141 °C (2022) a 29,416 °C (2016). Em relação a V_v , as médias anuais oscilaram entre 1,147 ms^{-1} (2021) e 1,596 ms^{-1} (2015), com valores mínimos de 0,758 ms^{-1} (2020) a 1,290 ms^{-1} (2017) e valores máximos variando de 1,825 ms^{-1} (2022) a 2,729 ms^{-1} (2012).

A Tabela 3 apresenta os resultados da validação cruzada do modelo geoestatístico selecionado para os valores de ITU, considerando os anos de 2012 e 2023. O modelo esférico apresentou os melhores valores de RMSSE, variando de 0,74 a 0,83, com valores mais próximos de 1, indicando melhor desempenho na validação. Além disso, observou-se maior proximidade entre os valores de RMSE e ASE para esse modelo.

Em comparação, os modelos exponencial e gaussiano apresentaram valores de RMSSE inferiores, variando de 0,58 a 0,64 e de 0,65 a 0,78, respectivamente. As estatísticas completas desses modelos são apresentadas no Apêndice 3. Diante dos resultados da validação cruzada, o modelo esférico foi selecionado para a geração dos mapas de krigagem do ITU no estado do Maranhão

Tabela 3. Validação cruzada do modelo esférico adotado para a construção dos mapas de krigagem do ITU no Maranhão

Esférico

Ano	ME ¹	RMSE ²	MSE ³	RMSSE ⁴	ASE ⁵
2012	-0,000320986	0,128319447	-0,000512021	0,800392631	0,160438056
2013	-0,000315744	0,128538646	-0,000487145	0,81826913	0,157218868
2014	-0,000321951	0,128419579	-0,000554609	0,830047674	0,154838422
2015	-0,000338638	0,128918717	-0,000686003	0,846295409	0,152458347
2016	-0,000309894	0,128365609	-0,000448229	0,821033577	0,156453329
2017	-0,000304233	0,128152743	-0,000454579	0,828461322	0,154829967
2018	-0,000202561	0,130590697	0,000138732	0,791902598	0,164944244
2019	-0,000162532	0,133705573	0,000323739	0,767968754	0,17411815
2020	-0,000130996	0,133960782	0,000503925	0,771984532	0,173539787
2021	-0,000141931	0,133116484	0,000487361	0,76332796	0,174411679
2022	-1.051E-04	0,133694996	0,000651064	0,748842232	0,178522544
2023	-0,000238688	0,130228631	-3.58E-05	0,805170026	0,161808438

¹. Erro médio. ². Raiz do erro quadrático médio. ³. Erro quadrático médio. ⁴. Raiz do erro quadrático médio padronizado. ⁵. Média do erro padronizado.

A Tabela 4 apresenta os principais parâmetros do modelo geoestatística 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 (Johnston, 2001). O alcance, um parâmetro fundamental em geoestatística, define a distância máxima de dependência espacial entre as amostras e é essencial para modelar a variabilidade de fenômenos ambientais (Goovaerts, 2011; Johnston, 2001).

No presente estudo, foram utilizados dados do *TerraClimate*; os valores de alcance variaram entre 5500 e 9000 m, indicando forte correlação espacial nessa escala. Cerón et al. (2021) compararam métodos de interpolação espacial para precipitação anual e sazonal em dois *hotspots* de biodiversidade na América do Sul e relataram alcances semelhantes. Esta extensão sugere que os processos climáticos operam em grande escala, corroborando estudos que destacaram a influência dos padrões atmosféricos e topográficos na distribuição espacial dos dados meteorológicos (Cerón et al 2021; Hengl et al., 2017).

Tabela 4. Parâmetros para os modelos de semivariograma ajustados e grau de dependência espacial.

Ano	Modelo	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	¹ GDE
2012	Esférico	0,00001	0,3991	7000	0,002
2013	Esférico	0,00001	0,3284	6000	0,003
2014	Esférico	0,00019	0,2993	5700	0,065
2015	Esférico	0,00001	0,4120	8000	0,002
2016	Esférico	0,00001	0,2980	5500	0,003

2017	Esférico	0.00001	0.3503	6600	0.002
2018	Esférico	0.004348	0.3363	7000	1.292
2019	Esférico	0.007121	0.4263	9000	1.670
2020	Esférico	0.007842	0.3599	8000	2.178
2021	Esférico	0.007233	0.3546	7500	2.039
2022	Esférico	0.009122	0.3087	6800	2.954
2023	Esférico	0.002712	0.4027	8000	0.673

¹. Grau de dependência espacial (%).

A distribuição espaço-temporal do ITU anual evidenciou um gradiente térmico no estado do Maranhão, com maiores valores concentrados nas mesorregiões Norte, Leste e no extremo norte da região Central. A variabilidade espacial e a precisão dos modelos de interpolação foram avaliadas por meio de semivariogramas experimentais e procedimentos de validação cruzada, cujos resultados são apresentados no material complementar deste trabalho (Apêndice). Nessas mesorregiões, predominou a classe de perigo para bovinos (ITU 79 a 83), com extensas áreas atingindo valores associados a alto estresse térmico em bovinos leiteiros (ITU = 79), especialmente nos anos de 2012 e 2016 (Mader et al., 2006; Rahimi et al., 2022; Pinto et al., 2020).

A mesorregião Oeste apresentou, na maior parte do período, condições de alerta para bovinos em geral (ITU 75 a 78), aproximando-se do limite associado ao alto estresse térmico em bovinos leiteiros. Os valores situaram-se, predominantemente, entre 76 e 79, com expansão das áreas com ITU superior a 80, especialmente entre 2015 e 2019 e em 2023. Em contraste, a mesorregião Sul apresentou os menores valores de ITU, com predominância das classes normal (ITU $\leq$ 74) e alerta (ITU entre 75 e 78), indicando condições térmicas relativamente mais favoráveis à criação de bovinos leiteiros

Entretanto, a ocorrência de condições mais favoráveis nessa região não significa que a produção leiteira seja inviável nas demais mesorregiões. Os resultados indicam, sobretudo, a necessidade de maior adoção de estratégias de adaptação e mitigação do estresse térmico. Nessas condições, recomenda-se priorizar sistemas de sombreamento natural ou artificial, melhoria da ventilação das instalações, disponibilidade contínua de água de qualidade e adoção de sistemas de resfriamento, como aspersão associada à ventilação forçada. O manejo também pode ser ajustado para reduzir a exposição dos animais aos períodos de maior carga térmica,

mediante adequação dos horários de fornecimento da alimentação e de outras atividades de manejo. Essas estratégias favorecem a dissipação de calor e podem reduzir os efeitos negativos do estresse térmico sobre o consumo de matéria seca e a produção de leite (West, 2003; Pinto et al., 2020; Chang-Fung-Martel et al., 2021).

Além das medidas de manejo e infraestrutura, a seleção de animais mais adaptados às condições climáticas locais e o uso de sistemas de produção compatíveis com o ambiente podem contribuir para reduzir a vulnerabilidade do rebanho. Estudos demonstram a existência de variabilidade genética na tolerância ao estresse térmico em bovinos leiteiros, possibilitando a incorporação dessa característica em programas de melhoramento genético (Nguyen et al., 2016; Garner et al., 2016). Dessa forma, o zoneamento do ITU não deve ser interpretado como uma delimitação de áreas aptas ou inaptas à bovinocultura leiteira, mas como uma ferramenta para identificar regiões de maior vulnerabilidade e subsidiar estratégias de manejo e planejamento produtivo.

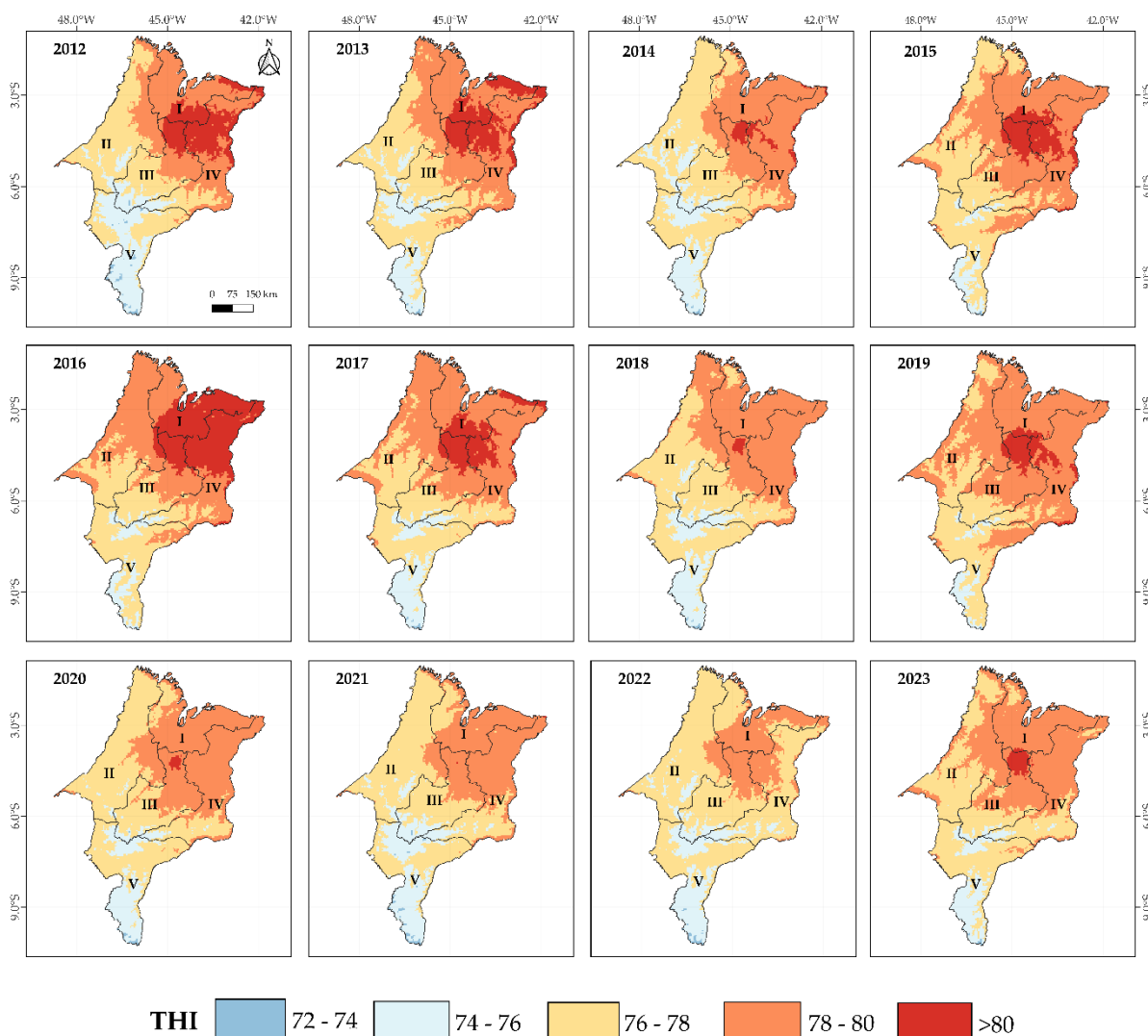


Figura 8. Mapas de krigagem do ITU de 2012 a 2023 nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul

Além disso, conforme apresentado na Figura 8, observou-se uma redução na extensão das áreas classificadas com ITU > 80 no período de 2020 a 2022, em comparação com anos anteriores, especialmente nas porções Norte, Centro e Leste do Maranhão. Em 2020, a ocorrência de valores superiores a 80 tornou-se mais restrita espacialmente, enquanto em 2021 e 2022 as áreas nessa classe foram pouco expressivas. Entretanto, em 2023 observou-se novamente a expansão da classe ITU > 80, principalmente na mesorregião Norte e em áreas próximas à região Central.

Os mapas de krigagem da temperatura média e da velocidade do vento, os semivariogramas experimentais, os resultados da validação cruzada e os mapas de krigagem do ITU utilizados na análise encontram-se disponíveis no Apêndice, como material complementar aos resultados apresentados no corpo do trabalho. A distribuição espacial do ITU pode ser relacionada à interação entre características fisiográficas e condições atmosféricas que atuam em diferentes escalas. Entre os fatores locais, destaca-se a altitude, que apresenta variação de aproximadamente 0 a 809 m (Figura 1). As maiores elevações concentram-se na porção Sul do estado, região que apresentou os menores valores de ITU ao longo do período analisado. A relação entre altitude e temperatura do ar é amplamente estabelecida, uma vez que, em condições atmosféricas semelhantes, áreas de maior elevação tendem a apresentar temperaturas mais amenas.

Além das características topográficas, a variabilidade espacial e temporal do ambiente térmico está associada à atuação de sistemas atmosféricos que condicionam os regimes de temperatura, umidade e precipitação no Maranhão. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) exerce importante influência sobre a distribuição das chuvas no Norte do Nordeste, enquanto a atuação de diferentes massas de ar e dos ventos alísios contribui para a dinâmica atmosférica regional (De Medeiros; De Oliveira, 2021; Carvalho et al., 2023; Santos et al., 2024). Essas interações podem modificar as condições de temperatura e umidade do ar e, consequentemente, influenciar o comportamento do ITU.

A influência da variabilidade climática interanual também deve ser considerada na interpretação dos resultados. O El Niño-Oscilação Sul (ENOS) constitui um dos principais modos de variabilidade climática que afetam a temperatura e a precipitação em diferentes regiões do Brasil, podendo modificar as condições ambientais observadas de um ano para outro (Cerón et al., 2021; Carvalho et al., 2023). No período analisado, os anos de 2012, 2013 e 2015–2017 apresentaram maiores extensões territoriais com $ITU > 80$, indicando maior exposição dos bovinos a condições de estresse térmico. O comportamento observado nesses anos coincide, em parte, com períodos de anomalias climáticas importantes no Nordeste brasileiro. A seca iniciada em 2012 associada a alterações nos regimes de precipitação e temperatura na região, com impactos sobre os sistemas agropecuários (Carvalho et al., 2023).

Apoiando essa perspectiva, Sousa et al., (2024) destacaram que o estado do Maranhão vivenciou sucessivos eventos de seca entre 2010 e 2016, fortemente influenciados pelo

fenômeno *El Niño* em 2015, que intensificou o aumento da temperatura do ar e reduziu significativamente a umidade relativa. Além disso, Santos et al., (2024), por meio de uma análise de índices climáticos, identificaram um aumento nas anomalias negativas de precipitação entre 2012 e 2019, com ênfase particular nos períodos de 2012–2013 e 2015–2017, que foram considerados especialmente críticos.

A distribuição espacial do declínio da produção de leite (DPL) associada ao estresse térmico evidenciou um gradiente decrescente no sentido norte–sul do Maranhão (Figuras 9 e 10). Para vacas com potencial produtivo de 10 kg/dia/vaca (PL10), as maiores perdas concentraram-se nas mesorregiões Leste e Norte, frequentemente superiores a 1,5 kg/vaca/dia, com destaque para os anos de 2012, 2015 e, principalmente, 2016. Em contraste, a mesorregião Sul apresentou perdas inferiores a 0,5 kg/vaca/dia, acompanhando o padrão espacial de menores valores de ITU observado anteriormente.

Para vacas com potencial produtivo de 25 kg/dia/vaca (PL25), as perdas foram substancialmente mais elevadas, com valores frequentemente superiores a 5 kg/vaca/dia nas mesorregiões Norte, Leste e em partes da região Central, sobretudo nos anos de maior carga térmica, como 2012, 2013, 2016 e 2017 (Figura 10). Esse comportamento demonstra que o impacto do estresse térmico é influenciado pelo potencial produtivo dos animais, sendo mais expressivo em vacas de maior produção. A maior sensibilidade desses animais está relacionada à maior produção de calor metabólico decorrente da elevada atividade fisiológica associada à síntese de leite. À medida que a produção aumenta, também se elevam a demanda energética e a produção interna de calor, tornando mais difícil a manutenção da homeotermia sob condições de elevada carga térmica (West, 2003; Collier et al., 2006).

Sob estresse térmico, as vacas reduzem o consumo de matéria seca como mecanismo de adaptação, diminuindo a produção de calor associada à digestão e ao metabolismo. Entretanto, essa redução limita a disponibilidade de nutrientes e energia para a síntese de leite. Paralelamente, maior proporção da energia disponível é direcionada à manutenção da homeotermia, reduzindo os recursos destinados à produção. Como vacas de maior potencial produtivo apresentam maior demanda nutricional para sustentar a lactação, os efeitos da redução do consumo e da redistribuição energética tendem a ser mais pronunciados nesses animais, resultando em maiores perdas produtivas (West, 2003; Chang-Fung-Martel et al., 2021; Polsky; von Keyserlingk, 2017).

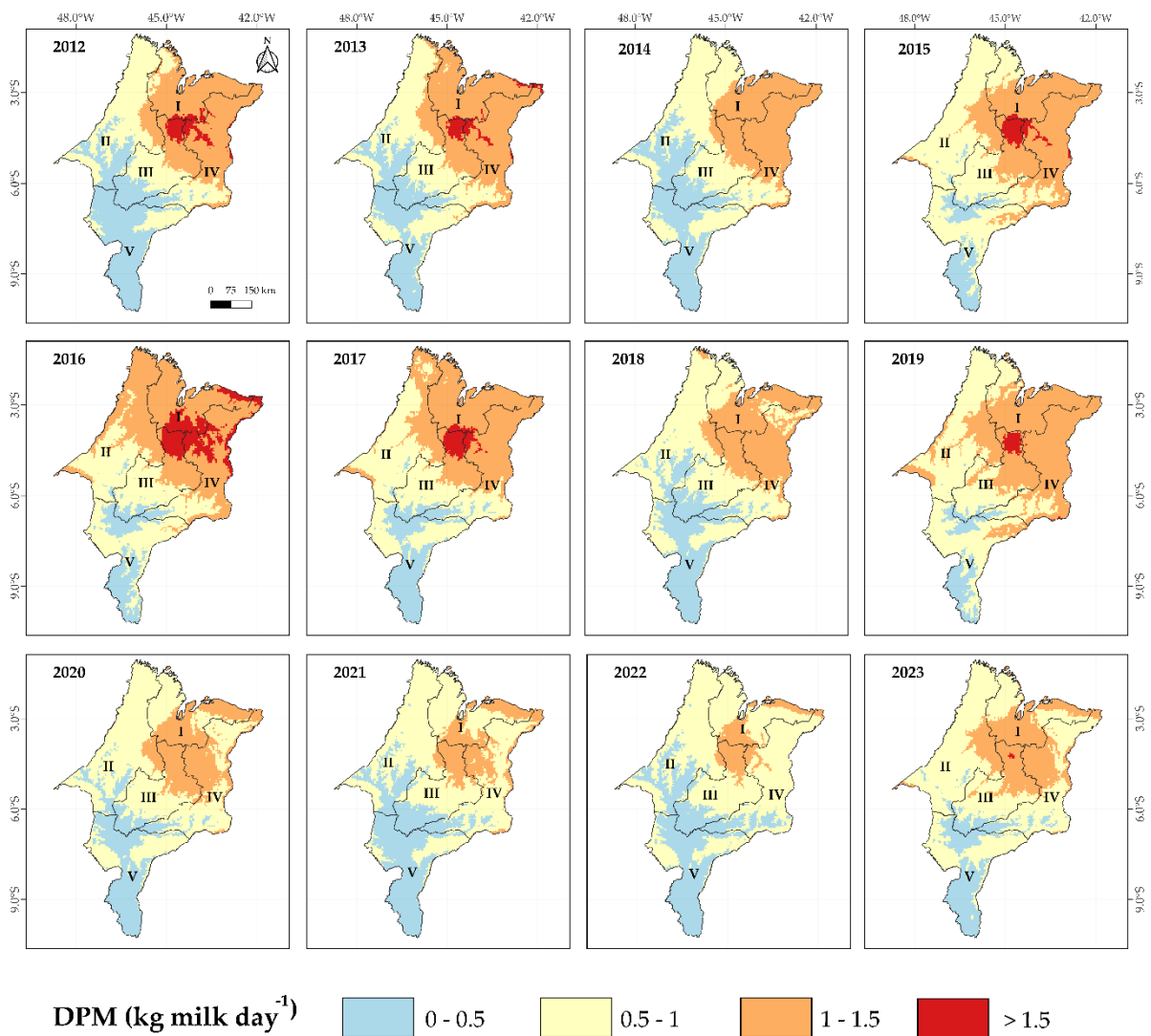


Figura 9. Mapas de krigagem da declínio da produção de leite (DPL) em relação à capacidade produtiva potencial em condições de conforto térmico por vaca: 10 kg dia⁻¹ vaca⁻¹ (PL10), de 2012 a 2023 nas mesorregiões do Maranhão.

