SISTEMA PORTÁTIL PARA MONITORAMENTO DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS APLICADO AO CONFORTO TÉRMICO EM CÂNIONS URBANOS

Bianca Milani de Quadros (1); Walter Ihlenfeld (2); Eduardo Leite Krüger (3); Solange Maria Leder (4); Martin Gabriel Ordenes Mizgier (5)

(1) Arquiteta, Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, bianca.milani@posgrad.ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Conforto Ambiental, R. Eng. Agronômico Andrei Cristian Ferreira, 662 – Florianópolis/SC, (48)3721-9797.
(2) Engenheiro Civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, walterihlenfeld@alunos.utfpr.edu.br, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, R. Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000 - Curitiba/PR, (41) 3279-6800.
(3) PhD, Docente do Departamento de Engenharia Civil, ekruger@utfpr.edu.br, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, R. Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000 - Curitiba – PR, (41) 3279-6800.
(4) PhD, Docente do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, solange.leder@academico.ufpb.br, Universidade Federal da Paraíba, Campus I Lot. Cidade Universitária, João Pessoa/PB, (83) 3216-7200.
(5) Dr., Docente do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, martin.ordenes@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Conforto Ambiental, R. Eng. Agronômico Andrei Cristian Ferreira, 662 - Florianópolis/SC, (48) 3721-9797.

RESUMO

Novas aplicações práticas de índices térmicos, como o *Universal Thermal Climate Index* (UTCI), via instrumentação portátil de variáveis meteorológicas em espaços abertos podem vir a ser de fundamental interesse para a melhoria das condições climáticas presentes e futuras nas cidades. O presente estudo tem como objetivo analisar a influência da morfologia urbana sobre o conforto térmico em espaços abertos por meio da utilização de um sistema portátil de monitoramento ambiental de baixo custo. Para isso, foi realizado um estudo de caso em Curitiba, no qual foram avaliadas variáveis ambientais e o fator de visão do céu (FVC) de um recorte urbano de uma área adensada da cidade, bem como as condições de conforto térmico em espaços abertos. Os dados microclimáticos coletados foram utilizados para o cálculo do UTCI, sendo estabelecidas correlações entre morfologia urbana e a condição de conforto e estresse térmico. Os resultados encontrados apontam para uma correlação significativa entre os dados, com valores de R^2 de 0,82; 0,88 e 0,58 para às 9h, 15h e 21h em um dia de verão, respectivamente. O horário das 15hs, no qual foram registradas as mais altas temperaturas do ar, condiz com o período de maior correlação.

Palavras-chave: conforto térmico, espaços abertos, medições dinâmicas, morfologia urbana, PLEMS.

ABSTRACT

New applications of thermal index, such as the Universal Thermal Climate Index (UTCI), via portable instrumentation of meteorological variables in open spaces may prove to be of fundamental interest for the improvement of present and future climate conditions in cities. The present study aims to analyze the influence of urban morphology on thermal comfort in open spaces through the use of a low-cost portable environmental monitoring system. For this, a case study was carried out in Curitiba, in which environmental variables and the sky view factor (SVF) of an urban area in a densely populated area of the city were evaluated, as well as the thermal comfort conditions in spaces open. The collected microclimatic data were used to calculate the UTCI, inflicting correlations between urban morphology and the condition of comfort and thermal stress. The results found point to a significant correlation among the data, with R^2 values of 0.82; 0.88 and 0.58 for 9:00, 15:00 and 21:00 on a summer day, respectively. The time of 15:00, in which the highest air temperatures were recorded, is consistent with the period of greatest correlation.

Keywords: thermal comfort, open spaces, mobile measurements, urban morphology, PLEMS.

1. INTRODUÇÃO

As últimas projeções das Nações Unidas indicam que a população mundial deve chegar em 8,5 bilhões em 2030 e 9,7 bilhões em 2050. Prevê-se que a população da África subsaariana duplique até 2050 (99%). Outras regiões terão taxas variáveis de aumento até 2050: Oceania excluindo Austrália/Nova Zelândia (56%), Norte da África e Ásia Ocidental (46%), Austrália/Nova Zelândia (28%), Ásia Central e Meridional (25%), América Latina e Caribe (18%), Leste e Sudeste Asiático (3%) e Europa e América do Norte (2%). Na primeira década do século XXI, a população urbana superou a população rural e, estima-se que, até 2050 68% da população global estará concentrada nas áreas urbanas (UNITED NATIONS, 2019).

O aumento populacional e adensamento das cidades provoca transformações morfológicas e ambientais. Análises recentes mostram que uma alta proporção da população mundial mais afetada por eventos climáticos extremos está concentrada em centros urbanos. A urbanização altera os ambientes locais por meio de uma série de fenômenos físicos que podem resultar em tensões ambientais locais. Isso inclui ilhas de calor urbanas (temperaturas do ar e da superfície mais altas em áreas urbanas em comparação com as áreas rurais circundantes, especialmente à noite) e inundações locais que podem ser exacerbadas pelas mudanças climáticas (REVI et al., 2014).

Diversos estudos estão sendo realizados com o intuito de compreender a interação entre o processo de urbanização, o fenômeno das ilhas de calor urbano e a aceleração da mudança climática. Segundo Sangiorgio et al. (2020), o albedo urbano e a presença de vegetação representam os fatores de maior influência sobre a intensidade da ilha de calor urbano, seguidas pela densidade populacional, a largura das ruas, a orientação e a altura dos edifícios. Para Jamei et al. (2016), transformações nos aspectos físicos da cidade em relação ao acesso solar, orientação do vento e infraestrutura verde alteram a camada limite urbana que determina modificações microclimáticas como o aumento da temperatura do ar em centros urbanos.

