

MARIANA NAVARRO BENEVIDES

**ZONEAMENTO CLIMÁTICO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO BASEADO NA
CLUSTERIZAÇÃO HIERÁRQUICA PARA CONFORTO E DESEMPENHO
TERMO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**

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

Orientadora: Joyce Correna Carlo

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

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

T

Benevides, Mariana Navarro, 1995-
B465z Zoneamento climático do semiárido brasileiro baseado na
2021 clusterização hierárquica para conforto e desempenho termo
energético de edificações / Mariana Navarro Benevides. –
Viçosa, MG, 2021.
91 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Joyce Correna Carlo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Arquitetura e clima. 2. Habitações - Projetos e
construção. 3. Arquitetura - Aspectos ambientais. 4. Energia -
Consumo. 5. Desempenho. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de
Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. II. Título.

CDD 22. ed. 720

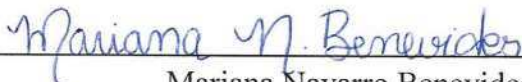
MARIANA NAVARRO BENEVIDES

**ZONEAMENTO CLIMÁTICO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO BASEADO NA
CLUSTERIZAÇÃO HIERÁRQUICA PARA CONFORTO E DESEMPENHO
TERMO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**

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

APROVADA: 26 de fevereiro de 2021.

Assentimento:


Mariana Navarro Benevides
Autora


Joyce Correna Carlo
Orientadora

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me sustentado, fortalecido e me abençoado todos esses anos.

Aos meus pais, Heraldo e Nadja, pelo apoio, amor incondicional, por acreditarem e investirem em mim todos esses anos.

Ao meu amor, David, por sempre estar pronto para me ajudar, por me reerguer todas as vezes em que eu caía, por todo amor, dedicação e paciência.

Aos meus grandes e queridos amigos Matheus, Caio, Débora e Elisa, por todos os momentos de alegria, choro e apoio com minha vida profissional e pessoal, e por trazerem felicidade aos meus anos de mestrado.

Aos meus amigos de laboratório, em especial, ao Mário, pelo auxílio, paciência e amizade.

À minha orientadora, Joyce Carlo pela confiança em mim e pelo auxílio para a realização deste trabalho.

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

RESUMO

BENEVIDES, Mariana Navarro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2021. **Zoneamento climático do semiárido brasileiro baseado na clusterização hierárquica para conforto e desempenho termo energético de edificações.** Orientadora: Joyce Correna Carlo.

A definição de zonas climáticas caracteriza-se como uma importante ferramenta para o planejamento de edificações adaptadas ao contexto climático local. A avaliação dos impactos do clima nas construções apresenta relevância na medida que influenciam no desempenho energético das mesmas, sobretudo em regiões que apresentam alta especificidade climática, como a região semiárida brasileira. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi propor zonas climáticas para o semiárido brasileiro utilizando-se de técnicas estatísticas multivariadas e avaliar estratégias de condicionamento térmico passivo para zonas climáticas propostas, a partir de simulações termo energéticas. Análise de componentes principais (ACP) foi utilizada a fim de selecionar as variáveis de maior influência e análise de clusterização hierárquica (ACH) foi empregada no intuito de definir espacialmente zonas climaticamente homogêneas. Para cada zona estabelecida, foram definidas as estratégias construtivas de condicionamento térmico mais adequadas, bem como calculados os índices térmicos de calor e de graus-hora de resfriamento e aquecimento. Simulações termo energéticas foram realizadas para avaliação das estratégias definidas considerando cinco municípios representativos das zonas climáticas estabelecidas: Apodi/RN, Oeiras/PI, Palmeira dos Índios/AL, Buritirama/BA e Águas Vermelhas/MG. Foram analisadas as estratégias de ventilação natural, subdividida em ventilação natural diurna, ventilação natural noturna, janelas abertas 24h e janelas fechadas 24h, além da estratégia de inércia térmica com aquecimento solar. A avaliação das simulações ocorreu a partir dos indicadores de balanço térmico, conforto térmico adaptativo e graus-horas de aquecimento e resfriamento. Como resultados, a ACP possibilitou a redução do banco de dados inicial de 104, para 48 variáveis, dentre as quais destacam-se as variáveis relacionadas à temperatura. A partir da HCA, cinco zonas climáticas foram definidas, para as quais evidenciou-se uma alta demanda por estratégias construtivas de condicionamento térmico. Dentre as estratégias de ventilação natural simuladas, o uso de janelas abertas 24 horas e durante o período noturno se caracteriza como uma boa alternativa para a redução das horas de desconforto por calor nas edificações inseridas nas Zonas 1, 2, 3 e 4. Essas estratégias promoveram maiores

percentuais de conforto térmico, bem como uma menor necessidade de graus-hora de resfriamento. Já para a Zona 5, a estratégia de ventilação natural com janelas abertas apenas no período diurno é a mais recomendada. A estratégia de inércia térmica com aquecimento solar avaliada para essa zona promoveu uma redução no desconforto por frio durante o inverno, porém um aumento no desconforto por calor e na necessidade de graus-hora de resfriamento nos demais meses. Diante do exposto, o zoneamento proposto neste estudo apresenta grande potencial de aplicação para um planejamento construtivo mais adaptado aos aspectos climáticos da região semiárida brasileira, contribuindo para o aumento da eficiência energética das edificações. Por fim, sugerem-se análises complementares para uma melhor aplicação da estratégia de inércia térmica em edificações inseridas nessa região.

Palavras-chave: Eficiência energética. Habitações. Clima. Estratégias construtivas. Desempenho.

ABSTRACT

BENEVIDES, Mariana Navarro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2021. **Climate zoning of the Brazilian semi-arid region based on hierarchical clustering for comfort and thermal energetic performance of buildings.** Advisor: Joyce Correna Carlo.

The definition of climatic zones is characterized as an important tool for the planning of buildings adapted to the local climatic context. The assessment of climate impacts on buildings is relevant since it influences their energy performance, especially in regions with high climatic specificity, such as the Brazilian semiarid region. In this context, the objective of this work was to propose climatic zones for the Brazilian semiarid using multivariate statistical techniques and to evaluate passive thermal conditioning strategies for the proposed climatic zones, based on thermal energy simulations. Principal component analysis (ACP) was used to select the variables with the greatest influence and hierarchical cluster analysis (HCA) was used to spatially define climatically homogeneous zones. For each established zone, the most appropriate constructive thermal conditioning strategies were defined, as well as the thermal indexes of heat and degrees hours of cooling and heating were calculated. Thermo-energetic simulations were carried out to evaluate the strategies defined considering five municipalities representative of the established climatic zones: Apodi/RN, Oeiras/PI, Palmeira dos Índios/AL, Buritirama/BA, and Águas Vermelhas/MG. Natural ventilation strategies were analyzed, subdivided into natural diurnal ventilation, natural nocturnal ventilation, windows open 24 hours and windows closed 24 hours, in addition to the strategy of thermal inertia with solar heating. The evaluation of the simulations took place from the indicators of thermal balance, adaptive thermal comfort, and degrees of heating and cooling. As result, the ACP made it possible to reduce the initial database from 104 to 48 variables, among which the variables related to temperature stand out. From the HCA, five climatic zones were defined, for which there was a high demand for constructive thermal conditioning strategies. Among the simulated natural ventilation strategies, the use of windows open 24 hours and during the night is characterized as a good alternative to reduce hours of discomfort due to heat in buildings inserted in Zones 1, 2, 3, and 4. These strategies promoted higher percentages of thermal comfort, as well as a lower need for degrees-hour of cooling. For Zone 5, the natural ventilation strategy with windows open only during the day is the most recommended. The strategy of thermal inertia with solar heating evaluated

for this zone promoted a reduction in discomfort due to cold during the winter, but an increase in discomfort due to heat and the need for degree-hours of cooling in the other months. In this way, the zoning proposed in this study has great potential for application for constructive planning more adapted to the climatic aspects of the Brazilian semiarid region, contributing to the increase in the energy efficiency of buildings. Finally, complementary analyzes are suggested for a better application of the thermal inertia strategy in buildings inserted in this region.

Keywords: Energy efficiency. Dwellings. Climate. Constructive strategies. Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1. (a) Localização da região semiárida no Brasil, bem como a distribuição espacial das estações climatológicas e dos dados climáticos em pixel utilizados, variação espacial da (b) altitude, (c) precipitação total média anual, (d) temperatura média anual e (e) amplitude térmica média anual.	25
Figura 2. 2. Carta psicrométrica adaptada de Givoni (1992) com aplicabilidade para as condições climáticas de países em desenvolvimento.	32
Figura 2. 3. Fluxograma da metodologia utilizada.	35
Figura 2. 4. (a) Percentual de variância explicada e variância acumulada, e (b) autovalores para os dez primeiros componentes principais (PCs).	36
Figura 2. 5. Gráfico biplot dos valores de correlação entre os componentes principais 1 e 2 e as 104 variáveis analisadas.	39
Figura 2. 6. Contribuição percentual do conjunto total de variáveis selecionadas na composição da resposta explicativa do (a) PC1 e (b) PC2.	41
Figura 2. 7. (a) Distribuição espacial das zonas climáticas definidas para o semiárido brasileiro bem como as estações climatológicas inseridas nas mesmas. (b) Mapa com o zoneamento climático proposto na NBR15220 (ABNT, 2013), para a região semiárida.	43
Figura 2. 8. Boxplot das temperaturas de bulbo seco e úmido, e da umidade relativa para as diferentes zonas climáticas definidas.	44
Figura 2. 9. Temperaturas de bulbo seco e úmido, e umidades relativas médias mensais para as diferentes zonas climáticas definidas.	45
Figura 2. 10. Percentual de horas anuais de ocorrência de conforto e de demanda por estratégias de condicionamento térmico para cada zona climática.	47
Figura 2. 11. Mapa com a identificação das principais estratégias identificadas para as zonas climáticas propostas.	50
Figura 2. 12. (a) Boxplot dos valores de índice de calor, e percentual de horas (b) anuais e (c) sazonais das categorias de classificação do índice de calor em relação a seus possíveis distúrbios fisiológicos nos indivíduos.	51

Figura 2. 13. Demanda por graus-hora de resfriamento e aquecimento das estações climatológicas inseridas nas zonas climáticas definidas para o semiárido brasileiro.	52
Figura 3. 1. Esquema da metodologia adotada no presente estudo.	64
Figura 3. 2. (a) Localização das zonas climáticas definidas para o semiárido brasileiro e das estações climatológicas utilizadas no Capítulo 2. (b) Localização dos municípios representativos de cada zona e (c) respectivos valores mensais de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento.	65
Figura 3. 3. Modelo de habitação unifamiliar utilizado. Fonte: Adaptado de Rodrigues (2019).	66
Figura 3. 4. Resultado do Balanço térmico do caso de referência em Apodi/RN.	74
Figura 3. 5. Percentuais (a) anuais e (b) mensais do conforto térmico adaptativo e desconforto por frio e calor para o município de Apodi/RN, considerando estratégias de ventilação natural.	75
Figura 3. 6. Percentuais (a) anuais e (b) mensais do conforto térmico adaptativo e desconforto por frio e calor para o município de Oeiras/PI, considerando estratégias de ventilação natural.	76
Figura 3. 7. Percentuais (a) anuais e (b) mensais do conforto térmico adaptativo e desconforto por frio e calor para o município de Palmeira dos Índios/AL, considerando estratégias de ventilação natural.	77
Figura 3. 8. Percentuais (a) anuais e (b) mensais do conforto térmico adaptativo e desconforto por frio e calor para o município de Buritirama/BA, considerando estratégias de ventilação natural.	78
Figura 3. 9. Percentuais (a) anuais e (b) mensais do conforto térmico adaptativo e desconforto por frio e calor para o município de Águas Vermelhas/MG, considerando estratégias de ventilação natural.	80
Figura 3. 10. Valores mensais de necessidade de graus-hora de resfriamento para os municípios de Apodi/RN, Oeiras/PI, Palmeira dos Índios/AL e Buritirama/BA, considerando as estratégias de ventilação natural.	81

Figura 3. 11. Valores mensais de necessidade de graus-hora de resfriamento e aquecimento para o município de Águas Vermelhas/MG, considerando as estratégias de ventilação natural.	82
Figura 3. 12. Percentuais (a) anuais e (b) mensais do conforto térmico adaptativo e desconforto por frio e calor para o município de Águas Vermelhas/MG, considerando estratégias de inércia térmica para aquecimento solar.	83
Figura 3. 13. Valores mensais de necessidade de graus-hora de resfriamento e aquecimento para o município de Águas Vermelhas/MG, considerando a estratégia de inércia térmica com aquecimento solar.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1. Variáveis utilizadas obtidas a partir do banco de dados do WorldClim 2 (FICK; HAJMANS, 2017).	27
Tabela 2. 2. Variáveis bioclimáticas utilizadas obtidas a partir do banco de dados do WorldClim 2 (FICK; HAJMANS, 2017).	28
Tabela 2. 3. Categorias para a classificação dos valores do índice de calor e os possíveis distúrbios fisiológicos nos indivíduos (NWS, 2020).	34
Tabela 2. 4. Correlação entre as 104 variáveis utilizadas para zoneamento climático e os seis primeiros componentes principais (PCs).	37
Tabela 2. 5. Variáveis selecionadas a partir da análise de componentes principais para o zoneamento climático do semiárido brasileiro.	40
Tabela 2. 6. Número mais relevante de agrupamentos (NRA) sugerido pelos 27 índices utilizados.	42
Tabela 3. 1. Percentual de horas anuais de ocorrência de conforto e de demanda por estratégias de condicionamento térmico para cada zona climática.	67
Tabela 3. 2. Propriedades térmicas da cobertura utilizada nas simulações. Fonte: Adaptado de Weber et al. (2017).	69
Tabela 3. 3. Propriedades térmicas do piso utilizado nas simulações. Fonte: Adaptado de Weber et al. (2017).	69
Tabela 3. 4. Propriedades térmicas das paredes utilizadas nas simulações considerando a estratégia de ventilação natural. Fonte: Adaptado de Weber et al. (2017).	70
Tabela 3. 5. Propriedades térmicas das paredes utilizadas nas simulações considerando a estratégia de inércia térmica com aquecimento solar. Fonte: Adaptado de Weber et al. (2017).	71

SUMÁRIO

1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1 Introdução	14
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
1.3 Estrutura da dissertação.....	16
REFERÊNCIAS.....	18
2 CAPÍTULO 2 – PROPOSIÇÃO DE ZONEAMENTO CLIMÁTICO PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	21
RESUMO.....	21
2.1 Introdução	22
2.2 Material e métodos.....	24
2.2.1 Área de estudo	24
2.2.2 Zoneamento climático.....	26
2.2.3. Caracterização das zonas climáticas	30
2.2.4 Fluxograma da metodologia utilizada.....	34
2.3 Resultados e discussão	35
2.3.1 Seleção das variáveis de interesse	35
2.3.2 Definição e caracterização das zonas climáticas	41
2.4 Conclusão.....	53
REFERÊNCIAS.....	54
3 CAPÍTULO 3 – AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONDICIONAMENTO TÉRMICO PASSIVO PARA ZONAS CLIMÁTICAS PROPOSTAS PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO	61
RESUMO.....	61

3.1 Introdução	62
3.2 Objetivo	63
3.3 Material e métodos.....	63
3.3.1 Arquivo climático	64
3.3.2 Geometria habitacional representativa.....	65
3.3.3 Estratégias construtivas.....	66
3.3.4 Materiais construtivos.....	67
3.3.5 Indicadores de desempenho	72
3.4 Resultados.....	73
3.4.1 Balanço térmico	73
3.4.2 Estratégia ventilação natural	74
3.4.3 Estratégia inércia térmica para aquecimento solar	83
3.5 Conclusão.....	85
REFERÊNCIAS.....	86
4 CAPÍTULO 4 – CONCLUSÃO GERAL.....	90
4.1 Contribuições da pesquisa	91
4.2 Limitações.....	91
4.3 Sugestões para trabalhos futuros.....	91

1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Introdução

A arquitetura bioclimática se baseia no desenvolvimento de projetos arquitetônicos que levam em consideração o contexto do clima local, onde o equilíbrio entre os fatores ambientais e as trocas de energia térmica promovem o alcance das necessidades de conforto (BARBIRATO; SOUZA; TORRES, 2007). Nesse contexto, a definição de zoneamentos climáticos torna possível a identificação e atenuação dos impactos adversos do clima nas edificações e a definição dos requisitos básicos para construções (CHEN; YANG, 2018; WALSH; CÓSTOLA; LABAKI, 2019), caracterizando-se como uma importante ferramenta para o aumento da eficiência energética de edificações.

No Brasil, as características climáticas propiciam um alto potencial de utilização de estratégias de condicionamento térmico passivo a fim de melhorar as condições de conforto térmico das edificações (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Dessa forma, a avaliação dos impactos do clima nas construções apresenta relevância na medida que influenciam no desempenho energético das mesmas, sobretudo em regiões que apresentam alta especificidade climática, como a região semiárida brasileira.

Ocupando cerca de 90% do território do nordeste brasileiro, a região semiárida apresenta condições climáticas recorrentemente extremas, na qual a presença de temperaturas elevadas e de uma umidade relativa do ar reduzida impactam no conforto térmico (SOUZA, 2018; ARAÚJO; BARBOSA; BATISTA, 2017). De acordo com Alvares et al. (2013) e SUDENE (2017), essa região caracteriza-se ainda por apresentar baixos índices de precipitação pluviométrica, elevados níveis de aridez, além de alto déficit hídrico, aspectos que evidenciam a necessidade de adaptações nos aspectos construtivos das edificações.

Corgnati e Kindinis (2007) e Givoni (1992) apresentam como estratégia de condicionamento térmico passivo, em regiões com o clima quente e seco, o uso de elementos construtivos que possuam elevada inércia térmica. Torres (2015), em estudo realizado para o semiárido brasileiro, aponta que a ventilação natural e o resfriamento evaporativo também podem ser utilizados como estratégias para atingir melhores níveis de desempenho térmico. Diante disso, evidencia-se a necessidade de zoneamentos que identifiquem a melhor

combinação de técnicas a fim de atender às necessidades inerentes às diferentes especificidades climáticas presentes no semiárido.

Apesar da existência de um zoneamento climático para o Brasil, apresentado na NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações Residenciais (ABNT, 2005), o mesmo possui críticas a sua metodologia desde sua concepção (MARTINS; BITTENCOURT; KRAUSE, 2012; BOGOS, 2016; LOURENÇO et al., 2019). Dentre as limitações, têm-se a reduzida quantidade de estações meteorológicas utilizadas, sobretudo na região semiárida, bem como a utilização apenas das variáveis temperatura e umidade relativa para a definição espacial das zonas. No intuito de preencher essa lacuna, métodos de interpolação de dados foram utilizados, o que acarretou em uma generalização das condições climáticas e, conseqüentemente, das estratégias construtivas recomendadas.

Em trabalho desenvolvido por Martins, Bittencourt e Krause (2012), concluiu-se que, ao simular o desempenho térmico de uma edificação para diferentes municípios do semiárido brasileiro, as recomendações obtidas foram diferentes daquelas apresentadas para a zona na qual estão inseridos segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005). Estudos como esse sugerem a necessidade da elaboração de um zoneamento climático mais detalhado no intuito de promover o estabelecimento de diretrizes e recomendações construtivas mais adequadas.

Em virtude disso, novas propostas de zoneamento foram desenvolvidas, como as revisões apresentadas por Roriz (2012a, 2012b, 2013, 2014). Nas propostas de Roriz (2012a) e Roriz (2012b), um aumento significativo no número de estações meteorológicas foi utilizado, além da inserção de dados de satélite para o preenchimento dos dados faltantes. Já para as propostas apresentadas por Roriz (2013) e Roriz (2014), houve a inclusão de estações oriundas de países sul-americanos vizinhos no intuito de auxiliar o processo de interpolação. Apesar desses avanços, essas propostas foram elaboradas considerando apenas as variáveis temperatura e amplitude térmica para a definição das zonas, para as quais não foram estabelecidos novos conjuntos de estratégias construtivas.

Diversos métodos para a definição de zonas climáticas visando a eficiência energética de edificações têm sido aplicados no mundo, como apresentam Walsh, Cóstola e Labaki (2017). Dentre esses métodos, destaca-se o uso do índice térmico de graus dias e de simulações termo energéticas (WALSH; CÓSTOLA; LABAKI, 2017). Além desses, o uso de técnicas de estatística multivariada como a análise de clusterização hierárquica apresenta grande potencial de aplicação, sobretudo quando associada a técnicas de pré-processamento, como a análise componentes principais (PRAENE et al., 2019).

Independentemente da metodologia utilizada para a definição de zonas climáticas, a avaliação das mesmas é de suma importância para a verificação das estratégias construtivas definidas (WALSH; CÓSTOLA; LABAKI, 2018; WALSH; CÓSTOLA; LABAKI, 2019). Neste contexto, o uso de simulações computacionais se caracteriza como uma ferramenta eficaz para análise da resposta da edificação frente aos fatores e cenários simulados, elevando a qualidade e a confiabilidade do zoneamento obtido.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Propor um zoneamento climático para o semiárido brasileiro visando o conforto e o desempenho térmico de edificações.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Selecionar as variáveis de maior relevância para o zoneamento climático;
- b) Definir zonas climáticas para o semiárido brasileiro;
- c) Determinar diretrizes construtivas a partir de estratégias de condicionamento térmico específicas para cada zona;
- d) Caracterizar as zonas climáticas em relação a necessidade de resfriamento e aquecimento;
- e) Simular o desempenho térmico de uma edificação residencial unifamiliar considerando estratégias de condicionamento térmico passivo;
- f) Avaliar o conforto e desempenho térmico da edificação simulada.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho está estruturado de modo a conter quatro capítulos.

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

No Capítulo 2, está inserido o primeiro artigo da dissertação, visando atender aos objetivos específicos a), b), c) e d). Este capítulo teve como foco a proposição de zonas climáticas para a região semiárida brasileira.

No Capítulo 3, está apresentado o segundo artigo da dissertação, que busca atender aos

objetivos específicos e) e f). Este capítulo teve como intuito avaliar estratégias construtivas por meio de simulações termo energéticas.

No Capítulo 4, está apresentado a conclusão geral que responde aos objetivos dos Capítulos 2 e 3. Ademais, neste capítulo são apresentadas as contribuições e limitações do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 15220: Desempenho térmico de edificações*. Rio de Janeiro, 2005.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ARAÚJO, M. L. T.; BARBOSA, G. L.; BATISTA, J. O. Desempenho térmico de residência unifamiliar PMCMV em diferentes cidades alagoanas. In: ENCAC – ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14, 2017, Brasília. *Anais eletrônicos...* Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/encac/files/2017/topico4artigo22.pdf>. Acesso em: 10 out. 2020.

BARBIRATO, G. M.; SOUZA, L. C. L.; TORRES, S. C. *Clima e Cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos*. Maceió: EDUFAL, 164 p, 2007.

BOGOS, A. J. Reflexões críticas quanto as limitações do texto das normas brasileiras de desempenho NBR 15220-3 e NBR 15575. *HOLOS*, v. 7, p. 290-298, 2016.

CHEN, X.; YANG, H. Integrated energy performance optimization of a passively designed high-rise residential building in different climatic zones of China. *Applied energy*, 215, 145-158, 2018.

CORGNATI, S. P.; KINDINIS, A. Thermal mass activation by hollow core slab coupled with night ventilation to reduce summer cooling loads. *Building and Environment*, v. 42, n. 9, p. 3285-3297, 2007.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and buildings*, 18(1), 11-23, 1992.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência Energética na Arquitetura*. third ed. São Paulo. Eletrobrás/Procel, 2014.

LOURENÇO, W. M. et al. Reflexões aos parâmetros de estratégias bioclimáticas e desempenho térmico da NBR15220 para zona bioclimática 2. *Anais [...]*, Santana do Livramento: SIEPE, v. 10, n. 2, 2019.

MARTINS, T. A. L.; BITTENCOURT, L. S.; KRAUSE, C. M. L. B. Contribuição ao zoneamento bioclimático brasileiro: reflexões sobre o semiárido nordestino. *Ambiente Construído*, v. 12, n. 2, p. 59-75, 2012.

PRAENE, J. P. et al. GIS-based approach to identify climatic zoning: A hierarchical clustering on principal component analysis. *Building and Environment*, 164, 106330, 2019.

RORIZ, M. Uma proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro. *ANTAC- Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído*. São Carlos-SP, 2012a.

Disponível em:

https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Proposta_Revisao_Zoneamento_Bioclimatico.pdf. Acesso em: 02 ago. 2020.

RORIZ, M. Segunda Proposta de Revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro. *Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética (LABEEE)*. Florianópolis, 2012b. Disponível em:

<https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Zoneamento.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2020.

RORIZ, M. *Classificação de climas do Brasil – versão 2.0*. 2013. Disponível em:

https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v2.pdf. Acesso em: 02 ago. 2020.

RORIZ, M. *Classificação de climas do Brasil – versão 3.0*. 2014. Disponível em:

https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf. Acesso em: 02 ago. 2020.

SOUSA, M. C. B. *Desejo por conforto térmico: estratégias adaptativas e modelos de conforto térmico no semiárido paraibano*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 134f, 2018.

SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. *Resolução n.115*, de 23 de novembro de 2017. Diário Oficial da União n.232, 5 de dezembro de 2017.

TORRES, D. A. *Desempenho térmico de habitações populares em Alagoas: alternativas para adequação climática*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 144f, 2015.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Performance-based validation of climatic zoning for building energy efficiency applications. *Applied energy*, v. 212, p. 416-427, 2018.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Review of methods for climatic zoning for building energy efficiency programs. *Building and Environment*, 112, 337-350, 2017.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Validation of the climatic zoning defined by ASHRAE standard 169-2013. *Energy Policy*, v. 135, p. 111016, 2019.

2 CAPÍTULO 2 – PROPOSIÇÃO DE ZONEAMENTO CLIMÁTICO PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

Este estudo teve como objetivo propor zonas climáticas para o semiárido brasileiro utilizando-se de técnicas estatísticas multivariadas, além de caracterizar essas zonas para aplicações de eficiência energética em edificações. A análise de componentes principais (ACP) foi utilizada a fim de selecionar as variáveis de maior influência para a área de estudo. A partir dessa seleção, a análise de clusterização hierárquica (ACH) foi empregada no intuito de definir espacialmente zonas climaticamente homogêneas, considerando o método de Ward como técnica hierárquica aglomerativa e a distância Euclidiana como medida de similaridade. Para cada zona estabelecida, foram definidas as estratégias construtivas de condicionamento térmico mais adequadas, bem como calculados os índices térmicos de calor e de graus-hora de resfriamento e aquecimento. A ACP possibilitou a redução da dimensionalidade do banco de dados inicial de 104, para 48 variáveis, dentre as quais destacam-se as variáveis climáticas e bioclimáticas relacionadas à temperatura. A partir da ACH, foram definidas cinco zonas climáticas para a região semiárida brasileira. Para todas as zonas, evidenciou-se uma alta demanda por estratégias construtivas de condicionamento, dentre as quais a adoção de ventilação diurna e noturna demonstra maior potencial para o aumento das horas anuais de conforto. O zoneamento proposto apresenta grande potencial de aplicação para um planejamento construtivo mais adaptado aos aspectos climáticos da região semiárida brasileira, contribuindo para o aumento da eficiência energética das edificações nessa região.