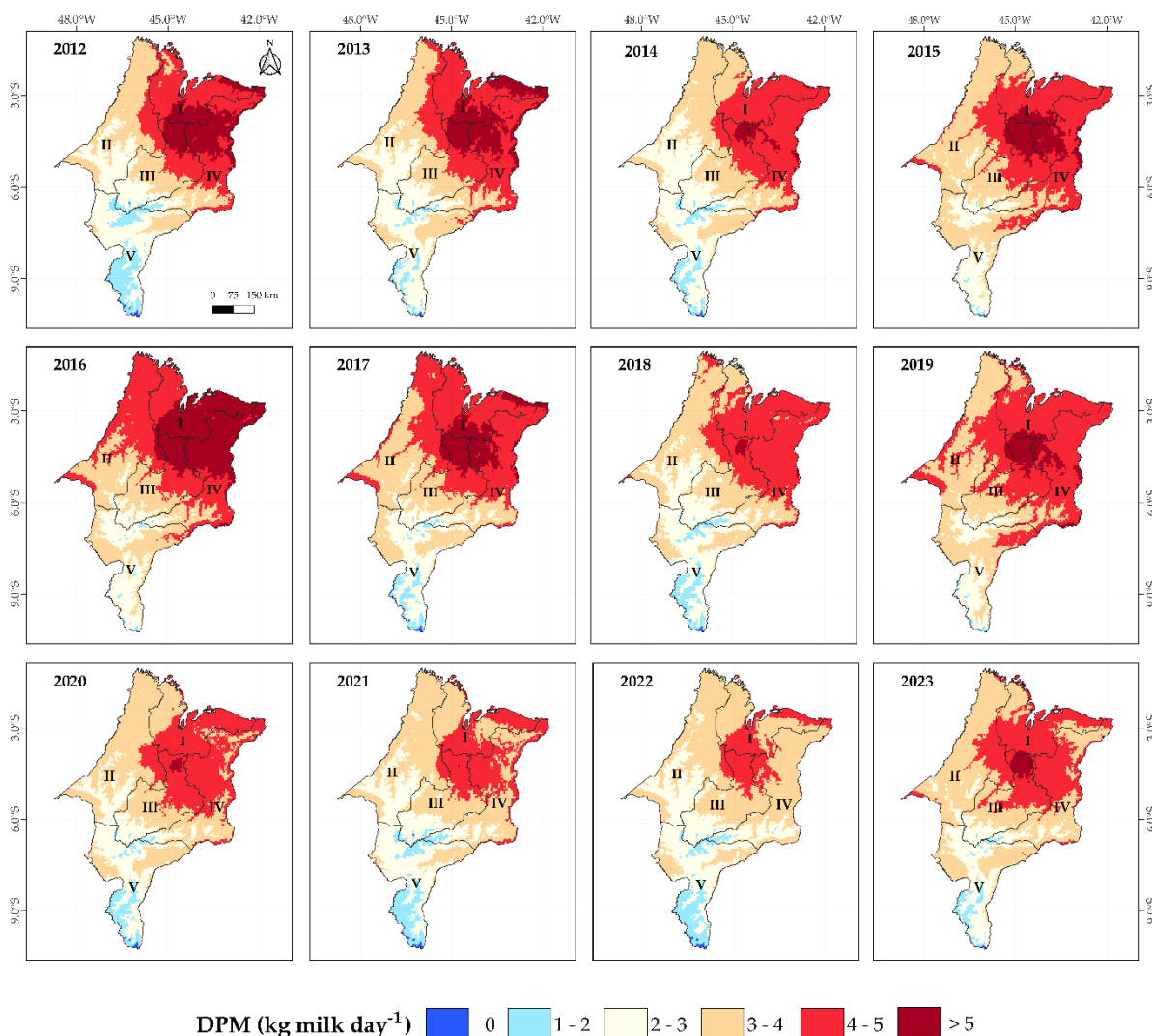


Figura 10. Mapas de krigagem do declínio da produção de leite (DPL) em relação à capacidade produtiva potencial em condições de conforto térmico por vaca: 25 kg dia⁻¹ vaca⁻¹ (PL25), de 2012 a 2023 nas mesorregiões do Maranhão

Os impactos do estresse térmico na produtividade foram evidentes e, como esperado, seguiram o padrão dos valores de ITU. No geral, estimamos perdas frequentemente superiores a 1,5 kg/vaca/dia para vacas PL10 e até 5 kg/vaca/dia para vacas PL25 nas mesorregiões termicamente mais desafiadoras do Maranhão, identificadas anteriormente. Em um estudo realizado com vacas leiteiras na Bahia, Brasil (Turco et al., 2006) foram estimadas perdas de até 1 kg/vaca/dia para vacas PL10 e até 4,5 kg/vaca/dia para vacas PL25 nas áreas mais críticas

(ITU > 77). Recentemente, pesquisadores realizaram um zoneamento bioclimático da região Centro-Oeste e identificaram conforto térmico durante o outono/inverno (ITU < 70), sem perdas de produtividade (Aparecido et al., 2022). No entanto, na primavera/verão, foram relatadas perdas de até 2 kg/vaca/dia para vacas PL25 na parte sul da região, sem impactos observados para vacas PL10.

As previsões bioclimáticas apresentadas neste estudo têm aplicações práticas para diversas instituições públicas e privadas envolvidas no planejamento agropecuário e na adaptação climática no Maranhão. Órgãos estaduais como a Agência Estadual de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural do Maranhão (AGERP), a Agência Estadual de Defesa Agropecuária do Maranhão (AGED) e a Secretaria de Estado da Agricultura podem utilizar essas projeções para orientar estratégias de mitigação, programas de capacitação e desenvolvimento de políticas públicas. Além disso, instituições nacionais como o Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR), o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) e unidades de pesquisa da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) podem incorporar esses resultados em modelos de assistência técnica e polos de inovação voltados para a resiliência climática da pecuária. O setor acadêmico pode apoiar essas iniciativas oferecendo análise de dados, extensão rural e a cocriação de marcos de adaptação específicos para a região, garantindo, assim, a efetiva transferência do conhecimento científico para os processos de tomada de decisão e para as comunidades rurais.

Entre as estratégias para reduzir os efeitos do estresse térmico sobre o DPL, destaca-se a adequação da relação genótipo × ambiente. A utilização de animais geneticamente mais adaptados às condições climáticas predominantes pode reduzir a susceptibilidade ao estresse térmico e favorecer a manutenção do desempenho produtivo. Essa estratégia é particularmente relevante em áreas com ITU entre 75 e 78, nas quais animais de elevada produção podem apresentar redução do desempenho mesmo sob condições de alerta (Hayes et al., 2009; Garner et al., 2016; Nguyen et al., 2016).

As melhorias nas instalações zootécnicas constituem outra estratégia fundamental, principalmente nas regiões Norte, Leste e Central, onde foram observados maiores valores de ITU e perdas produtivas. A implantação de sombra natural ou artificial, a utilização de coberturas com maior capacidade de isolamento térmico e a melhoria da circulação de ar podem favorecer a dissipação do calor. Em sistemas intensivos, a associação entre ventilação e

aspersão de água pode aumentar a eficiência do resfriamento dos animais (West, 2003; Collier et al., 2006).

O manejo alimentar também deve ser ajustado aos períodos de maior carga térmica. O estresse térmico reduz o consumo de matéria seca e, consequentemente, a disponibilidade de nutrientes para a produção de leite. Dessa forma, recomenda-se priorizar o fornecimento de alimentos nos períodos de menor temperatura, garantir disponibilidade contínua de água de boa qualidade e adequar a densidade energética da dieta às necessidades dos animais (West, 2003; Chang-Fung-Martel et al., 2021).

A disponibilidade de água e de áreas de sombra deve receber atenção especial durante os períodos mais quentes. O aumento da temperatura corporal eleva a demanda por mecanismos de dissipação de calor e, consequentemente, a necessidade de ingestão de água. Assim, bebedouros em quantidade suficiente, de fácil acesso e com fornecimento contínuo de água, associados a áreas de sombra próximas aos locais de alimentação e descanso, podem contribuir para reduzir a carga térmica sobre os animais (West, 2003; Polsky; von Keyserlingk, 2017).

5.3 Cenários Futuros (RCP 4.5 e 8.5)

As projeções climáticas futuras tornaram o cenário ainda mais preocupante. A Figura 11 apresenta mapas de krigagem das projeções futuras do ITU sob o cenário climático RCP4.5 para os períodos de curto prazo (2011–2040), médio prazo (2041–2070) e longo prazo (2071–2100) nas mesorregiões do Maranhão. Observou-se que, no curto prazo (2011–2040), a maior parte do estado do Maranhão deverá apresentar valores de ITU entre 75 e 78. No médio prazo (2041–2070), projeta-se um aumento nos níveis de estresse térmico, com valores de ITU predominantemente entre 78 e 81 nas mesorregiões Sul, Central e Oeste, especialmente, na porção sudoeste desta última. Esses valores de ITU corresponderam ao limiar de alto estresse térmico para os bovinos (Tabela 1). No longo prazo (2071–2100), esse padrão se intensifica, com a formação de extensas áreas apresentando valores de ITU acima de 81, principalmente nas regiões Sul e extremo Sudoeste do estado.

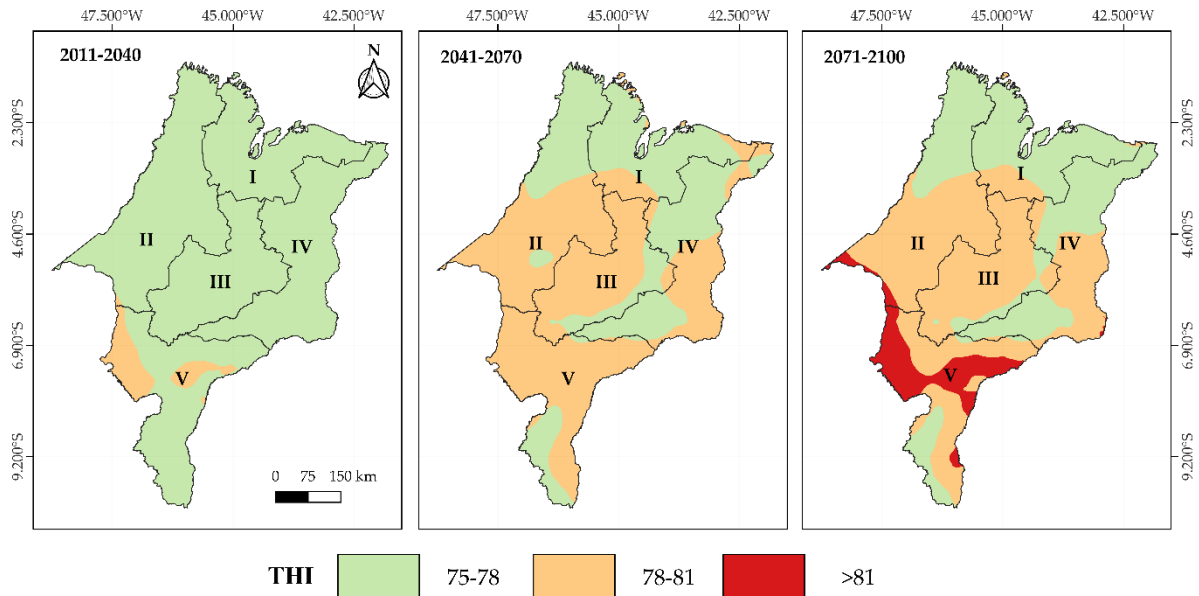


Figura 6. Mapas de krigagem das projeções futuras do ITU sob os cenários RCP4.5 para os períodos de curto prazo (2011–2040), médio prazo (2041–2070) e longo prazo (2071–2100) nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.

A maior intensificação projetada da carga térmica na região Sul do Maranhão pode estar associada à maior continentalidade e à menor influência direta do oceano, em comparação às áreas setentrionais. A influência marítima contribui para moderar as condições térmicas nas áreas próximas à costa, enquanto o interior do estado apresenta maior influência das características continentais e topográficas. Além disso, a variabilidade climática do Maranhão resulta da interação entre altitude, circulação atmosférica, sistemas de precipitação e influências oceânicas, contribuindo para diferenças espaciais na resposta às mudanças climáticas (Nascimento et al., 2017; Sodré et al., 2015). Portanto, a maior intensificação projetada no Sul deve ser interpretada como resultado da interação entre características fisiográficas e processos atmosféricos.

Sob o cenário climático RCP8.5, projeta-se intensificação progressiva da carga térmica no Maranhão ao longo dos períodos analisados. No curto prazo (2011–2040), predominam valores de ITU entre 82 e 84 na maior parte do estado, enquanto uma pequena área no extremo Norte apresenta valores entre 78 e 80. No médio prazo (2041–2070), observa-se expansão das

áreas com valores mais elevados, com predominância de ITU entre 82 e 84 e ocorrência de zonas com valores entre 80 e 82 (Figura 12).

No longo prazo (2071–2100), o cenário torna-se ainda mais crítico, com ampla expansão das áreas com ITU superior a 84 e ocorrência de valores acima de 86 em grande parte do Maranhão (Figura 12). Esse comportamento representa uma mudança expressiva em relação ao padrão observado no período histórico, indicando intensificação e maior abrangência das condições de estresse térmico no estado. Os valores projetados acima de 84 enquadram-se na condição de emergência térmica para bovinos, caracterizada por elevada dificuldade de dissipação de calor e maior risco de comprometimento das funções fisiológicas (Mader et al., 2006).

A exposição prolongada a condições de emergência térmica pode provocar aumento da temperatura corporal e da frequência respiratória, alterações no comportamento, redução do consumo de matéria seca e maior demanda hídrica. Como consequência, os animais direcionam maior parte dos recursos metabólicos para a manutenção da homeotermia, reduzindo a energia disponível para funções produtivas. Em vacas lactantes, esse processo pode resultar em redução acentuada da produção de leite e comprometimento do desempenho geral do rebanho (West, 2003; Polsky; von Keyserlingk, 2017).

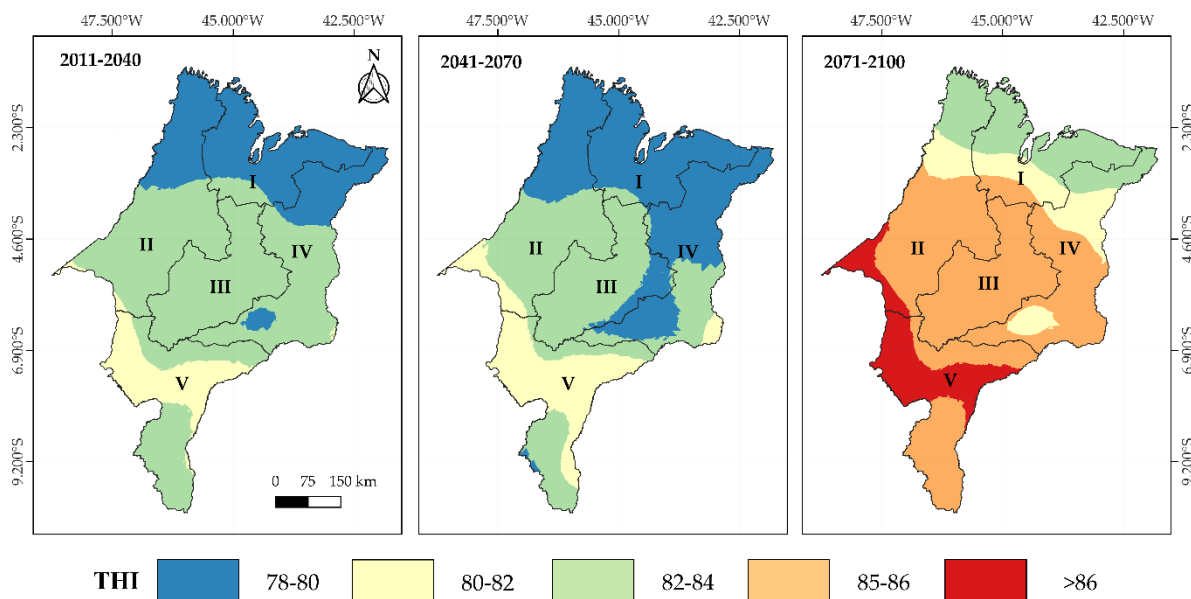
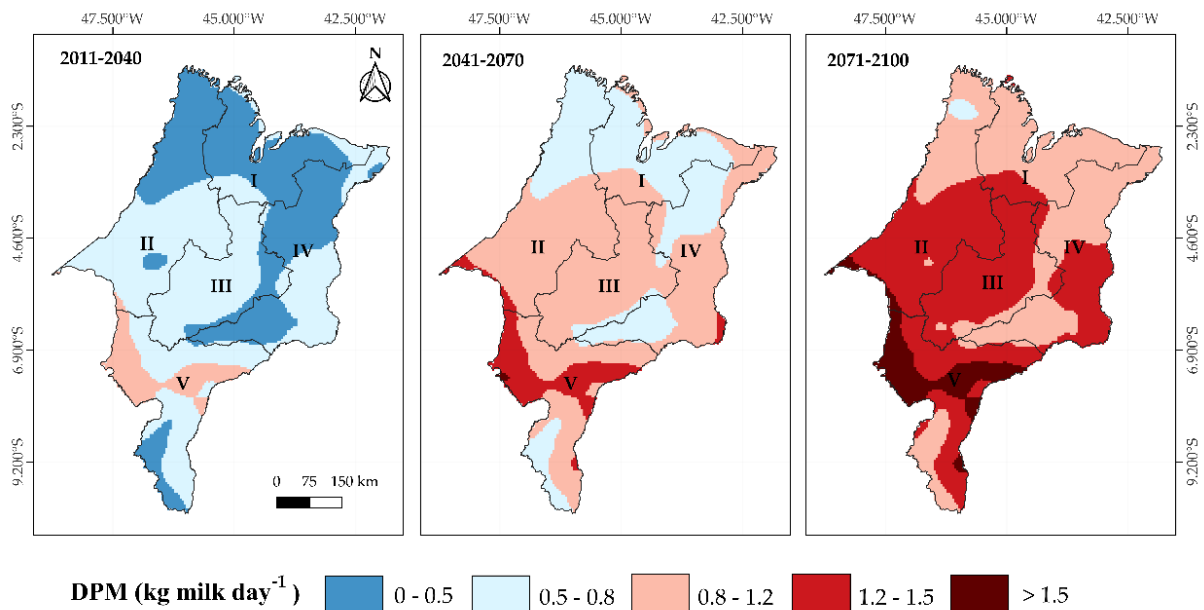
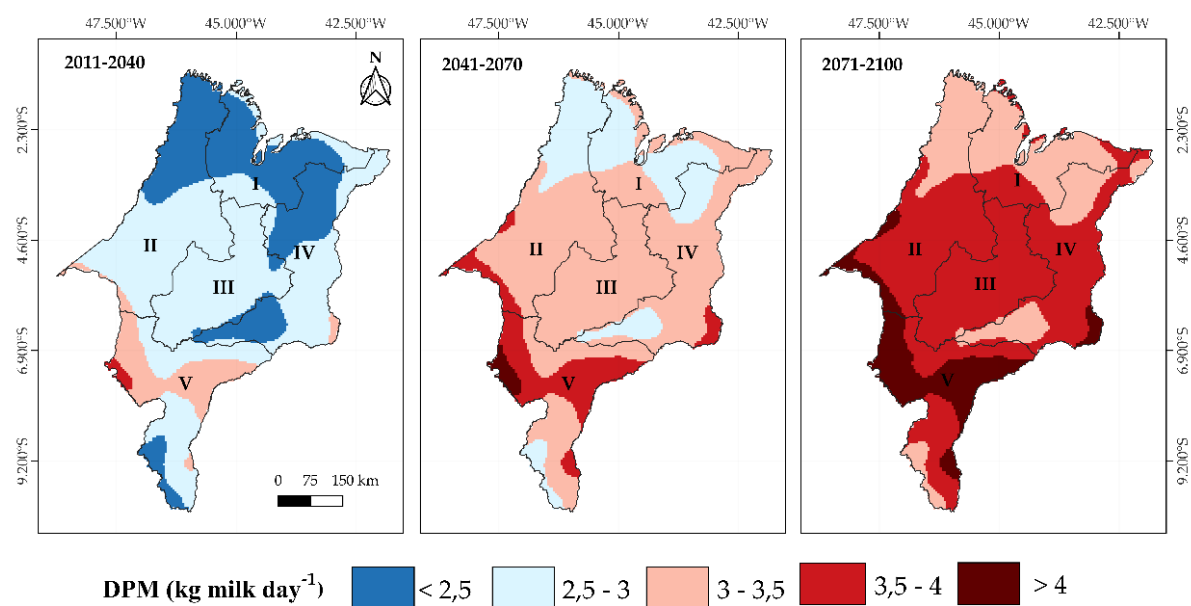