No contexto do conforto térmico e espaços abertos, artigos de revisão identificaram a morfologia urbana (fator de forma, orientação da rua, fator de visão do céu) e a arborização urbana (arborização das ruas e parques urbanos) como duas estratégias promissoras para melhorar o conforto do pedestre (JAMEI et al., 2016). Outra estratégia bastante estudada é a utilização de materiais de alto albedo para pavimentação ou envoltória das edificações (TALEGHANI, 2018). Com relação à morfologia urbana, estudos anteriores sugerem que o indicador FVC (fator de visão do céu) influencia diversos indicadores ambientais. Embora tenha sido encontrada forte relação entre FVC e temperatura urbana em muitos casos, o grau de correlação varia conforme localização, estação do ano e horário. Um estudo de caso da relação entre FVC e conforto térmico em clima frio encontrou que formas urbanas compactas apresentam ambiente térmico mais confortável do que formas dispersas (UNGER, 2004). Por outro lado, um estudo em clima quente e úmido concluiu que um maior FVC contribui para o incremento da ventilação natural a nível dos pedestres e melhores condições térmicas no verão (YANG et al., 2013).

A heterogeneidade do tecido urbano, especialmente a morfologia urbana, influencia diretamente as condições térmicas do microclima local. Medições em campo na escala do microclima permitem coletar dados inerentes ao cálculo de índices complexos de biometeorologia para estudos de conforto térmico. Para superar as limitações apresentadas por técnicas de medições fixas, vários pesquisadores vêm utilizando técnicas de medições móveis com sensores instalados em mochilas, bicicletas e outros veículos móveis (KOUSIS et al., 2022). Novas aplicações práticas de sistema portátil para o levantamento de índices de conforto térmico em espaços abertos, como o *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) são de fundamental interesse para a melhoria das condições climáticas presentes e futuras nas cidades.

2. OBJETIVO

Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar a influência da morfologia urbana sobre o conforto térmico em espaços abertos por meio da aplicação prática de um sistema portátil de monitoramento ambiental de baixo custo - PLEMS (sigla em inglês para *Portable Low-cost Environmental Monitoring System*).

3. MÉTODO

Este artigo é baseado em um estudo de caso realizado na cidade de Curitiba-PR, empregando o PLEMS, o qual foi desenvolvido no âmbito de uma colaboração em pesquisa entre a Universidade Tecnológica Federal do Paraná e a Universidade Federal da Paraíba. Foram avaliadas variáveis ambientais e o Fator de Visão do Céu

(FVC) de um recorte urbano em uma área adensada da cidade, bem como as condições de conforto térmico obtidas durante rotas pré-definidas nesse recorte. O método deste artigo está dividido em três partes:

1. Calibração e aplicação do sistema portátil de monitoramento ambiental de baixo custo (PLEMS);
2. Caracterização da área de estudo para avaliação do conforto térmico por meio do índice *Universal Thermal Climate Index* (UTCI);
3. Correlação entre morfologia urbana e a condição de conforto térmico com a base de dados coletados.

3.1. Caracterização e calibração do PLEMS

A Figura 1 apresenta os detalhes construtivos do PLEMS. Os dados coletados pelos sensores são latitude, longitude, velocidade e número de satélites conectados (1); temperatura do ar e umidade do ar (2); temperatura de globo (3); velocidade do vento (4); pressão atmosférica (5); concentração de CO^2 (6); lux ambiente (7) e ruído ambiente (8). A visualização dos dados coletados pode ser feita em tempo real em uma tela LCD acoplada ao equipamento e, a cada ciclo de 90 segundos, os dados são armazenados em arquivo ".csv".

Sua base consiste de um quadro de distribuição onde foram fixadas duas hastes de PVC de 0,80 metros e de uma de 1 metro com abraçadeiras plásticas (i) no centro, de forma que o termômetro de globo não fique sombreado pelos demais. Para posicionar todos os sensores alinhados, utilizou-se dois espelhos de tomadas (ii). Para proteger o sensor de temperatura e umidade do ar, foi impresso em plástico PLA uma barreira radiante (iii) (acesso livre pelo Thingiverse) a qual foi envernizada, sendo inserido um filme de papel alumínio no último prato, conforme recomendações de Ham (2015). Como pessoas com diferentes alturas podem utilizar o equipamento, há uma viga (iv) ajustável. Nesta coleta de dados preliminar, a altura dos sensores foi ajustada para 1,90 metros em relação ao solo; e o globo em 2,10 metros. Por fim, entre as hastes de PVC colocou-se espuma "casca de ovo" (v). Utilizada como colchão hospitalar, a espuma serve para proteger as costas do usuário e prezar pela ergonomia do protótipo.

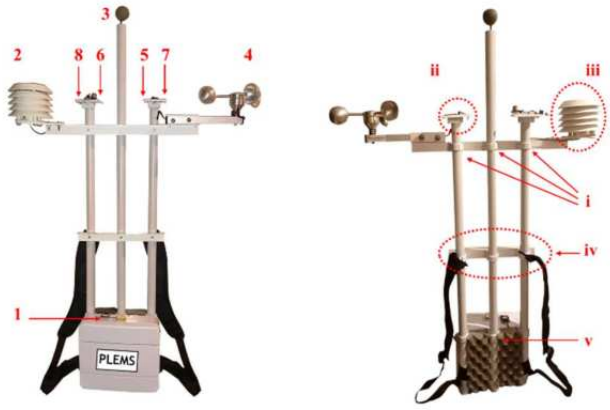

Figura 1 – Localização dos sensores e detalhes construtivos do PLEMS.

