

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Mapeamento de Índices Climáticos e Avaliação da Vulnerabilidade ao
Desconforto Térmico no Semiárido Brasileiro**

Mariana Navarro Benevides
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

MARIANA NAVARRO BENEVIDES

**Mapeamento de Índices Climáticos e Avaliação da Vulnerabilidade ao
Desconforto Térmico no Semiárido Brasileiro**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Joyce Correna Carlo

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

B465m Benevides, Mariana Navarro, 1995-
2025 Mapeamento de índices climáticos e avaliação da
vulnerabilidade ao desconforto térmico no semiárido brasileiro /
Mariana Navarro Benevides. – Viçosa, MG, 2025.
1 tese eletrônica (86 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Joyce Correna Carlo.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Arquitetura e Urbanismo, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.746>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Arquitetura - Aspectos ambientais - Brasil, Nordeste.
2. Edifícios - Propriedades térmicas - Brasil, Nordeste. I. Carlo,
Joyce Correna, 1973-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de
Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDD 22. ed. 720.4709813

MARIANA NAVARRO BENEVIDES

**Mapeamento de Índices Climáticos e Avaliação da Vulnerabilidade ao
Desconforto Térmico no Semiárido Brasileiro**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 14 de agosto de 2025.

Assentimento:

Mariana Navarro Benevides
Autora

Joyce Correna Carlo
Orientadora

Essa tese foi assinada digitalmente pela autora em 07/11/2025 às 14:26:10 e pela orientadora em 07/11/2025 às 14:43:21. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **3PRZ.Z1CR.JYIY** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Ao único e absoluto dono de todos os meus dias, Cristo, que me permitiu ver luz no meio de toda a escuridão.

Ao meu amado marido, David, por todo apoio, acalento e por sempre me reerguer todas as vezes que eu caí. Por sua paciência, compreensão e por acreditar em tudo que faço e sonho.

Aos meus pais, Heraldo e Nadja, pelos anos investidos em mim e na minha educação, por nunca deixarem faltar nada e por sempre transbordar amor.

À minha psicóloga Meryanne e minha psiquiatra Dafne, obrigada por me ouvirem com tanto amor e paciência, por me permitirem ser eu mesma, apesar de todo o meu sofrimento.

Aos meus poucos e grandes amigos, por me darem palavras de apoio, pelas orações feitas e mensagens de carinho quando precisava, vocês serão sempre lembrados.

À minha orientadora, Joyce Carlo pela confiança para a realização deste trabalho.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

BENEVIDES, Mariana Navarro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2025. **Mapeamento de Índices Climáticos e Avaliação da Vulnerabilidade ao Desconforto Térmico no Semiárido Brasileiro**. Orientadora: Joyce Correna Carlo.

Os aspectos climáticos influenciam diretamente o conforto térmico nas edificações. Por isso, avaliar a vulnerabilidade das populações a esses estressores torna-se fundamental para identificar áreas de risco, sobretudo em regiões de clima semiárido. O presente estudo busca calcular e mapear o índice de conforto térmico (ICT), os graus dia de resfriamento (GDR) e aquecimento (GDA) e o índice de calor (IC), e recomendar as estratégias construtivas mais adequadas para o semiárido brasileiro utilizando dados meteorológicos diários de 1960 a 2020 em formato raster com resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Além disso, visa propor o índice de vulnerabilidade ao desconforto térmico (IVDT) para essa região utilizando dados climáticos e socioeconômicos a partir dos indicadores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa aplicados na estrutura de risco-impacto do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Os resultados obtidos indicam que o percentual anual de ICT anual varia entre 38 e 61%, com maiores condições de conforto na faixa central do semiárido e desconforto por calor de até 60% no extremo noroeste. Os valores de GDR podem atingir até 476°C anuais no noroeste, enquanto os de GDA podem superar os 700°C anuais. Os resultados de IC demonstram que para todo o território semiárido são observadas condições de calor categorizadas como “Atenção” em pelo menos 15% do ano. Apesar disso, a implementação das estratégias de condicionamento térmico recomendadas pode resultar na ampliação de 62% do conforto anual. Os valores de IVDT evidenciam que a maioria dos municípios semiáridos enfrenta algum grau de vulnerabilidade ao desconforto térmico, embora predomine a classificação de baixa vulnerabilidade. Os municípios não vulneráveis ou com baixa vulnerabilidade concentram-se na porção centro-sul, enquanto aqueles com vulnerabilidade moderada a alta estão situados sobretudo no noroeste e no extremo sul. Constatou-se ainda que em um cenário de melhoria socioeconômica a vulnerabilidade de diversos municípios tem o potencial de ser reduzida ou eliminada, enquanto uma piora socioeconômica resultaria no aumento da vulnerabilidade em um número significativo de municípios. O IVDT mostrou-se eficaz ao combinar variáveis climáticas e socioeconômicas em um único índice, tornando-se uma ferramenta estratégica capaz de orientar o desenvolvimento de

políticas públicas que priorizem os municípios mais vulneráveis, reduzindo o grau de desconforto térmico da população. Por fim, um banco de dados foi criado e disponibiliza os mapas aqui apresentados de forma espacializada e por município, em escala mensal, sazonal e anual, contribuindo para o avanço no planejamento construtivo de edificações no semiárido brasileiro.

Palavras-chave: semiárido; índices climáticos; conforto térmico; estratégias construtivas; índice de vulnerabilidade

ABSTRACT

BENEVIDES, Mariana Navarro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2025. **Mapping of Climate Indices and Assessment of Vulnerability to Thermal Discomfort in the Brazilian Semi-Arid Region.** Adviser: Joyce Correna Carlo.

Climate factors have a direct influence on the thermal comfort of buildings. Consequently, assessing the vulnerability of populations to these stressors is essential for identifying at-risk areas, especially in semi-arid climates. This study aims to calculate and map the Thermal Comfort Index (TCI), Cooling Degree Days (CDD) and Heating Degree Days (HDD), and the Heat Index (HI), and to recommend the most suitable construction strategies for the Brazilian semi arid region using daily meteorological data from 1960 to 2020 in a 0.1°×0.1° raster format. Furthermore, it proposes the Thermal Discomfort Vulnerability Index (TDVI) for this region by integrating climatic and socioeconomic data through the exposure, sensitivity, and adaptive capacity indicators of the IPCC's risk impact framework. The results indicate that the annual TCI ranges from 38% to 61%, with the highest comfort levels in the central belt of the semi-arid and up to 60% thermal discomfort by heat in the far northwest. CDD values reach up to 476°C annually in the northwest, while HDD values exceed 700°C. HI results show "Attention" level heat conditions for at least 15% of the year across the entire semi-arid territory. Implementation of the recommended thermal conditioning strategies could increase annual comfort by 62%. TDVI values reveal that most semi-arid municipalities experience some degree of thermal discomfort vulnerability, predominantly classified as low. Non-vulnerable or low vulnerability municipalities are clustered in the central southern portion, whereas moderate to high vulnerability municipalities are located primarily in the northwest and extreme south. Under a socioeconomic improvement scenario, vulnerability could be reduced or eliminated in many municipalities, whereas socioeconomic decline would significantly increase vulnerability. The TDVI effectively combines climatic and socioeconomic variables into a single index, serving as a strategic tool to guide public policy development that prioritizes the most vulnerable municipalities and mitigates the population's thermal discomfort. Finally, a database was developed to provide the spatialized, municipal-scaled maps presented here on a monthly, seasonal, and annual basis, thereby advancing constructive planning for buildings in the Brazilian semi-arid region.

Keywords: semi-arid region; climatic indices; thermal comfort; construction strategies; vulnerability index

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - (a) Delimitação espacial e (b) variação de altitude do semiárido brasileiro. Fonte: A autora.	23
Figura 2.2 - Variação da (a) temperatura média anual (°C), (b) amplitude térmica média anual (°C) e (c) velocidade do vento média anual (m s ⁻¹) no semiárido brasileiro, com dados de 1970-2000 obtidos a partir da plataforma WorldClim 2 (FICK e HAJMANS, 2017). Fonte: A autora.	24
Figura 2.3 - (a) Distribuição espacial e (b) dos pontos centrais dos pixels utilizados, oriundos do banco de dados de Xavier et al. (2022). Fonte: A autora.	25
Figura 2.4 - Zonas de conforto e desconforto térmico apresentadas na carta bioclimática de Givoni (1992). Fonte: A autora.	27
Figura 2.5 - Zonas de conforto térmico e das estratégias de condicionamento térmico em edificações apresentadas na carta bioclimática de Givoni (1992). Fonte: A autora.	32
Figura 2.6 - Esquema metodológico adotado nesta pesquisa. Fonte: A autora.	34
Figura 2.7 - Percentuais anuais de (a) conforto térmico, (b) desconforto térmico, (c) desconforto por calor e (d) desconforto por frio obtidos para o semiárido brasileiro, por município. Fonte: A autora.	35
Figura 2.8 - Valores (a) anuais e (b) sazonais de graus-dia de resfriamento (GDR) para o semiárido brasileiro, em °C. Fonte: A autora.	37
Figura 2.9 - Valores mensais de graus-dia de resfriamento (GDR) espacializados para o semiárido brasileiro, em °C. Fonte: A autora.	38
Figura 2.10 - Valores (a) anuais e (b) sazonais de graus-dia de aquecimento (GDA) para o semiárido brasileiro, em °C. Fonte: A autora.	39
Figura 2.11 - Valores mensais de graus-dia de aquecimento (GDA) espacializados para o semiárido brasileiro, em °C. Fonte: A autora.	40
Figura 2.12 - Percentuais anuais de índice de calor obtidos para os municípios do semiárido brasileiro para as categorias (a) Atenção, (b) Atenção Extrema, (c) Perigo e (d) Extremo Perigo, referentes a possíveis distúrbios fisiológicos em indivíduos. Fonte: A autora.	42
Figura 2.13 - Percentuais anuais de demandas por estratégias construtivas (a) passivas e (b) ativas obtidas para o semiárido brasileiro, por município. Fonte: A autora.	44
Figura 2.14 - Percentuais anuais de demanda por cada uma das estratégias construtivas	

apresentadas na carta bioclimática de Givoni (1992), por município do semiárido. Fonte: A autora. 45

Figura 3.1 - (a) Delimitação espacial e (b) municípios da região semiárida brasileira. Fonte: A autora. 62

Figura 3.2 - Valores do indicador de exposição obtidos a partir da normalização dos percentuais anuais de desconforto térmico para o semiárido brasileiro. Fonte: A autora. 65

Figura 3.3 - Valores do indicador de sensibilidade obtidos a partir da normalização dos graus-dias totais para o semiárido brasileiro. Fonte: A autora. 66

Figura 3.4 - Valores do índice SoVI[®] obtidos para o semiárido brasileiro por Hummel et al. (2016). Fonte: A autora, baseado em Hummel et al. (2016). 68

Figura 3.5 - Valores do indicador de capacidade adaptativa considerando a condição socioeconômica atual e os cenários de melhoria e piora, obtidos a partir da normalização do índice SoVI[®] para o semiárido brasileiro. Fonte: A autora. 70

Figura 3.6 - Esquema metodológico adotado nesta pesquisa. Fonte: A autora. 71

Figura 3.7 - Valores de IVDT para os municípios da região semiárida brasileira. Fonte: A autora. 73

Figura 3.8 - Valores normalizados da soma dos indicadores de exposição e sensibilidade utilizados na obtenção do IVDT para os municípios da região semiárida brasileira. Fonte: A autora. 74

Figura 3.9 - Distribuição espacial dos municípios que apresentaram mudanças no grau de vulnerabilidade ao desconforto térmico em relação à condição atual, considerando os cenários de melhoria ou piora das condições socioeconômicas do semiárido brasileiro. Fonte: A autora. 76

Figura 3.10 - Grau de vulnerabilidade ao desconforto térmico considerando os cenários de melhoria ou piora das condições socioeconômicas no semiárido brasileiro, em relação à condição atual. Fonte: A autora. 77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Categorias para a classificação dos valores do índice de calor (IC) e respectivos possíveis distúrbios fisiológicos nos indivíduos (NWS, 2025).	30
Tabela 3. 1- Categorias para os valores de IVDT obtidos e respectiva interpretação.	64
Tabela 3. 2 – Variáveis socioeconômicas consideradas para a obtenção do índice SoVI®. ...	67
Tabela 3. 3- Valores atribuídos ao índice SoVI® para o presente estudo, considerando a condição socioeconômica atual e os cenários de melhoria e piora dessa condição.	69
Tabela 3. 4 - Número de municípios semiáridos observados por categoria do IVDT.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR4	Quarto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
CDD	Cooling degree-days
GDA	Graus-dia de aquecimento
GDR	Graus-dia de resfriamento
GH	Graus-hora
HDD	Heating degree-days
HI	Heat index
IC	Índice de calor
ICT	Índice de conforto térmico
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDW	Inverse Distance Weighting
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IVDT	Índice de vulnerabilidade ao desconforto térmico
NWS	National Weather Service
RED	Resfriamento evaporativo direto
REI	Resfriamento evaporativo indireto
SoVI	Social Vulnerability Index
TBS	Temperatura de bulbo seco
TBU	Temperatura de bulbo úmido
TCI	Thermal comfort index
TDVI	Thermal discomfort vulnerability index
UR	Umidade relativa

SUMÁRIO

1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1 Introdução.....	14
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Estrutura da tese.....	16
REFERÊNCIAS	17
2 CAPÍTULO 2 - MAPEAMENTO DE ÍNDICES CLIMÁTICOS E ESTRATÉGIAS CONSTRUTIVAS PARA EDIFICAÇÕES NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	20
RESUMO.....	20
2.1 Introdução.....	21
2.2 Material e métodos	22
2.2.1 Área de estudo	22
2.2.2 Banco de dados.....	24
2.2.3 Índices climáticos	26
2.2.4 Estratégias construtivas	31
2.2.5 Mapeamento	32
2.2.6. Esquema metodológico.....	33
2.3 Resultados e discussão	34
2.3.1 Índices climáticos	34
2.3.2 Estratégias construtivas	43
2.3.3 Disponibilização dos dados	48
2.4 Conclusão	48
REFERÊNCIAS	50

3 CAPÍTULO 3 - ÍNDICE DE VULNERABILIDADE AO DESCONFORTO TÉRMICO PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO	59
RESUMO.....	59
3.1 Introdução.....	60
3.2 Material e métodos	61
3.2.1 Área de estudo	61
3.2.2 Índice de vulnerabilidade.....	62
3.2.3 Normalização dos dados.....	63
3.2.4 Indicador de exposição	64
3.2.5 Indicador de sensibilidade	65
3.2.6 Indicador de capacidade adaptativa.....	66
3.2.7. Esquema metodológico.....	70
3.3 Resultados e discussão	71
3.4 Conclusão	78
REFERÊNCIAS	80
4 CAPÍTULO 4 – CONCLUSÃO GERAL	84
4.1 Contribuições da pesquisa	85
4.2 Limitações	85
4.3 Sugestões para trabalhos futuros	86

1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Introdução

Os padrões climáticos e o elevado nível de aridez do semiárido brasileiro impõem desafios singulares ao conforto térmico de seus habitantes. As altas temperaturas máximas associadas aos baixos índices pluviométricos resultam em extremos de calor que afetam não apenas a saúde humana, mas também o desempenho energético das edificações nessa região (BENEVIDES; TEIXEIRA; CARLO, 2022; SANTOS et al., 2025). Diante disso, o desenvolvimento de projetos arquitetônicos adaptados às especificidades climáticas locais torna-se essencial para otimizar o desempenho térmico (ELSHAFEI et al., 2021; FORCADA et al., 2021; HOZ-TORRES et al., 2024) e reduzir a demanda energética associada à climatização artificial de edificações (TAHERI; HOSSEINI; RAZBAN, 2022; ZHAO et al., 2024).

Índices climáticos se constituem como ferramentas importantes para a caracterização quantitativa e qualitativa do clima local ao traduzirem variáveis meteorológicas como a temperatura em métricas aplicáveis ao ambiente construído (MEHREGAN et al., 2022; PASA et al., 2012; SALATA et al., 2022). Esses indicadores permitem identificar padrões diários, sazonais e anuais de estresse térmico por meio de mapeamentos que possibilitam a identificação de regiões críticas, onde as características climáticas impactam em desconforto térmico (ESPINOZA et al., 2023; MATONGO et al., 2024). Dessa forma, índices climáticos atuam como uma ponte entre a análise ambiental e estratégias construtivas bioclimáticas (BENEVIDES; TEIXEIRA; CARLO, 2022), orientando soluções arquitetônicas capazes de responder adequadamente às especificidades do semiárido brasileiro.

Apesar dos avanços na obtenção da magnitude de indicadores climáticos, ainda existe uma lacuna no detalhamento desses índices em escala municipal (SILVA et al., 2024; STENSJÖ; FERREIRA; LOURA, 2017), o que dificulta a identificação de heterogeneidades locais. Como demonstra Pitt (2010), a caracterização climática por município pode embasar a criação e a aplicação de políticas públicas. Além disso, podem auxiliar na definição de diretrizes construtivas que incorporem ações de mitigação do calor ou frio extremo e que promovam a adaptabilidade das edificações ao clima local (HARVEY, 2020; LIU et al., 2023).

Historicamente, a região semiárida do Brasil é marcada por disparidades socioeconômicas (BUAINAIN; GARCIA, 2013; BATISTA; MOURA; ALVES, 2020), o que

impacta na maneira como a população local é capaz de enfrentar estressores climáticos (MENEZES et al., 2021; SENA et al., 2018). Nesse contexto, além da caracterização dos municípios por meio de índices climáticos, avaliar o grau de vulnerabilidade dos mesmos aos impactos negativos do clima é fundamental para orientar a alocação de recursos e a formulação de programas de adaptação específicos. Essa avaliação permite identificar os fatores ambientais estressores e os grupos populacionais mais expostos (VIEIRA et al., 2023), bem como verificar se esses grupos estão vulneráveis ou não.

A quantificação da vulnerabilidade local aos aspectos climáticos pode ser mensurada a partir de índices que agrupam fatores socioeconômicos, ambientais e construtivos (INOSTROZA; PALME; DE LA BARRERA, 2016; RATHI et al., 2016) para analisar a ocorrência de desconforto térmico. Tais indicadores, possuem o potencial para avaliar de forma integrada as áreas de maior risco térmico e orientar a adequações construtivas para uma melhor adaptação das edificações ao clima semiárido, contribuindo para o fortalecimento da resiliência das comunidades locais frente aos extremos de temperatura (ASSAF; ASSAAD, 2024; PANERU et al., 2024).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Mapear e analisar índices climáticos, estratégias construtivas e a vulnerabilidade ao desconforto térmico no semiárido brasileiro.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar o índice de conforto térmico, os graus-dia de resfriamento e aquecimento e o índice de calor para a região semiárida.
- b) Determinar as estratégias construtivas mais recomendadas para essa região.
- c) Criar indicadores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa para proposição de um índice de Vulnerabilidade ao Desconforto Térmico (IVDT).
- d) Avaliar mudanças nesse índice considerando cenários de melhoria e piora das condições socioeconômicas do semiárido.
- e) Criar uma base de dados com os índices climáticos, estratégias bioclimáticas e os valores de IVDT gerados.

1.3 Estrutura da tese

Este trabalho está estruturado de modo a conter quatro capítulos.

No Capítulo 1, uma introdução geral está apresentada contendo a problemática e a justificativa do tema. Além disso, estão listados os objetivos e a estrutura da tese.

No Capítulo 2, o primeiro artigo da tese está inserido, visando atender aos objetivos específicos a), b) e e). Este capítulo teve como foco o mapeamento de índices climáticos e a recomendação das estratégias bioclimáticas mais recomendadas para a região semiárida brasileira.

No Capítulo 3, o segundo artigo da tese está apresentado e busca atender aos objetivos específicos c), d) e e). Este capítulo teve como intuito propor um índice que avaliasse a vulnerabilidade dos municípios semiáridos ao desconforto térmico, a partir dos resultados de percentual anual de desconforto térmico e de graus-dia de aquecimento e resfriamento obtidos no capítulo anterior.

No Capítulo 4, a conclusão geral está apresentada e responde aos objetivos dos Capítulos 2 e 3. Por fim, são apresentadas as contribuições e limitações da tese, bem como sugestões para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ASSAF, Ghiwa; ASSAAD, Rayan H. Development and validation of a heat resilience index: Measuring communities resilience to extreme heat events. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 150, n. 4, p. 04024034, 2024.

BATISTA, Maria Larissa Bezerra; MOURA, José Ediglê Alcantara; ALVES, Christiane Luci Bezerra. Vulnerabilidade socioeconômica no semiárido Cearense: um estudo a partir das mesorregiões do estado. **DRd-Desenvolvimento Regional em debate**, v. 10, p. 1001-1032, 2020.

BENEVIDES, Mariana Navarro; TEIXEIRA, David Bruno de Sousa; CARLO, Joyce Correna. Climatic zoning for energy efficiency applications in buildings based on multivariate statistics: The case of the Brazilian semiarid region. **Frontiers of Architectural Research**, v. 11, n. 1, p. 161-177, 2022.

BUAINAIN, Antonio Marcio; GARCIA, Junior Ruiz. Desenvolvimento rural do semiárido brasileiro: transformações recentes, desafios e perspectivas. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia**, n. 19, 2013.

ELSHAFEI, Ghada et al. Towards an adaptation of efficient passive design for thermal comfort buildings. **Sustainability**, v. 13, n. 17, p. 9570, 2021.

ESPINOZA, Nikolai da Silva et al. Assessment of urban heat islands and thermal discomfort in the Amazonia biome in Brazil: A case study of Manaus city. **Building and Environment**, v. 227, p. 109772, 2023.

FORCADA, N. et al. Field study on adaptive thermal comfort models for nursing homes in the Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 252, p. 111475, 2021.

HARVEY, LD Danny. Using modified multiple heating-degree-day (HDD) and cooling-degree-day (CDD) indices to estimate building heating and cooling loads. **Energy and Buildings**, v. 229, p. 110475, 2020.

HOZ-TORRES, María Luisa De La et al. An investigation of indoor thermal environments and thermal comfort in naturally ventilated educational buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 84, p. 108677, 2024.

INOSTROZA, Luis; PALME, Massimo; DE LA BARRERA, Francisco. A heat vulnerability

index: spatial patterns of exposure, sensitivity and adaptive capacity for Santiago de Chile. **PLOS one**, v. 11, n. 9, p. e0162464, 2016.

LIU, Yan et al. Introducing degree days to building thermal climatic zoning in China. **Journal of Thermal Science**, v. 32, n. 3, p. 1155-1170, 2023.

MATONGO, Thomas Janvier et al. Assessing the severity of thermal discomfort in a building in the course of hot and humid climate. **F1000Research**, v. 13, p. 962, 2024.

MEHREGAN, Mahmood et al. Building energy model validation and estimation using heating and cooling degree days (HDD–CDD) based on accurate base temperature. **Energy Science & Engineering**, v. 10, n. 9, p. 3638-3649, 2022.

MENEZES, Júlia Alves et al. Analyzing spatial patterns of health vulnerability to drought in the Brazilian semiarid region. **International journal of environmental research and public health**, v. 18, n. 12, p. 6262, 2021.

PANERU, Suman et al. Assessing building thermal resilience in response to heatwaves through integrating a social vulnerability lens. **Journal of Building Engineering**, v. 98, p. 111219, 2024.

PASA, Carine Cristiane Machado Urbim et al. Avaliação da eficiência energética em edificações e sua relação com os materiais construtivos empregados. **Revista Produção Online**, v. 12, n. 1, p. 229-247, 2012.

PITT, Damian. The impact of internal and external characteristics on the adoption of climate mitigation policies by US municipalities. **Environment and Planning C: Government and Policy**, v. 28, n. 5, p. 851-871, 2010.

RATHI, Suresh Kumar et al. A heat vulnerability index: Spatial patterns of exposure, sensitivity and adaptive capacity for urbanites of four cities of India. **International journal of environmental research and public health**, v. 19, n. 1, p. 283, 2021.

SALATA, Ferdinando et al. Estimating building cooling energy demand through the Cooling Degree Hours in a changing climate: A modeling study. **Sustainable Cities and Society**, v. 76, p. 103518, 2022.

SANTOS, Gilles Chaves et al. Thermal performance of extensive green roof in the semi-arid climate of Northeastern Brazil. **Building and Environment**, p. 113356, 2025.

SENA, Aderita et al. Drought in the semiarid region of Brazil: Exposure, vulnerabilities and health impacts from the perspectives of local actors. **PLoS currents**, v. 10, p. ecurrents. disc226851ebd64290e619a4d1ed79c8639, 2018.

SILVA, Mario A. et al. Towards Climate, Bioclimatism, and Building Performance—A Characterization of the Brazilian Territory from 2008 to 2022. **Buildings**, v. 14, n. 8, p. 2568, 2024.

STENSJÖ, Iraci Pereira; FERREIRA, Camila Carvalho; LOURA, Rejane Magiag. Classificação e agrupamento das cidades brasileiras em graus-dia de aquecimento e resfriamento: 1960 a 2013. **Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 9, n. Supl. 1, p. 286-300, 2017.

TAHERI, Saman; HOSSEINI, Paniz; RAZBAN, Ali. Model predictive control of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems: A state-of-the-art review. **Journal of Building Engineering**, v. 60, p. 105067, 2022.

VIEIRA, Rita Marcia da Silva Pinto et al. Socio-environmental vulnerability to drought conditions and land degradation: an assessment in two northeastern Brazilian river basins. **Sustainability**, v. 15, n. 10, p. 8029, 2023.