Figura 7. Mapas de krigagem das projeções futuras do ITU sob os cenários RCP8.5 para os períodos de curto prazo (2011–2040), médio prazo (2041–2070) e longo prazo (2071–2100) nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.

No cenário RCP4.5, prevê-se que as vacas com PL10 percam, em média, 0,5 kg de leite por dia em relação ao seu potencial produtivo no curto prazo. Esse impacto se intensificará ao longo do tempo, atingindo perdas de até 1,2 kg de leite/vaca/dia na maior parte do estado no médio prazo (2041–2070) e ultrapassando 1,5 kg/vaca/dia no longo prazo (2071–2100), sendo as mesorregiões Central e Sul as mais afetadas. Para as vacas com PL25, as perdas são ainda mais severas, ultrapassando 4 kg de leite por vaca/dia no longo prazo, com forte impacto nas mesorregiões Central, Oeste e Sul que são os principais polos de produção leiteira do Maranhão. No cenário mais pessimista RCP8.5, as perdas projetadas para vacas PL10 variam entre 1,5 e 2 kg de leite/dia no médio prazo (2041–2070). No entanto, essas perdas tornam-se mais significativas no longo prazo (2071–2100), ultrapassando 2 kg/vaca/dia, especialmente nas mesorregiões Ocidental, Central e Sul (Figura 13). Para vacas PL25, as perdas ultrapassam 4,5 kg de leite/dia já no curto prazo e intensificam-se progressivamente, atingindo valores acima de 9 kg/vaca/dia no longo prazo (Figura 13)

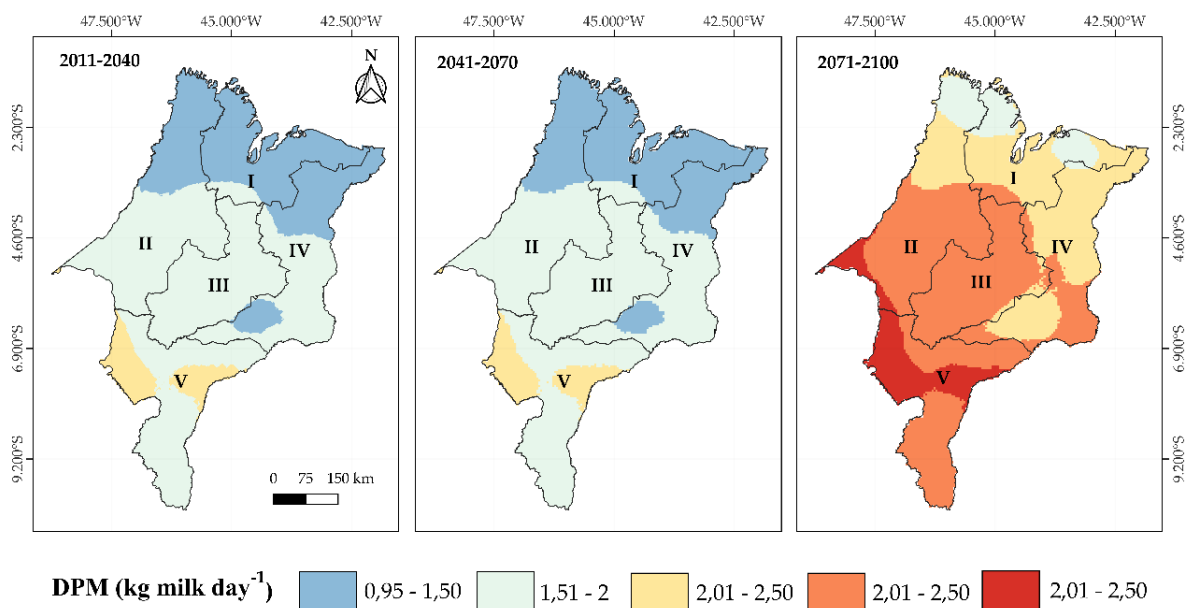


(a)

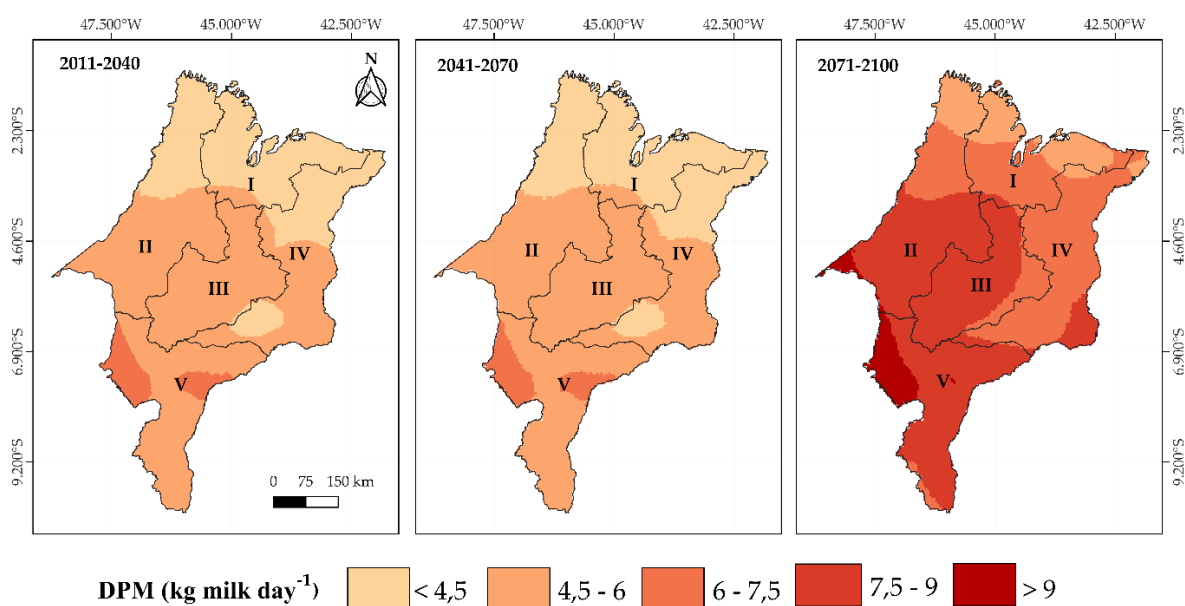


(b)

Figura 8. Mapas de krigagem da declínio da produção de leite (DPL) em relação à capacidade produtiva potencial em condições de conforto térmico por vaca: 10 kg dia⁻¹ vaca⁻¹ (PL10) (a) e 25 kg dia⁻¹ vaca⁻¹ (PL25) (b), com base nas projeções futuras do ITU.



(a)



(b)

Figura 9. Mapas de krigagem da o declínio da produção de leite (DPL) em relação à capacidade produtiva potencial em condições de conforto térmico por vaca: 10 kg dia⁻¹ vaca⁻¹ (PL10) (a) e 25 kg dia⁻¹ vaca⁻¹ (PL25) (b), com base nas projeções futuras do ITU

Vale ressaltar que os aumentos projetados no ITU podem gerar impactos ecológicos e econômicos significativos no Maranhão. Altas cargas térmicas ambientais podem reduzir a qualidade das pastagens, alterar os padrões de uso da terra e promover a perda de biodiversidade por meio de mudanças na vegetação (Oliveira et al., 2022; Paiva et al., 2020; Rahimi et al., 2022; Rodrigues et al., 2022). Economicamente, a produtividade leiteira pode diminuir devido à redução da produção de leite, como já documentado, mas também devido a problemas de fertilidade e ao aumento dos custos com saúde animal (Becker; Collier; Stone, 2020; Nzeyimana et al., 2023). Os pequenos agricultores são particularmente vulneráveis devido ao seu acesso limitado a tecnologias de mitigação (Silva et al., 2012; Vommaro; Menezes; Barata, 2020b). Essas dinâmicas podem levar a mudanças nas estratégias de subsistência e ao êxodo rural. A integração de práticas resilientes ao clima e políticas adaptativas é essencial para sustentar os sistemas de produção leiteira em cenários climáticos futuros.

Estudos conduzidos em diferentes partes do mundo reforçaram a severidade dos impactos das mudanças climáticas nos sistemas de produção pecuária. Na África Oriental, estimou-se que, sob o cenário RCP8.5, mais de 50% dos dias entre 2071 e 2100 serão de severo estresse térmico para o gado leiteiro (Rahimi *et al.*, 2021). No Reino Unido, foram projetados aumentos significativos na frequência de dias com valores de ITU acima de 70, podendo ultrapassar 90 dias por ano até 2100, especialmente no sul e leste da Inglaterra (Arnell; Freeman, 2021).

No Brasil, estudos que investigaram os impactos das mudanças climáticas no estresse térmico em animais de produção, sob o cenário pessimista SSP5-8.5, identificaram um aumento substancial no número de dias com alto estresse térmico nas regiões Sul e Sudeste, e com estresse térmico extremo nas regiões Norte e Centro-Oeste (Ferreira *et al.*, 2024). As projeções para o período de 2061–2080 indicaram que essas regiões podem enfrentar até 200 dias por ano sob condições de estresse térmico extremo.

No entanto, o impacto das mudanças climáticas na produção animal é um fenômeno multifatorial que envolve interações complexas entre fatores fisiológicos, ambientais, genéticos e de manejo (Foroushani; Amon, 2022; Giannone et al., 2023; Herbut; Angrecka; Walczak, 2018). Portanto, a dependência exclusiva do ITU para previsões pode ser limitante, uma vez que análises unifatoriais não capturam toda a complexidade do estresse térmico em bovinos (De Castro Júnior; Silva, 2021; Oliveira et al., 2019). Embora amplamente utilizado, o ITU

considera apenas a temperatura ambiente e a umidade relativa, negligenciando variáveis ambientais como radiação solar, vento e carga térmica acumulada, bem como aspectos comportamentais dos animais, como a busca por sombra (De Castro Júnior; Silva, 2021; Hoffmann et al., 2020).

Além disso, o uso de conjuntos de dados climáticos regionalizados pode suavizar extremos locais e microclimas específicos, levando à subestimação ou superestimação do risco em determinadas áreas. Assim, estudos futuros devem integrar estruturas de modelagem multidimensional, combinando o ITU com índices que incluem radiação solar (por exemplo, ITGU, ICT e ICA), interações genótipo-ambiente, práticas de manejo e fatores socioeconômicos.

Por outro lado, o presente estudo fornece informações genuínas e relevantes para a formulação de estratégias de mitigação e adaptação diante dos desafios impostos à produção leiteira pelas mudanças climáticas. Os resultados deste estudo destacam a necessidade urgente de implementação de estratégias de mitigação e adaptação com base científica, como o manejo ambiental inteligente, o melhoramento genético de animais com maior tolerância ao calor e o fortalecimento de políticas públicas voltadas ao apoio aos pequenos produtores.

Nesse contexto, ressalta-se a importância do monitoramento contínuo e regionalizado de indicadores bioclimáticos, possibilitando a antecipação de cenários críticos e uma tomada de decisão mais eficaz no setor produtivo. Com projeções indicando aumento da seca e das condições de calor em grande parte do território brasileiro (De Medeiros; De Oliveira, 2021; Ferreira et al, 2026), espera-se que o estresse térmico no rebanho se intensifique, representando um desafio adicional à segurança alimentar no contexto das mudanças climáticas globais. Esses achados estão alinhados ao Plano Maranhão 2050, uma iniciativa estratégica de longo prazo que enfatiza o desenvolvimento sustentável, a resiliência climática e a inclusão rural por meio da inovação e da governança efetiva. A incorporação da previsão bioclimática na implementação do plano poderia contribuir para sistemas agrícolas mais resilientes às mudanças climáticas na região.

6. CONCLUSÃO

A espacialização do ITU indica maior risco de estresse térmico nas mesorregiões Norte, Leste e Central do Maranhão, enquanto a mesorregião Sul apresenta condições climáticas relativamente mais favoráveis à criação de bovinos. Nas condições atuais, as perdas na produção de leite foram frequentemente superiores a 1,5 kg/vaca/dia para vacas com produção média de 10 kg/dia (PL10) e 5 kg/vaca/dia para vacas com produção média de 25 kg/dia (PL25), evidenciando os impactos do estresse térmico sobre o desempenho produtivo. As projeções climáticas apontam agravamento progressivo das condições térmicas nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, com expansão das áreas suscetíveis ao estresse térmico. As estimativas indicam que as perdas na produção de leite podem atingir aproximadamente 4 kg/vaca/dia no cenário RCP4.5 e 9 kg/vaca/dia no cenário RCP8.5 para vacas PL25, comprometendo a sustentabilidade dos sistemas pecuários.

REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T.; DOBROWSKI, S. Z.; PARKS, S. A.; HEGEWISCH, K. C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific Data**, v. 5, n. 1, p. 1–12, 2018.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and applied climatology**, v. 113, n. 3, p. 407-427, 2013.
- ALVES, A. A. P. Caracterização do manejo reprodutivo, composição racial e estrutura do rebanho leiteiro de propriedades do leste maranhense. 2016. **Monografia (Graduação em Zootecnia) – Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha**, 2016.
- ARAÚJO, M. L. S. D., RUFINO, I. A. A., SILVA, F. B., BRITO, H. C. D., SANTOS, J. R. N. The relationship between climate, agriculture and land cover in Matopiba, Brazil (1985–2020). **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 2670, 2024.
- ARAUJO NETO, R. B. de; CARDOSO, M. J.; SOUZA, H. A. de; TEIXEIRA NETO, M. L.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de. **Qualidade da silagem dos consórcios duplos e triplos de safrinha nas condições do leste maranhense**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2024. 9 p. (Embrapa Meio-Norte. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 157).
- APARECIDO, L. E. D. O.; LORENÇONE, J. A.; LORENÇONE, P. A.; TORSONI, G. B.; DE MORAES, J. R. D. S. C.; DE MENESES, K. C. 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.
- ARNELL, N. W.; FREEMAN, A. The effect of climate change on agro-climatic indicators in the UK. **Climatic Change**, v. 165, n. 1, p. 40, 2021.
- BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais: conforto animal**. Viçosa, MG: UFV, 1997.
- BALEW, A.; LEGESE, B.; KUNBUSHU, D.; NEGA, W.; ALEBEL, W.; KERBESH, A.; MIJANUR RAHMAN, M. 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.
- BARATI, F.; AGUNG, B.; WONGSRIKEAO, P.; TANIGUCHI, M.; NAGAI, T.; OTOI, T. Meiotic competence and DNA damage of porcine oocytes exposed to an elevated temperature. **Theriogenology**, v. 69, n. 6, p. 767-772, 2008.
- BECK, H. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; LUTSKO, N. J.; DUFOUR, A., ZENZ, Z; JIANG, X; VAN DIJK, A.I.J.M; MIRALLES, D. G. High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. **Scientific data**, v. 10, n. 1, p. 724, 2023.

BECKER, C. A.; COLLIER, R. J.; STONE, A. E. Invited review: Physiological and behavioral effects of heat stress in dairy cows. **Journal of dairy science**, v. 103, n. 8, p. 6751-6770, 2020.

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

BERRY, I. L.; SHANKLIN, M. D.; JOHNSON, H. D. Dairy shelter design based on milk production decline as affected by temperature and humidity. **Transactions of the ASAE**, v. 7, n. 3, p. 329-0331, 1964.

BROOM, D. M. Animal welfare complementing or conflicting with other sustainability issues. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 219, p. 104829, 2019.

BUFFINGTON, D. E.; COLLAZO-AROCHO, A.; CANTON, G. H.; PITT, D.; THATCHER, W. W.; COLLIER, R. J. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. 1981.

CALVIN, K.; DASGUPTA, D.; KRINNER, G.; MUKHERJI, A.; THORNE, P. W.; TRISOS, C., ... ORENDAIN, D. J. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 2023.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. 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.

CAI, Z.; CUI, J.; YUAN, H.; CHENG, M. Application and research progress of infrared thermography in temperature measurement of livestock and poultry animals: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 205, p. 107586, 2023.

