

Validação e revisão de agrupamento das cidades brasileiras em graus-dia de aquecimento e resfriamento

Validation and review of grouping of Brazilian cities in degrees-days of heating and cooling

Validación y revisión del agrupamiento de ciudades brasileñas en grados-día de calefacción y refrigeración

Camila Carvalho Ferreira, doutora em Engenharia Civil, UFOP

E-mail: camilaccferreira@yahoo.com.br  <https://orcid.org/0000-0002-1121-9126>

Rejane Magiag Loura, doutora em Ciências e Técnicas Nucleares, UFMG

E-mail: rejaneml@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-7048-8035>

Para citar este artigo: FERREIRA, C. C.; LOURA, R. M. Validação e revisão de agrupamento das cidades brasileiras em graus-dia de aquecimento e resfriamento. *Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo*, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 70-90, 2023.

DOI 10.5935/cadernospos.v23n1p70-90

Submissão: 2022-06-26

Aceite: 2022-10-21



Resumo

A estimativa de consumo de energia para condicionamento de ambiente é um ponto-chave para determinar o consumo de energia de uma edificação. A energia demandada para climatização pode ser utilizada para quantificar o rigor climático de determinado local. Entretanto, o Brasil não dispõe de normas técnicas e/ou zoneamentos estabelecidos por um método de cálculo para definição de graus-dia. Este trabalho se propõe a apresentar a atualização da proposta de zoneamento com base em graus-dia, elaborada por Stensjö, Ferreira e Loura (2017), a partir de dados de 317 cidades brasileiras utilizando as Normais Climatológicas (1961-1990). A classificação do novo conjunto de Normais Climatológicas referentes ao período de 1981 a 2010 empreende ajustes no processo de definição da temperatura-base para graus-dia de aquecimento. Para o desenvolvimento, seguiu-se o método proposto e as mesmas referências usadas por Stensjö, Ferreira e Loura (2017) para estabelecimento das temperaturas de base, cálculos de graus-dia e agrupamento. Em relação à classificação, o artigo investiga três possibilidades para identificar aquela mais adequada à nova base de dados. Os resultados demonstraram a robustez do método, permitiram refinamento do processo de classificação, bem como a identificação de tendências de demanda energética para as habitações brasileiras.

Palavras-chave: Mudança climática; Graus-dias de resfriamento e aquecimento; Agrupamento; Classificação climática.

Abstract

Estimating energy consumption for environment conditioning is a key point in determining the energy consumption of a building. The energy required for air conditioning can be used to quantify the climatic rigor of a given location. However, Brazil does not have technical standards and/or zoning established by a calculation method for the definition of degrees-days. This paper aims to present the update of the proposal of zoning based on degree-day, elaborated by Stensjö, Ferreira e Loura (2017), from data from 317 Brazilian cities using the Climatological Normals (1961-1990). The classification of the new set of Climatological Normals for the period from 1981 to 2010 undertakes adjustments in the process of defining the base temperature for degrees-days of heating. For the development, the proposed method and the same references used by Stensjö, Ferreira and Loura (2017) were followed to establish the base temperatures, calculations of degree-days and grouping. Regarding classification, the article investigates three possibilities to identify the most appropriate one for the new database. The results demonstrated the robustness of the method, allowed refinement of the classification process, as well as the identification of energy demand trends for Brazilian homes.

Keywords: Climatic change; Degree days of heating and cooling; Grouping; Climatic classification.



Resumen

Estimar el consumo de energía para el acondicionamiento ambiental es un punto clave para determinar el consumo de energía de un edificio. La energía requerida para el aire acondicionado se puede utilizar para cuantificar el rigor climático de un lugar determinado. Sin embargo, Brasil no tiene normas técnicas y/o zonificación establecidas por un método de cálculo para la definición de grados-días. Este trabajo tiene como objetivo presentar la actualización de la propuesta de zonificación basada en el grado-día, elaborada por Stensjö, Ferreira e Loura (2017), a partir de datos de 317 ciudades brasileñas que utilizan las Normales Climatológicas (1961-1990). La clasificación del nuevo conjunto de Normales Climatológicas para el período de 1981 a 2010 subestima los ajustes en el proceso de definición de la temperatura base para grados-días de calentamiento. Para el desarrollo, se siguió el método propuesto y las mismas referencias utilizadas por Stensjö, Ferreira e Loura (2017) para el establecimiento de temperaturas base, cálculos de grados-día y agrupación. En cuanto a la clasificación, el artículo investiga tres posibilidades para identificar la más adecuada para la nueva base de datos. Los resultados demostraron la robustez del método, permitieron el refinamiento del proceso de clasificación, así como la identificación de tendencias de demanda de energía para los hogares brasileños.

Palabras clave: Cambio climático; Grados de enfriamiento y calentamiento días; Agrupación; Clasificación climática.

INTRODUÇÃO

Há muito se defende a importância da ampliação da base de dados climáticos para as cidades brasileiras para fundamentação de regulamentos e legislações municipais quanto ao planejamento do uso do solo, normas técnicas sobre consumo energético e desempenho térmico de edificações, bem como Planos Nacionais capazes de lidar com a questão climática, urbana e energética simultaneamente. Na atualidade essa demanda recebe contornos dramáticos diante da emergência climática que se avizinha. Não se pode perder de vista as previsões de crescimento populacional de 3,7 bilhões nos países em desenvolvimento para as próximas quatro décadas, o que resultará em um processo crescente de urbanização e de demanda habitacional nesses países (UNITED NATIONS, 2013). No caso do Brasil, Givisiez e Oliveira (2018) estimam que, entre 2020 e 2040, haverá aproximadamente quinze milhões de novos domicílios.

Outra tendência relevante a ser considerada é o aumento da presença de equipamentos para condicionamento de ar nos domicílios brasileiros em torno de 59%, conforme a Pesquisa de Posse e Hábitos (ELETROBRAS, 2019). Anteriormente, para o ano de 2006, a existência desse tipo de equipamento correspondia a uma média de 10,5% das residências com pelo menos um



equipamento, indicando um crescimento médio de 16,7% de moradias com presença de equipamentos para condicionamento de ar neste intervalo.

Diante desse cenário, o planejamento energético nacional possui o desafio de lidar com o impacto dessa demanda no consumo de energia elétrica e na curva de carga do sistema elétrico nacional, com consequências na emissão de gases de efeito estufa provenientes da geração de energia. Em paralelo, o desafio dos planejadores urbanos passa pela elaboração de instrumentos legislativos capazes de orientar o crescimento e a renovação das cidades em direção a soluções com menor emissões de gases de efeito estufa das cidades; e dos arquitetos é produzir edificações que ofereçam condições de uso e conforto com o menor despendimento de energia e emissão de carbono possível. Conhecer a previsão de demanda energética de uma edificação em determinado local é condição essencial para pensar em edificações Energia-Zero, por exemplo. Assim, ganha relevância o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na elaboração de estratégias que aproximem o planejamento energético nacional ao planejamento urbano. O zoneamento climático inspirado em graus-dia é uma reconhecida ferramenta adotada internacionalmente com o intuito de auxiliar a introdução da demanda energética das edificações no planejamento energético nacional e também no planejamento territorial local.

