FATORES DETERMINANTES NA FORMAÇÃO DOS MICROCLIMAS URBANOS EM FUNÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO: ANÁLISE MULTIVARIADA

Ângela Maria Arruda (1); Luiz Fernando Kowalski (2); António Lopes (3); Érico Masiero (4)
(1) Doutoranda, Engenheira Civil, angelaarrudassp@gmail.com, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís Km 235, São Carlos - SP, CEP: 13571, +351 920 328 844
(2) Doutorando, Engenheiro Civil, luizfernando.lfk@gmail.com, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís Km 235, São Carlos - SP, CEP: 13571, +55 (19) 98147-6005
(3) Doutor, Professor do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, IGOT e Laboratório Associado Terra, antonio.lopes@campus.ul.pt, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal
(4) Doutor, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, erico@ufscar.br, Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luís Km 235, São Carlos - SP, CEP: 13571, +55 (16) 3351-8263

RESUMO
O uso e ocupação do solo, associado à escolha de materiais de edificações provoca diferentes níveis de acúmulo de calor no tecido urbano. Entretanto, pouco se sabe sobre a magnitude que cada variável possui sobre a formação do microclima urbano. Sendo assim, o objetivo deste estudo é analisar quais as variáveis microclimáticas possuem maior contribuição no campo térmico de áreas industriais e residenciais em um contexto de clima tropical. Para isso, foi simulada a interação microclimática entre os elementos do tecido urbano em uma área residencial e industrial de Uberlândia-MG, com apoio do software ENVI-met. Por fim, os dados de saída foram agrupados utilizando o método de Clusterização e sintetizados através da Análise Fatorial por Componentes Principais (PCA). Portanto, os resultados apontaram que para ambas as áreas, a Umidade Relativa, Absoluta e Temperatura do Ar são determinantes na formação do microclima. Entretanto, em áreas residenciais (LCZ3) o Fator de Visão do Céu apresentou um peso mais elevado na variância dos componentes principais. E em áreas industriais (LCZ8) a velocidade do vento descreveu um importante percentual na variância das duas dimensões principais. Desta forma, nota-se que no contexto tropical, as variáveis apresentaram diferentes pesos na formação do campo térmico em função da diferença do uso e ocupação do solo das cidades, o que nos leva a reflexão sobre a adequação de políticas públicas e bases normativas.

Palavras-chave: Uso e Ocupação do Solo, Microclima Urbano, Simulação Computacional, Análise Multivariada.

ABSTRACT
Different levels of heat gain in the urban tissue are caused by the land use and occupation along with the choice of building materials. Unfortunately, little is known about the impact that each factor has on how the urban microclimate develops. The goal of this study is to determine which microclimatic factors in a tropical environment contribute most to the thermal field of industrial and residential regions. Through ENVI-met software, it was simulated the microclimatic interaction between the components of the urban tissue in a residential and industrial region. The outputs were then combined using the Principal Component Factor Analysis (PCA) and Clustering methods. Finally, the results showed that the Relative Humidity, Absolute Humidity, and Air Temperature are determinants in the formation of the microclimate in both areas. However, in residential areas (LCZ3), the Sky Vision Factor had a higher weight in the variance of the main components. In industrial zones (LCZ8), wind speed explained a significant percentage of the variance in the two main dimensions. Thus, in the tropical context, the variables presented different weights in the formation of the thermal field due to differences in the land use and occupation of the cities, prompting us to consider the adequacy of public policies and normative bases.

Keywords: Land use and occupation, Urban Microclimate, Computer Simulation, Multivariate Analysis.

1. INTRODUÇÃO

O uso e ocupação do solo tem sido um dos fatores determinantes na formação do microclima das cidades. Áreas industriais e residenciais representam a maior fração de áreas antropizadas de boa parte das cidades e por meio da expansão da infraestrutura, da escolha de materiais e das políticas de ordenamento territorial, há importantes mudanças e potenciais desafios de atenuação das condições extremas nesses recortes.