CARDOSO, C. C.; PERIPOLLI, V.; AMADOR, S. A.; BRANDÃO, E. G.; ESTEVES, G. I. F.; SOUSA, C. M. Z.; FRANÇA, M. F. M. S.; GONÇALVES, F. G.; BARBOSA, F. A.; MONTALVÃO, T. C.; MARTINS, C. F.; FONSECA NETO, A. M.; MCMANUS, C. Physiological and thermographic response to heat stress in zebu cattle. **Livestock Science**, v. 182, p. 83-92, 2015.

CARTWRIGHT, S. L.; SCHMIED, J.; KARROW, N.; MALLARD, B. A. Impact of heat stress on dairy cattle and selection strategies for thermotolerance: a review. **Frontiers in veterinary science**, v. 10, p. 1198697, 2023.

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

CARVALHEIRA, L. de R.; WENCESLAU, R. R.; RIBEIRO, L. dos S.; CARVALHO, B. C. de; BORGES, A. M.; CAMARGO, L. S. de A. Daily vaginal temperature in Girolando cows from three different genetic composition under natural heat stress. **Translational Animal Science**, v. 5, n. 3, txab138, 2021.

CERÓN, W. L.; ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T.; CANCHALA, T.; CARVAJAL-ESCOBAR, Y.; SOUZA, R. A. Comparison of spatial interpolation methods for annual and seasonal rainfall in two hotspots of biodiversity in South America. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, n. 1, p. e20190674, 2021.

CHANG-FUNG-MARTEL, J.; HARRISON, M. T.; BROWN, J. N.; SMITH, A. P.; ECKARD, R. J. Negative relationship between dry matter intake and the temperature-humidity index with increasing heat stress in cattle: a global meta-analysis. **International Journal of Biometeorology**, v. 65, p. 1121–1131, 2021.

CHOI, E.; DE SOUZA, V. C.; DILLON, J. A.; KEBREAB, E.; MUELLER, N. D. Comparative analysis of thermal indices for modeling cold and heat stress in US dairy systems. **Journal of Dairy Science**, v. 107, n. 8, p. 5817-5832, 2024.

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, 2017.

CORRÊA, W.; CARVALHO, M. W. L.; MENDES, T. J. Atualização da classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 517-543, 2023.

DA SILVA, R. G.; MAIA, A. S. C.; DE MACEDO COSTA, L. Index of thermal stress for cows (ITSC) under high solar radiation in tropical environments. **International Journal of Biometeorology**, v. 59, n. 5, p. 551-559, 2015.

DANTAS, V. V.; SANTOS, M. A. S.; REBELLO, F. K.; SANTANA, A. C.; LOURENÇO JÚNIOR, J. D. B.; FREITAS, A. C. R. Technological level of dairy farming in the state of Maranhão, Brazil. 2018.

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.

DE MEDEIROS, F. J.; DE OLIVEIRA, C. P. Dynamical aspects of the recent strong El Niño events and its climate impacts in Northeast Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 178, n. 6, p. 2315-2332, 2021.

DE OLIVEIRA, M. L.; DOS SANTOS, C. A.; DE OLIVEIRA, G.; SILVA, M. T.; DA SILVA, B. B.; DE B. L. CUNHA, J. E.; RUHOFF, A.; SANTOS, C. A. G. Remote sensing-based

assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 835, p. 155490, 2022.

DENIS, L.; TEMBO, M. D.; MANDA, M.; WILONDJIA, A.; NDONG, N.; KIMELI, J. K.; PHIONAH, N. 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.; ZENOBIO, V.; CIOCI, D.; DALL'ACQUA, F.; TORA, S.; IANNETTI, S.; DI SABATINO, D. 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.

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

DOS SANTOS, M. M.; SOUZA-JUNIOR, J. B. F.; DANTAS, M. R. T.; DE MACEDO COSTA, L. L. An updated review on cattle thermoregulation: physiological responses, biophysical mechanisms, and heat stress alleviation pathways. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 24, p. 30471-30485, 2021.

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.

EVIN, G.; HINGRAY, B.; BLANCHET, J.; ECKERT, N.; MORIN, S.; VERFAILLIE, D. Partitioning uncertainty components of an incomplete ensemble of climate projections using data augmentation. **Journal of Climate**, v. 32, n. 8, p. 2423-2440, 2019.

EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G. A.; SENIOR, C. A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R. J.; TAYLOR, K. E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937-1958, 2016.

FAO, U. Global agriculture towards 2050. **FAO Rome**, 2009.

FAO, V. Shaping the future of livestock sustainably, responsibly, efficiently. In: **The 10th Global Forum for Food and Agriculture**. FAO, 2018. p. 20.

FERRAZ, P. F. P.; FERRAZ, G. A.; YANAGI JUNIOR, T.; MELO, L. F. L. D.; CASTRO, J. D. O.; CECCHIN, D. Spatial and temporal distribution of enthalpy in aviary heated by industrial furnace. **Revista Ceres**, v. 65, p. 346-355, 2018.

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

- FERREIRA, N. C. R.; ROSA, D. R. D.; FERREIRA, L. N.; RODRIGUES, D. C.; BARBARI, M.; CHOU, S. C.; ANDRADE, R. R. Regional impacts of heat stress on livestock in Brazil under climate change scenarios. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 119, p. 108392, 2026.
- 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, 2022.
- FUQUAY, J. W. Heat Stress as it Affects Animal Production *Journal of Animal Science*. 1981.
- GARNER, J. B.; DOOGAN, V. J.; STOCKDALE, C. R.; GEBERT, S.; CARTER, A. H.; FOOTE, A. P.; MCDOWELL, G. H.; HAYES, B. J. Genomic selection improves heat tolerance in dairy cattle. **Scientific Reports**, v. 6, p. 34114, 2016.
- GALÁN, E.; LLONCH, P.; VILLAGRÁ, A.; LEVIT, H.; PINTO, S.; DEL PRADO, A. A systematic review of non-productivity-related animal-based indicators of heat stress resilience in dairy cattle. **PloS one**, v. 13, n. 11, p. e0206520, 2018.
- GARCIA, A. B.; ANGELI, N.; MACHADO, L.; DE CARDOSO, F. C.; GONZALEZ, F. Relationships between heat stress and metabolic and milk parameters in dairy cows in southern Brazil. **Tropical animal health and production**, v. 47, n. 5, p. 889-894, 2015.
- GARCIA-SOTO, C.; CHENG, L.; CAESAR, L.; SCHMIDTKO, S.; JEWETT, E. B.; CHERIPKA, A.; ABRAHAM, J. P. An overview of ocean climate change indicators: Sea surface temperature, ocean heat content, ocean pH, dissolved oxygen concentration, arctic sea ice extent, thickness and volume, sea level and strength of the AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation). **Frontiers in Marine Science**, v. 8, p. 642372, 2021.
- GAUGHAN, J. B.; HOLT, S.; HAHN, G. L.; MADER, T. L.; EIGENBERG, R. 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.
- GAUGHAN, J. B.; MADER, T. L.; HOLT, S. M.; LISLE, A. A new heat load index for feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, v. 86, n. 1, p. 226-234, 2008.
- GEORGES, M. Principles of geostatistics. **Economic geology**, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1963.
- GERSHONI, M. Transgenerational transmission of environmental effects in livestock in the age of global warming. **Cell Stress and Chaperones**, v. 28, n. 5, p. 445-454, 2023.
- GIANNONE, C.; BOVO, M.; CECCARELLI, M.; TORREGGIANI, D.; TASSINARI, P. Review of the heat stress-induced responses in dairy cattle. **Animals**, v. 13, n. 22, p. 3451, 2023.
- GODDE, C. M.; MASON-D'CROZ, D.; MAYBERRY, D. E.; THORNTON, P. K.; HERRERO, M. Impacts of climate change on the livestock food supply chain; a review of the evidence. **Global food security**, v. 28, p. 100488, 2021.

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

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. Oxford university press, 1997.

GUJAR, G.; TIWARI, M.; YADAV, N. Adaptação ao estresse térmico em vacas – Respostas fisiológicas e mecanismos moleculares subjacentes. **Journal of thermal biology**, v. 118, p. 103740, 2023.

HAMMAMI, H.; BORMANN, J.; M'HAMDI, N.; MONTALDO, H. H.; GENGLER, N. Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. **Journal of dairy science**, v. 96, n. 3, p. 1844-1855, 2013.

HASAN, F. M.; CHLINGARYAN, A.; THOMSON, P. C.; CLARK, C. E. F.; ISLAM, M. R.; LOMAX, S. Impact of heat stress on cattle systems: Responses of production metrics to thermal stress. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 240, p. 111143, 2026.

HENGL, T.; MENDES DE JESUS, J.; HEUVELINK, G. B. M.; RUIPEREZ GONZALEZ, M.; KILIBARDA, M.; BLAGOTIĆ, A.; SHANGGUAN, W.; WRIGHT, M. N.; GENG, X.; BAUERMANN, L.; GRUNDY, M.; KEMPEN, B. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. **PLoS one**, v. 12, n. 2, p. e0169748, 2017.

HERBUT, P.; ANGRECKA, S.; WALCZAK, J. Environmental parameters to assessing of heat stress in dairy cattle—a review. **International journal of biometeorology**, v. 62, n. 12, p. 2089-2097, 2018.

HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980.

HOFFMANN, G.; HERBUT, P.; PINTO, S.; HEINICKE, J.; KUHLA, B.; AMON, T. Animal-related, non-invasive indicators for determining heat stress in dairy cows. **Biosystems Engineering**, v. 199, p. 83-96, 2020.

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

Jl, B.; BANHAZI, T.; PERANO, K.; GHAMRAMANI, A.; BOWTELL, L.; WANG, C.; LI, B. A review of measuring, assessing and mitigating heat stress in dairy cattle. **Biosystems Engineering**, v. 199, p. 4-26, 2020.

JOHNSTON, K.; VER HOEF, J. M.; KRIVORUCHKO, K.; LUCAS, N. **Using ArcGIS geostatistical analyst**. Redlands: Esri, 2001.

JOURNAL OF THE CHEMICAL, METALLURGICAL AND MINING SOCIETY OF SOUTH AFRICA. Journal of the Chemical, **Metallurgical and Mining Society of South Africa**. Johannesburg, v. 55, n. 1, p. 1–10, jul. 1955.

JUNQUEIRA, R.; NASCIMENTO, F. C. A.; SOUSA, R. F.; GUIMARÃES, S. O.; MARTINS,

E. S. P. R.; COSTA, A. C.; ALENCAR, D. B. S.; CHAVES, L. C. G.; MUNIZ, F. H.; PINTO, M. S. M.; LEMOS FILHO, L. C. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, C. M. Drought severity indexes for the Tocantins River Basin, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 141, n. 1–2, p. 465–481, 2020.

KAMAL, R.; DUTT, T.; PATEL, M.; DEY, A.; BHARTI, P. K.; CHANDRAN, P. C. Heat stress and effect of shade materials on hormonal and behavior response of dairy cattle: a review. **Tropical Animal Health and Production**, v. 50, n. 4, p. 701–706, 2018.

LATAWIEC, A. E.; STRASSBURG, B. B. N.; SILVA, D.; ALVES-PINTO, H. N.; FELTRAN-BARBIERI, R.; CASTRO, A.; IRIBARREM, A.; RANGEL, M. C.; BEDUSCHI, F. Improving land management in Brazil: A perspective from producers. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 240, p. 276–286, 2017.

LOZANO-JARAMILLO, M.; BASTIAANSEN, J. W.; DESSIE, T.; KOMEN, H. 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.

MADER, T. L.; DAVIS, M. S.; BROWN-BRANDL, T. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. **Journal of animal science**, v. 84, n. 3, p. 712–719, 2006.

MADER, T. L.; JOHNSON, L. J.; GAUGHAN, J. B. A comprehensive index for assessing environmental stress in animals. **Journal of Animal Science**, v. 88, n. 6, p. 2153–2165, 2010.

MARINHO, G. T. B.; PANDORFI, H.; DA SILVA, M. V.; MONTENEGRO, A. A. A.; DE SOUSA, L. D. B.; DESENZI, R.; ALMEIDA, G. L. P.; SILVA, T. G. F. Bioclimatic zoning for sheep farming through geostatistical modeling in the state of Pernambuco, Brazil. **Animals**, v. 13, n. 6, p. 1124, 2023.

MARTHA JR., G. B.; ALVES, E.; CONTINI, E. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. **Agricultural Systems**, v. 110, p. 173–177, 2012.

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

MITCHELL, D.; SNELLING, E. P.; HETEM, R. S.; MALONEY, S. K.; STRAUSS, W. M.; FULLER, A. Revisiting concepts of thermal physiology: predicting responses of mammals to climate change. **Journal of Animal Ecology**, v. 87, n. 4, p. 956–973, 2018.

MYLOSTYVYI, R.; IZHBOLDINA, O. An Integrated Approach Using Temperature–Humidity Index, Productivity, and Welfare Indicators for Herd-Level Heat Stress Assessment in Dairy Cows. **Animals**, v. 15, n. 22, p. 3341, 2025.

NARDONE, A.; RONCHI, B.; LACETERA, N.; RANIERI, M. S.; BERNABUCCI, U. Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. **Livestock science**, v. 130, n. 1–3, p. 57–69, 2010.

NASCIMENTO, F. C. A.; BRAGA, C. C.; ARAÚJO, F. R. C. D. Análise estatística dos eventos

secos e chuvosos de precipitação do estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 446–457, 2017.

NGUYEN, T. T. T.; BOWMAN, P. J.; HAILE-MARIAM, M.; NICHOLAS, F. W.; HAYES, B. J. Genomic selection for tolerance to heat stress in Australian dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v. 99, n. 4, p. 2849–2862, 2016.

NONG, D. H.; NGUYEN, T. T.; VU, X. T.; NGO, S. T.; VO, C. H.; TRAN, P. T. 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.

NUTA, A.; WANG, X.; KINAY, P. The impacts of climate change on livestock: An interdisciplinary, scoping review of health, production, and adaptation strategies. **Climate Smart Agriculture**, p. 100082, 2025.

NZEYIMANA, J. B.; FAN, C.; ZHUO, Z.; BUTORE, J.; CHENG, J. Heat stress effects on the lactation performance, reproduction, and alleviating nutritional strategies in dairy cattle, a review. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, v. 11, n. 3, p. 2023018-2023018, 2023.

OMINSKI, K. H.; KENNEDY, A. D.; WITTENBERG, K. M.; ABEYASEKARA, S. Physiological and production responses to short-term heat stress in lactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 85, n. 6, p. 1531–1538, 2002.

OLIVEIRA, C. P.; SOUSA, F. C. D.; SILVA, A. L. D.; SCHULTZ, É. B.; VALDERRAMA LONDOÑO, R. I.; SOUZA, P. A. R. D. Heat stress in dairy cows: impacts, identification, and mitigation strategies—a review. **Animals**, v. 15, n. 2, p. 249, 2025.

OLIVEIRA, S. E. O.; DE MELO COSTA, C. C.; CHIQUITELLI NETO, M.; DALLA COSTA, F. A.; MAIA, A. S. C. Effects of shade location and protection from direct solar radiation on the behavior of Holstein cows. **International Journal of Biometeorology**, v. 63, n. 11, p. 1465-1474, 2019.

OUELLET, V.; TOLEDO, I. M.; DADO-SENN, B.; DAHL, G. E.; LAPORTA, J. Critical temperature-humidity index thresholds for dry cows in a subtropical climate. **Frontiers in Animal Science**, v. 2, p. 706636, 2021.

PAIVA, P. F. P. R.; DE LOURDES PINHEIRO RUIVO, M.; DA SILVA JÚNIOR, O. M.; DE NAZARÉ MARTINS MACIEL, M.; BRAGA, T. G. M.; DE ANDRADE, M. M. N.; FERREIRA, B. M. Deforestation in protect areas in the Amazon: a threat to biodiversity. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 1, p. 19-38, 2020.

PINTO, S.; HOFFMANN, G.; AMMON, C.; AMON, T. Critical THI thresholds based on the physiological parameters of lactating dairy cows. **Journal of Thermal Biology**, v. 88, p. 102523, 2020.

POLLEY, H. W.; BRISKE, D. D.; MORGAN, J. A.; WOLTER, K.; BAILEY, D. W.; BROWN, J. R. Climate change and North American rangelands: trends, projections, and implications. **Rangeland Ecology & Management**, v. 66, n. 5, p. 493-511, 2013.

POLSKY, L.; VON KEYSERLINGK, M. A. G. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. **Journal of dairy science**, v. 100, n. 11, p. 8645-8657, 2017.

QUEIROZ, M. L. D. V.; BARBOSA FILHO, J. A. D.; SALES, F. A. D. L.; LIMA, L. R. D.; DUARTE, L. M. Variabilidade espacial do ambiente em galpões de frango de corte com sistema de nebulização. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 4, p. 586-595, 2017.

RAHIMI, J.; FILLOL, E.; MUTUA, J. Y.; CINARDI, G.; ROBINSON, T. P.; NOTENBAERT, A. M.; BUTTERBACH-BAHL, K. 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, 2022.

RAHIMI, J.; MUTUA, J. Y.; NOTENBAERT, A. M.; DIENG, D.; BUTTERBACH-BAHL, K. Will dairy cattle production in West Africa be challenged by heat stress in the future. **Climatic Change**, v. 161, n. 4, p. 665-685, 2020.

RAHIMI, J.; MUTUA, J. Y.; NOTENBAERT, A. M.; MARSHALL, K.; BUTTERBACH-BAHL, K. Heat stress will detrimentally impact future livestock production in East Africa. **Nature Food**, v. 2, n. 2, p. 88-96, 2021.

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.

RASHAMOL, V. P.; SEJIAN, V.; BAGATH, M.; KRISHNAN, G.; ARCHANA, P. R.; BHATTA, R. Physiological adaptability of livestock to heat stress: an updated review. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v. 6, n. 3, p. 62-71, 2018.

RAWAT, A.; KUMAR, D.; KHATI, B. S. A review on climate change impacts, models, and its consequences on different sectors: a systematic approach. **Journal of Water and Climate Change**, v. 15, n. 1, p. 104-126, 2024.

RODRIGUES, R. C.; TOSTA, X. M.; ARAÚJO, R. A.; SANTOS, F. N. S.; SILVA, R. R.; OLIVEIRA, L. B. T.; SILVA, I. R.; CUTRIM JÚNIOR, J. A. A.; LANA, R. P.; ZANINE, A. M.; COSTA, C. S. Grazing behavior and performance of cattle supplemented with increasing levels of babassu meal on Marandu-grass pastures in silvopastoral systems. **Biological Rhythm Research**, v. 53, n. 5, p. 696-706, 2022.

RUBENS, J.; VIOLA, M. R.; DE MELLO CARLOS, R.; VIEIRA-FILHO, M. Drought severity indexes for the Tocantins River Basin, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 141, n. 1-2, p. 465-481, 2020.

SANTOS, C. A. G.; SANTOS, D. C.; BRASIL NETO, R. M.; OLIVEIRA, G.; SANTOS, C.

A. C.; SILVA, R. M. Analyzing the impact of ocean-atmosphere teleconnections on rainfall variability in the Brazilian Legal Amazon via the Rainfall Anomaly Index (RAI). **Atmospheric Research**, v. 307, p. 107483, 2024.

