

O Índice de Calor (HI) na cidade de Fortaleza, Ceará

The Heat Index (HI) in the city of Fortaleza, Ceará

Antonio Ferreira Lima Júnior¹

Flávia Ingrid Bezerra Paiva Gomes²

Maria Elisa Zanella³

Palavras-chave

Clima urbano
Conforto térmico
Estresse térmico

Resumo

Ao longo do tempo, as mudanças no espaço tiveram como resultado a alteração das características naturais. Nesse contexto, surgiram indicadores de conforto térmico, desenvolvidos para interpretar as condições ambientais em relação ao estresse térmico. O objetivo deste estudo foi aplicar o Índice de Calor (Heat Index - HI) em diferentes bairros de Fortaleza, elegidos a partir dos diferentes tipos de cobertura do solo. Foi realizada uma campanha de coleta de dados em dez pontos da cidade, utilizando sensores termohigrômetros. A equação do HI foi aplicada aos dados coletados, de acordo com os intervalos do National Weather Service e dos intervalos adaptados para o município. Os dados indicam que Fortaleza experimentou temperaturas elevadas durante todo o período analisado (mês seco e quente), tendo impacto negativo no HI (até 42°C). A comparação das classes do indicador de conforto mostrou que, no intervalo original, poucos registros indicaram condições de conforto nos diferentes bairros, enquanto o intervalo de classes considerando a aclimação da população indicou mais situações confortáveis. As piores condições de conforto ocorreram no período vespertino, entre 12h e 14h. Os pontos mais críticos estão associados ao adensamento de edificações e à falta de infraestruturas verdes urbanas, sendo o Parque do Cocó e o Bairro de Fátima (mais arborizados) os que apresentaram maior frequência na classe de conforto. Conclui-se que todo o território da cidade enfrenta estresse térmico, no entanto, as estruturas verdes têm o potencial de atenuar os efeitos adversos do campo térmico, melhorando o conforto humano no ambiente citadino.

Keywords

Urban climate
Thermal comfort
Thermal stress

Abstract

Over time, changes in space have resulted in changes in natural characteristics. In this context, thermal comfort indicators have emerged, as developed to interpret environmental conditions in relation to thermal stress. The objective of this study was to apply the Heat Index (HI) in different neighborhoods of the city of Fortaleza, which choice was based on the different types of land cover. We carried out data collection campaign at ten points in the city, using thermohygrometer sensors. We applied the HI equation to the data collected, according to the intervals of the National Weather Service and the intervals adapted for the municipality. The data indicate that Fortaleza experienced high temperatures throughout the analyzed period (dry and hot months), having a negative impact on the HI (up to 42°C). The comparison of the comfort indicator classes showed that, in the original interval, few records indicated comfortable conditions in the different neighborhoods, while the interval of classes considering the acclimatization of the population indicated situations that were more comfortable. The worst comfort conditions occurred in the afternoon, between 12 p.m. and 2 p.m. The most critical points are associated with the density of buildings and the lack of urban green infrastructure, with neighborhoods Parque do Cocó and Bairro de Fátima (with more trees) that presented the highest frequency in the comfort class. We concluded that the entire territory of the city faces thermal stress; however, green structures have the potential to mitigate the adverse effects of the thermal field, improving human comfort in the urban environment.

¹Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, CE, Brasil. juniorgeoufc@gmail.com

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Quixadá, CE, Brasil. flavia.ingrid@ifce.edu.br

³Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, CE, Brasil. elisazv@terra.com.br

INTRODUÇÃO

As transformações espaciais que ocorreram no decorrer do tempo, principalmente intensificadas desde a Revolução Industrial, mudaram a forma como o homem interage com o meio e responde aos efeitos causados por essas alterações, principalmente em ambientes citadinos. Santos (1993) entende que a cidade pode ser compreendida como uma organização espacial primordialmente humana, o qual modifica os atributos naturais em busca de suprir as demandas geradas a partir de seu cotidiano. Dentre os elementos naturais que foram modificados pelo ser humano, especialmente nos ambientes urbanos, é possível destacar o clima, onde as condições atmosféricas locais foram consideravelmente alteradas no decorrer do tempo, ocasionando aumento significativo da temperatura do ar, anomalias na umidade relativa e velocidade dos ventos e mudança nos padrões de circulação atmosférica locais (Landsberg, 1956; 1981; Chandler, 1965; Oke, 1973; Monteiro, 1976), resultantes do processo de desenvolvimento urbano desordenado e sem planejamento apropriado (Gartland, 2010).

A substituição das coberturas de solo naturalmente permeáveis por superfícies impermeáveis que absorvem calor, e alteram o equilíbrio de energia das cidades, agrava os riscos associados aos extremos de temperatura (Nice *et al.*, 2022), aumentando o número de episódios de ondas de calor e suas intensidades em todo o mundo (Perkins-Kirkpatrick; Lewis, 2020). Observa-se que, a exposição ao aumento da temperatura ocorre de maneira desigual na cidade, onde as condições socioeconômicas e o ambiente urbano foram significativamente determinantes para o estresse térmico (arifwidodo; Chandrasiri, 2020), onde a maior exposição está ligada a tipologias habitacionais densas e pouca vegetação nos assentamentos informais de baixa renda (Adegun; Ayoola, 2022).

Essas condições podem ter efeito direto sobre a qualidade de vida da população. Huang *et al.* (2011) indicam que as temperaturas elevadas e níveis excessivos de umidade podem ter efeitos negativos na saúde humana e no desempenho no trabalho, especialmente quando ultrapassam os limites fisiológicos. Se a temperatura central do corpo humano ultrapassar os 37 °C por períodos extensos, pode ocorrer hipertermia (Sherwood; Huber, 2010), a partir de desequilíbrios temporários de calor que resultam no armazenamento de calor no corpo (Cramer; Jay, 2016).

Antes de causar comorbidades associadas à hipertermia o organismo sofre prejuízo em seu funcionamento ótimo pela sensação de desconforto térmico. Para averiguar tais prejuízos é necessário compreender o estado da mente humana e sua satisfação em relação ao campo térmico (Fanger, 1970), portanto, sendo preciso utilizar métodos para avaliar a resposta dos organismos a esse fenômeno.

É nesse sentido, que surgem os indicadores de conforto térmico, desenvolvidos com o propósito de tornar mais simples a delimitação das condições do ambiente em relação ao estresse eminente (Blazejczyk *et al.* 2012). De Freiras e Grigorieva (2015) em um estudo de revisão bibliográfica identificaram um total de 165 métodos ou índices para mensurar e avaliar as condições de conforto térmico, utilizando diferentes inputs e níveis de sofisticação. A seleção entre diferentes tipos de índices é diretamente influenciada pelas condições do ambiente, pela natureza das atividades realizadas pelo indivíduo e pela ponderação da relevância de cada aspecto específico do conforto (Annuniação, 2016), ponderando também a disponibilidades de dados de *input* para a aplicação do índice. Na região semiárida brasileira, por exemplo, foi identificada a aplicação de 20 índices diferentes, atentando para as fragilidades em suas aplicações (Paiva-Gomes; Zanella, 2023).

Na literatura científica, o Índice de Calor (Heat Index – HI), se destaca entre os indicadores utilizados para mensurar e analisar o conforto térmico em ambientes quentes. O HI combina valores de temperatura e umidade relativa do ar, determinando um valor de sensação térmica sentida pelos indivíduos (Steadman, 1979), baseado em diversos estudos biometeorológicos (Fanger, 1970). O HI pode ser aplicado em diferentes regiões do globo e para diferentes objetivos, desde simulações de conforto de acordo com o aquecimento global (Delworth *et al.*, 1999), análise de casos de ondas de calor (Suparta; Yatim, 2017; Awasthi *et al.*, 2021) e desenvolvimento de sistemas de alerta (Kirtsaeng; Kirtsaeng, 2015). No Brasil também são verificados estudos aplicando o HI em diversas vertentes, principalmente para análises microclimáticas (Nóbrega; Lemos, 2011; Novais *et al.*, 2021; Moreira *et al.*, 2023).