A calibração dos sensores foi realizada em uma câmara bioclimática no campus da URFPR com dois equipamentos: o confortímetro SENSU desenvolvido no LMPT/UFSC e um anemômetro de hélice Kestrel 3000. Os sensores foram posicionados a 1,80 metros de altura no centro da câmara e monitorados em condições térmicas controladas por um aparelho de ar-condicionado *split* 9.000 BTU (Philco Eletrônicos®), por três horas, durante as quais a temperatura de *setpoint* foi mantida em 16°C durante uma hora, e, após isso, o A/C foi desligado. Para a calibração, foram considerados dados de medições de minuto em minuto. Os resultados da estatística de regressão das variáveis térmicas (temperatura do ar, umidade do ar, temperatura de globo e ventilação) são apresentados pela Tabela 1. Para cada dado medido em campo, foi feita a correção do valor com base nas equações de regressão.

Tabela 1 – Sumário dos resultados de calibração

Variável	**R2**	**Valor-p**	**Teste de hipótese nula**	**Equação de regressão**
Temperatura do ar	0,9754	5,46E-09	Rejeitado, adota-se correção	Tcalib = 0,8850*T + 2,5695
Umidade do ar	0,9955	0,0005	Rejeitado, adota-se correção	Ucalib = 1,0441*U - 1,7459
Temperatura de globo	0,9982	5,43E-21	Rejeitado, adota-se correção	Gcalib = 0,9204*G + 1,563
Ventilação	0,9706	1,74E-05	Rejeitado, adota-se correção	Vcalib= 1,0485*V - 0,1451

3.1.1. Coleta dados meteorológicos

A medição em campo foi realizada nos dias 16, 17, 18 e 19 de março de 2023 às 9h, 15h e 21h. Quatros dados meteorológicos foram coletados com a utilização do PLEMS: temperatura do ar, temperatura do globo, velocidade do ar e umidade relativa do ar. Para o cálculo do índice de conforto térmico, utilizou-se o aplicativo *UTCI Calculation* (http://www.utci.org/utcineu/utcineu.php) desenvolvido pela Sociedade Internacional de Biometeorologia. Faz-se necessária a conversão dos valores da velocidade do vento a dez metros de altura para os dados de entrada do cálculo do índice térmico, sendo utilizado o fator de conversão proposto por Bröde et al. (2012), conforme Equação 1. A temperatura radiante média (Trmt) foi calculada em conformidade com a ISO 7726 (1998), considerando convecção forçada, pela Equação 2.

$$va = va_{xm} * \frac{log\left(\frac{10}{0{,}01}\right)}{log\left(\frac{x}{0{,}01}\right)} \quad \text{Equação 1}$$

$$T_{mrt} = \left[(t_g+273)^4 + \frac{1{,}1*10^8*va^{0{,}6}}{\varepsilon_g*D^{0{,}4}}*(t_g-t_a)\right]^{1/4} - 273 \quad \text{Equação 2}$$

Onde, va é a velocidade do vento a 10 metros de altura (m/s), va_{xm} é a velocidade do vento medida à x metros (m/s), T_{mrt}é a temperatura radiante média (°C), t_g é a temperatura de globo (°C), va é a velocidade do ar (m/s), ε_g é a emissividade do material do termômetro de globo (adimensional), D é o diâmetro do termômetro de globo (m) e t_a é a temperatura do ar (°C).

3.1.2. Coleta do fator de visão do céu

Para a coleta dos dados de morfologia urbana, expressos como o FVC, o qual é determinado pela distinção entre a área coberta por obstáculos e a área visível de céu, utilizaram-se fotografias hemisféricas. O equipamento utilizado para as fotografias hemisféricas foi uma câmera modelo Nikon D3100 com lente *fish-eye* Sigma 8mm (com ângulo de visão total de 180° em todas as direções), apoiada em um tripé a uma altura de 1,20 metros do solo.

O registro foi feito evitando a presença de pessoas e distorções de angulação da lente que deve estar nivelada e com orientação do topo da câmera para o Norte verdadeiro. O valor estimado de declinação magnética, ou seja, o ângulo da diferença entre o Norte verdadeiro e o Norte magnético foi calculado utilizando a calculadora online do NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration* (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml). Como resultado, obteve-se para o dia da coleta do dado uma declinação de 20°10'W ± 0°25' modificando 0°7'W por ano. O cálculo considera a latitude e longitude da cidade de Curitiba, a data da medição e se baseia no *World Magnetic Model* (WMM). Para a correção do Norte verdadeiro, uma bússola foi acoplada a tampa da lente e, em cada ponto de medição, foi feito o ajuste da declinação magnética para que a câmera estivesse orientada ao norte verdadeiro.

As fotografias hemisféricas foram tratadas e analisadas pelo software *RayManPro Version 3.1 Beta©,* desenvolvido pelo Centro de Pesquisa de Biometeorologia Humana sob supervisão do professor Prof. Dr. Andreas Matzarakis. Primeiramente, os dados de localização geográfica foram configurados no modelo na aba principal do programa. Na aba *Input - Sky view factor* foi inserido o arquivo da foto hemisférica. Nesta mesma aba foi feita o tratamento da imagem com exclusão do céu e criada a máscara de sombreamento dos elementos construídos e naturais que compõem a imagem. A ferramenta *cut-off* é responsável por excluir o céu tornando aparente a carta solar no trecho visível da abóboda celeste. Posteriormente, no comando *draw* foi criada a imagem preto e branco condizente com a máscara de sombreamento que será analisada pelo programa para o cálculo do FVC.

3.2. Caracterização da área de estudo para avaliação do conforto térmico

O desenvolvimento urbano de uma cidade está intrinsecamente relacionado a mudanças na sua estrutura morfológica, especialmente com o surgimento de cânions urbanos nas áreas centrais. Em Curitiba, o sistema viário e transporte público nortearam este desenvolvimento. Como resultado, observam-se corredores com edifícios altos e razão H/W, por vezes, superior a dois nos eixos estruturais da cidade.

Curitiba está localizada na latitude 25º25'48" Sul e longitude 49º16'15" Oeste e a uma altitude de 920 metros acima do nível do mar. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger a cidade de Curitiba está situada na zona *Cfb (Temperate oceanic climate)*, caracterizada pelo clima temperado com verões amenos.