SANTOS, G. G.; SOUZA, V. Q.; CARMO, A. P. M.; SANTOS, M. G.; FREITAS, L. S.; NERIS, J. P. F.; COSTA, J. N.; AGUIAR, E. S.; LIMA, F. M. S.; ARAÚJO, R. G. Análise espacial das principais produções agropecuárias do Estado do Maranhão. *In: AGRONEGÓCIO: técnicas, inovação e gestão*. v. 1, p. 287–302, 2021.

SCHARF, B.; JOHNSON, J. S.; WEABER, R. L.; SPIERS, D. E. Utilizing laboratory and field studies to determine physiological responses of cattle to multiple environmental stressors. **Journal of Thermal Biology**, v. 37, n. 4, p. 330–338, 2012.

SCOLARO, T. P.; VAZ, I. C. M.; GHISI, E. 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.; BHATTA, R.; GAUGHAN, J. B.; DUNSHEA, F. R.; LACETERA, N. Review: Adaptation of animals to heat stress. **Animal**, v. 12, p. s431–s444, 2018.

SEJIAN, V.; SHASHANK, C. G.; SILPA, M. V.; MADHUSOODAN, A. P.; DEVARAJ, C.; KOENIG, S. Non-invasive methods of quantifying heat stress response in farm animals with special reference to dairy cattle. **Atmosphere**, v. 13, n. 10, p. 1642, 2022.

SHEPHARD, R. W.; MALONEY, S. K. A review of thermal stress in cattle. **Australian Veterinary Journal**, v. 101, n. 11, p. 417–429, 2023.

SILVA, C. M.; COSTA FILHO, W. M.; SILVA, M. L. P. B.; ROSÁRIO, C. J. R. M.; PINHEIRO, M. F. N.; BEZERRA, N. P. C.; SOUTO, M. S. M.; BEZERRA, D. C.; ARRUDA, R. C. N.; COIMBRA, V. C. S. Caracterização da produção pecuária da agricultura familiar maranhense. *In: MANEJO, NUTRIÇÃO E PRODUÇÃO ANIMAL: tópicos atuais em pesquisa*. v. 1. **Editora Científica Digital**, 2023. p. 11–25.

SILVA, G. F. Perfil da pecuária bovina maranhense. 2025. 30 f. Monografia (Bacharelado em Zootecnia) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2025.

SILVA, M. V.; PANDORFI, H.; ALMEIDA, G. L. P.; JARDIM, A. M. R. F.; BATISTA, P. H. D.; SILVA, R. A. B.; LOPES, I.; OLIVEIRA, M. E. G.; SILVA, J. L. B.; MORAES, A. S. 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, 2020.

SILVA, R. A. B.; PANDORFI, H.; ALMEIDA, G. L. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, M. V. Spatial dependence of udder surface temperature variation in dairy cows with healthy status and mastitis. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 20, 2019.

SILVA, V. C.; NASCIMENTO, R. S.; LOPES NETO, J. P.; MIRANDA, J. R.; LOPES, F. F. M.; FURTADO, D. A. Bioclimatic spatial zoning for small ruminants in the state of Paraíba,

Brazil. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, v. 44, e54321, 2022.

SILVA, V. C.; NASCIMENTO, R. S.; LOPES NETO, J. P.; MIRANDA, J. R.; LOPES, F. F. M.; FURTADO, D. A. Bioclimatic zoning for quails in the rain season in the state of Paraíba, Brazil. **Bioscience Journal**, v. 39, e39057, 2023.

SILVA, Z. F.; ANDRADE, A. C.; BENTO JÚNIOR, F. A.; SOUSA, R. S.; LOIOLA, J. M. L. Características do sistema de produção de leite da Microrregião de Imperatriz, no Estado do Maranhão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 55, n. 2, p. 44–49, 2012.

SILVEIRA, R. M. F.; FAÇANHA, D. A. E.; VASCONCELOS, A. M.; LEITE, S. C. B.; LEITE, J. H. G. M.; SARAIVA, E. P.; FÁVERO, L. P.; TEDESCHI, L. O.; SILVA, I. J. O. Physiological adaptability of livestock to climate change: a global model-based assessment for the 21st century. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 116, p. 108061, 2026.

SINGARAVADIVELAN, A.; PRASAD, A.; BALUSAMI, C.; HARIKUMAR, S.; BEEN, V.; GLEEJA, V. L.; SEJIAN, V.; VIJAYAKUMAR, P.; SACHIN, P. B.; KUMAR, I. P.; LAKSHMI, M.; PARVATHY, V. S. Navigating the labyrinth of heat stress assessment in dairy cattle: a comprehensive review of methods and emerging technologies. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 237, p. 110517, 2025.

SOBJAK, R.; SOUZA, E. G.; BAZZI, C. L.; OPAZO, M. A. U.; MERCANTE, E.; AIKES JÚNIOR, J. Process improvement of selecting the best interpolator and its parameters to create thematic maps. **Precision Agriculture**, v. 24, n. 4, p. 1461–1496, 2023.

SODRE, G. R. C.; MORAES, B. C.; FERREIRA, D. S.; OLIVEIRA, J. V.; SOUZA, E. B. Teleconexões oceânicas nos padrões climatológicos da Amazônia Oriental: análise dos últimos 40 anos (1974–2013). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 52–70, 2015

SOUZA, A. C. D.; SOUSA, A. M. D.; CORRÊA, W. C.; MARQUES, J. I.; MENESES, K. C. D.; PANDORFI, H.; SILVA, T. G. F. D.; SILVA, J. L. B. D.; SILVA, M. V. D.; MACHADO, N. A. F. Bioclimatic Zoning and Climate Change Impacts on Dairy Cattle in Maranhão, Brazil. **Animals**, v. 15, n. 11, p. 1646, 2025.

SOUZA, W. G.; SILVA, M. T.; SIQUEIRA, M. S.; GOMES, H. B.; OLIVEIRA, G.; SILVA, T. G. F.; CAVALCANTI, E. P. Variabilidade espaço-temporal da seca meteorológica nas microrregiões do MATOPIBA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 1, p. 1–21, 2024.

ST-PIERRE, N. R.; COBANOV, B.; SCHNITKEY, G. Economic losses from heat stress by US livestock industries. **Journal of Dairy Science**, v. 86, p. E52–E77, 2003.

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

THORNTON, P. K.; VAN DE STEEG, J.; NOTENBAERT, A.; HERRERO, M. The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: a review of what we know and what we need to know. **Agricultural Systems**, v. 101, n. 3, p. 113–127, jul. 2009.

- TRESOLDI, G.; HEJAZI, M.; TUCKER, C. B. A comprehensive study of respiration rates in dairy cattle in a Mediterranean climate. **Journal of Dairy Science**, v. 108, n. 6, p. 6229–6243, jun. 2025.
- TURCO, S. H. N.; SILVA, T. G. F.; SANTOS, L. F. C.; RIBEIRO, P. A. Zoneamento bioclimático para vacas leiteiras no Estado da Bahia. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 20–27, abr. 2006.
- VALVERDE, M. C.; MARENGO, J. A. Extreme rainfall indices in the hydrographic basins of Brazil. **Open Journal of Modern Hydrology**, v. 4, n. 1, p. 10–26, 2014.
- 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.
- VITALI, A.; FELICI, A.; ESPOSITO, S.; BERNABUCCI, U.; BERTOCCHI, L.; MARESCA, C.; NARDONE, A.; LACETERA, N. The effect of heat waves on dairy cow mortality. **Journal of Dairy Science**, v. 98, n. 7, p. 4572–4579, jul. 2015.
- VOMMARO, F.; MENEZES, J. A.; BARATA, M. M. L. Contributions of municipal vulnerability map of the population of the state of Maranhão (Brazil) to the sustainable development goals. **Science of the Total Environment**, v. 706, p. 134629, mar. 2020a.
- WANI, M. A.; SHAISTA, N.; WANI, Z. M. 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.
- WANKAR, A. K.; RINDHE, S. N.; DOIJAD, N. S. Heat stress in dairy animals and current milk production trends, economics, and future perspectives: the global scenario. **Tropical Animal Health and Production**, v. 53, n. 1, p. 70, 2021.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. [S.l.]: Wiley, 2007.
- WEST, J. W. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v. 86, n. 6, p. 2131–2144, jun. 2003.
- YAN, G.; LI, H.; SHI, Z. Evaluation of thermal indices as the indicators of heat stress in dairy cows in a temperate climate. **Animals**, v. 11, n. 8, p. 2459, 2021.
- 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.

1 Apêndice 1

2 Resumo das estatísticas descritivas para os valores médios anuais da temperatura do ar.

Ano	Média	Min ¹	Max ²	SD ³	CV ⁴
2012	26.889	23.450	29.137	1.132	4.208
2013	27.033	23.791	29.120	1.0372	3.837
2014	26.755	23.591	28.920	0.941	3.517
2015	27.163	24.049	29.154	0.826	3.041
2016	27.374	24.291	29.416	0.996	3.638
2017	27.110	23.508	29.241	0.977	3.604
2018	26.786	23.554	28.783	0.869	3.244
2019	27.281	24.308	29.070	0.734	2.691
2020	26.780	23.537	28.583	0.798	2.980
2021	26.583	23.295	28.333	0.814	3.062
2022	26.468	23.133	28.141	0.729	2.754
2023	26.886	23.875	28.783	0.761	2.830
2024	27.163	23.966	29.195	0.8221	3.142

3 ¹Mínimo. ² Máximo. ³ Desvio padrão. ⁴ Coeficiente de variação.

4

5

6 Apêndice 2

7 Resumo das estatísticas descritivas para os valores anuais de velocidade do vento.

Ano	Média	Min ¹	Max ²	SD ³	CV ⁴
2012	1.467	1.092	2.729	0.265	18.064
2013	1.425	1.079	2.493	0.250	17.544
2014	1.484	1.201	2.475	0.228	15.364
2015	1.596	1.126	2.675	0.286	17.920
2016	1.503	1.146	2.47	0.249	16.567
2017	1.574	1.290	2.352	0.184	11.690
2018	1.294	0.841	2.500	0.284	21.947
2019	1.169	0.825	2.241	0.216	18.477
2020	1.231	0.758	1.833	0.193	15.678
2021	1.147	0.841	1.908	0.180	15.693
2022	1.334	0.908	1.825	0.185	13.868
2023	1.414	1.100	2.058	0.177	12.518
2024	1.467	1.150	2.258	0.180	12.270

¹Mínimo. ² Máximo. ³ Desvio padrão. ⁴ Coeficiente de variação.

Apêndice 3

Validação cruzada dos modelos geoestatísticos testados para valores médios anuais do ITU.

Gaussiano					
Ano	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
2012	0,001626452	0,182013053	0,00779711	0,802128	0,226911639
2013	0,001406824	0,185973639	0,00646772	0,7780316	0,23899667
2014	0,001205019	0,187393487	0,005395297	0,7546008	0,248276242
2015	0,001114403	0,190652883	0,004834541	0,7420926	0,2568169
2016	0,001339842	0,186079898	0,006101088	0,76550823	0,24303419
2017	0,00111343	0,189309448	0,004984191	0,7591191	0,2493122
2018	0,000599605	0,191581318	0,002662496	0,7088172	0,270140782
2019	0,000869422	0,181607237	0,003934458	0,70581076	0,257203767
2020	0,000660389	0,192203203	0,002877935	0,7045586	0,27267361
2021	0,001002446	0,189840465	0,00433775	0,72143335	0,263044782
2022	0,000106874	0,193464814	0,000758881	0,65726061	0,294165691
2023	0,001654166	0,179921759	0,007887942	0,78423291	0,229410673
Exponencial					
Ano	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
2012	-0,000472255	0,12889224	-0,000958666	0,582564257	0,221274032
2013	-0,000490464	0,129299708	-0,001043384	0,594798666	0,217402355
2014	-0,000490748	0,128962683	-0,001096212	0,610484416	0,21128051
2015	-0,000499266	0,129465871	-0,001163473	0,616646626	0,209993647
2016	-0,000458259	0,128978477	-0,000921173	0,602824793	0,213965415
2017	-0,000467414	0,128788414	-0,000981837	0,602542766	0,213797067
2018	-0,000458935	0,128393832	-0,00097723	0,624536891	0,20560194
2019	-0,000527456	0,12990522	-0,001237933	0,605038327	0,214717179
2020	-0,000469978	0,129369522	-0,00104148	0,641470262	0,201734207
2021	-0,000506541	0,129350044	-0,001099826	0,608753309	0,212502554
2022	-0,00047885	0,128458003	-0,001030727	0,625094344	0,205531904
2023	-0,000471804	0,129069315	-0,000974172	0,608991685	0,211972383

¹. Erro médio. ². Raiz do erro quadrático médio. ³. Erro quadrático médio. ⁴. Raiz do erro

17 Apêndice 4

18 Validação cruzada dos modelos geoestatísticos testados para valores médios anuais de
19 temperatura do ar.

Esférico					
Ano	ME ¹	RMSE ²	MSE ³	RMSSE ⁴	ASE ⁵
2014	-0.000204936	0.082198787	-0.000587313	0.855976353	0.096105142
2015	-0.000215991	0.082135197	-0.000712451	0.848934244	0.096825771
2016	-0.0001938	0.081797651	-0.000454343	0.841799328	0.09723369
2017	-0.000193494	0.081890327	-0.000473753	0.840975162	0.097459257
2018	-0.000120973	0.084084031	0.000217326	0.791784334	0.10621371
2019	-0.000109248	0.084923205	0.000252636	0.773825547	0.109753444
2020	-8.19×10^{-5}	0.085825575	0.00049992	0.771998349	0.111175679
2021	-9.28×10^{-5}	0.085384528	0.000452708	0.766104395	0.111463969
2022	-2.79×10^{-5}	0.087383584	0.000913714	0.736658549	0.118584279
2023	-0.00013748	0.083618374	7.63×10^{-5}	0.803959345	0.104037462
2024	-0.0001854052	0.08252512	-0.0003539157	0.8378303	0.90854659
Gaussiano					
Ano	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
2014	0.000441129	0.123315133	0.002978388	0.714932486	0.17238961
2015	0.000473844	0.123462419	0.003144899	0.712593309	0.173154822
2016	0.000557042	0.122305438	0.003815208	0.733422053	0.166676007
2017	0.000451164	0.122702137	0.003099707	0.723840617	0.169433035
2018	0.000308054	0.123952861	0.002098401	0.674811211	0.183565326
2019	0.000290605	0.123865886	0.001968925	0.674745404	0.183452757
2020	0.000195298	0.124201639	0.00145892	0.681010733	0.182270527
2021	0.000418079	0.123312678	0.002823683	0.69778248	0.176626158
2022	9.47×10^{-5}	0.124168571	0.000899863	0.663017223	0.187158578
2023	0.000229171	0.124237606	0.001628482	0.664802599	0.186752305
2024	-0.0009863753	0.126433	-0.003256301	0.4341501	0.2910521
Exponencial					
Ano	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
2014	-0.00030466	0.082549167	-0.001057929	0.613082836	0.134672248

2015	-0.000297301	0.082380439	-0.001053532	0.621410071	0.132610451
2016	-0.000280168	0.082103456	-0.000880885	0.612841799	0.133985616
2017	-0.000262758	0.082112712	-0.00078651	0.615039712	0.133568466
2018	-0.000282375	0.082416766	-0.000895012	0.626294565	0.131624318
2019	-0.000292956	0.082448963	-0.001021571	0.626530991	0.131634996
2020	-0.00027494	0.082684695	-0.000902094	0.653010965	0.126672239
2021	-0.000269293	0.082713603	-0.000814937	0.645746563	0.128146679
2022	-2.73×10^{-4}	0.082307145	-0.000853912	0.649012204	0.126859435
2023	-0.000267204	0.082358826	-0.00080602	0.632910771	0.130168669
2024	-0.0003057324	0.08254026	-0.001021407	0.612146	0.1348374

¹. Erro médio. ². Raiz do erro quadrático médio. ³. Erro quadrático médio. ⁴. Raiz do erro quadrático médio padronizado. ⁵. Média do erro padronizado.

23 Apêndice 5
 24 Validação cruzada para os modelos geoestatísticos testados para valores anuais de velocidade
 25 do vento

Esférico					
Ano	ME ¹	RMSE ²	MSE ³	RMSSE ⁴	ASE ⁵
2014	2.22×10^{-5}	0.005855997	0.000967779	0.209550856	0.027700369
2015	2.73×10^{-5}	0.005884585	0.001091054	0.205882806	0.028339731
2016	2.39×10^{-5}	0.005860335	0.001018727	0.209409907	0.027749647
2017	1.61×10^{-5}	0.005861276	0.000789962	0.237867906	0.024436935
2018	2.43×10^{-5}	0.008635566	0.000798573	0.261035016	0.032946513
2019	6.39×10^{-6}	0.00848083	0.000556435	0.289241427	0.029177985
2020	3.23×10^{-6}	0.009472863	0.000368143	0.401070223	0.023564388
2021	9.11×10^{-6}	0.009118394	0.000605613	0.392121242	0.02316413
2022	8.33×10^{-6}	0.008826727	0.000520317	0.383088724	0.022949407
2023	7.41×10^{-6}	0.008842566	5.70×10^{-4}	0.38129127	0.023092005
2024	7.12×10^{-6}	0.008964043	0.00061063	0.3696746	0.02410764
Gaussiano					
Ano	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
2014	7.18×10^{-5}	0.006885916	0.009966881	0.958926431	0.007159693
2015	7.98×10^{-5}	0.007114556	0.010175624	0.906325581	0.007827267
2016	9.88×10^{-5}	0.007310013	0.011298487	0.829971511	0.008782574
2017	0.000102069	0.007936288	0.009186667	0.7034129	0.011251273
2018	9.58×10^{-5}	0.010063436	0.009442755	0.994902711	0.010100562
2019	0.000203545	0.01023285	0.015245186	0.752504658	0.013573351
2020	0.000129428	0.011655538	0.009488282	0.826237387	0.014091003
2021	0.000133187	0.011486578	0.009101525	0.762207342	0.015041559
2022	1.04×10^{-4}	0.010683676	0.007789744	0.78916468	0.013510756
2023	0.000117656	0.011040446	0.008136526	0.739386421	0.014901817
2024	0.0000790821	0.00980666	0.007345327	0.8954465	0.0109287
Exponencial					
Ano	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
2014	2.36×10^{-5}	0.005914032	0.000772875	0.15010959	0.038990755