ZHAO, Xiaoqing et al. Controlling naturally ventilated double-skin façade to reduce energy consumption in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 202, p. 114649, 2024.

2 CAPÍTULO 2 - MAPEAMENTO DE ÍNDICES CLIMÁTICOS E ESTRATÉGIAS CONSTRUTIVAS PARA EDIFICAÇÕES NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

Este estudo calcula e mapeia índices climáticos e recomenda as estratégias construtivas mais adequadas para o semiárido brasileiro. Para isso, foram utilizados dados meteorológicos diários de 1960 a 2020 em formato raster com resolução espacial de $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$ para gerar um ano médio padrão das variáveis climáticas. Esses dados foram utilizados para a obtenção de valores do índice de conforto térmico (ICT), dos graus-dia de resfriamento (GDR) e aquecimento (GDA) e do índice de calor (IC), além da identificação de estratégias de condicionamento térmico. Os resultados indicam que o percentual anual de ICT anual varia entre 38 e 61 %, com maiores condições de conforto na faixa central do semiárido e desconforto por calor de até 60 % no extremo noroeste. Os valores de GDR podem atingir até 476°C anuais no noroeste, enquanto os de GDA podem superar os 700°C anuais. Os resultados de IC demonstram que para todo o território semiárido são observadas condições de calor categorizadas como “Atenção” em pelo menos 15 % do ano. Em contrapartida, a implementação das estratégias de condicionamento térmico recomendadas pode resultar na ampliação de 62% do conforto anual. Por fim, um banco de dados foi criado e disponibiliza os mapas gerados de forma espacializada e por município, em escala mensal, sazonal e anual, contribuindo para o avanço no planejamento construtivo de edificações no semiárido brasileiro.

Palavras-chave: semiárido, conforto térmico, graus-dia, índice de calor, estratégias construtivas.

2.1 Introdução

As características climáticas exercem um papel determinante no desempenho das edificações, influenciando desde a seleção dos materiais construtivos até sua eficiência energética. Estudos como os apresentados por Mamani et al. (2022) e Oliveira, Rupp e Ghisi (2021) demonstram que fatores como temperatura, radiação solar, umidade e vento impactam diretamente no conforto dos usuários, exigindo do projeto arquitetônico uma abordagem adaptada à realidade climática local. Martins, Soebarto e Williamson (2022) destacam ainda a necessidade de se considerar tais variáveis na fase de concepção das edificações para minimizar perdas energéticas e promover ambientes internos saudáveis. Dessa forma, a integração dos elementos do clima ao projeto construtivo deve ser explorada para otimizar os recursos climáticos locais a favor do conforto térmico interno (ELSHAFEI et al., 2021), reduzindo a dependência por sistemas mecânicos de climatização e promovendo uma maior eficiência energética.

Nesse contexto, a aplicação de índices climáticos na arquitetura possibilita uma análise quantitativa e qualitativa das condições ambientais que influenciam o desempenho térmico das edificações. A utilização de indicadores como os índices de conforto térmico e o indicador térmico de graus-dia tem permitido avaliar de forma consistente a interação entre o ambiente externo e os espaços internos (ESCANDÓN et al., 2023; HOZ-TORRES et al., 2024; KHEIRI; HABERL; BALTAZAR, 2023), fornecendo subsídios para a tomada de decisão no projeto arquitetônico. Além desses indicadores, o uso do índice de calor também tem contribuído para uma melhor compreensão de como as variáveis climáticas podem influenciar no conforto dos usuários (FLORES-LARSEN e FILIPPÍN, 2021; HONG et al., 2021). Nadarajah et al. (2024) reforçam que índices como esses contribuem também para a identificação dos fatores críticos de desconforto térmico, além de orientar a identificação de estratégias construtivas adequadas.

Tendo em vista a necessidade de projetar espaços que atenuem os efeitos adversos do clima, o desconforto térmico em ambientes construídos tem sido amplamente investigado pela literatura nacional (BARBOSA et al., 2024; ESPINOZA et al., 2023) e internacional (EHSAN et al., 2021; MUÑOZ et al., 2022). Como apontam Arsad et al. (2023), a falta de integração adequada das condições climáticas no projeto resulta em ambientes internos com elevado potencial de estresse térmico, demandando soluções que favoreçam o conforto. Diante disso, o emprego de estratégias bioclimáticas de condicionamento térmico surge como alternativa viável para mitigar os impactos do desconforto aos usuários. Aghimien, Li e Tsang (2022)

destacam ainda que essas estratégias permitem a criação de ambientes mais amenos e confortáveis, promovendo uma redução nos índices de estresse térmico e no consumo energético.

A influência do clima local nas edificações assume importância ainda maior em regiões submetidas a características climáticas consideradas extremas, como a região semiárida brasileira. Nessa região são observados altos índices de aridez e temperaturas elevadas o que, de acordo com Benevides, Teixeira e Carlo (2022) implicam nos reduzidos percentuais de conforto térmico anual. Estudos como os apresentados por Costa et al. (2020) e Santos et al. (2022) objetivaram mapear índices climáticos para o semiárido brasileiro, porém sem aplicações diretas para o conforto térmico de edificações. Já o estudo de Benevides, Teixeira e Carlo (2022) estabeleceu as estratégias construtivas com maior aplicabilidade para essa região, porém considerando uma abordagem por zonas climáticas.

Apesar desses esforços, orientações acerca da aplicabilidade de índices climáticos e estratégias construtivas em escala de município ainda se constituem como uma lacuna a ser preenchida pela literatura científica. A obtenção de informações nessa escala espacial é de fundamental importância para subsidiar a tomada de decisão em políticas públicas (TEIXEIRA, 2002). Não obstante, o mapeamento desses dados pode ser utilizado como instrumento de diagnóstico e planejamento, possibilitando a identificação de áreas críticas e a priorização de intervenções que promovam o conforto térmico e a eficiência energética em municípios específicos do semiárido. Dessa forma, o objetivo deste estudo é mapear índices climáticos e recomendar as estratégias construtivas mais adequadas, a fim de nortear soluções arquitetônicas que priorizem o conforto térmico dos usuários de edificações no semiárido brasileiro.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Área de estudo

A presente pesquisa tem como área de estudo a região semiárida brasileira, que abrange aproximadamente 1,33 milhões de km², correspondendo a cerca de 15% do território nacional. Essa região compreende um total de 1.477 municípios distribuídos em onze estados (Figura 2.1a), sendo esses Alagoas (AL), Bahia (BA), Ceará (CE), Espírito Santo (ES), Maranhão (MA), Minas Gerais (MG), Paraíba (PB), Piauí (PI), Pernambuco (PE), Rio Grande do Norte (RN) e Sergipe (SE), localizados nas regiões nordeste e sudeste do país (BRASIL, 2021).

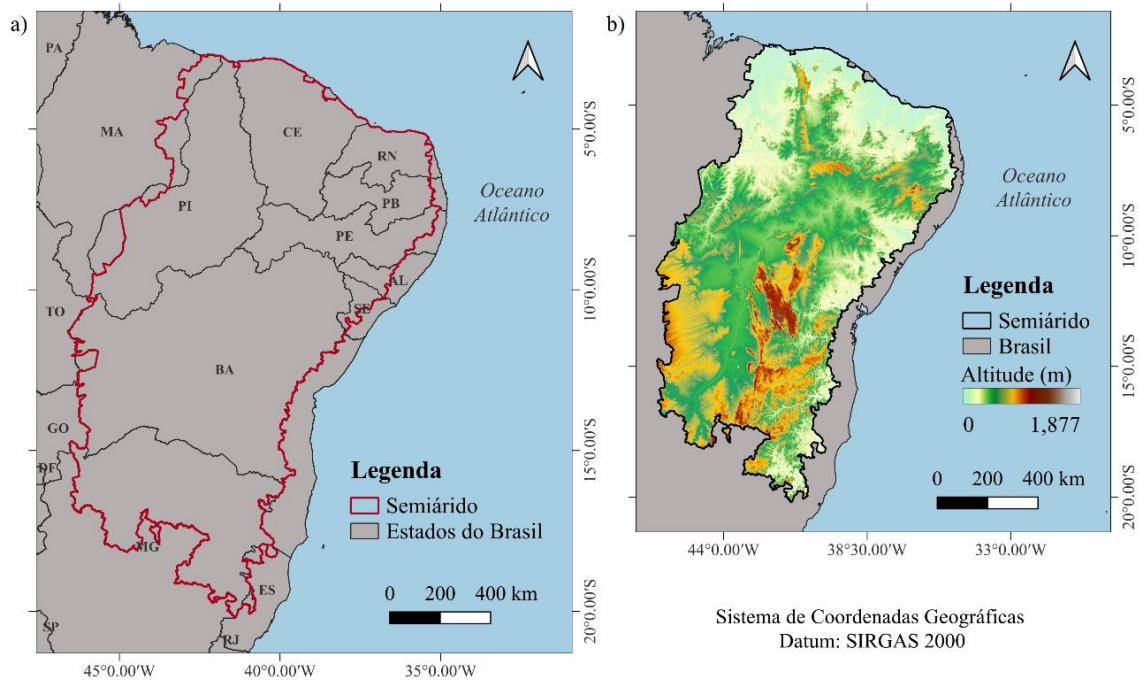


Figura 2.1 - (a) Delimitação espacial e (b) variação de altitude do semiárido brasileiro. Fonte: A autora.

Nos últimos anos, a delimitação do semiárido passou por alterações, resultando em modificações em sua extensão territorial. A Proposição N° 151/2021 ((BRASIL, 2021) foi elaborada com o objetivo de revisar a delimitação até então vigente (BRASIL, 2020) e realizar a inclusão de alguns municípios. Esse processo contou com a participação de um maior número de órgãos governamentais e utilizou dados climatológicos mais atualizados, considerando o período de 1991 a 2020. Apesar dessas modificações, os critérios técnicos adotados para a classificação de um município como pertencente a essa região permaneceram os mesmos, os quais são: (i) Índice de Aridez de Thornthwaite inferior ou igual a 0,50; (ii) precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; e (iii) percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano. Para serem incluídos na delimitação da região semiárida, os municípios deveriam atender a pelo menos um dos critérios supracitados (BRASIL, 2020).

Do ponto de vista geográfico, as altitudes na região semiárida brasileira apresentam variações significativas, oscilando entre 0 metros, no litoral norte, e 1.877 metros, na região do Pico do Barbado, situado na Chapada Diamantina (Figura 2.1b). A distribuição das precipitações nessa região ocorre de forma irregular tanto interanualmente quanto intra-anualmente (MARENGO; TORRES; ALVES, 2017). Quanto à variabilidade espacial da

temperatura, as maiores médias anuais são registradas na porção equatorial da região (Figura 2.2a). Por outro lado, as amplitudes térmicas médias anuais mais elevadas, em torno de 15°C, concentram-se na região central do semiárido (Figura 2.2b), enquanto as maiores magnitudes de velocidade dos ventos ocorrem na porção nordeste dessa região (Figura 2.2c).

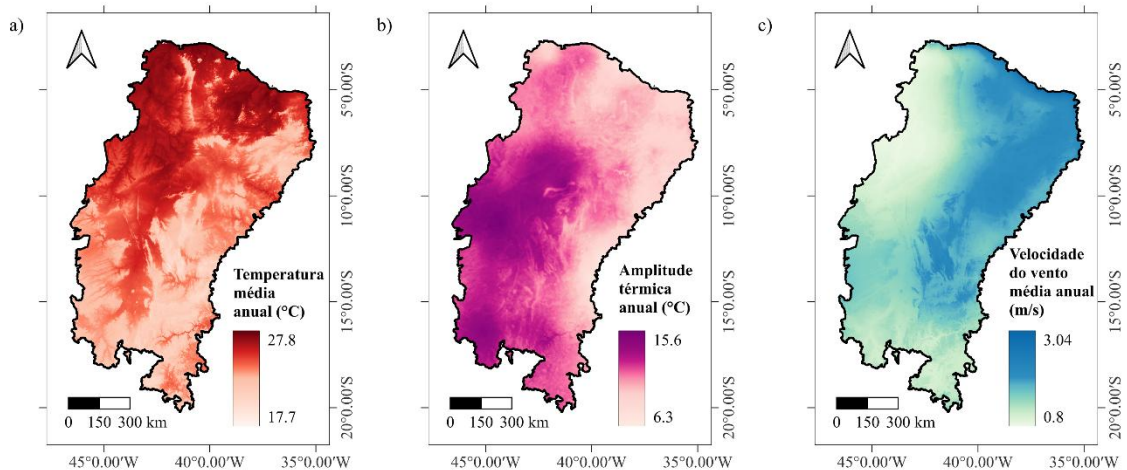


Figura 2. 2 - Variação da (a) temperatura média anual (°C), (b) amplitude térmica média anual (°C) e (c) velocidade do vento média anual (m s^{-1}) no semiárido brasileiro, com dados de 1970-2000 obtidos a partir da plataforma WorldClim 2 (FICK e HAJMANS, 2017). Fonte: A autora.

2.2.2 Banco de dados

Foram utilizados dados meteorológicos em formato matricial (pixel), com resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ($\sim 11,1 \text{ km} \times \sim 11,1 \text{ km}$). Dessa forma, para a área que delimita o semiárido, foram considerados um total de 12.949 pixels (Figura 2.3a). Estes dados foram extraídos do banco de dados desenvolvido por Xavier et al. (2016; 2022), que se baseia em observações interpoladas de 11.473 pluviômetros e 1.252 estações meteorológicas ao longo de todo o território brasileiro. Esse banco de dados possui valores em escala temporal diária, de 1960 a 2020, totalizando 61 anos de observações. Xavier et al. (2022) interpolaram dados de seis variáveis meteorológicas distintas, sendo essas: temperaturas mínima e máxima, precipitação, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa.

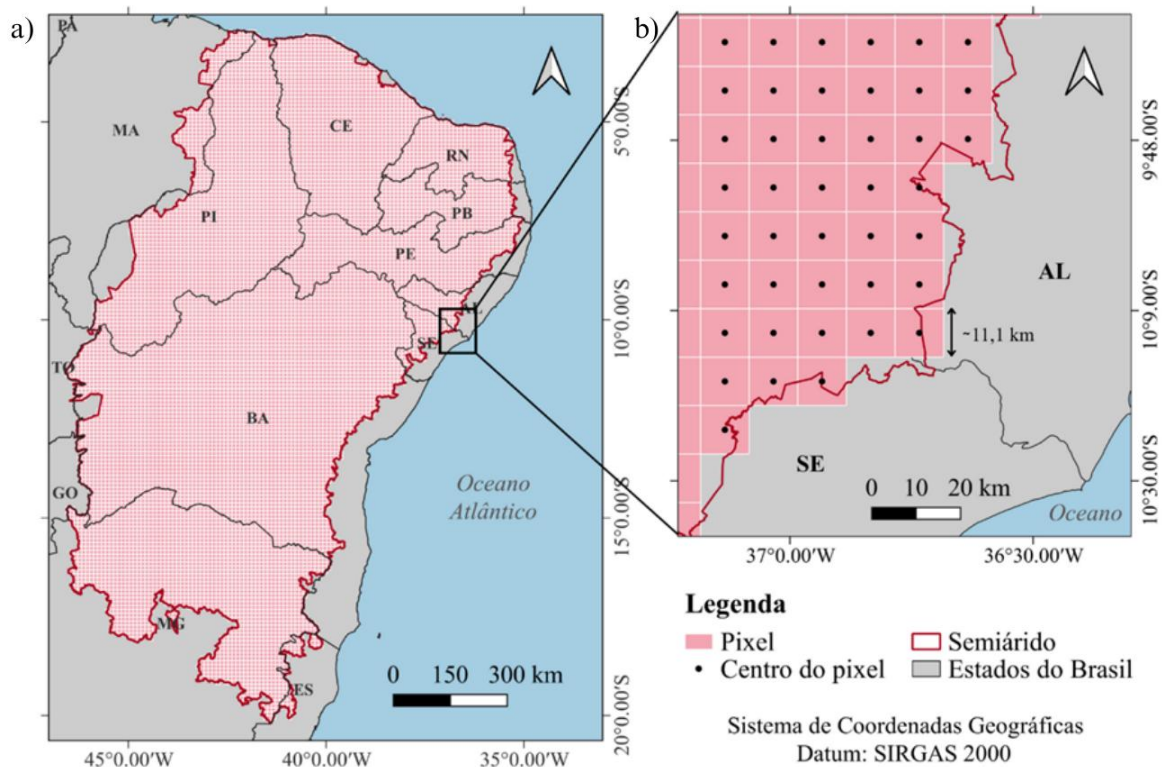


Figura 2.3 - (a) Distribuição espacial e (b) dos pontos centrais dos pixels utilizados, oriundos do banco de dados de Xavier et al. (2022). Fonte: A autora.

A escolha pelo uso deste banco de dados se deu em virtude de ele ser considerado a principal fonte de dados em formato matricial com valores observados, apresentando as informações mais recentes disponíveis para o Brasil e com alta resolução espacial, além de ser validado estatisticamente. Além disso, este banco de dados possui vantagens significativas em relação aos dados climáticos de reanálises, como aqueles apresentados pelo ERA5 (HERSBACH et al., 2020). Primeiramente, ele é baseado em um grande número de estações meteorológicas e pluviômetros distribuídos pelo país, garantindo uma melhor representação das condições climáticas locais, como é o caso do semiárido brasileiro. De maneira oposta, o ERA5 depende de modelos numéricos globais que podem suavizar variações regionais. Dessa forma, os dados de Xavier et al. (2022) capturam com maior precisão fenômenos climáticos locais devido à incorporação do relevo e da taxa de decaimento da temperatura com a altitude.

Devido ao grande volume de dados utilizados no presente estudo, uma rotina computacional em ambiente R (R CORE TEAM, 2025) foi desenvolvida para a obtenção dos dados de um ano considerado padrão, ou seja, um ano com valores diários médios para o período de 1960 a 2020, utilizando-se a Equação 2.1. O objetivo deste cálculo consiste em minimizar a influência da variabilidade interanual das variáveis climáticas, obtendo-se um ano

que representa com maior precisão as características médias de cada pixel que integra o semiárido brasileiro.

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^{61} X_j}{n} \quad (2.1)$$

em que \bar{X}_i é o valor médio diário para cada pixel para o dia i do ano, considerando todos os anos (j) da série de dados (1960-2020), e n é o número total de anos da série (61 anos).

Por fim, os valores médios diários obtidos tiveram seu formato de pixel convertido para planilhas no formato *.csv* (*comma-separated values*), cujos valores foram tabelados considerando as coordenadas (latitude e longitude) do ponto central de cada pixel (Figura 2.3b). Para isso, utilizou-se o *software* de geoprocessamento QGIS versão 3.34, através do comando "Pixels de raster para pontos". Essa conversão de formatos foi necessária para acelerar o processamento dos dados, em virtude do seu grande volume.

2.2.3 Índices climáticos

Como evidenciam Hong et al. (2021), as condições internas das edificações são impactadas diretamente pelas características climáticas externas. Diante disso, três índices foram calculados a fim de caracterizar os aspectos climáticos da região semiárida brasileira, sendo esses o índice de conforto térmico, os índices de graus-dia de resfriamento e aquecimento e o índice de calor. A escolha por esses índices se baseou na sua alta capacidade de expressar o contexto climático local e de serem considerados no contexto de edificações. Além disso, como demonstram Silva et al. (2024), Walsh, Cóstola e Labaki (2017) e Zhao, Lian e Lai (2021), esses índices têm sido amplamente utilizados na literatura científica.

2.2.3.1 Índice de conforto térmico

O índice de conforto térmico (ICT) calculado no presente estudo se baseia na "zona de conforto térmico" inserida na carta bioclimática proposta por Givoni (1992) para as condições climáticas de países em desenvolvimento. Nesta carta, representada na Figura 2.4, a "zona de conforto térmico" é definida como a faixa de condições climáticas em que a maioria das pessoas

não sente desconforto térmico, seja por calor ou frio (GIVONI, 1992; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Entretanto, quando as condições de conforto não são atingidas, ou seja, em condições de desconforto, estratégias construtivas são indicadas para obtenção de melhores condições térmicas para os usuários de uma edificação.

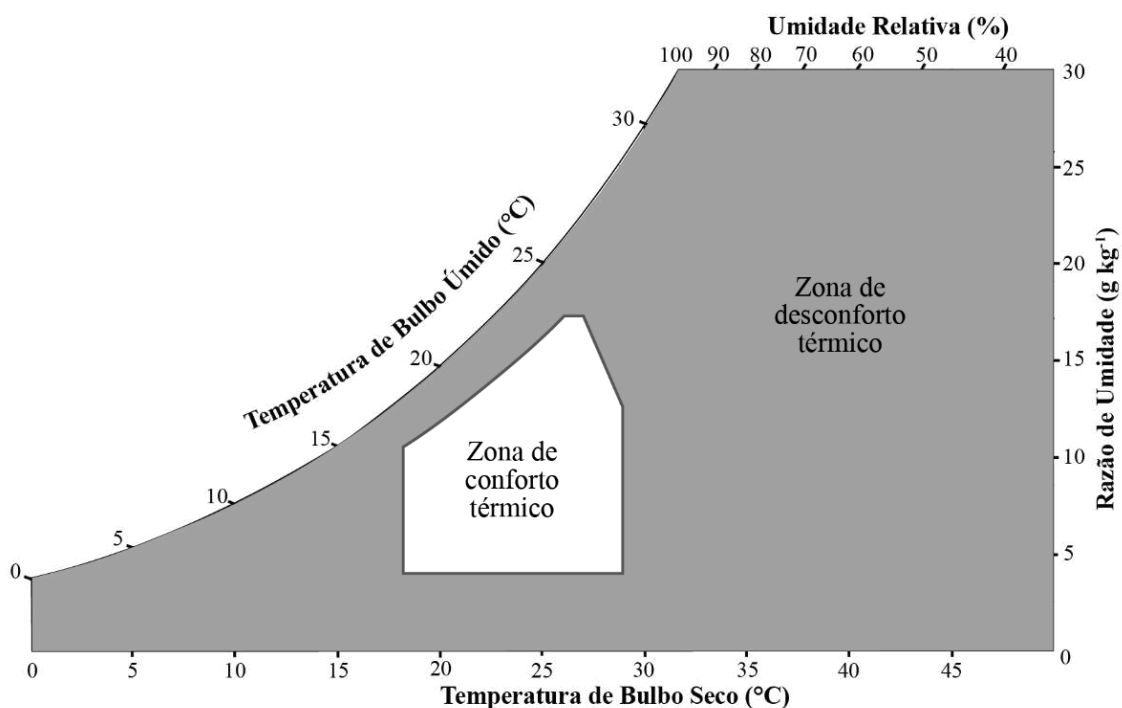


Figura 2.4 - Zonas de conforto e desconforto térmico apresentadas na carta bioclimática de Givoni (1992). Fonte: A autora.

O ICT calculado consiste no percentual de tempo em que o usuário está submetido a condições de conforto térmico ao longo do ano, considerando o ano médio padrão obtido a partir da Equação 2.1. Para a obtenção dos valores de ICT, foi desenvolvido um algoritmo de classificação em ambiente R (R CORE TEAM, 2025) para identificar a condição de conforto ou desconforto na carta bioclimática utilizando os dados das variáveis temperatura de bulbo seco (TBS, em °C), temperatura de bulbo úmido (TBU, em °C) e umidade relativa do ar (UR, em %). Como os valores de TBU não estão disponíveis na base dados apresentada por Xavier et al. (2022), os mesmos foram obtidos a partir da relação psicrométrica entre a TBU e as TBS e RH utilizando a Equação 2.2, proposta por Stull (2011).

$$TBU = TBS \times [0,151977 \times (UR + 8,313659)^{0,5}] + \arctan(TBS + UR) - \arctan(UR - 1,676331) + [0,00391838 \times (UR)^{1,5} \times \arctan(0,023101 \times UR)] - 4,686035 \quad (2.2)$$

em que TBU é a temperatura de bulbo úmido (°C), TBS é a temperatura de bulbo seco (°C) e UR é a umidade relativa do ar (%).

Para cada dia do ano, o ICT foi calculado para três condições térmicas: duas condições extremas (utilizando as temperaturas mínima e máxima diária) e uma condição média (utilizando a temperatura média diária), considerando o ano médio padrão gerado. Portanto, para cada pixel inserido na região semiárida, foram obtidos 1.095 valores anuais (produto das três condições térmicas pelo número de dias no ano) para o cálculo dos percentuais de conforto. Como resultado, obtiveram-se os percentuais anuais de conforto e desconforto térmico para o semiárido brasileiro.

2.2.3.2 Graus-dia

O índice de graus-dia é amplamente utilizado para estimar o consumo de energia necessário para aquecimento e resfriamento de edificações (ABEBE; ASSEFA, 2022; SADEQUI; TABARI; DINPASHOH, 2022; SCOCCIMARRO et al., 2023). Este índice quantifica a severidade do clima de uma determinada região, auxiliando no planejamento energético e no desenvolvimento de alternativas construtivas eficientes. Conceitualmente, o índice de graus-dia representa a soma das diferenças diárias entre a temperatura média externa e uma temperatura de referência, conhecida como temperatura de base, ao longo de um período específico (STENSJÖ; FERREIRA; LOURA, 2017).

