XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8451

Avaliação das Recomendações de Estratégias Bioclimáticas para Edificações de Capitais Brasileiras Diante do Cenário Pessimista RCP 8.5 para 2050

Assessment of Recommended Bioclimatic Design Strategies for Buildings in Brazilian Capital Cities under the Pessimistic RCP 8.5 Scenario for 2050

Maria Luisa Oliveira da Silva
Universidade Estadual de Feira de Santana| Feira de Santana | Brasil | oliveiramallu460@gmail.com
Gleison Martins da Costa
Universidade Estadual de Feira de Santana | Feira de Santana | Brasil | gmcosta@uefs.br

Resumo

O aquecimento global e as mudanças climáticas impõem desafios para a concepção de projetos de edificações adequados ao clima do local de implantação. Este estudo identifica e analisa a quantidade de horas associadas a estratégias bioclimáticas, em 11 capitais brasileiras, sob o cenário de emissões RCP 8.5 para o ano de 2050. A metodologia adotou uma abordagem quantitativa baseada em dados climáticos projetados pelos modelos globais MPI-ESM, HadGEM2 e NorESM1 acoplados ao modelo regional do tipo REMO. Os resultados indicam uma quantidade relativamente baixa de horas de conforto térmico para algumas capitais brasileiras e uma dependência de estratégias como o resfriamento artificial contribuindo, consequentemente, para um elevado consumo energético nas edificações. A partir dos resultados, é possível fornecer subsídios para o projeto de edificações resilientes em um cenário de aquecimento global acentuado, destacando as incertezas entre os diferentes modelos climáticos.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Estratégias bioclimáticas. RCP 8.5. Conforto térmico. Edificações resilientes.

Global warming and climate change pose challenges for the design of buildings that are suitable for the local climate. This study identifies and analyzes the number of hours associated with bioclimatic strategies in 11 Brazilian capitals under the RCP 8.5 emissions scenario for the year 2050. The methodology adopted a quantitative approach based on climate data projected by the MPI-ESM, HadGEM2, and NorESM1 global models, coupled with the REMO regional model. The results indicate a relatively low number of thermal comfort hours for some Brazilian capitals and a dependence on strategies such as artificial cooling, consequently contributing to high energy consumption in buildings. Based on the results, it is possible to provide support for the design of resilient buildings in a scenario of pronounced global warming, highlighting the uncertainties among the different climate models.

Keywords: Climate change. Bioclimatic strategies. RCP 8.5. Thermal comfort. Resilient buildings.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8451

INTRODUÇÃO

O aquecimento global e as mudanças climáticas impõem desafios sem precedentes às construções. Com o aumento das temperaturas médias, torna-se necessário utilizar não apenas condições relacionadas ao futuro, mas também considerar a ocorrência de eventos extremos, como ondas de calor, na elaboração de projetos de edificações e testes de simulações térmicas [1].

Historicamente, as recomendações de projeto e as avaliações de desempenho térmico de edificações são feitas por meio de análises baseadas em um único arquivo climático representativo, com dados medidos ao longo dos anos. No entanto, diante das mudanças climáticas, essa abordagem limita a compreensão da variabilidade climática futura, podendo resultar em edifícios vulneráveis ao superaquecimento. A utilização de múltiplas projeções de modelos climáticos é fundamental para capturar as incertezas dos cenários futuros e garantir que os projetos das próximas décadas sejam resilientes às diversas trajetórias de aquecimento global [2].

No Brasil, a compreensão do desempenho térmico ao longo do tempo contribui para evitar problemas como o calor excessivo e as interrupções no fornecimento de energia. Nesse contexto, este artigo identifica e analisa a quantidade de horas associadas a indicações de uso das estratégias bioclimáticas baseado no cenário de emissões RCP 8.5, considerado o caminho mais pessimista pela comunidade científica, visando sugerir orientações para a resiliência das soluções de projeto diante do aquecimento acentuado previsto para o ano de 2050.