Palavras-chave: Análise de componentes principais. Análise de clusterização hierárquica. Diagrama psicrométrico. Índice de calor. Graus-hora.

2.1 Introdução

O zoneamento climático é uma importante ferramenta para o estabelecimento de diretrizes construtivas que visem a eficiência energética de edificações. A partir da delimitação de zonas, torna-se possível a identificação e atenuação dos impactos adversos do clima nas edificações e a definição dos requisitos básicos para construções em diferentes zonas (CHEN E YANG, 2018; WALSH; CÓSTOLA; LABAKI, 2019), além de propiciar o uso racional dos recursos climáticos (KHAMBADKONE; JAIN, 2017). Walsh, Cóstola e Labaki (2017) destacam ainda que a definição de zonas baseada nos aspectos climáticos possui aplicação direta na regulamentação de normas, certificações, selos e políticas energéticas.

Diversos métodos de zoneamento climático para eficiência energética de edificações têm sido adotados por diferentes países considerando as especificidades ambientais, políticas e socioeconômicas locais (WALSH; CÓSTOLA; LABAKI, 2017). Dentre esses métodos, técnicas de estatística multivariada como as análises de componentes principais (ACP) e de cluster são amplamente utilizadas para o processamento de dados climáticos (PRAENE et al., 2019; XIONG et al., 2019; HAO et al., 2020). Enquanto a clusterização é empregada para a definição espacial de zonas (XIONG et al., 2019; BAI et al., 2020; HAO et al., 2020), a ACP é utilizada para o pré-processamento dos dados no intuito de reduzir o número de variáveis a partir da identificação das mais relevantes (PRAENE et al., 2019).

No Brasil, a definição de zonas climáticas direcionada à eficiência energética de edificações teve sua primeira proposta desenvolvida por Roriz, Ghisi e Lamberts (1999), e foi utilizada como base para a criação da Norma Brasileira Regulamentadora de Desempenho térmico de edificações (NBR 15220) (ABNT, 2005). Nessa norma, o território brasileiro é segmentado em oito zonas, para as quais foram estabelecidas diretrizes e estratégias construtivas específicas. Apesar da NBR 15220 se constituir como a norma de zoneamento vigente para o país, críticas existem desde sua concepção, sobretudo quanto à reduzida quantidade de estações meteorológicas utilizadas e pelo fato de apenas as variáveis temperatura e umidade relativa terem sido consideradas. Como alternativa, métodos de interpolação foram utilizados para a definição desse zoneamento, o que acarretou em uma generalização das condições climáticas e, conseqüentemente, das estratégias recomendadas.

Em virtude disso, novas propostas para o zoneamento brasileiro foram desenvolvidas, como as revisões apresentadas por Roriz (2012a, 2012b, 2013, 2014). Nas

propostas de Roriz (2012a) e Roriz (2012b), um aumento significativo no número de estações meteorológicas foi realizado, além da inserção de dados de satélite para o preenchimento dos dados faltantes. Já para as propostas apresentadas por Roriz (2013) e Roriz (2014), houve a inclusão de estações oriundas de países sul-americanos vizinhos no intuito de auxiliar o processo de interpolação. Apesar das tentativas de melhoria em relação à versão inicial proposta por Roriz, Ghisi e Lamberts (1999), nas revisões apresentadas por Roriz (2012a, 2012b, 2013, 2014) foram considerados apenas dados de temperatura e amplitude térmica para a delimitação dos zoneamentos. Dessa forma, a utilização de um conjunto mais amplo de variáveis meteorológicas ainda se constitui como uma lacuna a ser preenchida.

A avaliação de diferentes variáveis climáticas caracteriza-se como de grande importância para a delimitação de zonas visando a eficiência energética de edificações, sobretudo em regiões que apresentam uma alta especificidade climática, como a região semiárida brasileira. Como descrevem Alvares et al. (2013) e SUDENE (2017), essa região apresenta baixos índices de precipitação pluviométrica, elevados níveis de aridez e alto déficit hídrico. Além disso, para a região semiárida são observadas temperaturas elevadas e umidades relativas do ar reduzidas na maior parte do ano, o que impactam nas condições de conforto térmico (AZEVEDO et al., 2015; MARÇAL et al., 2019; MARTINS; BITTENCOURT; KRAUSE, 2012; PANET; ARAÚJO; ARAÚJO, 2020; SANTOS et al., 2019).

Ao longo do território brasileiro, o desconforto acarretado pelo calor tem sido, muitas das vezes, amenizado pelo uso de condicionamento artificial do ar (COSTA; FREIRE; KIPERSTOK, 2019; SILVA et al., 2019; RAMOS et al., 2020), o que promove um aumento demasiado no consumo de energia e uma redução da eficiência energética das edificações (AFLAKI et al., 2015). Como discutem Ramos et al. (2020), essa demanda é ainda maior em áreas com temperaturas consideradas “muito quentes” e “extremamente quentes”, tais como as observadas na região semiárida brasileira. Como alternativa para essa região, a utilização de estratégias de condicionamento térmico passivo pode propiciar um aumento das condições de conforto térmico (ABNT, 2005; MARTINS; BITTENCOURT, KRAUSE, 2012), sobretudo quando associada à definição de zonas que especifiquem a combinação mais adequada de estratégias construtivas a serem empregadas.

Diante disso, a definição de zonas que considerem as especificidades climáticas da região semiárida apresenta grande potencial para subsidiar o planejamento e a adaptação de

edificações visando uma maior eficiência energética das mesmas. Dessa forma, este estudo teve como objetivo propor zonas climáticas para o semiárido brasileiro utilizando-se de técnicas estatísticas multivariadas, além de caracterizar essas zonas para aplicações de eficiência energética em edificações.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Área de estudo

A região semiárida brasileira abrange uma área total de 1,03 milhões de km², o que corresponde a 13,2% do território nacional, sendo considerada uma das áreas semiáridas com maior população no mundo, cerca de 27 milhões de habitantes (BRASIL, 2018). Nessa região, estão inseridos 1.262 municípios distribuídos entre os estados de Alagoas (AL), Bahia (BA), Ceará (CE), Maranhão (MA), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Rio Grande do Norte (RN) e Sergipe (SE), na região nordeste do Brasil, além do estado de Minas Gerais (MG), na região sudeste (Figura 2.1a). Em relação aos aspectos geográficos, as altitudes nessa região variam de 2 m, no litoral norte, a elevações de 1.840 m, na região do Pico do Barbado, na Chapada Diamantina (Figura 2.1b).

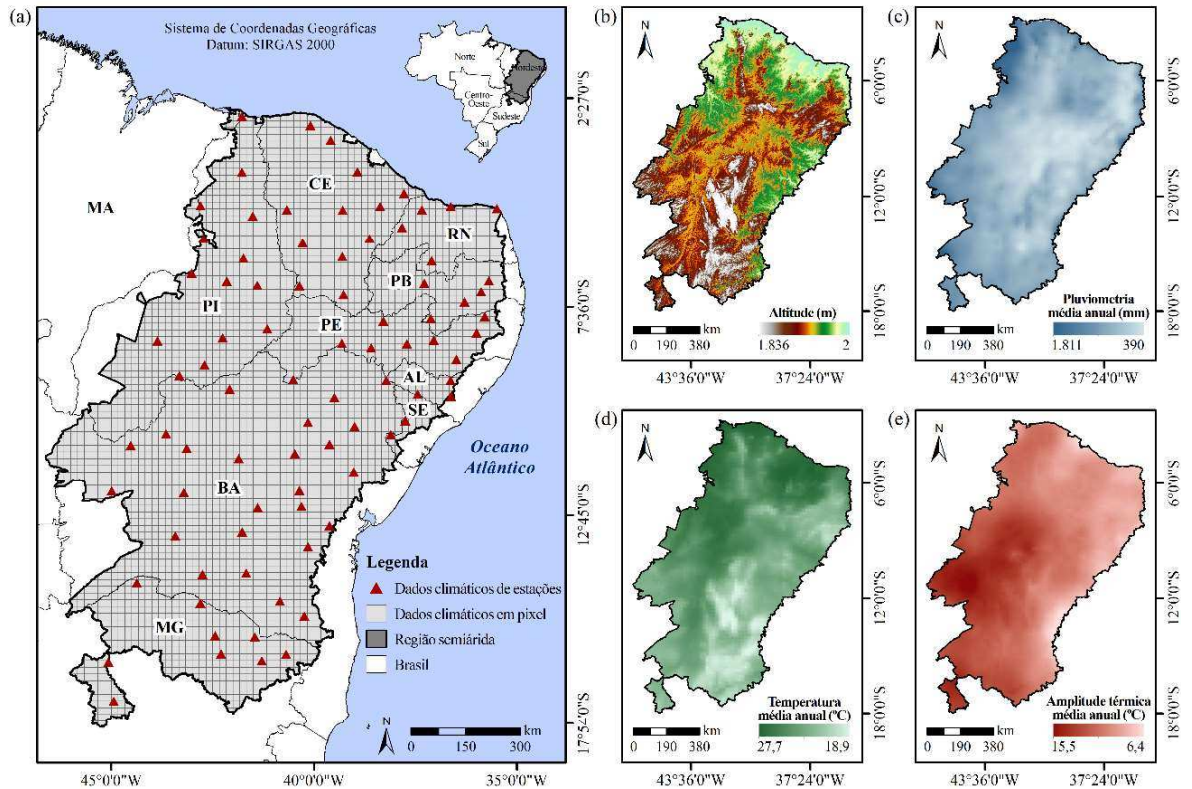


Figura 2.1. (a) Localização da região semiárida no Brasil, bem como a distribuição espacial das estações climatológicas e dos dados climáticos em pixel utilizados, variação espacial da (b) altitude, (c) precipitação total média anual, (d) temperatura média anual e (e) amplitude térmica média anual.

Dentre os critérios para a classificação dos municípios brasileiros como pertencentes à região semiárida, os mesmos devem apresentar precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm, ou Índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50, ou percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano (BRASIL, 2020).

As chuvas na região semiárida estão distribuídas inter e intra-anualmente de forma bastante irregular (MARENGO; TORRES; ALVES, 2017), variando de 390 a 1.853 mm em relação aos totais médios anuais (Figura 2.1c). No que concerne à variabilidade espacial da temperatura, as maiores magnitudes médias anuais são observadas na região equatorial (Figura 2.1d), enquanto os valores de amplitude térmica média anual mais expressivos, da ordem de 15 °C, ocorrem na parte central da região semiárida (Figura 2.1e).

2.2.2 Zoneamento climático

2.2.2.1 Dados climáticos em pixel

Os dados utilizados para a definição das zonas climáticas no semiárido brasileiro consistiram de valores em formato matricial, ou seja, em formato de pixel, obtidos a partir da plataforma WorldClim 2 Data Portal (FICK; HAJMANS, 2017). Esse banco de dados foi gerado a partir de informações de satélites e de estações climatológicas, obtendo-se variáveis climáticas mensais espacialmente interpoladas, em escala global, com alta resolução espacial. Esses dados apresentam como principal vantagem a disponibilidade de informações para áreas com reduzida quantidade de dados provenientes de estações climatológicas locais.

Para o presente estudo, foram utilizados os dados climáticos históricos médios mais recentes disponíveis para esse banco de dados, com horizonte temporal de 1970 a 2000, em escala mensal. De modo a abranger toda a região semiárida, foram utilizados um total de 3.611 pixels (Figura 2.1a) com escala espacial de 10 minutos, ou seja, cada unidade de pixel com dimensões de $\sim 18,4 \times \sim 18,4$ km (340 km^2). Esse banco de dados é subdividido em variáveis climáticas e variáveis denominadas como bioclimáticas, além dos valores topográficos de altitude.

Como variáveis climáticas, utilizaram-se dados de temperatura, precipitação pluviométrica, radiação solar, velocidade do vento e pressão de vapor, detalhadas na Tabela 2.1. Quanto às variáveis bioclimáticas, essas são caracterizadas por apresentarem condições anuais, sazonais e valores de fatores ambientais extremos ou limitantes. Foram utilizadas 19 variáveis bioclimáticas (Tabela 2.2), derivadas dos dados mensais de temperatura e precipitação, com o intuito de se obterem um maior número de variáveis biologicamente significativas (POGGIO; SIMONETTI; GIMONA, 2018). Ao todo, entre variáveis denominadas climáticas e bioclimáticas, foram utilizadas 104 variáveis.

Tabela 2. 1. Variáveis utilizadas obtidas a partir do banco de dados do WorldClim 2 (FICK; HAJMANS, 2017).

Topográfico	Temperatura			Precipitação	Radiação	Velocidade	Pressão
	(°C)			(mm)	Solar	Vento	Vapor
					(kJ m⁻² day⁻¹)	(m s⁻¹)	(kPa)
Altitude	Tmean1	Tmin1	Tmax1	Prec1	Srad1	Wind1	Vapr1
	Tmean2	Tmin2	Tmax2	Prec2	Srad2	Wind2	Vapr2
	Tmean3	Tmin3	Tmax3	Prec3	Srad3	Wind3	Vapr3
	Tmean4	Tmin4	Tmax4	Prec4	Srad4	Wind4	Vapr4
	Tmean5	Tmin5	Tmax5	Prec5	Srad5	Wind5	Vapr5
	Tmean6	Tmin6	Tmax6	Prec6	Srad6	Wind6	Vapr6
	Tmean7	Tmin7	Tmax7	Prec7	Srad7	Wind7	Vapr7
	Tmean8	Tmin8	Tmax8	Prec8	Srad8	Wind8	Vapr8
	Tmean9	Tmin9	Tmax9	Prec9	Srad9	Wind9	Vapr9
	Tmean10	Tmin10	Tmax10	Prec10	Srad10	Wind10	Vapr10
	Tmean11	Tmin11	Tmax11	Prec11	Srad11	Wind11	Vapr11
	Tmean12	Tmin12	Tmax12	Prec12	Srad12	Wind12	Vapr12

A altitude é expressa em metros.

Tmean: temperatura média mensal (1, 2, 3 12 = Janeiro, Fevereiro, Março, Dezembro), Tmin: temperatura mínima média mensal, Tmax: temperatura máxima média mensal, Prec: precipitação média mensal, Srad: radiação solar média mensal, Wind: velocidade do vento média mensal, Vapr: pressão de vapor da água média mensal.

Tabela 2. 2. Variáveis bioclimáticas utilizadas obtidas a partir do banco de dados do WorldClim 2 (FICK; HAJMANS, 2017).

Variáveis		Fórmula	Unidade
Bio1	Temperatura média anual	$\sum_{\text{Jan}}^{\text{Dez}} \bar{T}$	°C
Bio2	Amplitude térmica mensal média	$\sum_{\text{Jan}}^{\text{Dez}} T_{\text{max}} - T_{\text{min}} / 12$	°C
Bio3	Isotermalidade	$(\text{Bio2} / \text{Bio7}) * 100$	-
Bio4	Desvio sazonal de temperatura	$\text{Sd} (\bar{T}_{\text{Jan}}^{\text{Dez}}) * 100$	-
Bio5	Temperatura máxima do mês mais quente		°C
Bio6	Temperatura mínima do mês mais frio		°C
Bio7	Amplitude térmica anual	$\text{Bio5} - \text{Bio6}$	°C
Bio8	Temperatura média do trimestre mais chuvoso		°C
Bio9	Temperatura média do trimestre mais seco		°C
Bio10	Temperatura média do trimestre mais quente		°C
Bio11	Temperatura média do trimestre mais frio		°C
Bio12	Precipitação anual	$\sum_{\text{Jan}}^{\text{Dez}} \bar{P}$	mm
Bio13	Precipitação do mês mais chuvoso		mm
Bio14	Precipitação do mês mais seco		mm
Bio15	Variação sazonal da precipitação	$\text{CV} (\bar{P})$	-
Bio16	Precipitação do trimestre mais chuvoso		mm
Bio17	Precipitação do trimestre mais seco		mm
Bio18	Precipitação do trimestre mais quente		mm
Bio19	Precipitação do trimestre mais frio		mm

Jan: Janeiro, Dez: Dezembro, \bar{P} : precipitação média mensal, \bar{T} : temperatura média mensal, T_{max} : temperatura máxima, T_{min} : temperatura mínima, Sd: desvio padrão, CV: coeficiente de variação.

2.2.2.2. Seleção das variáveis de interesse

No intuito de reduzir o número total de variáveis utilizadas para a definição do zoneamento climático, realizou-se a seleção das variáveis de maior influência (variabilidade) na região semiárida brasileira. Para isso, a técnica estatística da análise de componentes principais (ACP) foi empregada a fim de reduzir a dimensionalidade do banco de dados WorldClim 2 (FICK; HAJMANS, 2017), composto por 104 variáveis (Tabelas 2.1 e 2.2).

A ACP é um procedimento estatístico utilizado para extrair informações relevantes

de um banco de dados multivariado a partir da transformação ortogonal para converter um conjunto de observações que podem ser variáveis correlacionadas em variáveis linearmente não correlacionadas, denominadas componentes principais (PCs). Essa conversão é conduzida de forma que o primeiro componente principal tenha a maior variância possível e cada um dos próximos PCs tenham variância menor que o PC anterior. Por fim, o banco de dados resultante produzido pela ACP é um conjunto de bases ortogonais não correlacionadas (KASSAMBARA, 2017; HAIR et al., 2009).

Anteriormente à aplicação da ACP, foi realizada a padronização da escala das variáveis visando eliminar interferências nos resultados devido às diferentes magnitudes dos dados, procedimento realizado a partir da Equação 1.

$$X_n = \frac{X_n - \text{méd}(X)}{\text{sd}(X)} \quad (1)$$

onde X_n é um valor observado em uma matriz de valores para uma dada variável X ; $\text{méd}(X)$ é o valor médio da variável X ; e $\text{sd}(X)$ é o desvio padrão da variável X .

Para a seleção do número de componentes principais, utilizou-se do critério da percentagem de variância, descrito por Hair et al. (2009). Esse critério fundamenta-se na definição de um número mínimo limite da variância total a ser extraída pelos componentes principais. No presente estudo, definiu-se que o número de PCs a serem utilizados deveria explicar, no mínimo, 90% da variância total dos dados.

Posteriormente à definição do número de PCs, a escolha das variáveis de maior influência a serem utilizadas para a definição das zonas climáticas se deu a partir do grau de correlação das mesmas com os componentes principais estabelecidos. Desse modo, foram escolhidas apenas as variáveis que apresentaram correlação (positiva ou negativa) igual ou superior a 0,80.

Essas análises foram realizadas com auxílio do software R, versão 4.0.2 (R CORE TEAM, 2020), utilizando os pacotes FactoMineR (HUSSON et al., 2020) e factoextra (KASSAMBARA; MUNDT, 2020).

2.2.2.3. Definição das zonas climáticas

De posse das variáveis climáticas de maior influência no semiárido brasileiro

definidas a partir da análise de componentes principais, realizou-se o agrupamento dos 3.611 pixels a partir da análise de clusterização hierárquica (ACH). Além dessas variáveis, as latitudes e longitudes centrais de cada pixel foram incluídas na análise a fim de se obterem zonas climaticamente homogêneas. Esses procedimentos foram realizados a partir dos pacotes Stats (BOLAR, 2019) e Dendextend (GALILI, 2020), em ambiente R.

Previamente à aplicação da ACH, também foi realizada a padronização da escala das variáveis, a partir da Equação 1. Para o agrupamento, utilizou-se como técnica hierárquica aglomerativa o método de Ward (WARD JR., 1963), conforme Praene et al. (2019), Zolfaghari et al. (2019) e Xiong et al. (2019). Como explicam Terassi e Galvani (2017), esse método permite determinar a distância entre dois grupos a partir da soma dos quadrados das distâncias entre os pontos e o centróide. Como medida de proximidade, foi utilizada a distância Euclidiana para representar a similaridade e a dissimilaridade entre as variáveis utilizadas, assim como realizado por Bai et al. (2020).

Para a definição do número ideal de zonas climáticas (clusters), utilizou-se um esquema de votação a partir de 27 índices diferentes, calculados utilizando o pacote em linguagem R NbClust (CHARRAD et al. 2014; CHARRAD et al. 2015). A partir de diferentes metodologias, cada um desses índices determina o número mais relevante de agrupamentos (NRA) para um determinado banco de dados.

De posse do número total de zonas, cada um dos pixels teve sua zona especificada, o que possibilitou a demarcação espacial de cada zona a partir dos pixels que a compõe. Por fim, uma suavização das arestas no contorno de cada zona foi realizada para uma melhor representação da delimitação dos zoneamentos, a partir do comando Line Smoothing do software de geoprocessamento QGIS versão 3.4.

2.2.3. Caracterização das zonas climáticas

2.2.3.1. Dados de estações climatológicas

Os dados utilizados para a caracterização das zonas climáticas definidas para o semiárido brasileiro consistiram de arquivos climáticos desenvolvidos por Roriz (2012c), com base em dados de 2000 a 2010, oriundos de estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Esses arquivos contém um ano de dados médios que representam as características climáticas de um local específico, sem considerar os extremos

de temperatura.

Esses dados estão disponíveis em formato Energy Plus Weather file (.EPW), em escala horária, e são usualmente utilizados para a realização de simulações termo energéticas. Para o presente estudo, foram utilizados 84 arquivos .EPW, cuja a distribuição espacial está apresentada na Figura 1a. Dentre as variáveis contidas nos mesmos, foram utilizados os dados de temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de bulbo úmido (TBU) e umidade relativa (UR) para a caracterização das zonas climáticas estabelecidas. O download desses arquivos foi realizado, gratuitamente, através da plataforma OneBuilding (<http://climate.onebuilding.org/>).

2.2.3.2. Definição de estratégias construtivas de condicionamento térmico

Após a delimitação da área de abrangência de cada zona climática, os dados de TBS, TBU e UR horários de todas as estações inseridas geograficamente em cada zona foram agrupados e sobrepostos à carta psicrométrica apresentada por Lamberts, Dutra e Pereira (2014). Essa carta, representada na Figura 2.2, consiste em uma adaptação com aplicabilidade para as condições climáticas de países em desenvolvimento, obtida a partir da versão original proposta por Givoni (1992). A partir dessa carta psicrométrica, foram definidos os percentuais horários das estratégias de condicionamento térmico mais adequadas ao semiárido brasileiro.

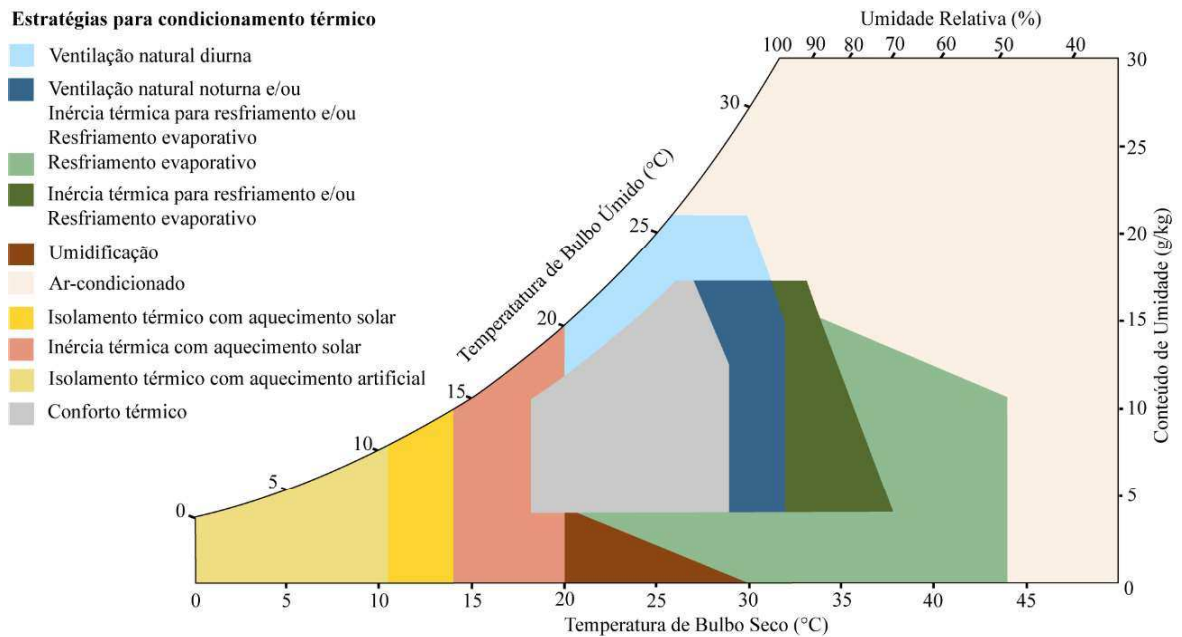


Figura 2. 2. Carta psicrométrica adaptada de Givoni (1992) com aplicabilidade para as condições climáticas de países em desenvolvimento.

Como explica Givoni (1992), cartas psicrométricas facilitam a análise das características climáticas de uma determinada localidade a partir do ponto de vista do conforto térmico humano. Ademais, especificam soluções construtivas na tentativa de maximizar as condições de conforto interno quando a edificação não é ventilada artificialmente. Cartas psicrométricas como as adaptadas a partir da proposta por Givoni (1992) vêm sendo amplamente utilizadas para a avaliação da eficiência energética de edificações e auxiliam na caracterização de zonas climáticas, como destacam Walsh, Cóstola e Labaki. (2017).

As cartas psicrométricas são estruturadas em torno da “zona de conforto térmico”, como exemplificado na Figura 2.2. 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, estratégias construtivas passivas são indicadas para obtenção de melhores condições térmicas, tais como o emprego de ventilação natural diurna e noturna, resfriamento evaporativo, umidificação, inércia térmica para resfriamento, inércia térmica com aquecimento solar e isolamento térmico com aquecimento solar. Ademais, a necessidade do uso de ar condicionado e de aquecimento artificial também é indicada na carta.