Para o presente estudo, foram calculados os índices de graus-dia de resfriamento (GDR) e de aquecimento (GDA), em escala mensal, sazonal e anual. Os valores de GDR e GDA, obtidos, respectivamente, pelas Equações 2.3 e 2.4 são computados apenas quando as diferenças entre a temperatura média externa (TBS) e a temperatura de base são positivas, ou seja, acima de zero. Caso contrário, não é necessário resfriamento ou aquecimento.

$$GDR = \sum(TBS - T_b) \quad (2.3)$$

$$GDA = \sum(T_b - TBS) \quad (2.4)$$

em que GDR é graus-dia de resfriamento ($^{\circ}\text{C}$) e GDA é graus-dia de aquecimento ($^{\circ}\text{C}$), ambos calculados em escala mensal, sazonal e anual, TBS é a temperatura de bulbo seco diária ($^{\circ}\text{C}$), e T_b é a temperatura de base ($^{\circ}\text{C}$).

Para o cálculo da temperatura de base, empregou-se a metodologia utilizada por Stensjö, Ferreira e Loura (2017), que considera a temperatura de neutralidade. Essa abordagem do conforto térmico permite incorporar as condições de aclimação dos usuários sujeitos a diferentes contextos climáticos, o que inclui o clima semiárido. A temperatura de neutralidade ou de base foi determinada por meio do modelo adaptativo de De Dear e Brager (2002), conforme apresentado na Equação 2.5. Para isso, utilizou-se os dados de TBS observados em cada um dos pixels que compõem o semiárido.

$$T_b = (0,31 \times \overline{TBS}) + 17,8 \quad (2.5)$$

em que T_b é a temperatura de base ($^{\circ}\text{C}$) e \overline{TBS} é a temperatura de bulbo seco média mensal ($^{\circ}\text{C}$).

2.2.3.3 Índice de calor

O índice de calor (IC) consiste em um parâmetro baseado na combinação da temperatura do ar com a umidade relativa para estimar uma temperatura aparente, refletindo a sensação térmica percebida pelos indivíduos em um ambiente. Segundo Blazejczyk et al. (2012), em condições de alta umidade, ocorre uma diminuição na taxa de evaporação da água, o que reduz a capacidade do corpo de dissipar o calor e, conseqüentemente, ocorre um aumento da temperatura quando comparado a ambientes com ar seco. Com base nisso, os valores de IC têm sido empregados para evidenciar a necessidade de adaptações em edificações, considerando os níveis de exposição dos usuários a condições extremas de temperatura e umidade relativa (BENEVIDES; TEIXEIRA; CARLO, 2022; HONG et al., 2021).

No presente estudo, os valores do índice de calor (IC) foram obtidos a partir do

algoritmo desenvolvido pelo Serviço Meteorológico dos Estados Unidos (NWS, 2025). O cálculo do IC incorpora variáveis como radiação solar, velocidade do vento, resistência térmica das vestimentas, fisiologia humana e nível de atividade física, as quais estão implicitamente consideradas no índice (ROTHFUSZ e HEADQUATERS, 1990). Além desses fatores, segundo NWS (2025), os valores de IC levam em conta condições de sombreamento e são classificados de acordo com os possíveis efeitos adversos do calor excessivo sobre os indivíduos, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Categorias para a classificação dos valores do índice de calor (IC) e respectivos possíveis distúrbios fisiológicos nos indivíduos (NWS, 2025).

IC (°C)	Categoria	Possíveis distúrbios de calor para pessoas
$27 < IC \leq 32$	Atenção	Possível fadiga por exposição prolongada/ou atividade física
$32 < IC \leq 41$	Extrema atenção	Possível insolação, câibras ou exaustão por exposição prolongada ao calor e/ou atividade física
$41 < IC \leq 54$	Perigo	Prováveis câibras ou exaustão e possível insolação por exposição prolongada ao calor e/ou atividade física
> 54	Extremo perigo	Insolação altamente provável

Fonte: A autora.

Apesar desse índice ter sido inicialmente concebido para condições externas, ele tem sido adaptado para a avaliação de ambientes internos, como exemplificam Feitosa e Wilkinson (2018) e Jacklitsch et al. (2016). Para o cálculo do IC, foram utilizados apenas os dados de TBS e UR (Equação 6), por meio do pacote *weathermetrics* (ANDERSON; BELL; PENG, 2013; ANDERSON; PENG; FERRARI, 2016) desenvolvido para aplicação em ambiente R (R CORE TEAM, 2025).

$$\begin{aligned}
 IC = & -42,379 + (2,04901523 \times TBS) + (10,14333127 \times UR) - \\
 & (0,22475541 \times TBS \times UR) - (0,00683783 \times TBS \times TBS) - \\
 & (0,05481717 \times UR \times UR) + (0,00122874 \times TBS \times TBS \times UR) + \\
 & (0,00085282 \times TBS \times UR \times UR) - (0,00000199 \times TBS \times TBS \times \\
 & R \times UR)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

em que IC é o índice de calor ($^{\circ}\text{C}$), onde TBS é a temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$) e UR é a umidade relativa (%).

2.2.4 Estratégias construtivas

A carta bioclimática proposta por Givoni (1992) é uma ferramenta fundamental na arquitetura para a definição de estratégias de condicionamento térmico em edificações. Como mencionado anteriormente, esta carta relaciona variáveis climáticas, como temperatura do ar e umidade relativa, permitindo a identificação de zonas de conforto térmico e a seleção de estratégias construtivas adequadas. De acordo com Bairros (2021), a aplicação desta carta visa maximizar a eficiência no conforto ambiental de edificações, adaptando-as às variáveis climáticas específicas de cada localidade. Além disso, como destacam Walsh, Cóstola e Labaki (2017), cartas bioclimáticas como a de Givoni (1992) vêm sendo amplamente utilizadas para a avaliação da eficiência energética de edificações.

A carta bioclimática de Givoni (1992) é composta por zonas. Quando as condições climáticas relativas à zona de conforto térmico não são alcançadas, recomenda-se a aplicação de estratégias construtivas para a melhoria do desempenho térmico das edificações (Figura 2.5). Essas estratégias, quando aplicadas corretamente, contribuem para a eficiência energética das edificações e para o conforto térmico dos ocupantes (MANZANO-AGUGLIARO et al., 2015; LACHIR e NOUFID, 2024). Dentre as estratégias inseridas nas demais zonas da carta, destacam-se a ventilação natural, tanto diurna quanto noturna, o resfriamento evaporativo, a umidificação do ar, o uso da inércia térmica para resfriamento ou aquecimento, além do isolamento térmico combinado com aquecimento solar. Ademais, a carta também indica a necessidade da utilização de sistemas mecânicos de climatização, como o ar-condicionado e o aquecimento artificial, quando as estratégias passivas não são suficientes para garantir o conforto térmico adequado.

Estratégias de condicionamento térmico

- (A) Ventilação natural diurna
- (B) Ventilação natural noturna e/ou
- (C) Resfriamento evaporativo e/ou
- (D) Inércia térmica para resfriamento
- (C) Resfriamento evaporativo
- (E) Isolamento térmico com aquecimento solar
- (F) Inércia térmica com aquecimento solar
- (C) Resfriamento evaporativo e/ou
- (D) Inércia térmica para resfriamento
- (G) Ar-condicionado
- (H) Aquecimento artificial com isolamento térmico
- (I) Umidificação

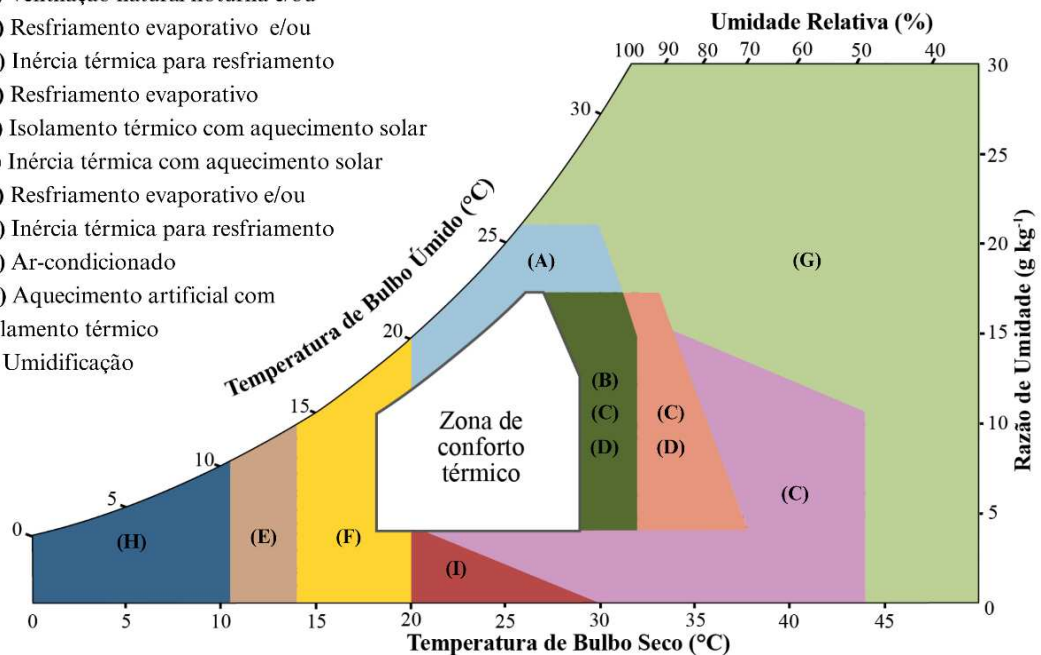


Figura 2.5 - Zonas de conforto térmico e das estratégias de condicionamento térmico em edificações apresentadas na carta bioclimática de Givoni (1992). Fonte: A autora.

No presente estudo, o percentual anual de recomendação de cada estratégia construtiva foi definido para cada um dos pixels que compõem a região semiárida. Para isso, foram realizados os mesmos procedimentos descritos na Seção 3.2.3.1, onde as variáveis TBS, TBU e UR foram inseridas na carta bioclimática. Como resultado, obtiveram-se os percentuais anuais de cada estratégia construtiva recomendada para o semiárido.

2.2.5 Mapeamento

Os resultados obtidos a partir do cálculo dos índices climáticos descritos acima, bem como das estratégias construtivas, foram mapeados para todo o semiárido brasileiro. Para isso, dois tipos de mapas foram produzidos: i) mapas de resultados especializados; e ii) mapas de resultados por município. A escolha por disponibilizar os resultados nesses dois formatos visa atender a duas demandas distintas: i) mapas que forneçam uma visão mais ampla dos índices e das estratégias para todo o semiárido, a fim de relacioná-los com as variáveis climáticas que influenciam nesta região; ii) mapas direcionados para informar a população e orientar políticas públicas de cada município.

O mapeamento dos resultados espacializados se deu a partir da interpolação dos dados tabelados. O objetivo deste procedimento foi gerar mapas em formato matricial (raster), cujos pixels apresentassem as mesmas dimensões do pixel original do banco de dados de Xavier et al. (2022). Para isso, utilizou-se o comando “Interpolação IDW” no software QGIS, obtendo-se mapas com resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ($\sim 11,1 \text{ km} \times \sim 11,1 \text{ km}$) novamente.

Os mapas com resultados por município foram obtidos a partir dos mapas interpolados e utilizando um arquivo “máscara” em formato *.shapefile* contendo os municípios que compõem a região semiárida. Para isso, utilizou-se o comando “Estatísticas zonais”, também a partir do software QGIS. A partir desses procedimentos, geraram-se mapas contendo os valores médios, mínimos, máximos, valor da amplitude e do desvio padrão dos índices e estratégias calculados, por município. Todos os mapas gerados foram coloridos de modo a facilitar a interpretação dos resultados obtidos.

2.2.6. Esquema metodológico

Em resumo, a metodologia descrita utilizou dados climáticos do banco de dados de Xavier et al. (2022), em formato matricial, escala diária e alta resolução espacial para a obtenção do índice de conforto térmico, índice de graus-dia de resfriamento e aquecimento, índice de calor e para a determinação das estratégias construtivas mais recomendadas para a região semiárida brasileira. Posteriormente, os resultados obtidos foram mapeados para a área de estudo e disponibilizados de forma espacializada e por município, em escala mensal, sazonal e anual. Um esquema da metodologia adotada nesta pesquisa está apresentado na Figura 2.6.

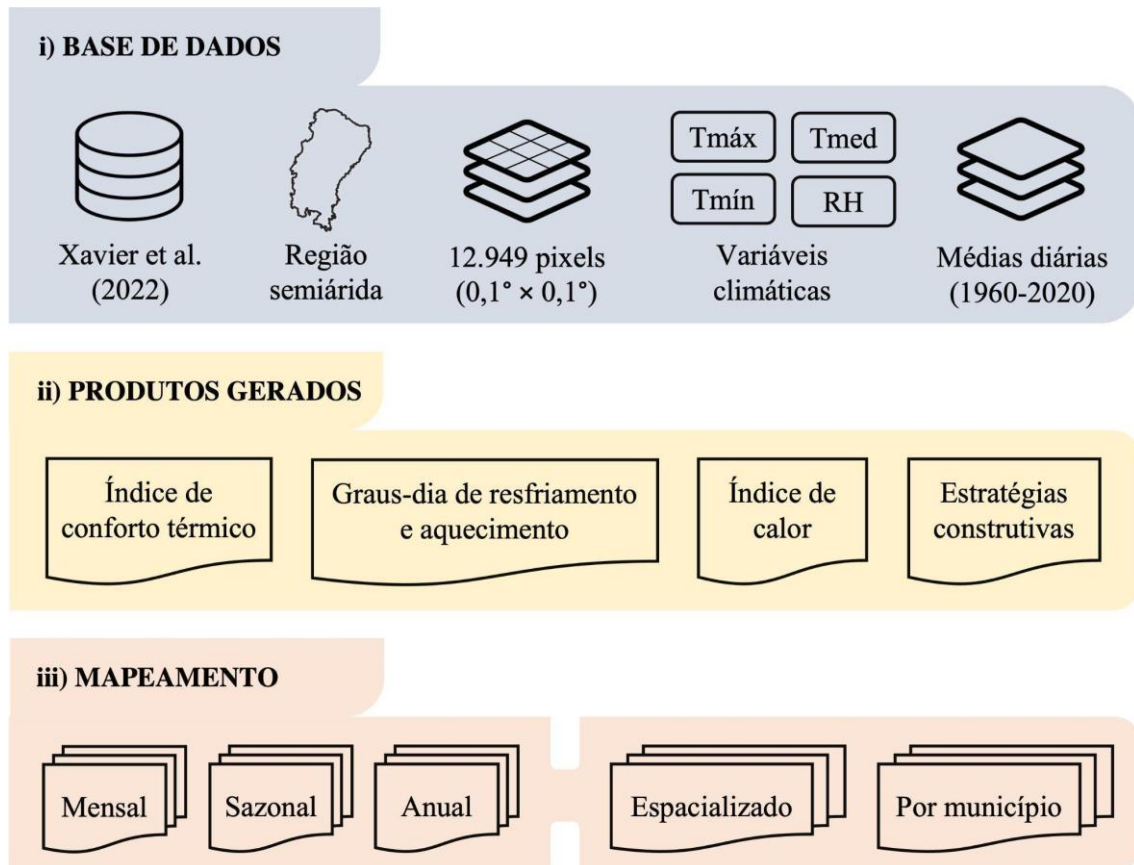


Figura 2.6 - Esquema metodológico adotado nesta pesquisa. Fonte: A autora.

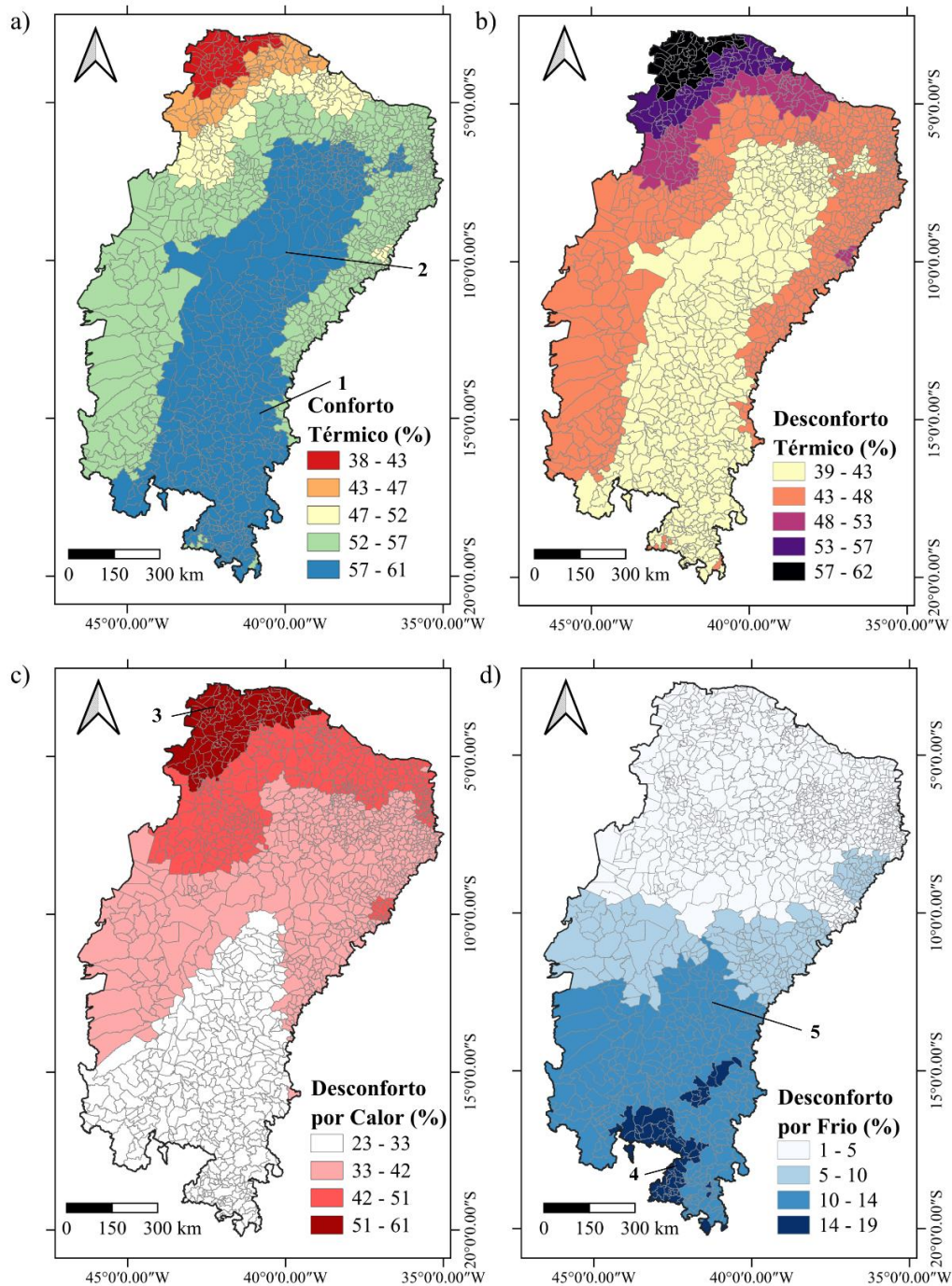
2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Índices climáticos

Considerando o impacto das características climáticas externas nas condições internas das edificações, o índice de conforto térmico (ICT), os índices de graus-dia de resfriamento (GDR) e aquecimento (GDA), e o índice de calor (IC) foram calculados a fim de caracterizar os aspectos climáticos da região semiárida brasileira.

Os valores obtidos de ICT demonstram que os percentuais de conforto variam de 38 a 61% anualmente (Figura 2.7a). As maiores magnitudes de ICT (obtidas em pelo menos 57% do ano) são observadas nos municípios localizados em uma faixa central no sentido norte-sul do semiárido, o que pode estar relacionado às altitudes acima da média dessa região (Figura 2.1b). A ocorrência de maiores percentuais de conforto nessa faixa é corroborada pelos resultados de zoneamento climático apresentados por Benevides, Teixeira e Carlo (2022) bem como pelo estudo apresentado por Santana et al. (2021). Estes autores destacam que, no município de

Vitória da Conquista (Latitude: 14° 51'S, Longitude: 40° 50'W, Altitude: 874 m, População: 370.879 hab.), localizado no centro-sul do estado da Bahia, as temperaturas médias ao longo dos doze meses do ano se mantêm dentro da faixa considerada adequada para o conforto térmico.



1:Vitória da Conquista-BA, 2:Jaguarari-BA, 3:Joca Marques-PI, 4:Divinolândia de Minas-MG e 5:Mucugê-BA.

Figura 2.7 - Percentuais anuais de (a) conforto térmico, (b) desconforto térmico, (c) desconforto por calor e (d) desconforto por frio obtidos para o semiárido brasileiro, por município. Fonte: A autora.

O município de Jaguarari (Latitude: 10° 14'S, Longitude: 40° 11'W, Altitude: 636 m, População: 32.703 hab.), localizado no norte da Bahia, apresentou os maiores valores ICT, em cerca de 61% do ano e, portanto, pode ser considerado como o município com as melhores condições de conforto térmico da região semiárida, bem como o de menor demanda pela aplicação de estratégias construtivas. De acordo com Duarte (2024), o referido município apresenta condições socioeconômicas consideradas satisfatórias. No entanto, seu Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é inferior à média do estado da Bahia e ainda enfrenta deficiências em infraestrutura básica, especialmente no que se refere ao acesso da população à rede de saneamento básico. Diante desse cenário, infere-se que, de modo geral, a população local possui limitada capacidade de promover adequações nas construções existentes, dificultando a adoção de estratégias construtivas mais complexas, como a utilização de materiais que proporcionem maior inércia térmica no revestimento e paredes externas das edificações. Assim, espera-se que os elevados percentuais anuais de ICT contribuam para condições internas mais confortáveis nas edificações deste município sem a necessidade de grandes intervenções.

Em relação ao desconforto térmico, os maiores percentuais anuais foram observados no noroeste da região semiárida (Figura 2.7b), sobretudo no norte do estado do Piauí. Nessa porção, o desconforto térmico é acarretado majoritariamente pelo calor. Como apresentado na Figura 2.7c, a ocorrência de altas temperaturas implica em percentuais de desconforto por calor em até 61% do ano, como observado no município de Joca Marques (Latitude: 3° 28'S, Longitude: 42° 25'W, Altitude: 24 m, População: 5.394 hab.), no Piauí. De acordo com a classificação de Köppen (1936) proposta por Medeiros, Calvanti e Duarte (2020) para o estado do Piauí, o município de Joca Marques é classificado climaticamente como do tipo “As”, ou seja, tropical quente e úmido, com uma estação seca no inverno, o que explica as condições de desconforto por calor nesta região.

O sul da região semiárida apresenta os maiores percentuais de desconforto por frio, podendo ocorrer em até 19% do ano (Figura 2.7d). O maior percentual foi observado para o município de Divinolândia de Minas (Latitude: 18° 47'S, Longitude: 42° 35'W, Altitude: 741 m, População: 6.516 hab.), no estado de Minas Gerais, cujo clima é classificado como “Cwa”, ou seja, com clima subtropical de inverno seco e com temperaturas inferiores a 18°C. Outra região de destaque está situada no município de Mucugê (Latitude: 13° 00'S, Longitude: 41° 22'W, Altitude: 983 m, População: 12.137 hab.) e cidades adjacentes, no estado da Bahia, esse município apresenta as maiores altitudes do semiárido (superiores a 1100 metros), o que

naturalmente implica em temperaturas reduzidas ao longo do ano e na ocorrência de desconforto por frio.

Os valores anuais de GDR por município (Figura 2.8a), corroboram, em sua grande maioria, os resultados de percentuais anuais de desconforto por calor (Figura 2.7c), evidenciando novamente temperaturas mais elevadas no norte da região semiárida. Esse padrão também foi observado por Medeiros et al. (2005) ao mapear as temperaturas mínimas, máximas e médias no nordeste brasileiro. Anualmente, no norte do semiárido, pode-se chegar a uma necessidade de resfriamento de até 476°C, como no município de Joca Marques-PI já discutido anteriormente.

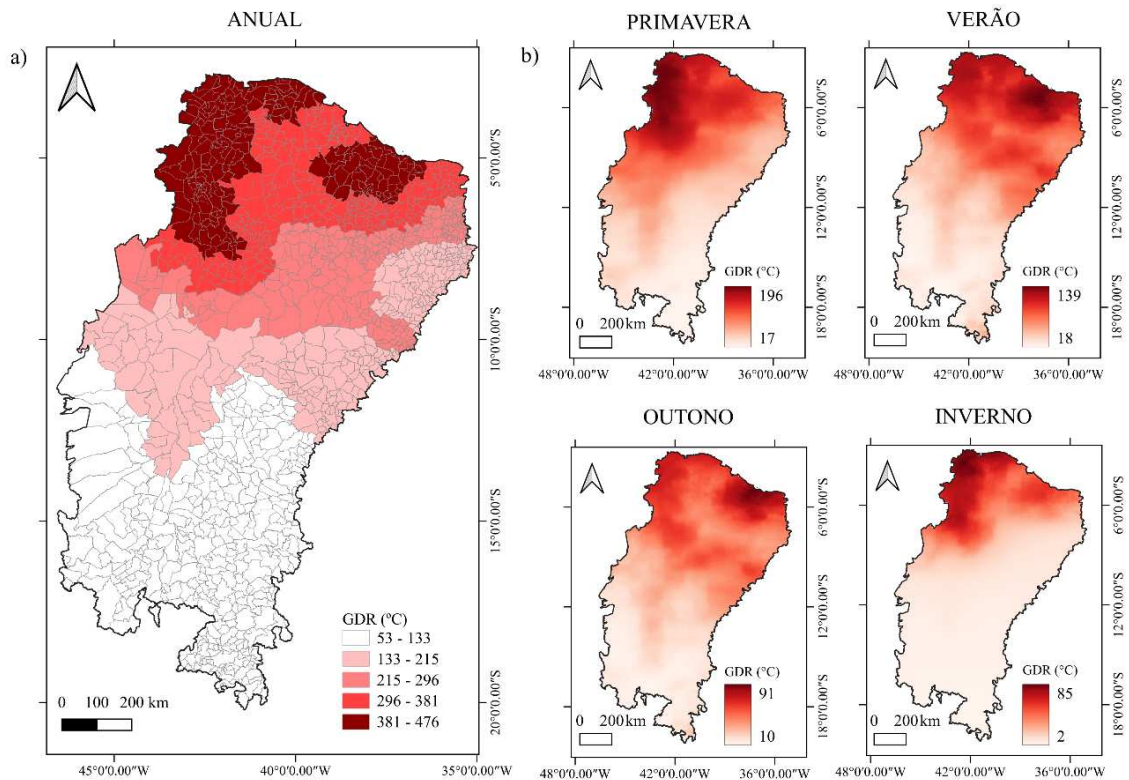


Figura 2.8 - Valores (a) anuais e (b) sazonais de graus-dia de resfriamento (GDR) para o semiárido brasileiro, em °C. Fonte: A autora.