O objetivo deste artigo é aperfeiçoar a metodologia desenvolvida por Stensjö, Ferreira e Loura (2017), a fim de ajustá-la às alterações climáticas ocorridas entre as Normais Climatológicas de 1961-1990 e as de 1981-2010 e empreender ajustes no processo de definição da temperatura-base para graus-dia de aquecimento (GDA).

A denominação “graus-dia” pode ser definida como a diferença entre a temperatura-base e temperatura externa, totalizada pelo somatório de valores para um determinado período a ser definido (mês ou ano), assimilando as variações da temperatura externa em termos de amplitude e de frequência em relação à temperatura-base. Esse método destaca-se pela simplicidade de cálculo para caracterização do rigor climático de dado local e para estimar a demanda de consumo de energia das edificações para climatização artificial (DAY, 2006)

Outra aplicabilidade recorrente da metodologia de graus-dia é na abordagem das questões relacionadas às mudanças climáticas, sejam em escala regional, sejam em escala nacional. Com tal aplicação, estudos utilizando graus-dias com essa finalidade assinalaram, de forma geral, um aumento da demanda para resfriamento e a redução de demanda para aquecimento (BAI; WANG, 2019; D'AMICO, *et al.*, 2019; BERARDI; JAFARPUR, 2020; BAI *et al.*, 2020; LOURA *et al.*, 2021).

O desenvolvimento dessa base climática para o Brasil ainda é pouco explorado, havendo sido propostos apenas dois zoneamentos climáticos utilizando a metodologia de graus-dia para o País: Roriz (2012) e Stensjö, Ferreira e Loura (2017). Ambas as propostas utilizaram como base de dados climatológicos as Normais Climatológicas 1961-1990 (INMET, 2009) e dados de estações convencionais do



Inmet. Uma diferença efetiva entre ambas as metodologias consiste na definição das temperaturas de base de referência para a estimativa de graus-hora, o que influenciará nos valores finais obtidos.

Enquanto Roriz (2012, p. 7) utiliza a faixa de conforto térmico fixa proposta por Givoni (1992, p. 20) para países em desenvolvimento (18-28 °C), sendo adotada temperatura-base de 28°C para cálculo da demanda de resfriamento, Stensjö, Ferreira e Loura (2017) utilizam o modelo de conforto adaptativo de Dear e Brager (2002), ou seja, a temperatura-base para cálculo da demanda de resfriamento é variável de acordo com a temperatura externa do ar local, refletindo assim as variações climáticas locais e a adaptação de sua população. Em relação à temperatura-base para cálculo da demanda de aquecimento, Roriz (2012, p. 7) trabalha com temperatura fixa de 18° C. Já Stensjö, Ferreira e Loura (2017, p. 291) consideram a temperatura neutra menos 5 °C, uma faixa variável com o limite mínimo da temperatura-base de 18 °C.

Invidiata *et al.* (2016) propuseram um agrupamento de 411 cidades brasileiras utilizando a metodologia de graus-hora de resfriamento e aquecimento, tendo como referência as temperaturas-base fixas de 26 °C e 18 °C, respectivamente, para um modelo de edificação residencial unifamiliar ventilado naturalmente. Esse agrupamento foi comparado aos grupos propostos por Roriz (2012), e os autores identificaram que o agrupamento poderia ser reduzido para apenas cinco grupos climáticos (INVIDIATA *et al.*, 2016).

Stensjö, Ferreira e Loura (2017) desenvolveram um projeto de zoneamento nacional inspirado em graus-dia a partir de dados de 317 cidades brasileiras utilizando as informações disponíveis nas Normas Climatológicas (INMET, 2009) para o período de 1961 a 1990. As autoras utilizam temperaturas-base variáveis conforme modelo de conforto adaptativo e propõem seis grupos para caracterização da demanda de aquecimento e resfriamento para o território nacional.

Definição das temperaturas-base

Estudos mais recentes no campo do conforto térmico apontam que a temperatura interna de conforto está relacionada com a temperatura externa que se sucede em diferentes climas, variando ao longo do tempo (ROAF; CRICHTON; NICOL, 2009) e a relação entre a temperatura interna de conforto e a temperatura externa pode indicar recursos apropriados para o conforto térmico e para a eficiência energética de edificações (KHEDARI *et al.*, 2000; HEIDARI; SHARPLES, 2002). A mudança de contexto já descrita requer ferramentas preditivas mais robustas e objetivas para auxiliar as recomendações de projeto quanto ao conforto térmico. Contudo, parece continuar essencial manter o clima local como uma referência.

Pereira e Assis (2010) identificaram o modelo de Dear e Brager (2002), utilizado na revisão da ASHRAE 55 em 2004, como capaz de representar a condição de

aclimação da população brasileira, adotando-se a faixa de conforto de $T_n \pm 2$ °C, para pouco desconforto, e de $T_n \pm 4$ °C para desconforto (PEREIRA; ASSIS, 2010).

Um estudo conduzido por Vecchi *et al.* (2014) observou a necessidade de adequação do limite inferior da faixa de conforto do modelo adaptativo adotado pela ASHRAE 55 para o clima brasileiro em função da vestimenta, sugerindo-se a fixação do limite inferior da faixa de conforto em 19,5 °C para temperaturas externas superiores a 16 °C (VECCHI *et al.*, 2014).

Método

A metodologia aplicada para o desenvolvimento da revisão do zoneamento por graus-dia de resfriamento (GDR) e de aquecimento (GDA) é a desenvolvida por Stensjö, Ferreira e Loura (2017). Realizaram-se algumas adaptações na metodologia proposta em relação à temperatura-base adotada para o cálculo dos graus por aquecimento e aos grupos propostos, contemplando o número de grupos e as faixas de abrangência.

De forma simplificada, as etapas metodológicas consistem em:

- (i) seleção dos dados climatológicos;
- (ii) cálculo do GDR e GDA para cada localidade;
- (iii) agrupamentos;
- (iv) análise estatística dos grupos;
- (v) georreferenciamento dos dados;
- (vi) proposição do zoneamento.

Base de dados utilizada

Para o desenvolvimento das análises propostas, utilizaram-se os dados das Normais Climatológicas de dois períodos: 1961-1990 (INMET, 2009) e 1981-2010 (INMET, 2018). A opção pelas Normais Climatológicas embasou-se no fato de que esta possui número importante, para o contexto nacional, de municípios distribuídos ao longo do território brasileiro.