2.2.3.3. Análise de índices térmicos

No intuito de ampliar a caracterização das zonas climáticas definidas, dois índices térmicos foram calculados para as 84 estações climatológicas inseridas no semiárido brasileiro. Inicialmente, foram obtidos valores do índice de calor (IC) a fim de evidenciar uma maior ou menor necessidade de adaptação das edificações com base nos níveis de exposição dos usuários a condições extremas de temperatura e umidade relativa. Além disso, o indicador térmico de graus-hora (GH) foi utilizado com o objetivo de avaliar a demanda por aquecimento e resfriamento das zonas climáticas. Para ambos os índices, os valores foram calculados em escala horária.

O IC é um índice que combina temperatura do ar e umidade relativa para determinar uma temperatura aparente, ou seja, representa a percepção que um indivíduo tem quanto ao calor em um ambiente. Como explicam Blazejczyk et al. (2012), quando a umidade é alta, a taxa de evaporação de água é reduzida, o que significa que o calor é removido do corpo em uma taxa menor, fazendo com que se retenha mais calor comparado à condição de ar seco.

Diversos algoritmos foram desenvolvidos para calcular o IC em função da temperatura do ar e da umidade relativa com base na teoria apresentada por Steadman (1984). Para o presente estudo, utilizou-se o algoritmo desenvolvido pelo Serviço Meteorológico dos Estados Unidos (NWS) (NWS, 2020) que, como demonstrado por Anderson, Peng e Ferreri (2013), apresentou o melhor ajuste aos valores da tabela de Steadman. Variáveis como radiação solar, vento, resistência térmica do vestuário, fisiologia humana e atividade física são implicitamente assumidos no índice de calor do NWS (ROTHFUSZ; HEADQUATERS, 1990) e, embora tenha sido projetado inicialmente para condições ao ar livre, esse índice tem sido utilizado também para a avaliação de ambientes internos (JACKLITSCH et al., 2016; FEITOSA; WILKINSON, 2018).

De acordo com NWS (2020), os valores obtidos de IC consideram condições de sombreamento e são categorizados em relação a possíveis distúrbios acarretados pelo excesso de calor nos indivíduos, como apresentado na Tabela 2.3. O cálculo do IC foi realizado a partir dos dados de TBS e UR utilizando o pacote *weathermetrics* (ANDERSON; BELL; PENG, 2013; ANDERSON; PENG; FERRERI, 2016), em ambiente R.

Tabela 2. 3. Categorias para a classificação dos valores do índice de calor e os possíveis distúrbios fisiológicos nos indivíduos (NWS, 2020).

Índice de calor (°C)	Categoria	Possíveis distúrbios de calor para pessoas
27–32	Atenção	Possível fadiga por exposição prolongada e/ou atividade física
32–41	Extrema atenção	Possível insolação, cãibras ou exaustão por exposição prolongada ao calor e/ou atividade física
41–54	Perigo	Prováveis cãibras ou exaustão e possível insolação por exposição prolongada ao calor e/ou atividade física
≥55	Extremo perigo	Insolação altamente provável

Como outro índice térmico a ser utilizado, o indicador de graus-hora é obtido a partir da diferença entre a temperatura do ar ambiente ou externo e uma temperatura de referência, também conhecida como temperatura de base. Dessa forma, foram calculadas as demandas horárias por resfriamento e aquecimento utilizando os dados de TBS, a partir das Equações 2 e 3, respectivamente.

$$GHR = \sum T_i - T_{b1} \quad (2)$$

$$GHA = \sum T_{b2} - T_i \quad (3)$$

onde GHR é graus-hora de resfriamento (°C); GHA é graus-hora de aquecimento (°C); T_i é a temperatura do ar externo na hora i do dia (°C); T_{b1} é temperatura de base para resfriamento (°C); T_{b2} é temperatura de base para aquecimento (°C).

Como explica Mourshed (2012), a temperatura de base é definida como a temperatura do ar na qual os sistemas de aquecimento ou resfriamento não necessitam funcionar para que sejam mantidas as condições de conforto térmico. Para o presente estudo a temperatura de base para resfriamento adotada foi de 26°C, conforme estabelecido por INMETRO (2012). Como temperatura de base para aquecimento foi adotado o valor de 18 °C, valor também utilizado por Melo et al. (2012) e Balvedi et al. (2018).

2.2.4 Fluxograma da metodologia utilizada

Em resumo, a metodologia, inicialmente, objetivou a definição do zoneamento climático. Para isso, foram aplicadas técnicas estatísticas para a seleção das variáveis de

maior relevância e para a definição espacial das zonas. Posteriormente, realizou-se a caracterização das zonas climáticas por meio da definição de estratégias construtivas e da análise de índices térmicos (Figura 2.3).

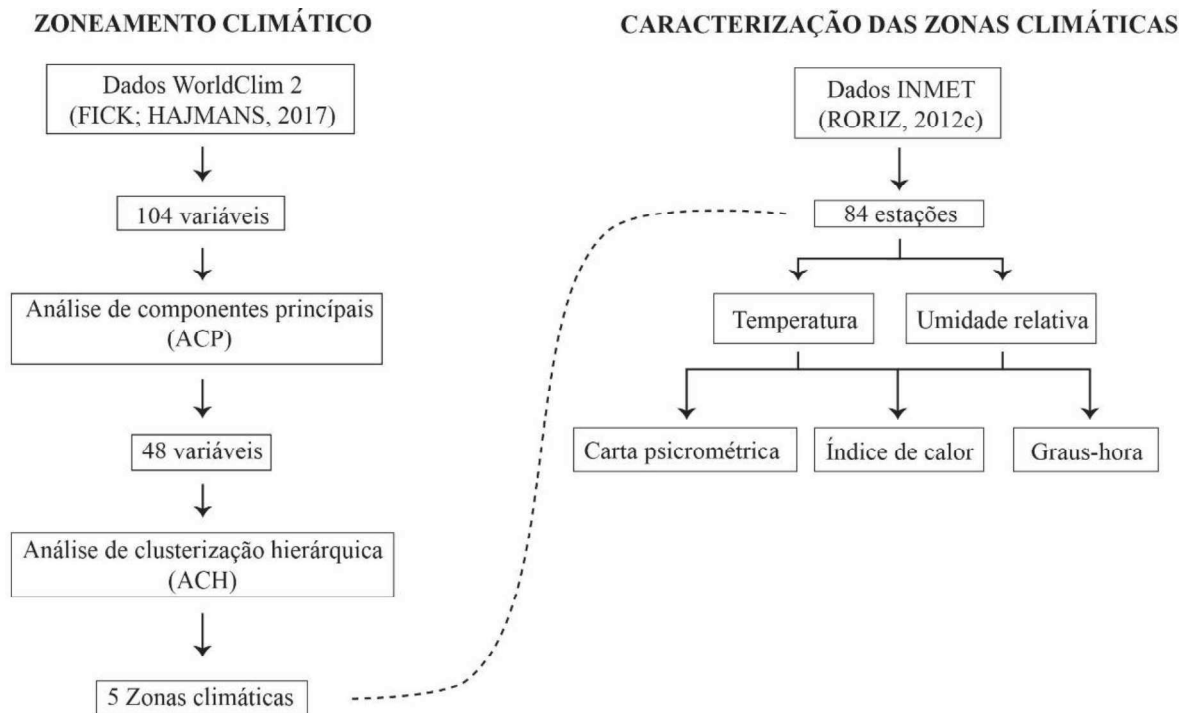


Figura 2. 3. Fluxograma da metodologia utilizada.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Seleção das variáveis de interesse

A técnica de análise de componentes principais (ACP) permitiu a redução da dimensionalidade do banco de dados inicial e a definição das variáveis de maior influência no zoneamento climático proposto para o semiárido brasileiro. Na Figura 2.4a está apresentado o percentual de variância explicado pelos componentes principais (PCs) gerados, a partir da qual pode-se observar que o PC1 e o PC2 juntos explicam mais da metade da variabilidade total dos dados, cerca de 47,4 e 24,6%, respectivamente.

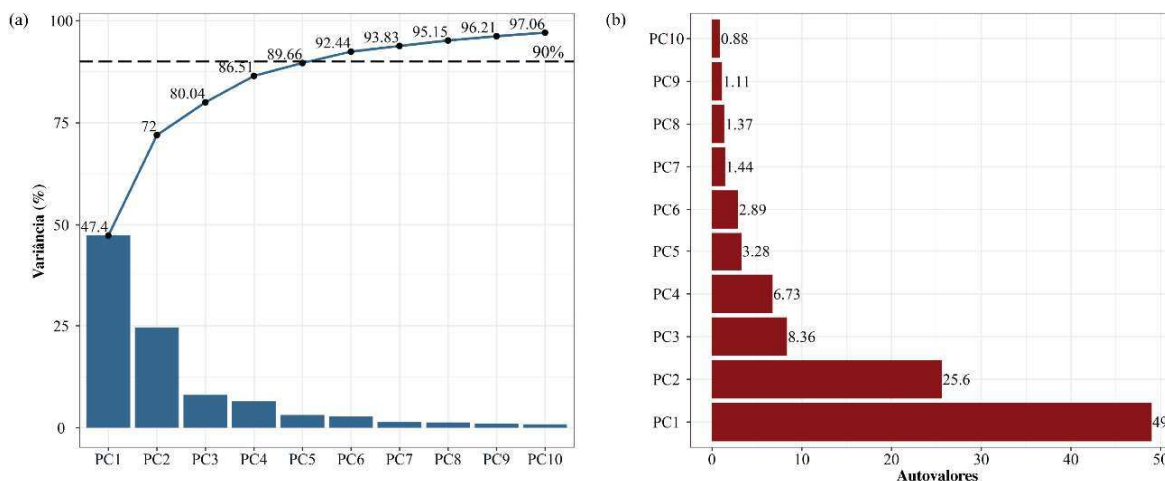


Figura 2. 4. (a) Percentual de variância explicada e variância acumulada, e (b) autovalores para os dez primeiros componentes principais (PCs).

Em relação aos autovalores observados para os dez primeiros componentes principais, apresentados na Figura 2.4b, constata-se que do PC1 ao PC9 os autovalores contêm magnitudes superiores à unidade. Autovalores representam a quantidade de variação explicada por cada componente principal (Hair et al., 2009) e, como aponta Kassambara (2017), PCs com autovalores maiores que um apresentam significância prática na medida que explicam uma variância superior àquela representada por uma única variável padronizada. Apesar disso, pode-se perceber que, assim como para os valores de variância (Figura 2.4a), os autovalores do PC1 e do PC2 destacam-se em relação aos demais, sendo, respectivamente, cinco e três vezes maiores que o autovalor do PC3.

Baseado no critério de seleção do número de componentes principais definido anteriormente, o número de PCs a serem utilizados deveria explicar, no mínimo, 90% da variância total dos dados. Dessa forma, somente os seis primeiros componentes principais foram selecionados para a análise das variáveis, totalizando 92,44% da variância (Figura 2.4a). Na Tabela 2.4 está apresentada a correlação do conjunto total de variáveis com os seis primeiros PCs, com destaque para as variáveis que apresentaram correlação (positiva ou negativa) iguais ou superiores a 0,80.

Tabela 2. 4. Correlação entre as 104 variáveis utilizadas para zoneamento climático e os seis primeiros componentes principais (PCs).

Variável	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	Variável	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Bio1	0,98	-0,10	-0,07	0,11	0,02	-0,02	Tmean9	0,90	-0,41	-0,02	-0,01	0,07	0,02
Bio2	-0,07	-0,87	-0,23	0,18	0,18	0,15	Tmean10	0,91	-0,36	-0,09	0,09	0,06	0,00
Bio3	0,60	-0,06	-0,42	-0,35	0,01	-0,12	Tmean11	0,97	-0,09	-0,11	0,12	-0,06	-0,03
Bio4	-0,66	0,26	0,09	0,48	-0,07	-0,09	Tmean12	0,96	0,10	-0,10	0,13	-0,06	-0,08
Bio5	0,80	-0,50	-0,12	0,21	0,03	0,13	Tmax1	0,86	-0,03	-0,26	0,32	0,01	-0,07
Bio6	0,88	0,39	-0,01	-0,09	-0,16	-0,07	Tmax2	0,72	-0,05	-0,28	0,52	0,11	-0,08
Bio7	-0,26	-0,84	-0,09	0,27	0,20	0,18	Tmax3	0,66	-0,13	-0,25	0,62	0,19	0,02
Bio8	0,86	-0,12	-0,22	0,24	0,14	-0,21	Tmax4	0,73	-0,38	-0,20	0,45	0,20	0,11
Bio9	0,97	0,12	-0,03	-0,05	-0,08	0,10	Tmax5	0,75	-0,55	-0,12	0,21	0,17	0,12
Bio10	0,97	-0,08	-0,03	0,19	-0,03	-0,03	Tmax6	0,78	-0,57	-0,09	0,06	0,13	0,08
Bio11	0,98	-0,16	-0,05	-0,04	0,00	0,01	Tmax7	0,78	-0,57	-0,05	-0,04	0,11	0,07
Bio12	0,20	-0,32	0,73	-0,37	0,23	0,21	Tmax8	0,73	-0,65	-0,03	-0,06	0,12	0,05
Bio13	0,43	-0,32	0,41	-0,57	0,24	-0,01	Tmax9	0,71	-0,67	-0,08	0,01	0,12	0,06
Bio14	-0,33	0,55	0,54	0,21	-0,21	0,02	Tmax10	0,77	-0,56	-0,19	0,09	0,06	0,05
Bio15	0,49	-0,39	-0,35	-0,44	0,21	-0,12	Tmax11	0,90	-0,23	-0,23	0,13	-0,11	0,02
Bio16	0,38	-0,37	0,47	-0,54	0,28	0,05	Tmax12	0,92	-0,05	-0,24	0,18	-0,11	-0,02
Bio17	-0,32	0,56	0,54	0,21	-0,24	0,02	Tmin1	0,91	0,33	0,06	0,08	0,01	-0,16
Bio18	-0,69	-0,30	0,21	0,20	0,39	-0,03	Tmin2	0,90	0,33	0,07	0,13	0,01	-0,15
Bio19	0,32	0,50	0,43	-0,25	-0,10	0,13	Tmin3	0,89	0,37	0,08	0,13	0,04	-0,13
Altitude	-0,86	-0,34	-0,21	-0,25	-0,02	0,11	Tmin4	0,90	0,39	0,03	0,07	-0,02	-0,08
Prec1	-0,08	-0,83	0,37	-0,17	0,23	0,03	Tmin5	0,89	0,40	0,00	-0,01	-0,14	-0,04
Prec2	0,47	-0,55	0,33	-0,45	0,05	0,11	Tmin6	0,87	0,44	-0,02	-0,06	-0,17	-0,05
Prec3	0,71	-0,15	0,20	-0,56	-0,04	0,00	Tmin7	0,88	0,40	-0,01	-0,08	-0,16	-0,06
Prec4	0,73	0,20	0,23	-0,55	-0,09	0,03	Tmin8	0,92	0,26	0,03	-0,07	-0,13	-0,06
Prec5	0,50	0,60	0,38	-0,36	-0,01	0,11	Tmin9	0,96	0,06	0,07	-0,03	-0,03	-0,04
Prec6	0,11	0,81	0,38	-0,01	-0,04	0,30	Tmin10	0,96	-0,03	0,07	0,08	0,04	-0,07
Prec7	-0,03	0,77	0,39	0,10	-0,08	0,37	Tmin11	0,96	0,09	0,06	0,09	0,00	-0,10
Prec8	-0,20	0,66	0,47	0,22	-0,13	0,34	Tmin12	0,92	0,27	0,07	0,07	-0,01	-0,15
Prec9	-0,43	0,30	0,69	0,23	0,01	0,27	Vapr1	0,69	0,29	0,51	0,20	0,25	0,03
Prec10	-0,55	-0,59	0,41	0,15	0,33	0,02	Vapr2	0,76	0,33	0,45	0,18	0,14	0,01
Prec11	-0,52	-0,68	0,26	0,16	0,36	0,02	Vapr3	0,84	0,30	0,32	0,19	0,07	0,03
Prec12	-0,46	-0,74	0,28	0,10	0,33	0,01	Vapr4	0,88	0,35	0,23	0,08	0,05	0,03
Srad1	-0,51	0,67	0,08	0,36	0,12	0,09	Vapr5	0,84	0,45	0,20	0,02	-0,03	0,05
Srad2	-0,45	0,66	-0,02	0,43	0,14	0,14	Vapr6	0,73	0,63	0,15	-0,03	0,00	-0,01
Srad3	-0,47	0,57	-0,14	0,42	0,25	0,23	Vapr7	0,63	0,71	0,15	-0,07	0,03	-0,06
Srad4	-0,03	-0,02	-0,30	0,31	0,31	0,71	Vapr8	0,55	0,74	0,24	-0,07	0,06	-0,09
Srad5	0,59	-0,47	-0,12	-0,07	0,11	0,53	Vapr9	0,48	0,73	0,33	-0,02	0,15	-0,14
Srad6	0,67	-0,55	-0,05	-0,26	0,00	0,35	Vapr10	0,47	0,55	0,53	0,03	0,29	-0,09
Srad7	0,71	-0,50	-0,02	-0,29	-0,02	0,33	Vapr11	0,53	0,26	0,62	0,19	0,29	0,04
Srad8	0,74	-0,44	-0,03	-0,33	-0,03	0,26	Vapr12	0,54	0,32	0,59	0,21	0,34	0,04
Srad9	0,79	-0,03	-0,23	-0,34	-0,12	0,38	Wind1	-0,04	0,87	-0,32	-0,22	0,23	0,02
Srad10	0,59	0,40	-0,32	-0,30	-0,20	0,40	Wind2	-0,34	0,78	-0,32	-0,09	0,37	0,00
Srad11	0,45	0,65	-0,32	-0,11	-0,25	0,32	Wind3	-0,47	0,72	-0,33	0,03	0,28	0,04
Srad12	0,22	0,82	-0,21	0,01	-0,20	0,29	Wind4	-0,37	0,74	-0,42	0,02	0,15	0,12
Tmean1	0,94	0,17	-0,10	0,21	0,01	-0,12	Wind5	-0,29	0,72	-0,45	0,03	0,15	0,20
Tmean2	0,89	0,17	-0,10	0,34	0,07	-0,12	Wind6	-0,11	0,82	-0,43	0,02	0,03	0,20
Tmean3	0,88	0,15	-0,08	0,41	0,12	-0,07	Wind7	-0,15	0,81	-0,43	-0,02	0,15	0,23

Variável	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	Variável	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Tmean4	0,94	0,02	-0,09	0,29	0,10	0,01	Wind8	-0,08	0,81	-0,28	-0,27	0,39	-0,04
Tmean5	0,98	-0,08	-0,07	0,11	0,02	0,04	Wind9	0,04	0,80	-0,36	-0,29	0,33	0,06
Tmean6	0,99	-0,07	-0,06	0,00	-0,03	0,02	Wind10	-0,05	0,76	-0,29	-0,39	0,39	-0,14
Tmean7	0,98	-0,13	-0,04	-0,07	-0,02	0,01	Wind11	0,09	0,61	-0,22	-0,51	0,44	-0,24
Tmean8	0,94	-0,29	0,00	-0,07	0,01	0,01	Wind12	0,06	0,64	-0,29	-0,47	0,42	-0,20

Os valores em negrito têm correlação considerada significativa ($\geq|0.8|$).

Embora os seis primeiros componentes principais tenham sido considerados para a escolha das variáveis de maior importância (variabilidade) no semiárido brasileiro, percebeu-se que valores de correlação considerados significativos ($\geq|0.8|$) foram observados apenas nos dois primeiros PCs. Do conjunto total de 104 variáveis, constatou-se que 38 apresentaram correlação significativa com PC1, enquanto 10 variáveis mostraram-se significativas para o PC2. Os valores de correlação entre os dois componentes principais mais relevantes, PC1 e PC2, e as 104 variáveis analisadas estão apresentados graficamente na Figura 2.5.

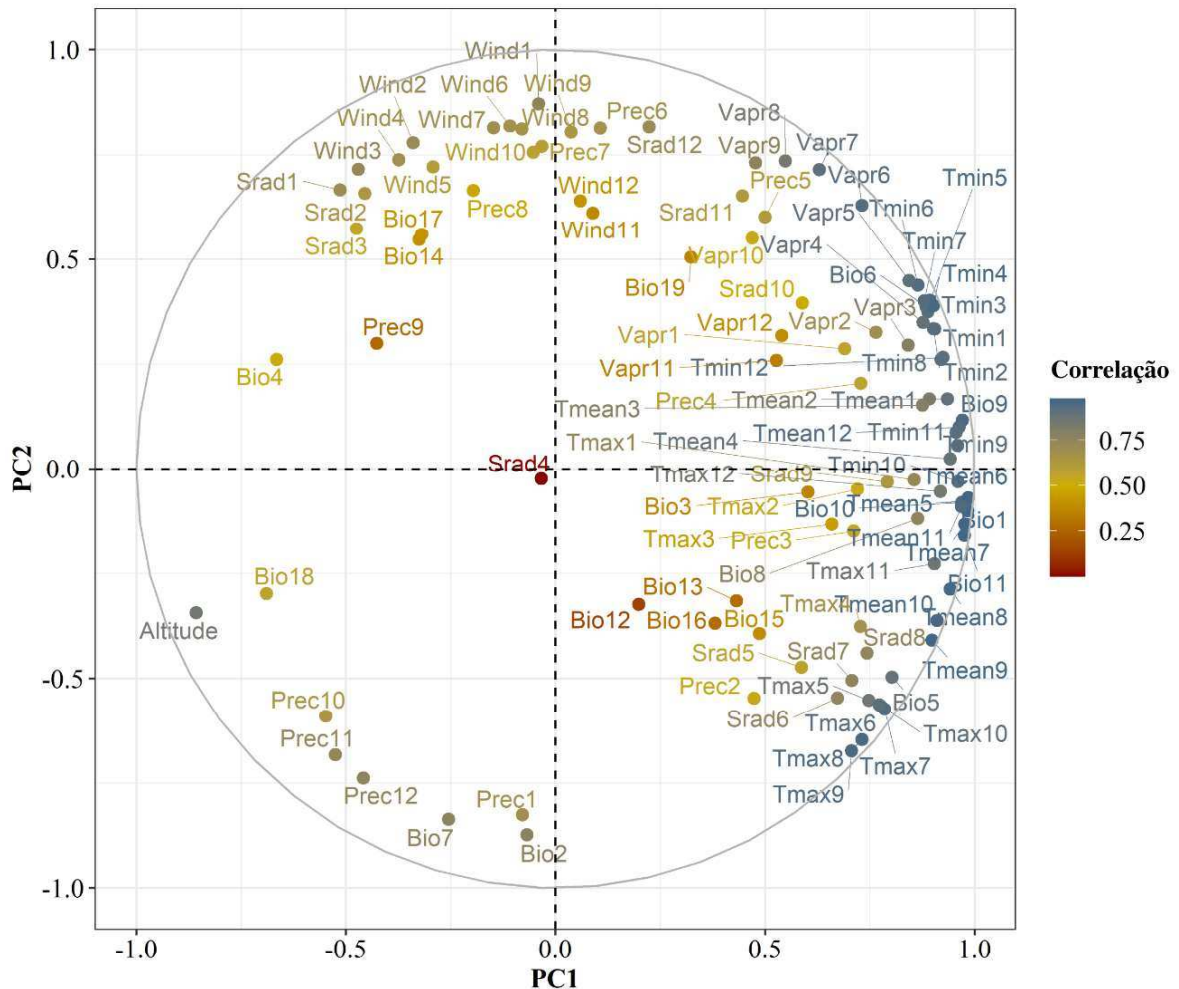


Figura 2. 5. Gráfico biplot dos valores de correlação entre os componentes principais 1 e 2 e as 104 variáveis analisadas.

No gráfico biplot apresentado na Figura 2.5, as variáveis localizadas adjacentes à delimitação da circunferência possuem correlação, positiva ou negativa, próxima à unidade e apresentam maior correlação entre si quando contíguas umas às outras. Desse modo, constatou-se que as maiores correlações positivas para o PC1 e para o PC2, estão relacionadas às variáveis temperatura e velocidade do vento, respectivamente. Em contrapartida, a variável altitude foi a que apresentou maior correlação inversa com o PC1, enquanto para o PC2 maior correlação negativa foi observada para as variáveis amplitude térmica diária (Bio2) e anual (Bio7).

Quanto às variáveis localizadas mais próximas ao centro da circunferência, a radiação solar de abril, a precipitação de setembro e as precipitações anual (Bio12), do mês mais chuvoso (Bio13), sazonal (Bio15) e do trimestre mais chuvoso (Bio16) caracterizam-se como as variáveis de menor relevância para o zoneamento climático do semiárido

brasileiro. A menor importância dessas variáveis pode estar relacionada ao fato de a região semiárida estar localizada, em sua maioria, em áreas com baixas latitudes, além de apresentar reduzidos índices pluviométricos (BRASIL, 2020; ALVARES et al., 2013).

Na Tabela 2.5 estão apresentadas as 48 variáveis selecionadas a partir da análise de componentes principais por terem apresentado valor de correlação com os PCs superior a 0,8, em módulo. Dentre essas, destaca-se a relevância das temperaturas médias e mínimas para todos os meses, além das temperaturas máximas de janeiro, novembro e dezembro. Salienta-se ainda que, das variáveis bioclimáticas selecionadas, todas estão relacionadas à temperatura, ratificando a importância dessa variável na definição de zonas climáticas, assim como proposto por Roriz (2014).

Tabela 2. 5. Variáveis selecionadas a partir da análise de componentes principais para o zoneamento climático do semiárido brasileiro.

Variáveis selecionadas					
1. Bio1	9. Bio11	17. Tmean1	25. Tmean9	33. Tmin5	41. Vapr3
2. Bio2	10. Altitude	18. Tmean2	26. Tmean10	34. Tmin6	42. Vapr4
3. Bio5	11. Prec1	19. Tmean3	27. Tmean11	35. Tmin7	43. Vapr5
4. Bio6	12. Prec6	20. Tmean4	28. Tmean12	36. Tmin8	44. Wind1
5. Bio7	13. Srad12	21. Tmean5	29. Tmin1	37. Tmin9	45. Wind6
6. Bio8	14. Tmax1	22. Tmean6	30. Tmin2	38. Tmin10	46. Wind7
7. Bio9	15. Tmax11	23. Tmean7	31. Tmin3	39. Tmin11	47. Wind8
8. Bio10	16. Tmax12	24. Tmean8	32. Tmin4	40. Tmin12	48. Wind9

A contribuição do conjunto total de variáveis selecionadas na composição da resposta explicativa do PC1 e do PC2 está apresentada, em ordem decrescente, na Figura 2.6. Para o PC1, quando observados os valores superiores à contribuição média, destacam-se os percentuais das variáveis de temperatura do segundo semestre. Em relação ao PC2, as variáveis amplitude térmica diária (Bio2) e amplitude térmica anual (Bio7) apresentaram grande contribuição, apesar de possuírem correlação negativa com esse componente principal (Tabela 2.4 e Figura 2.5). Ressalta-se ainda a alta contribuição da velocidade do vento em janeiro (Wind1) quando comparada aos percentuais observados para as velocidades do vento nos demais meses.