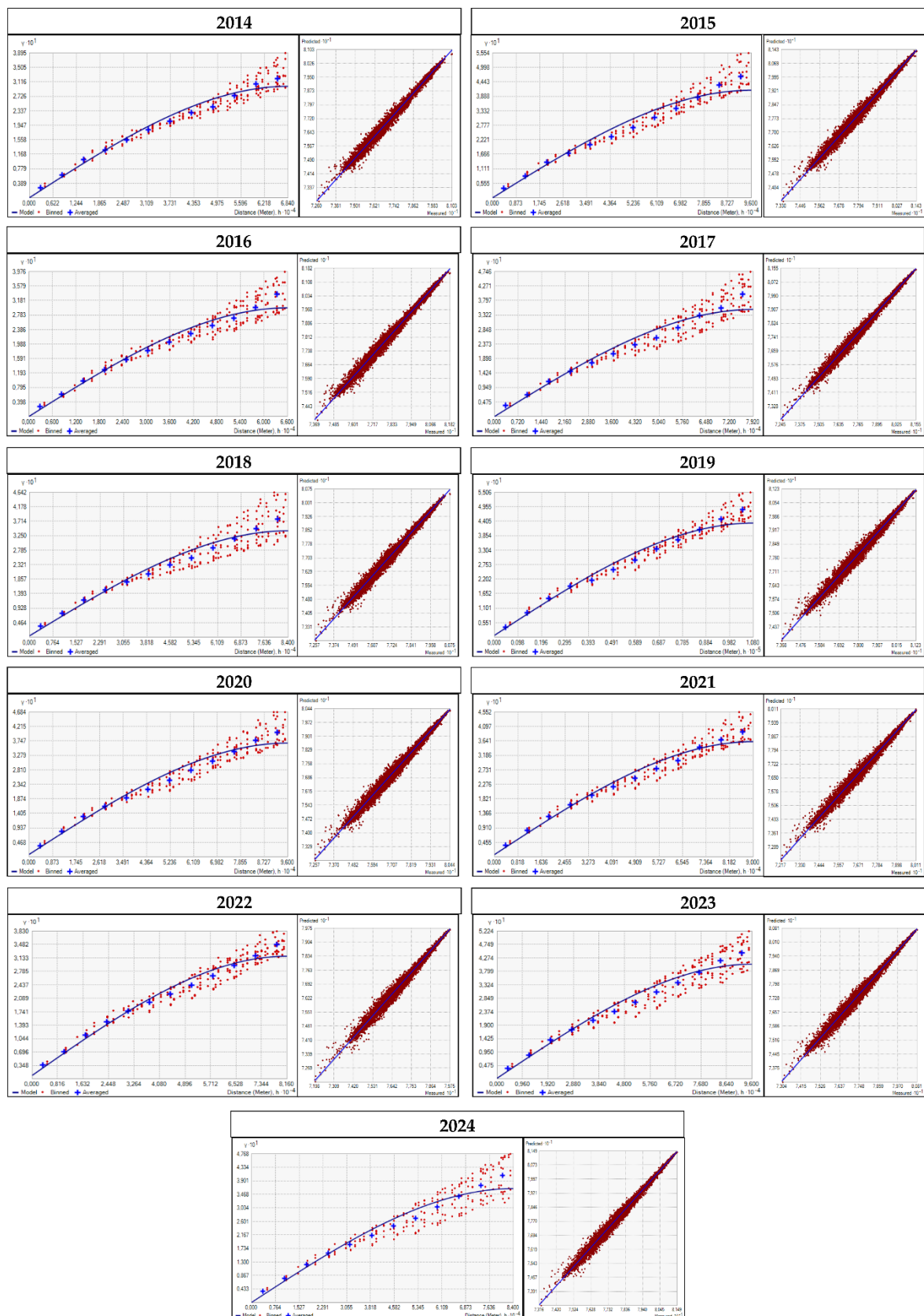
2015	3.03×10^{-5}	0.005929303	0.000891817	0.14785225	0.039713333
2016	2.61×10^{-5}	0.005909295	0.000836927	0.152139202	0.038463578
2017	1.62×10^{-5}	0.005907867	0.000620755	0.17365505	0.033697348
2018	2.49×10^{-5}	0.008672124	0.000621573	0.18758295	0.045995513
2019	4.69×10^{-7}	0.008523516	0.000319591	0.209514754	0.040435716
2020	-3.94×10^{-7}	0.009490483	0.000195564	0.287952916	0.032870342
2021	6.90×10^{-6}	0.00913917	0.000407744	0.280767227	0.032411693
2022	6.25×10^{-6}	0.008852304	0.000353307	0.277726593	0.031729262
2023	5.67×10^{-6}	0.008868963	0.000400476	0.276020481	0.031976274
2024	3.57×10^{-6}	0.009011779	0.000410107	0.2682195	0.03336508

¹. Erro médio. ². Raiz do erro quadrático médio. ³. Erro quadrático médio. ⁴. Raiz do erro quadrático médio padronizado. ⁵. Média do erro padronizado

29 Apêndice 6

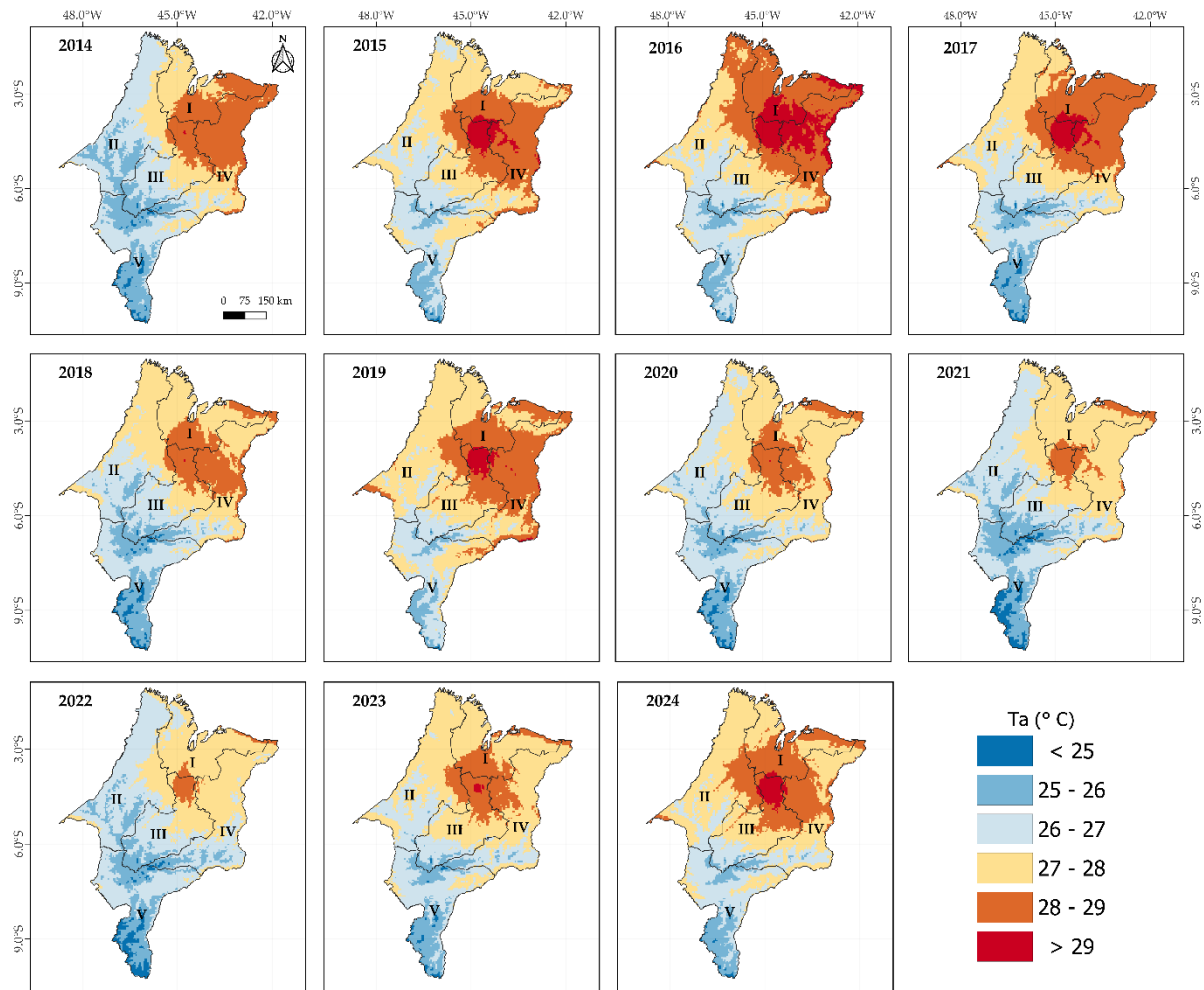
30 Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas de krigagem anuais do Índice de

31 Temperatura e Umidade (ITU) de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão.



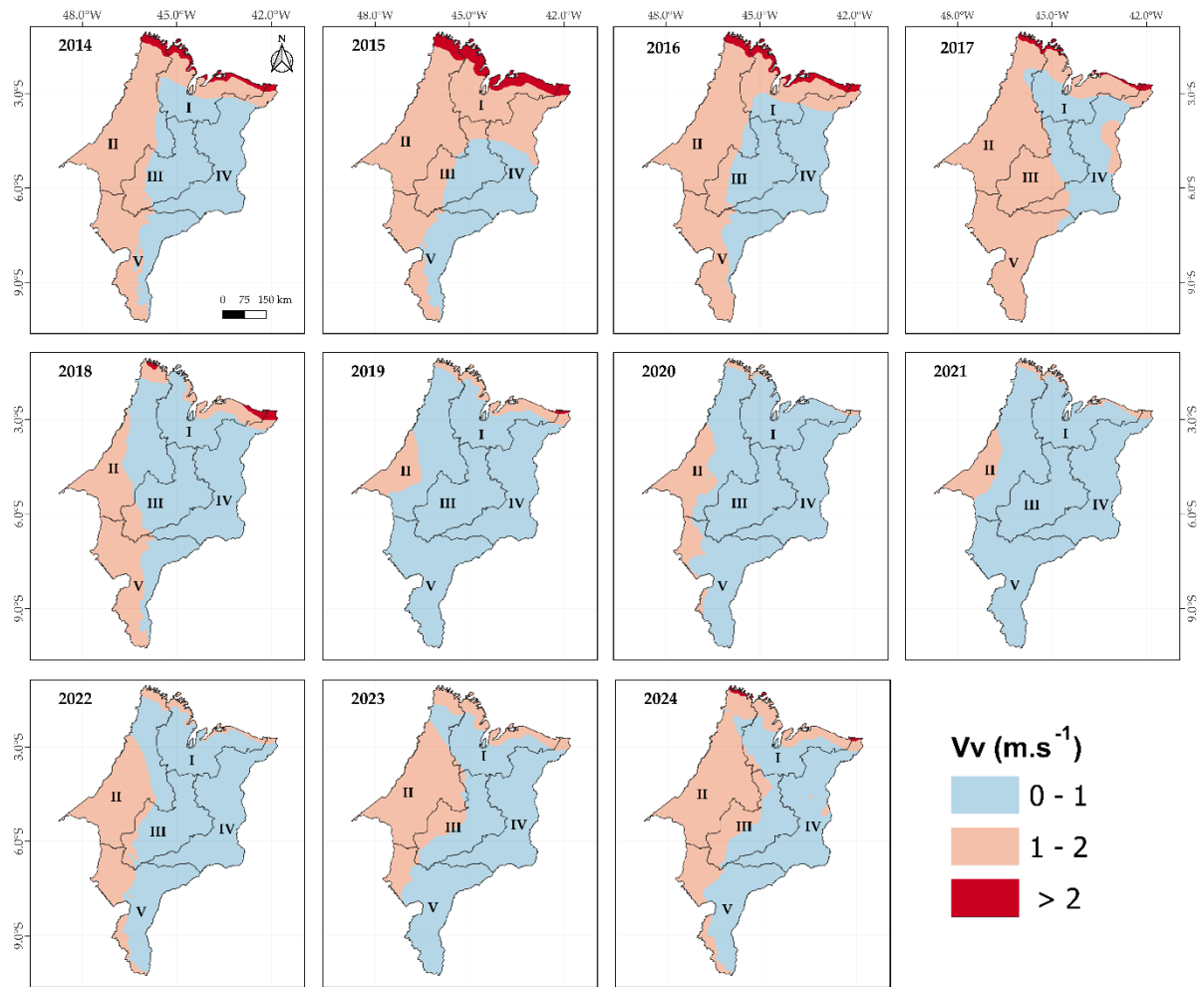
Apêndice 7

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



Apêndice 8

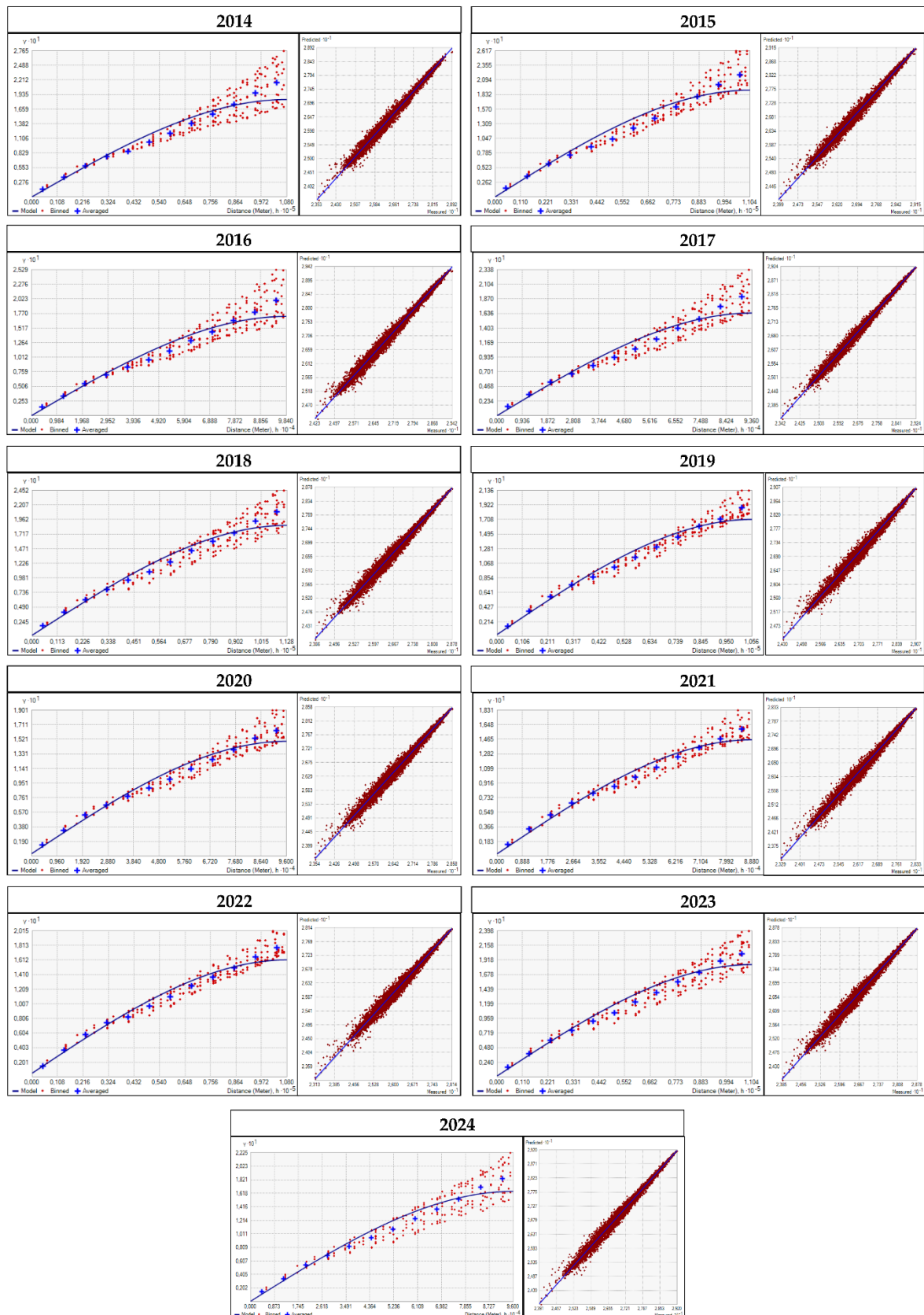
Mapas de krigagem anuais dos valores de velocidade do vento de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.



72 Apêndice 9

73 Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas de krigagem anuais da

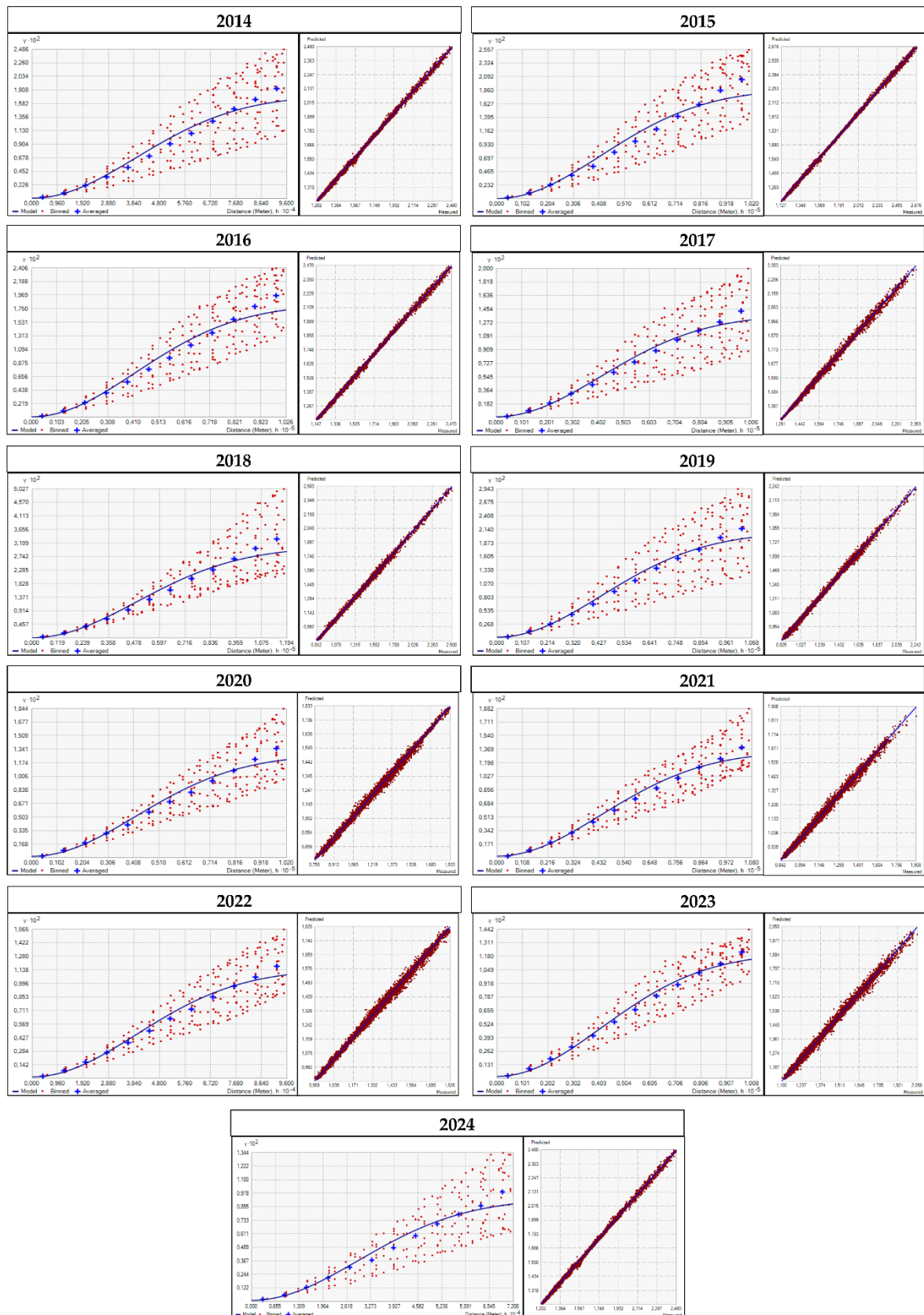
74 temperatura do ar de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão.