Enquanto no mês mais frio (julho) a temperatura média é de 12°C, no mês mais quente (fevereiro) a média é de 23°C. As temperaturas mínima e máxima absolutas registradas nestes meses são de -2°C e de 32°C. Ao longo de todo ano, o vento leste apresenta maior frequência de ocorrência.

A área de estudo foi selecionada em função da heterogeneidade quanto a fatores morfológicos e arborização dos cânions urbanos e levando em conta aspectos de segurança para a realização das medições de campo. Assim, o recorte feito a partir do eixo estrutural da Rua Padre Anchieta, no bairro Bigorrilho, contempla uma diversidade morfológica de cânions urbanos (rasos, médios e profundos), orientações solares distintas (vias norte-sul e leste-oeste), arborizadas e não arborizadas (Figura 2).

Para fins de caracterização, o recorte foi subdividido em seis rotas formadas cada qual por duas quadras, as quais são analisadas e denominadas de acordo com sua morfologia e orientação solar e condição de arborização. Sendo assim, temos três rotas norte-sul (RNS) e três rotas leste-oeste (RLO): RNS1, RNS2, RNS3, RLO1, RLO2 e RLO3. As rotas apresentam aproximadamente 250 metros de distância cada, resultando em um percurso total de 1,5 km percorrido em uma hora. Portanto, há uma diferença média de cinco minutos entre cada ponto medido.



Rotas:

RNS1: Rua Gastão Câmara

RNS2: Rua Dona Alice Tibiriçá

RNS3: Rua Cel. Joaquim Ignácio Taborda Ribas

RLO1: Rua Padre Agostinho

RLO2: Rua Padre Anchieta

RLO3: Rua Martin Afonso

Figura 2 – Imagem aérea do recorte urbano e rotas de análise. Fonte: Adaptado de GoogleMaps (2023)

3.3. Correlação entre morfologia urbana e conforto térmico com base nos dados coletados

Tendo como base os dados microclimáticos coletados e o fator de visão do céu levantado *in loco*, deu-se a análise da influência da morfologia urbana sobre as condições de conforto térmico em espaços abertos. Desse modo, os dados de entrada foram agrupados com os valores devidamente calibrados da Ta(°C), UR(%), v(m/s) e Trm(°C) de cada ponto medido na área de estudo. Posteriormente, obtiveram-se os valores de saída do UTCI classificados em função da Tabela 1, sendo a zona de ausência de estresse térmico localizada entre os limites de 9°C e 26°C.

Tabela 1 – Faixas de estresse térmico do UTCI.

UTCI (°C)	**Categoria de estresse térmico**
<40	Extremo estresse por frio
-27 a -40	Muito forte estresse por frio
-13 a -27	Forte estresse por frio
0 a -13	Moderado estresse por frio
+9 a 0	Leve estresse por frio
+9 a +26	Sem estresse térmico
+26 a +32	Moderado estresse por calor
+32 a +38	Forte estresse por calor
+38 a +46	Muito forte estresse por calor
>46	Extremo estresse por calor

Para caracterização inicial do comportamento térmico dos cânions urbanos, foram gerados gráficos comparativos das variáveis microclimáticas e UTCI calculado para os quatro dias de coleta. Esta análise permite a identificação de padrões de comportamento entre os pontos medidos e a seleção do dia representativo para a análise da influência da morfologia urbana no ambiente térmico. Além disto, foram feitas análises comparativas entre os dados medidos pelo PLEMS nas medições dinâmicas e uma estação de referência estacionária localizada no parque meteorológico do Campus da Universidade Federal do Paraná, a 7km de distância de área de estudo.

Por fim, para o dia selecionado foram estabelecidas regressões do índice térmico UTCI para FVC. A partir dos gráficos, foi possível analisar o grau de correlação entre os indicadores estudados.

4. RESULTADOS

4.1. Comportamento térmico de cânions urbanos

Para a seleção do dia representativo para análise da influência da morfologia urbana no comportamento térmico de cânions no verão, foi feita uma análise comparativa entre os dias de coleta de dados durante a noite. A Figura 3 apresenta os gráficos da temperatura do ar, temperatura de globo, temperatura radiante média e índice de conforto térmico UTCI.