MÉTODO

A pesquisa adotou uma abordagem quantitativa, baseada na análise de percentuais de uso das estratégias bioclimáticas em cenários de mudanças climáticas. Nesse levantamento, foi considerado o cenário de emissão de gases de efeito estufa RCP 8.5 para o ano de 2050. Os cenários RCP (*Representative Concentration Pathways*) representam diferentes trajetórias possíveis de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera ao longo do século XXI.

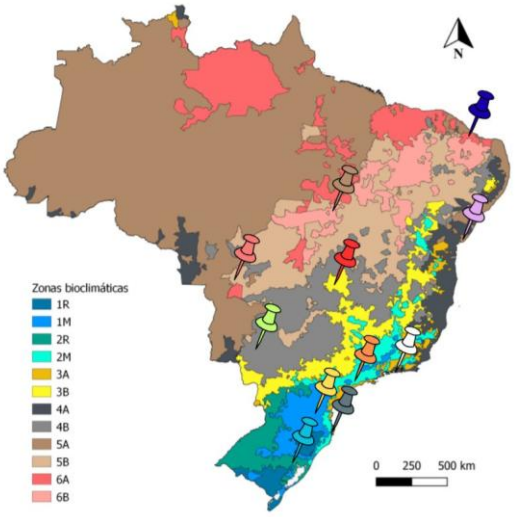
O cenário selecionado representa uma trajetória mais pessimista, associada a altas emissões e maior aquecimento global [3]. Desse modo, a utilização dessa trajetória para diferentes localidades permitiu avaliar possíveis variações nas condições climáticas futuras e compreender como essas mudanças podem influenciar o desempenho térmico das edificações.

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram selecionadas capitais brasileiras representativas das diferentes zonas bioclimáticas definidas pela NBR 15220-3 [4]. A escolha por capitais se justifica, principalmente, pela disponibilidade e confiabilidade de dados climáticos históricos e projetados, além de representarem importantes centros urbanos do território nacional. Cada capital foi associada à zona bioclimática correspondente, permitindo contemplar a diversidade climática presente no Brasil. Entretanto, a zona bioclimática 1R não foi considerada na análise, pois a base de dados climáticos usada neste estudo [2] traz informações apenas para as capitais do Brasil e

nenhuma delas está situada na referida zona. Dessa forma, o estudo contempla a maior parte das zonas bioclimáticas estabelecidas pela norma, permitindo uma análise representativa das condições climáticas do país (Figura 1).

A amostragem contemplou 11 capitais no total, representando, quase a totalidade das zonas bioclimáticas: Palmas (6B), Salvador (5A), Fortaleza (6A), Brasília (3B), Cuiabá (5B), Campo Grande (4B), Rio de Janeiro (4A), São Paulo (2M), Curitiba (1M), Porto Alegre (2R) e Florianópolis (3A).

Figura 1 - Zoneamento bioclimático brasileiro e cidades escolhidas para o estudo



Nota: Os alfinetes indicam as capitais selecionadas. Fonte: Adaptado de LabEEE/UFSC, 2021 [5].

Definidas as cidades, selecionaram-se arquivos climáticos baseados em três modelos climáticos globais (GCMs) acoplados a modelos climáticos regionais (RCMs) do tipo REMO: MPI-ESM-REMO, NorESM1-REMO e HadGEM2-REMO, detalhados em [2]. Esses dados foram processados no software *Climate Consultant 6.0* para extrair as horas por estratégia, utilizando as cartas psicrométricas baseadas nos estudos de Givoni.

Adotou-se o modelo de conforto da *ASHRAE Standard 55 e* do *Handbook of Fundamentals*, escolha justificada pela integração de fatores ambientais e humanos para uma análise mais precisa [6]. Essas cartas permitiram identificar as condições predominantes e as estratégias mais adequadas ao conforto térmico das edificações.