A análise climática local é fundamental para a compreensão do conforto térmico em ambientes externos, em especial os urbanos. É notória a diversidade de modificações impostas à paisagem em curtas distâncias nas cidades, tendo diferentes faces do tecido urbano condições naturais e urbanísticas bastante distintas entre si. Tal diversidade seria

suficiente para induzir diferentes condições de conforto térmico? Tendo como base o HI, o presente trabalho teve como objetivo analisar as condições de conforto térmico no município de Fortaleza capital do estado do Ceará, tendo em vista as diferentes formas urbanas e condições de uso do solo. Foi aqui analisado um período crítico em relação às condições térmicas na região, representado pelo mês de outubro do ano de 2019.

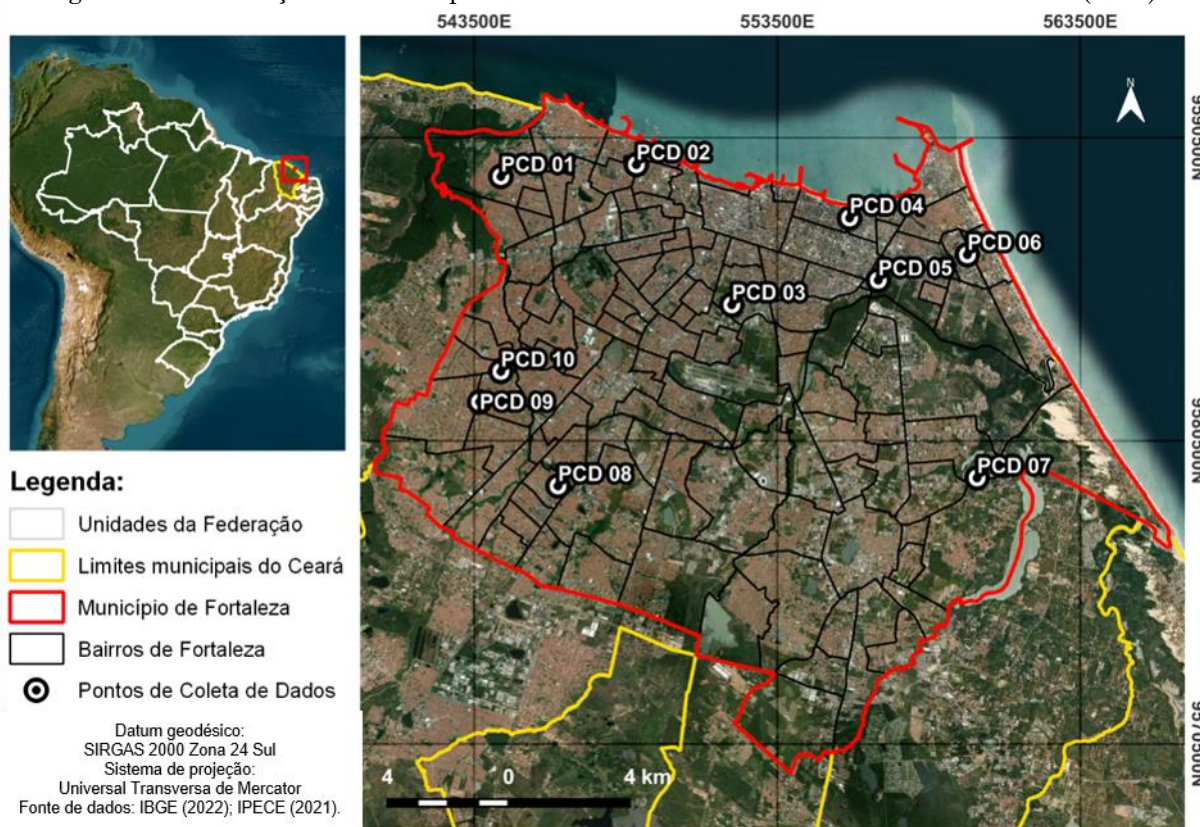
METODOLOGIA

Área de estudo

A pesquisa foi realizada tendo como lócus o município de Fortaleza, capital do estado do Ceará, está localizada nas coordenadas centrais SIRGAS 2000 UTM Zona 24 Sul, 9581533.31 S e 552409.32 O (Figura 1). De acordo com Mendonça e Danni-Oliveira (2007), Fortaleza está inserida no contexto de Clima Tropical Equatorial. Por estar localizada na costa da região Nordeste brasileira, banhada pelo Oceano Atlântico, a cidade apresenta condições de umidade relativa elevada e grande influência dos ventos, em diferentes escalas.

De maneira geral, a temperatura do município não sofre grandes variações intra e interanuais, onde as variações de temperaturas entre os meses mais e menos quentes, não ultrapassam os 2°C (Moura, 2008; Lima Júnior, 2023), sendo os meses de outubro, novembro e dezembro os que alcançam as maiores temperaturas máximas médias. Portanto, o que rege a variabilidade climática no município é a precipitação pluviométrica, largamente influenciada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), esta, por sua vez, tendo sua atuação influenciada pelos Eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na bacia do Oceano Atlântico (Ferreira; Mello, 2005). Os principais sistemas atmosféricos que atuam na produção de chuva na cidade de Fortaleza, além da ZCIT, são os Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN), os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), as Ondas de Leste (OL), entre outros, provocando precipitação concentrada majoritariamente no primeiro semestre do ano (Ferreira; Mello, 2005; Barbieri, 2014), enquanto no segundo semestre predominam situações de estabilidade atmosférica sob influência da Massa Equatorial Atlântica (mEa).

Figura 1 - Localização do município de Fortaleza e dos Pontos de Coleta de Dados (PCD).



Fonte: Os autores (2024).

Atualmente, Fortaleza é considerada uma das capitais mais importantes do país. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023), a capital do Ceará ocupa a 11ª posição entre as cidades com maiores PIBs do país. De acordo com a prévia do censo demográfico (IBGE, 2023), Fortaleza conta com 2.428.678 habitantes, sendo o 4º município mais povoado do país. Com densidade demográfica de 7.775,43 habitantes por quilômetro quadrado (hab/km²) é a oitava cidade mais densa e ocupa o primeiro lugar nesse quesito entre as capitais brasileiras.

Sendo assim, o município consiste em um importante aglomerado urbano, sem a presença de áreas rurais importantes e com alto índice de modificação da paisagem, onde apenas as áreas legalmente protegidas mantêm características naturais preservadas, havendo a substituição dos materiais de cobertura do solo em praticamente todo o município.

Coleta de dados primários

Este artigo analisou as condições de temperatura e umidade relativa do ar em Fortaleza, tendo em vista diferentes bairros, que apresentam condições de uso e ocupação do solo e estrutura urbana diferenciadas. Para tanto, foi necessário realizar uma campanha de coleta de dados primários

através de sensores termohigrômetros alocados em pontos estratégicos da cidade. A distribuição dos sensores (Figura 1) teve como base os diferentes padrões de uso do solo e localização geográfica, objetivando obter uma representação coesa do território fortalezense. O Quadro 1 apresenta as características de cada Ponto de Coleta de Dados.

Foi empregado o uso de termohigrômetros do modelo HOBO MX2301A. Esses dispositivos são designados para aferir a temperatura e umidade relativa do ar (Balany *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2023). Para empregar tais instrumentos em ambientes ao ar livre, torna-se imprescindível a utilização de um abrigo. Estes abrigos, destinados aos termohigrômetros, constituem-se como dispositivos de proteção, resguardando os instrumentos de medição contra a incidência direta de radiação solar e a ação do vento. Confeccionados a partir de tubos de PVC branco, apresentam orifícios na parte superior e inferior, permitindo a circulação do ar e minimizando o impacto do aquecimento solar direto no sensor. Ademais, desempenham a função de resguardar o sensor contra as intempéries, como chuvas e ventos intensos.