Para os cálculos e desenvolvimento do presente trabalho serão utilizadas as variáveis ambientais: temperatura média compensada (°C), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C) e precipitação acumulada mensal (mm). As Normais Climatológicas dos períodos selecionados fornecem dados climatológicos mensais. Todavia, o cálculo de graus-dia fundamenta-se em valores horários das variáveis envolvidas. Para a conversão dos dados climáticos mensais disponíveis em variações horárias foi utilizada a Equação 1, ajustando os dados locais à curva padrão da Organização Mundial de Meteorologia (WMO) (ASSIS, 2001).



$$T_{e,j} = T_x - (T_x - T_n) k_j^1 \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

$T_{e,j}$ é a temperatura do ar externa na hora j , em °C;

T_x é a temperatura média mensal das máximas, em °C;

T_n é a temperatura média mensal das mínimas, em °C;

k_j é o valor de ajuste da curva horária de temperatura, para a hora j .

Empregando os dados que compõem as Normais de 1981-2010, pretende-se gerar novas análises de agrupamentos e corroborar o agrupamento proposto por Stensjö, Ferreira e Louira (2017), ou gerar uma nova proposição, conforme os resultados apontarem.

Para o desenvolvimento da metodologia proposta originalmente, as autoras trabalharam com a base de dados das Normais Climatológicas de 1961-1990, totalizando 291 cidades. Já para as presentes análises há um total de 298 cidades compondo os dados das Normais Climatológicas de 1981-2010. Contudo, apenas 197 cidades são encontradas em ambas as bases de dados dos dois períodos, sendo utilizadas as informações apenas dessas cidades para a validação da metodologia e análise dos agrupamentos.

Definição das temperaturas-base

A temperatura-base para cálculo de graus-dia de resfriamento foi obtida a partir da temperatura de conforto resultante do modelo de conforto adaptativo proposto por Dear e Brager (2002), considerando 90% de aceitabilidade ($T_n + 2,5$ °C) (Equação 2).

$$T_n = 0,31T_e + 17,8 \text{ °C} \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

T_n é a temperatura de conforto;

T_e é a temperatura média mensal externa.

Para a temperatura-base para o cálculo de graus-dia de aquecimento, o limite de $T_n - 5$ °C para GDA foi o adotado. Tomando como base o estudo desenvolvido por Vecchi *et al.* (2014), no presente trabalho, adequou-se a temperatura-base de para GDA para de $T_n - 5$ °C para temperaturas médias do ar mensais inferiores a 16 °C e limite em 19,5 °C para temperaturas médias do ar mensais superiores a 16 °C.

1 Os valores de k , a partir da hora 0 até a hora 23, são: 0,75; 0,78; 0,82; 0,87; 0,89; 0,96; 1,00; 0,93; 0,76; 0,57; 0,41; 0,28; 0,15; 0,11; 0,02; 0,00; 0,04; 0,08; 0,15; 0,46; 0,56; 0,64; 0,73; 0,70.



Cálculo do número de horas de GDA e GDR

O cálculo de GDA e GDR seguiu a metodologia proposta por Stensjö, Ferreira e Loura (2017), com base em Day (2006): somar as diferenças horárias entre as temperaturas do ar e a temperatura-base superiores a zero e dividir por 24. Para calcular o número de graus-dia de aquecimento (GDA) quando a temperatura externa for superior à temperatura-base, o valor adotado de GDA para esta hora é zero. A Equação 3 apresenta a fórmula geral para este processo, considerando GDA.

$$D_d = \frac{\sum_{j=1}^{24} (T_b - T_{e,j}) [(T_b - T_{e,j}) > 0]}{24} \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

D_d é o número de graus-dia diário para um dado dia;

T_b é a temperatura-base;

$T_{e,j}$ é a temperatura do ar externa na hora j .

De forma análoga, para graus-dia de resfriamento (GDR), a Equação 3 torna-se a Equação 4, apresentada a seguir:

$$D_d = \frac{\sum_{j=1}^{24} (T_{e,j} - T_b) [(T_{e,j} - T_b) > 0]}{24} \quad (\text{Equação 4})$$

Os graus-dia foram somados pelo período de um dia normal para este trabalho. Esse valor foi multiplicado pelo número de dias do mês e a soma efetuada para todos os meses do ano, para se obter os valores anuais de GDR e GDA, conforme mostrado na Equação 5.

$$D_a = \sum_{i=1}^{12} (D_{d,i} d_i) \quad (\text{Equação 5})$$

onde:

D_a é o número de graus-dia total no ano;

$D_{d,i}$ é o número de graus-dia calculado para o dia normal do mês i ;

d_i é o número de dias do mês i .



Agrupamento dos dados

A partir dos valores calculados de GDR e GDA para as localidades que compõem a base de dados, empregou-se a técnica de agrupamento de dados denominada de *clustering*, que permite a classificação das cidades por similaridade de GDA e GDR.

A técnica de *clustering* utilizada foi a de *K-means*, conforme a metodologia adotada. As análises foram realizadas no *software* IBM SPSS®, considerando o agrupamento de graus-dia de resfriamento e aquecimento conjuntamente.

Para a análise estatística do comportamento dos grupos, será utilizado o desvio padrão. O desvio padrão permite avaliar a variabilidade dos dados dentro de um grupo, à medida que avalia a uniformidade de um conjunto. Um desvio padrão muito elevado pode indicar a necessidade de um número maior de grupos além do então considerado.

Validação da metodologia inicial

Para testar a validade e a sensibilidade da metodologia inicial proposta por Stensjö, Ferreira e Loura (2017), ela será aplicada aos dados das Normais Climatológicas para o período de 1981-2010, base de dados mais recente. O agrupamento gerado será comparado estatisticamente e por meio de mapas ao agrupamento inicial resultante dos dados das Normais Climatológicas de 1961-1990, avaliando se a metodologia apresenta sensibilidade aos dados climáticos.

Em uma primeira etapa, serão examinadas apenas as cidades que possuem dados para os dois períodos analisados, permitindo assim uma análise comparativa do comportamento de GDR e GDA. Em seguida, para a análise de agrupamentos possíveis, serão utilizadas todas as 298 cidades que compõem as Normais Climatológicas para o período de 1981 a 2010.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados dos métodos de cálculo de GDA

Uma das revisões sugeridas na metodologia de Stensjö, Ferreira e Loura (2017) pelo presente trabalho é a definição da temperatura-base para o cálculo dos graus-dia de aquecimento (GDA). A Figura 1 apresenta os resultados para GDA obtidos a partir da metodologia original e os resultados obtidos para GDA aplicando-se a metodologia revisada.