As zonas/estratégias consideradas pelo software na carta bioclimática são as seguintes: Conforto (Cf), Sombreamento (Sb), Alta inércia térmica (A), Alta inércia térmica com ventilação noturna (Avn), Resfriamento evaporativo direto (Re), Resfriamento evaporativo em duas etapas (Re2), Resfriamento por ventilação natural (Rvn), Resfriamento por ventilação forçada (Rvf), Ganho de calor interno (Gc), Ganho solar direto passivo de baixa inércia térmica (Gsb), Ganho solar direto passivo de alta inércia térmica (Gsa), Proteção contra vento de espaços livres (Pcv), Umidificação (U), Desumidificação (Du), Resfriamento, com adição de desumidificação, se necessário (Rd) e o Aquecimento, com adição de umidificação, se necessário (Au).

Na análise bioclimática das 8760 horas anuais via *Climate Consultant 6.0*, o somatório das estratégias excedeu o total de horas do ano devido à sobreposição de zonas na carta bioclimática. Isso indica que, sob certas condições de temperatura e umidade, as estratégias podem ser eficazes simultaneamente. Assim, os dados representam o potencial individual de cada técnica, não sendo categorias mutuamente exclusivas.

Após o processamento dos arquivos pelo software, os resultados foram organizados no Microsoft Excel, onde se calcularam os seguintes indicadores estatísticos: média aritmética, desvio padrão e coeficiente de variação.

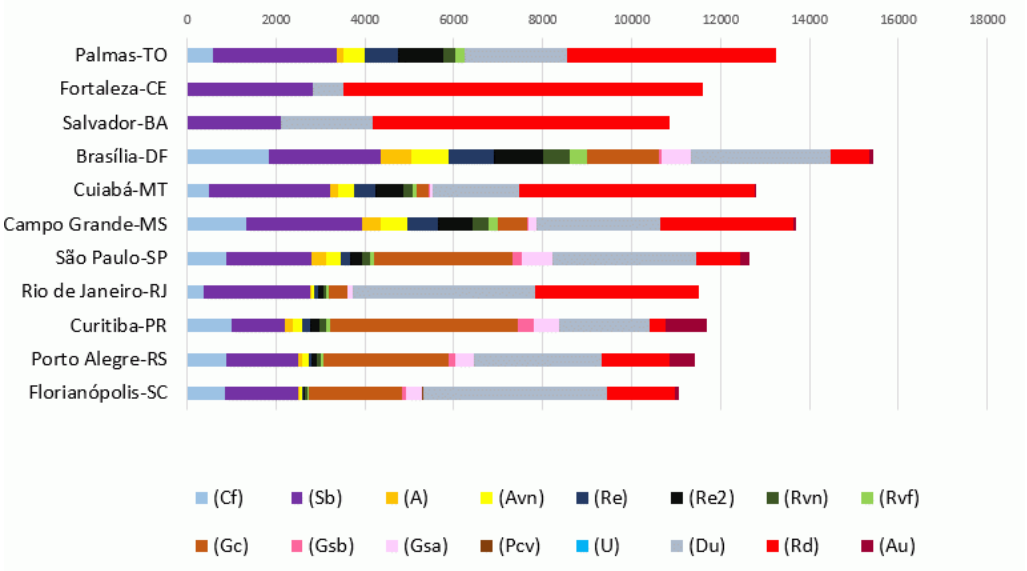
Compreender as incertezas das projeções climáticas exige uma análise estatística sólida, visto que, conforme defendido por estudos [7], a combinação de distintos modelos pode resultar em flutuações significativas. Diante dessa premissa, o presente estudo se estrutura na integração entre simulação climáticas e análise estatística, permitindo uma leitura mais precisa da eficácia das estratégias bioclimáticas nas diversas zonas do país. Tal estrutura analítica pode contribuir no desempenho térmico das edificações em contextos de instabilidade climática futura.

RESULTADOS

INDICAÇÕES PARA O CENÁRIO MPI-ESM-REMO

A avaliação dos dados provenientes do modelo MPI-ESM-REMO para o ano de 2050 indica um cenário de desconforto térmico severo, especialmente nas regiões Norte e Nordeste (Figura 2).