Quadro 1 - Descrição das características dos Pontos de Coleta de Dados (PCDs) da pesquisa.

Imagem aérea	Descrição do Ponto
	PCD 01 (Álvaro Wayne) Coordenadas: 5448850E e 9589610S Características: ocupação residencial, residências geminadas, construções são majoritariamente de alvenaria e a cobertura é composta por revestimentos cerâmicos. Alta densidade de edificações. Pouca arborização.
	PCD 02 (Vila Velha) Coordenadas: 544377E e 9589218S Características: ocupação residencial, construções são majoritariamente de alvenaria e a cobertura é composta por revestimentos cerâmicos. Alta densidade de edificações. As vias possuem pavimentação asfáltica, e com exceção das avenidas principais são majoritariamente estreitas. Pouca arborização.
	PCD 03 (Bairro de Fátima) Coordenadas: 551997E e 9584984S Características: ocupação mista, maior dimensão dos lotes e distanciamento entre as edificações. Gabarito variado, verticalização intermediária. Avenidas pavimentadas e largas. Presença de espaços abertos.
	PCD 04 (Meireles) Coordenadas: 555887E e 9587848S Características: ocupação mista. A pavimentação das ruas e avenidas é predominantemente (quase que 100%) composta por material asfáltico, enquanto o material de construção mais utilizado nas edificações é o concreto, com estruturas de aço e revestimentos cerâmicos. Verticalização consolidada e baixa arborização.
	PCD 05 (Parque do Cocó) Coordenadas: 556830E e 9585795S Características: unidade de conservação estadual. Cobertura vegetal de grande porte. Ocupação mista com entorno composto por edificações acima de 10 pavimentos. O Parque do Cocó oferece áreas dedicadas a atividades de lazer, esportes, cultura e educação ambiental.
	PCD 06 (De Lourdes) Coordenadas: 559775E e 9586637S Características: ocupação residencial de alto padrão, lotes de maior dimensão e com recuos, respeito as diretrizes urbanísticas. Construções de alvenaria e coberturas cerâmicas. Baixo volume de edificações e lotes não construídos. Próximo à praia.
	PCD 07 (Lagoa Redonda) Coordenadas: 559775E e 9586637S Características: ocupação residencial, construções de alvenaria e coberturas cerâmicas. Arborização consideravelmente alta. Baixa densidade de construções, considerada zona de expansão. Vias pavimentadas e não pavimentadas.
	PCD 08 (Mondubim) Coordenadas: 559775E e 9586637S Características: ocupação residencial, construções de alvenaria e coberturas cerâmicas. Alta densidade de edificações e pouca arborização. Vias com pavimentação asfáltica.
	PCD 09 (Bom Jardim) Coordenadas: 543292E e 9581464S Características: ocupação residencial, construções de alvenaria e coberturas cerâmicas de baixo gabarito. Alta densidade de edificações e pouca arborização. Próximo a rede hidrográfica urbana canalizada. Vias com pavimentação asfáltica.
	PCD 10 (Conjunto Ceará) Coordenadas: 544376E e 9582784S Características: ocupação residencial, construções de alvenaria e coberturas cerâmicas de baixo gabarito. Alta densidade de edificações e pouca arborização. Próximo a rede hidrográfica urbana canalizada. Vias com pavimentação asfáltica.

Fonte: Os autores (2024).

O período de coleta de dados foi o mês de outubro de 2019. O mês de outubro foi escolhido pelas características de forte estabilidade da atmosfera, tendo em vista que em condições estáveis da atmosfera, as

diferenças microclimáticas são intensificadas (Santamouris *et al.*, 2007). Esse mês também figura entre os mais quentes no decorrer do ano. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram registrados de 1 a 31 de

outubro de 2019, aferindo os elementos em intervalos de 5 minutos.

Cálculo do Índice de Calor (Heat Index – HI)

O cálculo do Índice de Calor (HI) é obtido por meio de análises estatísticas de regressão que consideram a temperatura e a umidade relativa do ar. Esse método foi desenvolvido a partir da formulação inicial do Índice de Temperatura Aparente de Steadman, datado de 1979. De acordo com Kusch *et al.* (2004) o HI caracteriza a percepção humana diante das diversas combinações de temperatura

elevada e umidade do ar. Isso ocorre devido à dificuldade crescente na perda de calor por evaporação à medida que a umidade aumenta. Os autores indicam a importância do índice para os procedimentos de alerta, tendo em vista os impactos para a saúde e segurança pública.

Neste trabalho o HI foi calculado a partir de planilhas Excel, onde a fórmula foi inserida, visando otimizar o processo e executá-lo em larga escala. A equação utilizada para calcular o HI está descrita abaixo. Após o cálculo do HI em graus Fahrenheit (°F), foi realizada a conversão dos resultados para graus Celsius (°C).

$$HI = 16,923 + [(1,85212 \cdot 10^{-1}) \cdot t_a] + (5,37941 \cdot UR) - [(1,00254 \cdot 10^{-1}) \cdot t_a \cdot UR] + [(9,41695 \cdot 10^{-3}) \cdot t_a^2] + [(7,28898 \cdot 10^{-3}) \cdot UR^2] + [(3,45372 \cdot 10^{-4}) \cdot t_a^2 \cdot UR] - [(8,1497 \cdot 10^4) \cdot t_a \cdot UR^2] + [(1,02102 \cdot 10^{-5}) \cdot t_a^2 \cdot UR^2] - [(3,8646 \cdot 10^{-5}) \cdot t_a^3] + [(2,91583 \cdot 10^{-5}) \cdot UR^3] + [(1,42721 \cdot 10^{-6}) \cdot t_a^3 \cdot UR] + [(1,97483 \cdot 10^7) \cdot t_a \cdot UR^3] - [(2,18429 \cdot 10^{-8}) \cdot t_a^3 \cdot UR^2] + [(8,43296 \cdot 10^{-10}) \cdot t_a^2 \cdot UR^3] - [(4,81975 \cdot 10^{-11}) \cdot t_a^3 \cdot UR^3] \quad (1)$$

Onde:

HI é o Índice de Calor

UR é a umidade relativa do ar (%)

t_a é a temperatura de bulbo seco do ar (°F)

Conforme as informações fornecidas pelo Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos (National Weather Service - NWS), as leituras do Índice de Calor (HI) podem ser interpretadas com base nos níveis de alerta e nas possíveis implicações para a saúde humana (Quadro 2).

Quadro 2 - Níveis de alerta do HI e suas possíveis consequências para a saúde

Nível de alerta	Índice de Calor (HI)	Sintomas
Perigo extremo	$\geq 54^\circ\text{C}$	Insolação; risco de acidente vascular cerebral (AVC) iminente.
Perigo	$41,1^\circ\text{C} - < 54^\circ\text{C}$	Cãibras, insolação, esgotamento físico. Possibilidade de danos cerebrais (AVC) para exposição prolongada com atividades físicas
Cuidado extremo	$32,1^\circ\text{C} - 41^\circ\text{C}$	Insolação, câibras por calor ou exaustão por calor possíveis com exposição prolongada e/ou atividade física.
Cuidado	$27,1^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C}$	Possível fadiga com exposição prolongada e/ou prática de atividade física.
Seguro	$\leq 27^\circ\text{C}$	Não há problemas

Fonte: Adaptado de National Weather Service (s.d.)

Petalas (2015) verificou em sua tese doutoral a aplicabilidade de alguns índices de conforto térmico para Fortaleza, definindo assim, novos limites de conforto para uma série de índices que pudessem ser aplicados em análises bioclimáticas de espaços abertos

nesta cidade e em outras de condições climáticas e de aclimação semelhantes. A autora, apresentou para o HI, um novo intervalo das faixas de conforto levando em consideração a aclimação da população fortalezense (Quadro 3).