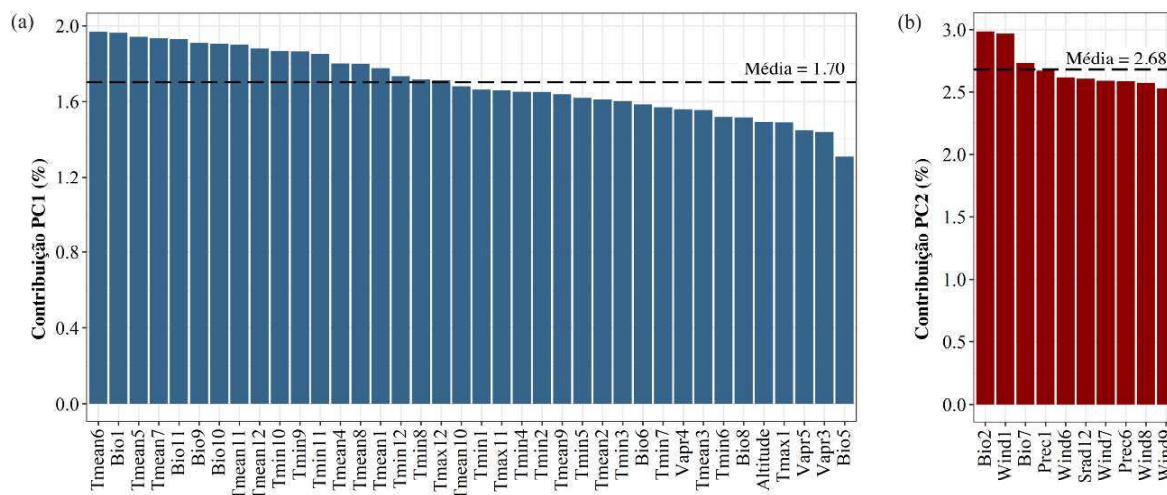


Figura 2. 6. Contribuição percentual do conjunto total de variáveis selecionadas na composição da resposta explicativa do (a) PC1 e (b) PC2.

2.3.2 Definição e caracterização das zonas climáticas

De posse da definição das variáveis de interesse obtidas a partir da análise de componentes principais, a análise de clusterização hierárquica (ACH) possibilitou o agrupamento dos 3.611 pixels abrangendo a região semiárida no intuito de definir zonas climaticamente homogêneas. Com base no esquema de votação a partir do uso de 27 índices para a definição do número mais relevante de agrupamentos (NRA), constatou-se que a quantidade ideal de zonas climáticas para a região semiárida brasileira é cinco (Tabela 2.6).

Tabela 2. 6. Número mais relevante de agrupamentos (NRA) sugerido pelos 27 índices utilizados.

Index	KL ^a	CH ^b	Ball ^c	Beale ^d	CCC ^e	Cindex ^f	DB ^g
NRA	10	2	3	3	5	12	5
Valor	5.4491	2929.5762	24318.47	-6.5383	-8.7687	0.2851	1.0435
Index	Dindex ^h	Duda ⁱ	Dunn ^j	Frey ^k	Friedman ^l	Gap ^m	Hartigan ⁿ
NRA	5	3	10	1	4	2	5
Valor	0	1.2255	0.0242	NA	3.68E+13	0.0804	499.9271
Index	Hubert ^o	Marriot ^p	McClain ^q	PseudoT2 ⁱ	PtBiserial ^r	Ratkowsky ^s	Rubin ^l
NRA	3	5	2	3	3	2	10
Valor	0	1.44E+39	0.611	-312.0654	0.537	0.4345	-0.3375
Index	Scott ^t	SDBw ^u	Sdindex ^v	Silhouette ^w	TraceW ^x	TrCovW ^x	
NRA	5	12	5	2	5	4	
Valor	6000.14	0.2059	0.5348	0.3583	7311.682	19714514	

^a Krzanowski e Lai (1988). ^b Calinski e Harabasz (1974). ^c Ball e Hall (1965). ^d Beale (1969). ^e Sarle (1983). ^f Hubert e Levin (1976). ^g Davies e Bouldin (1979). ^h Lebart et al. (2000). ⁱ Duda et al. (1973). ^j Dunn (1974). ^k Frey e Van Groenewoud (1972). ^l Friedman e Rubin (1967). ^m Tibshirani et al. (2001). ⁿ Hartigan (1975). ^o Hubert e Arabie (1985). ^p Marriot (1971). ^q McClain e Rao (1975). ^r Milligan (1981). ^s Ratkowsky e Lance (1978). ^t Scott e Symons (1971). ^u Halkidi e Vazirgiannis (2001). ^v Halkidi et al. (2000). ^w Rousseeuw (1987). ^x Milligan e Cooper (1985).

Na Figura 2.7a está apresentada a distribuição espacial das cinco zonas climáticas definidas para a região semiárida brasileira. A Zona 3 se constitui como a maior zona definida, ocupando cerca de 33,3% da área total do semiárido e está inserida no nordeste dessa região. Em contrapartida, as Zonas 1 (norte) e 5 (sudeste) caracterizam-se como as de menor abrangência espacial, correspondendo a 13,9 e 13,8% da região semiárida, respectivamente. Destaca-se ainda que a Zona 1 ocupa a maior parte da zona costeira norte do Brasil, enquanto a Zona 4 se caracteriza como a zona mais continental quando comparada às demais.

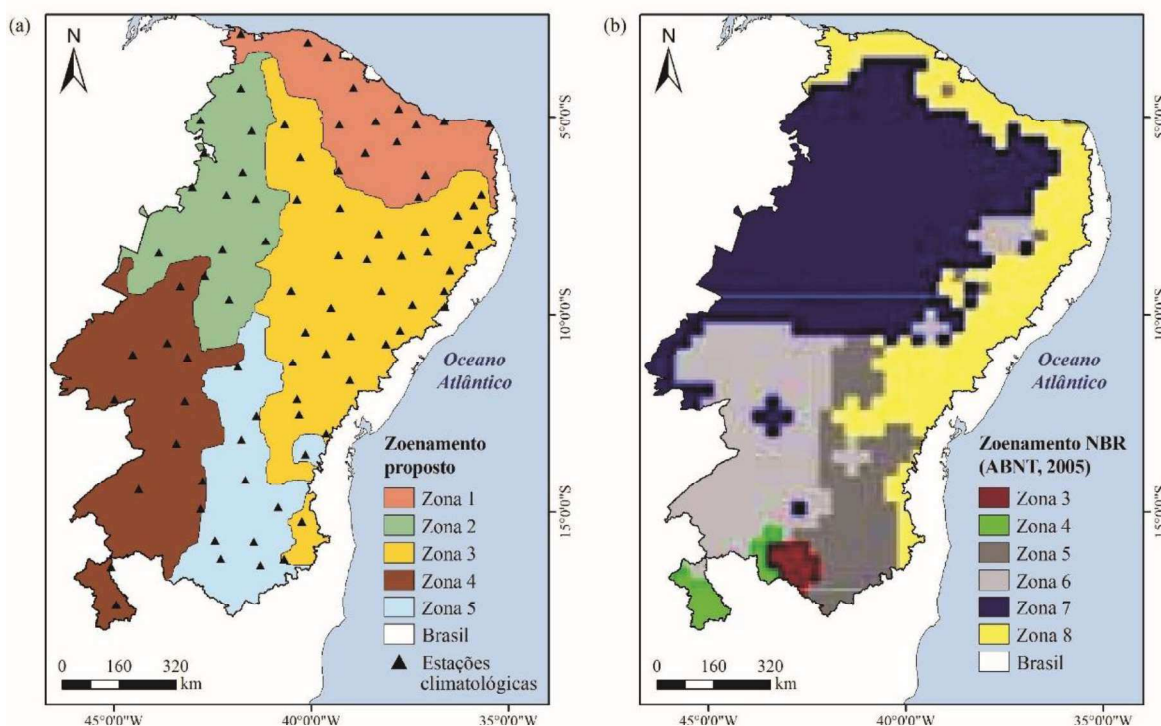


Figura 2. 7. (a) Distribuição espacial das zonas climáticas definidas para o semiárido brasileiro bem como as estações climatológicas inseridas nas mesmas. (b) Mapa com o zoneamento climático proposto na NBR15220 (ABNT, 2013), para a região semiárida.

Comparado ao zoneamento proposto pela NBR15220 (ABNT, 2003), o zoneamento apresentado pelo presente estudo para a região semiárida apresentou uma zona a menos (Figura 2.7b). No que concerne à localização espacial das zonas, a Zona 7 apresentada pela norma abrange parte dos territórios inseridos nas Zonas 1, 2 e 3 do zoneamento proposto neste estudo. Além disso, na NBR15220 (ABNT, 2003) a Zona 8, localizada no litoral norte e no leste da região semiárida, contempla parte das Zonas 1 e 3 do presente estudo. Por fim, as Zonas 3, 4, 5 e 6 apresentadas na norma ao sul do território semiárido estão agrupadas nas Zonas 4 e 5 no zoneamento proposto neste estudo.

2.3.2.1 Caracterização climática

A caracterização climática realizada a partir do agrupamento dos dados horários oriundos das estações climatológicas inseridas em cada uma das cinco zonas definidas estão apresentadas, em escala anual e mensal, nas Figuras 2.8 e 2.9, respectivamente. De maneira geral, não foram observadas diferenças expressivas entre as zonas estabelecidas quando analisados os valores médios anuais das temperaturas de bulbo seco (TBS) e bulbo úmido

(TBU), bem como da umidade relativa (UR). Considerando as TBS e TBU registradas ao longo de todo o ano, as Zonas 1 e 2 são caracterizadas por apresentarem os maiores valores médios dessas variáveis. De modo contrário, as Zonas 4 e 5 foram as que apresentaram os menores valores médios de TBU e TBS, respectivamente.

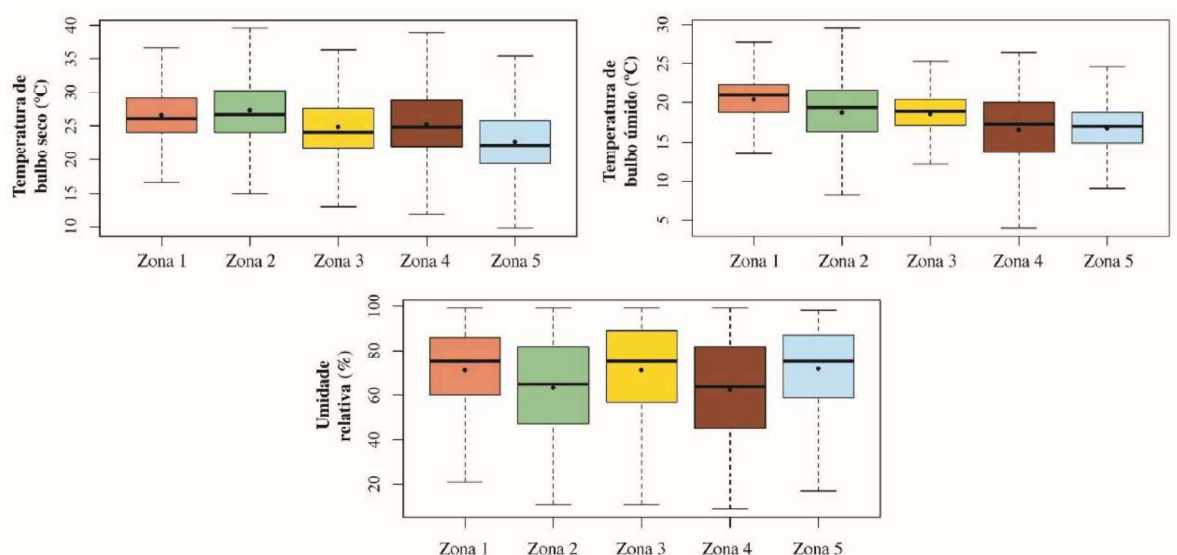


Figura 2. 8. Boxplot das temperaturas de bulbo seco e úmido, e da umidade relativa para as diferentes zonas climáticas definidas.

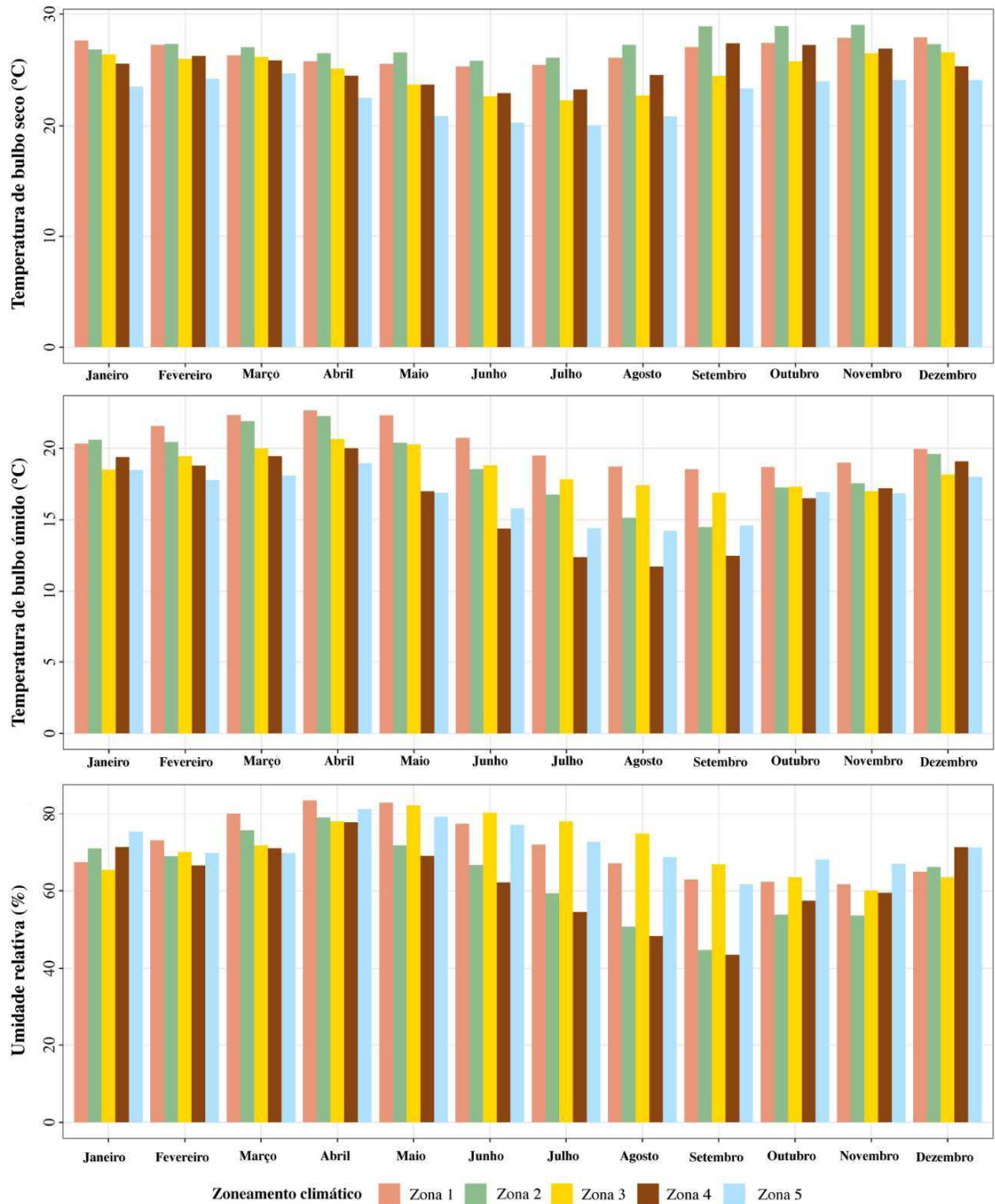


Figura 2. 9. Temperaturas de bulbo seco e úmido, e umidades relativas médias mensais para as diferentes zonas climáticas definidas.

Em relação à umidade relativa, as Zonas 2 e 4 apresentaram-se semelhantes em termos médios anuais, com valores inferiores aos observados nas Zonas 1, 3 e 5. Esse aspecto pode estar relacionado ao fato de as Zonas 2 e 4 estarem localizadas de modo mais

continental (mais afastadas da costa), o que reduz o efeito da maritimidade característico da faixa litorânea do nordeste brasileiro, como evidenciam Pereira e Nascimento (2020) e Silva Júnior et al. (2017). Destaca-se ainda que a Zona 4 apresentou as maiores amplitudes em relação aos valores das três variáveis analisadas, caracterizando-se como a região climaticamente mais heterogênea (Figura 2.8).

Apesar das semelhanças em relação ao comportamento médio anual das variáveis TBS, TBU e UR entre as zonas definidas, a diferenciação proposta a partir da análise de clusterização hierárquica é evidenciada pela variação nos padrões dessas variáveis em escala mensal (Figura 2.9). De maneira geral, um maior contraste sazonal foi observado para as variáveis TBU e UR, quando comparados à TBS, que apresentou menores alterações ao longo do ano. Assim como para a TBS média anual, as Zonas 1 e 2 apresentam as maiores magnitudes de TBS mensais, enquanto a Zona 5 é caracterizada pelas menores temperaturas de bulbo seco em todos os meses.

No que concerne aos valores mensais de TBU e UR, as Zonas 2 e 4 apresentaram as maiores variabilidades intra-anuais. Diferenças mensais de TBU na ordem de 7,74 e 8,28 °C são observadas nas Zonas 2 e 4, respectivamente. Essas mesmas zonas são caracterizadas ainda por apresentarem os meses de inverno mais secos. Em contrapartida, as Zonas 1, 3 e 5 apresentaram as menores variabilidades intra-anuais, bem como altos valores de UR mesmo durante o inverno. Esse fato está relacionado a um maior efeito da maritimidade observado nessas zonas (Pereira e Nascimento, 2020), o que reduz o impacto das variações de temperatura e umidade relativa nas edificações.

2.3.2.2 Estratégias construtivas de condicionamento térmico

A sobreposição dos dados de TBS, TBU e UR à carta psicrométrica adaptada de Givoni (1992) possibilitou a definição das estratégias construtivas demandadas à cada uma das zonas climáticas definidas. Desse modo, o percentual de horas anuais de ocorrência de conforto e de demanda por estratégias de condicionamento térmico foi estabelecido para cada zona, como apresentado na Figura 2.10.

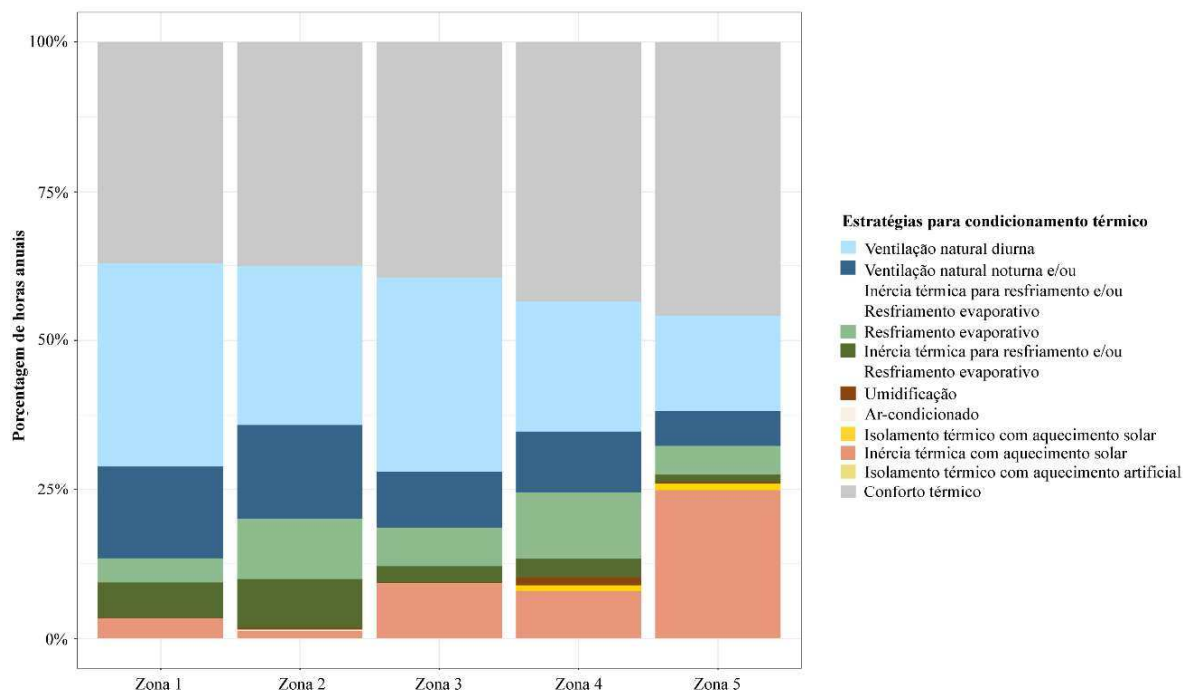


Figura 2. 10. Percentual de horas anuais de ocorrência de conforto e de demanda por estratégias de condicionamento térmico para cada zona climática.

Ao analisar os percentuais de ocorrência de conforto térmico para as zonas climáticas definidas, observou-se que o maior percentual ocorreu para a Zona 5 (45,9%), enquanto os menores percentuais foram observados para as Zonas 1 e 2, na ordem de 37,1 e 37,6%, respectivamente. A pequena diferenciação em relação ao percentual de horas de conforto, mostrou que nenhuma das zonas apresentou condições climáticas que suprimissem a necessidade de estratégias construtivas adicionais afim de ampliar o percentual anual de horas de conforto. Frente a isso, fica nítida a alta demanda por estratégias de condicionamento térmico em todas as zonas climáticas definidas para a região semiárida brasileira.

A estratégia de ventilação natural diurna é demandada para as cinco zonas estabelecidas, sendo requerida para 33,9 e 32,4% das horas anuais observadas para as Zonas 1 e 3, respectivamente. Como explicam Aflaki et al. (2015) e Zheng et al. (2018), o uso de ventilação natural consiste em uma estratégia passiva que se baseia em diferenças de pressão para mover o ar através dos edifícios (resfriamento convectivo), o que propicia a renovação do ar interno. Aflaki et al. (2015) e Chen, Tong e Malkawi (2017) destacam ainda que a ventilação natural apresenta grande potencial de redução da energia requerida para o resfriamento dos componentes construtivos, com custo de operação menor quando

comparado à utilização de ventilação mecânica Zheng et al. (2018).

Em regiões com predomínio das temperaturas diurnas do ar acima de 29°C e de umidades relativas inferiores a 60%, a ventilação noturna consiste na estratégia de condicionamento térmico passivo mais adequada (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Nesse contexto, as maiores demandas por ventilação noturna ocorrem nas Zonas 1 e 2, para as quais se observam as maiores temperaturas de bulbo seco mensais (Figura 2.9). De maneira geral, a adoção das estratégias de ventilação diurna e noturna caracteriza-se como a de maior potencial para o aumento das horas anuais de conforto na região semiárida. O uso dessas estratégias, quando associadas, elevaria consideravelmente as horas anuais de conforto térmico, sobretudo para as Zonas 1 e 3, onde os percentuais de conforto atingiriam 86,5 e 81,4%, respectivamente.

A importância da utilização da ventilação natural é evidenciada em estudos de análise de desempenho de edificações localizadas em regiões semiáridas, como apresentam Mastouri et al. (2019). Segundo esses autores, o uso de ventilação natural foi capaz de reduzir significativamente as temperaturas operativas internas de uma edificação residencial no Marrocos, caracterizando-se como uma estratégia passiva eficiente para o aumento das horas de resfriamento anuais. Especificamente em relação à região semiárida brasileira, Martins, Bittencourt e Krause (2012) demonstram a partir de simulações termo energéticas que o uso de ventilação natural foi capaz de dobrar os percentuais anuais de conforto térmico para o município de Pão de Açúcar, no estado do Alagoas.

A utilização da estratégia de inércia térmica para resfriamento pode ser utilizada isoladamente ou em associação à ventilação natural noturna e ao resfriamento evaporativo (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Para as zonas climáticas definidas, a demanda por inércia térmica para resfriamento é maior nas Zonas 1 e 2, para as quais sua utilização possibilitaria um aumento de 21,4 e 24,1% de horas anuais de conforto, respectivamente. Como demonstra Endurthy (2011), o uso de inércia térmica para resfriamento torna-se mais eficiente quando associado à estratégia de ventilação noturna. A partir disso, o calor armazenado na estrutura térmica da edificação durante o dia é liberado ao ambiente somente à noite, quando as temperaturas externas diminuem. Desse modo, a estrutura térmica resfriada durante a noite mantém-se com as temperaturas internas reduzidas durante a maior parte do dia (LANDSMAN; BRAGER; DOCTOR-PINGEL, 2018).

A estratégia de resfriamento evaporativo apresenta maior potencial de uso nas Zonas 2, 3 e 4, e pode ser utilizada em conjunto à ventilação natural noturna e à inércia térmica

para resfriamento. Como explicam Borges, Sarmiento e Carvalho (2018) e Kashyap, Gaba e Tiwari (2019), o resfriamento evaporativo é uma técnica que permite a redução das temperaturas do ar a partir da conversão do calor sensível em calor latente enquanto a entalpia total do ar permanece constante, e pode ser obtido através do uso de vegetação, fontes de água ou outros recursos que permitam a evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar.

Dentre as cinco zonas estabelecidas, a Zona 4 apresentou a maior necessidade de utilização da estratégia de umidificação, além de alta demanda por resfriamento evaporativo. Esse fato pode estar relacionado aos baixos valores de umidade relativa observados para essa zona, sobretudo nos meses de junho a setembro (Figura 2.8 e 2.9). De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), quando a umidade do ar for muito baixa e as temperaturas forem inferiores a 27°C haverá desconforto devido à secura do ar. Nestes casos, a utilização da estratégia de umidificação promove um aumento na sensação de conforto térmico.

Em relação a estratégia de inércia térmica com aquecimento solar, a Zona 5 apresentou demandas expressivamente maiores que às demais, sendo requerida em 24,7% das horas anuais. De acordo com Nikolić et al. (2018), o uso de inércia térmica com aquecimento solar consiste na utilização de componentes construtivos que retêm o calor absorvido, liberando-o lentamente para o interior do ambiente quando as temperaturas internas tornam-se inferiores às externas. A necessidade por aquecimento na Zona 5 pode ser evidenciada também pelo fato de a mesma apresentar as maiores demandas pela estratégia de isolamento térmico com aquecimento solar, o que pode ser explicado pelos reduzidos valores de temperatura média, máxima e mínima de bulbo seco observadas para essa zona.