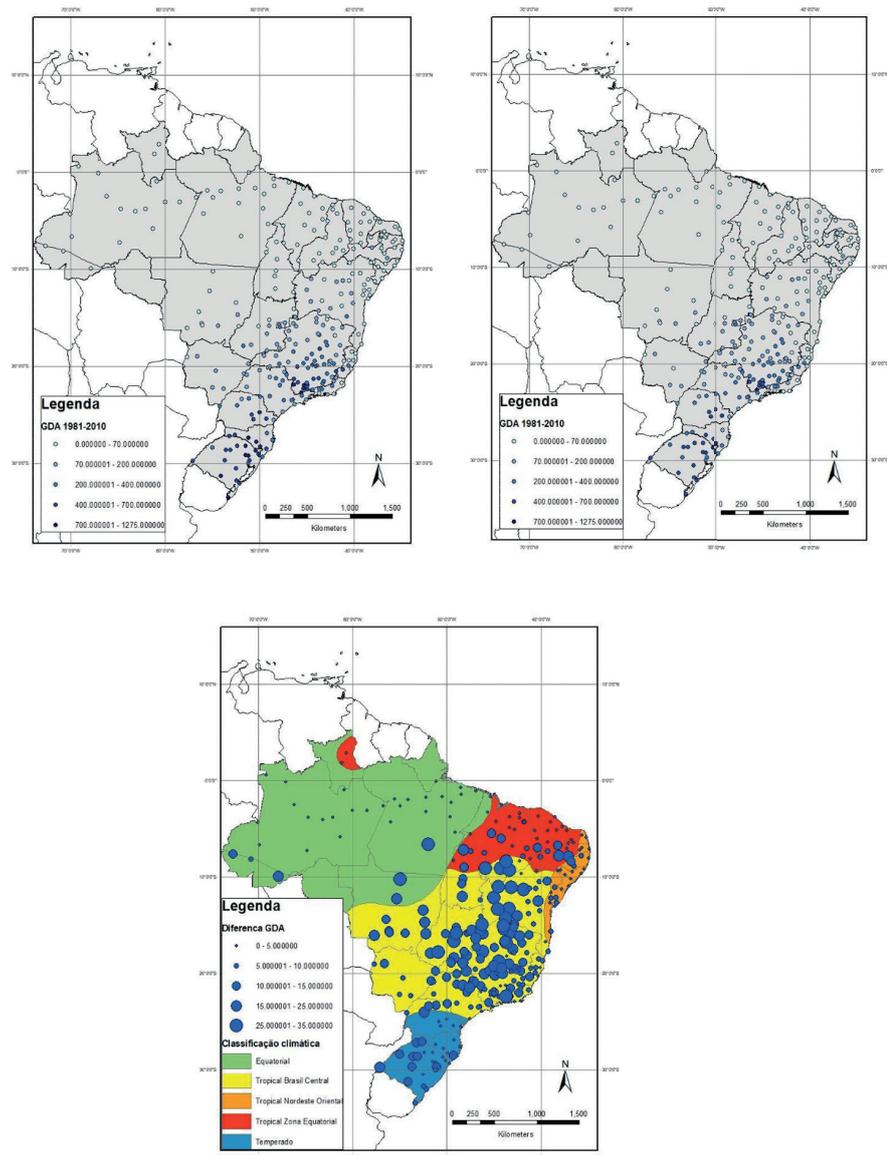


Figura 1: Dados de GDA para cada localidade conforme Stensjö, Ferreira e Loura (2017) (superior à esquerda), proposta pelas autoras (superior à direita) e diferença nos valores de acordo com o método de cálculo de GDA e sua distribuição de acordo com o clima (inferior ao centro). Fonte: Das autoras.

Os resultados para GDA apresentaram poucas diferenças entre as metodologias original e revista. Apenas duas localidades mostraram alterações um pouco mais significativas. Contudo, o que se observou foi a redução no valor de GDA principalmente para cidades caracterizadas pelos climas quentes ou climas com a predominância da estação quente (Figura 1). Cidades de clima equatorial e temperaturas elevadas ao longo de todo o ano apresentaram uma redução considerável de GDA da metodologia revista para a original, indicando sua maior adequabilidade ao contexto do clima quente. Logo, os valores de GDA considerados para a validação da metodologia e análise de outros possíveis agrupamentos serão os valores de GDA pela metodologia revista.

A partir dessa definição, os valores calculados de GDA e de GDR para as cidades que compõem a base de dados são apresentados na Figura 2.

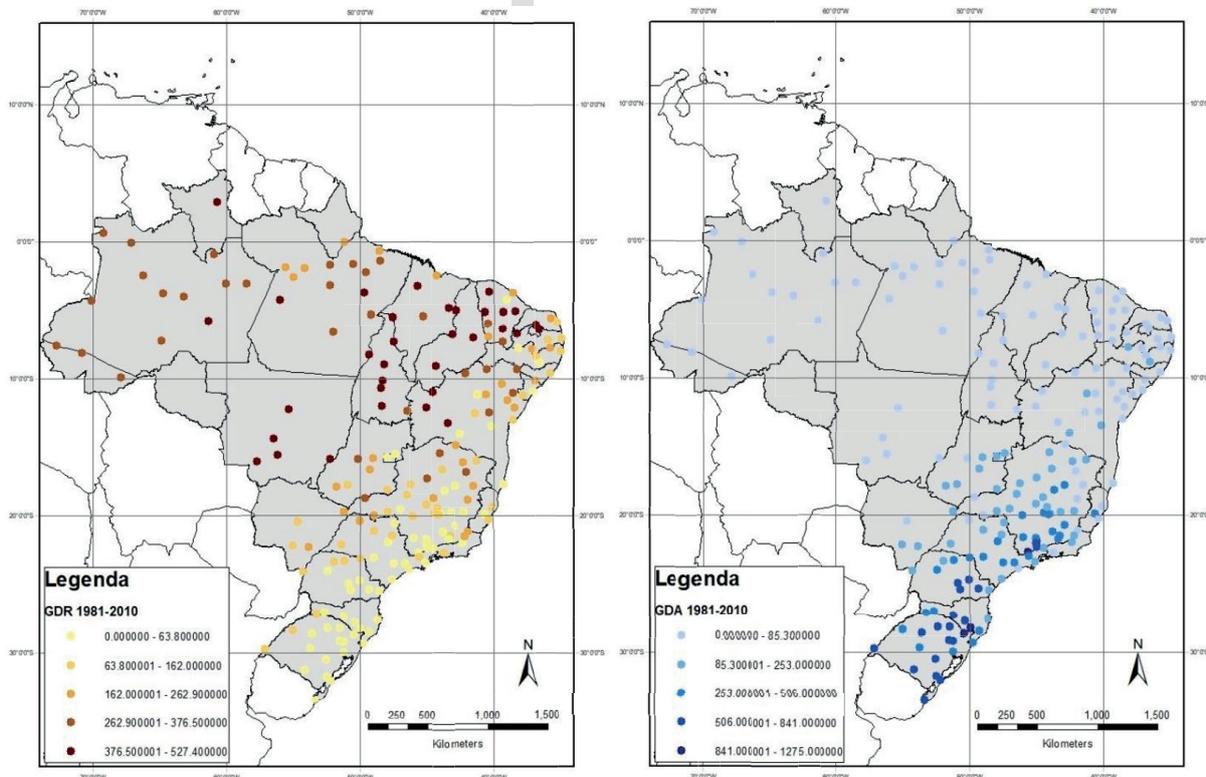


Figura 2: Valores de graus-dia utilizados para a análise de agrupamentos GDR e GDA. Fonte: Das autoras.