Quadro 3 - Intervalo de conforto do HI

Faixa de conforto	Índice de Calor (HI)
Desconfortável	> 32,1°C
Confortável	29,3°C – 32,1°C
Não designado pela autora	< 29,3°C

Fonte: Adaptado de Petalas (2015).

Neste trabalho, a nível de comparação, os dados foram analisados levando em consideração os dois intervalos de acordo com as classes originais e adaptadas do índice. A aplicação do HI foi realizada na totalidade dos dados coletados, assim como para os valores médios horários, encontrando assim, padrões relativos ao conforto térmico da cidade no período analisado.

Os valores de HI foram espacializados através do software SIG QGIS 3.28.10, utilizando o método de interpolação IDW (Inverse Distance Weighted). Esse método consiste na estimativa simples ponderada pela distância do valor na estação alvo. Esse método produz resultados precisos (Musashi *et al.*, 2018), principalmente para regiões de baixa complexidade topográfica do terreno (You *et al.*, 2008), caso de Fortaleza.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

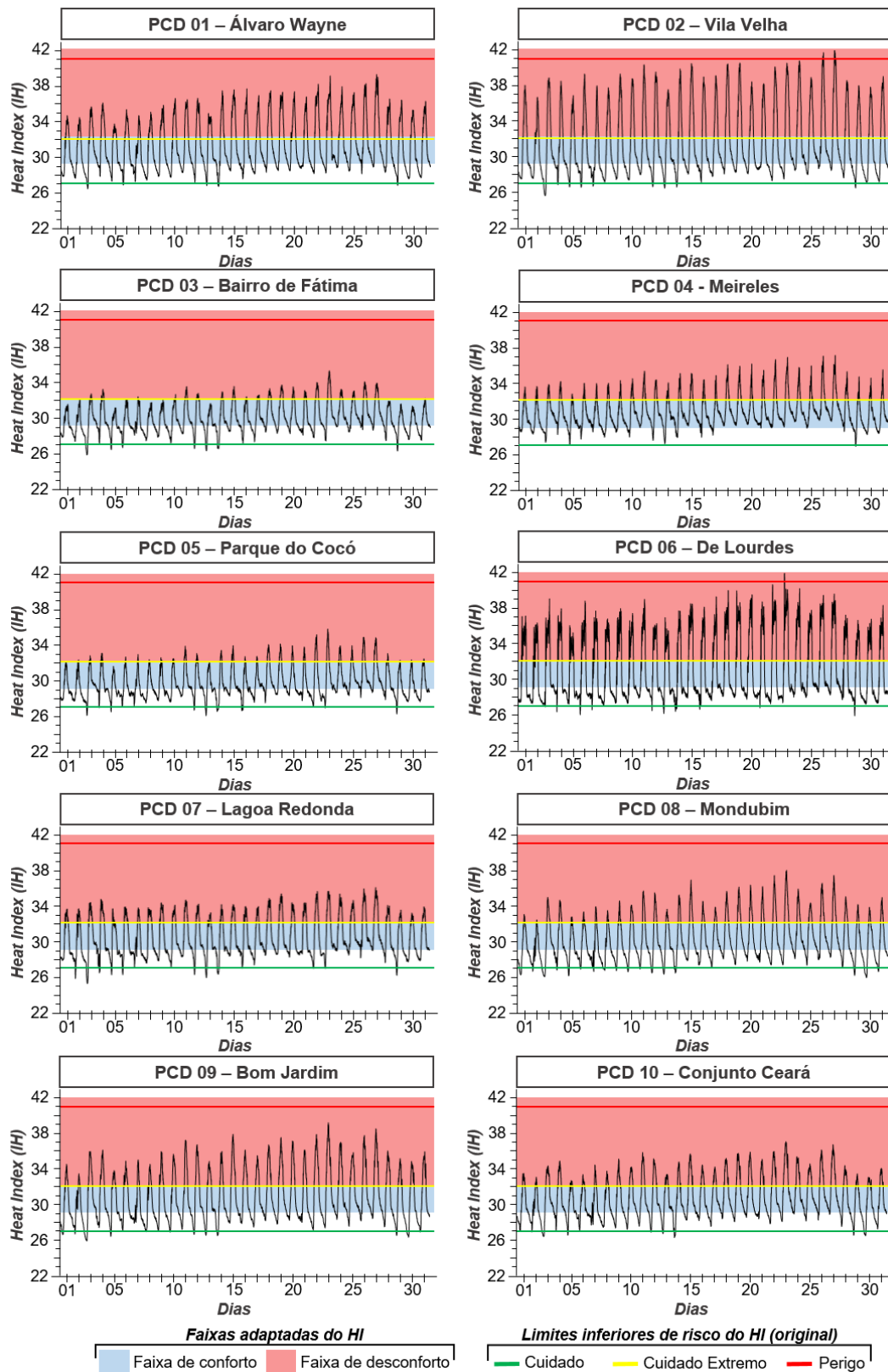
O gráfico da Figura 2 indica a distribuição temporal do HI para cada ponto de coleta de dados (PCD) em outubro de 2019. Esse período é caracterizado por temperaturas elevadas e ausência de precipitação pluviométrica, devido à influência direta da Massa Equatorial Atlântica. A figura indica

também o intervalo de classes do indicador, tendo em vista a classificação original e os intervalos adaptados por Petalas (2015), levando em consideração a aclimação dos residentes do município de Fortaleza.

É notório que, de acordo com as classes originais (NWS), todos os pontos apresentam HI acima dos níveis de conforto, tendo em vista o limiar de 27°C, onde dois pontos (PCD 02 e PCD 06) registraram valores acima do limiar de perigo. Esses pontos representam características distintas de ocupação do solo urbano, onde o PCD 02 é caracterizado por grande adensamento horizontal de edificações, lotes totalmente edificados e pouca vegetação, aquecendo mais no período vespertino. Já o PCD 06 está situado em uma área de duna, com lotes maiores e residências de alto padrão, onde as áreas não edificadas são cobertas por vegetação herbácea e rasteira, que no período seco dá lugar ao solo exposto, fazendo com que haja um aquecimento elevado e rápido da superfície, aumento a temperatura e HI no período matutino (até 11h).

O gráfico revela, ainda, a grande amplitude dos valores do HI, onde a curva segue a radiação solar direta incidindo na superfície terrestre. No final do mês é possível visualizar a ocorrência de uma onda de calor, onde há o aumento significativo do HI em todos os pontos analisados.

Figura 2 - Variação e evolução do HI dos PCDs durante o mês de outubro de 2019.



Fonte: Os autores (2024).

As ondas de calor são eventos meteorológicos irregulares, porém frequentes, que impactam globalmente, manifestando-se através de períodos

prolongados de temperaturas elevadas e intensas ao longo de vários dias (Marto, 2005). No mês analisado, entre os dias 22 e 27, verifica-se a ocorrência de intensidades

mais acentuadas de temperatura, sendo o período que registrou HI superior ao limiar de perigo, nos bairros Vila Velha e de Lourdes (PCD 02 e PCD 06).

Mesmo durante o período de onda de calor, o PCD 03 e PCD 05 mantiveram os valores do indicador distantes do limiar de perigo. O diferencial desses bairros está na característica de uso e ocupação do solo atribuído. O PCD 03, localizado no bairro de Fátima, apresenta espaços abertos arborizados, lotes de tamanhos variados, vias de acesso mais largas e verticalização intermediária com uso residencial, essas características promovem uma maior amenização das condições térmicas (Lima Júnior, 2023), o que reflete sobre o resultado do HI aplicado para os dados locais.

De acordo com Lima Júnior (2023) a amplitude térmica na cidade de Fortaleza pode chegar a uma média de 4°C, onde o Parque do Cocó caracteriza-se como o ponto mais fresco do ambiente urbano. Essa característica reflete também no resultado do HI para a área do Parque (PCD 05), uma vez que este registrou os menores valores associados, inclusive durante o episódio de onda de calor.