As demandas por resfriamento artificial (ar-condicionado) e por aquecimento artificial (com isolamento térmico) apresentaram percentuais anuais quase nulos (menores que 0,2%). Esse fato evidencia que, para a região semiárida brasileira, a utilização de estratégias de condicionamento térmico passivo se constitui com uma alternativa eficaz para o aumento dos percentuais de conforto térmico. Como demonstram Kashyap, Gaba e Tiwari (2019), o uso de estratégias passivas apresenta uma vantagem em relação às artificiais uma vez que não demandam a utilização de energia elétrica. Complementarmente às estratégias mencionadas, o uso de sombreamento é recomendado para todas as zonas climáticas estabelecidas uma vez que apresentam valores de temperatura de bulbo seco maiores que 20°C (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Por fim, um mapa com a identificação das estratégias mais relevantes às diferentes zonas propostas foi desenvolvido com o intuito de

facilitar a compreensão e a aplicação (Figura 2.11).

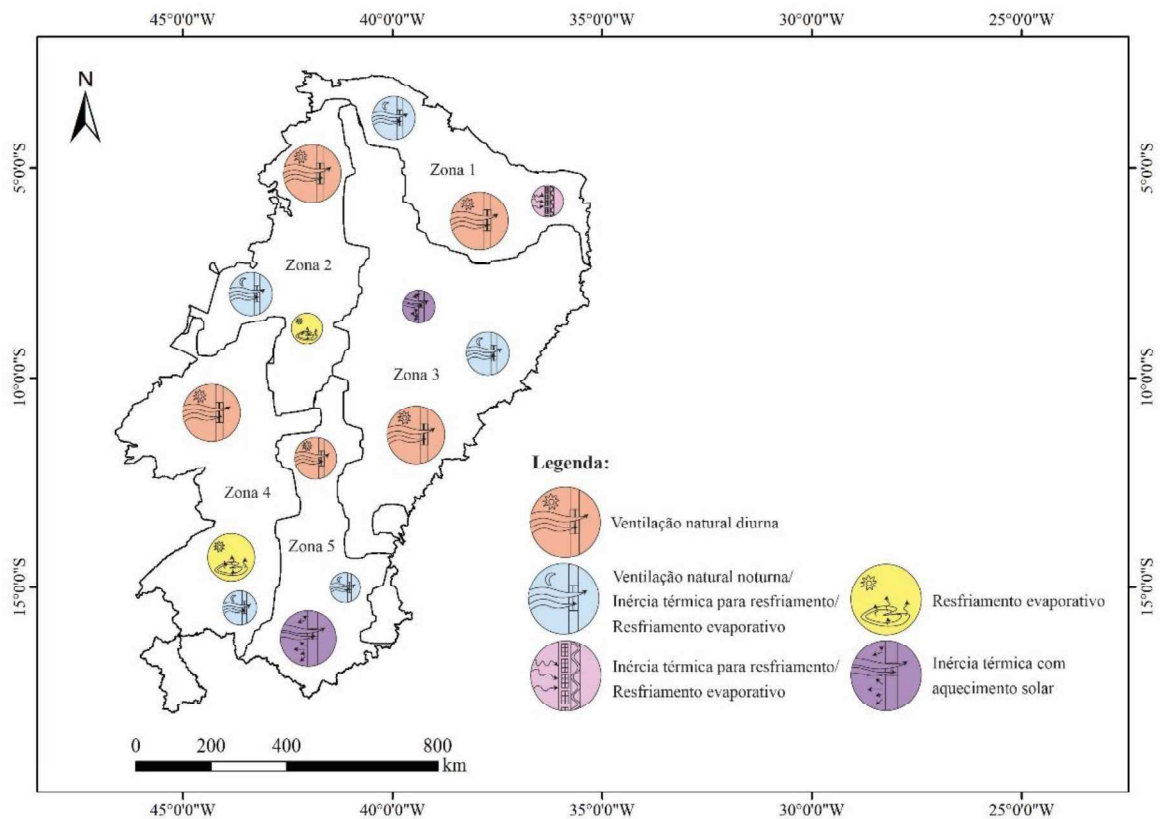


Figura 2. 11. Mapa com a identificação das principais estratégias identificadas para as zonas climáticas propostas.

2.3.2.3 Índices térmicos

De modo a complementar a caracterização das zonas climáticas definidas para a região semiárida, os índices térmicos de calor (IC) e graus-hora (GH) foram calculados para as 84 estações climatológicas em análise. Como apresentado na Figura 2.12a, os maiores valores de IC foram obtidos nas Zonas 1 e 2, para as quais também são observadas as maiores ocorrências anuais e sazonais de IC categorizadas como “Atenção” e “Extrema atenção” (Figura 2.12b e 2.12c). Valores de IC categorizados como “Perigo” foram observados apenas para a Zona 2, entretanto com percentual abaixo de 0,1%. Ademais, não foram observadas ocorrências de “Extremo perigo” em nenhuma das zonas.

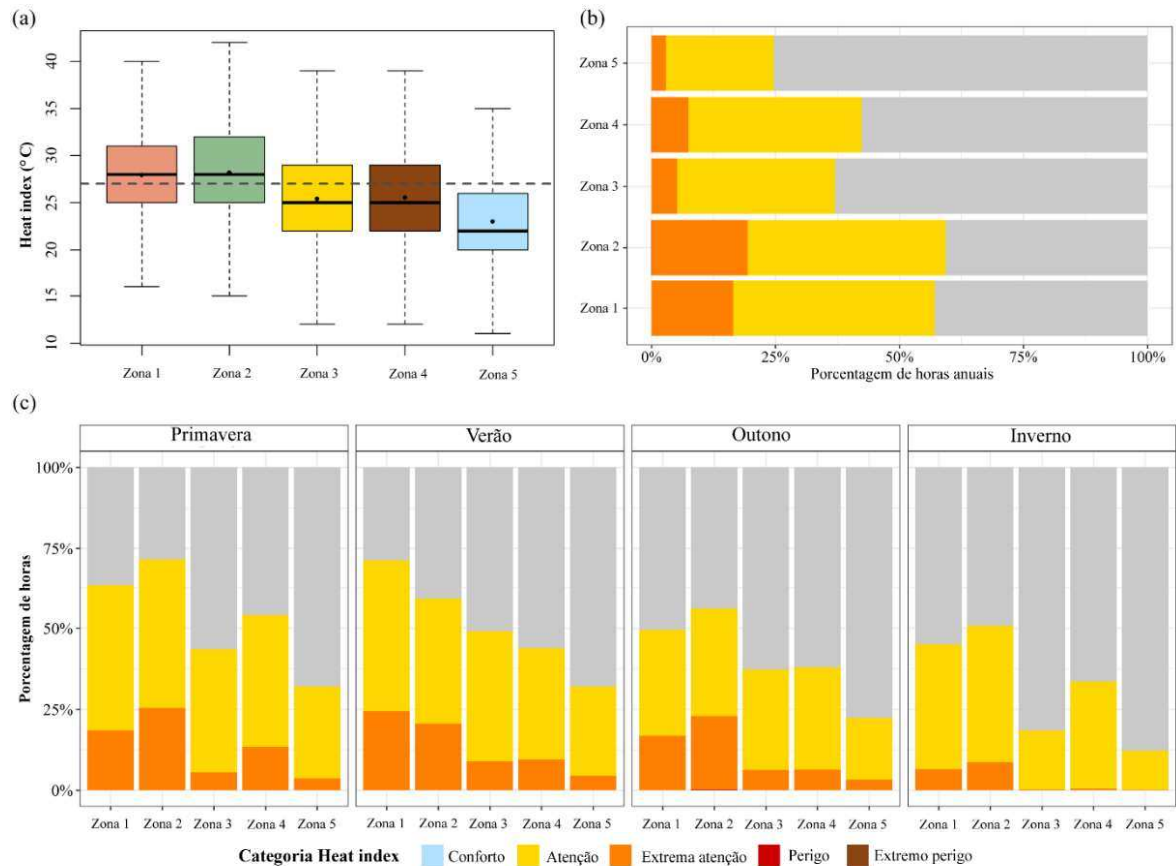


Figura 2. 12. (a) Boxplot dos valores de índice de calor, e percentual de horas (b) anuais e (c) sazonais das categorias de classificação do índice de calor em relação a seus possíveis distúrbios fisiológicos nos indivíduos.

Os altos valores de IC observados na Zona 2 são corroborados pela elevada demanda por graus-horas de resfriamento (GHR), como evidenciado na Figura 2.13. Para essa zona, os valores de GHR demandados superam 20.000 graus-horas anuais para a maior parte das estações inseridas na mesma. Como discutido anteriormente, para a Zona 2, a adoção das estratégias de ventilação natural diurna e noturna, bem como de resfriamento evaporativo pode promover um aumento de 37,6 para 98,1% de horas anuais de conforto térmico (Figura 2.10). Desse modo, apesar dos elevados valores de IC e da alta demanda por resfriamento, o uso de estratégias de condicionamento térmico passivo nessa zona caracteriza-se como uma solução eficiente no intuito de aumentar as horas anuais de conforto, minimizando a necessidade de adoção de sistemas de resfriamento artificial.

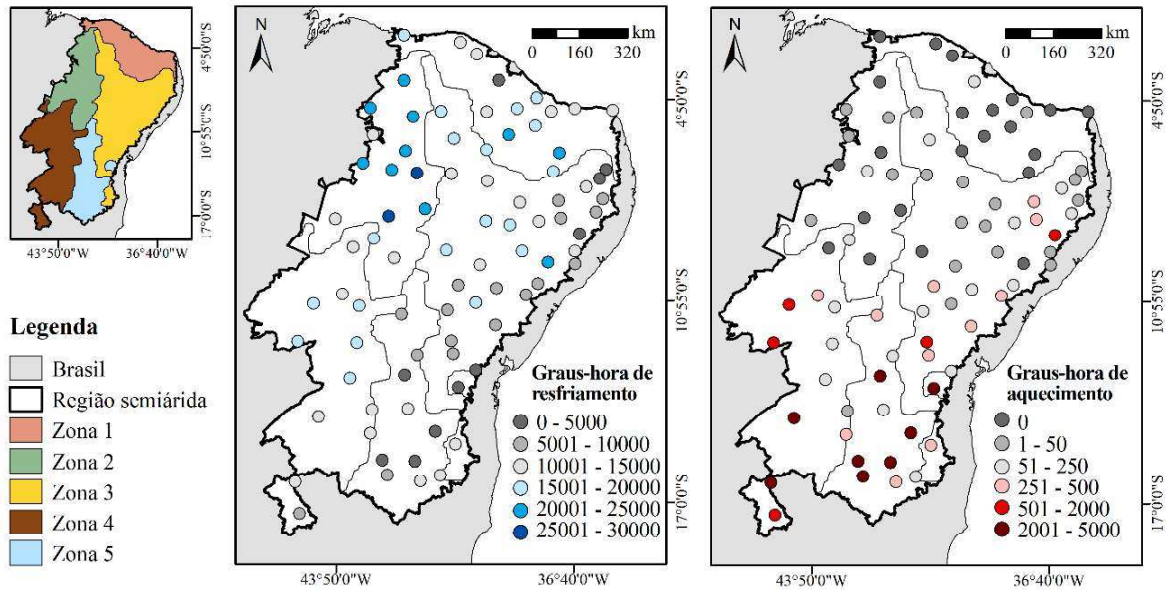


Figura 2. 13. Demanda por graus-hora de resfriamento e aquecimento das estações climatológicas inseridas nas zonas climáticas definidas para o semiárido brasileiro.

As Zonas 3 e 4, apesar de não estarem localizadas contíguas uma à outra, apresentaram valores máximos, mínimos e médios de IC similares. Comparada às demais, essas zonas apresentaram comportamento intermediário em relação aos percentuais de horas anuais e sazonais categorizados como “Atenção” e “Extrema atenção”. Na Zona 3, metade das estações climatológicas analisadas apresentou demanda por resfriamento inferior a 10.000 graus-hora, sobretudo àquelas localizadas mais próximas à costa, enquanto na Zona 4 a demanda por GHR variou entre 5.000 e 20.000. Destaca-se ainda um maior requerimento de GHA para a Zona 4, quando comparada à Zona 3.

Os valores mais baixos de IC foram observados para a Zona 5, onde os percentuais anuais de horas categorizadas como “Atenção” e “Extrema atenção” foram de apenas 21,7 e 2,9%, respectivamente. O reduzido impacto do calor aos indivíduos nessa zona pode ser evidenciado também pela baixa demanda por resfriamento (GHR inferiores a 15.000) e pela alta demanda por aquecimento (GHA de até 5.000). Por fim, ressalta-se que o requerimento por aquecimento na Zona 5 pode ser atenuado a partir do emprego da inércia térmica e do isolamento térmico com aquecimento solar como estratégias de condicionamento térmico passivo, a partir das quais um incremento de 26% nas horas anuais de conforto térmico pode ser obtido.

2.4 Conclusão

O uso das técnicas de estatística multivariada da análise de componentes principais e de clusterização hierárquica possibilitou a definição de cinco zonas com características climáticas e particularidades construtivas distintas no semiárido brasileiro. Para a definição dessas zonas, somente os dois primeiros componentes principais apresentaram relevância prática, a partir dos quais demonstrou-se a importância das variáveis climáticas e bioclimáticas relacionadas à temperatura como as de maior variabilidade espacial para o zoneamento dessa região.

Constatou-se que as cinco zonas definidas apresentam condições climáticas que evidenciam uma alta demanda por estratégias construtivas de condicionamento térmico para que se obtenha uma maior eficiência energética das edificações. De maneira geral, a adoção das estratégias de ventilação diurna e noturna caracteriza-se como as de maior potencial para o aumento das horas anuais de conforto na região semiárida. Percentuais anuais quase nulos de demanda por resfriamento e aquecimento artificial demonstram que a utilização de estratégias passivas se constitui com uma alternativa eficaz para a promoção do conforto térmico. De forma complementar, o uso de sombreamento é recomendado para todas as zonas climáticas estabelecidas.

Em relação às recomendações de diretrizes construtivas com aplicabilidade para cada uma das zonas, as Zonas 1 e 2 devem priorizar a adoção de estratégias que visem o resfriamento da edificação, tais como ventilação diurna e noturna, e resfriamento evaporativo. Nessas zonas, a necessidade de graus-hora de aquecimento apresenta-se quase nula, enquanto os valores de índice de calor ultrapassam os observados nas demais zonas. As Zonas 3 e 4 apresentam, simultaneamente, estações climatológicas com necessidades tanto de aquecimento quanto de resfriamento. Dessa forma, recomenda-se cautela quanto à aplicação das estratégias, bem como à escolha dos materiais que irão compor a edificação, de modo a atender ambas as demandas. Para a Zona 5, observou-se um predomínio pela necessidade de aquecimento, condição que pode ser revertida a partir do emprego de materiais com alta inércia e que propiciem isolamento térmico.

Os resultados obtidos a partir do zoneamento proposto pelo presente estudo apresentam grande potencial de aplicação para um planejamento construtivo de edificações mais adaptado às especificidades climáticas da região semiárida brasileira, uma vez que diretrizes específicas para essa região ainda são escassas.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220 *NBR 15220: Desempenho térmico de edificações*, Rio de Janeiro, 2005.
- AFLAKI, A.; MAHYUDDIN, N.; MAHMOUD, Z. A. C.; BAHARUM, M. R. A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. *Energy and Buildings*, 101, 153-162, 2015.
- ALVARES, C. A et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728, 2013.
- ANDERSON, B.; PENG, R.; FERRERI, J. *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. 2020
- ANDERSON, G. B.; BELL, M. L.; PENG, R. D. Methods to calculate the heat index as an exposure metric in environmental health research. *Environmental health perspectives*, 121(10), 1111-1119, 2013.
- AZEVEDO, P. V. D. et al. Characterization of human thermal comfort in urban areas of Brazilian semiarid. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30(4), 371-380, 2015.
- BAI, L. et al. A new approach to develop a climate classification for building energy efficiency addressing Chinese climate characteristics. *Energy*, 195, 116982, 2020.
- BALVEDI, B. F. et al. Identificação de perfis de comportamento do usuário para edificações residenciais multifamiliares e naturalmente ventiladas em Florianópolis. *Ambiente construído*, 18(3), 149-160, 2018.
- BLAZEJCZYK, K. et al. Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International journal of biometeorology*, 56(3), 515-535, 2012.
- BOLAR, K. *STAT: Interactive Document for Working with Basic Statistical Analysis*. R package version 2.3. 2019. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/STAT/index.html>. Acesso em: 10 out. 2020.

BORGES, D. A., SARMENTO, A. P., & CARVALHO, G. B. D. Projeto arquitetônico para a cidade de Catalão/Go: diretrizes para a zona bioclimática 6. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Goiânia*, v. 14, n. 1, p. 142-158, jan./jun. 2018. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/46976/pdf>>. Acesso em: 10 out. 2020.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Nova delimitação Semiárido. 2018. Disponível em: <http://antigo.sudene.gov.br/images/arquivos/semiariado/arquivos/Rela%C3%A7%C3%A3o_de_Munic%C3%ADpios_Semi%C3%A1rido.pdf>. Acesso em: 10 out. 2020.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Delimitação do semiárido. 2020. Disponível em: <<http://antigo.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>>. Acesso em: 10 out. 2020.

CHARRAD, M. et al. NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *J. Stat. Softw.* 61, 2014.

CHARRAD, M. et al. *NbClust: Determining the Best Number of Clusters in a Data Set*. R package version 3.0. 2015. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/NbClust/index.html>>. Acesso em: 10 out. 2020.

CHEN, X.; YANG, H. Integrated energy performance optimization of a passively designed high-rise residential building in different climatic zones of China. *Applied energy*, 215, 145-158, 2018.

CHEN, Y.; TONG, Z.; MALKAWI, A. Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations. *Building and Environment*, 122, 386-396, 2017.

COSTA, M. L.; FREIRE, M. R.; KIPERSTOK, A. Strategies for thermal comfort in university buildings-The case of the faculty of architecture at the Federal University of Bahia, Brazil. *Journal of environmental management*, 239, 114-123, 2019.

ENDURTHY, A. R. *Coupling of Thermal Mass with Night Ventilation in Buildings*. Tucson: Arizona State University. 2011. Disponível em:<https://repository.asu.edu/attachments/56699/content/Endurthy_asu_0010N_10739.pdf>.

Acesso em: 10 out. 2020.

FEITOSA, R. C.; WILKINSON, S. J. Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit. *Building and Environment*, 140, 11-22, 2018.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315, 2017.

GALILI T. *dendextend: Extending 'dendrogram' Functionality in R*. R package version 1.14. 2020. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/dendextend/index.html>>. Acesso em: 10 out. 2020.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and buildings*, 18(1), 11-23, 1992.

HAIR, J. F. et al. *Análise multivariada de dados*. Bookman editora. 2009.

HAO, Z. et al. Building climate zones of major marine islands in China defined using two-stage zoning method and clustering analysis. *Frontiers of Architectural Research*, 2020.

HUSSON, F. et al. *FactoMineR: an R package for multivariate analysis*. R package version 2.3. 2020. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/FactoMineR/index.html>> Acesso em: 10 out. 2020.

INMETRO. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R. 2012. Disponível em: <<http://www.pbefedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2020.

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.

KASHYAP, S.; GABA, V. K.; TIWARI, A. K. Enhancing Passive Cooling and Natural Ventilation for Houses of Various Climatic Zones of India. In: *2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)*. IEEE, p. 183-187, 2019.

KASSAMBARA, A. *Multivariate Analysis II: Practical guide to principal component methods in R*. vol. 2. first ed. STHDA, 2017.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. *factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses*. R package version 1.0.5. 2020. Disponível em:< <https://cran.r-project.org/package=factoextra>>. Acesso em: 10 out. 2020.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. (2020). *factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses*. R package version 1.0.5. Disponível em:< <https://cran.r-project.org/web/packages/factoextra/index.html> >. Acesso em: 10 out. 2020.

KHAMBADKONE, N. K.; JAIN, R. A bioclimatic analysis tool for investigation of the potential of passive cooling and heating strategies in a composite Indian climate. *Building and Environment*, 123, 469-493, 2017.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência Energética na Arquitetura*. third ed. São Paulo. Eletrobrás/Procel, 2014.

LANDSMAN, J.; BRAGER, G.; DOCTOR-PINGEL, M. Performance, prediction, optimization, and user behavior of night ventilation. *Energy and buildings*, 166, 60-72, 2018.

Marçal, N. A. et al. Analysis of the environmental thermal comfort conditions in public squares in the semiarid region of northeastern Brazil. *Building and Environment*, 152, 145-159, 2019.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3-4), 1189-1200, 2017.

MARTINS, T. A. L.; BITTENCOURT, L. S.; KRAUSE, C. M. D. L. B. Contribuição ao zoneamento bioclimático brasileiro: reflexões sobre o semiárido nordestino. *Ambiente Construído*, 12(2), 59-75, 2012.

Mastouri, H. et al. Effect of Natural Ventilation on the Thermal Performance of a Residential Building in a Hot Semi-Arid Climate. In: *2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. IEEE, 2019. p. 1-6.

- MELO, A. P. et al. Assessing the accuracy of a simplified building energy simulation model using BESTEST: The case study of Brazilian regulation. *Energy and buildings*, 45, 219-228, 2012.
- MOURSHED, M. Relationship between annual mean temperature and degree-days. *Energy and buildings*, 54, 418-425, 2012.
- NIKOLIĆ, D. et al. Basic principles of passive solar heating. In *3rd International conference on Quality of Life*, Kopaonik, Serbia, pp. 28-30, 2018.
- NWS - National Weather Service. Meteorological Conversions and Calculations: Heat Index Calculator. 2011. Disponível em: < <https://www.weather.gov/ama/heatindex>>. Acesso em: 10 out. 2020.
- PANET, M. D. F.; ARAÚJO, V. M. D. D.; ARAÚJO, E. H. S. D. No calor da idade: parâmetros de conforto térmico para idosos residentes em localidade do semiárido paraibano. *Ambiente Construído*, 20(2), 135-149, 2020.
- PEREIRA, L. H.; NASCIMENTO, P. S. S. Avaliação das normais climatológicas em municípios do Nordeste brasileiro no período de 1961 a 2010/Evaluation of climatological norms in Northeast brazilian municipalities during 1961 to 2010. *Brazilian Journal of Development*, 6(1), 13-27, 2020.
- POGGIO, L.; SIMONETTI, E.; GIMONA, A. Enhancing the WorldClim data set for national and regional applications. *Science of the Total Environment*, 625, 1628-1643, 2018.
- PRAENE, J. P. et al. GIS-based approach to identify climatic zoning: A hierarchical clustering on principal component analysis. *Building and Environment*, 164, 106330, 2019.
- 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: 12 set. 2020.
- RAMOS, G. et al. Adaptive behaviour and air conditioning use in Brazilian residential buildings. *Building Research & Information*, p. 1-16, 2020.

RORIZ, M. Uma proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro. *ANTAC- Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. São Carlos-SP. 2012a.*

Disponível

em:https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Proposta_Revisao_Zoneamento_Bioclimatico.pdf. Acesso em: 12 out. 2020.

RORIZ, M. Segunda Proposta de Revisão do Zoneamento Bioclimático

Brasileiro. *Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética (LABEEE). Florianópolis. 2012b.* Disponível

em:<https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Zoneamento.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2020.

RORIZ, M. *Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros*. In: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos, SP. 2012c

RORIZ, M. *Classificação de climas do Brasil – versão 2.0*. 2013. Disponível em:<https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v2.pdf>. Acesso em: 12 out. 2020.

RORIZ, M. *Classificação de climas do Brasil – versão 3.0*. 2014. Disponível em:<https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf>. Acesso em: 12 out. 2020.

RORIZ, M.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Bioclimatic zoning of Brazil: a proposal based on the Givoni and Mahoney methods. In *Proceedings of PLEA*, pp. 211-216, 1999.

ROTHFUSZ, L. P.; HEADQUARTERS, N. S. R. 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, 9023*. 1990. Disponível em:< https://wonder.cdc.gov/wonder/help/Climate/ta_htindx.PDF>. Acesso em: 12 out. 2020.

SANTOS, S. M. et al. Integrating conventional and green roofs for mitigating thermal discomfort and water scarcity in urban areas. *Journal of Cleaner Production*, 219, 639-648, 2019.

SILVA JUNIOR, M. H. et al. Classificação climática de Thornthwaite: uma proposta de

adaptação para a região semiárida brasileira (Thornthwaite's climate classification: an adaptation proposal for the Brazilian semiarid). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(6), 1760-1774, 2017.

SILVA, H. C. N. et al. Modeling and simulation of cogeneration systems for buildings on a university campus in Northeast Brazil—A case study. *Energy Conversion and Management*, 186, 334-348, 2019.

STEADMAN, R. G. A universal scale of apparent temperature. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(12), 1674-1687, 1984.

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. *Resolução n.115*, de 23 de novembro de 2017. Diário Oficial da União n.232, 5 de dezembro de 2017.

TERASSI, P. M. D. B.; GALVANI, E. Identification of homogeneous rainfall regions in the eastern watersheds of the state of Paraná, Brazil. *Climate*, 5(3), 53, 2017.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Review of methods for climatic zoning for building energy efficiency programs. *Building and Environment*, 112, 337-350, 2017.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Validation of the climatic zoning defined by ASHRAE standard 169-2013. *Energy Policy*, 135, 111016, 2019.

WARD JR, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association*, 58(301), 236-244, 1963.

XIONG, J. et al. A hierarchical climatic zoning method for energy efficient building design applied in the region with diverse climate characteristics. *Energy and Buildings*, 186, 355-367, 2019.

ZHENG, X. et al. *Natural Ventilation*. In: Wang R., Zhai X. (eds) Handbook of Energy Systems in Green Buildings. Springer, Berlin, Heidelberg. 2018.

ZOLFAGHARI, F. et al. (2019). Hierarchical cluster analysis to identify the homogeneous desertification management units. *Plos one*, 14(12), e0226355. 2019.