Figura 2: Horas por estratégia para cada capital (MPI-ESM-REMO)



Fonte: Os autores.

O maior número de horas de Conforto Térmico encontrado foi de 1840 horas para a cidade de Brasília (3B). Isso representa um percentual de apenas 21,0% de horas de conforto térmico por ano. Aplicando um arquivo climático atual (TMYx 2011-2025) na referida carta bioclimática, nota-se que esta cidade possui um total de 3566 horas

(40%). Assim, é perceptível uma redução considerável nas horas de conforto térmico para a localidade, que deve cair pela metade caso as previsões calculadas para o modelo MPI-ESM-REMO se confirmem.

As horas de Conforto Térmico, para esse primeiro cenário, apresentam um valor relativamente baixo, especialmente em Fortaleza (6A) e Salvador (5A), onde as horas de Conforto Térmico chegam a praticamente zero. Para ambas as capitais, nas condições estabelecidas dentro do modelo MPI-ESM-REMO, as estratégias de condicionamento térmico passivo que possuem impacto na melhoria do conforto térmico são, respectivamente, apenas o Sombreamento e a Desumidificação. Ou seja, não há outras estratégias passivas indicadas para as edificações de tais cidades.

Nesses termos, para Salvador, o Sombreamento é recomendado para 2095 horas (23,9%) e a Desumidificação para 2074 horas (23,6%). Por sua vez, para Fortaleza, tais estratégias são indicadas, respectivamente, para 2834 horas (32,4%) e 681 horas (7,8%) do ano. Apesar desse destaque para as duas capitais, a estratégia de condicionamento térmico passiva com o maior número de horas de recomendações para as capitais avaliadas é a Desumidificação, indicada para a cidade de Florianópolis em 4148 horas do ano.

Por sua vez, o Resfriamento Artificial (Rd) teve maior destaque para Fortaleza, com 8076 horas de indicação, abrangendo 92,2% do ano. Este cenário implica no uso quase ininterrupto de ar-condicionado para garantir o conforto térmico, o que alerta para um expressivo aumento no consumo energético dentro das edificações.

Ademais, percebe-se que as capitais que possuem uma maior variação de cores no gráfico apresentam, consequentemente, uma maior variabilidade de uso das estratégias bioclimáticas para obter conforto térmico no interior do ambiente construído, a partir da elaboração de projetos arquitetônicos compatíveis às condições climáticas futuras do cenário avaliado.

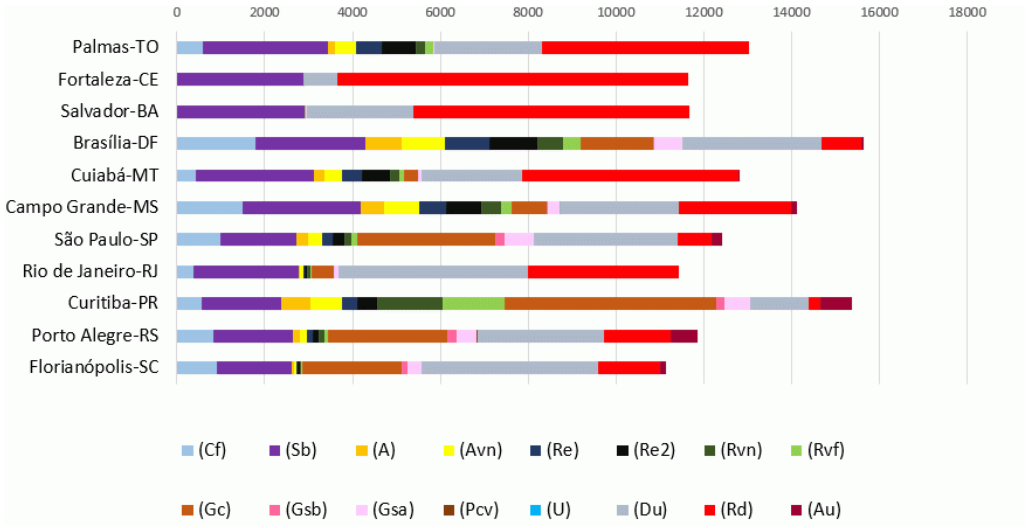
Os dados das cidades de Campo Grande e Brasília traduzem essa constatação. Acrescenta-se que, esta última capital, ao apresentar um número total de horas de recomendações superior às demais, ultrapassando inclusive a linha de 14000 horas, possui um maior tempo de aproveitamento das estratégias bioclimáticas para melhoria do conforto térmico nas edificações.