Ao analisar a distribuição dos dados nas diferentes classes de conforto (Figura 3), é possível identificar a influência da aclimação para a interpretação do HI, tendo em vista as classes indicadas pelo NWS e por Petalas (2015).

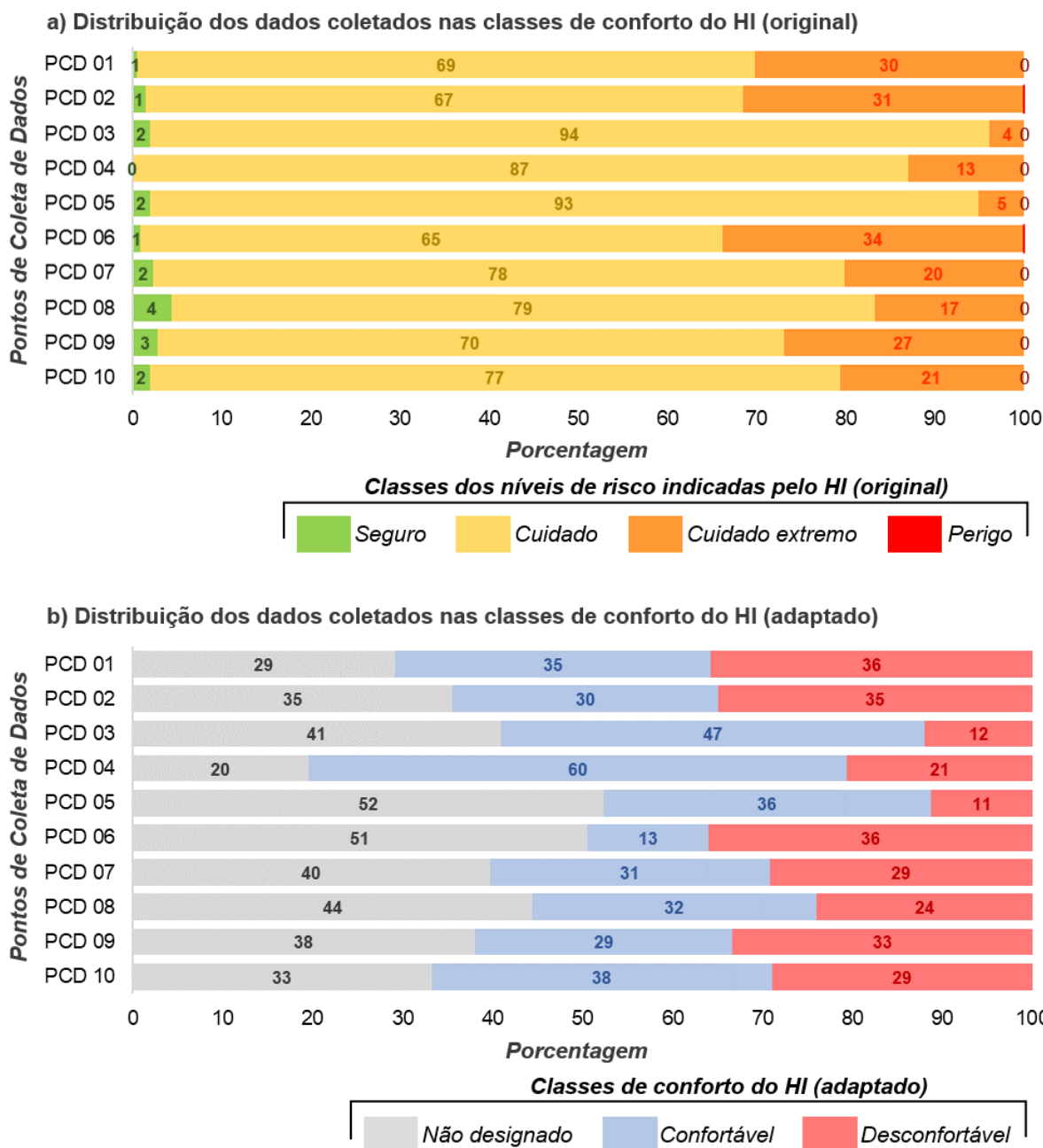
Na classificação original (NWS), o ponto que apresentou maior porcentagem de dados dentro da classe segura, de conforto, foi o

PCD 08, localizado no bairro Mondubim (4%), enquanto o PCD 04 (Meireles) não registrou temperaturas dentro do intervalo de conforto estabelecido. Como em Fortaleza no período analisado a condição de conforto é verificada sempre no período noturno, essa ausência de condições de HI consideradas confortáveis no Meireles expõe uma conjuntura de menor arrefecimento noturno dos materiais, o que é perfeitamente plausível em uma área onde o concreto é o material construtivo mais comum, enquanto em diversos outros bairros da cidade, como o supracitado Mondubim, é a alvenaria que predomina.

O ponto Álvaro Wayne, Vila Velha e de Lourdes (PCD 01, PCD 02 e PCD 06, respectivamente) registraram os maiores percentuais de dados enquadrados na classe de cuidado extremo (30%, 31% e 34%, respectivamente), ressaltando que nos pontos de Vila Velha e De Lourdes (PCD 02 e PCD 03) foram constatadas medições acima do nível de perigo.

Tendo em vista a aclimação da população fortalezense, Petalas (2015) estabeleceu um novo intervalo para os limiares de conforto e desconforto a partir do resultado do HI, considerando que indivíduos que permanecem por períodos prolongados de tempo em ambientes de clima quente apresentam uma maior capacidade de tolerância às elevadas temperaturas em comparação com aquelas provenientes de regiões mais frias (Andreasi, 2009). Sendo assim, o limiar superior de conforto do HI, ou seja, de início do desconforto, que era de 27°C passou a ser 32,1°C.

Figura 3 - Distribuição dos dados coletados nas classes de conforto do HI.



Fonte: Os autores (2024).

Quando avaliada a distribuição dos dados coletados, tendo como perspectiva a aclimação da população, aumentam as porcentagens que se enquadram dentro do limiar de conforto. Os pontos localizados no bairro de Fátima e Parque do Cocó (PCD 03 e PCD 05, respectivamente) foram os que obtiveram a maior porcentagem de dados considerados não-desconfortáveis (88%). Percebe-se uma diferença entre a classificação do NWS, tanto no valor da porcentagem quanto nos pontos representativos.

Já os pontos que registraram os menores percentuais considerados não-

desconfortáveis, foram os situados no Álvaro Wayne, De Lourdes e Vila Velha (PCD 01, PCD 02 e PCD 06) com 64%, 64% e 65%, respectivamente. Apesar da discrepância em relação às porcentagens verificadas em ambos os intervalos de classes do HI, os mesmos bairros foram os mais problemáticos em relação à situação do desconforto térmico.

É necessário destrinchar os dados em escala horária, uma vez que o comportamento das condições térmicas da cidade, estão diretamente relacionadas à incidência da radiação solar e ao meio físico do ambiente citadino. Os estudos de clima urbano em Fortaleza, na perspectiva do