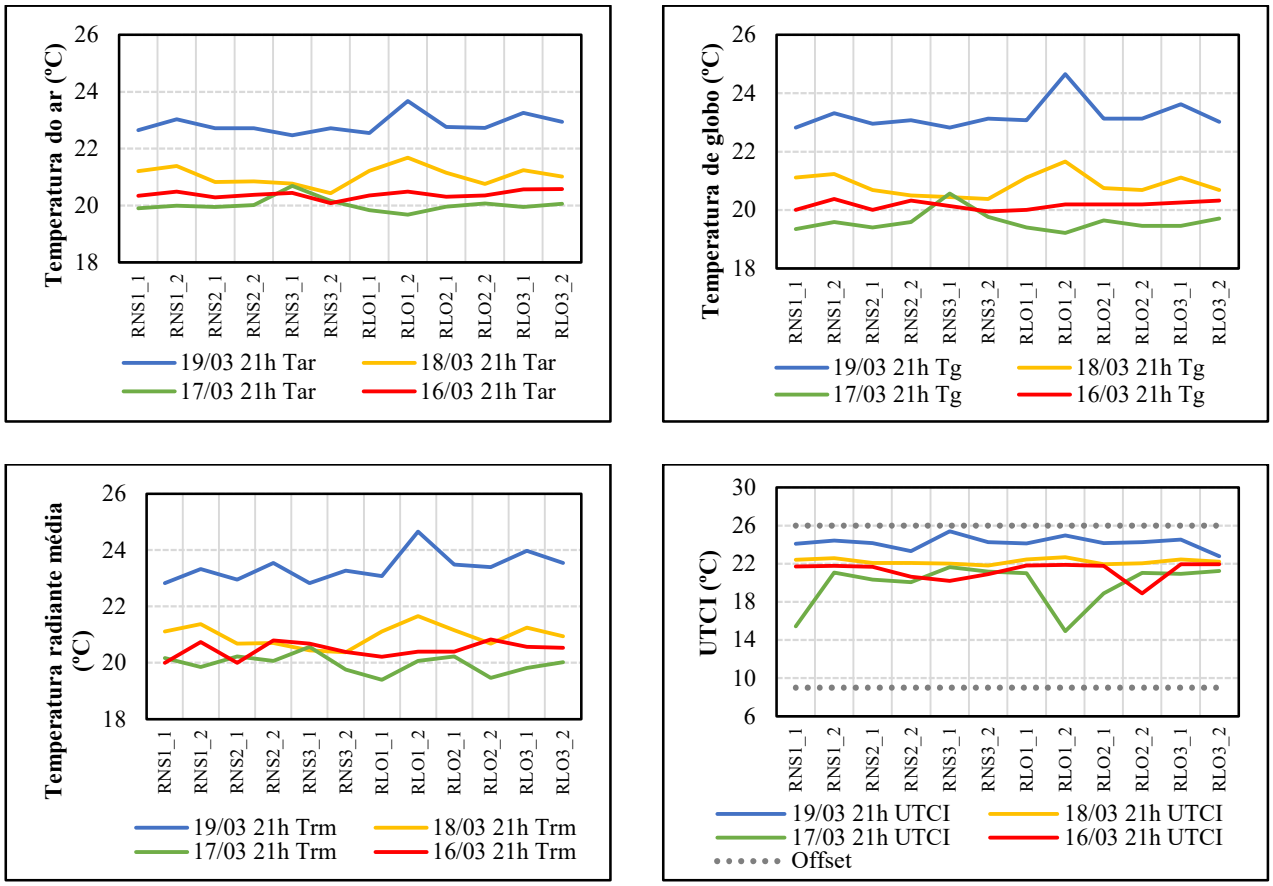

Figura 3 – Gráficos comparativos da temperatura do ar, temperatura de globo, temperatura radiante média e UTCI nos dias 16, 17, 18, e 19/03 às 21hs.

Os valores mínimo, médio e máximo para temperatura do ar ao longo dos dias foram 19,7; 20,6 e 23,7ºC, respectivamente. Para temperatura de globo foram 19,2; 20,4 e 24,7ºC, respectivamente. E para temperatura radiante média 19,4, 20,7 e 24,7ºC. Observa-se comportamentos semelhantes entre os dias 18 e 19/03, com tendências similares de mudanças nos valores de cada ponto de medição. Este resultado ocorre pela condição do céu ao longo destes dias. Enquanto os dias 16/03 e, principalmente o dia 17/03 apresentavam condições de céu parcialmente nublado, os dias 18 e 19/03 foram dias de céu claro. Além disso, ao longo dos três períodos de medições, registrou-se baixa disponibilidade de ventilação, o que leva a trocas térmicas

sobretudo por radiação. Nestas condições, a influência da morfologia urbana de cada ponto de medição é mais representativa uma vez que o balanço térmico se dá entre a condição na superfície e a abóbada desobstruída.

Com relação ao índice de conforto térmico UTCI, observa-se que o dia 19/03 resultou em condições térmicas mais próximas ao limite superior da faixa de conforto (26,0ºC), ou seja, mesmo durante a noite e sem a presença do sol, as condições de conforto térmico nas ruas medidas se aproximam do estresse térmico por calor. A partir destas comparações do comportamento das variáveis microclimáticas e o índice de conforto térmico, o dia 19/03 foi selecionado para as análises de influência de morfologia no comportamento térmico de cânions urbanos.

4.1.1. FVC na área de estudo

Os resultados dos valores de FVC na área de estudo variam de 0,03 a 0,65 com uma média de 0,26 (Figura 4). As fotos hemisféricas ilustram a obstrução do céu em cada ponto, sendo destacados em vermelho os pontos sem arborização (RNS1_1, RNS1_2, RNS2_1, RNS3_1 e RLO3_2).

Os pontos RNS3_2 e RLO2_2 representam locais de maior adensamento urbano, com um FVC médio de 0,08. Em contraste, os locais com baixo adensamento ocorrem nos pontos RLO3_1, RLO1_1 e RLO1_2. Estes dois últimos compreendem pontos em local de baixo adensamento, porém são sombreados por árvores densas, motivo pelo qual possuem baixo valor do FVC.

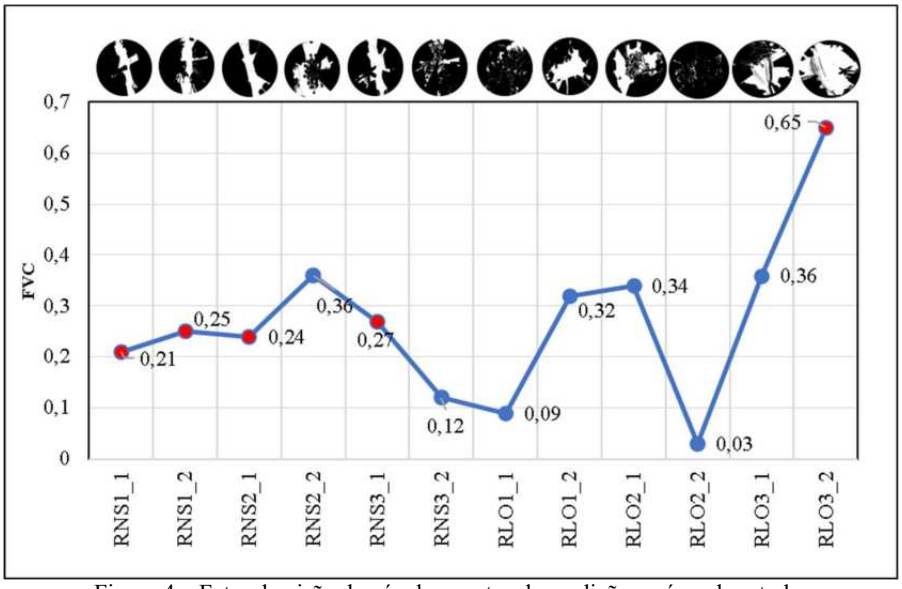

Figura 4 – Fator de visão do céu dos pontos de medição na área de estudo.