Sazonalmente, duas localidades se destacam em relação às magnitudes de GDR (Figura 2.8b). Primeiramente, o extremo noroeste do semiárido (fronteira dos estados do Piauí e Maranhão), durante a primavera e o inverno no hemisfério sul. Esse padrão é ainda mais evidente nos meses de maio a setembro (Figura 2.9). A outra localidade consiste na fronteira dos estados do Ceará (CE) e Rio Grande do Norte (RN), onde o calor e a necessidade por

resfriamento se acentuam nos meses de verão e outono. Como demonstra Rodrigues (2024) ao mapear as temperaturas mensais para o CE, na fronteira com o RN as temperaturas médias superaram os 28°C na maior parte dos meses, o que influencia nas magnitudes de GDR apresentadas na Figura 2.9.

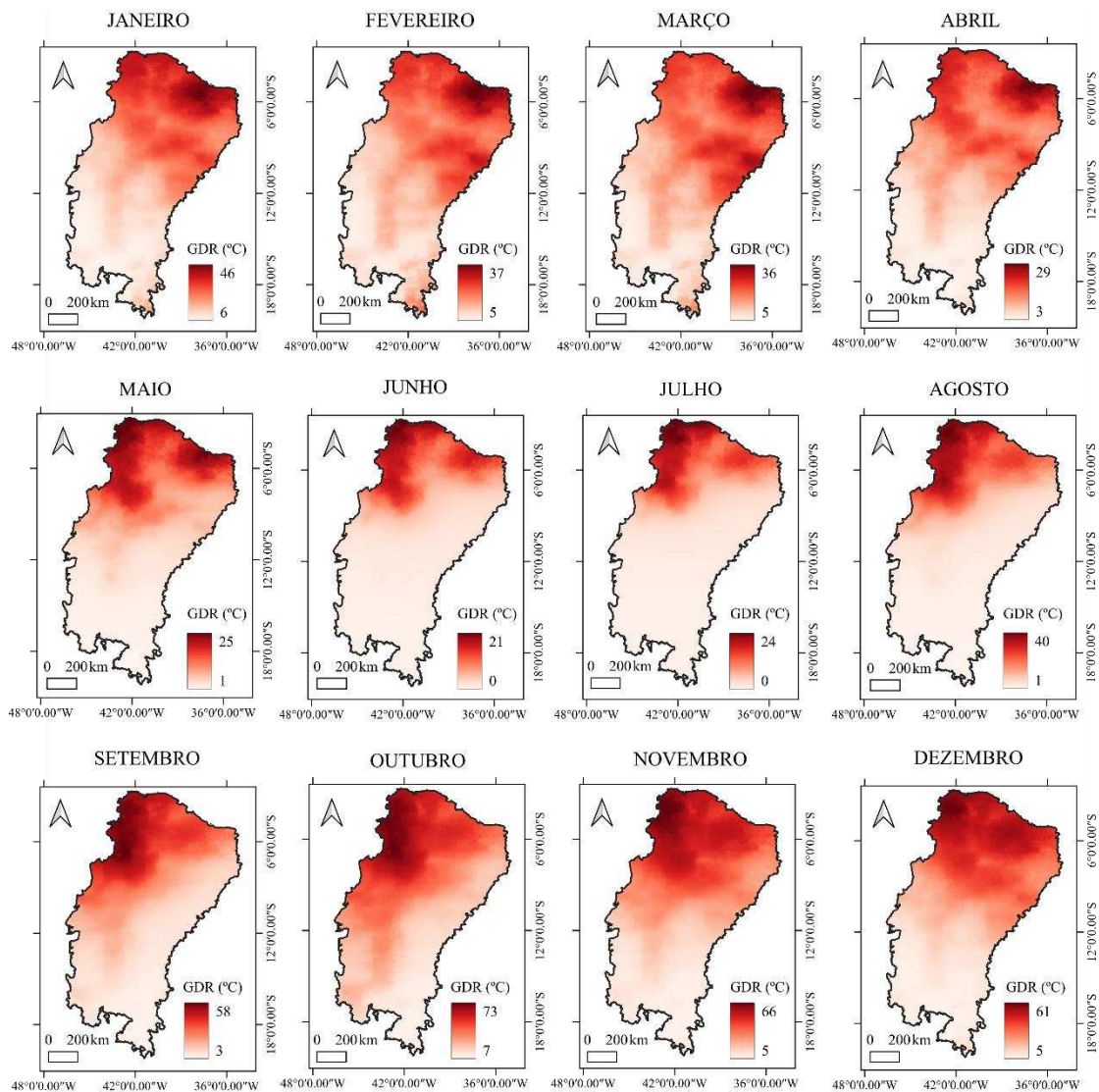


Figura 2.9 - Valores mensais de graus-dia de resfriamento (GDR) espacializados para o semiárido brasileiro, em °C. Fonte: A autora.

Em relação às necessidades por aquecimento no semiárido brasileiro, em escala anual, as mesmas superam as necessidades por resfriamento, com magnitudes de GDA anual podendo atingir cerca de 751°C. Apesar disso, o requerimento por aquecimento ocorre de maneira mais concentrada, apenas em um reduzido número de municípios no sul da região semiárida, como evidenciado na Figura 2.10a. Considerando todos os municípios semiáridos, o menor e o maior

valor anual de GDA ocorre, respectivamente, para os municípios de Apuiarés-CE e Divinolândia de Minas-MG.

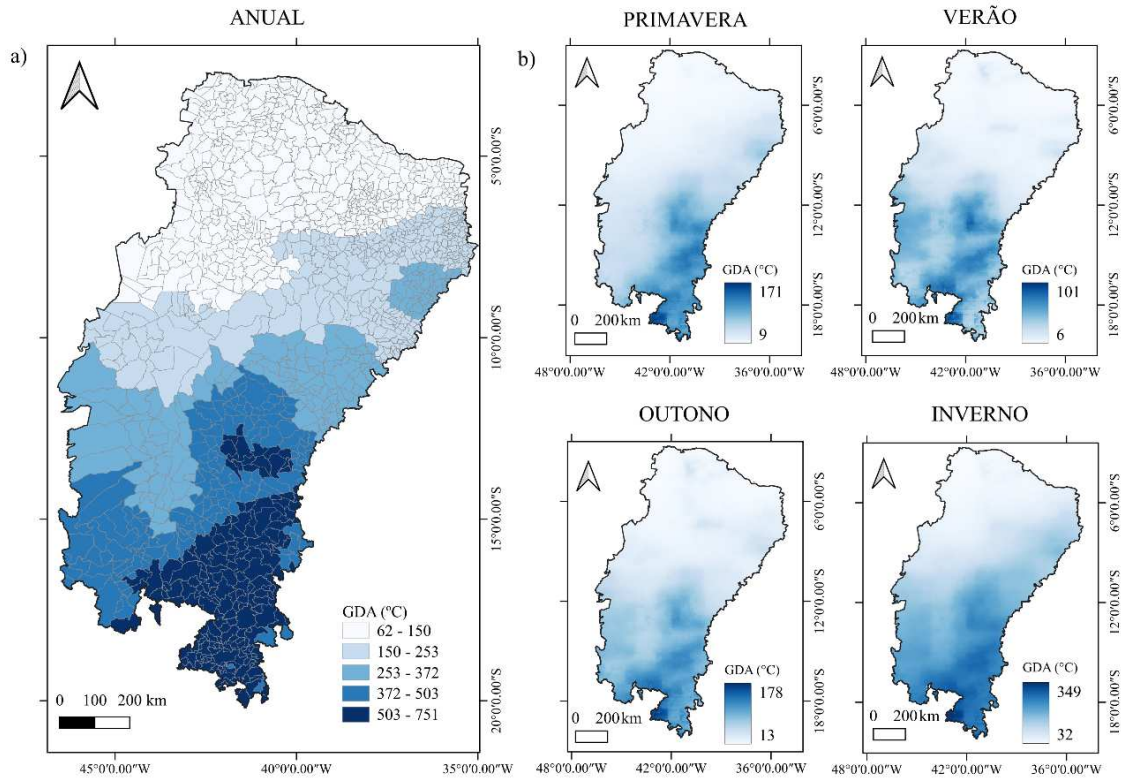


Figura 2.10 - Valores (a) anuais e (b) sazonais de graus-dia de aquecimento (GDA) para o semiárido brasileiro, em °C. Fonte: A autora.

Sazonalmente, o padrão das maiores magnitudes de GDA na porção sul do semiárido persiste (Figura 2.10b), atingindo valores máximos, como é de se esperar, no período do inverno no hemisfério sul, estação em que a Terra recebe mais radiação solar direta nas latitudes mais ao norte do Equador. Como consequência desse fenômeno, a necessidade por aquecimento no semiárido ocorre com maior intensidade nos meses de junho, julho e agosto (Figura 2.11).

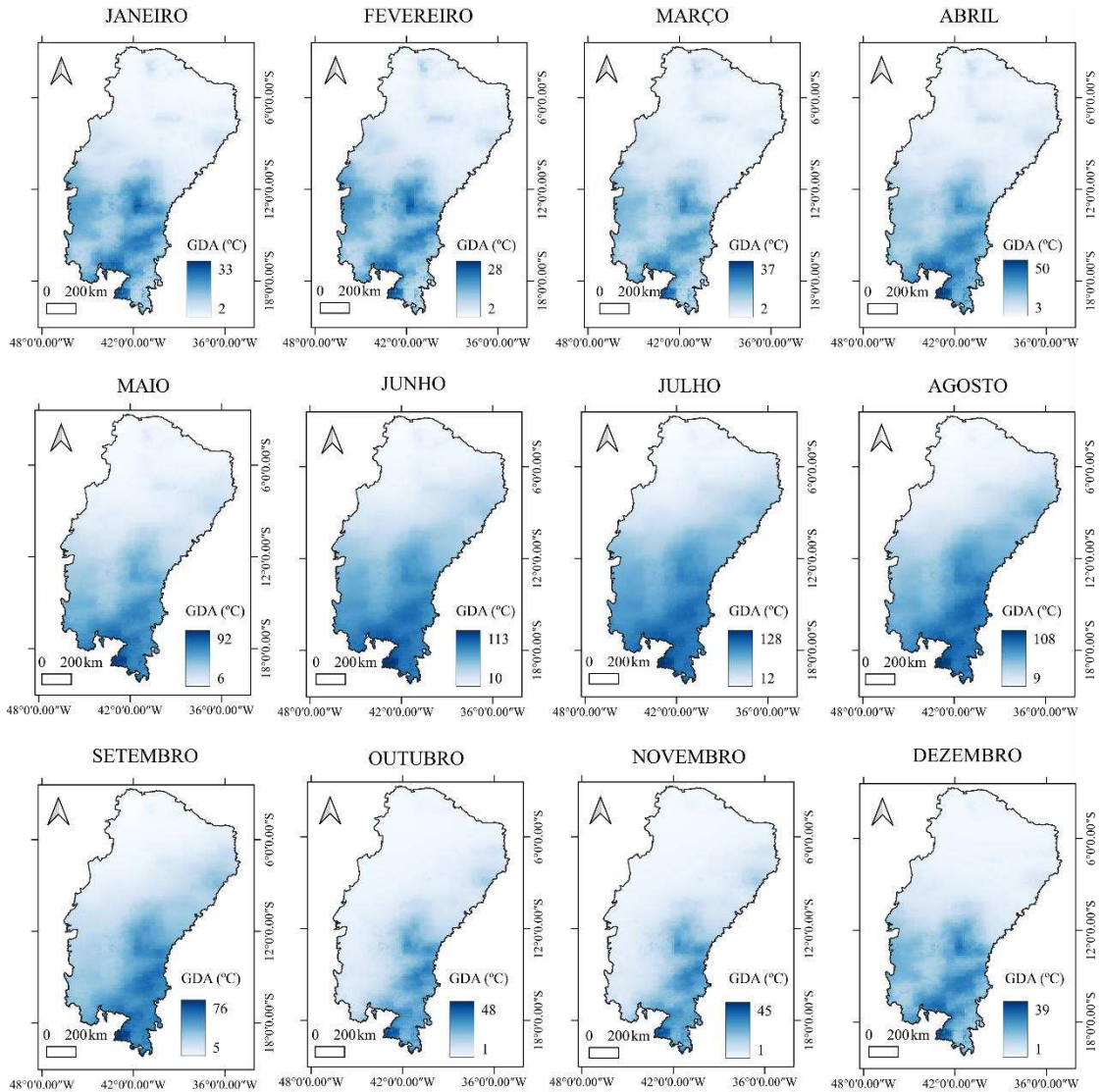


Figura 2.11 - Valores mensais de graus-dia de aquecimento (GDA) espacializados para o semiárido brasileiro, em °C. Fonte: A autora.

As necessidades de resfriamento e aquecimento de edificações na região semiárida brasileira foram calculadas anteriormente por Martins, Bittencourt e Krause (2012), Stensjö, Ferreira e Loura (2017), Benevides (2020), Benevides, Teixeira e Carlo (2022) e Silva et al. (2024). No entanto, tais pesquisas apresentam limitações que foram superadas pelo presente estudo. Os estudos realizados por Martins, Bittencourt e Krause (2012) e Benevides (2020) estimaram magnitudes de graus-hora (GH) apenas para três e cinco municípios do semiárido, respectivamente, apresentando, portanto, uma resposta desse índice de forma muito localizada. Já Stensjö, Ferreira e Loura (2017) e Benevides, Teixeira e Carlo (2022) calcularam as demandas por resfriamento e aquecimento para um maior número de localidades do semiárido,

mas não forneceram tais valores mapeados de forma espacializada, apenas para as estações consideradas. Esta lacuna foi superada por Silva et al. (2024), entretanto tais autores mapearam valores de GDR e GDA apenas em escala anual.

Diante disso, os mapas de GDR e GDA apresentados pelo presente estudo em escala mensal, sazonal e anual se configuram como o conjunto de resultados mais abrangente acerca da necessidade por resfriamento e aquecimento de edificações já produzido para a região semiárida brasileira. Tais mapas, apresentados de forma espacializada e por município, fornecem informações robustas capazes de nortear o projeto de edificações climaticamente mais adaptadas às realidades dessa região.

Os resultados referentes ao IC obtidos para a região semiárida (Figura 2.12) ratificam a demanda por resfriamento na porção centro-norte desta região. Observou-se que todos os municípios inseridos no semiárido estão submetidos à condições de estresse térmico por calor, apresentando valores de IC na categoria “Atenção” em pelo menos 15% do ano (Figura 2.12a). Para a categoria “Extrema Atenção” constatou-se que os maiores percentuais são observados no oeste do semiárido, podendo ocorrer em até 26% do ano (Figura 2.12b). Em termos anuais, essa parcela do semiárido apresenta os menores percentuais de umidade relativa do ar segundo Moura, Sobrinho e Silva (2019), o que significa que os valores de IC apresentados são influenciados, em sua maioria, pelas altas temperaturas observadas.

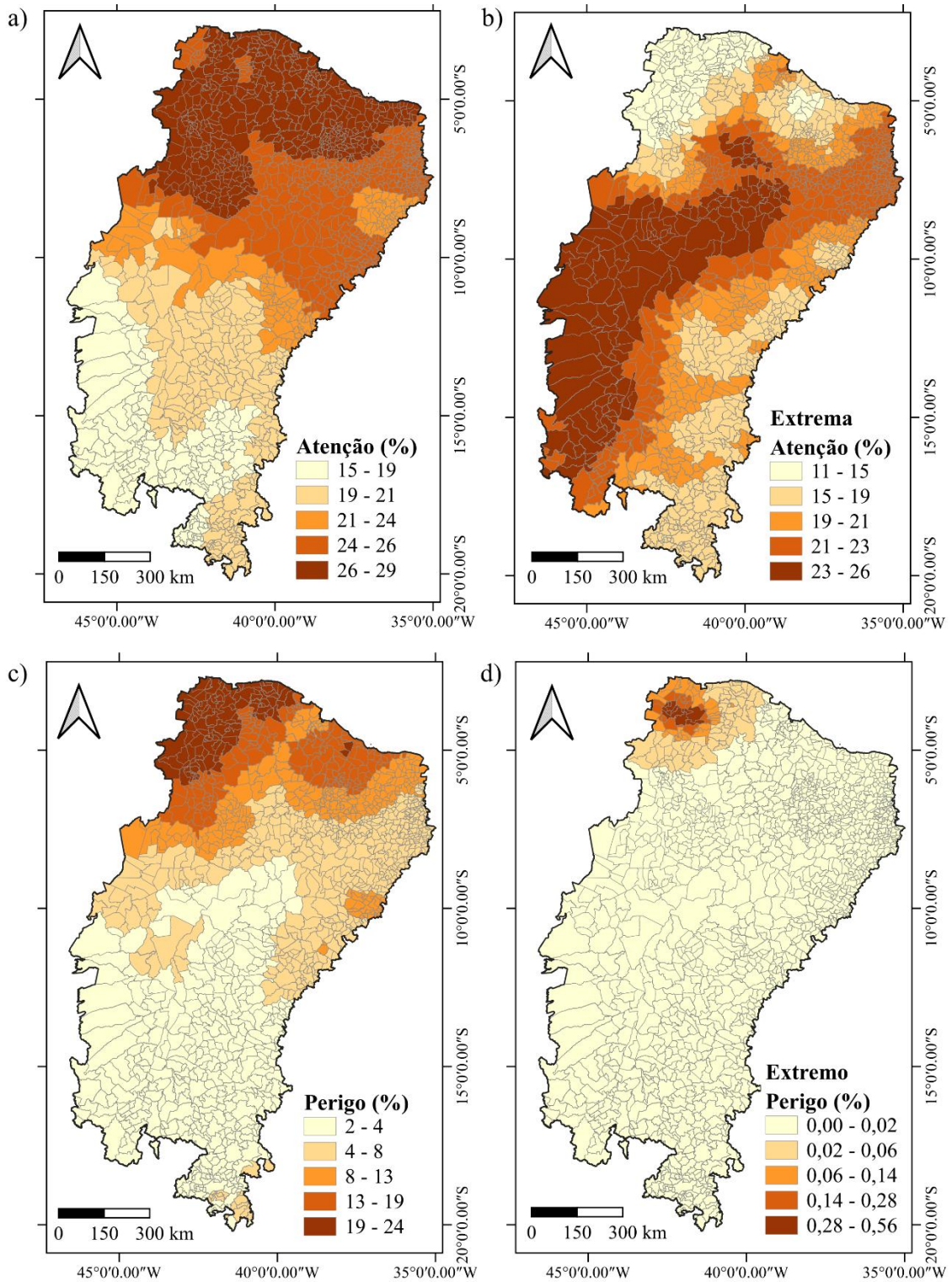


Figura 2 Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento. **12** - Percentuais anuais de índice de calor obtidos para os municípios do semiárido brasileiro para as categorias (a) Atenção, (b) Atenção Extrema, (c) Perigo e (d) Extremo Perigo, referentes a possíveis distúrbios fisiológicos em indivíduos. Fonte: A autora.

O IC reflete a sensação térmica percebida pelos indivíduos em um ambiente a partir da combinação da temperatura do ar com a umidade relativa, estimando uma temperatura aparente. O resultado do efeito cumulativo dessas variáveis pode ser constatado com mais evidência no noroeste da região semiárida, onde são observados os maiores percentuais de IC categorizados como “Perigo” e “Extremo Perigo” (Figura 2.12c e 2.12d). Conforme discutido anteriormente, esta região apresenta altas demandas por resfriamento, com valores de GDR podendo superar 400°C anuais. Adicionalmente, como apresenta Silva et al. (2004), essa região é caracterizada como a de maior umidade relativa do ar no estado do Piauí, com valores médios anuais acima dos 70%. Dessa forma, em ambientes com alta umidade, a evaporação da água é reduzida, dificultando a perda de calor pelo corpo (BLAZEJCZYK et al., 2012). Portanto, os valores de IC no noroeste do semiárido implicam em um aumento da temperatura corporal, reduzindo o conforto térmico dos usuários.

De maneira geral, os percentuais de IC categorizados como “Extremo Perigo” não apresentaram magnitudes relevantes, com valores anuais inferiores a 1%. Apesar disso, deve-se levar em consideração que mudanças climáticas futuras podem eventualmente agravar a ocorrência de estresse térmico na região semiárida. Estudos como os apresentados por Costa et al. (2020), Guimarães et al. (2016) e Sales et al. (2015), projetam uma resposta de aumento nas temperaturas observada na região nordeste do Brasil, abrangendo o semiárido, o que implicaria em um aumento nos percentuais anuais de IC. Além disso, Requía et al. (2024) evidenciam a relação entre a falta de condições de conforto térmico, a partir de altos valores de IC, com o aumento na ocorrência de mortalidade relacionada à doenças respiratórias e circulatórias no Brasil, ratificando a importância da consideração dos percentuais anuais de IC no planejamento construtivo nacional.

2.3.2 Estratégias construtivas

Os percentuais anuais de desconforto térmico obtidos para o semiárido brasileiro (Figura 2.7b) evidenciam a alta demanda pela aplicação de estratégias construtivas de condicionamento térmico para essa região a fim de melhorar as condições de conforto. A partir do uso da carta bioclimática de Givoni (1992), observou-se que o uso somente de estratégias passivas, é insuficiente para suprir todas as demandas por estratégias construtivas no semiárido (Figura 2.13).

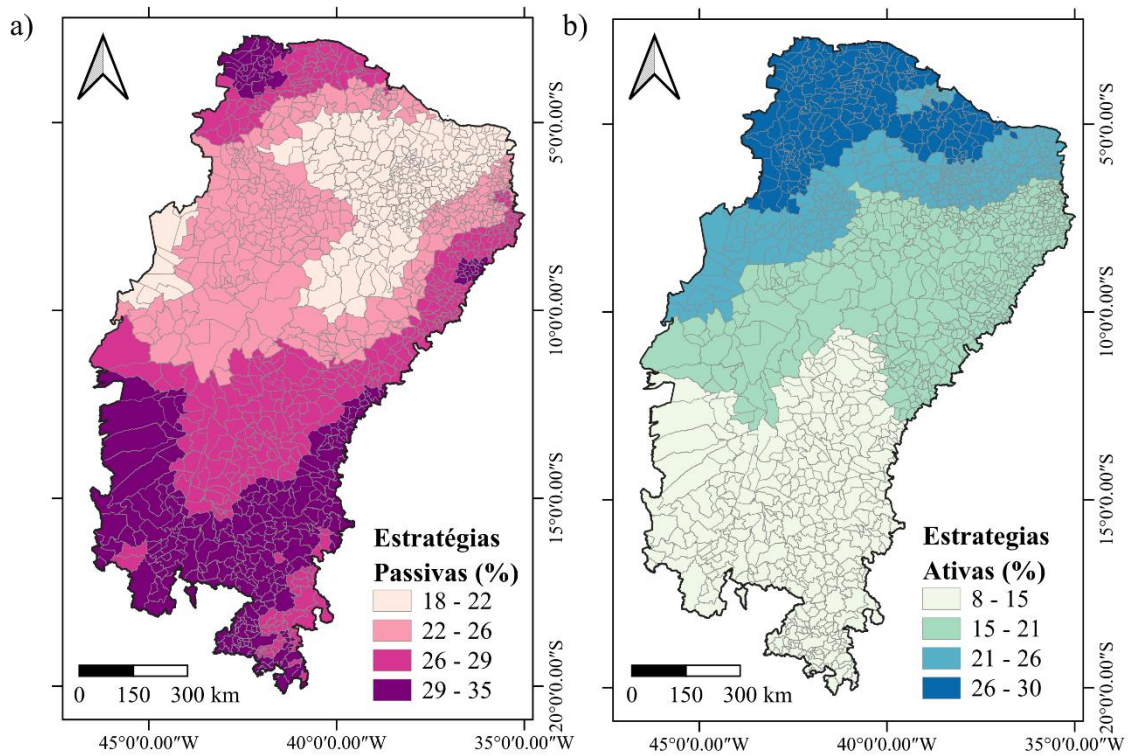


Figura 2.13 - Percentuais anuais de demandas por estratégias construtivas (a) passivas e (b) ativas obtidas para o semiárido brasileiro, por município. Fonte: A autora.

Para as regiões mais críticas em relação às demandas por resfriamento e aquecimento, respectivamente no noroeste e sul do semiárido, o uso de estratégias construtivas passivas é capaz de ampliar o percentual anual de conforto em pelo menos 18% (Figura 2.13a). Como reforçam Manzano-Agugliaro et al. (2015), o uso de estratégias passivas é vantajoso uma vez que não requer consumo de energia elétrica, devendo ser priorizado sempre que possível. Autores como Bhikhoo, Hashemi e Cruickshank (2017), em estudo para a Tailândia, evidenciam que o uso de estratégias passivas pode reduzir o número de dias com desconforto por calor em cerca de 21%. Tais estratégias também se mostraram eficientes para ampliar as condições de conforto térmico no Brasil, como demonstram Correia, Amorim e Santamouris (2024) e Marcolini, Almeida e Barreira (2022).