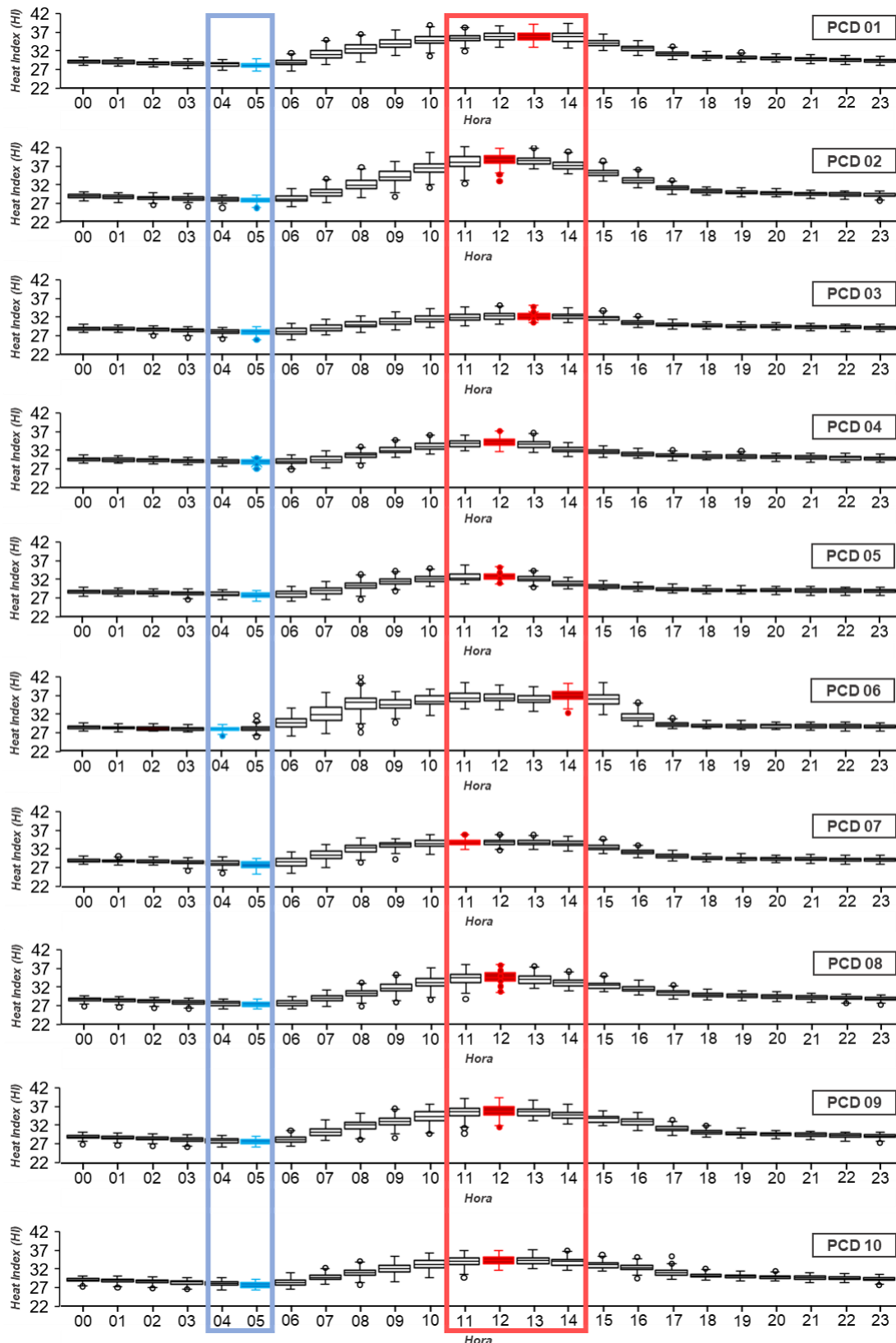
campo térmico (Moura, 2008; Moura *et al.*, 2008; Lima Júnior, 2018; Lima Júnior, 2023) indicam que as manifestações mais intensas da ilha de calor urbana na cidade ocorrem no período diurno (entre 7h e 15h). A análise do resultado das médias horárias do HI vai de encontro ao que é relatado na literatura para o município.

A análise da distribuição horária do resultado do HI durante o mês de outubro de 2019, auxilia na compreensão do conforto térmico na cidade de Fortaleza (Figura 4). Assim como a amplitude da ilha de calor, a intensidade do resultado do HI é mais acentuada durante o período diurno, onde a partir das 7h há uma variação significativa nos valores coletados, persistindo nesse padrão até às 16h.

Nessa faixa horária, em decorrência da insolação direta da radiação solar, são registrados valores mais elevados de temperatura. Outro importante fator a ser considerado na análise é a condição sinótica predominante da mEa, que provoca estabilidade para o tempo e, portanto, uma maior acentuação da influência das condições locais no campo térmico (Santamouris *et al.*, 2007).

Os maiores valores horários do HI foram registrados de 11h às 14h, período de incidência direta da radiação solar sobre a superfície terrestre. Já os menores registros ocorreram entre 4h e 5h, em concordância com a literatura científica local, que aponta esses horários com os registros mais baixos de temperatura do ar e menor intensidade da ilha de calor urbana.

Figura 4 - Gráfico de caixa da distribuição horária do HI para o mês de outubro de 2019.



Fonte: Os autores (2024).

Foram analisados os PCDs que registraram os maiores e menores valores de HI em cada período horário (Figura 5), com o objetivo de compreender como a dinâmica de

uso e cobertura do solo interfere no comportamento do conforto térmico da cidade.

Figura 5 - Identificação dos pontos com maior e menor registro de valor para cada média horária do HI.

	00h - 02h	03h - 05h	06h - 08h	09h - 11h	12h - 14h	15h - 17h	18h - 20h	21h - 23h
PCD 01	28.95	28.34	30.83	34.75	35.75	32.63	30.20	29.59
PCD 02	28.72	28.04	30.09	36.20	38.11	33.25	29.98	29.37
PCD 03	28.80	28.11	29.09	31.47	32.24	30.75	29.57	29.27
PCD 04	29.45	29.00	29.71	33.01	33.33	31.05	30.27	29.94
PCD 05	28.54	28.02	29.07	32.12	31.90	29.78	29.04	28.93
PCD 06	28.31	28.02	32.19	35.57	36.46	32.17	28.83	28.71
PCD 07	28.77	28.08	30.25	33.39	33.69	31.25	29.42	29.20
PCD 08	28.36	27.57	29.00	33.05	33.94	31.44	29.63	29.03
PCD 09	28.55	27.80	30.08	34.23	35.30	32.51	29.81	29.20
PCD 10	28.82	28.06	29.73	33.09	34.13	32.15	30.03	29.49

A variação de tons em azul representa os menores valores e a variação de tons em vermelho, os maiores valores registrados para aquela hora.

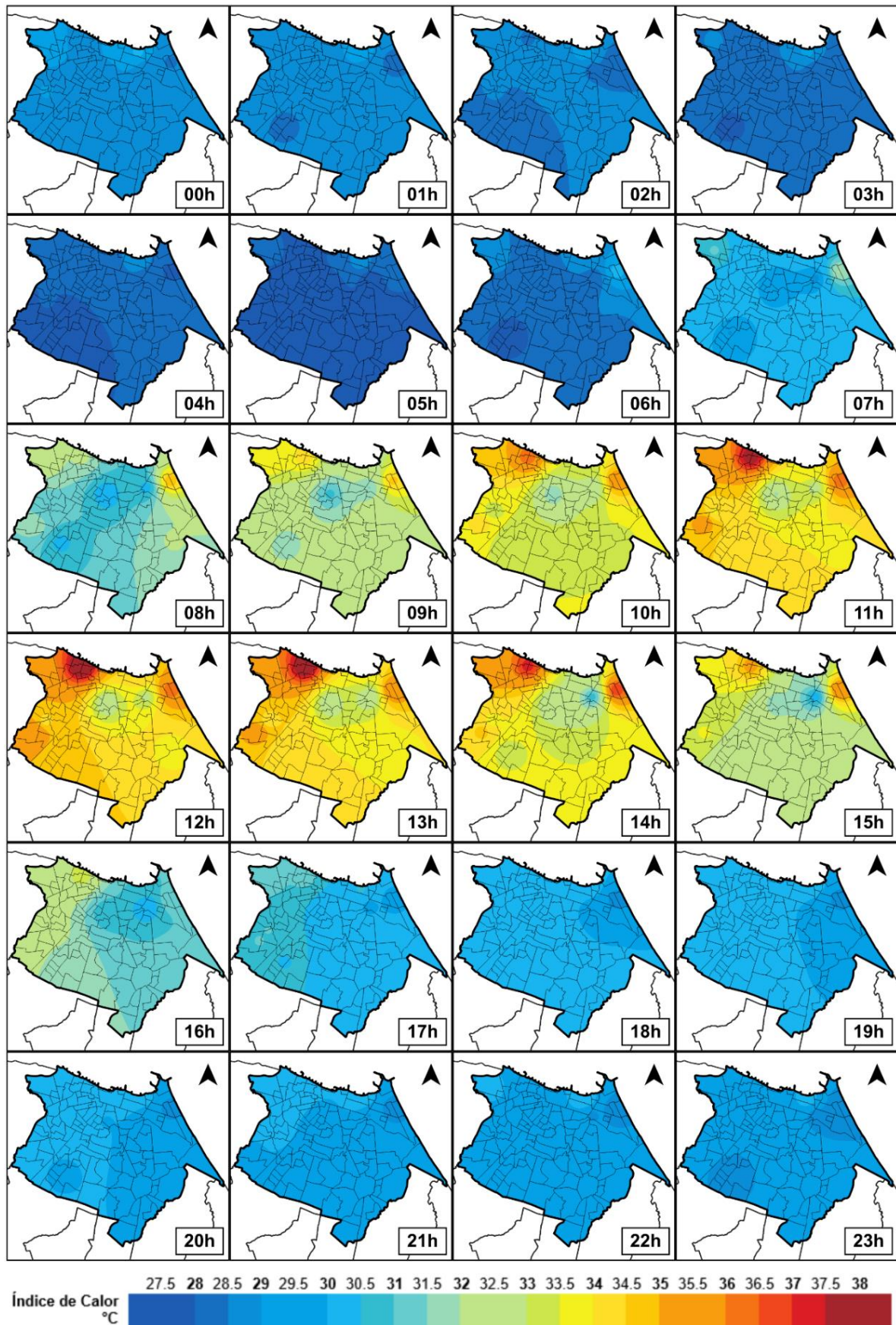
Fonte: Os autores (2024).