3 CAPÍTULO 3 – AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONDICIONAMENTO TÉRMICO PASSIVO PARA ZONAS CLIMÁTICAS PROPOSTAS PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar estratégias de condicionamento térmico passivo para zonas climáticas propostas para o semiárido brasileiro. A análise das estratégias foi realizada a partir de simulações termo energéticas, utilizando-se do software *Energyplus*. Para isso, avaliou-se um modelo habitacional de tipologia unifamiliar considerando as características climáticas dos municípios de Apodi/RN, Oeiras/PI, Palmeira dos Índios/AL, Buritirama/BA e Águas Vermelhas/MG. Foram simuladas as estratégias de ventilação natural, subdividida em ventilação natural diurna, ventilação natural noturna, janelas abertas 24 horas e janelas fechadas 24 horas, além da estratégia de inércia térmica com aquecimento solar. A avaliação das simulações ocorreu a partir dos indicadores de balanço térmico, conforto térmico adaptativo e graus horas de aquecimento e resfriamento. Dentre as estratégias de ventilação natural analisadas, o uso de janelas abertas 24 horas e durante o período noturno se caracteriza como uma boa alternativa para a redução das horas de desconforto por calor nas edificações inseridas nos municípios de Apodi/RN, Oeiras/PI, Palmeira dos Índios/AL e Buritirama/BA. Para esses municípios, essas estratégias promoveram maiores percentuais de conforto térmico, bem como uma menor necessidade de graus-hora de resfriamento. Em relação ao município de Águas Vermelhas/MG, a estratégia de ventilação natural com janelas abertas apenas no período diurno é a mais recomendada. A estratégia de inércia térmica com aquecimento solar avaliada para esse município promoveu uma redução no desconforto por frio durante o inverno, porém um aumento no desconforto por calor e na necessidade de graus-hora de resfriamento nos demais meses. Análises complementares são sugeridas para uma melhor aplicação dessa estratégia em edificações inseridas na região semiárida brasileira.

Palavras-chave: Simulação termo energética. Edificação unifamiliar. Ventilação natural. Inércia térmica. Conforto térmico adaptativo.

3.1 Introdução

O emprego de estratégias de condicionamento térmico em edificações assume importância na medida que auxilia na utilização dos recursos climáticos. No Brasil, regiões que apresentam características climáticas extremas, como a região semiárida (ALVARES et al., 2013; SUDENE, 2017), evidenciam uma maior necessidade de identificação das estratégias mais adequadas no intuito de garantir um aumento na eficiência energética de edificações.

Como alternativas para o planejamento de construções mais adaptadas às regiões de clima semiárido, a utilização de estratégias de condicionamento térmico passivas podem acarretar em um melhor desempenho térmico das edificações. Dentre essas estratégias, o uso de ventilação natural e de materiais com elevada inércia térmica se configura como uma boa opção para a promoção do conforto térmico (MASTOURI et al., 2017; MASTOURI et al., 2019).

Objetivando analisar a estratégia de ventilação natural, Mastouri et al. (2019) avaliaram a aplicação dessa estratégia para um edifício residencial localizado na região de Marrakech, cidade com clima semiárido no Marrocos. Os resultados evidenciaram que a utilização da ventilação noturna foi capaz de reduzir a temperatura operativa da edificação de forma significativa. Os autores concluem que a ventilação natural se constitui como uma técnica passiva relevante para o resfriamento do ar, podendo acarretar em reduções de até 27% da carga de resfriamento anual.

Mastouri et al. (2017) investigaram o efeito da combinação de isolamento térmico com alta inércia térmica no desempenho térmico de edifícios em um clima semiárido quente. Os impactos dessas técnicas passivas nas cargas de resfriamento e aquecimento e no conforto interno foram avaliados por meio de simulação computacional. Como resultados, os sistemas passivos investigados apresentaram um efeito notável na temperatura do ar interior a partir da redução da amplitude térmica diária. Além disso, observou-se um decréscimo de 62% no desconforto térmico e uma redução de até 81% na carga anual de resfriamento e aquecimento.

Nesse contexto, a utilização de softwares que permitem simular condições termo energéticas tem se mostrado eficaz no intuito de avaliar as condições de edificações já existentes ou de subsidiar o planejamento de novas. Esse fato pode ser evidenciado pelo aumento do número de trabalhos que utilizam dessa ferramenta, como exemplificam Tian et

al. (2018) e Gao, Koch e Wu (2019). Diante disso, a utilização de uma metodologia de análise de performance por simulação possibilita uma melhor avaliação das condições térmicas da edificação em estudo (BIANCO et al., 2016; WEIß; FULTERER; KNOTZER, 2019; GUNAWARDENA; STEEMERS, 2019).

A realização de simulações termo energéticas apresentam alguns aspectos passíveis de análise quanto ao desempenho térmico, como é o caso dos indicadores térmicos de conforto térmico adaptativo, proposto na ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2013), e o método conhecido como graus hora, que calcula a demanda por horas de aquecimento ou resfriamento. Esses indicadores são comumente utilizados para avaliação de conforto do usuário e gastos energéticos, como apresentam os trabalhos de Martins, Bittencourt e Krause (2012), Araújo, Barbosa e Batista (2017), Oliveira, Sakiyama e Miranda (2017), Wang, Zhu e Guo (2019), Mahar et al. (2020), Soflaei et al. (2020) e Vivian et al. (2020).

3.2 Objetivo

Este estudo teve como objetivo avaliar estratégias de condicionamento térmico passivo para as zonas climáticas propostas para o semiárido brasileiro apresentadas no Capítulo 2 desta dissertação.

3.3 Material e métodos

A avaliação das estratégias de condicionamento térmico passivo identificadas para o semiárido brasileiro foi realizada a partir de simulações termo energéticas, utilizando-se do software *Energyplus* (DOE, 2019). Para isso, considerou-se um modelo habitacional de tipologia unifamiliar para cinco municípios da região semiárida definidos como representativos de cada uma das zonas estabelecidas no Capítulo 2. Foram avaliadas as estratégias de ventilação natural e inércia térmica com aquecimento solar a partir dos indicadores de desempenho térmico. A Figura 3.1 mostra a esquematização da metodologia adotada, a qual está apresentada em detalhe na sequência.

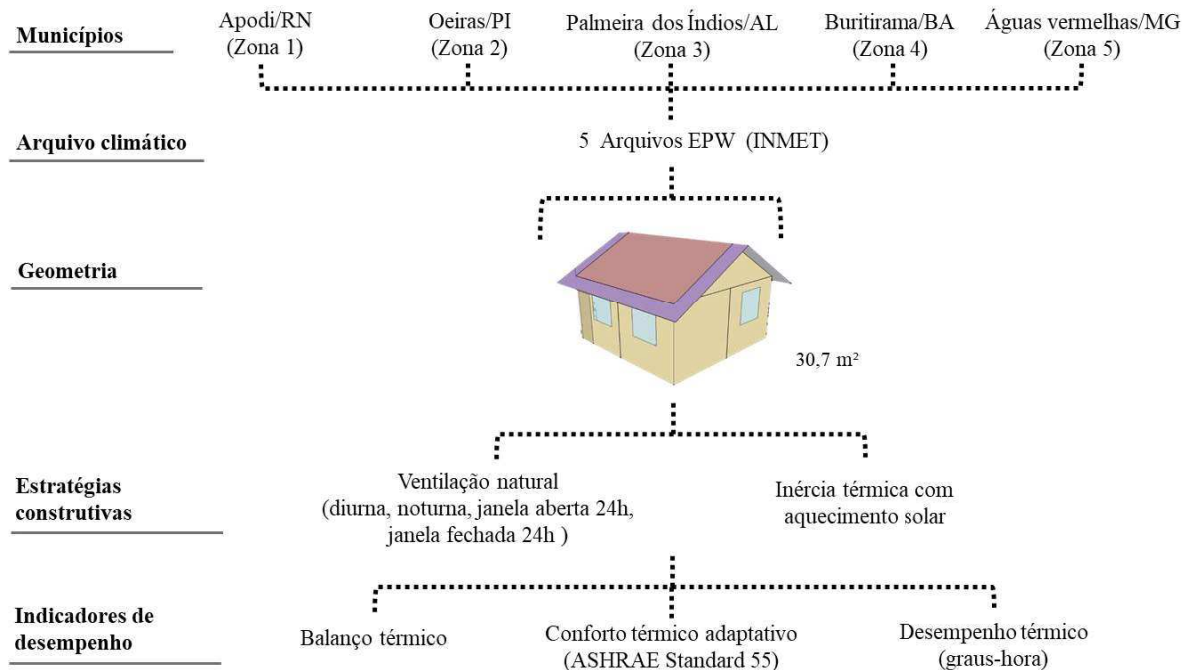


Figura 3. 1. Esquema da metodologia adotada no presente estudo.

3.3.1 Arquivo climático

Como arquivos climáticos para as simulações, foi utilizado o mesmo banco de dados que auxiliou na caracterização das zonas climáticas definidas para a região semiárida no Capítulo 2. Dessa forma, o banco de dados foi composto por arquivos em formato Energy Plus Weather file (.EPW), originados a partir de dados de arquivos climáticos desenvolvidos por Roriz (2012), obtidos de estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Realizou-se a seleção de municípios representativos que caracterizassem as condições climáticas de cada uma das cinco zonas definidas. Essa seleção teve como base a análise dos resultados do índice térmico de graus-hora obtidos para as 84 estações climatológicas utilizadas no Capítulo 2 (Figura 3.2a). Foram selecionadas as estações que apresentaram valor de graus-hora mais próximo ao graus-hora médio calculado para cada zona. Dessa forma, as estações climatológicas analisadas das Zonas 1, 2, 3, 4 e 5, estão localizadas, respectivamente, nos municípios Apodi/RN, Oeiras/PI, Palmeira dos Índios/AL, Buritirama/BA e Águas Vermelhas/MG (Figura 3.2b), cujos os valores médios mensais de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento estão apresentadas na Figura 3.2c.

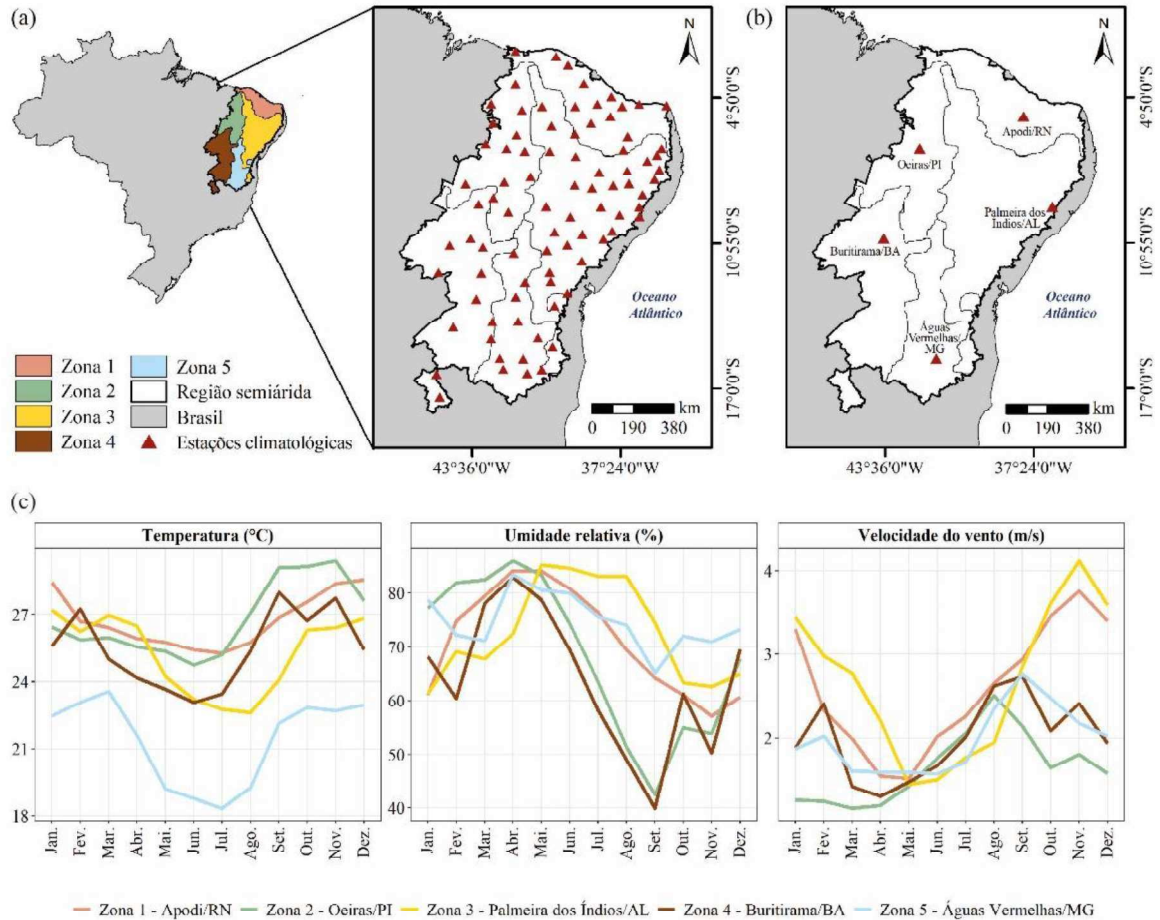


Figura 3. 2. (a) Localização das zonas climáticas definidas para o semiárido brasileiro e das estações climatológicas utilizadas no Capítulo 2. (b) Localização dos municípios representativos de cada zona e (c) respectivos valores médios mensais de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento.

3.3.2 Geometria habitacional representativa

De acordo com a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Continua, intitulada “Características gerais dos domicílios e dos moradores 2018” (IBGE, 2019), tanto para o cenário brasileiro atual, quanto especificamente para a região semiárida, o modelo de tipologia habitacional unifamiliar apresenta predominância. Desta forma, foi selecionada uma geometria de tipologia unifamiliar desenvolvida por Telles (2016) e baseada na pesquisa de Sorgato (2009). A geometria escolhida (Figura 3.3) apresenta área útil de 30,7 m², nos quais estão inseridos quatro ambientes, sendo estes: sala de estar e cozinha, dois dormitórios e um banheiro.

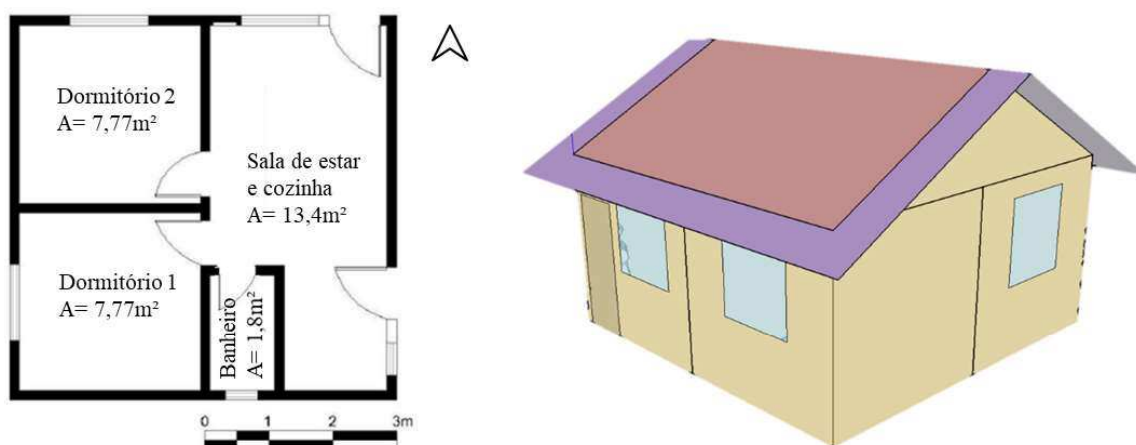


Figura 3. 3. Modelo de habitação unifamiliar utilizado. Fonte: Adaptado de Rodrigues (2019).

Os padrões de uso e ocupação bem como as cargas energéticas internas da edificação tiveram seus valores determinados por Rodrigues (2019) para o modo de vida “tradicional”. Baseado nas definições de Sorgato (2015), esse modo de vida é caracterizado por uma família na qual uma parcela dos moradores permanece na residência durante o período diurno (8h às 18h), enquanto no período noturno (18h às 8h) todos os integrantes permanecem na habitação. Com base nessas definições, os modelos foram simulados considerando uma ocupação de três moderadores e apresentando um consumo energético variando de 80 a 200 kWh/mês.

Apesar de terem sido avaliadas as simulações quando rotacionadas para todas as orientações principais (norte, sul, leste e oeste), percebeu-se que não houve diferença entre as médias das quatro orientações e a os resultados de apenas uma delas. Dessa forma, para o presente estudo foram analisados os resultados de apenas uma das rotações, a rotação norte.

3.3.3 Estratégias construtivas

A seleção das estratégias de condicionamento térmico a serem simuladas para cada zona climática definida no Capítulo 2 ocorreu com base nos seus maiores percentuais de horas anuais demandadas (Tabela 3.1).

Tabela 3. 1. Percentual de horas anuais de ocorrência de conforto e de demanda por estratégias de condicionamento térmico para cada zona climática.

Estratégia	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Conforto térmico	37,14	37,62	39,50	43,40	45,91
Ventilação natural diurna	33,92	26,48	32,42	21,66	15,88
Ventilação natural noturna/Inércia térmica para resfriamento/Resfriamento evaporativo	15,51	15,87	9,53	10,32	5,82
Inércia térmica para resfriamento/Resfriamento evaporativo	5,93	8,16	2,72	3,08	1,18
Resfriamento evaporativo	4,04	10,04	6,45	11,04	4,83
Inércia térmica com aquecimento solar	3,37	1,26	9,29	7,92	24,70
Ar condicionado	0,05	0,23	0,00	0,00	0,00
Umidificação	0,04	0,30	0,07	1,32	0,30
Aquecimento solar com isolamento térmico	0,00	0,00	0,02	0,93	1,29
Aquecimento artificial com isolamento térmico	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08

Para todas as zonas definidas (Zonas 1 a 5), foi simulada a estratégia de ventilação natural, subdividida em ventilação natural diurna (janelas abertas de 6h às 18h), ventilação natural noturna (janelas abertas de 18h às 6h), janelas abertas 24 horas e janelas fechadas 24 horas. Para a Zona 5, além da ventilação natural, foi simulada a estratégia de inércia térmica com aquecimento solar considerando três composições de materiais distintas.

3.3.4 Materiais construtivos

A escolha pelos materiais padrões na simulação ocorreu com base nos materiais apresentados na Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua, intitulada “Características gerais dos domicílios e dos moradores 2018” (IBGE, 2019).

Para todas as simulações realizadas, foi utilizada uma cobertura de telha cerâmica, laje pré-moldada com tábua cerâmica e revestimento interno de argamassa, conforme especificado na Tabela 2.

Nos materiais construtivos do piso, foi utilizada uma composição de piso cerâmico isolado com lã de rocha (Tabela 3). A decisão pelo uso desse material isolante no piso se deu em virtude da incoerência dos resultados prévios obtidos para simulações realizadas sem sua aplicação.

Nas simulações considerando as estratégias que envolvem a ventilação natural, a composição das paredes utilizada foi de tijolo cerâmico de 6 furos com argamassa interna e externa, como apresentado na Tabela 4. Nessas simulações, considerou-se a utilização de janela basculante para o banheiro e de janelas de giro para os demais ambientes.

Para as simulações com a aplicação da estratégia de inércia térmica com aquecimento solar foram avaliadas três composições de paredes distintas, sendo estas de bloco de concreto com altos valores de capacidade térmica (Tabela 5). Neste caso, considerou-se as janelas de giro com abertura apenas no período diurno.

Tabela 3. 2. Propriedades térmicas da cobertura utilizada nas simulações. Fonte: Adaptado de Weber et al. (2017).

Componente Construtivo	Material	Revestimento	Composição	Espessura Equivalente (cm)	Condutividade Térmica (W/m °C)	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (kJ/kg K)	Resistencia Térmica (m ² °C/W)	Transmitância Térmica (W/m ² °C)	Capacidade Térmica (kJ/m ² °C)
Cobertura	Bloco cerâmico pré-moldado		cerâmica	1	1,05	2000	0,92	0,0095	1,77	185
		tabela	câmara de ar	25	1,19	-	-	0,21		
		cerâmica e concreto	4	1,75	2200	1	0,023			
		revestimento interno de cerâmica	1,2	1,05	2000	0,92	0,011			
		argamassa	câmara de ar	4,6	0,565	-	-	0,081		
		argamassa	cerâmica	1,2	1,05	2000	0,92	0,011		
		argamassa	cerâmica	1	1,15	2000	1	0,009		

Tabela 3. 3. Propriedades térmicas do piso utilizado nas simulações. Fonte: Adaptado de Weber et al. (2017).

Componente Construtivo	Composição	Espessura Equivalente (cm)	Condutividade Térmica (W/m °C)	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (kJ/kg K)	Resistencia Térmica (m ² °C/W)
Piso	lã de rocha	-	-	-	-	0,889
	laje	8	1,75	2300	1	-
	piso cerâmico	2	1,05	2000	0,92	-

Tabela 3. 4. Propriedades térmicas das paredes utilizadas nas simulações considerando a estratégia de ventilação natural. Fonte: Adaptado de Weber et al. (2017).

Componente Construtivo	Material	Revestimento	Composição	Espessura Equivalente (cm)	Condutividade Térmica (W/m °C)	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (kJ/kg K)	Resistência Térmica (m ² °C/W)	Transmitância Térmica (W/m ² °C)	Capacidade Térmica (kJ/m ² °C)
Parede	Cerâmica 6 furos (9x14x24)	argamassa interna e externa	argamassa interna	2.5	1.15	2000	1	0.022	2.39	150
			cerâmica	1.34	0.9	1600	0.92	0.015		
			câmara de ar	6.32	0.361	-	-	0.175		
			cerâmica	1.34	0.9	1600	0.92	0.015		
			argamassa externa	2.5	1.15	2000	1	0.022		

Tabela 3. 5. Propriedades térmicas das paredes utilizadas nas simulações considerando a estratégia de inércia térmica com aquecimento solar.

Fonte: Adaptado de Weber et al. (2017).

Componente Construtivo	Material	Revestimento	Composição	Espessura Equivalente (cm)	Condutividade Térmica (W/m °C)	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (kJ/kg K)	Resistencia Térmica (m ² °C/W)	Transmitância Térmica (W/m ² °C)	Capacidade Térmica (kJ/m ² °C)
Parede Composição 1	Concreto 2 furos (14x19x39)	argamassa interna e externa, placa de granito	argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,62	329
			concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			câmara de ar	8,00	0,635	-	-	0,126		
			concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			argamassa externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
			granito	2,50	3,00	2600	0,80	0,080		
Parede Composição 2	Concreto Bloco duplo 2 furos (14x19x39)	argamassa interna e externa com câmara de ar	argamassa interna	2,5	1,15	2000	1	0,022	0,63	439
			concreto	3,0	1,75	2400	1	0,017		
			câmara de ar	8,0	0,143	-	-	0,559		
			concreto	3,0	1,75	2400	1	0,017		
			câmara de ar	4,0	0,217	-	-	0,184		
			concreto	3,0	1,75	2400	1	0,017		
			câmara de ar	8,0	0,143	-	-	0,559		
			concreto	3,0	1,75	2400	1	0,017		
			argamassa externa	2,5	1,15	2000	1	0,022		
Parede Composição 3	Concreto Bloco duplo 2 furos (14x19x39)	argamassa interna e externa com lã de rocha	argamassa interna	2,5	1,15	2000	1	0,022	0,29	441
			concreto	3	1,75	2400	1	0,017		
			câmara de ar	8	0,074	-	-	1,081		
			concreto	3	1,75	2400	1	0,017		
			lã de rocha	4	0,045	100	0,8	0,889		
			concreto	3	1,75	2400	1	0,017		
			câmara de ar	8	0,074	-	-	1,081		
			concreto	3	1,75	2400	1	0,017		
			argamassa externa	2,5	1,15	2000	1	0,022		

3.3.5 Indicadores de desempenho

3.3.5.1 Balanço térmico

Com o intuito de analisar a coerência das simulações realizadas, um caso de referência para o cálculo do balanço térmico foi realizado para o município de Apodi/RN. Esse procedimento tem como objetivo avaliar o desempenho térmico da edificação quanto às cargas de energia provenientes dos ganhos e perdas de calor de cada superfície externa e interna (cobertura, parede, piso, porta e janela), sistema de iluminação, equipamentos e a presença de usuários nos ambientes (Melo e Lamberts, 2008a).

Os dados utilizados são fornecidos em escala horária e através do sistema de condicionamento de ar inserido no caso simulado é possível identificar a quantidade de calor que deve ser adicionado ou retirado do ambiente para atender a uma determinada temperatura de controle. Neste trabalho, as temperaturas de controle para acionamento do sistema de ar para aquecimento e resfriamento foram, respectivamente, 18 °C e 24 °C. Sendo assim, o somatório das cargas térmicas da edificação deve estar próximo, em módulo, ao valor encontrado para o sistema de condicionamento de ar inserido (Melo e Lamberts, 2008b). Os dados necessários para esses cálculos foram obtidos a partir dos relatórios de saída da simulação.

3.3.5.2 Conforto térmico adaptativo

Para a avaliação das edificações habitacionais quanto ao conforto térmico adaptativo, foram utilizados os conceitos e os procedimentos apresentados pela ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2013). A partir dessa metodologia, foram utilizados os dados de temperatura operativa, de entrada e saída do fluxo de ar, e a temperatura de bulbo seco externo, resultantes da simulação pelo *Energyplus*. No conforto térmico adaptativo são utilizados valores referentes aos últimos 15 dias, em escala horária, a fim de identificar os percentuais de conforto ou desconforto aos usuários. Em relação ao desconforto, o mesmo pode ser caracterizado como desconforto por frio ou por calor.

Para a obtenção das temperaturas máxima e mínima limites adequadas do ponto de vista do conforto adaptativo, foram utilizadas as Equações 1 e 2 (ASHRAE, 2013).

$$\text{Limite de aceitabilidade máximo} = 21,3 + T_{\text{ext}} \times 0,31 \quad (1)$$

$$\text{Limite de aceitabilidade mínimo} = 14,3 + T_{\text{ext}} \times 0,31 \quad (2)$$

onde T_{ext} é temperatura externa média (°C).

3.3.5.3 Graus-hora

Para a avaliação quanto ao desempenho térmico, foram utilizados os indicadores de graus-hora de resfriamento e aquecimento. A obtenção desses índices ocorreu a partir da utilização dos valores de temperatura operativa provenientes da simulação dos modelos habitacionais de referência e do valor de temperatura base para cada uma das condições de necessidade, como apresentado nas Equações 3 e 4. Para a identificação das necessidades de resfriamento e de aquecimento, as temperaturas base utilizadas foram, respectivamente, 26°C e 18 °C. O primeiro valor foi estabelecido conforme o RTQ-R (INMETRO, 2012), enquanto o segundo é um valor definido com base na norma Standard 55(ASHRAE, 2010) e em Givoni (1992).

$$\text{GHR} = \sum T_o - T_{b1} \quad (3)$$

$$\text{GHA} = \sum T_{b2} - T_o \quad (4)$$

onde GHR é graus-hora de resfriamento (°C); GHA é graus-hora de aquecimento (°C); T_o é a temperatura operativa horária do ambiente (°C); T_{b1} é temperatura de base para resfriamento (°C); T_{b2} é temperatura de base para aquecimento (°C).