Dentre as estratégias passivas apresentadas na carta bioclimática de Givoni (1992), o emprego de ventilação natural diurna (Estratégia (A)) se apresenta como a maneira mais eficaz de aumentar o número de horas de conforto térmico ao longo do ano. Essa estratégia é capaz de contribuir com até 23% do conforto térmico anual (Figura 2.14). Considerando os municípios semiáridos, a Estratégia (A) apresenta maior potencial de uso no noroeste e em toda a faixa

leste do semiárido.

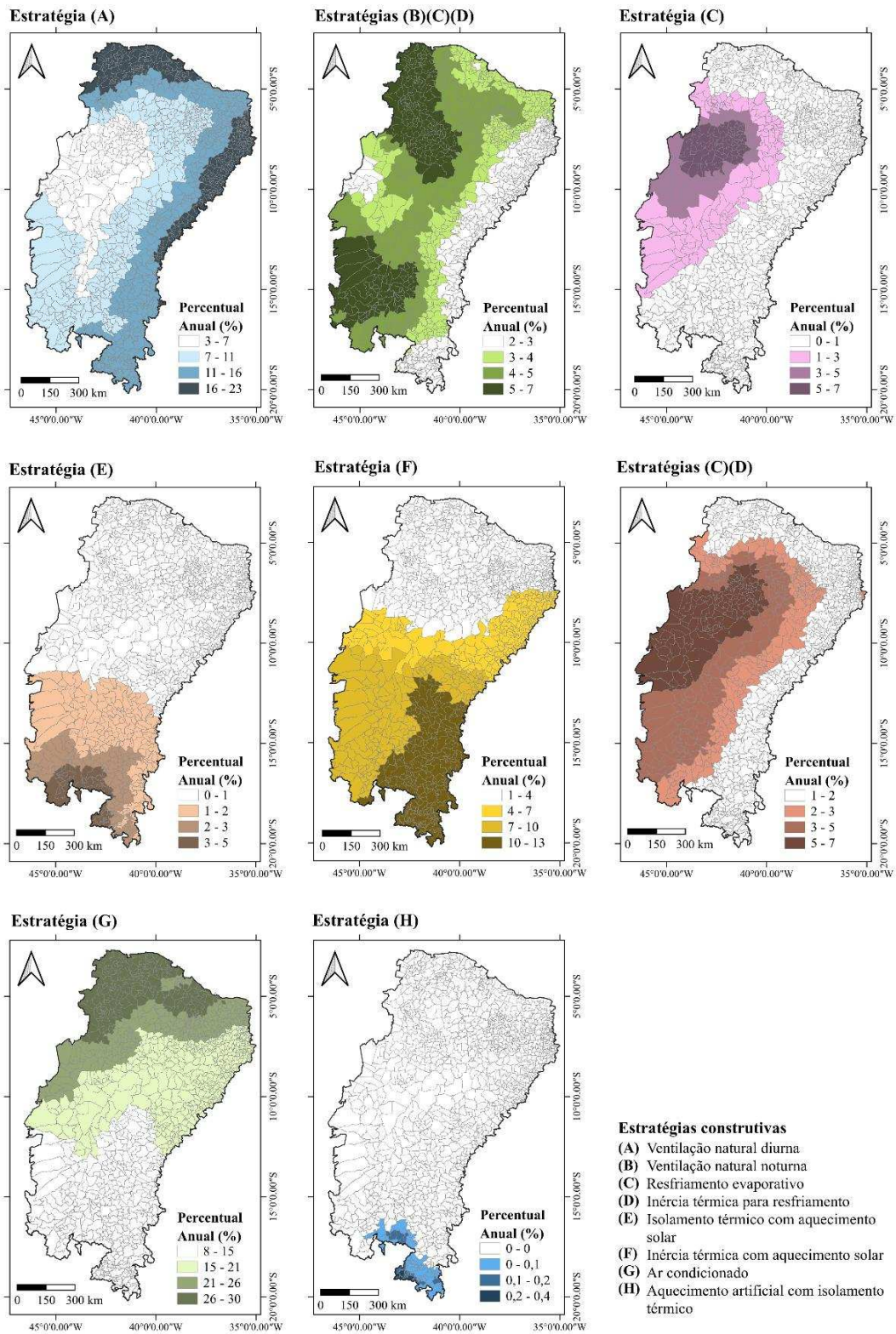


Figura 2.14 - Percentuais anuais de demanda por cada uma das estratégias construtivas apresentadas na carta bioclimática de Givoni (1992), por município do semiárido. Fonte: A autora.

A ventilação natural é uma estratégia passiva que aproveita as variações de pressão para promover o movimento do ar dentro das edificações, contribuindo para o resfriamento por convecção (ZHENG et al., 2018). Como explicam Zhong et al. (2022), o uso dessa estratégia é benéfico também por não promover emissões de carbono e por permitir a troca do ar interno do ambiente, melhorando as condições sanitárias. Song et al. (2021) afirmam ainda que a ventilação natural pode ser considerada como uma solução sustentável para promover uma melhoria na eficiência energética das edificações, apresentando, inclusive, grande potencial de uso em áreas urbanas (FONTENELLE; BASTOS; LORENTE, 2021).

Considerando esses mesmos princípios, o emprego da ventilação natural noturna (Estratégia (B)) também apresenta potencial de ampliar as condições de conforto térmico da região semiárida, sobretudo em sua porção noroeste e sudoeste. Estudos como os apresentados por Arumugam, Ramalingam e Vellaichamy (2022) e Li et al. (2022) demonstram a eficácia dessa estratégia no resfriamento da massa térmica do ar e na redução do excesso de calor no ambiente, o que reduz a demanda energética da edificação. Dessa forma, a utilização associada das ventilações naturais diurna e noturna podem ampliar em até 30% os percentuais de conforto anual no semiárido brasileiro (Figura 2.14).

Apesar desses benefícios, Buonocore et al. (2025) discutem que a frequência de utilização da ventilação natural apresentou uma tendência decrescente ao longo dos últimos anos no Brasil em decorrência do aumento da renda e da preferência pelo uso de condicionamento artificial do ar. Diante desses aspectos, evidencia-se que o efetivo emprego das estratégias construtivas propostas pelo presente estudo está ligado também à realidade socioeconômica local.

A região oeste-central do semiárido, para a qual foram observados percentuais anuais de desconforto de até 51% e índice de calor na categoria “Extrema Atenção” em pelo menos 23% do ano, apresenta potencial de ampliar os percentuais de conforto térmico anual a partir do uso das estratégias de resfriamento evaporativo (Estratégia (C)) e inércia térmica para resfriamento (Estratégia (D)), ou da combinação de ambas. O emprego dessas estratégias, apesar de estar restrito a determinadas localidades do semiárido, pode acarretar em um aumento do conforto em cerca de 14% do ano.

Como explicam Yang et al. (2019), o uso do resfriamento evaporativo como estratégia de condicionamento térmico em edificações se baseia no fato de que a água precisa absorver calor para mudar do estado líquido para o estado de vapor, convertendo calor sensível em calor latente de vaporização, o que resulta na redução da temperatura do ambiente. O uso dessa

estratégia pode ocorrer de forma direta (RED), ou seja, quando o ar quente entra em contato direto com água promovendo sua evaporação, ou de forma indireta (REI), a partir de um trocador de calor ou outro elemento resfriado pela evaporação da água (KALSIA et al., 2023; YANG; CUI; LAN, 2019). Estudos têm discutido que o uso de REI apresenta boa aplicabilidade em regiões de clima quente e árido (YANG et al., 2021). Isso ocorre pois, ao contrário do que ocorre no RED, o REI não implica no aumento da umidade relativa do ar, o que elevaria as temperaturas internas e a retenção de calor na edificação. Considerando que a estratégia de resfriamento evaporativo foi indicada para as regiões do semiárido com altos valores de IC, recomenda-se, portanto, que seja priorizada a utilização de técnicas de REI para o semiárido brasileiro, evitando o agravamento do calor interno nas edificações.

O uso da estratégia de inércia térmica pode ser empregado tanto para o resfriamento (Estratégia (D)) quanto para o aquecimento (Estratégia (F)) do ambiente, uma vez que reduz a amplitude da temperatura interior em relação à exterior (LAMBERTS, DUTRA; PEREIRA, 2014). Como discutido anteriormente, a estratégia de inércia térmica para resfriamento pode ser empregada em conjunto com o resfriamento evaporativo a fim de reduzir as temperaturas no oeste do semiárido. Estudos como o apresentado por Mastouri et al. (2017) apontam que o uso dessa estratégia tem sido eficiente para atenuar a amplitude térmica em regiões submetidas ao clima semiárido.

Como discutido anteriormente, o sul da região semiárida apresenta as maiores demandas por aquecimento (Figura 2.10). Para essa localidade, o uso das estratégias de isolamento térmico com aquecimento solar (Estratégia (E)) e inércia térmica com aquecimento solar (Estratégia (F)) podem ampliar as condições de conforto em até 18% do ano, caso sejam empregadas de forma conjunta (Figura 2.14). Lamberts, Dutra e Pereira (2014) explicam que, nestes casos, deve-se evitar as perdas de calor da edificação para o exterior e priorizar os ganhos de calor internos. Como exemplos para a aplicação prática dessas estratégias, tais autores citam a possibilidade de incorporação de superfícies envidraçadas orientadas ao sol, paredes mais espessas e a redução das aberturas.

O uso de estratégias de condicionamento térmico ativas no semiárido brasileiro pode ser requerido em até 30% do ano para garantir condições de conforto térmico (Figura 2.13b). Observou-se que a maior demanda ocorre na porção norte do semiárido, para a qual é necessário o resfriamento a partir do uso de ar condicionado (Estratégia (G)). Tocchio et al. (2024) evidencia que o Brasil está incluído entre os dez países com maior consumo de ares condicionados do mundo, sendo utilizados majoritariamente para o resfriamento do ambiente.

Toda essa utilização tem ampliado a demanda por energia elétrica ao longo dos últimos anos (TOCCHIO et al., 2024), com potencial de aumento para o futuro (COLELLI; WING; CIAN, 2023). Diante disso, evidencia-se que a parcela da população semiárida para a qual o acesso à energia elétrica ainda é restrito ou com baixa renda pode estar limitada ao uso de estratégias passivas, o que reduz o potencial de adequações visando o aumento das condições de conforto térmico.

O uso da estratégia ativa de isolamento térmico com aquecimento artificial (Estratégia (H)) apresentou demandas pouco expressivas para o semiárido brasileiro, inferiores a 1% ao longo de todo o ano. Além disso, ressalta-se que não foi observada a necessidade do uso da estratégia umidificação (Estratégia (I)) para a melhoria do conforto nessa região. Por fim, ressalta-se que o emprego de sombreamento nas edificações é recomendado sempre que as temperaturas locais superarem os 20°C (LAMBERTS et al., 2014). Portanto, o uso de sombreamento é indicado como uma estratégia complementar para todo o semiárido brasileiro.

2.3.3 Disponibilização dos dados

De modo a facilitar o uso dos resultados de mapeamento apresentados neste estudo por parte de profissionais da área construtiva, gestores, tomadores de decisão, pesquisadores e da população em geral, os resultados aqui apresentados foram compilados em uma base de dados única e estão disponíveis para download a partir do seguinte link: <https://data.mendeley.com/datasets/cgyp6cy7kg/2>.

Espera-se que esta base de dados seja utilizada como uma ferramenta de apoio ao planejamento e à implementação de soluções construtivas mais adequadas às condições climáticas da região semiárida brasileira, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida das populações residentes nesta região.

2.4 Conclusão

O uso de dados meteorológicos em formato raster com alta resolução espacial possibilitou o mapeamento de valores do índice de conforto térmico (ICT), dos graus-dia de resfriamento (GDR) e aquecimento (GDA) e do índice de calor (IC) para todo o semiárido brasileiro. A partir desses dados, tornou-se possível ainda recomendar as estratégias construtivas mais adequadas para às diferentes realidades climáticas do território semiárido.

Os valores para os índices climáticos demonstraram que as condições de conforto térmico ocorrem entre 38 e 61% do ano, com os maiores percentuais anuais concentrados numa faixa norte-sul no centro do semiárido. Em contrapartida, no noroeste dessa região podem ser observadas condições de desconforto térmico por calor em até 60% do ano. Os valores de GDR evidenciam que as demandas por resfriamento podem atingir até 476°C anuais no extremo noroeste, enquanto as demandas por aquecimento (valores de GDA) superam 700°C anuais no sul do semiárido, embora ocorram de forma mais localizada espacialmente e concentrada nos meses de inverno. Além disso, os valores observados de IC evidenciam que todos os municípios semiáridos experimentam condições de calor categorizadas como “Atenção” em, no mínimo, 15 % do ano, e que a ocorrência de IC nas categorias “Perigo” e “Extremo Perigo” são mais frequentes no noroeste dessa região devido à combinação de altas temperaturas e umidade relativa elevada.

Em relação às recomendações de estratégias construtivas para o semiárido, constatou-se que a aplicação de estratégias passivas pode ampliar a ocorrência de condições de conforto térmico em até 35% do ano. O emprego das estratégias de ventilação natural diurna e noturna de forma conjunta mostrou-se promissor, com potencial para contribuir com até 30 % de acréscimo de conforto anual. O uso da estratégia de resfriamento evaporativo e o uso de inércia térmica complementam as opções de intervenções passivas recomendadas para o oeste-central do semiárido. Em contrapartida, estratégias ativas, como o uso do ar-condicionado, são requeridas em cerca de 30 % do ano, sobretudo no norte dessa região, o que evidencia a importância de soluções híbridas (estratégias passivas e ativas) que equilibrem eficiência energética e viabilidade socioeconômica local.

O presente estudo se destaca por apresentar o conjunto mais abrangente de mapas de ICT, GDR, GDA e IC já produzidos para o semiárido brasileiro, em escalas mensal, sazonal e anual, tanto em formato espacializado quanto por município, superando a cobertura espacial e temporal limitada de estudos anteriores. Adicionalmente, foram identificadas e mapeadas as zonas críticas de desconforto térmico e associadas a elas as estratégias construtivas mais adequadas para a melhoria das condições de conforto nessa região. Por fim, ressalta-se a criação de uma base de dados de acesso livre aos mapas produzidos neste estudo, o que possibilita a utilização das informações aqui discutidas por parte de pesquisadores e da população em geral, contribuindo para a melhoria do planejamento construtivo da região semiárida brasileira.

REFERÊNCIAS

ABEBE, Solomon; ASSEFA, Tibebu. Development of climatic zoning and energy demand prediction for Ethiopian cities in degree days. **Energy and Buildings**, 260, 111935. 2022.

AGHIMIEN, Emmanuel Imuetinyan; LI, Danny Hin Wa; TSANG, Ernest Kin-Wai. Bioclimatic architecture and its energy-saving potentials: A review and future directions. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 29, n. 2, p. 961-988, 2022.

ANDERSON, Brooke.; PENG, Roger.; FERRERI, Joshua. **Weathermetrics: Functions to Convert Between Weather Metrics**. R package version 1.2.2, 2016. Disponível em: <https://github.com/geanders/weathermetrics/>. Acesso em: 10 nov. 2024

ANDERSON, G. Brooke; BELL, Michelle L.; PENG, Roger D. Methods to calculate the heat index as an exposure metric in environmental health research. **Environmental health perspectives**, v. 121, n. 10, p. 1111-1119, 2013.

ARSAD, Fadly Syah et al. Assessment of indoor thermal comfort temperature and related behavioural adaptations: a systematic review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 29, p. 73137-73149, 2023.

ARUMUGAM, Pappu; RAMALINGAM, Velraj; VELLAICHAMY, Pandiyarajan. Effective PCM, insulation, natural and/or night ventilation techniques to enhance the thermal performance of buildings located in various climates—A review. **Energy and Buildings**, v. 258, p. 111840, 2022.

BAIROS, Adriane da Silva. **Aplicações do diagrama de Givoni na arquitetura bioclimática: estratégias de conforto térmico**. 2021. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

BARBOSA, Elisabeti FT et al. Energy Efficiency and Thermal Comfort Analysis in a Higher Education Building in Brazil. **Sustainability**, v. 16, n. 1, p. 462, 2024.

BENEVIDES, Mariana Navarro; TEIXEIRA, David Bruno de Sousa; CARLO, Joyce

Correna. Climatic zoning for energy efficiency applications in buildings based on multivariate statistics: The case of the Brazilian semiarid region. **Frontiers of Architectural Research**, v. 11, n. 1, p. 161-177, 2022.

BENEVIDES, Mariana Navarro. **Análise de conforto e desempenho térmico de habitações unifamiliares no semiárido mineiro**. 2020. 39 f. Monografia (Especialização em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

BHIKHOO, Nafisa; HASHEMI, Arman; CRUICKSHANK, Heather. Improving thermal comfort of low-income housing in Thailand through passive design strategies. **Sustainability**, v. 9, n. 8, p. 1440, 2017.

BLAZEJCZYK, Krzysztof et al. Comparison of UTCI to selected thermal indices. **International journal of biometeorology**, v. 56, p. 515-535, 2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. Delimitação do semiárido. 2020. Disponível em: < <http://antigo.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido> >. Acesso em: 1 jan. 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Resolução Condel/Sudene nº 150**, de 13 de dezembro de 2021. Aprova a Proposição nº 151/2021, que trata do Relatório técnico que apresenta os resultados da revisão da delimitação do Semiárido 2021. Brasília: Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/hierarquia/resolucoes-condel/resolucao-condel-sudene-no-150-de-13-de-dezembro-de-2021>. Acesso em: 1 jan. 2024.

BUONOCORE, Carolina et al. Natural ventilation in Brazilian homes: depicting perceptions, usage patterns and motivations in a questionnaire survey. **Building Research & Information**, v. 53, n. 1-2, p. 40-55, 2025.

COCO, Aitor et al. Criteria for a recommended standard: occupational exposure to heat and hot environments. **DHHS (NIOSH) Publication**, 2016.

COLELLI, Francesco Pietro; WING, Ian Sue; CIAN, Enrica De. Air-conditioning adoption

and electricity demand highlight climate change mitigation–adaptation tradeoffs. **Scientific reports**, v. 13, n. 1, p. 4413, 2023.

CORREIA, Camila Machado de Azevedo; AMORIM, Cláudia Naves David; SANTAMOURIS, Mattheos. Use of passive cooling techniques and super cool materials to minimize cooling energy and improve thermal comfort in Brazilian schools. **Energy and Buildings**, v. 312, p. 114125, 2024.

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

COSTA, Rafaela Lisboa et al. Cenários de Mudanças Climáticas para a Região Nordeste do Brasil por meio da Técnica de Downscaling Estatístico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 785-801, 2021.

DE DEAR, Richard J.; BRAGER, Gail S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and buildings**, v. 34, n. 6, p. 549-561, 2002

OLIVEIRA, Candi Citadini de; RUPP, Ricardo Forgiarini; GHISI, Enedir. Influence of environmental variables on thermal comfort and air quality perception in office buildings in the humid subtropical climate zone of Brazil. **Energy and Buildings**, v. 243, p. 110982, 2021.

DUARTE, Bruna Leite. **Desafios de implantação do plano municipal de saneamento básico: estudo de caso do município de Jaguarari-BA**. 2024. 75 f. Dissertação (Mestrado profissional em Direito) Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa, Brasília, 2024.

EHSAN, Sana et al. Thermal discomfort levels, building design concepts, and some heat mitigation strategies in low-income communities of a South Asian city. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 5, p. 2535, 2021.

ELSHAFEI, Ghada et al. Towards an adaptation of efficient passive design for thermal comfort buildings. **Sustainability**, v. 13, n. 17, p. 9570, 2021.

ESCANDÓN, Rocío et al. Assessment of vulnerability to overheating at a regional scale through parametric simulation models and cooling degree-days analysis: The case of southern Spanish social housing stock. **Journal of Building Engineering**, v. 73, p. 106709, 2023.

ESPINOZA, Nikolai da Silva et al. Assessment of urban heat islands and thermal discomfort in the Amazonia biome in Brazil: A case study of Manaus city. **Building and Environment**, v. 227, p. 109772, 2023.

FEITOSA, Renato Castiglia; WILKINSON, Sara J. Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit. **Building and Environment**, v. 140, p. 11-22, 2018.

FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.

FLORES-LARSEN, Silvana; FILIPPIN, Celina. Energy efficiency, thermal resilience, and health during extreme heat events in low-income housing in Argentina. **Energy and Buildings**, v. 231, p. 110576, 2021.

FONTENELLE, Marília Ramalho; BASTOS, Leopoldo Eurico Gonçalves; LORENTE, Sylvie. Natural ventilation for office building retrofit in dense urban context under hot and humid climate. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 2, p. 67-87, 2021.

GIVONI, Baruch. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and buildings**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992.

GUIMARÃES, Sullyandro Oliveira et al. Projeções de Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro dos Modelos do CMIP5 e do CORDEX. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 337-365, 2016.

HERSBACH, Hans et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly journal of the royal meteorological society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.

HONG, Tianzhen et al. Urban microclimate and its impact on building performance: A case study of San Francisco. **Urban Climate**, v. 38, p. 100871, 2021.

HOZ-TORRES, María Luisa De La et al. An investigation of indoor thermal environments

and thermal comfort in naturally ventilated educational buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 84, p. 108677, 2024.

JACKLITSCH, B. et al. **Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Heat and Hot Environments**. Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health USA, 2016.

KALSIA, Mohit et al. Evaporative cooling technologies: conceptual review study. 2023.

KHEIRI, Farshad; HABERL, Jeff S.; BALTAZAR, Juan-Carlos. Impact of outdoor humidity conditions on building energy performance and environmental footprint in the degree days-based climate classification. **Energy**, v. 283, p. 128447, 2023.

KOPPEN, Wladimir. Das geographische System de Klimate. **Handbuch der klimatologie**, 1936.

LACHIR, Asia; NOUFID, Abdelhamid. Assessment of building design strategies to enhance energy efficiency and thermal comfort: Case study in Morocco's climate zones. **Journal of Building Physics**, v. 48, n. 2, p. 197-221, 2024.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3 ed. São Paulo. Eletrobrás/Procel, 2014.

LI, Xiao-Xu et al. Night ventilation scheme optimization for an Ultra-low energy consumption building in Shenyang, China. **Energy Reports**, v. 8, p. 8426-8436, 2022.

MAMANI, Tamara et al. Variables that affect thermal comfort and its measuring instruments: A systematic review. **Sustainability**, v. 14, n. 3, p. 1773, 2022.

MANZANO-AGUGLIARO, Francisco et al. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 49, p. 736-755, 2015.

MARCOLINI, Murilo; ALMEIDA, Ricardo MSF; BARREIRA, Eva. Evaluation of the effect of passive cooling techniques on thermal comfort using test cells in the northern region of Brazil. **Applied Sciences**, v. 12, n. 3, p. 1546, 2022.

MARENCO, Jose Alvarez.; TORRES, Roger Rodrigues; ALVES, Lincoln Muniz. Drought in

Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, p. 1189-1200, 2017.

MARTINS, Larissa Arakawa; SOEBARTO, Veronica; WILLIAMSON, Terence. Performance evaluation of personal thermal comfort models for older people based on skin temperature, health perception, behavioural and environmental variables. **Journal of Building Engineering**, v. 51, p. 104357, 2022.

MARTINS, Tathiane Agra de Lemos; BITTENCOURT, Leonardo Salazar; KRAUSE, Cláudia Mariz de Lyra Barroso. Contribuição ao zoneamento bioclimático brasileiro: reflexões sobre o semiárido nordestino. **Ambiente Construído**, v. 12, p. 59-75, 2012.

MASTOURI, Hicham et al. Thermal performance assessment of passive techniques integrated into a residential building in semi-arid climate. **Energy and Buildings**, v. 143, p. 1-16, 2017.

MEDEIROS, Raimundo Mainar de; CAVALCANTI, Enilson Palmeira; DUARTE, Jaqueline Fernandes de Medeiros. Classificação climática de köppen para o estado do Piauí–Brasil. **Revista Equador**, v. 9, n. 3, p. 82-99, 2020.

MEDEIROS, Salomão de S. et al. Estimativa e espacialização das temperaturas do ar mínimas, médias e máximas na Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 247-255, 2005.

MOURA, Magna Soelma Beserra de; SOBRINHO, José Espínola; SILVA, Thieres George Freire da. Aspectos meteorológico do semiárido brasileiro. **Tecnologias de Convivência Com O Semiárido Brasileiro; Embrapa: Brasília, Brazil**, v. 1, p. 85-104, 2019.

MUÑOZ, Pedro et al. The role of specific heat capacity on building energy performance and thermal discomfort. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01423, 2022.

NADARAJAH, Pravin Diliban et al. Bioclimatic classification for building energy efficiency using hierarchical clustering: A case study for Sri Lanka. **Journal of Building Engineering**, v. 83, p. 108388, 2024.

NWS - National Weather Service. **Meteorological Conversions and Calculations: Heat Index Calculator**. 2025. Disponível em:< <https://www.weather.gov/ama/heatindex>>. Acesso

em: 30 maio 2025.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. Disponível em:< <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 1 jun 2023.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2025. Disponível em:< <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 1 jun 2023.

REQUIA, Weeberb J. et al. Thermal Comfort Conditions and Mortality in Brazil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 21, n. 9, p. 1248, 2024.