Os pontos localizados em Álvaro Wayne, Vila Velha, De Lourdes e Bom Jardim (PCD 01, 02, 06 e 09, respectivamente), foram os que registraram as maiores médias horárias no período diurno (entre 6h e 17h). O bairro Meireles (PCD 04) foi o que registrou os maiores registros de HI durante a noite e madrugada, devido ao já exposta diferença nos materiais construtivos e ao processo de verticalização consolidado verificado no bairro. Durante o dia, o sombreamento dos prédios proporciona um efeito positivo sobre as condições térmicas, uma vez que protege a superfície da incidência de radiação solar direta, no entanto, os processos de múltiplas refletâncias e prolongamento no armazenamento de calor produzido durante o dia, faz com que a temperatura do ar seja mais elevada durante essas faixas horárias.

Durante o período de maior insolação, entre 9h e 17h, os pontos localizados no bairro de Fátima e no Parque do Cocó, indicam condições mais amenas em relação ao valor de temperatura do ar e consequentemente de HI, chegando a quase a mais de 6°C de diferença entre o ponto mais fresco (Cocó) e o mais quente (Vila Velha), durante o período vespertino (entre 12h e 14h). Essa diferença está diretamente associada às características de uso e ocupação do solo nesses bairros.

As médias horárias do HI foram espacializadas (Figura 6) indicando as áreas da cidade com condições de conforto e desconforto térmico no território fortalezense.

Figura 6 - Espacialização das médias horárias do HI durante o mês de outubro de 2019.



Fonte: Os autores (2024).

Para melhor visualização das diferenças horárias foram atribuídas as mesmas classes de temperatura, com um intervalo de 0,5°C.

É notório, através da análise dos cartogramas, que a periferia do município de Fortaleza sofre com a intensidade do desconforto térmico, sendo os setores noroeste, oeste e sudoeste, os que apresentam e mantem os maiores valores de HI durante o dia. Essas áreas compreendem grande densidade populacional, e, conseqüentemente elevada densidade de edificações, contribuindo para condições térmicas desfavoráveis.

Essa mesma região é também onde vive, em maior porcentagem, uma população de menor poder aquisitivo e mais vulnerável às variações climáticas, o que pode levar a reflexões associadas à desigualdade socioambiental e à injustiça climática, como no trabalho de Paiva (2014).

Outro setor que apresentou condições de HI desfavoráveis foi o setor nordeste da cidade, no entorno no bairro de Lourdes, no entanto, com menor intensidade no período vespertino e maior intensidade durante o início da manhã, devido as características naturais já citadas do entorno do PCD 06.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cidade de Fortaleza, encontra-se em uma região de alta incidência de radiação solar, contribuindo para temperaturas elevadas durante todo o ano. As características heterogêneas de uso e ocupação da superfície urbana do município, contribuem para com que haja diferenças significativas na manifestação da temperatura do ar, contribuindo para a disparidade na sensação térmica dos cidadãos.

A cidade não possui um sistema eficiente de monitoramento das variáveis termo higrométricas, havendo poucos pontos fixos de medição dessas variáveis em seu território e sendo necessário, para trabalhos como o que aqui se expõe, a instalação de pontos temporários de medição. É necessário o investimento em soluções (aumento da rede de monitoramento e modelagem) para que o campo térmico seja compreendido em suas condições e manifestações reais.

Com os sensores instalados e coletando dados precisos, foi possível compreender o conforto térmico da cidade em um contexto de um período quente e seco. O Índice de Calor (HI), nos limiares da NWS, indica uma

situação de desconforto em todos os bairros avaliados, enquanto, na classificação que leva em consideração a aclimação dos habitantes, as condições de conforto foram significativamente mais elevadas.

Mesmo nos horários mais críticos nos dias em que o episódio de uma onda de calor foi verificado, as áreas com mais infraestruturas verdes conseguem amenizar as condições de desconforto térmico a nível local. Nesta conjuntura o Parque do Cocó compreende um importante instrumento urbanístico para o conforto térmico na cidade de Fortaleza, manifestando os menores valores de HI nos horários já definidos pela literatura como de maior intensidade de Ilha de Calor.

Esta pesquisa apresentou um arcabouço de informações sobre o campo térmico da cidade em um período crítico. É importante destacar a necessidade de abranger as análises para outros períodos o ano e pontos do município, levando em consideração mais tipos de tempo atmosféricos e mais condições de uso do solo.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-GHANY, A. M.; AL-HELAL, I. M.; SHADY, M. R. Human Thermal Comfort and Heat Stress in an Outdoor Urban Arid Environment: A Case Study. *Advances in Meteorology*, v. 2013, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/693541>
- ADEGUN, O. B.; AYOOLA, H. A. Between the rich and poor: exposure and adaptation to heat stress across two urban neighborhoods in Nigeria. *Environment, Development and Sustainability*, v. 24, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01924-w>
- ANDREASI, W. A. **Método de avaliação de conforto térmico em região de clima quente e úmido do Brasil**. Tese (doutorado) -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 204 p. 2009.
- ANNUNCIACÃO, L. **Instrumentação, modelagem e validação de procedimento a partir de gradientes de temperatura e umidade relativa**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2016.
- ARIFWIDODOA, S. D.; CHANDRASIRI, O. Urban heat stress and human health in Bangkok, Thailand. *Environmental Research*, v. 185, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109398>
- AWASTHI, A.; VISHWAKARMA, K.; PATTNAYAK, K. C. Retrospection of heatwave and heat index. *Theoretical and Applied Climatology* v. 147, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03854-z>