Nesse contexto, projetos urbanos climaticamente responsivos podem melhorar as condições de uso de espaços abertos. Segundo Nikolopoulou (2004), projetos focados na adequação bioclimática, consideram a integração entre espaço, clima e pessoas, combinando elementos espaciais, com o intuito de atenuar os efeitos negativos do clima, proporcionando condições mais favoráveis de uso.

Battista et al. (2023) elaboraram um modelo numérico calibrado utilizando o ENVI e vários tipos de cenários de mitigação a fim de analisar a redução do aquecimento de áreas e os impactos das medidas mitigatórias na diminuição da temperatura do ar.

Segundo Shishegar (2013), há quatro categorias principais de elementos espaciais comumente utilizados para atingir esses objetivos: Vegetação, Dispositivos de Sombreamento, Materiais e Água. Além disso, esses elementos devem ser associados à Relação Altura-Largura (High-Width) do cânion urbano, ou seja, a relação H/W. Esses parâmetros são importantes no entendimento sobre a relevância desses elementos em cada região específica.

A Local Climate Zones (LCZ) é uma estrutura particular de classificação do uso da terra para descrever a composição e cobertura de superfícies urbanas com consistência e comparabilidade entre cidades, apoiando aplicações em estudos de ondas de calor urbanas, urbanização sustentável e balanço energético urbano (Stewart, Oke, 2012). Associada a ela, Bechtel et al. (2015) a ferramenta disponível no portal web do projeto World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) auxilia no processo de classificação dos recortes urbanos.

No contexto brasileiro, o projeto de zoneamento climático fornece ferramentas para identificar áreas no território com condições semelhantes, onde o mesmo conjunto de ferramentas políticas e metas pode ser aplicado. Um zoneamento climático adequado é essencial para a implementação de uma política de conservação de energia e certificação bem-sucedidas no ambiente construído (WALSH, CÓSTOLA, LABAKI, 2023).

Porém, justamente neste contexto, ainda há dificuldade no entendimento do nível de interação de cada variável microclimática com os elementos que compõem o tecido urbano. Desta maneira, a pergunta que motiva esse estudo é: Quais são as variáveis com maior peso na formação do microclima em recortes com diferentes usos e ocupação, como as áreas residenciais e industriais no clima tropical.

Para isso, Santos e Souza (2018) propuseram a utilização de técnicas de análise multivariada, análise fatorial e análise de agrupamentos para sintetizar informações, e facilitar o entendimento da variabilidade temporal das variáveis climáticas. E Silva et al. (2017) ao estudar o Estado de Sergipe notaram que das dez variáveis climáticas analisadas, apenas três (umidade relativa do ar, temperatura do ar máxima e velocidade máxima do vento) obtiveram um percentual de explicação de 75,15% do clima local, ou seja, por meio dessas técnicas exploratórias (FÁVERO e BELFIORE, 2017) é possível identificar quais as variáveis com maior influência em cada recorte urbano.

Em Uberlândia, são poucos os estudos que abordam a influência do uso do solo na formação de UHI, destacando-se os estudos de Silva et al. (2018) e Vieira e Machado (2019) que encontram uma intensidade máxima em torno de 2.0 ºC para o inverno e 1.2ºC no verão, através de transecto móvel e sensoriamento remoto. Os locais com maior intensidade foram os bairros periféricos, com muitos lotes vagos, solo exposto e vegetação escassa.

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste artigo é analisar quais as variáveis microclimáticas possuem maior contribuição no campo térmico de áreas industriais e residenciais em clima tropical.

3. MÉTODO

Esta pesquisa se trata de um estudo de caso com apoio de simulação computacional e está dividido em três etapas principais:

a) Caracterização da área de estudo
b) Simulação computacional das condições microclimáticas dos recortes amostrais urbanos

c) Análise Multivariada
d) Contextualização das variáveis mais relevantes de acordo com a análise multivariada

Os procedimentos experimentais estão apresentados na Figura 1.