4.1.2. Comparação entre PLEMS e estação meteorológica de referência

Para identificar as alterações microclimáticas nos cânions urbanos, foram feitas análises comparativas entre os dados medidos pelo PLEMS e uma estação de referência da rede de estações meteorológicas automáticas do INMET, localizada no Campus da Universidade Federal do Paraná, a 7km de distância de área de estudo.

A Figura 3 evidencia as diferenças entre a temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento medida em cada ponto e o valor registrado pela estação de referência às 15hs, horário mais crítico do dia. A temperatura do ar média medida ao longo das rotas e registrada pela estação de referência foi de 26,6 e 28ºC, respectivamente, representando uma redução percentual de 5% na temperatura do ar dentro dos cânions urbanos. Outro estudo na cidade de Curitiba desenvolveu simulações computacionais com o *software ENVI-met* e também encontrou temperaturas mais altas no período diurno em locais com menor obstrução do céu (KRÜGER et al., 2011), como é o caso da estação de referência localizada em um campus universitário. A temperatura do ar tem relação direta com a quantidade de radiação solar recebida em um determinado local, o que demonstra a importância do desenho urbano para obtenção de condições de conforto térmico humano.

Para a umidade relativa do ar, os valores médios medidos pelo PLEMS e o valor registrado pela estação de referência foram de 39,8 e 35%, respectivamente. A umidade relativa apresentou aumento percentual de 12% na média. Observa-se que o comportamento da curva da umidade relativa é inverso ao da umidade

relativa, ou seja, pontos medidos com temperatura mais altas resultam em umidade relativas mais baixas e vice-versa.

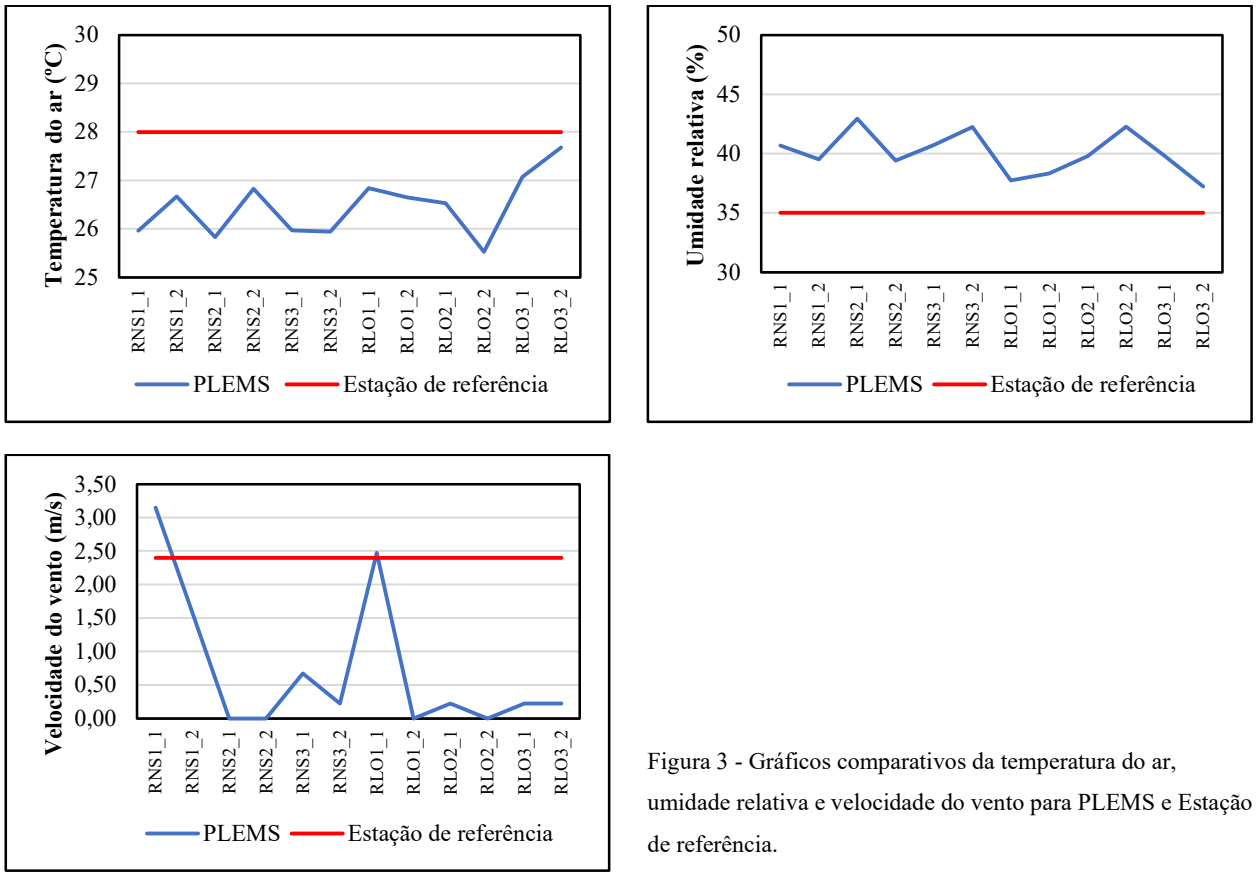

Figura 3 - Gráficos comparativos da temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento para PLEMS e Estação de referência.