Validação da metodologia inicial

O agrupamento de GDR e GDA proposto por Stensjö, Ferreira e Louira (2017), proposta original, foi aplicado aos dados climáticos de 197 cidades das Normais Climatológicas de 1981-2010, para avaliar a validade da metodologia para além dos dados utilizados para gerá-la. A classificação das cidades conforme os grupos propostos pelas autoras (vf. Tabela 1) é apresentada no mapa na Figura 6.

Ao aplicar o agrupamento proposto pelas autoras, observou-se haver uma faixa de dados não contemplada. Essa faixa corresponde a GDR entre 353,3 horas e 475,1 horas, impedindo que todas as cidades fossem classificadas. Avaliando a classificação dos grupos referenciadas pelas autoras, a faixa não contemplada aparenta ter sido considerada como GDR alto. Tomando essa suposição como verdadeira, realizou-se a classificação dos dados das Normais para o período de 1981-2010 completamente. Os resultados estão na Figura 3.

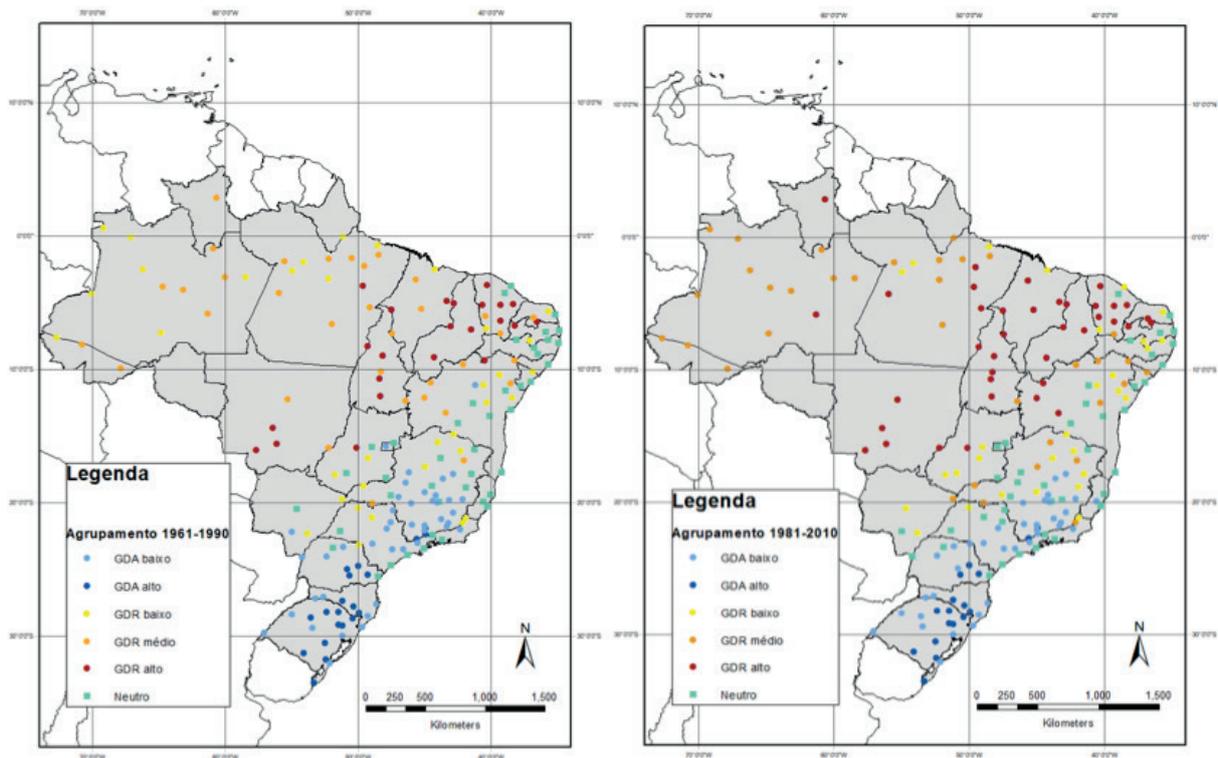


Figura 3: Classificação climática das cidades conforme Stensjö, Ferreira e Loura (2017) para a base de dados 1961-1990 (à esquerda) e para a base de dados 1991-2010 (à direita). Fonte: Das autoras.

Os resultados obtidos assinalaram que a metodologia proposta apresenta sensibilidade às mudanças nas bases de dados. Eles apontaram que o padrão do agrupamento foi conservado, ainda que algumas alterações na classificação tenham sido notadas. Estas foram referentes ao aumento de GDR e redução de GDA em algumas localidades, tendência essa já observada em outros estudos em função do aumento das temperaturas médias do ar.

Desse modo, acredita-se que a metodologia seja suficiente ao objetivo a que se propõe, apresentando sensibilidade às variações dos dados sem uma mudança de padrão de comportamento. Há, no entanto, que se corrigir a abrangência das faixas de forma que contemple toda a variabilidade dos dados de graus-dia de resfriamento.

Revisão do agrupamento

Após a constatação de necessidade de revisão das faixas que definem os grupos para a classificação em GDA e GDR proposta originalmente, algumas possibilidades de agrupamento foram analisadas:

(i) agrupamento conforme Stensjö, Ferreira e Loura (2017), com a adição de mais um grupo contemplando a faixa de GDR até então inexistente;

(ii) agrupamento com cinco grupos utilizando os dados das Normais Climatológicas de 1981-2010;

(iii) agrupamento com sete grupos utilizando os dados das Normais Climatológicas de 1981-2010.

Para ajustar as faixas dos grupos propostos por Stensjö, Ferreira e Loura (2017) de forma a contemplar todo o intervalo de GDR, inseriu-se um novo grupo denominado GDR 3, abrangendo o intervalo de 350 horas a 475 horas, e o antigo grupo nomeado de GDR 3 passou a ser GDR 4. A Tabela 1 apresenta as faixas de GDR e GDA que definem cada um dos, agora, sete grupos.