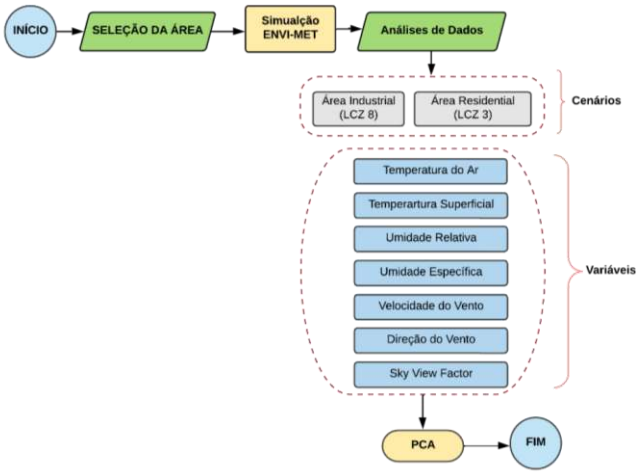


Figura 1 – Fluxograma da pesquisa

3.1. Caracterização da área de estudo

A cidade de Uberlândia, Brasil, está localizada no interior do estado de Minas Gerais, 18° 55' 08" S, 48° 16' 37" O (Figura 1), com população estimada de 706 597 habitantes (IBGE, 2020) e área total de 4 115,206 km². É um importante centro regional industrial, logístico e sua economia baseada em atividades industriais e de serviços. O clima é tropical com estação seca (Aw) na classificação de Köppen-Geiger, altitude de 863 m, IDH de 0,789 segundo (IBGE 2020).

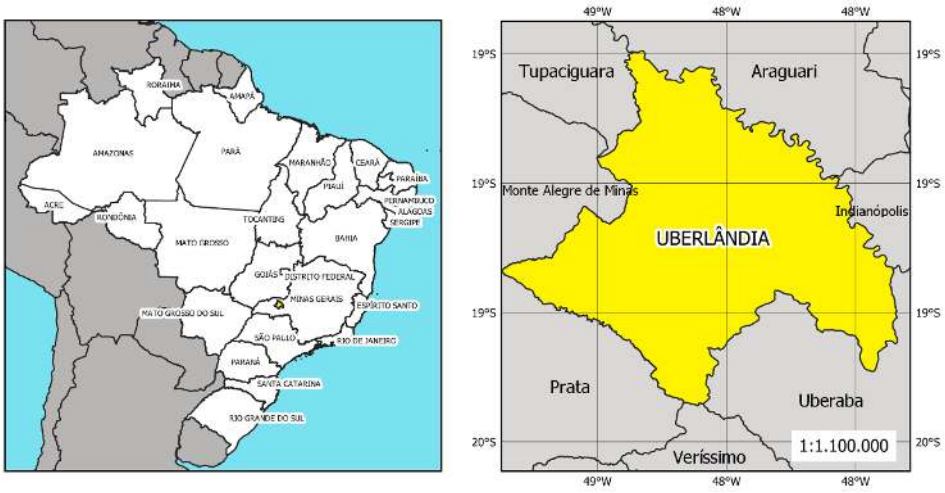


Figura 1 – Localização da cidade de Uberlândia/MG.

Na Figura 2 são apresentados os recortes estudados.



(a)

(b) (c)

Figura 2 – (a) Localização dos recortes, (b) industrial; (c) residencial (GOOGLE EARTH, 2023).

Os recortes da área de estudo representam duas Zonas Climáticas Locais (LCZ), classificadas como LCZ3, para a área residencial (AR) e LCZ8 referente à área industrial (AI), embasadas no método proposto por Stewart e Oke (2012) e Demuzere et al. (2022) apresentado na Figura 3.