RODRIGUES, Elmo Jorge. **Balanco hídrico climatológico e classificação climática do estado do Ceará**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2024.

ROTHFUSZ, Lans P.; HEADQUARTERS, NWS Southern Region. The heat index equation (or, more than you ever wanted to know about heat index). **Fort Worth, Texas: National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Meteorology**, v. 9023, p. 640, 1990. Disponível em:< https://wonder.cdc.gov/wonder/help/Climate/ta_htindx.PDF>. Acesso em: 12 jun.2024

SADEQI, Amin; TABARI, Hossein; DNPASHOH, Yagob. Spatio-temporal analysis of heating and cooling degree-days over Iran. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, p. 1-23, 2022.

SALES, Domingo Cassain et al. Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no nordeste brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 435-456, 2015.

SANTANA, Rúbia Vieira et al. Conforto térmico nas condições meteorológica de vitória da conquista, no estado da bahia, brasil Thermal comfort in the weather conditions of vitória da conquista, in the state of bahia, brazil. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p.

58461-58479, 2021.

SANTOS, Janaína Cassiano dos et al. Aridity indices to assess desertification susceptibility: a methodological approach using gridded climate data and cartographic modeling. **Natural Hazards**, p. 1-28, 2022.

SCOCCIMARRO, Enrico et al. Country-level energy demand for cooling has increased over the past two decades. **Communications Earth & Environment**, v. 4, n. 1, p. 208, 2023.

SILVA, Mario A da. et al. Towards Climate, Bioclimatism, and Building Performance—A Characterization of the Brazilian Territory from 2008 to 2022. **Buildings**, v. 14, n. 8, p. 2568, 2024.

SILVA, Thieres George Freire da et al. Estimativa e espacialização da umidade relativa do ar no Estado do Piauí. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, 13., 2004, Fortaleza. *Meteorologia e o desenvolvimento sustentável: anais*. Fortaleza: SBMET, 2004

SONG, Jiyun et al. Natural ventilation in London: Towards energy-efficient and healthy buildings. **Building and Environment**, v. 195, p. 107722, 2021.

STENSJÖ, Iraci Pereira; FERREIRA, Camila Carvalho; LOURA, Rejane Magiag. Classificação e agrupamento das cidades brasileiras em graus-dia de aquecimento e resfriamento: 1960 a 2013. **Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 9, n. Supl. 1, p. 286-300, 2017.

STULL, Roland. Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. **Journal of applied meteorology and climatology**, v. 50, n. 11, p. 2267-2269, 2011.

TEIXEIRA, Elenaldo Celso. O papel das políticas públicas no desenvolvimento local e na transformação da realidade. **Salvador: AATR**, v. 200, p. 09, 2002.

TOCCHIO, Gabriel Guilhen et al. Forecasting demand for air conditioning in the Brazilian residential sector. **Journal of Building Engineering**, v. 96, p. 110572, 2024.

WALSH, Angélica; CÓSTOLA, Daniel; LABAKI, Lucila Chebel. Review of methods for climatic zoning for building energy efficiency programs. **Building and Environment**, v. 112, p. 337-350, 2017.

XAVIER, Alexandre C. et al. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022.

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

YANG, Hongxing et al. Research development of indirect evaporative cooling technology: An updated review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 145, p. 111082, 2021.

YANG, Yifan; CUI, Gary; LAN, Christopher Q. Developments in evaporative cooling and enhanced evaporative cooling-A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, p. 109230, 2019.

ZHAO, Qiantao; LIAN, Zhiwei; LAI, Dayi. Thermal comfort models and their developments: A review. **Energy and Built Environment**, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2021.

ZHENG, Xiaohong et al. Natural ventilation. In: **Handbook of Energy Systems in Green Buildings**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2018. p. 1227-1270.

ZHONG, Huai-Yu et al. Single-sided natural ventilation in buildings: a critical literature review. **Building and Environment**, v. 212, p. 108797, 2022.

3 CAPÍTULO 3 - ÍNDICE DE VULNERABILIDADE AO DESCONFORTO TÉRMICO PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

O presente estudo propõe um índice de vulnerabilidade ao desconforto térmico (IVDT) para a região semiárida do Brasil. Para isso, foram utilizados dados relativos ao percentual anual de desconforto térmico, graus-dia de resfriamento e aquecimento, bem como das condições socioeconômicas da população semiárida. Essas variáveis foram normalizadas e transformadas nos indicadores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa, e aplicadas na estrutura de risco-impacto do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Além da análise da vulnerabilidade atual, avaliaram-se cenários de melhoria e piora das condições socioeconômicas. Os resultados evidenciam que a maioria dos municípios semiáridos enfrenta algum grau de vulnerabilidade ao desconforto térmico, embora predomine a classificação de baixa vulnerabilidade. Os municípios não vulneráveis ou com baixa vulnerabilidade concentram-se na porção centro-sul, enquanto aqueles com vulnerabilidade moderada a alta estão situados sobretudo no noroeste e no extremo sul. Nos cenários projetados, melhorias socioeconômicas têm o potencial de reduzir ou eliminar a vulnerabilidade de diversos municípios, enquanto uma piora socioeconômica resultaria no aumento da vulnerabilidade em um número significativo de municípios. O IVDT mostrou-se eficaz ao combinar variáveis climáticas e socioeconômicas em um único índice, tornando-se uma ferramenta estratégica capaz de orientar o desenvolvimento de políticas públicas que priorizem os municípios mais vulneráveis, reduzindo o grau de desconforto térmico da população.

Palavras-chave: semiárido, índice de vulnerabilidade, conforto térmico, graus-dia.

3.1 Introdução

O estudo da vulnerabilidade de sistemas naturais assume papel central na avaliação dos impactos que estressores climáticos exercem sobre a qualidade de vida das populações (WATTS et al., 2018; MORA et al., 2017). A elevação das temperaturas médias globais, assim como o aumento na frequência de ondas de calor e de frio intenso (IPCC, 2021), têm ampliado a mortalidade por estresse térmico e comprometido o conforto térmico em ambientes urbanos (GASPARRINI et al., 2015; VICEDO-CABRERA et al., 2018; EBI et al., 2018). Diante disso, compreender o grau de vulnerabilidade das populações aos impactos climáticos é essencial para antecipar riscos e orientar estratégias de adaptação capazes de mitigar seus efeitos adversos (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003).

De semelhante modo ao ambiente natural, o ambiente construído também mostra-se sensível às variações térmicas (SHARIFI; BOLAND, 2018; HATVANI-KOVACS et al., 2018). O uso de materiais de construção pouco eficientes, estratégias construtivas inadequadas e a falta de recursos para a aquisição de tecnologias de resfriamento ou aquecimento podem agravar o desconforto térmico nas edificações. Além do fator construtivo, o contexto socioeconômico molda a capacidade de adoção de medidas de mitigação (RIZWAN; DENNIS; LIU, 2008), de modo que populações com menor disponibilidade de recursos ficam mais vulneráveis aos extremos de temperatura. Como apontam Sun et al. (2022), desigualdades socioeconômicas intensificam o impacto de estressores térmicos, evidenciando a necessidade de políticas que orientem adequações construtivas para reduzir a vulnerabilidade (HUMMEL; CUTTER; EMRICH, 2016).

Diante dessa problemática, a análise da vulnerabilidade de sistemas ambientais a estressores climáticos tem sido amplamente investigada pela literatura científica (D'AMBROSIO; DI MARTINO; MIRAGLIA, 2023; MACINTYRE et al., 2018). Nesse contexto, o uso da estrutura risco-impacto consolidada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas e baseada em Turner et al. (2003) tem auxiliado pesquisadores e instituições na formulação de metodologias para identificar e quantificar fatores de risco (KIM; JEONG; CHUNG, 2021). Nessa abordagem, a vulnerabilidade resulta da interação entre a exposição aos estressores climáticos, a sensibilidade do sistema às perturbações e a capacidade adaptativa das populações. Tal metodologia se destaca por possibilitar a integração de variáveis ambientais, sociais e econômicas em diferentes escalas (ADNAN et al., 2022), favorecendo a criação de índices que identificam as populações e territórios mais suscetíveis aos impactos

climáticos.

Com base na estrutura risco-impacto, índices de vulnerabilidade têm sido desenvolvidos com diferentes objetivos, como a identificação de áreas prioritárias para ações de adaptação aos impactos de tufões em regiões costeiras (NGUYEN; LIOU; TERRY, 2019; WANG et al., 2025), a avaliação do impacto de ondas de calor da Europa (FARKAS et al., 2024; WOLF; MCGREGOR, 2013) e a determinação dos níveis de vulnerabilidade ao calor na América do Sul (INOSTROZA; PALME; DE LA BARRERA, 2016). No Brasil, estudos como os de Menezes et al. (2018), para a Amazônia Legal, buscaram identificar os municípios com maior fragilidade frente às mudanças climáticas, enquanto Quintão et al. (2017) aplicaram a estrutura risco-impacto para o estado de Minas Gerais com o intuito de avaliar a vulnerabilidade social, ambiental e na saúde frente aos riscos climáticos emergentes.

Apesar de diversos índices terem sido aplicados para avaliar a exposição de comunidades aos efeitos adversos do clima (NIU et al., 2021), a mensuração da vulnerabilidade ao desconforto térmico ainda é uma lacuna a ser preenchida. Essa carência é especialmente relevante no contexto do semiárido brasileiro, região que apresenta temperaturas elevadas, altos níveis de aridez e desafios socioeconômicos históricos que potencializam o efeito dos estressores térmicos sobre a população (BRITO JÚNIOR; MAGALHÃES; ALBUQUERQUE, 2023; MENEZES et al., 2021). A análise integrada dos aspectos climáticos e sociais pode oferecer subsídios valiosos para a formulação de políticas públicas voltadas à redução das desigualdades frente às condições de desconforto térmico. Diante do exposto, este estudo tem como objetivo propor um índice vulnerabilidade ao desconforto térmico para o semiárido brasileiro.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Área de estudo

Este estudo tem como área de abrangência a região semiárida brasileira, que se estende por onze estados das regiões Nordeste e Sudeste do país: Alagoas (AL), Bahia (BA), Ceará (CE), Espírito Santo (ES), Maranhão (MA), Minas Gerais (MG), Paraíba (PB), Piauí (PI), Pernambuco (PE), Rio Grande do Norte (RN) e Sergipe (SE) (Figura 3.1a). Essa área abrange aproximadamente 1,33 milhões de km², o que corresponde a cerca de 15% do território nacional (BRASIL, 2021), e compreende um total de 1.477 municípios (Figura 3.1b).

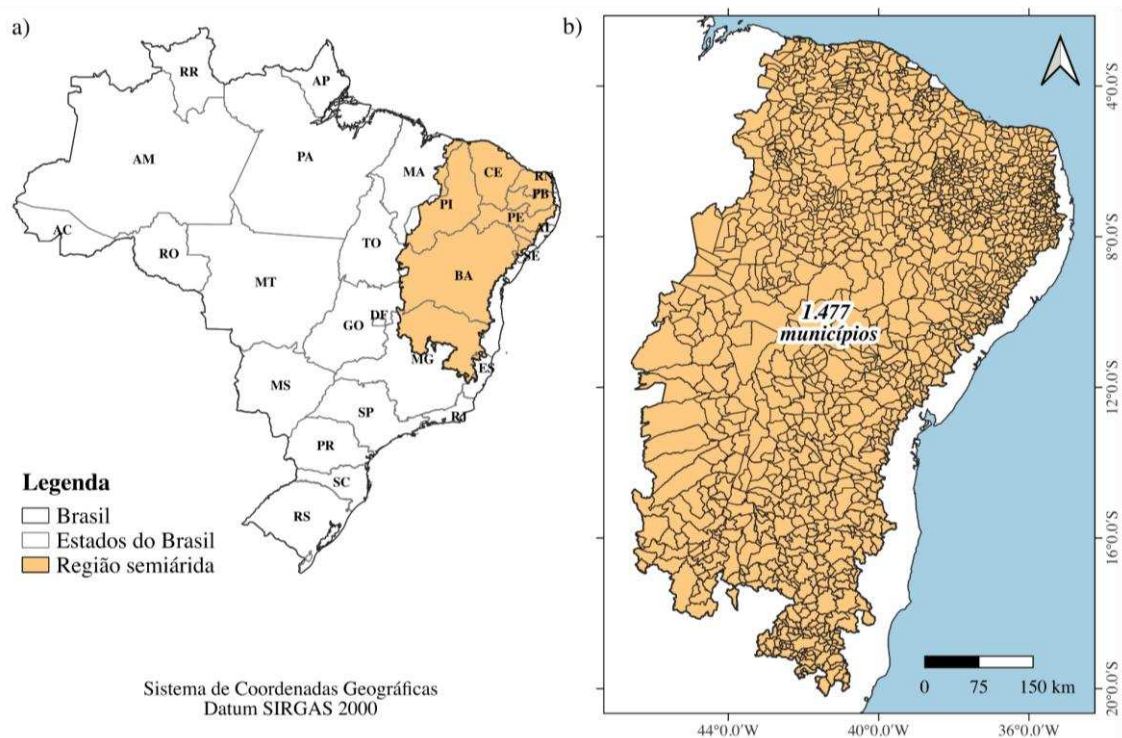


Figura 3. 1 - (a) Delimitação espacial e (b) municípios da região semiárida brasileira. Fonte: A autora.

3.2.2 Índice de vulnerabilidade

A identificação dos municípios mais vulneráveis ao desconforto térmico no semiárido brasileiro foi realizada por meio da proposição do Índice de Vulnerabilidade ao Desconforto Térmico (IVDT), baseado em variáveis climáticas e socioeconômicas.

O IVDT foi obtido a partir da adaptação da estrutura de risco-impacto apresentada por Turner et al. (2002), inserida no quarto relatório de avaliação (AR4) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) e no relatório especial sobre gerenciamento de riscos de eventos extremos e desastres para promover a adaptação às mudanças climáticas (IPCC, 2012).

Nessa estrutura, o nível de vulnerabilidade se dá em função da exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação que o sistema (região semiárida) possui. Como descrito por Zou e Yoshino (2017), quando um sistema é sujeito a perturbações, o primeiro passo consiste na quantificação do nível de exposição ao estresse, o que pode ser feito utilizando-se de uma combinação de variáveis ambientais para determinar como o sistema pode ser influenciado por distúrbios externos. O segundo aspecto a ser considerado, é a sensibilidade do sistema a essas perturbações, e se refere às variáveis que podem torná-lo mais vulnerável a esses distúrbios

externos. Por fim, a capacidade adaptativa de um sistema caracteriza sua habilidade de retornar a um estado saudável após o estresse, e de manter certas estruturas e funções ao experimentar um distúrbio externo, sendo determinado não apenas pela resiliência interna, mas também por qualquer melhoria antropogênica que possa ser aplicada a esse sistema.

Dessa forma, como apresentam Turner et al. (2002), a modelagem da vulnerabilidade se dá, conceitualmente, em função dos indicadores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa (Equação (3.1)). Para o presente estudo, o IVDT foi calculado a partir da Equação (3.2). Neste modelo, os indicadores de exposição e sensibilidade possuem uma contribuição positiva no valor do índice, enquanto o indicador de capacidade adaptativa penaliza (sinal negativo) a magnitude final do índice. Essa escolha metodológica foi feita considerando que as causas da vulnerabilidade (indicadores de exposição e sensibilidade) possuem um peso maior que a capacidade adaptativa. Diante disso, quanto maior o valor do IVDT para um determinado município, mais vulnerável ao desconforto térmico esse município está.

$$\text{Vulnerabilidade} = f(\text{Exposição, Sensibilidade, Capacidade Adaptativa}) \quad (3.1)$$

$$\text{IVDT} = \text{Exposição} + \text{Sensibilidade} - \text{Capacidade Adaptativa} \quad (3.2)$$

3.2.3 Normalização dos dados

Devido à diferença na escala dos valores dos diferentes indicadores a serem utilizados, os mesmos tiveram suas magnitudes normalizadas a fim de minimizar a influência desproporcional de variáveis com maiores amplitudes numéricas sobre o resultado final do IVDT.

A normalização aplicada seguiu o método Min-Max (CAO; STOJKOVIC; OBRADOVIC, 2016; MAZZIOTTA; PARETO, 2021), que reescala os dados para o intervalo [0, 1], ou seja, entre zero e um. Este método, aplicado a partir da Equação (3.3), mantém a proporcionalidade entre os valores originais, garantindo que todos os indicadores contribuam da mesma forma para a análise. Essa abordagem é utilizada em casos onde os dados apresentam unidades distintas ou ordens de grandeza variadas, assegurando que nenhuma variável influencie mais a composição do índice em virtude de sua escala (WEHBE; BAROUD, 2024). A normalização realizada facilita a interpretação, a comparação e a operação entre os

indicadores, contribuindo para maior robustez e coerência nos resultados obtidos (CHOI, 2019).

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (3.3)$$

em que x é o valor original da variável, $\min(x)$ é o menor valor da variável, $\max(x)$ é o maior valor da variável e x' é o valor normalizado entre 0 e 1.

Além da normalização dos valores dos indicadores, o resultado final do IVDT também foi normalizado para facilitar a interpretação numérica dos resultados obtidos entre 0 e 1. Dessa forma, os valores de IVDT foram divididos em quatro categorias, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1- Categorias para os valores de IVDT obtidos e respectiva interpretação.

Valor do IVDT	Interpretação do IVDT
$0 \leq \text{IVDT} \leq 0,25$	Não vulnerável
$0,25 < \text{IVDT} \leq 0,50$	Pouco vulnerável / Vulnerabilidade baixa
$0,50 < \text{IVDT} \leq 0,75$	Moderadamente vulnerável / Vulnerabilidade moderada
$0,75 < \text{IVDT} \leq 1$	Muito vulnerável / Vulnerabilidade alta

Fonte: A autora.

3.2.4 Indicador de exposição

De acordo com Zou e Yoshino (2017), o indicador de exposição busca expressar o nível de contato ou de sujeição (exposição) de um sistema a um estressor. No IVDT, o indicador de exposição será pelo tempo ao qual o município está submetido ao desconforto térmico. Para isso, serão utilizados os valores mapeados de percentual anual de desconforto, apresentados no Capítulo 2 desta tese. A obtenção destes percentuais se deu a partir da sobreposição dos dados de temperatura do ar e umidade relativa à carta psicrométrica de Givoni (1992).

Os percentuais de tempo em desconforto foram submetidos à normalização, obtendo-se valores para o indicador de exposição entre 0 e 1, os quais são apresentados na Figura 3.2. Este indicador demonstra a frequência e a intensidade dos eventos em que as condições meteorológicas ultrapassam os limites do conforto térmico, e buscam, na prática, quantificar quanto um determinado município está submetido ao estresse térmico.

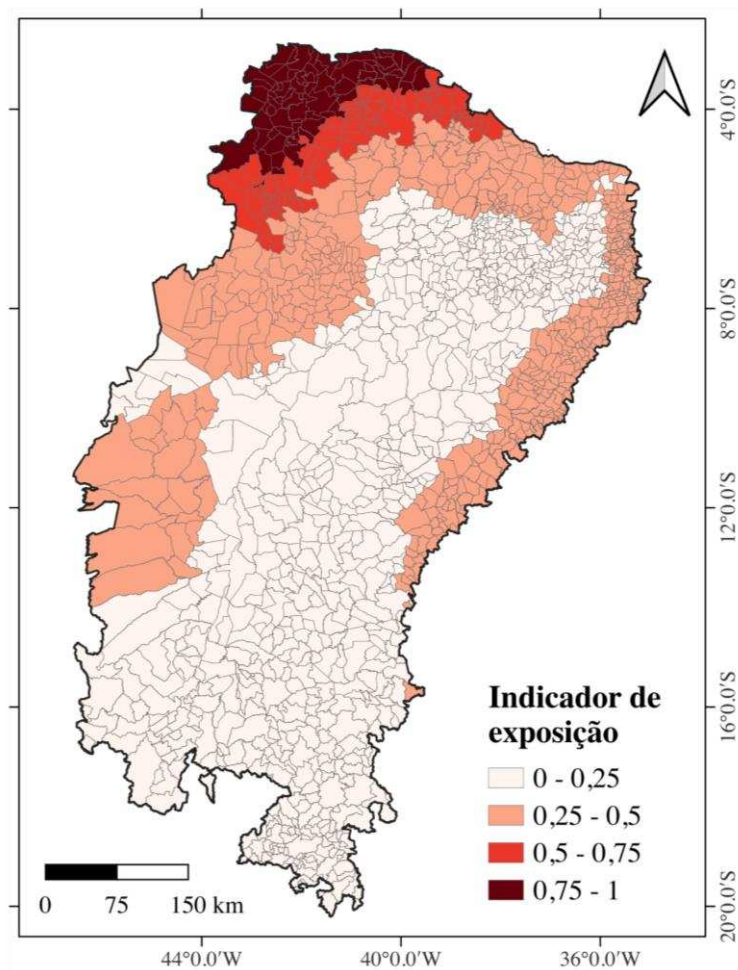


Figura 3. 2 - Valores do indicador de exposição obtidos a partir da normalização dos percentuais anuais de desconforto térmico para o semiárido brasileiro. Fonte: A autora.

3.2.5 Indicador de sensibilidade

O indicador de sensibilidade refere-se à intensidade com que um sistema é afetado, adversa ou favoravelmente, por exposições climáticas (IPCC, 2007). No âmbito do IVDT, a sensibilidade será representada pela magnitude do esforço fisiológico necessário para a manutenção do conforto térmico da população local. Para isso, serão utilizados os valores anuais de graus-dia de resfriamento (GDR) e aquecimento (GDA) apresentados no Capítulo 2 desta tese, os quais expressam a quantidade de energia necessária para compensar o desconforto causado por temperaturas que ultrapassam os limites (inferiores e superiores) do conforto térmico.

Os GDR e GDA foram somados a fim de representar a demanda total (graus-dia totais) por ajustes na temperatura, uma vez que a maior parte dos municípios do semiárido apresentam

tanto demanda por resfriamento quanto aquecimento. Para a utilização como indicador de sensibilidade, os graus-dia totais foram submetidos à normalização, gerando os valores apresentados na Figura 3.3. Esse indicador visa refletir o quão sensível a população de um determinado município é frente às demandas por ajustes na temperatura às quais estão submetidas.

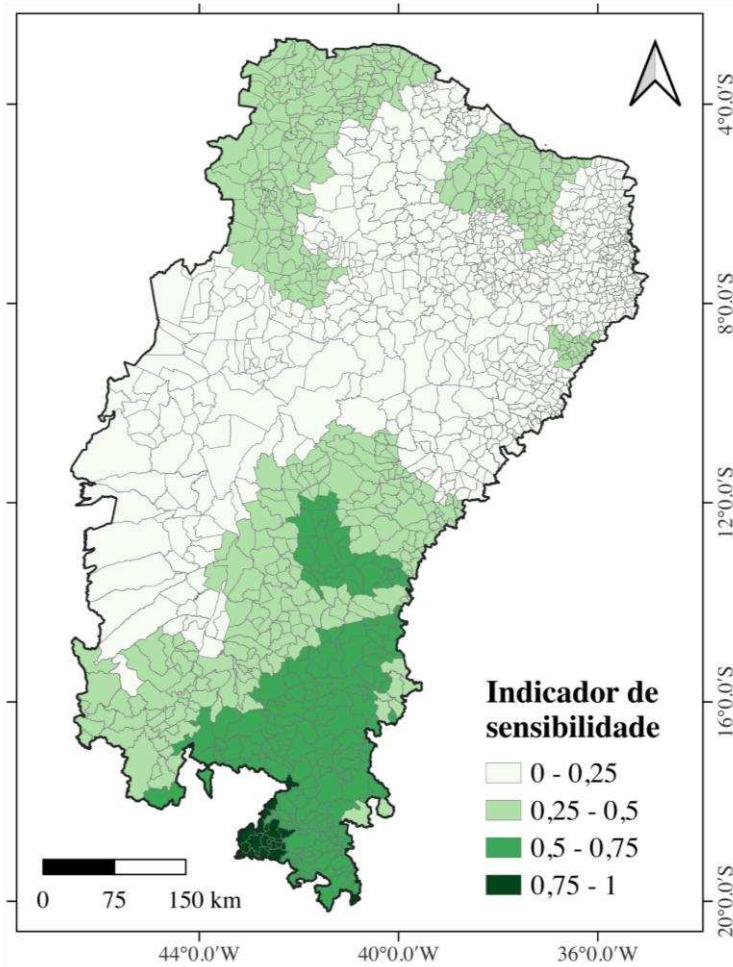


Figura 3.3 - Valores do indicador de sensibilidade obtidos a partir da normalização dos graus-dias totais para o semiárido brasileiro. Fonte: A autora.

3.2.6 Indicador de capacidade adaptativa

A partir da definição apresentada pelo IPCC (2012), o indicador de capacidade adaptativa expressa a aptidão de um sistema em se ajustar aos impactos, moderar danos, explorar oportunidades ou lidar com as consequências diante de um fenômeno estressor. Portanto, para o IVDT, este indicador busca refletir a capacidade que a população de um

determinado município possui de se adaptar à condições de desconforto térmico.

Os valores desse indicador serão baseados no Índice de Vulnerabilidade Social (SoVI[®] - *Social Vulnerability Index*), desenvolvido por Cutter, Boruff e Shirley (2003) para integrar múltiplos fatores socioeconômicos que afetam a capacidade de comunidades responderem e se recuperarem de desastres. Esse índice foi aplicado ao território brasileiro por Hummel, Cutter e Emrich (2016), para o qual foram consideradas 42 variáveis socioeconômicas para os municípios, tais como pobreza, exclusão econômica, baixo acesso à infraestrutura urbana, baixa escolaridade, analfabetismo, urbanização precária e favelização, dentre outros (Tabela 3.2). A Figura 3.4 apresenta os valores do índice SoVI[®] obtidos para o semiárido brasileiro.