Proposta	Grupo	Necessidade	Valor (em horas)	Ocorrências
Original	GDA 1	Baixa demanda de aquecimento	GDA < 608,7	75
	GDA 2	Alta demanda de aquecimento	GDA > 608,7	38
	GDR 1	Demanda de resfriamento baixa	GDR < 246,0	50
	GDR 2	Demanda de resfriamento moderada	GDR < 353,3	47
	GDR 3	Demanda de resfriamento alta	GDR > 475,1	13
	Neutro	Sem demanda de aquecimento e resfriamento	GDR < 148,3 e GDA < 236,6	91
Revista	GDA 1	Baixa demanda de aquecimento	GDA < 608,7	48
	GDA 2	Alta demanda de aquecimento	GDA > 608,7	21
	GDR 1	Demanda de resfriamento baixa	GDR < 246,0	9
	GDR 2	Demanda de resfriamento moderada	GDR < 353,3	49
	GDR 3	Demanda de resfriamento moderada a alta	353,2 < GDR < 475,1	92
	GDR 4	Demanda de resfriamento alta	GDR > 475,1	18
	Neutro	Sem demanda de aquecimento e resfriamento	GDR < 148,3 e GDA < 246,6	60

Tabela 1: Agrupamento conforme necessidade de aquecimento e resfriamento proposto por Stensjö, Ferreira e Loura (2017) original e revisto. Fonte: Das autoras.

Para avaliar a dispersão dentro dos grupos, foi calculado o desvio padrão de cada um para GDA e GDR. Tais valores são apresentados na Tabela 2.



Grupo	Desvio padrão	
	GDR	GDA
GDA 1	40,6	100,6
GDA 2	22,4	194,4
GDR 1	37,4	55,7
GDR 2	29,2	48,3
GDR 3	108,1	41,5
GDR 4	29,5	26,2
Neutro	46,2	84,8

Tabela 2: Desvio padrão dos grupos para a proposta de Stensjö, Ferreira e Louira (2017) revista. Fonte: Das autoras.

Analisando os valores de desvio padrão obtidos para cada um dos grupos, tanto de GDR quanto para GDA, observaram-se valores altos para o grupo GDR 3 e de GDA 1, 2 e Neutro. Esses altos valores de desvio padrão são um indicativo de que os grupos não são os mais adequados. Diante desse resultado, optou-se por testar novos agrupamentos. Como se obtiveram altos valores de desvio padrão principalmente para GDA, agrupamentos com mais grupos caracterizados por GDA podem ser mais representativos.

O primeiro teste foi realizado para um agrupamento utilizando a técnica de *clustering* por *K-means* para cinco grupos. As faixas para esses grupos são apresentadas na Tabela 3.

Grupo	Necessidade	Valor (em horas)	Ocorrências	Desvio padrão	
				GDR	GDA
GDA 1	Demanda de aquecimento baixa	GDA < 850,0	22	21,5	94,0
GDA 2	Demanda de aquecimento alta	GDA > 850,0	3	0,0	92,0
GDR 1	Demanda de resfriamento baixa	GDR < 250,0	44	55,5	93,3
GDR 2	Demanda de resfriamento alta	GDR > 250,0	66	69,5	23,1
Neutro	Sem demanda de aquecimento e resfriamento	GDR < 300,0 e GDA < 250,0	62	76,0	59,4

Tabela 3: Agrupamento considerando 5 grupos. Fonte: Das autoras.



Um dos pontos a serem destacados para esse agrupamento está no fato de o grupo GDA 2 ser composto por apenas três localidades, número este pouco representativo estatisticamente dentro do universo de 197 cidades.

O agrupamento das cidades conforme essa classificação é apresentado na Figura 6.

Para analisar a variabilidade nos cinco grupos, foi calculado o desvio padrão de GDA e GDR para cada um deles. Os valores de desvio padrão para GDR e GDA para cada grupo estão especificados na Tabela 3.

Assim como ocorreu para o agrupamento resultante da metodologia de Stensjö, Ferreira e Louira (2017), para o agrupamento com cinco grupos, houve a observância de valores altos de desvio padrão, apontando a necessidade de mais grupos para que o agrupamento seja representativo (Tabela 3).

Em continuidade a essas análises, sugeriu-se um agrupamento com sete grupos. A principal diferença entre esse e o proposto originalmente está na definição dos grupos. Por sua vez, Stensjö, Ferreira e Louira (2017) trabalharam com dois grupos caracterizados por GDA, um neutro e quatro grupos caracterizados por GDR; esse trabalho propõe três grupos caracterizados por GDA, um neutro e três grupos caracterizados por GDR. As faixas para esses grupos estão na Tabela 4.

Grupo	Necessidade	Valor (em horas)	Ocorrências	Desvio padrão	
				GDR	GDA
GDA 1	Demanda de aquecimento baixa	GDR < 180 e GDA < 550,0	34	46,5	62,1
GDA 2	Demanda de aquecimento moderada	GDR < 180 e 550,0 < GDA < 890,0	24	25,4	90,8
GDA 3	Demanda de aquecimento alta	GDR < 180 e GDA > 890,0	4	0,0	76,6
GDR 1	Demanda de resfriamento baixa	GDR < 230,0 e GDA < 155,0	67	57,6	49,1
GDR 2	Demanda de resfriamento moderada	230,0 < GDR < 380,0 e GDA < 155,0	71	43,8	45,6
GDR 3	Demanda de resfriamento alta	GDR > 380,0 e GDA < 155,0	54	49,0	22,4
Neutro	Sem demanda de aquecimento e resfriamento	GDR < 241,0 e GDA < 300,0	43	61,7	53,2

Tabela 4: Agrupamento considerando-se sete grupos. Fonte: Das autoras.

Mesmo com o aumento dos grupos de cinco para sete, restou um com poucas cidades. Nos dois casos, esses grupos correspondem às localidades com alta demanda de aquecimento. Como há a predominância do clima quente no território brasileiro, poucas são as cidades com alta demanda de aquecimento, e a tendência é que este grupo com poucas cidades se repita nos agrupamentos.



O agrupamento das cidades conforme essa classificação é apresentado na Figura 4.