77 Apêndice 10

78 Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas de krigagem anuais da

79 velocidade do vento de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão.



81 Apêndice 11

82 Resumo das estatísticas descritivas para os valores médios mensais da temperatura do ar.

Ano	Média	Min ¹	Max ²	SD ³	CV ⁴
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
Maio	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

83 ¹Mínimo. ² Máximo. ³ Desvio padrão. ⁴ Coeficiente de variação.

84

85

86 Apêndice 12

87 Resumo das estatísticas descritivas para os valores mensais de velocidade do vento.

Ano	Média	Min ¹	Max ²	SD ³	CV ⁴
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

88 ¹Mínimo. ² Máximo. ³ Desvio padrão. ⁴ Coeficiente de variação.

89

90 Apêndice 13

91 Resumo das estatísticas descritivas para os valores mensais da pressão de vapor.

Ano	Média	Min ¹	Max ²	SD ³	CV ⁴
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
Maio	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

92 ¹Mínimo. ² Máximo. ³ Desvio padrão. ⁴ Coeficiente de variação.

93

Apêndice 14

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

Mês	Esférico				
	ME ¹	RMSE ²	MSE ³	RMSSE ⁴	ASE ⁵
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
Maio	-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
Mês	Gaussiano				
	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
Maio	-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
Mês	Exponencial				
	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
Maio	-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

¹. Erro médio. ². Raiz do erro quadrático médio. ³. Erro quadrático médio. ⁴. Raiz do erro quadrático médio padronizado. ⁵. Média do erro padronizado.

Apêndice 15

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

Esférico					
Mês	ME ¹	RMSE ²	MSE ³	RMSSE ⁴	ASE ⁵
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

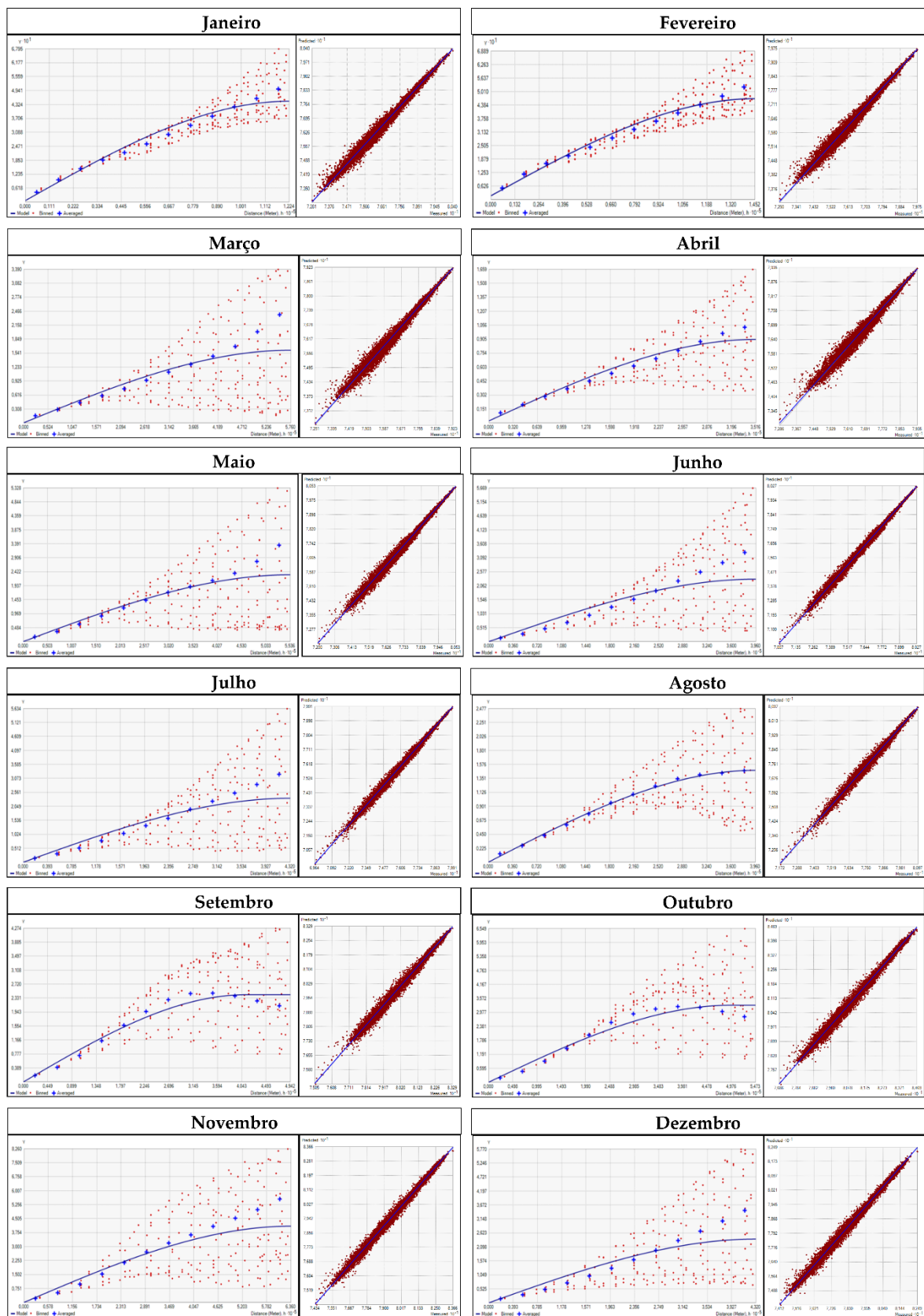
¹. Erro médio. ². Raiz do erro quadrático médio. ³. Erro quadrático médio. ⁴. Raiz do erro quadrático médio padronizado. ⁵. Média do erro padronizado.

Esférico					
Mês	ME ¹	RMSE ²	MSE ³	RMSSE ⁴	ASE ⁵
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
Mai	-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
Mai	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
Mai	-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

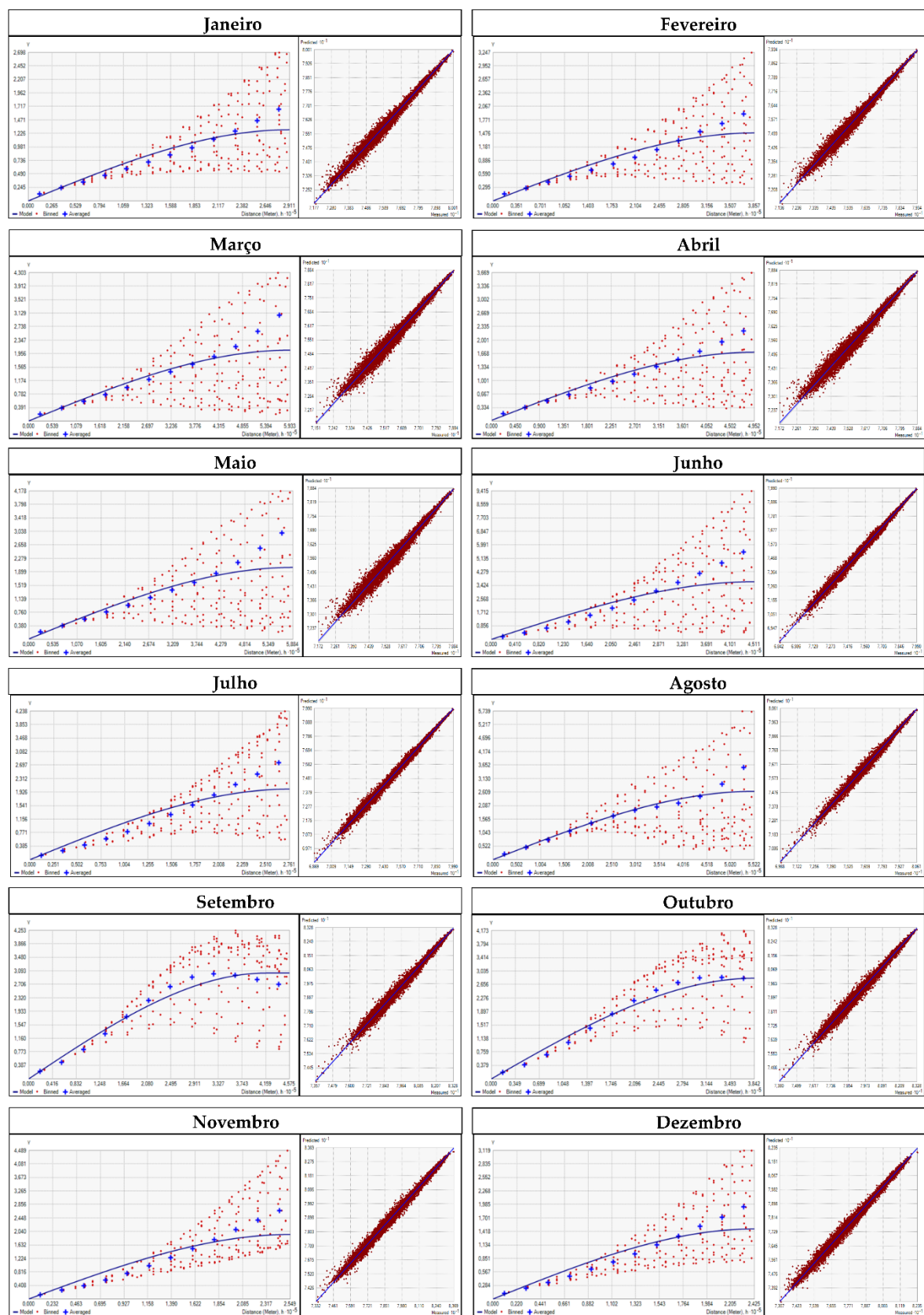
112 Apêndice 17

113 Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas mensais de krigagem do Índice

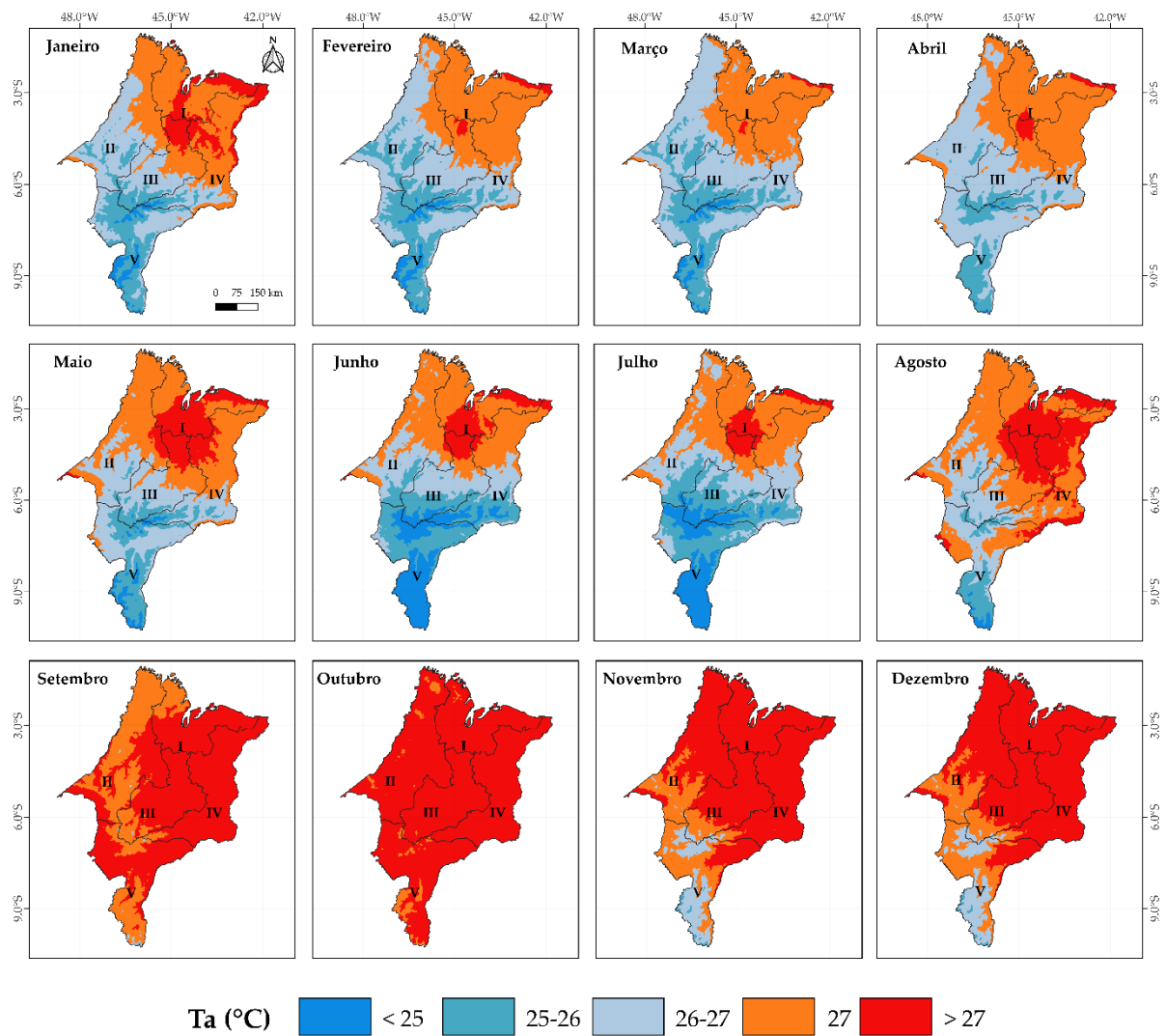
114 de Temperatura e Umidade (ITU) de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão



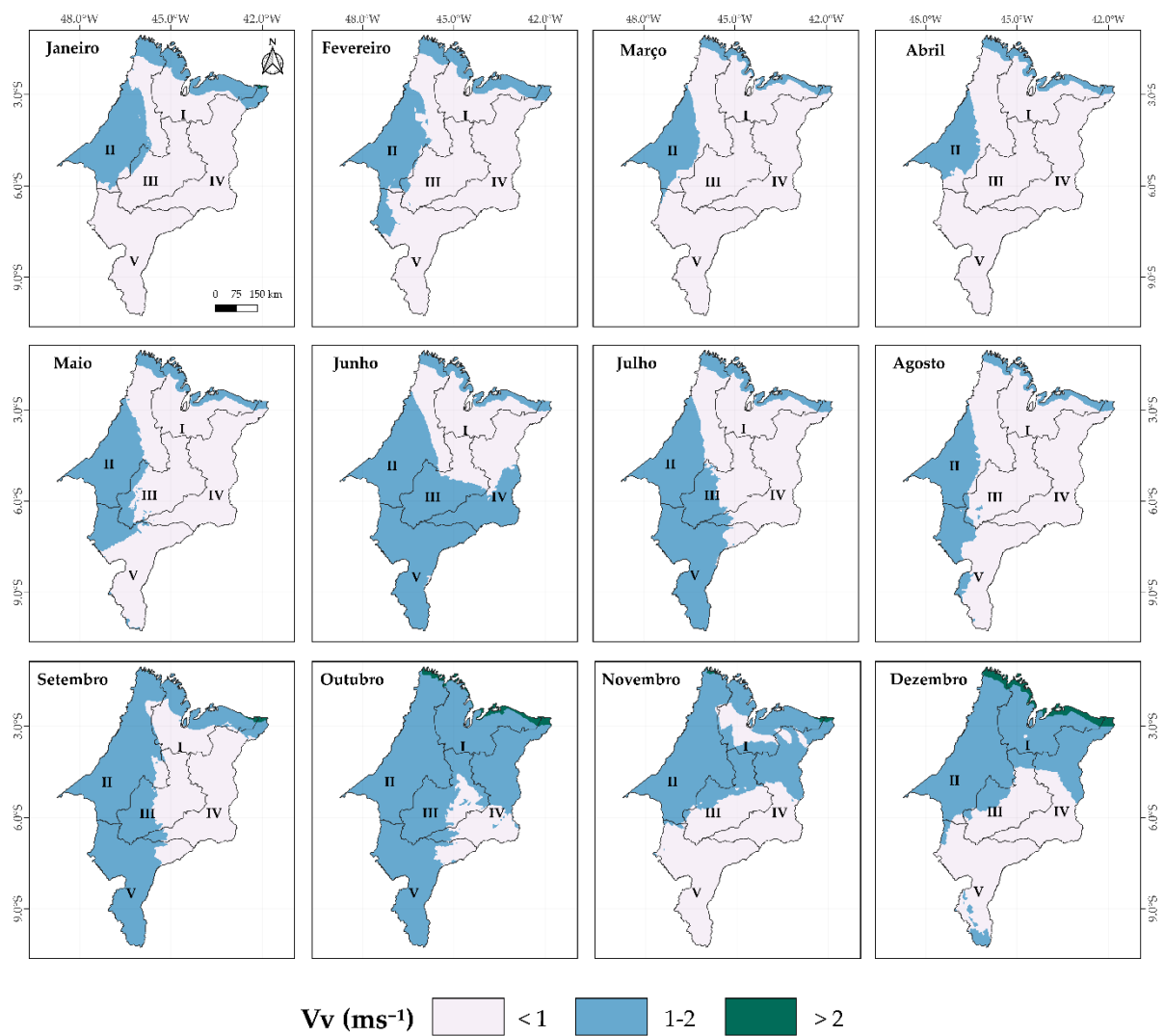
- 116 Apêndice 18
- 117 Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas mensais de krigagem do Índice
- 118 de Temperatura do Globo e Umidade (ITGU) de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão



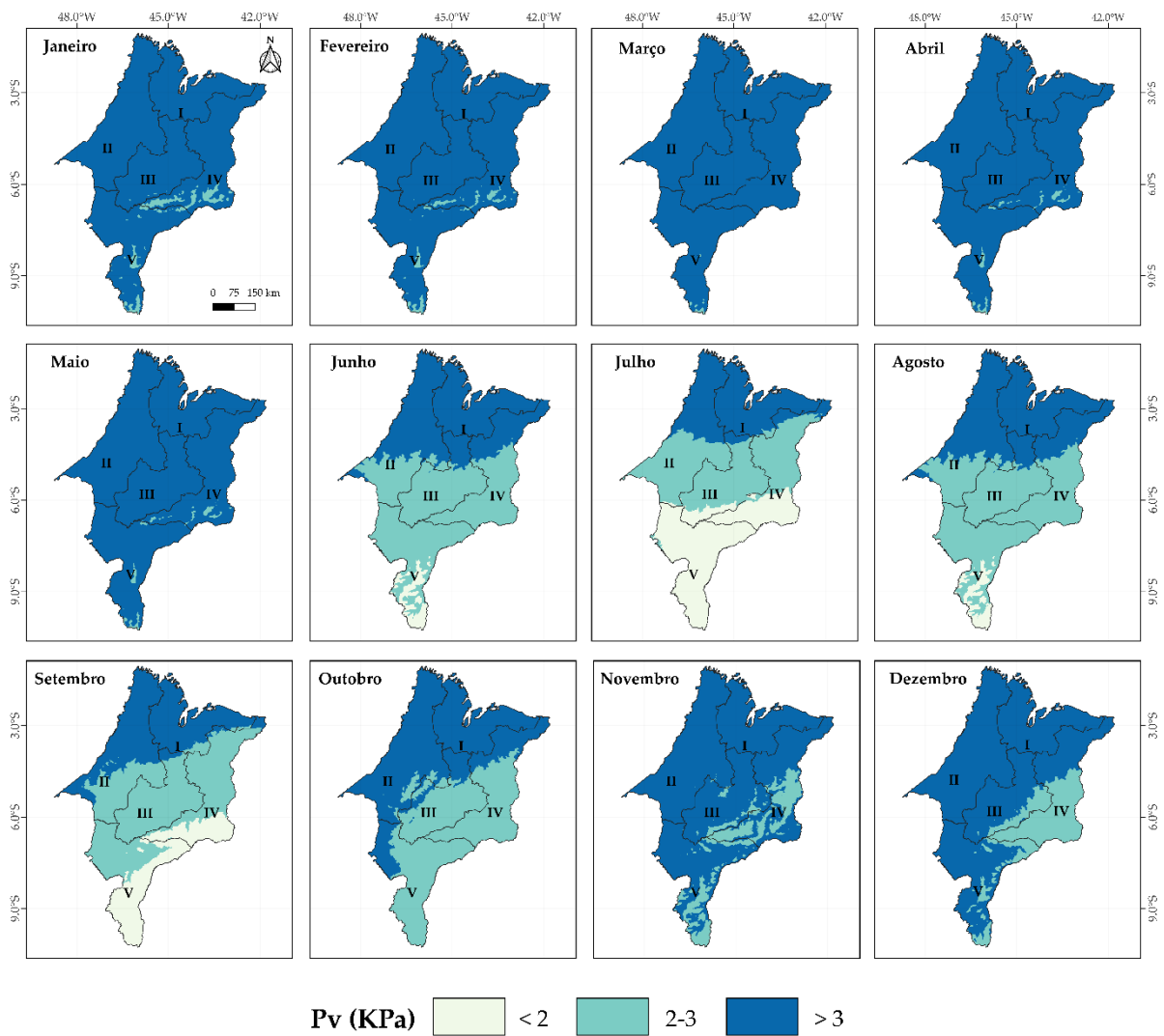
120 Apêndice 19
121 Mapas de krigagem dos valores mensais de temperatura do ar de 2014 a 2024 nas
122 mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.