Tabela 3.2 – Variáveis socioeconômicas consideradas para a obtenção do índice SoVI[®].

Conceito	Nº	Descrição
Status socioeconômico	1	Percentual da população vivendo em domicílios com renda de até R\$70,00 per capita por mês (pobreza extrema)
	2	Percentual de famílias vivendo em domicílios com mais de uma família
	3	Percentual de domicílios sem telefone (celular ou fixo)
Gênero	4	Percentual de mulheres
	5	Percentual de mulheres empregadas na força de trabalho
	6	Razão entre a renda média mensal feminina e masculina
Raça e etnia	7	Percentual da população branca
	8	Percentual da população negra
	9	Percentual da população asiática
	10	Percentual da população parda
	11	Percentual da população indígena
Idade	12	Mediana de idade
Perda de emprego (dependência de um único setor)	13	Percentual da população empregada na agricultura, pesca, produção florestal, pecuária e aquicultura
	14	Percentual da população empregada na indústria extrativa
	15	Percentual da população empregada no setor de transporte
	16	Percentual da população empregada em atividades de alojamento
	17	Percentual da população empregada em atividades de serviços alimentares
	18	Percentual da população empregada no comércio
	19	Percentual da população empregada na administração pública, defesa e seguridade social
	20	Percentual da população urbana
Urbano/Rural	21	Densidade populacional
Inquilinos	22	Percentual da população vivendo em domicílios alugados
Ocupação	23	Percentual da força de trabalho com registro formal de emprego
	24	Percentual da força de trabalho sem registro formal de emprego
	25	Percentual de trabalhadores de subsistência na força de trabalho
Estrutura familiar	26	Percentual de domicílios chefiados por mulheres sem responsabilidade compartilhada
	27	Número médio de pessoas por domicílio
Educação	28	Percentual da população analfabeta com 15 anos ou mais
	29	Percentual da população que concluiu o ensino fundamental ou com ensino médio incompleto
	30	Percentual da população com graduação universitária
Variação populacional	31	Variação populacional 2000–2010

Serviços médicos e acesso	32	Percentual da força de trabalho atuando em serviços de saúde humana e assistência social
Dependência social	33	Cobertura estimada da população por equipes básicas de saúde (2011)
	34	Número de benefícios concedidos pela seguridade social por ano per capita
	35	Percentual da população com menos de 14 anos e com mais de 60 anos
Populações com necessidades especiais	36	Percentual da população com pelo menos um tipo de deficiência
	37	Percentual da população com grau extremamente elevado de deficiência (deficiência visual, auditiva e motora)
Qualidade do ambiente construído	38	Percentual de domicílios sem infraestrutura de água ou poço
	39	Percentual de domicílios sem infraestrutura de esgoto
	40	Percentual de domicílios sem serviços de coleta de lixo
	41	Percentual de domicílios sem fornecimento de energia elétrica
	42	Percentual da população vivendo em domicílios com paredes externas de baixa qualidade

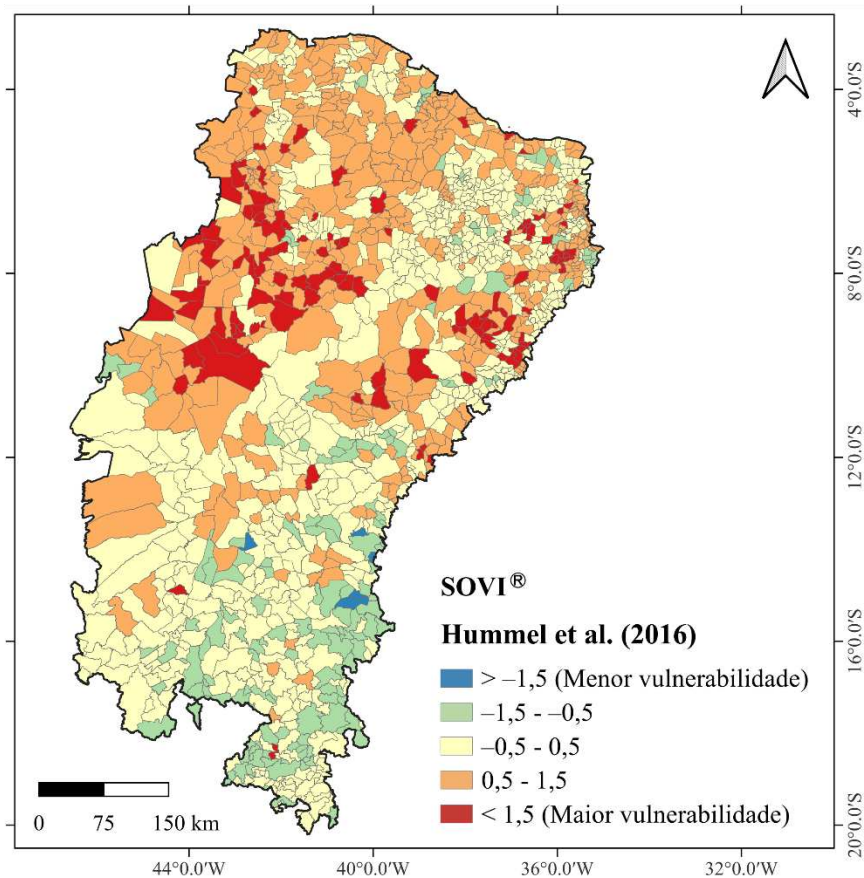


Figura 3.4 - Valores do índice SoVI® obtidos para o semiárido brasileiro por Hummel et al. (2016). Fonte: A autora, baseado em Hummel et al. (2016).

Como os valores mapeados para o SoVI® foram apresentados em forma de intervalos numéricos padronizados (de -1,5 a 1,5), foram atribuídos valores inteiros de um a cinco a esses

intervalos com o objetivo de facilitar tanto a normalização quanto a interpretação dos resultados. Conforme apresentado na Tabela 3.3, aos municípios com menor vulnerabilidade social ($\text{SoVI}^{\text{®}} < -1,5$) atribuiu-se o maior valor (numeral cinco) e para aqueles com maior vulnerabilidade ($\text{SoVI}^{\text{®}} > 1,5$) atribuiu-se o menor valor (numeral um). Essa inversão segue a lógica de que o indicador de capacidade adaptativa atua como fator de mitigação no cálculo do IVDT, uma vez que quanto maior a capacidade adaptativa (isto é, menor a vulnerabilidade social), menor será o valor final do IVDT. Isso reflete a maior aptidão desses municípios para enfrentar e se ajustar às condições adversas de desconforto térmico, e, portanto, sua menor vulnerabilidade frente a tais estressores climáticos.

Tabela 3. 3- Valores atribuídos ao índice $\text{SoVI}^{\text{®}}$ para o presente estudo, considerando a condição socioeconômica atual e os cenários de melhoria e piora dessa condição.

SoVI[®]	Indicador de capacidade adaptativa			
	Valor atribuído	Condição atual	Cenário de melhoria	Cenário de piora
$\text{SoVI}^{\text{®}} \leq -1,5$	5	1,0	1,0	0,75
$-1,5 < \text{SoVI}^{\text{®}} \leq -0,50$	4	0,75	1,0	0,50
$-0,50 < \text{SoVI}^{\text{®}} \leq 0,50$	3	0,50	0,75	0,25
$0,50 < \text{SoVI}^{\text{®}} \leq 1,5$	2	0,25	0,50	0
$\text{SoVI}^{\text{®}} > 1,5$	1	0	0,25	0

Fonte: A autora.

No intuito de analisar como mudanças socioeconômicas podem afetar a vulnerabilidade ao desconforto térmico no semiárido brasileiro, dois cenários foram propostos a fim de representar condições hipotéticas de melhoria e de piora nas condições socioeconômicas locais, em relação à condição atual (Figura 3.5). Tal análise é importante pois os índices representam um recorte estático no tempo e não capturam adequadamente as tendências dinâmicas de adaptação ou de agravamento futuro das vulnerabilidades. A construção de cenários prospectivos, portanto, permite uma avaliação mais completa da resiliência dos municípios diante de possíveis transformações sociais, somado a abordagem comumente utilizada a partir de dados históricos.

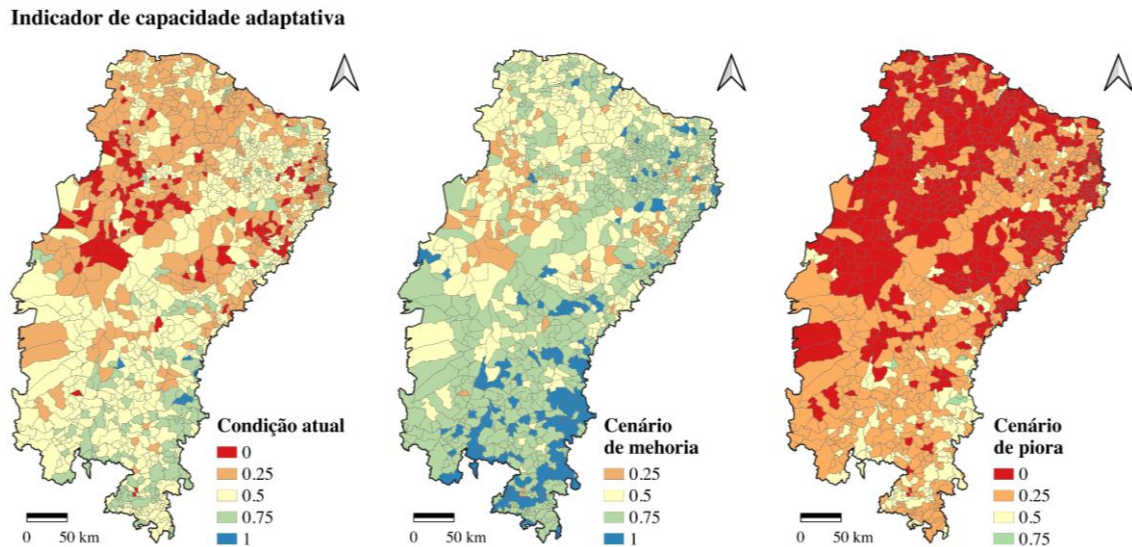


Figura 3.5 - Indicador de capacidade adaptativa considerando a condição socioeconômica atual e os cenários de melhoria e piora, obtidos a partir da normalização do índice SoVI[®] para o semiárido brasileiro. Fonte: A autora.

Por fim, ressalta-se que os valores do SoVI[®] apresentados por Hummel, Cutter e Emrich (2016) para o Brasil foram calculados com base nos dados do Censo Demográfico de 2010, e não incorporam as informações mais recentes disponibilizadas pelo Censo de 2022. Essa defasagem se configura como uma limitação metodológica, uma vez que parte das variáveis utilizadas na composição do índice já não representa com precisão a atual realidade socioeconômica do país. Ainda assim, esses valores permanecem como a única base consolidada e disponível do SoVI[®] para o país, sendo, dessa forma, uma importante referência para estudos de vulnerabilidade social até que uma atualização seja publicada com os dados mais recentes.

3.2.7. Esquema metodológico

A metodologia adotada para a proposição do Índice de Vulnerabilidade ao Desconforto Térmico (IVDT) para o semiárido brasileiro baseou-se na integração entre dados climáticos e socioeconômicos, organizados segundo a estrutura de risco-impacto proposta por Turner et al. (2002). Foram utilizados dados dos percentuais anuais de desconforto térmico, graus-dia de resfriamento (GDR) e aquecimento (GDA), permitindo caracterizar a exposição e a sensibilidade dos municípios às condições de estresse térmico. A capacidade adaptativa desses municípios foi representada pelo Índice de Vulnerabilidade Social (SoVI[®]). A combinação dos

valores normalizados desses três indicadores resultou na obtenção do IVDT considerando a atual condição socioeconômica do semiárido, bem como os cenários de melhoria e piora dessa condição. Esta metodologia está sintetizada no esquema apresentado na Figura 3.6.

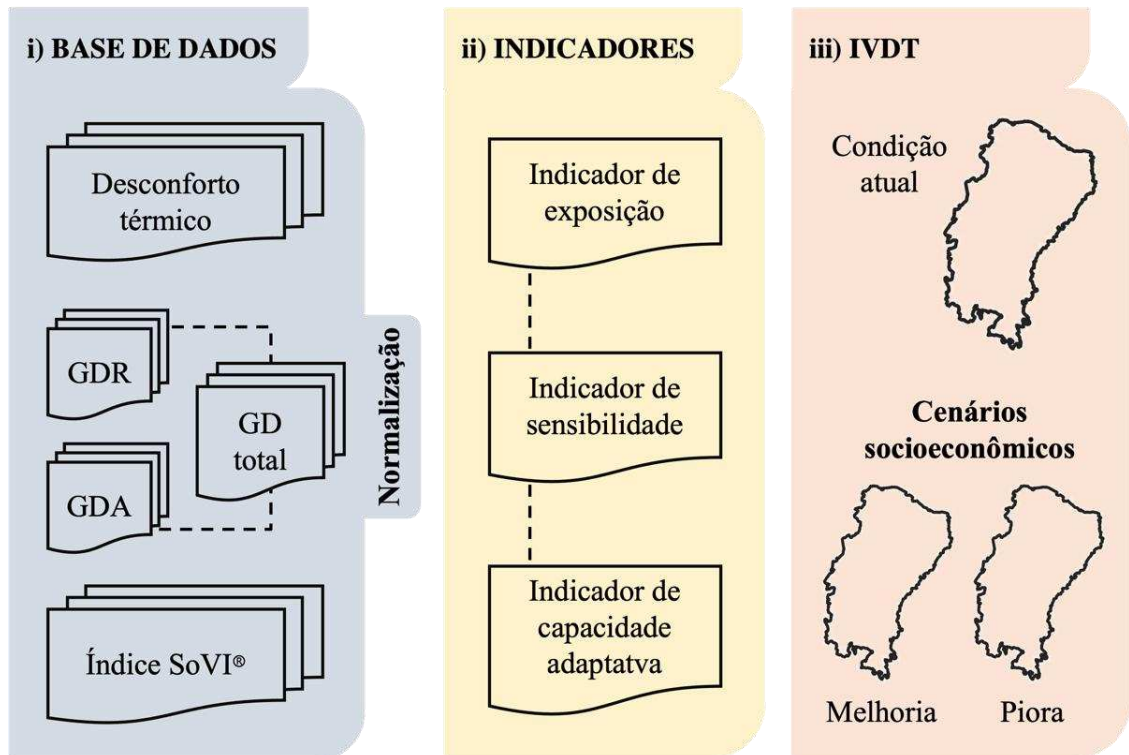


Figura 3. 6 - Esquema metodológico adotado nesta pesquisa. Fonte: A autora.

3.3 Resultados e discussão

O uso dos indicadores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa empregados na estrutura de risco-impacto adotada, possibilitou a obtenção do IVDT, um índice que expressa a vulnerabilidade do semiárido brasileiro ao desconforto térmico. De acordo com a Tabela 3.4, apenas 16,1% dos municípios semiáridos não apresentam nenhum grau de vulnerabilidade ao desconforto, o que evidencia que a grande maioria dos municípios dessa região (83,9%) está vulnerável aos estressores climáticos que acarretam o desconforto térmico. Apesar disso, constatou-se que a maior parte dos municípios semiáridos, cerca de 61,7%, apresentam grau de vulnerabilidade ao desconforto considerado baixo.

Tabela 3. 4 - Número de municípios semiáridos observados por categoria do IVDT.

IVDT	Condição atual		Cenário de melhoria		Cenário de piora	
	Qtde.	%	Qtde.	%	Qtde.	%
Não vulnerável	238	16,1	398	26,9	167	11,3
Pouco vulnerável	912	61,7	810	54,8	904	61,2
Moderadamente vulnerável	281	19,0	233	15,8	325	22,0
Muito vulnerável	46	3,1	36	2,4	81	5,5

Fonte: A autora.

A distribuição espacial do IVDT, apresentada na Figura 3.7, evidencia que a maior parte dos municípios classificados como não vulneráveis ou com vulnerabilidade baixa está concentrada na porção centro-sul do semiárido. Dos 1.477 municípios analisados, 281 foram classificados com vulnerabilidade moderada e 46 com vulnerabilidade alta. Essas duas categorias do IVDT estão predominantemente localizadas no noroeste e no extremo sul da região semiárida, indicando os municípios cujas populações estão mais expostas aos efeitos adversos do desconforto térmico, tanto por calor quanto por frio.

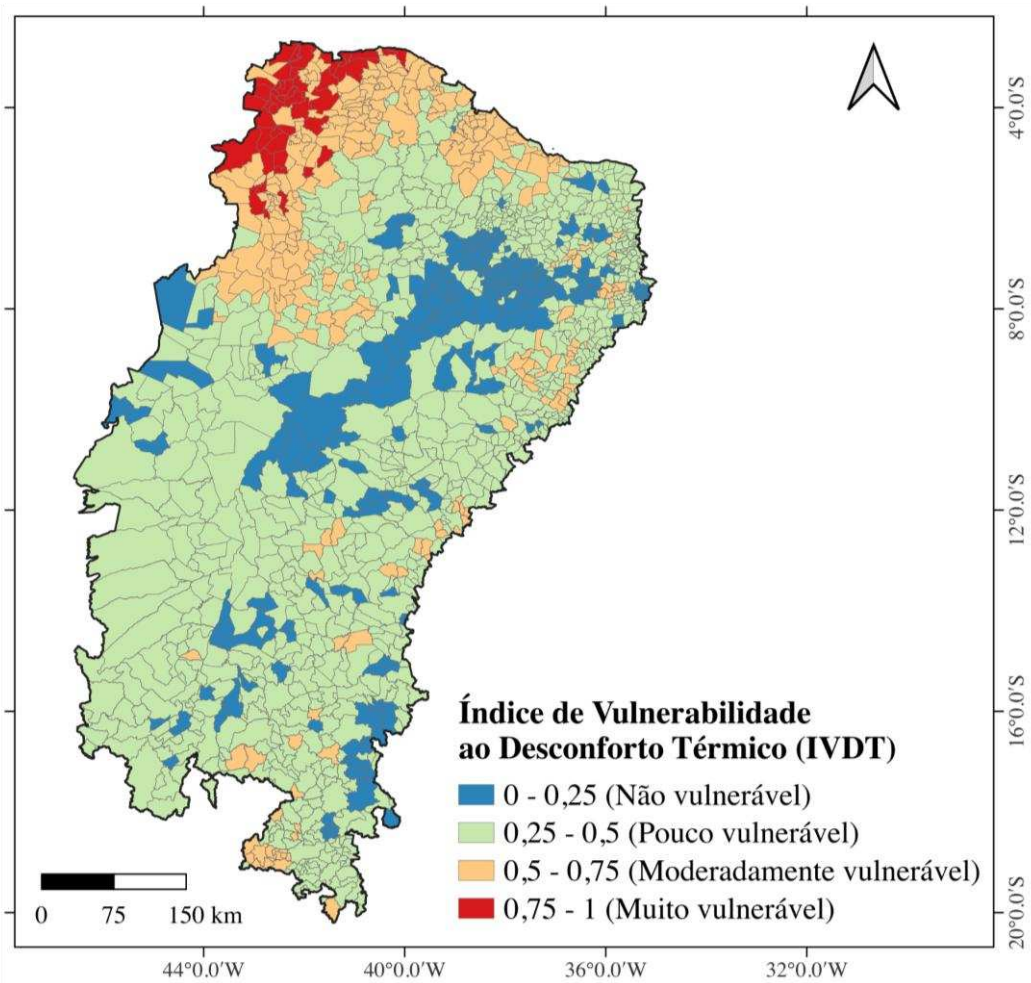


Figura 3.7 - Valores de IVDT para os municípios da região semiárida brasileira. Fonte: A autora.

Os municípios no noroeste e no extremo sul do semiárido apresentam altos níveis de exposição e sensibilidade ao desconforto, como apresentado na Figura 3.8. A soma dos indicadores de exposição e sensibilidade revelam o grau com que os municípios estão suscetíveis ao desconforto térmico. Como explicam Kottow (2003) e Schwartz, Bellinger e Glass (2011), a diferença entre susceptibilidade e vulnerabilidade se dá pela ênfase que cada conceito atribui ao risco. Enquanto a susceptibilidade refere-se ao grau intrínseco de afetabilidade de uma população diante de um estressor (exposição + sensibilidade), a vulnerabilidade incorpora, além dessa predisposição, fatores contextuais que modulam a capacidade de resposta e recuperação (capacidade adaptativa). Em outras palavras, um município pode ser altamente suscetível ao desconforto térmico por suas características climáticas, mas apresentar baixa vulnerabilidade caso disponha de infraestrutura, recursos e estratégias adaptativas capazes de mitigar o impacto desses estressores.

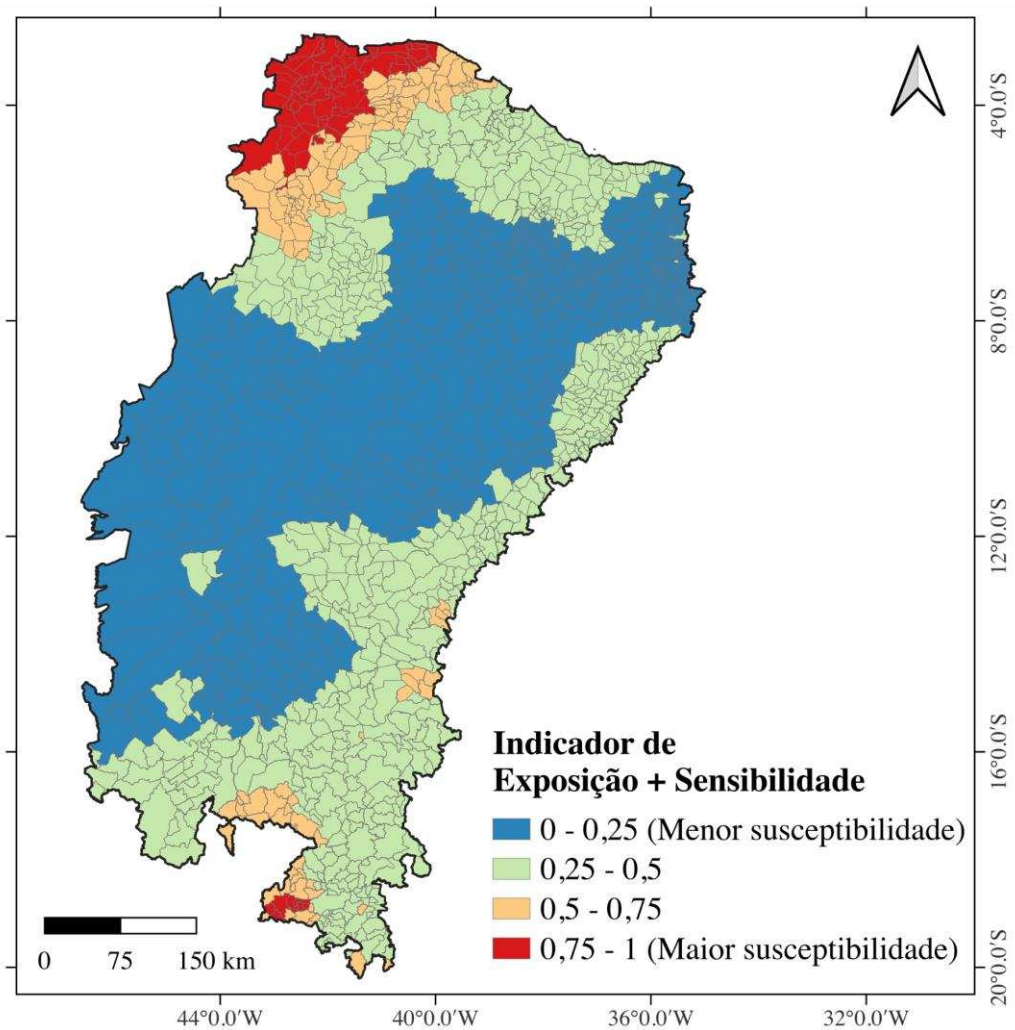


Figura 3. 8 - Valores normalizados da soma dos indicadores de exposição e sensibilidade utilizados na obtenção do IVDT para os municípios da região semiárida brasileira. Fonte: A autora.

A diferença entre os conceitos de susceptibilidade e vulnerabilidade possui relevância prática pois alguns municípios, dentre os quais podem ser citados Forquilha-CE (Latitude: 3° 47'S, Longitude: 40° 15'W, Altitude: 100 m, População: 24.173 hab.) e Carmésia-MG (Latitude: 19° 05'S, Longitude: 43° 08'O, Altitude: 809 m, População: 2.605 hab.), apresentam elevada susceptibilidade ao desconforto térmico (decorrente de alta exposição e sensibilidade) e, ainda assim, registram baixa vulnerabilidade em razão de sua capacidade adaptativa. Isso evidencia que populações com melhores condições socioeconômicas, capazes de se adaptar ou mitigar os efeitos de estressores térmicos, podem manter níveis satisfatórios de conforto e reduzir a incidência de impactos negativos aos indivíduos, mesmo em cenários de calor intenso ou frio acentuado.