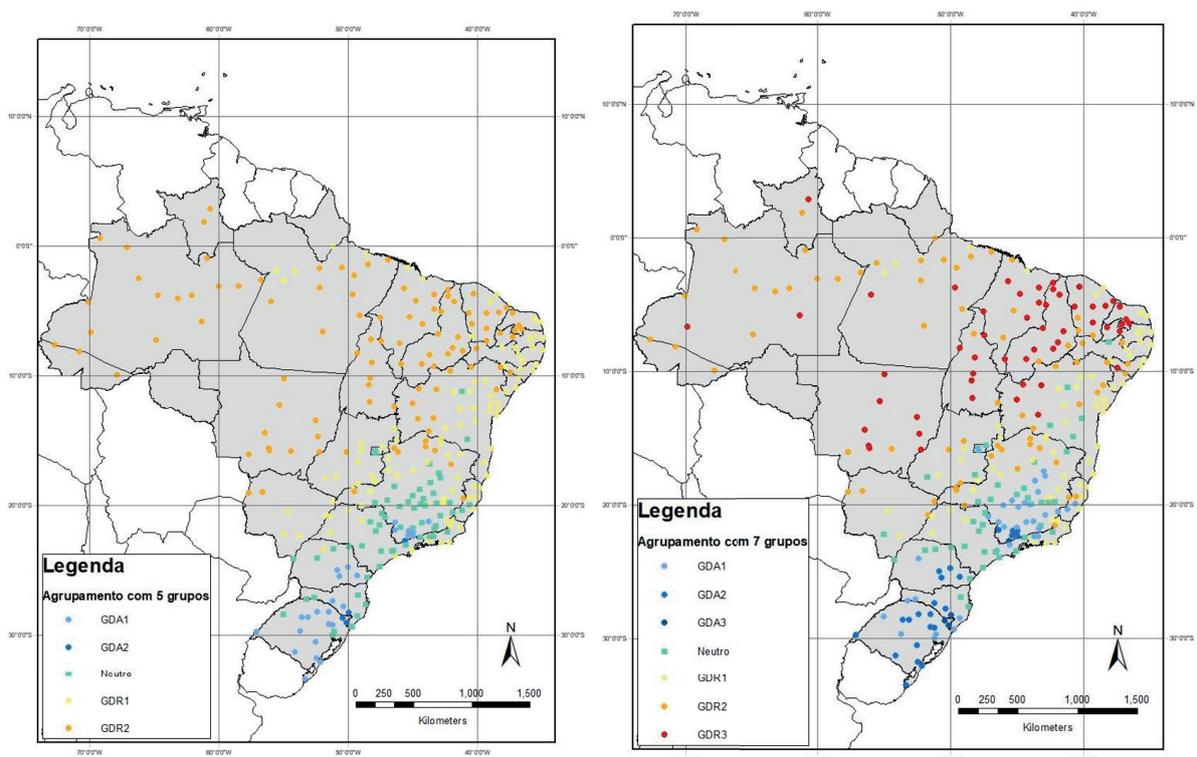


Figura 4: Agrupamento por GDR e GDA para cinco grupos (à esquerda) e para sete grupos (à direita). Fonte: Das autoras.

Os valores calculados de desvio padrão para esse agrupamento estão na Tabela 4.

Para o agrupamento com sete grupos, novamente houve a observância de valores altos de desvio padrão para os grupos caracterizados pela demanda de aquecimento (GDA 1 a 3). Esses grupos são representados por um número menor de localidades do que o apresentado usualmente pelos outros, podendo ser esta a razão da maior variabilidade dentro dos grupos. Outro ponto importante é que a demanda de aquecimento é proveniente dos climas temperados do sul do País, dos climas tropical de altitude da Região Sudeste e dos climas de transição com inverno mais frio e seco. Ou seja, comportamentos climáticos bem distintos, o que se reflete nos valores diversificados de GDA.

Agrupamento final por GDR e GDA

Diante dos resultados obtidos em que o agrupamento de sete grupos resultou uma melhor representatividade da variabilidade climática brasileira, este foi o eleito. A diferença para o último agrupamento apresentado será na adequação numérica das faixas de GDA e de GDR que definem os grupos, contemplando todo o intervalo de GDA e GDR. As faixas propostas são descritas na Tabela 5.

Grupo	Necessidade	Valor (em horas)	Ocorrências	Desvio padrão
GDA 1	Demanda de aquecimento baixa	$GDR < 180$ e $GDA < 600,0$	40	45,0
GDA 2	Demanda de aquecimento moderada	$GDR < 180$ e $600,0 < GDA < 1000,0$	18	23,7
GDA 3	Demanda de aquecimento alta	$GDR < 180$ e $GDA > 1000,0$	4	0,0
GDR 1	Demanda de resfriamento baixa	$GDR < 250,0$ e $GDA < 155,0$	83	68,5
GDR 2	Demanda de resfriamento moderada	$250,0 < GDR < 400,0$ e $GDA < 155,0$	72	42,4
GDR 3	Demanda de resfriamento alta	$GDR > 400,0$ e $GDA < 155,0$	45	43,7
Neutro	Sem demanda de aquecimento e resfriamento	$GDR < 250,0$ e $GDA < 300,0$	35	64,7

Tabela 5: Novo agrupamento proposto. Fonte: Das autoras.

A distribuição espacial dos grupos pelo território brasileiro é apresentada na Figura 5.



Figura 5: Agrupamento final proposto. Fonte: Das autoras.

Foram calculados os desvios padrão de GDA e GDR para cada grupo (Tabela 5).

Apesar dos valores ainda altos de desvio padrão para GDA, a adequação das faixas foi benéfica para sua redução. Entre todos os agrupamentos avaliados, esse foi o que apresentou valores mais baixos de desvio padrão e maior adequabilidade.

Comparando o agrupamento proposto por Stensjö, Ferreira e Loura (2017) e o proposto pelas autoras, observa-se que há um comportamento geral bem similar entre os agrupamentos, sendo que o proposto pelas autoras apresenta faixas mais adequadas de GDA e GDR para a definição dos grupos e com desvios padrão inferiores. As diferenças observadas entre ambos são pontuais. Algumas localidades classificadas como GDA 1 por Stensjö, Ferreira e Loura (2017) foram classificadas como Neutro no agrupamento proposto. De forma equivalente, localidades agrupadas em Neutro passaram para GDR 1, como GDR 3 para GDR 2. Além disso, o GDR 4 não foi considerado na atual proposta e o grupo GDA 3 adicionado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração de base de dados climáticos para as cidades brasileiras é uma etapa de relevância para fundamentar legislações e planos pertinentes à eficiência energética de edificações e ações climáticas. No entanto, o Brasil não dispõe de normas técnicas e/ou zoneamentos estabelecidos por um método de cálculo para definição de graus-dia. Um dos poucos trabalhos desenvolvidos foi realizado por Stensjö, Ferreira e Loura (2017), fundamentado em graus-dia a partir de dados disponíveis nas Normas Climatológicas para o período de 1961-1990. Esse conteúdo ainda se apresenta de forma muito árida para os arquitetos e planejadores de maneira geral. Entretanto, ampliar o conhecimento sobre esse método de zoneamento climático pode contribuir para produção de edificações mais confortáveis e eficientes.