3.4 Resultados

3.4.1 Balanço térmico

A análise do balanço térmico realizado para o município de Apodi/RN (caso de referência) demonstrou a coerência nos resultados obtidos a partir da simulação. Na Figura 3.4 estão apresentadas as cargas de energia provenientes dos ganhos e perdas de calor de cada superfície, sistema de iluminação, equipamentos, presença de usuários nos ambientes e do sistema de condicionamento de ar. Essa análise foi realizada para os três ambientes de permanência prolongada existentes na edificação e teve como horizonte temporal de análise o dia primeiro de janeiro. A partir dessa figura, evidencia-se que o sistema de resfriamento

conseguiu suprir o somatório de cargas internas presentes na edificação, o que demonstra a confiabilidade dos resultados das simulações apresentados na sequência.

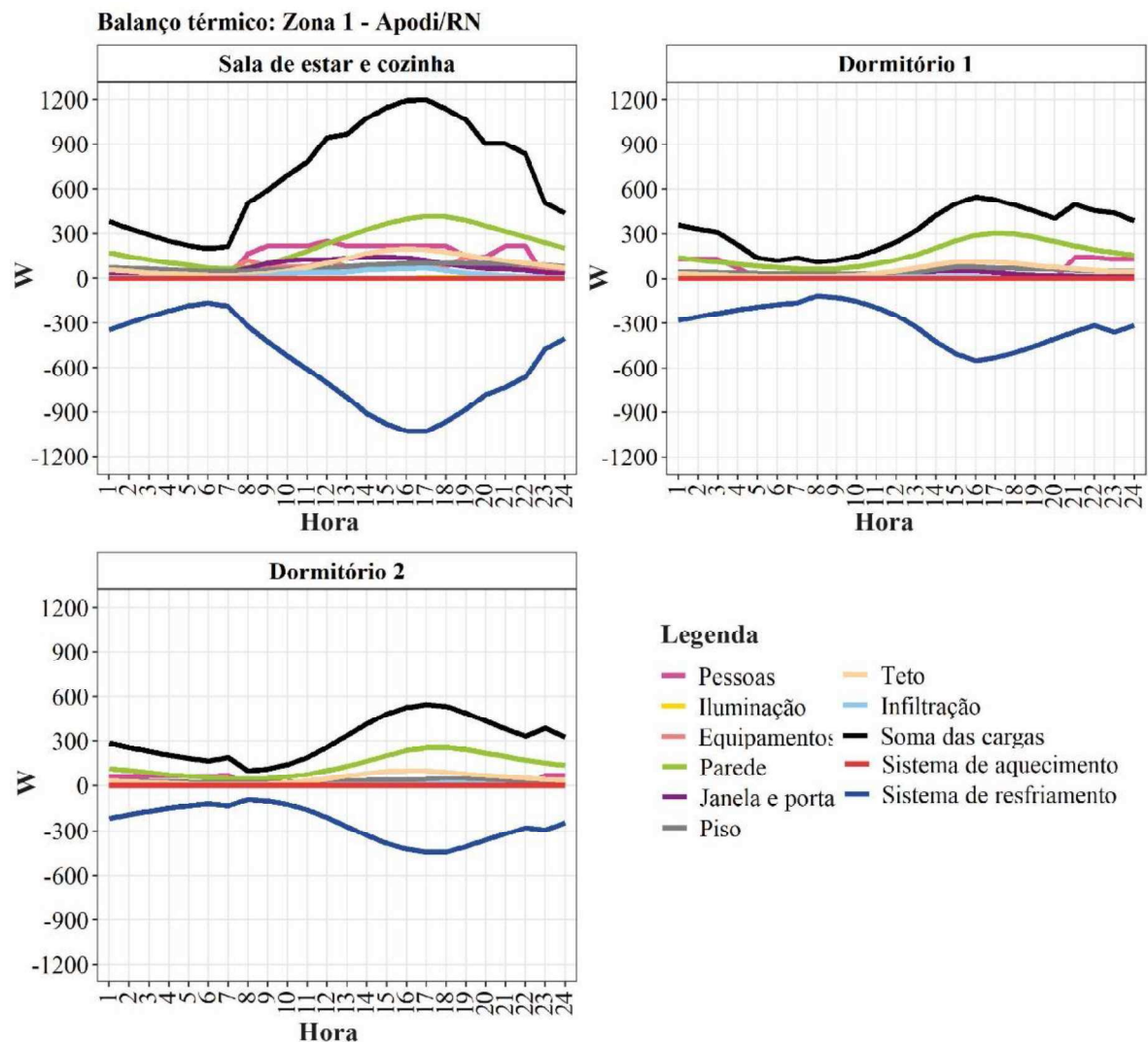


Figura 3. 4. Resultado do balanço térmico do caso de referência em Apodi/RN.

3.4.2 Estratégia ventilação natural

A resposta da aplicação de estratégia de ventilação natural no conforto térmico da edificação simulada foi analisada para os cinco municípios representativos das zonas climáticas definidas no Capítulo 2. Para as Zonas 1, 2, 3 e 4, as estratégias de ventilação considerando janelas abertas 24 horas e durante o período noturno promoveram os maiores percentuais anuais de conforto (Figuras 3.5a, 3.6a, 3.7a e 3.8a). O uso dessas estratégias foi mais expressivo no município de Palmeira dos Índios/AL onde os percentuais anuais de

conforto chegam a 87,7%. Quanto ao desconforto, pode ser caracterizado majoritariamente como desconforto por calor, observado para todas as estratégias de ventilação natural analisadas.

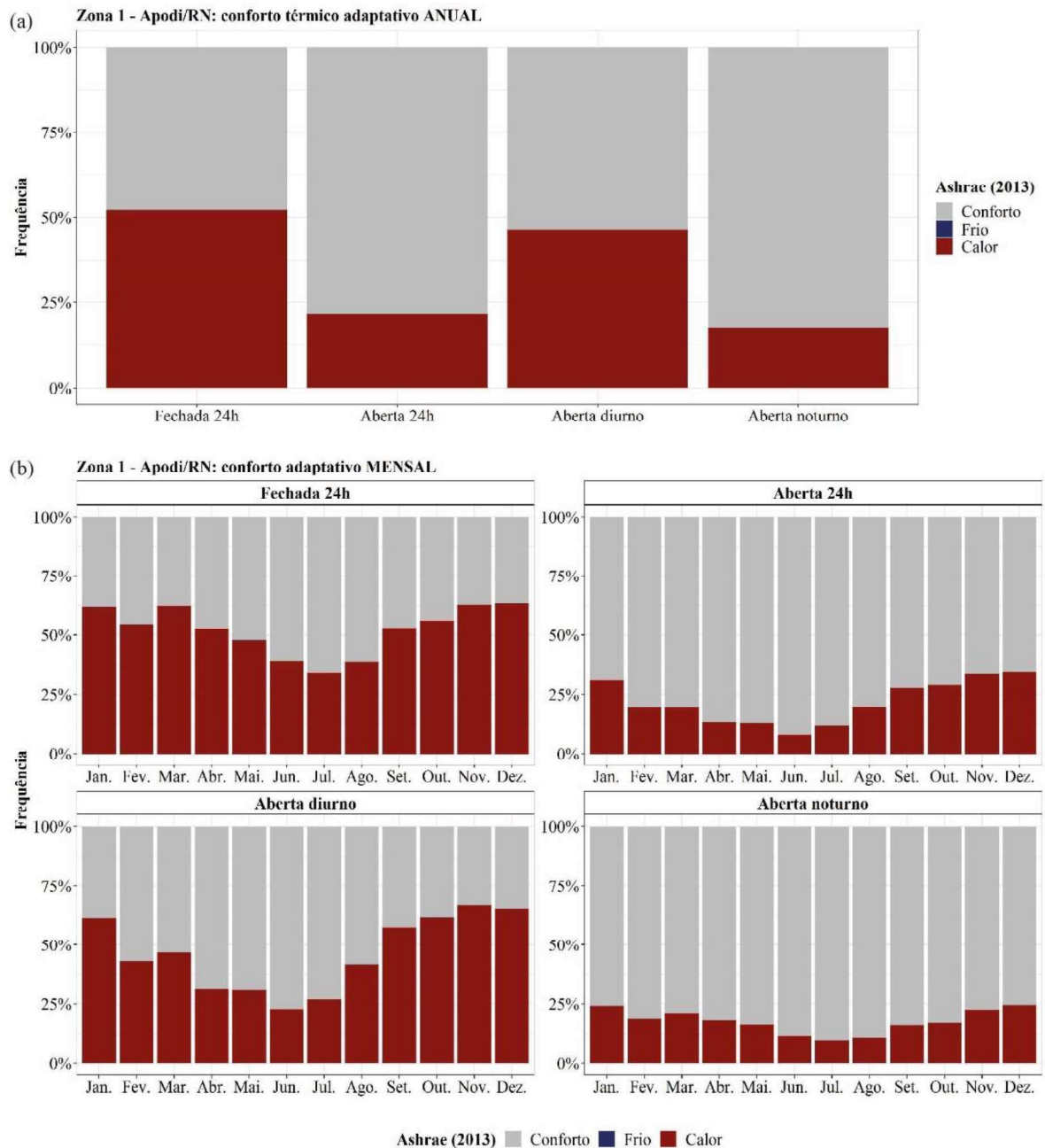


Figura 3. 5. Percentuais (a) anuais e (b) mensais do conforto térmico adaptativo e desconforto por frio e calor para o município de Apodi/RN, considerando estratégias de ventilação natural.

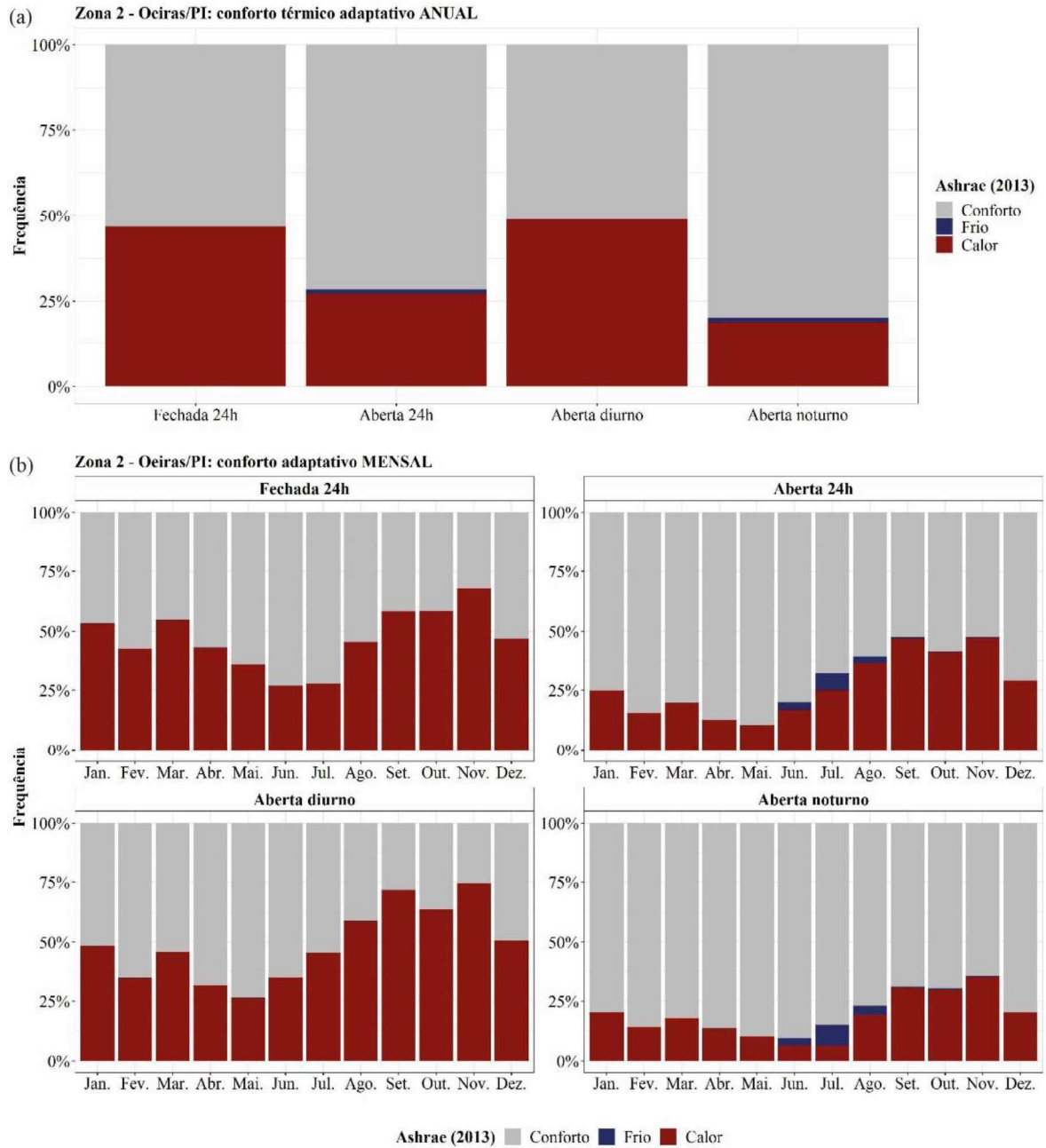


Figura 3. 6. Percentuais (a) anuais e (b) mensais do conforto térmico adaptativo e desconforto por frio e calor para o município de Oeiras/PI, considerando estratégias de ventilação natural.

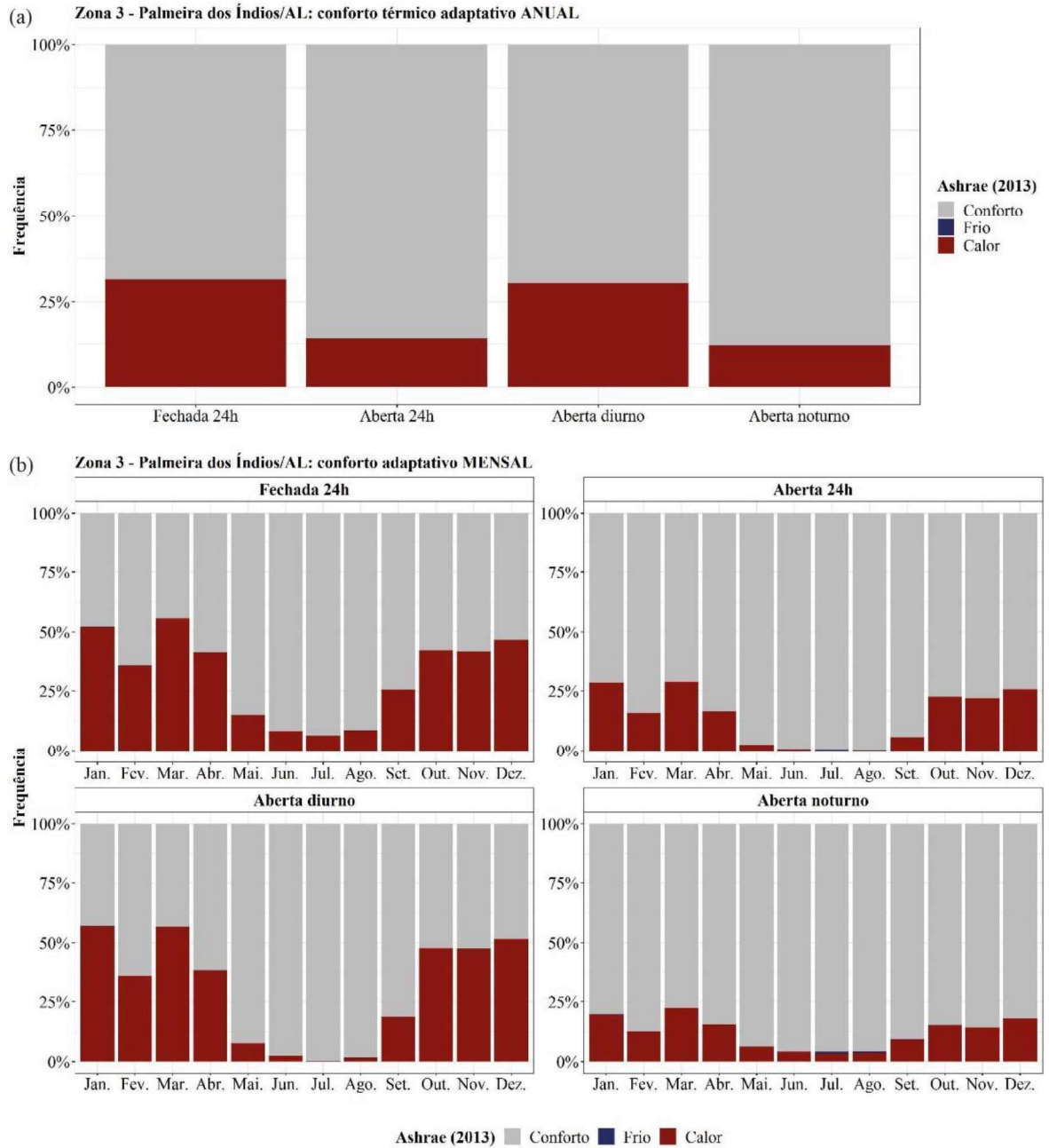


Figura 3. 7. Percentuais (a) anuais e (b) mensais do conforto térmico adaptativo e desconforto por frio e calor para o município de Palmeira dos Índios/AL, considerando estratégias de ventilação natural.

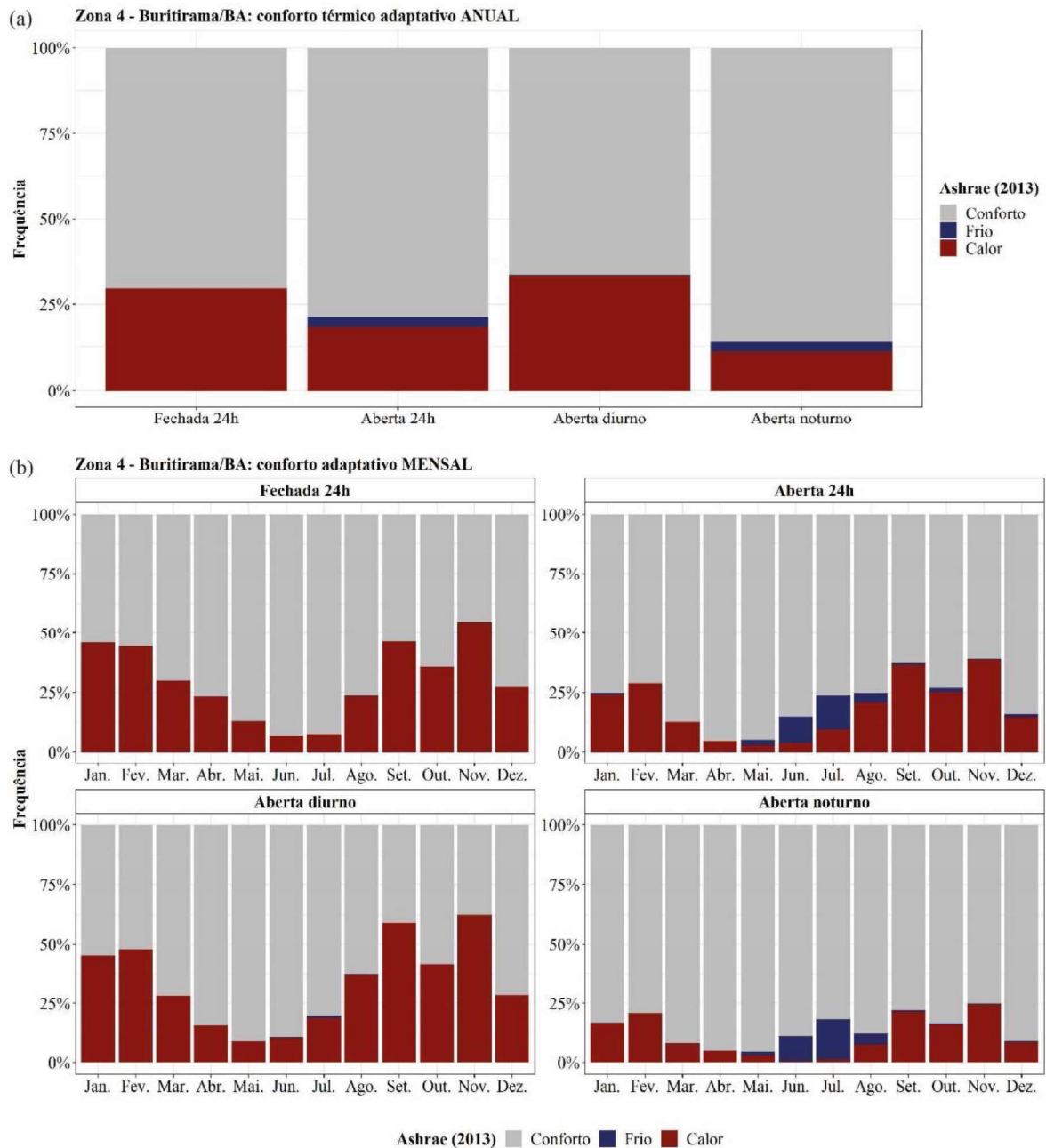


Figura 3. 8. Percentuais (a) anuais e (b) mensais do conforto térmico adaptativo e desconforto por frio e calor para o município de Buritirama/BA, considerando estratégias de ventilação natural.

Em relação aos percentuais mensais de conforto térmico adaptativo (Figuras 3.5b, 3.6b, 3.7b e 3.8b), as estratégias de ventilação com as janelas abertas 24 horas e durante o período noturno também apresentaram os menores percentuais de desconforto para todos os meses, quando analisadas as Zonas 1, 2, 3 e 4.

Para o município de Apodi/RN, os menores percentuais de conforto térmico foram

observados nos meses de novembro e dezembro, apesar dos altos valores da velocidade do vento nesses meses (Figura 3.2c). Nos meses de junho e julho, foram observados os menores percentuais de desconforto por calor, o que está associado às menores temperaturas presentes para essa zona nesses meses.

No município de Oeiras/PI, as altas temperaturas médias mensais de agosto a dezembro acarretaram em maiores percentuais de desconforto por calor. Para esse município e para Buritirama/BA, desconforto por frio foi observado durante o inverno, sobretudo para os meses de junho e julho onde ambas as cidades apresentaram os mais baixos valores de umidade relativa mensal.

O município de Palmeira dos Índios/AL, no período de maio a agosto, apresentou percentuais horários de conforto térmico próximos a 100% quando analisadas as estratégias de ventilação natural com janelas abertas 24 horas e no período noturno. Para essas mesmas estratégias, os percentuais de desconforto por calor foram menos expressivos para o mês de novembro que os observados nas Zonas 1, 2 e 4. Esse fato pode estar relacionado as altas velocidades do vento observadas para esse mês, como evidenciado na Figura 3.2c.

Diferentemente das demais cidades analisadas, o município de Águas Vermelhas/MG apresentou os maiores percentuais de conforto térmico anual e mensal quando simuladas as estratégias de ventilação natural considerando as janelas fechadas 24 horas e abertas durante o período diurno (Figura 3.9). Para este município, foram observados também os maiores percentuais de desconforto por frio, presentes em todos os meses quando analisadas as estratégias de ventilação natural com janelas abertas 24 horas e durante o período noturno.

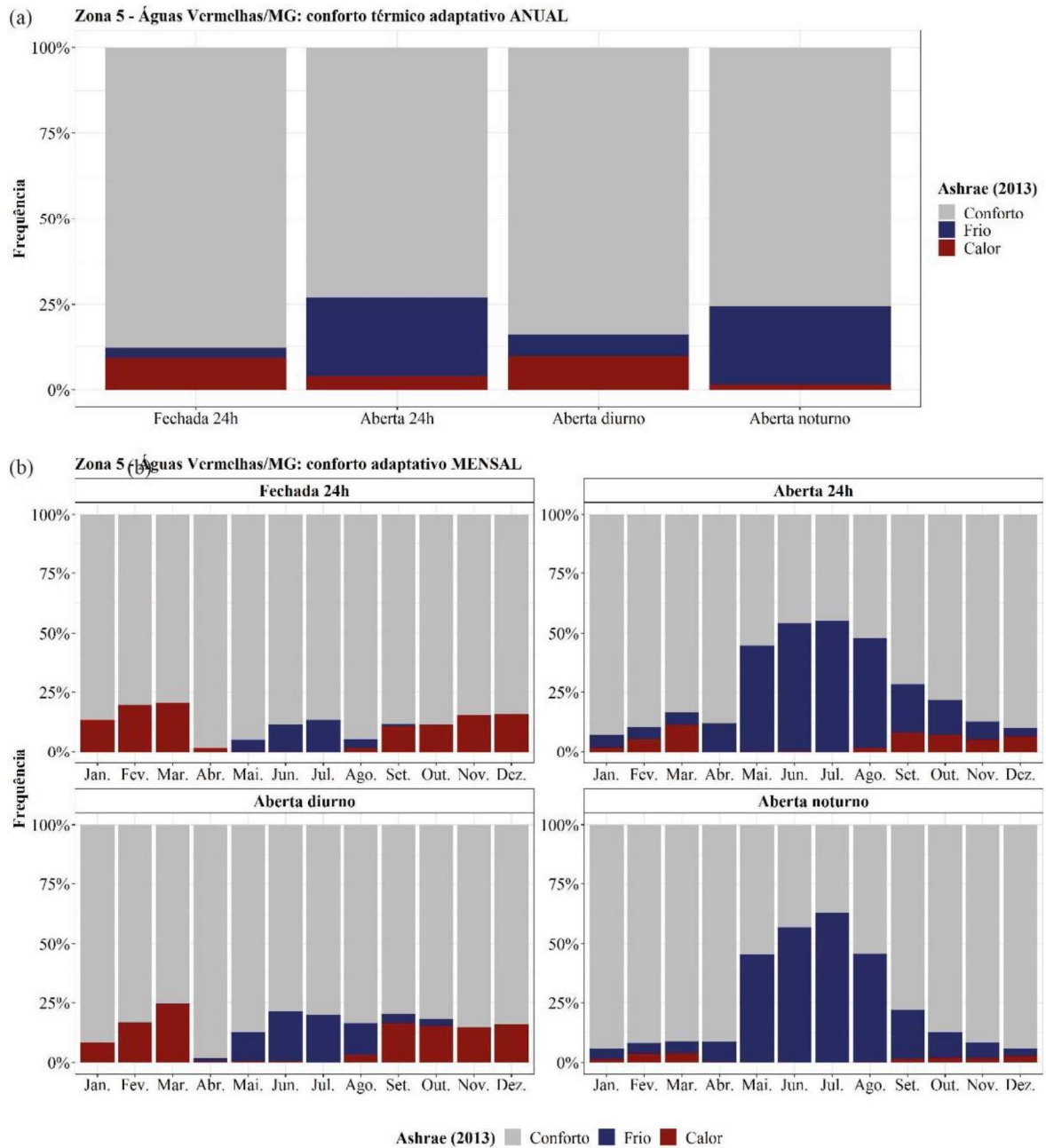


Figura 3. 9. Percentuais (a) anuais e (b) mensais do conforto térmico adaptativo e desconforto por frio e calor para o município de Águas Vermelhas/MG, considerando estratégias de ventilação natural.