- BALANY, F., MUTTIL, N., MUTHUKUMARAN, S., WONG, M.S., NG, A.W. M. Studying the Effect of Blue-Green Infrastructure on Microclimate and Human Thermal Comfort in Melbourne's Central Business District. *Sustainability*, v. 14, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14159057>
- BARBIERI, G. M. L. **Eventos de chuva extrema associados a sistemas atmosféricos de escala sinótica e escala local no estado do Ceará**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Ceará, Fortaleza, 2014.
- BLAZEJCZYK, K.; EPSTEIN, Y.; JENDRITZKY, G.; STAIGER, H.; TINZ, B. Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, v. 56, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>
- CHANDLER, T. J. **The climate of London**. Hutchinson: London, 1965.
- CRAMER, M. N.; JAY, O. Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress. *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, v. 196, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autneu.2016.03.001>
- DE FREITAS, C. R.; GRIGORIEVA, E. A. A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *International Journal of Biometeorology*, v. 59, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0819-3>
- DELWORTH, T. L.; MAHLMAN, J. D.; KNUTSON, T. R. Changes in Heat Index associated with CO₂-induced Global Warming. *Climatic Change*, v. 43, 1999. <https://doi.org/10.1023/A:1005463917086>
- FANGER, P. O. **Thermal Comfort - Analysis and Applications in Environmental Engineering**. Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
- FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. da S. Principais Sistemas Atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, n. 1, 2005. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>
- GARTLAND, L. **Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo, Ed. Oficina de Textos, 2010. 248p.
- HUANG, C.; BARNETT, A. G.; WANG, X.; VANECKOVA, P.; FITZGERALD, G.; TONG, S. Projecting future heat-related mortality under climate change scenarios: a systematic review. *Environmental Health Perspectives*, v. 119, 2011. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1103456>
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2022: resultados preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 15 jan. 2024
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malhas territoriais. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 06 jan. 2024.
- IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Portal de Mapas e Dados do IPECE, Fortaleza, 2021. Disponível em: <http://mapas.ipece.ce.gov.br/i3geo/ogc/index.php>. Acesso em: 5 jan. 2024.
- KIRTSAENG, S.; KIRTSAENG, P. Analysis and simulation of heat index for developing a heat alert system over Thailand. 2015 Asian Conference on Defense Technology (ACDT), 2015. <https://doi.org/10.1109/acdt.2015.7111585>
- KUSCH, W.; FONG, H. Y.; JENDRITZKY, G.; JACOBSEN, I. **Guidelines on biometeorology and air quality forecasts**. PWS-10, WMO/TD 1184. Geneva: WMO, 2004.
- LANDSBERG, H. E. **The climate of towns. Man's Role in Changing the Face of the Earth**. W. L. Thomas, Ed., University of Chicago Press, 1956.
- LANDSBERG, H. E. **The Urban Climate**. Academic Press, New York, 1981.
- LIMA JÚNIOR, A. F. **Análise espaço-temporal da dengue em Fortaleza e sua relação com o clima urbano e variáveis socioambientais**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- LIMA JÚNIOR, A. F. **Clima Urbano: análise do campo térmico e sugestão de áreas prioritárias para implementação de medidas mitigadoras**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.
- MA, D., WANG, Y., ZHOU, D., ZHU, Z. Cooling effect of the pocket park in the built-up block of a city: a case study in Xi'an, China. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23809-9>
- MALLICK, F. H. Thermal comfort and building design in the tropical climates. *Energy and Building*, v. 23, 1996. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00940-X](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00940-X)
- MARTO, N. Heat waves: health impacts. *Acta Medica Portuguesa*, v. 18, n. 6, 2005. <https://doi.org/10.20344/amp.1063>
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Texto, 2007.
- MONTEIRO, C. A. de F. **Teoria e Clima Urbano**. São Paulo: IGEOG/Universidade de São Paulo, 181p. (Série Teses e Monografias, 25), 1976.
- MOREIRA, P. H. O.; COSTA, A. C. L. da; SILVA JÚNIOR, J. de A.; CUNHA, A. C. da. Variações sazonais do Índice de Temperatura Efetiva (ITE) E Índice de Calor (IC) com o uso do solo em Zona Urbana na Amazônia Oriental. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 24, n. 93, p. 01–17, 2023. <http://doi.org/10.14393/RCG249365649>
- MOURA, M. O. **O clima urbano sob o nível do conforto térmico**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

- MOURA, M. O.; ZANELLA, M. E.; SALES, M. C. L. Ilhas Térmicas na cidade de Fortaleza/CE. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 28, n. 2, p. 33-44, 2008. <https://doi.org/10.5216/bgg.v28i2.5718>
- MUSASHI, J. P.; PRAMOEDYO, H.; FITRIANI, R. Comparison of Inverse Distance Weighted and Natural Neighbor Interpolation Method at Air Temperature Data in Malang Region. **CAUCHY – Journal Matematika Murni Dan Aplikasi**, v. 5, n. 2, 2018. <https://doi.org/10.18860/ca.v5i2.4722>.
- NATIONAL WEATHER SERVICE. Heat Index. Amarillo, Texas: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), [s.d.]. Disponível em: <https://www.weather.gov/ama/heatindex>. Acesso em: 16 jan. 2024.
- NICE, K. A.; NAZARIAN, N.; LIPSON, M. J.; HART, M. A.; SENEVIRATNE, S.; THOMPSON, J.; NASERIKIA, M.; GODIC, B.; STEVENSON, M. Isolating the impacts of urban form and fabric from geography on urban heat and human thermal comfort, **Building and Environment**, v. 224, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109502>.
- NÓBREGA, R. S.; LEMOS, T. V. da S. O Microclima e o (Des)Conforto Térmico em ambientes abertos na cidade do Recife. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 28, n. 1, 2011.
- NOVAIS, J. W. Z.; BATISTA, D. S.; FERREIRA, R. L.; SOUZA, R. D.; FERNANDES, T.; MUSIS, C. R. Influence of Leaf Area Index on the Heat Index of a Tropic Urban Park. **Global Journal of Human-Social Science**, v. 21, 2021. <https://doi.org/10.34257/GJHSSVOL21IS3PG67>
- OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, v. 7, n. 8, 1973. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- PAIVA, F. I. B. **Vulnerabilidade Socioambiental em Fortaleza: uma perspectiva a partir do conforto térmico**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- PAIVA-GOMES, F. I. B.; ZANELLA, M. E. Análise sobre os índices de conforto térmico humano mais utilizados no semiárido brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 15., 2023, Brasília. **Anais...** Brasília: Associação Brasileira de Climatologia (ABCLIMA), 2023. v. 1, p. 1175.
- PERKINS-KIRKPATRICK, S. E.; LEWIS, S. C. Increasing trends in regional heatwaves. **Nature Communications**, v. 11, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7>
- PETALAS, K. V. **Estudo da sensação térmica e definição de limites de conforto para espaços abertos na cidade de Fortaleza, CE**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015. <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/11385>
- SANTAMOURIS, M.; PARAPONIARIS, K.; MIHALAKAKOU, G. Estimating the ecological footprint of the heat island effect over Athens, Greece. **Climatic Change**, v. 80, n. 3-4, p. 265-276, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9128-0>
- SANTOS, M. **A urbanização brasileira**. São Paulo: Hucitec, 1993.
- SHERWOOD, S. C.; HUBER, M. An adaptability limit to climate change due to heat stress. **PNAS**, v. 107, n. 21, 2010. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913352107>.
- STEADMAN, R. G. The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. **Journal of applied meteorology**, v. 18, n. 7, p. 861-873, 1979. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<0861:TAOSPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<0861:TAOSPI>2.0.CO;2)
- SUPARTA, W.; YATIM, A. N. M. An analysis of heat wave trends using heat index in East Malaysia. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 852, 2017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/852/1/012005>
- YOU, J.; HUBBARD, K. G.; GODDARD, S. Comparison of methods for spatially estimating station temperatures in a quality control system. **International Journal of Climatology**, v. 28, n. 6, 2008. <https://doi.org/10.1002/joc.1571>

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Antonio Ferreira Lima Júnior: conceitualização, análise de dados, pesquisa, metodologia e redação do manuscrito original.

Flávia Ingrid Bezerra Paiva Gomes: análise de dados, pesquisa, metodologia e redação do manuscrito original.

Maria Elisa Zanella: pesquisa, metodologia, supervisão e redação do manuscrito original.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.