O objetivo do presente trabalho foi a validação e a atualização dessa classificação para um novo conjunto de Normas Climatológicas referentes ao período de 1981 a 2010. As atualizações propostas perpassam nos ajustes no processo de definição da temperatura-base para graus-dia de aquecimento e nas faixas de GDA e GDR que definem os grupos.

As análises realizadas no presente estudo corroboram o método de cálculo de GDR. Ainda, concluíram que o método de cálculo de GDA, que considera a temperatura-base para GDA de $T_n - 5$ °C para temperaturas médias do ar mensais inferiores a 16 °C e 19,5 °C para temperaturas médias do ar mensais superiores a 16 °C, apresentou ser mais condizente com a realidade climática brasileira, principalmente para o clima quente e úmido.

Em relação aos agrupamentos, assim como Stensjö, Ferreira e Loura (2017), confirma-se que os agrupamentos com sete grupos são mais representativos do que os agrupamentos com cinco grupos apenas.



Os resultados obtidos apontaram para a validação do método de Stensjö, Ferreira e Louira (2017), evidenciando a sua robustez do método, assim como sua sensibilidade a diferentes bases de dados. Algumas adaptações foram necessárias ao método original sem refinamento do processo de classificação. As faixas de GDA e de GDR foram revistas para que abrangessem todo o intervalo de dados e aqueles definidos por números arredondados, facilitando a aplicação do método.

Ao final, o agrupamento resultante mostra-se como uma base de dados climáticos para a identificação de tendências de demanda energética para as habitações brasileiras. Entre elas, pode-se apontar uma elevação do número de cidades com aumento da demanda para GDR, principalmente. Este trabalho oferece subsídios para debates sobre exigências de desempenho térmico mínimo das envoltórias em escala nacional visando à redução de demanda energética. Também pode auxiliar estudos comparativos sobre morfologias urbanas mais favoráveis a determinados climas e pode informar objetivamente um arquiteto sobre o esforço necessário para promoção de conforto térmico. Enfim, pode contribuir tanto em escala urbana quanto na da edificação.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, E. S. de. Método integrado de análise climática para arquitetura aplicado à cidade de Belo Horizonte, MG. *In: VI ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E III ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC/ELACAC)*, 2001, São Pedro. *Anais do VI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído/ III Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído*, São Paulo, ANTAC, 2001. 1 CD-ROM.
- BAI, L. *et al.* A new approach to develop a climate classification for building energy efficiency addressing Chinese climate characteristics. *Energy*, v. 195, p. 1-14, 2020. DOI 10.1016/j.energy.2020.116982
- BAI, L.; WANG, S. Definition of new thermal climate zones for building energy efficiency response to the climate change during the past decades in China. *Energy*, v. 170. p. 709-719, 2019. DOI 10.1016/j.energy.2018.12.187
- BERARDI, U.; JAFARPUR, P. Assessing the impact of climate change on building heating and cooling energy demand in Canada. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 121, p. 1-12, 2020. DOI 10.1016/j.rser.2019.109681
- D'AMICO, A. *et al.* Building energy demand assessment through heating degree days: the importance of a climatic dataset. *Applied Energy*, v. 242, p. 1285-1306, 2019. DOI 10.1016/j.apenergy.2019.03.167
- DAY, T. *Degree-days: theory and application TM4*. London: The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE), 2006.



- DEAR, R. J. de.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, v. 34, n. 6, p. 549-561, July 2002. DOI 10.1016/S0378-7788(02)00005-1
- ELETROBRAS. *Pesquisa de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos na classe residencial*. Rio de Janeiro: Procel, 2019. Disponível em: <https://q.elektrobras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>. Acesso em: 2 fev. 2023.
- GIVISIEZ, G. H. N.; OLIVEIRA, E. L. de. (org.). *Demanda futura por moradias: demografia, habitação e mercado*. Niterói, RJ: Universidade Federal Fluminense, 2018.
- GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992. DOI 10.1016/0378-7788(92)90047-K
- HEIDARI, S.; SHARPLES, S. A comparative analysis of short-term and long-term thermal comfort surveys in Iran. *Energy and Buildings*, v. 34, n. 6, p. 607-614, 2002. DOI 10.1016/S0378-7788(02)00011-7
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Normais Climatológicas do Brasil: 1961-1990*. Brasília, DF: INMET, 2009. p. 465.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Normais Climatológicas do Brasil: 1981-2010*. Brasília, DF: INMET, 2018.
- INVIDIATA, A. *et al.* Análise de agrupamento de 411 cidades brasileiras baseado em indicadores de desempenho de edificações residenciais naturalmente ventiladas. In: *XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 2016, São Paulo. *Anais [...]*. São Paulo, ANTAC, 2016.
- KHEDARI, J. *et al.* Thailand ventilation comfort chart. *Energy and Buildings*, v. 32, n. 3, p. 245-249, 2000. DOI 10.1016/S0378-7788(00)00050-5
- LOURA, R. M.; FERREIRA, C. C.; STENSJÖ, I. P. Análise comparativa da classificação e agrupamento das cidades brasileiras em graus-dia de aquecimento e resfriamento a partir das Normais Climatológicas 1961-1990 e 1981-2010. In: *CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL (PLURIS 2020)*, 9. Águas de Lindoia: [s.n.], 2021.
- PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. *Ambiente Construído*, v. 10, n. 1, p. 31-51, 2010. DOI 10.1590/S1678-86212010000100002
- ROAF, S.; CRICHTON, D.; NICOL, F. *Adapting buildings and cities for climate change: a 21st century survival guide*. 2nd ed. UK: Routledge, 2009.



RORIZ, M. *Segunda proposta de revisão do zoneamento bioclimático do Brasil*. São Carlos: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), 2012.

STENSJÖ, I. P. FERREIRA, C. C.; LOURA, R. M. Classificação e agrupamento das cidades brasileiras em graus-dia de aquecimento e resfriamento: 1960 a 2013. *Urbe – Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 9, n. 1, p. 286-300, 2017. DOI 10.1590/2175-3369.009.SUPL1.AO03

UNITED NATIONS. *World population prospects: the 2012 revision*. New York, 2013. Disponível em: <https://www.un.org/en/development/desa/publications/world-population-prospects-the-2012-revision.html#:~:text=The%20report%2C%20World%20Population%20Prospects,to%201.8%20billion%20in%202050>. Acesso em: 2 fev. 2023.

VECCHI, R. *et al.* Application of the adaptive model proposed by ASHRAE 55 in the Brazilian climate context: raising some issues. *In: 8TH WINDSOR CONFERENCE*. London, 2014. p. 13.