A velocidade do vento apresentou a maior diferença percentual (-91%) em relação à estação de referência com valores de 0,2 e 2,4m/s para a média do PLEMS e estação de referência, respectivamente. Um estudo de caso também encontrou influências significativas da morfologia urbana sobre a ventilação na escala microclimática. A pesquisa comparou o efeito de três variáveis (fator de visão do céu, fator de visão da árvore e taxa de parcela verde) e encontrou maior impacto do FVC sobre a velocidade do vento, sugerindo que um aumento de 10% no FVC poderia aumentar em 7 a 8% a velocidade do vento (YANG et al., 2013). O FVC tem o potencial de indicar o grau de fechamento ou abertura do ambiente urbano ao fluxo de ar pela ação dos ventos e pela diferença de temperatura.

Observa-se a ocorrência de um ponto (RLO3_2) com valores de temperatura do ar e umidade relativa próximos aos da estação de referência. Este ponto está localizado na Av. Martin Afonso e tende a se aproximar da condição de exposição da estação de referência por ser o ponto de maior fator de visão do céu (FVC=0,65) na área de estudo.

4.1.3. Regressão do índice térmico UTCI para FVC

A partir dos dados de morfologia urbana e dados microclimáticos medidos em campo, foi estabelecida a correlação entre o FVC e índice de conforto térmico UTCI na área de estudo (Figura 5). Para minimizar a influência da vegetação urbana, a correlação compreende apenas os pontos localizados em cânions sem arborização. Os resultados encontrados apontam para uma correlação significativa com valores de R^2 de 0,82; 0,88 e 0,58 para às 9h, 15h e 21h, respectivamente. Observa-se que o maior efeito do FVC sobre o UTCI ocorre às 15h, horário mais crítico em termos de desconforto por calor.

Estudos anteriores também identificaram um efeito significativo do FVC sobre índices de conforto térmico em espaços abertos com efeito positivo do FVC sobre o índice de conforto externo PET - *Physiologically Equivalent Temperature* (HÖPPE, 1999) - no verão e inverno (CHIANG et al., 2023). Estes resultados demonstram que valores elevados de FVC consistentemente elevam os valores dos índices PET ou UTCI e a possibilidade de desconforto por calor para o período de verão. Outros estudos sugerem que o FVC não é crucial para a determinação das condições de conforto térmico devido à diversidade de outras variáveis climáticas e aspectos urbanos que afetam o microclima local (JAMEI et al., 2016).

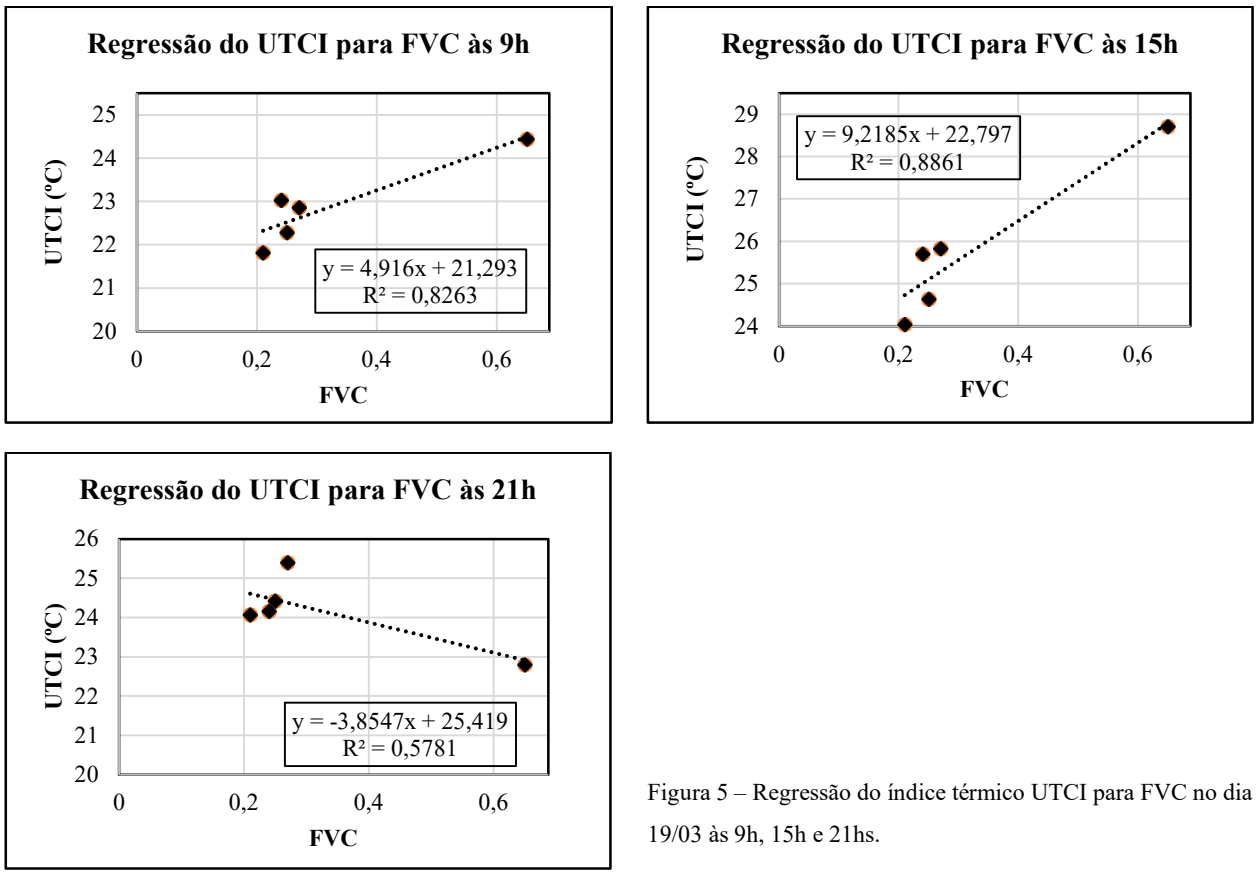

Figura 5 – Regressão do índice térmico UTCI para FVC no dia 19/03 às 9h, 15h e 21hs.