124 Apêndice 20
125 Mapas de krigagem dos valores mensais velocidade do vento de 2014 a 2024 nas
126 mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.



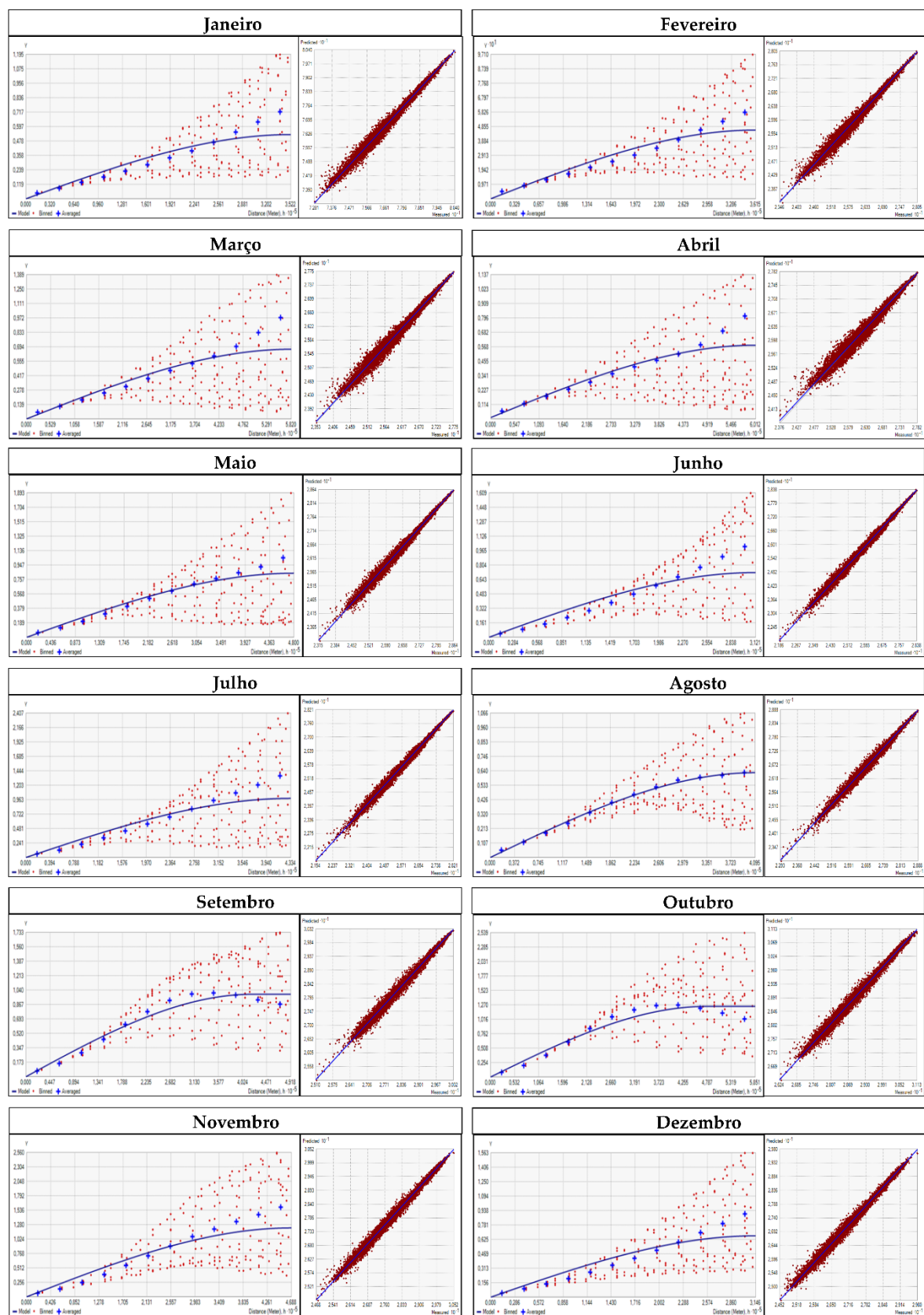
129 Apêndice 21
 130 Mapas de krigagem dos valores mensais pressão de vapor de 2014 a 2024 nas mesorregiões
 131 do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.



134 Apêndice 22

135 Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas de krigagem mensais da

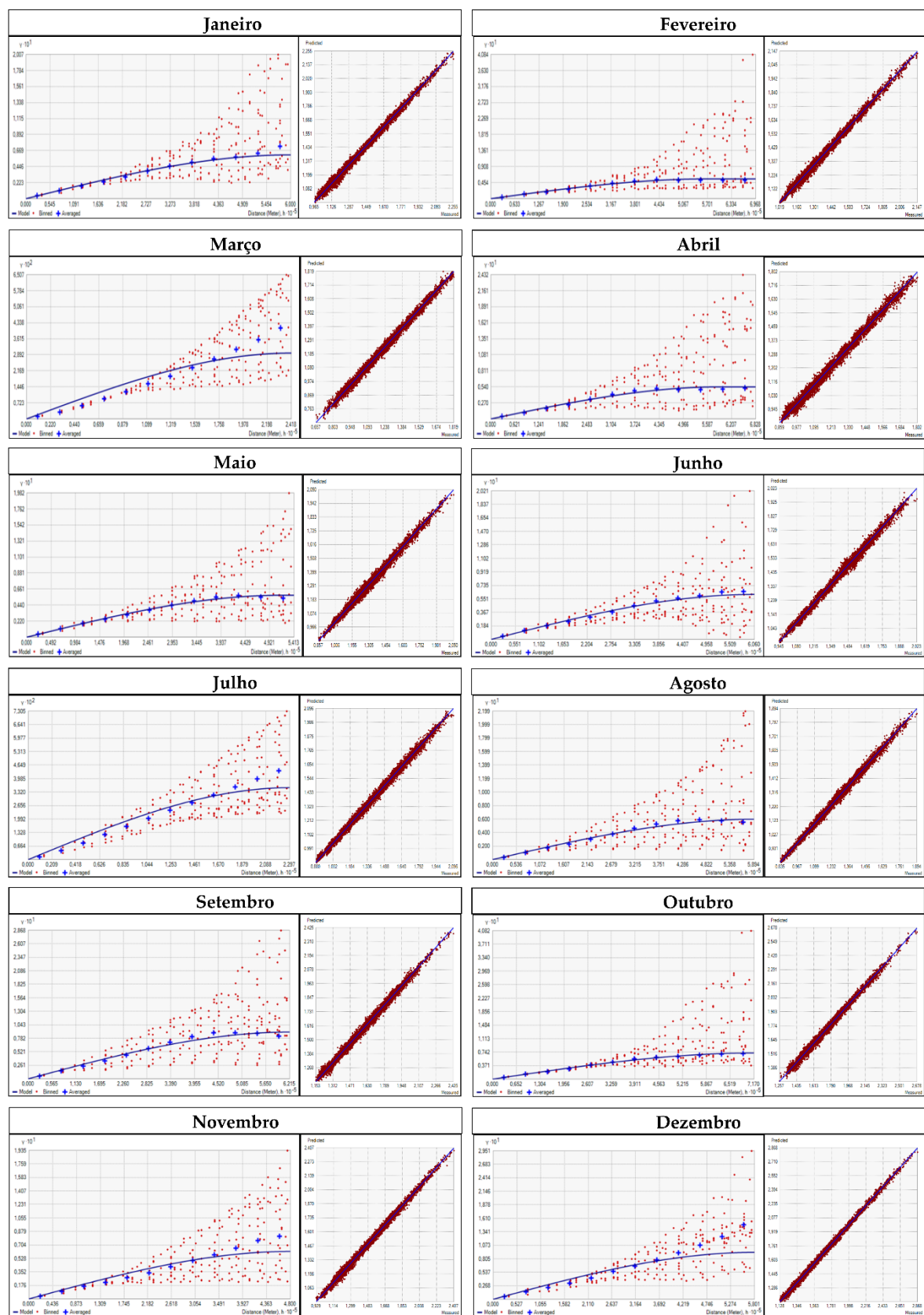
136 temperatura do ar de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão.



138 Apêndice 23

139 Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas de krigagem mensais da

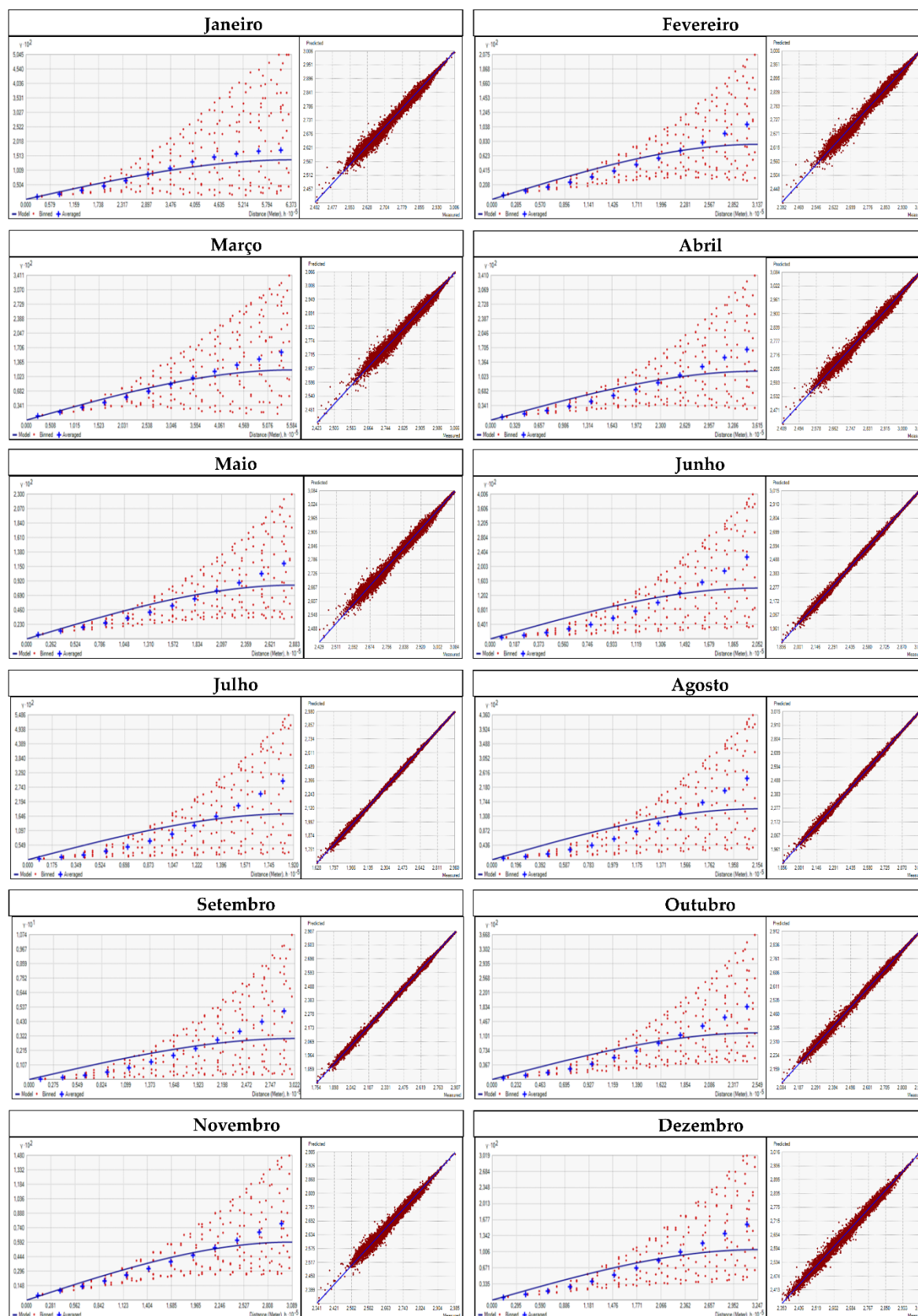
140 velocidade do vento de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão.



142 Apêndice 24

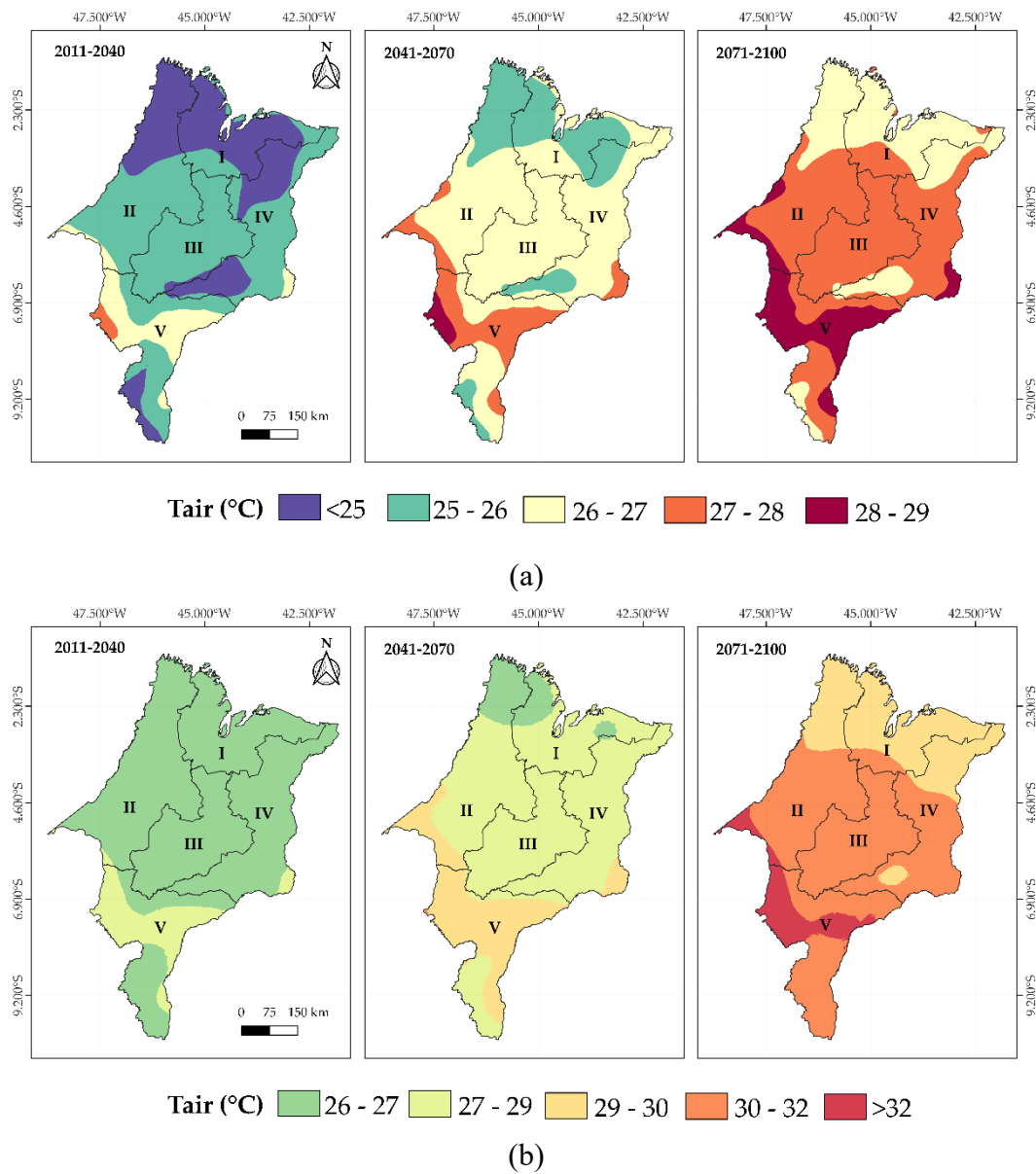
143 Semivariogramas experimentais e validação cruzada de mapas de krigagem mensais da

144 pressão de vapor de 2014 a 2024 nas mesorregiões do Maranhão.



146 Apêndice 25

147 Mapas de krigagem das projeções futuras de temperatura do ar sob os cenários RCP4.5 (a) e
148 RCP8.5 (b) para os períodos de curto prazo (2011–2040), médio prazo (2041–2070) e longo
149 prazo (2071–2100) nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—
150 Leste e V—Sul.



Apêndice 26

Mapas de krigagem das projeções futuras de velocidade do vento sob os cenários RCP4.5 (a) e RCP8.5 (b) para os períodos de curto prazo (2011–2040), médio prazo (2041–2070) e longo prazo (2071–2100) nas mesorregiões do Maranhão: I—Norte, II—Oeste, III—Central, IV—Leste e V—Sul.