INDICAÇÕES PARA O CENÁRIO NorESM1-REMO

Já para as projeções do modelo NorESM1-REMO, o maior número de horas de conforto térmico corresponde a 1790 horas, mais uma vez para a cidade de Brasília (3B). Esse dado representa um percentual de 20,43% do total de horas anuais.

O Sombreamento e a Desumidificação permanecem como as melhores estratégias de condicionamento passivo para mitigar os problemas de conforto térmico dentro das edificações das capitais nesse cenário futuro pessimista para 2050 (Figura 3).

Figura 3: Horas por estratégia para cada capital (NorESM1-REMO)



Fonte: Os autores.

O Sombreamento continua tendo destaque nas capitais de Salvador e Fortaleza, que apresentaram, respectivamente, um total de 2898 horas (33,2%) e 2867 horas (32,7%), sugerindo um leve aumento no número de horas para a primeira cidade. Por sua vez, a Desumidificação é indicada para 2431 horas de Salvador e 760 horas de Fortaleza.

O Resfriamento Evaporativo (direto e em duas etapas) e a Umidificação apresentam baixa aplicabilidade em cidades litorâneas. Isso ocorre porque os elevados índices de umidade saturam o potencial de troca térmica por evaporação [8]. Assim, diante da severidade do cenário RCP 8.5 para 2050, a prioridade projetual nessas capitais deve recair sobre a Desumidificação

O uso crescente de Refrigeração Artificial reforça a tendência de elevação térmica nas capitais brasileiras. No entanto, Curitiba destaca-se pela baixa necessidade desses sistemas para garantir o conforto térmico, o que sinaliza um possível panorama positivo para as cidades da zona bioclimática 1 M, mesmo diante do processo de aquecimento global.

Ademais, três cidades superam a linha de 14000 horas de recomendações, sugerindo uma melhoria nas opções de orientação de projetos para algumas capitais dentro deste cenário de mudanças climáticas. Assim, para algumas cidades, como Curitiba, é possível tirar um maior proveito do clima em benefício do conforto térmico, logo, eficiência energética das edificações.