Ao se comparar a condição de ventilação natural com janelas abertas no período diurno com janelas abertas 24 horas, pode-se perceber um aumento significativo no desconforto por frio, principalmente nos meses de inverno. Esse fato evidencia a influência da ventilação noturna no aumento do desconforto por frio para o município de Águas Vermelhas/MG.

No que concerne às análises do indicador de desempenho térmico de graus-hora, necessidade de resfriamento ocorreu para os cinco municípios avaliados, enquanto a necessidade por aquecimento só foi observada para o município de Águas Vermelhas/MG (Figuras 3.10 e 3.11).

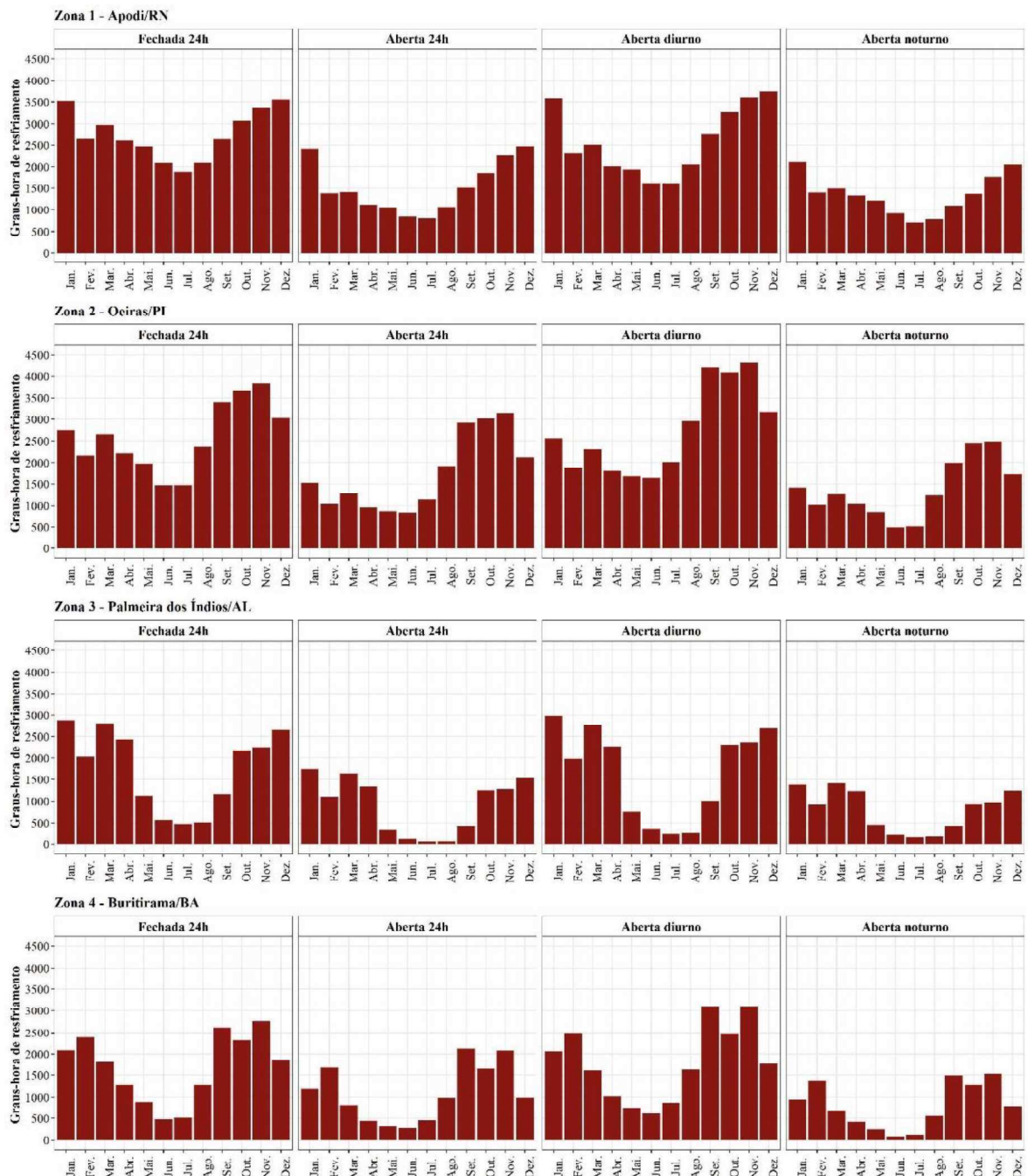


Figura 3. 10. Valores mensais de necessidade de graus-hora de resfriamento para os municípios de Apodi/RN, Oeiras/PI, Palmeira dos Índios/AL e Buritirama/BA, considerando as estratégias de ventilação natural.

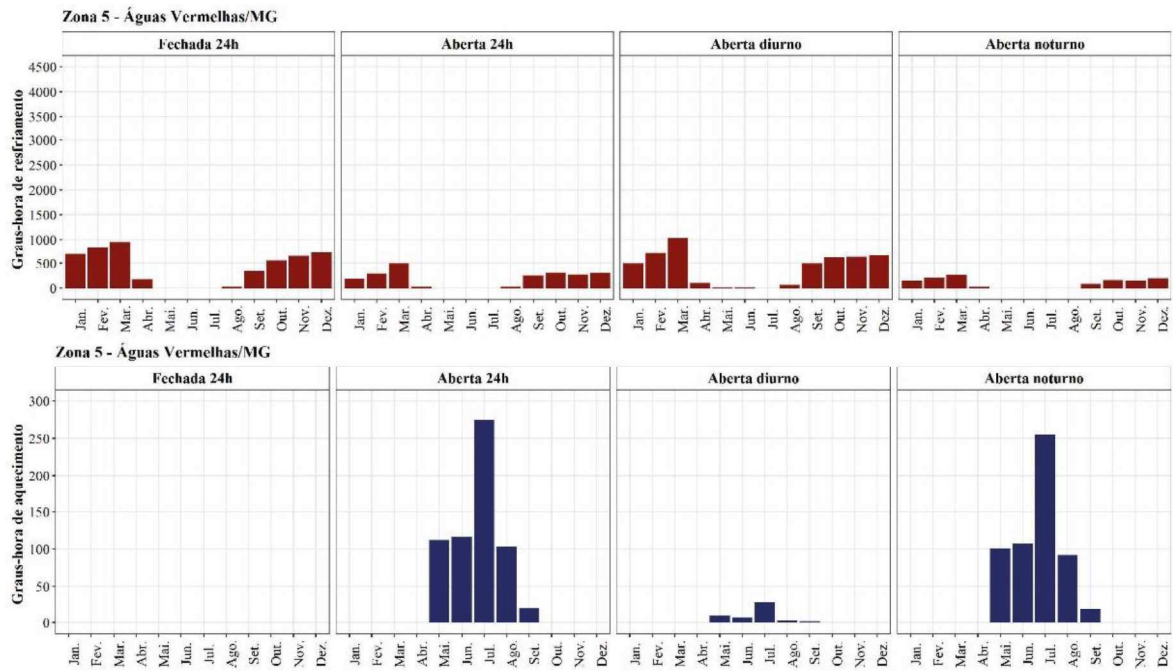


Figura 3. 11. Valores mensais de necessidade de graus-hora de resfriamento e aquecimento para o município de Águas Vermelhas/MG, considerando as estratégias de ventilação natural.

O emprego das estratégias de ventilação natural com janelas abertas 24 horas e somente durante o período noturno promoveu uma menor necessidade de graus-hora de resfriamento quando comparadas às demais estratégias de ventilação, para todos os municípios analisados. De maneira oposta, essas mesmas estratégias acarretaram em maiores necessidades de aquecimento nos meses de inverno para o município de Águas Vermelhas/MG.

De maneira geral, dentre as estratégias de ventilação natural analisadas, as condições de janelas abertas 24 horas e durante o período noturno são as mais indicadas para o aumento no percentual de horas de conforto térmico mensal e anual nos municípios inseridos nas Zonas 1, 2, 3 e 4 definidas no Capítulo 2. Em contrapartida, para a Zona 5 as estratégias de ventilação mais indicadas consistem no uso de janelas fechadas 24 horas e abertas no período diurno.

Para a Zona 5, apesar de as estratégias de ventilação natural com janelas fechadas 24 horas e abertas somente no período diurno terem acarretado em maiores percentuais de conforto e em uma menor necessidade de graus-hora de aquecimento, sugere-se o uso da ventilação diurna, uma vez que possibilitaria maiores taxas de renovação do ar internas.

3.4.3 Estratégia inércia térmica para aquecimento solar

Considerando as baixas temperaturas observadas no município de Águas Vermelhas/MG, três composições de paredes com altos valores de capacidade térmica foram simuladas afim de avaliar a aplicação da estratégia de inercia térmica com aquecimento solar.

Em relação ao conforto térmico adaptativo anual e mensal, a parede de Composição 2 (bloco duplo de concreto, argamassa interna e externa com câmara de ar) apresentou os maiores percentuais de conforto quando comparada às Composições 1 (bloco de concreto, argamassa interna e externa com placa de granito) e 3 (bloco duplo de concreto, argamassa interna e externa com lã de rocha) (Figura 3.12a e 3.12b).

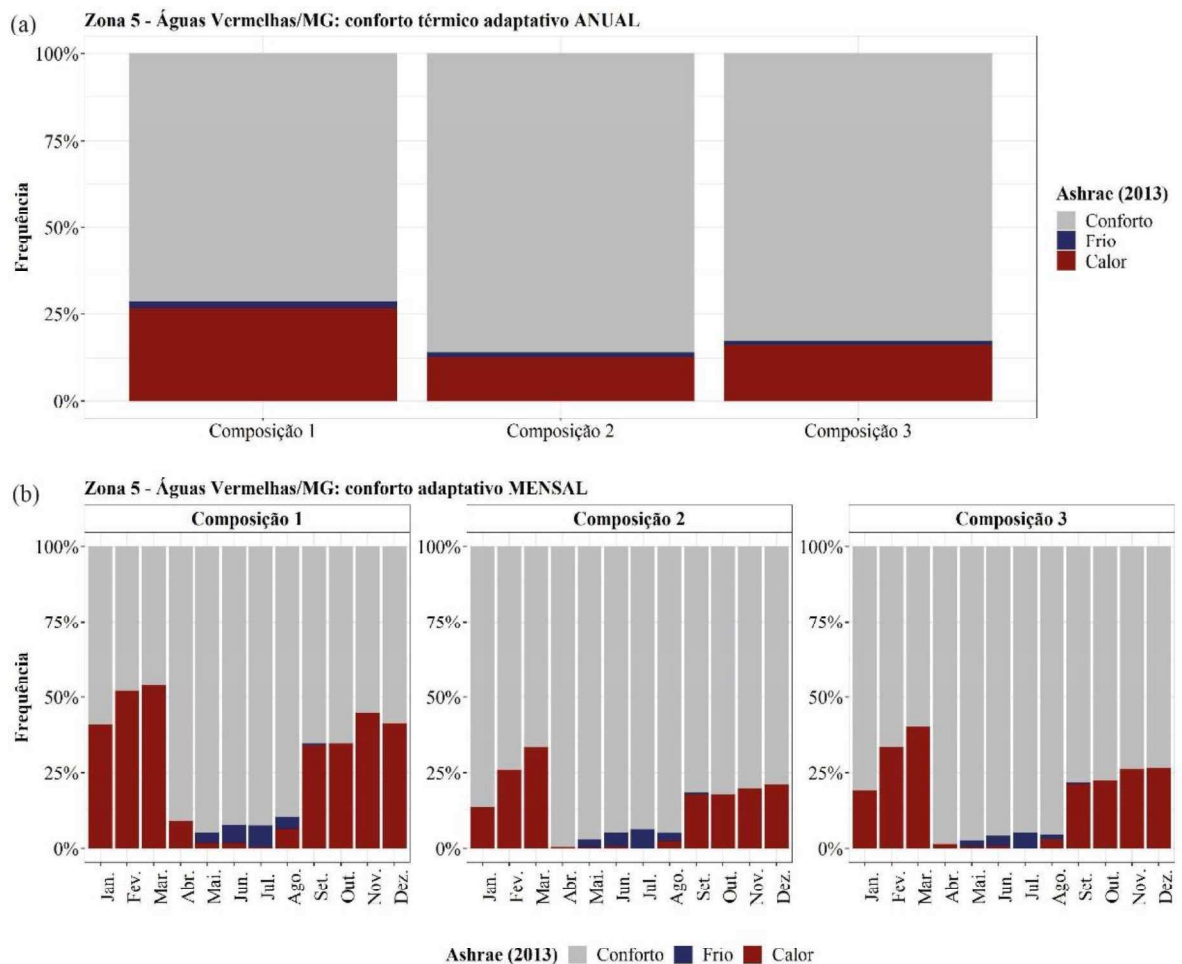


Figura 3. 12. Percentuais (a) anuais e (b) mensais do conforto térmico adaptativo e desconforto por frio e calor para o município de Águas Vermelhas/MG, considerando estratégias de inércia térmica para aquecimento solar.

Apesar das três composições de parede que empregaram a estratégia de inércia térmica com aquecimento solar terem promovido um aumento nos percentuais de conforto térmico nos meses de inverno, o uso dessa estratégia acarretou em um demasiado aumento nas horas de desconforto por calor nos demais meses. Esse fato é corroborado pelo aumento da necessidade de graus-hora de resfriamento observado para o município de Águas Vermelhas quando comparado ao se empregar as estratégias de ventilação natural (Figura 3.13). Quanto à necessidade de aquecimento, o uso da estratégia de inércia térmica com aquecimento solar acarretou em valores máximos na ordem de apenas sete graus-hora.

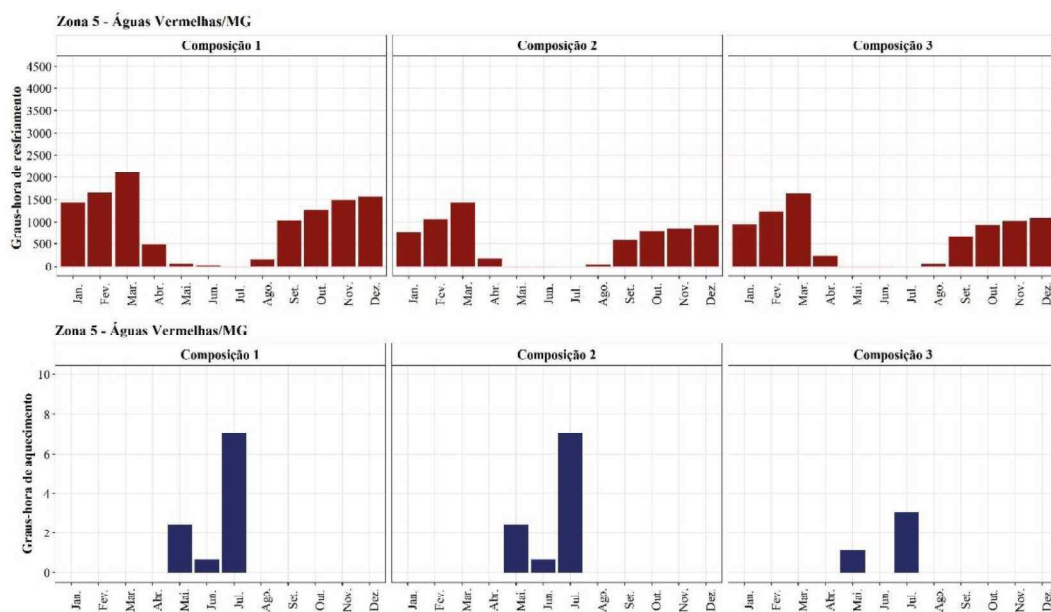


Figura 3. 13. Valores mensais de necessidade de graus-hora de resfriamento e aquecimento para o município de Águas Vermelhas/MG, considerando a estratégia de inércia térmica com aquecimento solar.

Diferentemente da alta demanda pelo uso da estratégia de inércia térmica com aquecimento solar definida para a Zona 5 no Capítulo 2 (Tabela 1), as respostas das simulações realizadas indicam a incoerência no uso dessa estratégia na maior parte dos meses. Diante disso, análises complementares podem ser realizadas afim de melhor estudar a influência do uso dessa estratégia em edificações inseridas nessa zona, como a utilização de outras composições de materiais bem como o emprego dessa estratégia apenas em algumas superfícies da envoltória.

3.5 Conclusão

A realização de simulações termo energéticas possibilitou a avaliação da adequabilidade de estratégias de condicionamento térmico passivo propostas para o semiárido brasileiro. A confiabilidade dessas simulações foi atestada a partir da análise do balanço térmico realizado para o município de Apodi/RN.

Dentre as estratégias de ventilação natural analisadas, o uso de janelas abertas 24 horas e durante o período noturno se caracterizam como uma boa alternativa para a redução das horas de desconforto por calor nas edificações inseridas nas Zonas 1, 2, 3 e 4. Essas estratégias acarretaram maiores percentuais de conforto térmico anual e mensal, bem como em uma menor necessidade de graus-hora de resfriamento. Além disso, não foram observadas necessidades de graus-hora de aquecimento para essas zonas.

Especificamente em relação à Zona 5, a estratégia de ventilação natural com janelas abertas apenas no período diurno é a mais recomendada, uma vez que promove maiores percentuais de conforto e permite maiores taxas de renovação do ar. Em relação à estratégia de inércia térmica com aquecimento solar avaliada para essa zona, as três composições de parede analisadas promoveram uma redução no desconforto por frio durante o inverno. Em contrapartida, um aumento no desconforto por calor e na necessidade de graus-hora de resfriamento foi observado nos demais meses, o que sugere a necessidade de análises complementares para um melhor emprego dessa estratégia nas edificações inseridas nessa zona.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ARAÚJO, M. L. T.; BARBOSA, G. L.; BATISTA, J. O. Desempenho térmico de residência unifamiliar PMCMV em diferentes cidades alagoanas. In: ENCAC – Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 14, 2017, Brasília. **Anais eletrônicos...** Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/encac/files/2017/topico4artigo22.pdf>> Acesso em: 10 mar. 2020.

ASHRAE - American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineering. *Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy*. ASHRAE: Atlanta. 2013.

ASHRAE - American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineering. *Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy*. ASHRAE: Atlanta. 2010

BIANCO, V. et al. Analysis of energy demand in residential buildings for different climates by means of dynamic simulation. *International Journal of Ambient Energy*, v.37, n.2, p. 108-120, 2016.

DOE – United States Department of Energy. EnergyPlus: version 9.0.1. 2019. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

GAO, H.; KOCH, C.; WU, Y. Building information modelling based building energy modelling: A review. *Applied energy*, v. 238, p. 320-343, 2019.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and buildings*, 18(1), 11-23, 1992.

GUNAWARDENA, K.; STEEMERS, K. Adaptive comfort assessments in urban

neighbourhoods: Simulations of a residential case study from London. *Energy and Buildings*, v. 202, p. 109322, 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios: Características gerais dos domicílios e dos moradores 2018*. Rio de Janeiro, 2019.

INMETRO. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R. 2012. Disponível em:<
<http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

MAHAR, W. A. et al. Sensitivity Analysis of Passive Design Strategies for Residential Buildings in Cold Semi-Arid Climates. *Sustainability*, v. 12, n. 3, p. 1091, 2020.

MARTINS, T. A. L.; BITTENCOURT, L. S.; KRAUSE, C. M. L. B. Contribuição ao zoneamento bioclimático brasileiro: reflexões sobre o semiárido nordestino. *Ambiente Construído*, v. 12, n. 2, p. 59-75, 2012.

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

MASTOURI, H., et al. Effect of Natural Ventilation on the Thermal Performance of a Residential Building in a Hot Semi-Arid Climate. In *2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference*, pp. 1-6, IEEE, 2019.

MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise da influência do desempenho térmico dos fechamentos opacos através do balanço térmico. *XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC)*. Fortaleza, 2008a.

MELO, A. P.; LAMBERTS, R. O método do balanço térmico através de simulação computacional no programa EnergyPlus. *Manual do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE)*. Florianópolis, 2008b.

OLIVEIRA, C. C.; SAKIYAMA, N. R. M.; MIRANDA, L. V. Desempenho térmico de uma edificação unifamiliar naturalmente ventilada para o clima de Teófilo Otoni-mg. *REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 13, n. 2, 2017.

RODRIGUES, M. G. *Consumo de energia elétrica de habitações com sistemas fotovoltaicos sob a tarifa branca e convencional*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 140 f, 2019.

RORIZ, M. Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros. In: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos, SP, 2012.

SOFLAEI, F. et al. A simulation-based model for courtyard housing design based on adaptive thermal comfort. *Journal of Building Engineering*, p. 101335, 2020.

SORGATO, M. J. *Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 216f, 2009.

SORGATO, M. J. *A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 260 f, 2015.

SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. *Resolução n.115*, de 23 de novembro de 2017. Diário Oficial da União n.232, 5 de dezembro de 2017.

TELLES, C. P. *Proposta de simplificação do RTQ-R*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 118f, 2016.

TIAN, Z. et al. Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. *Energy and Buildings*, v. 158, p. 1306-1316, 2018.

WANG, C.; ZHU, Y.; GUO, X. Thermally responsive coating on building heating and cooling energy efficiency and indoor comfort improvement. *Applied Energy*, v. 253, p. 113506, 2019.

WEBER, F. S. et al. Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros no programa *EnergyPlus: relatório técnico* LABEEE. Florianópolis, 2017.

WEIß, T.; FULTNERER, A. M.; KNOTZER, A. Energy flexibility of domestic thermal loads—a building typology approach of the residential building stock in Austria. *Advances in Building Energy Research*, v. 13, n. 1, p. 122-137, 2019.

4 CAPÍTULO 4 – CONCLUSÃO GERAL

Esta dissertação teve como objetivo propor um zoneamento climático para o semiárido brasileiro visando o conforto e o desempenho térmico de edificações. Além disso, buscou-se avaliar a influência do uso de estratégias de condicionamento térmico para essa região, a fim de subsidiar um planejamento e adaptação de edificações mais adequadas às especificidades climáticas da região semiárida.

No Capítulo 2, técnicas de estatística multivariada foram empregadas para a seleção das variáveis climáticas de maior relevância para o semiárido brasileiro, bem como para a definição espacial de zonas climáticas. Enfatiza-se que a metodologia utilizada apresenta robustez e grande potencial de aplicação em outras regiões, uma vez que considera os aspectos climáticos locais de maior influência para delimitação de zoneamentos. Como resultados, as variáveis relacionadas a temperatura apresentaram maior relevância prática, a partir das quais cinco zonas climáticas foram definidas para a região semiárida. Todas as zonas propostas apresentaram alta demanda por estratégias construtivas de condicionamento térmico para que se obtenha uma maior eficiência energética das edificações. Apesar disso, percebeu-se que o uso de estratégias passivas se constitui como uma alternativa eficaz para um aumento nas condições de conforto térmico, uma vez que a demanda por estratégias de resfriamento e aquecimento artificial foram quase nulas. Quanto às recomendações, as estratégias de ventilação natural diurna e noturna, além do resfriamento evaporativo são as mais indicadas para as Zonas 1, 2, 3 e 4, enquanto a estratégia de inércia térmica com aquecimento solar adquire importância para a Zona 5.

No Capítulo 3, simulações termo energéticas foram realizadas no intuito de avaliar a adequabilidade de estratégias de condicionamento térmico passivo em uma edificação unifamiliar considerando as características climáticas das cinco zonas propostas no Capítulo 2. Como estratégias avaliadas, a ventilação natural foi subdividida em ventilação natural diurna, ventilação natural noturna, janelas abertas 24 horas e janelas fechadas 24 horas, analisadas para os municípios de Apodi/RN (Zona 1), Oeiras/PI (Zona 2), Palmeira dos Índios/AL (Zona 3), Buritirama/BA (Zona 4) e Águas Vermelhas/MG (Zona 5). Para a Zona 5, além da ventilação natural, foi simulada a estratégia de inércia térmica com aquecimento solar considerando três composições de materiais distintas com alta capacidade térmica. Os resultados demonstraram que o uso de janelas abertas 24 horas e durante o período noturno se caracterizam como uma boa alternativa para a redução das horas de desconforto por calor

nas edificações inseridas nas Zonas 1, 2, 3 e 4. Para Zona 5, a estratégia de ventilação natural com janelas abertas apenas no período diurno é a mais recomendada. Quanto ao uso de inércia térmica com aquecimento solar, apesar dessa estratégia ter sido recomendada no Capítulo 2, as simulações realizadas sugerem que a aplicação dessa estratégia deve ser feita com cautela, uma vez que pode acarretar em altos percentuais de desconforto por calor.

4.1 Contribuições da pesquisa

Como principais contribuições desta dissertação têm-se a avaliação de um amplo conjunto de variáveis para a determinação de zonas climáticas visando a eficiência energética de edificações, anteriormente limitadas pelo uso das variáveis temperatura e umidade relativa. Além disso, progressos acerca da compreensão do conforto e desempenho térmico de edificações unifamiliares inseridas no semiárido brasileiro foram realizados, o que se caracteriza como de grande relevância dadas as condições climáticas atípicas e recorrentemente extremas dessa região.

4.2 Limitações

Dentre as principais limitações deste trabalho pode-se citar a utilização do banco de dados do WorldClim que, apesar de apresentar horizonte temporal extenso (1970-2000), é composto por dados relativamente desatualizados. Outra limitação consiste na utilização de apenas um método para a determinação das estratégias de condicionamento térmico, a carta psicrométrica adaptada de Givoni, que considera apenas aspectos relacionados à temperatura e ao conteúdo de umidade no ar. Por fim, as estratégias definidas no Capítulo 2 não foram avaliadas em sua totalidade no Capítulo 3.

4.3 Sugestões para trabalhos futuros

Como recomendações para a continuação desta pesquisa têm-se a avaliação de simulações termo energéticas que considerem outras composições de materiais construtivos diferente dos analisados, além de outras tipologias de edificações. Ademais, sugere-se a avaliação de outros métodos para a definição de estratégias de condicionamento térmico.