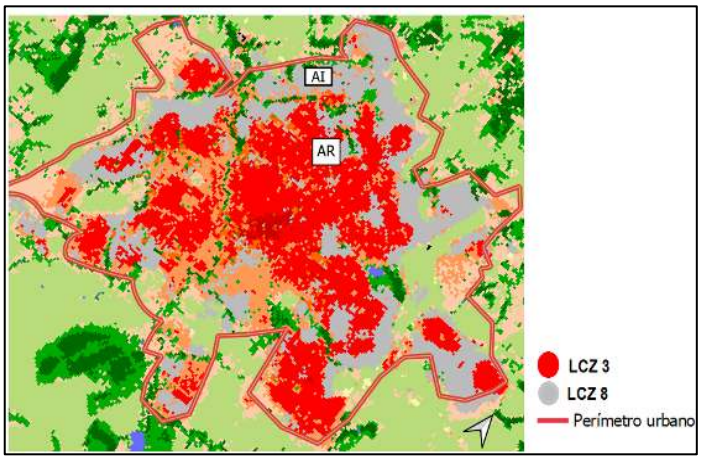


Figura 3 – Classificação LCZ de Uberlândia - MG (Adaptado pelos autores de DEMUZERE et al., 2022).

Na Figura 4, tem-se a porcentagem da composição física dos recortes estudados apresentados na Figura 3: o recorte industrial apresenta o dobro de superfície pavimentada se comparado ao recorte residencial, enquanto este último apresenta o percentual de 72% maior de telhado. A utilização de telhas cerâmicas é predominante para o recorte residencial, enquanto o recorte industrial utiliza telhas metálicas do tipo sanduíche.

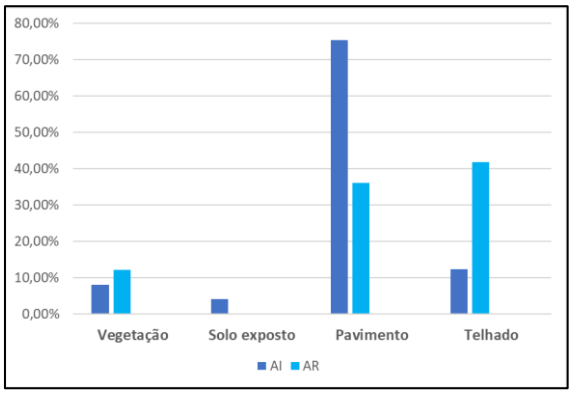


Figura 4 – Composição física dos recortes

3.2. Simulação computacional das condições microclimáticas

A simulação computacional foi realizada com o software ENVI-met v.5.1.1, utilizando o arquivo climático da cidade de Uberlândia. Os parâmetros de entrada estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada de simulação no ENVI-met

Parâmetro	**Arquivo Climático**
Arquivo Climático	BRA_MG_Uberlandia.867760_TMYx.2007-2021
Tipo de Processamento	Full Forcing
Período de simulação	23/01/22 - 24/01/22
Tempo de simulação	24 horas
Área de modelagem (L, W, H)	500 m x 500 m x 50 m
Grids (x, y,z)	4 x 4 x 2

Os elementos que compõem a área modelada, estão apresentados na Figura 5. Os pontos vermelhos, aleatoriamente dispostos no recorte, indicam os locais onde foram extraídos os resultados para a análise multivariada das variáveis estudadas, a saber, temperatura do ar (Tar), umidade relativa (RH) e umidade específica (SH) do ar, velocidade (WS) e direção (WD) do vento, fator de visão do céu (SVF) e temperatura de superfície (LST), às 14 h.