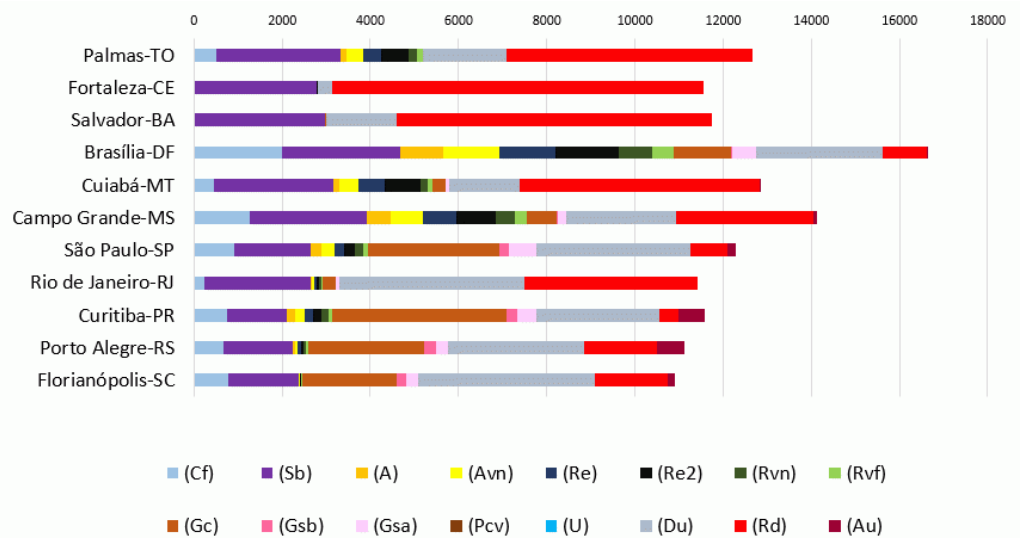
INDICAÇÕES PARA O CENÁRIO HadGEM2-REMO

No modelo HadGEM2-REMO, há projeções mais benéficas para algumas cidades, entre os cenários analisados para 2050. Isto é, a capital com maior índice de horas de conforto térmico continua sendo Brasília (3B), aumentando esse índice para 1989 horas. Isso representa um percentual de aproximadamente 22,7% das 8760 horas do ano.

É possível observar também que o Resfriamento Artificial, uma estratégia artificial, mantém-se indispensável para cidades das diversas regiões e zonas bioclimáticas. Como é o caso de Fortaleza (6A), Cuiabá (5B), Palmas (6B) e Salvador (5A), cidades de

clima quente, do Norte e Nordeste, com grande quantidade de horas de uso dessa estratégia para atingir o conforto térmico (Figura 4).

Figura 4: Horas por estratégia para cada capital (HadGEM2-REMO)



Fonte: Os autores.

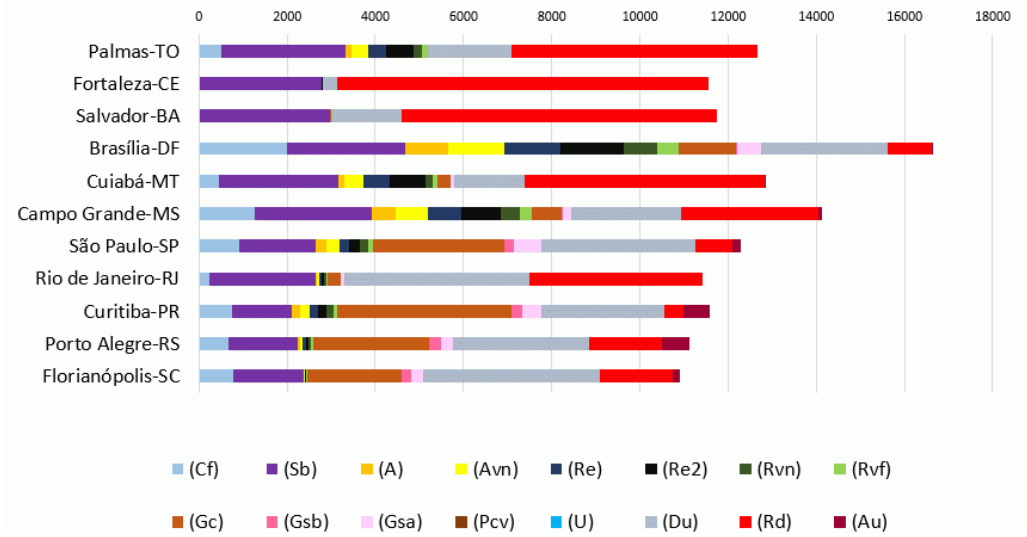
Sob o modelo HadGEM2-REMO (RCP 8.5), a ventilação torna-se ineficaz, com recomendação próxima a zero em várias capitais (Figura 4). Ao ultrapassar os limites de conforto, o ar externo passa a admitir calor ao interior [8]. A elevada umidade agrava o cenário ao anular a evaporação do suor, tornando indispensável o uso de climatização artificial para resfriamento e desumidificação.