5. CONCLUSÕES

Este artigo se propôs a analisar a influência da morfologia urbana sobre o conforto térmico em espaços abertos por meio da aplicação prática de um sistema portátil de monitoramento ambiental de baixo custo - PLEMS *(sigla em inglês para Portable Low-cost Environmental Monitoring System*). As principais contribuições dessa pesquisa estão em aplicar instrumentação meteorológica portátil como alternativa aos métodos convencionais de medição fixos, identificar as alterações climáticas em cânions urbanos e analisar a condição de conforto térmico nos espaços abertos.

Os resultados encontrados apontam para uma correlação significativa com valores de R^2 de 0,82; 0,88 e 0,58 para às 9h, 15h e 21h, respectivamente. O horário das 15hs, no qual foram registradas as mais altas temperaturas do ar, condiz com o período de maior correlação. Como conclusão, observa-se uma tendência de maior influência do FVC sobre índices de conforto térmico UTCI durante o dia.

Outro resultado importante é a condição de céu claro para estudos de clima e estratégias de planejamento urbano. As análises dos dados microclimáticos nos quatro dias de coleta confirmam comportamentos discrepantes dos dias de céu nublado e comportamentos semelhantes em dias de céu claro. Assim, condições de céu claro devem ser consideradas por apresentar maior sensibilidade das alterações microclimáticas dependentes da morfologia urbana.

Foram demonstradas alterações microclimáticas importantes nos valores médios de temperatura do ar (-5%), umidade relativa (+12%) e, principalmente velocidade do vento (-91%). Por outro lado, o ponto com maior FVC tende a apresentar condições semelhantes a estação meteorológica de referência. Portanto, a

morfologia urbana tem relação direta com a quantidade de radiação solar e fluxo de vento o que demonstra a importância do desenho urbano nas condições de conforto térmico humano.

Apesar de válido como análise inicial, o método é simplificado e pode ser melhorado em estudos futuros. Um dos tópicos que merece atenção é o uso da vegetação como estratégia de mitigação de calor urbano. As análises evidenciaram que a consideração dos pontos arborizados diminui a correlação entre o FVC e UTCI, uma vez que a obstrução do céu ocorre não apenas pela presença das edificações como também pela copa das árvores, resultando em condições microclimáticas distintas. As variáveis inerentes à condição da arborização dos cânions urbanos podem ser testadas em estudos futuros para a elaboração de análises mais complexas e coerentes com a atual necessidade de estratégias de mitigação do calor urbano. Outro avanço do método deve ser a aplicação de um fator de correção temporal sobre os dados coletados pela medição dinâmica, haja vista que há uma diferença média de cinco minutos entre cada ponto medido, o que acarreta alterações nas condições climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRÖDE, P.; FIALA, D.; BŁAŻEJCZYK, K.; HOLMER, I.; JENDRITZKY, G.; KAMPMMANN, B.; TINZ, B.; HAVENITH, G. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). **International Journal of Biometeorology**, v. 56, n. 3, p. 481-494, 2012.

BROWN, R. D. **Design with microclimate: the secret to comfortable outdoor space**. Island Press, 2010.

CHIANG, Y.-C., LIU, H.-H., LI, D., & HO, L.-C. Quantification through deep learning of sky view factor and greenery on urban streets during hot and cool seasons. **Landscape and Urban Planning**, 232, 104679, 2023.

GIVONI, B. **Urban design for hot humid regions.** Renewable Energy, 5(5–8), 1047–1053, 1994.

HAM, J. **Radiation Shield For Weather Station Temperature/Humidity.** [S. l.], 2015. Disponível em: https://www.thingiverse.com/thing:1067700. Acesso em: 12 mar. 2023.

HÖPPE, Peter. The physiological equivalent temperature–a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment**. International journal of Biometeorology**, v. 43, p. 71-75, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7726**. Ergonomics of the thermal environments – Instruments for measuring physical quantities. Genève: ISO, 1998.

JAMEI, E., RAJAGOPALAN, P., SEYEDMAHMOUDIAN, M., & JAMEI, Y. Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 54, 1002–1017, 2016.

KOUSIS, I., MANNI, M., & PISELLO, A. L. Environmental mobile monitoring of urban microclimates: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 169, 112847, 2022.

KRÜGER, E. L., MINELLA, F. O., & RASIA, F.. Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. **Building and Environment**, 46(3), 621–634, 2011.

REVI, A., SATTERTHWAITE, D. E., ARAGÓN-DURAND, F., CORFEE-MORLOT USA, J., KIUNSI, R. B., DA SILVA, J., DODMAN, D., MASKREY, A., PAHWA GAJJAR, S., BALBUS, J., CARDONA, O.-D., SVERDLIK, A., BARROS, V., DOKKEN, D., MACH, K., BILIR, T., CHATTERJEE, M., EBI, K., ESTRADA, Y., … MACCRACKEN, S. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** In Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, 2014.

TALEGHANI, M. Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 81, pp. 2011–2018, 2018.

UNGER, J. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. **Climate Research**, 27(3), 253–264, 2004.

UNITED NATIONS, D. OF E. AND S. A. (2019). **World Population Prospects 2019**. https://population.un.org/wpp/

YANG, F., QIAN, F., & LAU, S. S. Y. Urban form and density as indicators for summertime outdoor ventilation potential: A case study on high-rise housing in Shanghai. **Building and Environment**, 70, 122–137, 2013.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e o CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Edital Universal) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.