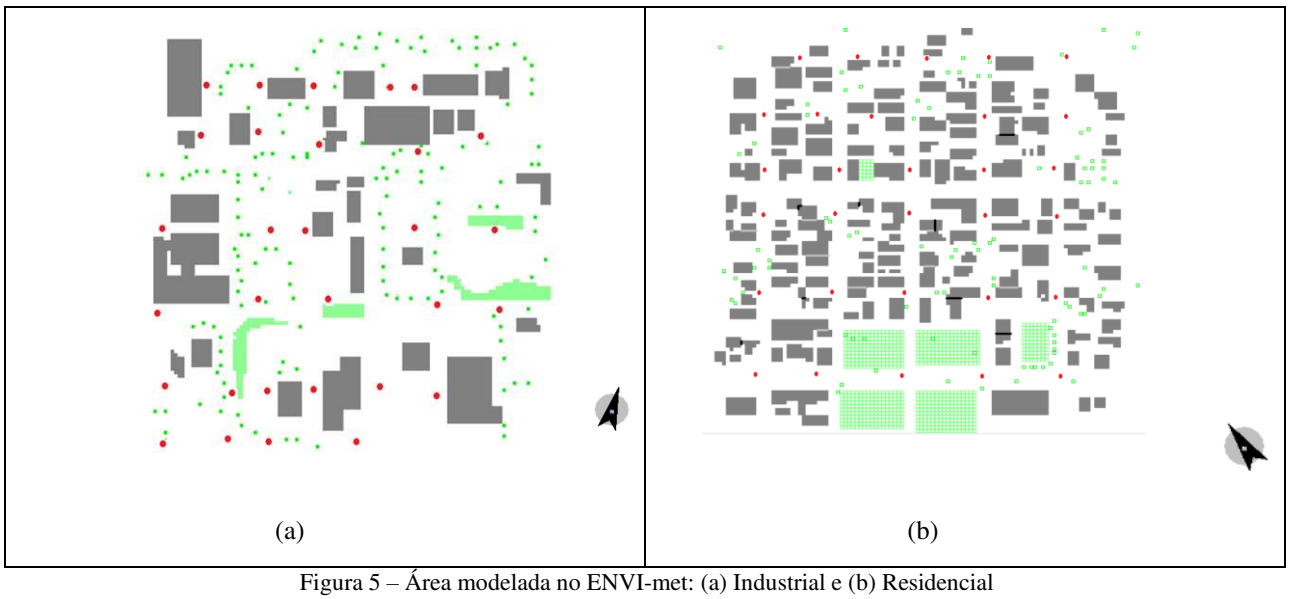


Figura 5 – Área modelada no ENVI-met: (a) Industrial e (b) Residencial

3.3. Análise Multivariada

O conjunto de dados utilizados nesta fase foi obtido via simulação ENVI-met, para 30 pontos amostrais na Figura 5, para o horário das 14 h. As análises foram realizadas por meio de rotinas computacionais implementadas no software R 3.0.1.

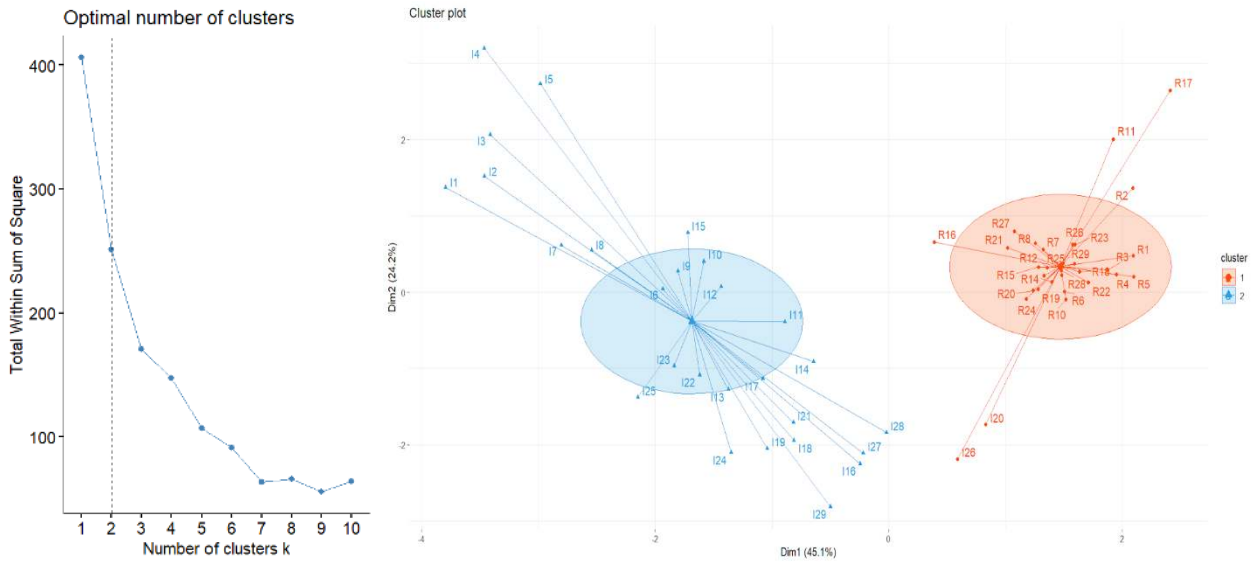
Na análise multivariada foram aplicadas duas técnicas exploratórias: A Clusterização, a fim de agrupar por similaridade as variáveis estudadas em conjuntos heterogêneos. Além disso, utilizou-se a análise fatorial por componentes principais (PCA) que tem por objetivo reduzir o número de variáveis e identificar quais são as mais determinantes na composição dos fatores de cada uma das áreas.