Em 2050, as temperaturas externas projetadas superam constantemente os limites de conforto térmico. Nessas condições, o fluxo de ar deixa de resfriar por convecção e passa a transferir calor para o interior, efeito agravado pela alta umidade que anula o resfriamento evaporativo. Assim, a ventilação natural, historicamente eficaz no Brasil [8], torna-se vetor de desconforto, justificando a transição para sistemas ativos e vedações herméticas com isolamento térmico.

Mais uma vez, Brasília se mostrou a cidade com um melhor panorama para aproveitar as condições climáticas para elaboração de projetos bioclimáticos mais eficientes e variados. Ela atingiu um valor maior que 16000 horas de recomendações, ou seja, aumentou o número de horas em que é possível usar as estratégias bioclimáticas para melhoria das condições térmicas dentro das edificações.

Tendo em vista a variabilidade e as imprecisões nas projeções climáticas futuras, foi calculada a média entre os modelos para se ter uma visão mais abrangente do conjunto de cenários pessimista (RCP 8.5) selecionados. Ao avaliar a média dos três modelos, a estratégia passiva com maior valor para a algumas das capitais é o Ganho Térmico de Calor Interno (Gc), com média de 4327 horas para a cidade de Curitiba. Em seguida, tem-se a Desumidificação, com média que chega a 4057 horas para Florianópolis (Figura 5).

Figura 5: Média de horas para os três modelos



Fonte: Os autores.

Em terceiro lugar, destaca-se o Sombreamento, com recomendação média de 2831 horas para Fortaleza. Em climas tropicais extremos, a proteção solar atua como a primeira barreira contra o ganho térmico excessivo, sendo um pré-requisito básico antes de qualquer outra estratégia de condicionamento [9].

Entre todas as estratégias (ativas e passivas), a Refrigeração Artificial é a que apresenta a maior média de horas necessárias, superando as 6000 horas em algumas capitais. Tal fato indica que as estratégias passivas sozinhas não darão conta do cenário RCP 8.5.

Por sua vez, o Conforto Térmico atinge níveis críticos de quase 0% em capitais como Fortaleza (6A) e Salvador (5A). Para esta zona da carta bioclimática, o melhor resultado encontrado é para a cidade de Brasília, com média de 1873 horas de conforto térmico ao ano.

Ao analisar esses resultados médios, observa-se que o cenário crítico, para o Brasil de 2050, terá um perfil climático no qual as estratégias passivas tradicionais, como a simples abertura de janelas, perdem o protagonismo. Essa média serve como um alerta: o custo de manter uma edificação confortável no cenário RCP 8.5 será muito mais elevado, exigindo que a arquitetura seja extremamente eficiente para reduzir o tempo de uso das máquinas de resfriamento.

Vale salientar ainda que a confiabilidade das projeções para 2050 é reforçada pela análise do desvio padrão e do coeficiente de variação. Nota-se que as estratégias mais críticas apresentam uma concordância notável entre os modelos MPI-ESM-REMO, HadGEM2-REMO e NorESM1-REMO. O exemplo disso, é a necessidade de Resfriamento Artificial, que apresenta um desvio padrão máximo de 485 horas para a cidade de Palmas.

O número resulta em um Coeficiente de Variação de 9,7%, indicando uma dispersão baixa em relação à média de 4997,7 horas. Isso significa que, independentemente do modelo climático adotado, a necessidade de refrigeração artificial é uma certeza estatística para o futuro dessas capitais.

Em contrapartida, a zona de Conforto Térmico apresenta a maior incerteza relativa. Em Fortaleza, por exemplo, o desvio padrão de 1,15 horas frente à média de 0,7 horas resulta em um Coeficiente de Variação de 164,2%. Esta disparidade é evidente entre os modelos: enquanto o NorESM1-REMO prevê 2 horas de conforto, o HadGEM2-REMO projeta zero horas. Tal variação demonstra que, sob aquecimento severo, mínimas flutuações climáticas são suficientes para extinguir a plotagem de dados climáticos dentro da zona de conforto térmico na carta bioclimática.