Por outro lado, municípios com susceptibilidade moderada mas vulnerabilidade elevada, como é o exemplo de São João do Tigre-PB (Latitude: 8° 04'S, Longitude: 36° 50'W, Altitude: 674 m, População: 4.529 hab.), revelam que, na ausência de medidas estruturais e sociais adequadas, até perturbações térmicas de intensidade intermediária podem gerar consequências severas para o conforto da população, aumentando o valor do IVDT. Esses contrastes demonstram a importância de políticas públicas direcionadas não apenas à redução dos níveis de exposição por meio de intervenções no ambiente construído, mas também da ampliação da capacidade adaptativa dos municípios semiáridos. Dessa forma, o IVDT passa a ser uma ferramenta estratégica para identificar prioridades de ação e elaborar planos de adaptação territorialmente adequados às diferentes realidades da região semiárida brasileira.

Em relação aos cenários hipotéticos de melhoria e piora nas condições socioeconômicas locais, simulados com o objetivo de analisar como alterações nesse contexto podem influenciar a vulnerabilidade ao desconforto térmico, observou-se que, no caso de uma melhora nas condições socioeconômicas do semiárido brasileiro, 228 municípios (15,4%) apresentariam uma redução no grau de vulnerabilidade. Em contrapartida, sob um cenário de piora das condições socioeconômicas, 185 municípios (12,5%) demonstram um potencial de aumento nos níveis de vulnerabilidade. Conforme apresentado na Figura 3.9, a distribuição dos municípios que apresentaram melhoria ou piora nos cenários avaliados ocorreu de forma heterogênea, sem um padrão geográfico claramente definido.

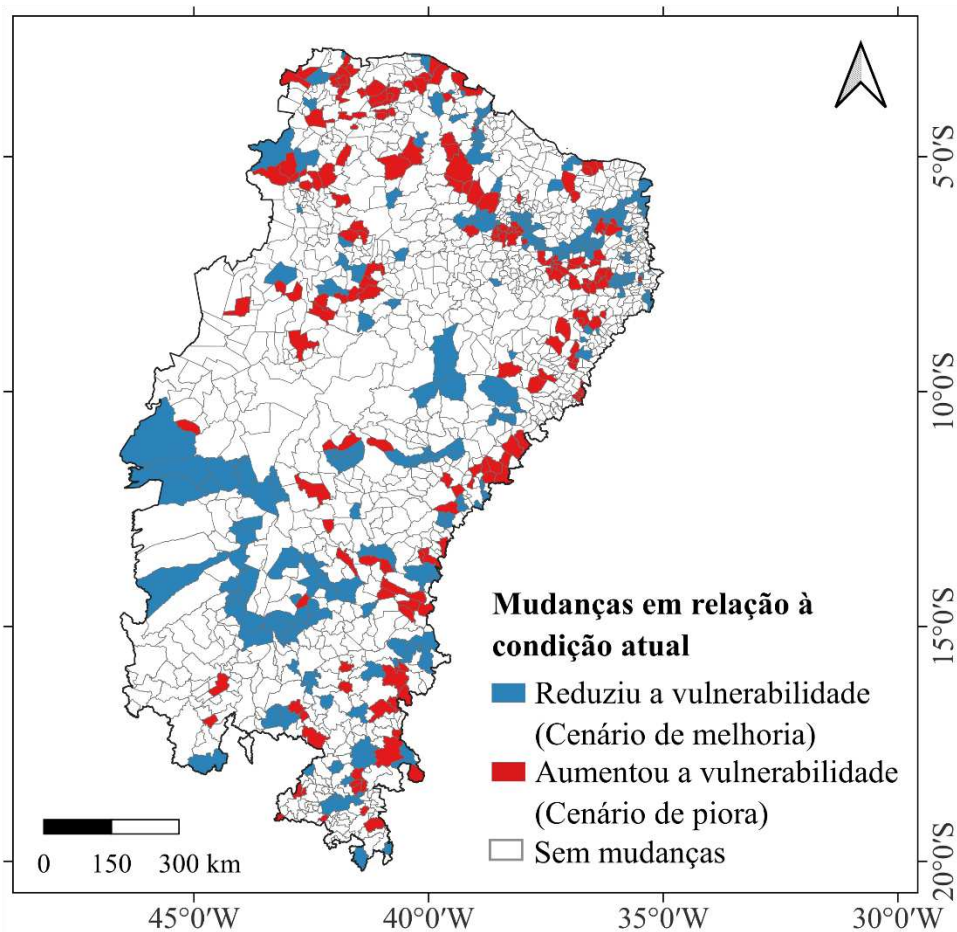


Figura 3.9 - Distribuição espacial dos municípios que apresentaram mudanças no grau de vulnerabilidade ao desconforto térmico em relação à condição atual, considerando os cenários de melhoria ou piora das condições socioeconômicas do semiárido brasileiro. Fonte: A autora.

Observou-se que no cenário de melhoria simulado, 160 municípios (10,8%) deixaram de apresentar algum grau de vulnerabilidade (Figura 3.10a). Isso significa que a melhoria nas condições socioeconômicas da população possibilitaria um aumento na sua capacidade adaptativa às características climáticas locais a ponto de eliminar sua vulnerabilidade ao desconforto térmico. Tais municípios se caracterizam, portanto, como aqueles cujas iniciativas de desenvolvimento social e investimentos em infraestrutura no ambiente construído possuem maior potencial para ampliar as condições de conforto da população.

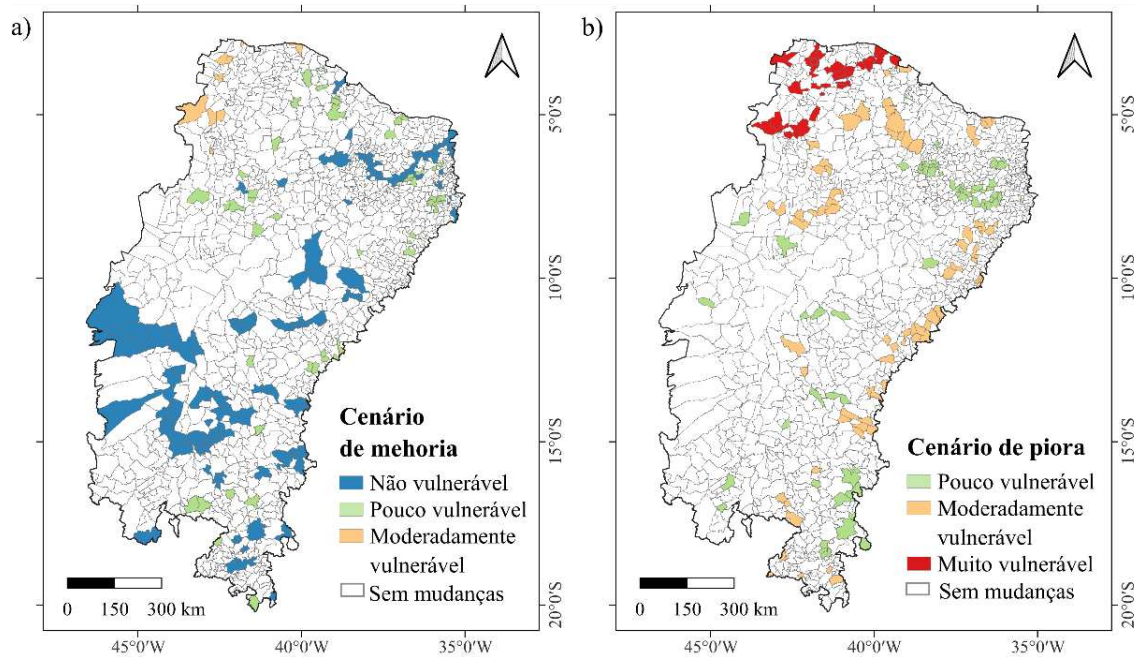


Figura 3.10 - Grau de vulnerabilidade ao desconforto térmico considerando os cenários de melhoria (a) ou piora das condições socioeconômicas no semiárido brasileiro (b), em relação à condição atual. Fonte: A autora.

Em contrapartida, constatou-se que 35 municípios passariam a apresentar o mais alto grau de vulnerabilidade ao considerar o cenário de piora das condições socioeconômicas (Figura 3.10b). Ressalta-se que esses municípios estão mais uma vez concentrados espacialmente no noroeste da região semiárida, o que pode refletir uma fragilidade socioeconômica estrutural, bem como a alta exposição dessa população aos estressores climáticos que causam o desconforto térmico ao longo do ano. Esse padrão reforça a urgência de ações de desenvolvimento regional e políticas de mitigação específicas para esses municípios, de modo a reduzir desigualdades e fortalecer a resiliência dessa população frente às condições extremas de temperatura.

Os resultados apresentados ressaltam a relevância de ações integradas de redução da pobreza, melhoria do acesso a serviços básicos e fortalecimento de programas de assistência social como componentes essenciais para diminuir a exposição e aumentar a resiliência das populações frente ao desconforto térmico (HUMMEL; CUTTER; EMRICH, 2016). A simulação dos cenários aqui discutidos reforça que políticas públicas orientadas ao desenvolvimento socioeconômico podem transformar o padrão espacial da vulnerabilidade ao desconforto térmico no semiárido, convertendo municípios com alto grau de vulnerabilidade em locais mais capacitados a se adaptar e mitigar os efeitos de estressores térmicos.

O desenvolvimento do índice proposto pelo presente estudo apresenta grande potencial de orientar ações para um planejamento de edificações mais adaptado às realidades climáticas e socioeconômicas do semiárido brasileiro, além de subsidiar a criação de normas e regulamentações para adequações construtivas nas regiões com maior desconforto. O IVDT possui ainda capacidade de orientar o desenvolvimento de políticas públicas que priorizem os municípios mais vulneráveis, tais como a garantia de crédito para a implementação de adequações construtivas e de acesso à equipamentos para resfriamento e aquecimento das edificações, reduzindo o grau de desconforto da população.

Por fim, considerando o ineditismo do índice desenvolvido e seu potencial de aplicação por parte de gestores, tomadores de decisão, pesquisadores e da população em geral, os valores do IVDT apresentados, bem como dos indicadores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa foram compilados em uma base de dados única e estão disponíveis para download a partir do seguinte link: <https://data.mendeley.com/datasets/d9cbk96ytj/2>.

3.4 Conclusão

A consideração do percentual anual de desconforto térmico, graus-dia de resfriamento e aquecimento, bem como das condições socioeconômicas da população semiárida possibilitou a proposição do Índice de Vulnerabilidade ao Desconforto Térmico (IVDT), em escala de município. O uso da estrutura de risco-impacto, a partir dos indicadores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa se mostrou eficaz no desenvolvimento do IVDT considerando tanto a condição atual, como os cenários de melhoria e piora das condições socioeconômicas.

Os valores de IVDT obtidos revelam que a maior parte dos municípios do semiárido brasileiro enfrenta algum grau de vulnerabilidade ao desconforto térmico, ainda que, para a maioria, essa vulnerabilidade seja classificada como baixa. Especialmente, os municípios classificados como não vulneráveis e com baixa vulnerabilidade concentram-se na porção centro-sul do semiárido. Já as categorias de vulnerabilidade moderada e alta estão localizadas predominantemente no noroeste e no extremo sul do semiárido, evidenciando tais municípios como os mais sujeitos aos impactos adversos do calor e do frio extremos.

A análise do IVDT evidencia ainda que, apesar dos altos níveis de exposição e sensibilidade de alguns municípios do noroeste e extremo sul do semiárido, sua elevada capacidade adaptativa, decorrente de melhores condições socioeconômicas, possibilita a

mitigação dos estressores e a manutenção de níveis satisfatórios de conforto térmico. De maneira oposta, em locais com susceptibilidade moderada, mas com baixa capacidade adaptativa, a população apresenta menor possibilidade de resposta frente ao desconforto, estando submetida a um maior grau de vulnerabilidade. Esses achados reforçam a necessidade de políticas que ampliem o acesso a tecnologias de adaptabilidade, de modo a reduzir o risco de impactos nas áreas mais vulneráveis.

Em relação aos cenários avaliados, no cenário de melhoria das condições socioeconômicas, diversos municípios do semiárido brasileiro reduziram ou anulariam seu grau de vulnerabilidade em razão do fortalecimento de sua capacidade adaptativa. Por outro lado, uma piora socioeconômica resultaria no aumento da vulnerabilidade em um número significativo de municípios, incluindo casos em que se observaria o grau máximo de vulnerabilidade. Esses resultados evidenciam a necessidade de ações de desenvolvimento regional e políticas públicas voltadas à redução das desigualdades e ao aumento da resiliência da população semiárida frente a eventos térmicos extremos.

A proposição do IVDT para o semiárido brasileiro demonstrou ser eficaz ao sintetizar, em um único indicador, as múltiplas dimensões da vulnerabilidade ao desconforto térmico, integrando variáveis climáticas e socioeconômicas. Diante disso, considera-se que o IVDT pode se consolidar como uma ferramenta estratégica para orientar a definição de prioridades de ação e a formulação de planos de adaptação alinhados às distintas realidades climáticas e socioeconômicas da região semiárida. Ademais, recomenda-se a ampliação de sua aplicação para todo o território brasileiro, bem como a validação local dos resultados obtidos, de modo que ajustes metodológicos possam contribuir para o aprimoramento do índice proposto.

REFERÊNCIAS

ADNAN, Mohammed Sarfaraz Gani et al. Vulnerability of Australia to heatwaves: A systematic review on influencing factors, impacts, and mitigation options. **Environmental Research**, v. 213, p. 113703, 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Resolução Condel/Sudene nº 150**, de 13 de dezembro de 2021. Aprova a Proposição nº 151/2021, que trata do Relatório técnico que apresenta os resultados da revisão da delimitação do Semiárido 2021. Brasília: Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/hierarquia/resolucoes-condel/resolucao-condel-sudene-no-150-de-13-de-dezembro-de-2021>. Acesso em: 1 jan. 2024.

BRITO JÚNIOR, Valdir de Moura; MAGALHÃES, Henrique Fernandes; ALBUQUERQUE, Ulysses Paulino. Perception of health risks in contexts of extreme climate change in semiarid Northeastern Brazil: an analysis of the role of socioeconomic variables. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 19, n. 1, p. 24, 2023.

CAO, Xi Hang; STOJKOVIC, Ivan; OBRADOVIC, Zoran. A robust data scaling algorithm to improve classification accuracies in biomedical data. **BMC bioinformatics**, v. 17, p. 1-10, 2016.

CHOI, Hyun Il. Assessment of aggregation frameworks for composite indicators in measuring flood vulnerability to climate change. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 19371, 2019.

CUTTER, Susan L.; BORUFF, Bryan J.; SHIRLEY, W. Lynn. Social vulnerability to environmental hazards. **Social science quarterly**, v. 84, n. 2, p. 242-261, 2003.

D'AMBROSIO, Valeria; DI MARTINO, Ferdinando; MIRAGLIA, Vittorio. A GIS-based framework to assess heatwave vulnerability and impact scenarios in urban systems. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 13073, 2023.

EBI, Kristie L. et al. Health risks of warming of 1.5 C, 2 C, and higher, above pre-industrial temperatures. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 6, p. 063007, 2018.

FARKAS, Renáta et al. Heatwave vulnerability and climate policy assessment in Central

Europe: A comparative study of Hungarian and Slovak cities. **Urban Climate**, v. 56, p. 102073, 2024.

GASPARRINI, Antonio et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. **The lancet**, v. 386, n. 9991, p. 369-375, 2015.

GIVONI, Baruch. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and buildings**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992.

HATVANI-KOVACS, Gertrud et al. Policy recommendations to increase urban heat stress resilience. **Urban Climate**, v. 25, p. 51-63, 2018.

HUMMELL, Beatriz M. L.; CUTTER, Susan L.; EMRICH, Christopher T. Social vulnerability to natural hazards in Brazil. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 7, p. 111-122, 2016.

INOSTROZA, Luis; PALME, Massimo; DE LA BARRERA, Francisco. A heat vulnerability index: spatial patterns of exposure, sensitivity and adaptive capacity for Santiago de Chile. **PLOS one**, v. 11, n. 9, p. e0162464, 2016.

IPCC. **Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC**. Cambridge University Press, 2007.

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

IPCC. **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 2012.

KIM, Byeong Je; JEONG, Seunghoo; CHUNG, Ji-Bum. Research trends in vulnerability studies from 2000 to 2019: Findings from a bibliometric analysis. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 56, p. 102141, 2021.

KOTTOW, Michael H. The vulnerable and the susceptible. **Bioethics**, v. 17, n. 5-6, p. 460-471,

2003.

MACINTYRE, H. L. et al. Assessing urban population vulnerability and environmental risks across an urban area during heatwaves–Implications for health protection. **Science of the total environment**, v. 610, p. 678-690, 2018.

MAZZIOTTA, Matteo; PARETO, Adriano. Data normalization for aggregating time series: The constrained min-max method. **Rivista Italiana di Economia Demografia e Statistica**, p. 101-108, 2021.

MENEZES, Júlia Alves et al. Analyzing spatial patterns of health vulnerability to drought in the Brazilian semiarid region. **International journal of environmental research and public health**, v. 18, n. 12, p. 6262, 2021.

MENEZES, Júlia Alves et al. Mapping human vulnerability to climate change in the Brazilian Amazon: The construction of a municipal vulnerability index. **PloS one**, v. 13, n. 2, p. e0190808, 2018.

MORA, Camilo et al. Global risk of deadly heat. **Nature climate change**, v. 7, n. 7, p. 501-506, 2017.

NGUYEN, Kim-Anh; LIOU, Yuei-An; TERRY, James P. Vulnerability of Vietnam to typhoons: A spatial assessment based on hazards, exposure and adaptive capacity. **Science of the Total Environment**, v. 682, p. 31-46, 2019.

NIU, Yanlin et al. A systematic review of the development and validation of the heat vulnerability index: major factors, methods, and spatial units. **Current climate change reports**, v. 7, n. 3, p. 87-97, 2021.

QUINTÃO, Ana Flávia et al. Social, environmental, and health vulnerability to climate change: the case of the municipalities of Minas Gerais, Brazil. **Journal of environmental and public health**, v. 2017, n. 1, p. 2821343, 2017.

RIZWAN, Ahmed Memon; DENNIS, Leung Y.C; LIU, Chunho. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. **Journal of environmental sciences**, v. 20, n. 1, p. 120-128, 2008.

SCHWARTZ, Joel; BELLINGER, David; GLASS, Thomas. Expanding the scope of risk assessment: methods of studying differential vulnerability and susceptibility. **American journal of public health**, v. 101, n. S1, p. S102-S109, 2011.

SHARIFI, Ehsan; BOLAND, John. Limits of thermal adaptation in cities: outdoor heat-activity dynamics in Sydney, Melbourne and Adelaide. **Architectural Science Review**, v. 61, n. 4, p. 191-201, 2018.

SUN, Yanwei et al. Mapping urban socio-economic vulnerability related to heat risk: A grid-based assessment framework by combining the geospatial big data. **Urban Climate**, v. 43, p. 101169, 2022.

TURNER, Billie L. et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 100, n. 14, p. 8074-8079, 2002.

VICEDO-CABRERA, Ana Maria et al. Temperature-related mortality impacts under and beyond Paris Agreement climate change scenarios. **Climatic change**, v. 150, n. 3, p. 391-402, 2018.

WANG, Yebao et al. GIS-based risk assessment of typhoon disasters in coastal provinces of China. **Frontiers in Marine Science**, v. 12, p. 1548763, 2025.

WATTS, Nick et al. The 2018 report of the Lancet Countdown on health and climate change: shaping the health of nations for centuries to come. **The Lancet**, v. 392, n. 10163, p. 2479-2514, 2018.

WEHBE, Celine; BAROUD, Hiba. Limitations and considerations of using composite indicators to measure vulnerability to natural hazards. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 19333, 2024.

WOLF, Tanja; MCGREGOR, Glenn. The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom. **Weather and Climate Extremes**, v. 1, p. 59-68, 2013.

ZOU, Taohong; YOSHINO, Kunihiro. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal components approach in the Daxing'anling region, China. **Ecological Indicators**, v. 78, p. 405-415, 2017.

4 CAPÍTULO 4 – CONCLUSÃO GERAL

Esta tese teve como objetivo calcular e mapear índices climáticos e recomendar as estratégias construtivas que priorizem o conforto térmico dos usuários de edificações no semiárido brasileiro. Além disso, buscou-se propor um índice a fim de identificar os municípios semiáridos mais vulneráveis ao desconforto térmico.

No Capítulo 2, a partir do uso de dados meteorológicos em formato raster com alta resolução espacial, constatou-se que as condições de conforto térmico na região semiárida ocorrem, no máximo, em até 61 % do ano, concentrando-se principalmente na faixa central, enquanto no extremo noroeste o desconforto por calor predomina. Nesta área, as demandas por resfriamento ultrapassam 476 °C anuais, ao passo que no sul do semiárido as necessidades de aquecimento podem atingir 700 °C por ano, embora restritas ao inverno. O índice de calor demonstra que todos os municípios semiáridos enfrentam níveis que exigem “Atenção” em pelo menos 15 % do ano, com picos da categoria “Perigo” mais frequentes no noroeste devido à combinação de altas temperaturas e elevada umidade relativa. Verificou-se ainda que o uso de estratégias construtivas passivas demonstra potencial para ampliar o conforto em até 35% do ano, especialmente a partir do uso da ventilação natural. Por sua vez, estratégias ativas como o uso de ar-condicionado são necessárias em cerca de 30% do ano no norte do semiárido, o que ressalta as altas demandas pelo condicionamento artificial do ar nessa região.

No Capítulo 3, a integração dos dados de percentual anual de desconforto térmico, graus dia de resfriamento e de aquecimento e das condições socioeconômicas da população permitiu desenvolver o Índice de Vulnerabilidade ao Desconforto Térmico para o semiárido, em escala municipal. A aplicação da estrutura de risco e impacto com os indicadores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa mostrou-se eficiente para avaliar tanto a condição atual quanto cenários de melhoria ou piora socioeconômica. Os resultados indicam que a maior parte dos municípios semiáridos apresenta algum grau de vulnerabilidade, ainda que predominantemente baixo, concentrando-se na porção centro-sul, ao passo que níveis moderados a altos de vulnerabilidade ocorrem no noroeste e no extremo sul da região. Constatou-se ainda que municípios com elevada capacidade adaptativa conseguem mitigar estressores climáticos e manter o conforto térmico mesmo sob altas exposições, enquanto áreas com adaptabilidade limitada enfrentam riscos maiores, reforçando a importância de políticas que ampliem o acesso a tecnologias de adaptação. Considerando os cenários simulados, a melhoria das condições socioeconômicas pode reduzir ou eliminar a vulnerabilidade ao

desconforto, ao contrário do que ocorre no cenário de piora, onde os impactos são ampliados. Esses achados evidenciam a necessidade de planos regionais de adaptação a fim de que se reduzam os níveis de vulnerabilidade dos municípios semiáridos ao desconforto térmico.

Os resultados apresentados nesta tese se constituem como uma abordagem abrangente acerca dos efeitos das variáveis climáticas sobre o conforto térmico no semiárido brasileiro e indicam com clareza o nível de vulnerabilidade ao qual a população local está submetida. Ao integrar o mapeamento detalhado de índices climáticos com a proposição de um índice que sintetiza exposições térmicas e capacidades adaptativas, esta tese estabelece uma base para orientar adaptações construtivas e políticas públicas no semiárido brasileiro.

4.1 Contribuições da pesquisa

Como principais contribuições desta tese têm-se o mapeamento detalhado de índices climáticos com alta resolução espacial. Adicionalmente, têm-se a recomendação de estratégias construtivas específicas por município, o que facilita a implantação destas sugestões nos projetos arquitetônicos locais. Além disso, o índice de vulnerabilidade proposto, até então inédito na literatura científica, impulsiona o desenvolvimento de normas e programas voltados à mitigação do desconforto térmico e a redução de desigualdades socioeconômicas no semiárido brasileiro. Por fim, o banco de dados gerado, de acesso livre, consolida todas as informações aqui discutidas em arquivos georreferenciados que permitem consultar, comparar e extrair dados por município, facilitando sua utilização na tomada de decisões e na elaboração de políticas de adaptação aos estressores climáticos do semiárido brasileiro.

4.2 Limitações

Dentre as principais limitações deste trabalho pode-se citar a utilização de um ano médio padrão para a obtenção dos índices climáticos, o que minimiza os efeitos da variabilidade interanual e dificulta a captação dos eventos extremos que impactam o conforto térmico e a demanda por condicionamento. Além disso, foram utilizados apenas dados de variáveis meteorológicas externas, ou seja, não foram analisados dados de desempenho real de edificações, o que limita a validação prática das estratégias construtivas recomendadas. Por fim, ressalta-se que os valores do SoVI[®] utilizados como indicador de capacidade adaptativa na

obtenção do IVDT foram calculados com base nos dados do Censo Demográfico de 2010, e não incorporam as informações mais recentes disponibilizadas pelo Censo de 2022 sobre as condições socioeconômicas semiáridas.

4.3 Sugestões para trabalhos futuros

Como recomendações para a continuação desta pesquisa têm-se a realização de simulações termo energéticas e medições *in loco* em edificações para avaliar o impacto prático das estratégias bioclimáticas recomendadas e validar os resultados obtidos para os índices climáticos. Além disso, sugere-se a incorporação de projeções de dados climáticos futuros para avaliar como mudanças no clima podem alterar o conforto térmico e a eficácia das estratégias ao longo do século. Ademais, recomenda-se que o IVDT possa ser recalculado considerando dados socioeconômicos mais recentes, bem como para cenários futuros de mudanças climáticas a fim de analisar como tais alterações podem impactar no grau de vulnerabilidade ao desconforto térmico no futuro. Por fim, recomenda-se que a metodologia desenvolvida nesta tese seja aplicada a todo o território brasileiro no intuito de compreender como os índices climáticos calculados e o índice de vulnerabilidade proposto se caracterizam em escala nacional.