4. RESULTADOS

Os resultados estão organizados em duas partes: sendo a primeira, a análise multivariada visando determinar quais as variáveis microclimáticas, dentre as estudadas, são as mais importantes de acordo com cada recorte e a segunda a contextualização e discussão das variáveis mais relevantes para cada recorte.

4.1 Análise Multivariada

O número ótimo de clusters pelo critério de Kaiser-Meyer-Oklin [KMO] (1958) foi igual a dois, conforme observado na Figura 6a. Além disso, nota-se a formação de dois clusters, cujos parâmetros são o resultado do agrupamento das duas áreas estudadas, residencial (Cluster 1) e industrial (Cluster 2). Os resultados do recorte residencial são mais homogêneos se comparados aos industriais e ambos explicam 69.23% da variabilidade dos pontos.



(a) (b)

Figura 6 – (a) Determinação do número de clusters e (b) Resultado do processo de clusterização

Recorrendo-se à análise de componentes principais, na Figura 7 tem-se o gráfico biplot das variáveis estudadas e pontos coletados.

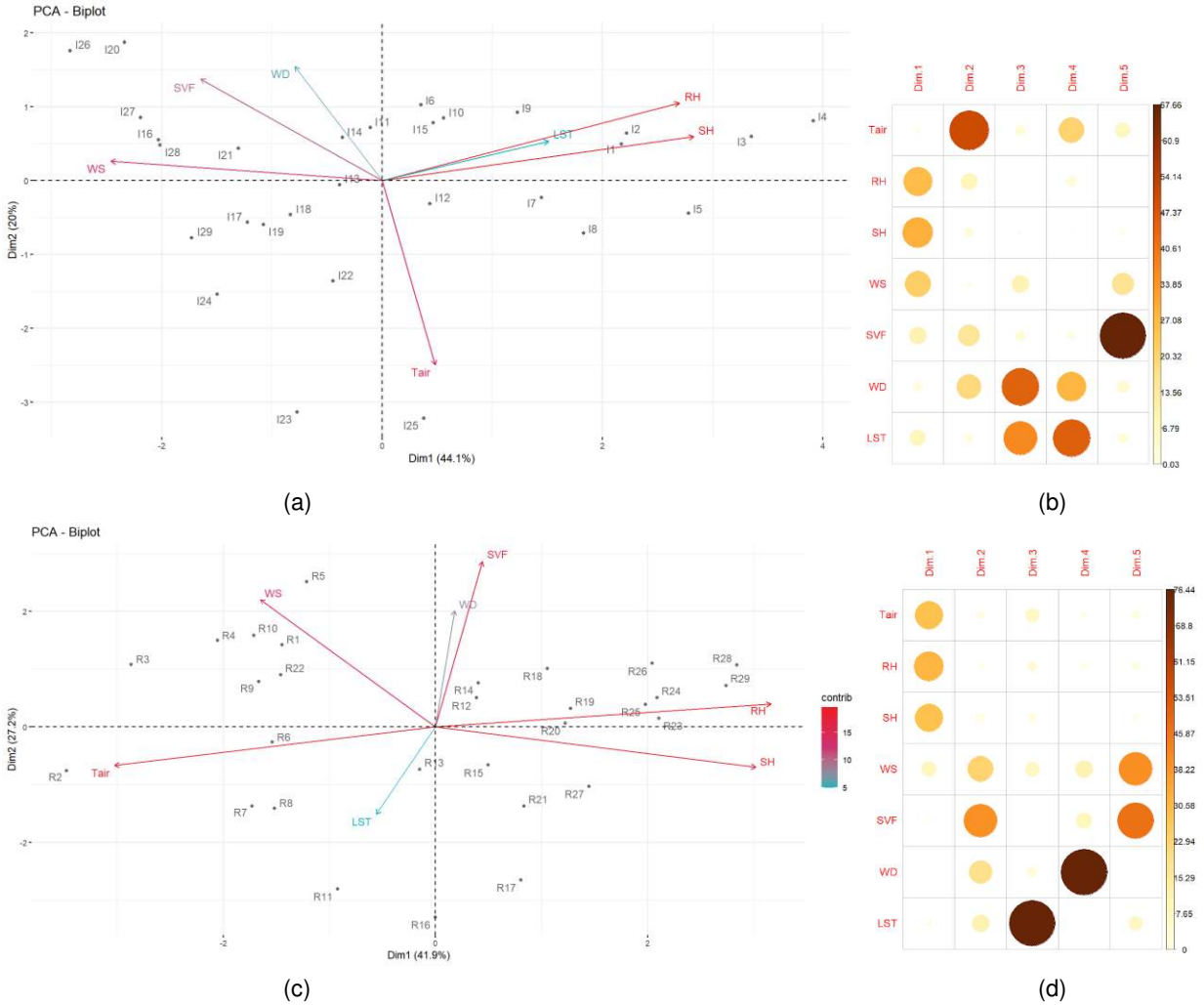


Figura 7 – Biplot das variáveis estudadas e pontos coletados: a) Industrial, c) Residencial; Score Fatorial: (b) Industrial e (d) Residencial

As duas primeiras dimensões explicam 64,1% da variância dos dados na área industrial e 69,1% da área residencial. Para ambos os recortes, as variáveis Tair, RH, SH foram determinantes para caracterizar o microclima, contudo para o recorte industrial a WS é um importante componente do PC, enquanto para o recorte residencial o SVF ocupa lugar de destaque.

4.2 Contextualização das variáveis mais relevantes de acordo com a análise multivariada

A partir das ferramentas da análise multivariada foi possível identificar as variáveis de maior importância para o estudo do microclima de duas LCZs de Uberlândia que serão discutidas nesta seção.

Na Figura 8, tem-se os valores da Tair ao longo das 24 h de simulação para os recortes simulados: a Tair foi superior para a área industrial (AI) se comparada à área residencial (AR) durante o período de incidência de radiação (8:30 às 19:30 h) atingindo a máxima de 41,5ºC às 13:30 h, tal temperatura é aproximadamente 6% superior ao pico registrado para a AR às 16 h. Quanto à RH, o comportamento dos dois recortes se mostrou similar ao longo do período estudado.