A Desumidificação, estratégia passiva com média máxima de 4218 horas para a cidade do Rio de Janeiro (4A), expressou um desvio padrão de 109,4, o que resultou em um Coeficiente de Variação de 2,6%. Essa estratégia se destacou por possuir a maior média no conjunto de estratégias bioclimáticas avaliadas, o que evidencia sua alta eficácia na mitigação do desconforto térmico em ambientes construídos sob o cenário RCP 8.5.

CONCLUSÃO

A presente pesquisa avaliou o impacto das mudanças climáticas nas estratégias bioclimáticas para o ano de 2050 sob o cenário de emissões RCP 8.5, utilizando uma abordagem multimodelo para mitigar as incertezas inerentes às projeções climáticas. Os resultados obtidos permitem concluir que o cenário de aquecimento global severo impõe desafios sem precedentes à arquitetura brasileira, exigindo uma mudança de paradigma no desenvolvimento de projetos de edificações.

Em primeiro lugar, vale salientar que o conforto térmico sofrerá redução drástica no país, com extinção do potencial natural em Salvador e Fortaleza. Sob o modelo HadGEM2-REMO, a ventilação natural torna-se contraproducente em diversas capitais: ao exceder os limites de conforto, o ar externo passa a aquecer o interior das edificações. Esse cenário invalida o uso exclusivo de ventilação tradicional sem o devido tratamento do envelope.

No que tange às estratégias de projeto, a Desumidificação, o Ganho de Calor Interno e Sombreamento consolidaram-se como a medida passiva mais resiliente e eficaz. Isso leva à conclusão que, no cenário avaliado para 2050, a umidade relativa alta será uma problemática constante em várias capitais. Além disso, o ganho de calor solar será eficiente para cidades com clima frio em alguns períodos do ano.

Independentemente do modelo climático analisado, o Sombreamento é uma estratégia robusta e eficaz. Paralelamente, a Refrigeração Artificial é uma certeza estatística, indicando que o consumo energético será decisivo para a sustentabilidade econômica das cidades em 2050.

Embora este estudo ofereça uma análise consistente sobre as tendências para o ano de 2050, reconhece-se que ele apresenta limitações quanto à amplitude dos cenários e horizontes temporais. Para superar essas lacunas, a continuidade da pesquisa incluirá o cenário de baixas emissões RCP 2.6 e os recortes temporais de 2010 e 2090, permitindo uma análise comparativa mais abrangente da evolução climática.

DECLARAÇÃO

Os autores declaram que não foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial generativa ou tecnologias assistidas por inteligência artificial no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] MACHARD, A. *et al*. A Methodology for Assembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data. **Energies**, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en13133424. Acesso em: 12 abr. 2026.

[2] BRACHT, M. K. *et al*. Multiple regional climate model projections to assess building thermal performance in Brazil: understanding the uncertainty. **Journal of Building Engineering**, v. 88, p. 109248, July 2024. DOI: // doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109248.

[3] VAN VUUREN, Detlef P. *et al.* The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 1–2, p. 5–31, nov. 2011.

[4] ABNT. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.

[5] LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LabEEE). **Zoneamento Bioclimático Brasileiro**. Florianópolis: UFSC, 2021. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br. Acesso em: 13 abr. 2026.

[6] MILNE, M.; CHALK, A. **Climate Consultant 6.0: User Guide**. Los Angeles: University of California, Los Angeles (UCLA), 2014.

[7] FAORLIN, M. N.; LAMBERTS, R. Projeções futuras: desempenho térmico de duas envoltórias para uma habitação unifamiliar em São Paulo. In: EURO-ELECS 2023 – Conferência Latino-Americana e Europeia sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2023, Madrid. **Anais [...].** Madrid: Euro-ELECS, 2023.

[8] LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Zoneamento bioclimático brasileiro e recomendações construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Florianópolis: LabEEE/UFSC, 2004.

[9] CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para o Brasil**: **conforto ambiental**. Rio de Janeiro: Revan, 2009.