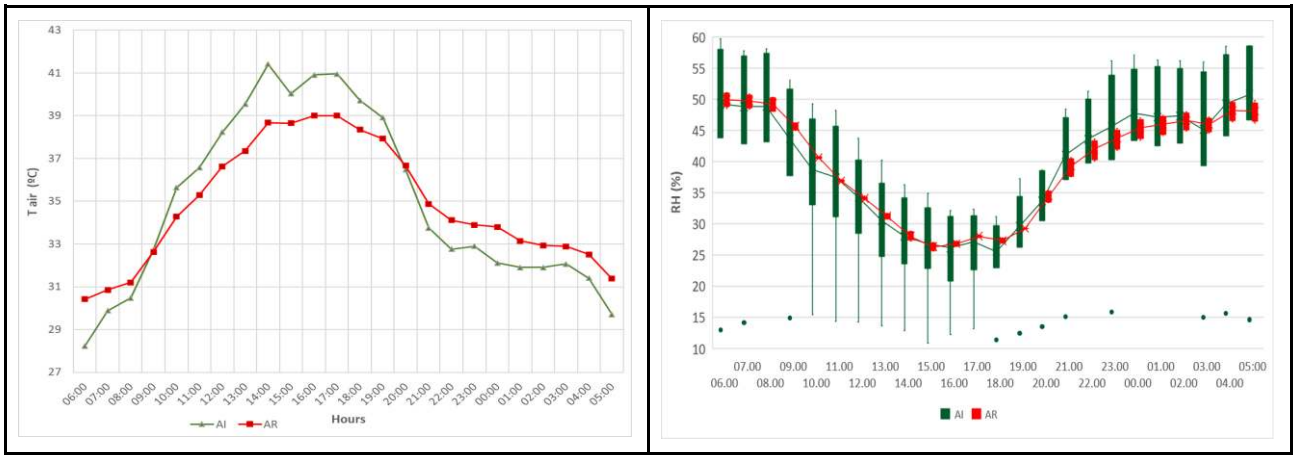


Figura 8 – (a) Temperatura do ar e (b) umidade relativa: Valores médios de 30 pontos da malha

A WS registrada para a cidade de Uberlândia, durante a simulação variou entre 0,5 m/s a 3,6 m/s, considerada de intensidade fraca, com direção predominante a NE, conforme apresentado na Figura 9. Os ventos fracos presentes na região puderam melhor atuar no arrefecimento da AI, visto que se trata de uma área mais aberta que favorece a formação de corredores de ventilação. Além da WS, a direção também tem papel expressivo na diminuição da Tair urbana, podendo reduzir até 0,18 ºC em média, em zonas densamente ocupadas, segundo estudos de Zheng et al. (2022). Para otimizar a eficiência dos ventos, os autores recomendam o planejamento de corredores de vento em conjunto com espaços verdes e parques.

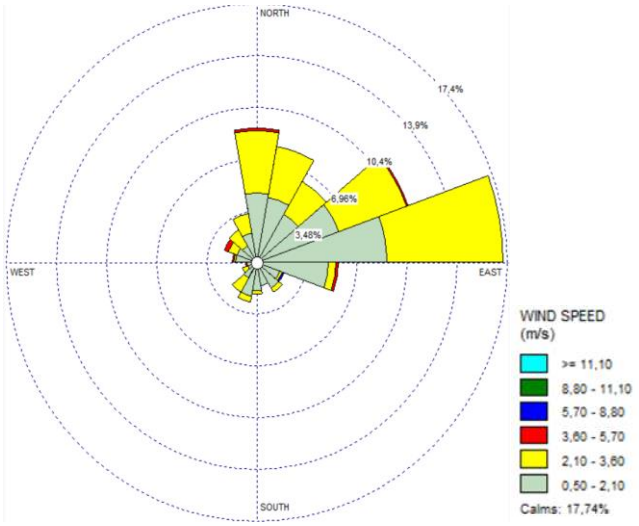


Figura 9 – Velocidade média e direção do vento

A relação (H/W) entre a altura das edificações (H) e a largura da rua (W) do recorte residencial foi de 0,36, em média 30% superior à H/W industrial. O SVF, apresentado na Figura 10, variou de 0,50 a 1. Percebe-se que a densidade construída na região residencial é maior do que aquela identificada na região industrial. Além da densidade construída, Liu et al. (2021) explicam que o efeito da ilha de calor foi mais notável em Pequim, quando combinadas as seguintes condições: percentual de vegetação < 11%, cobertura impermeável >85% e densidade de edificações > 24%.

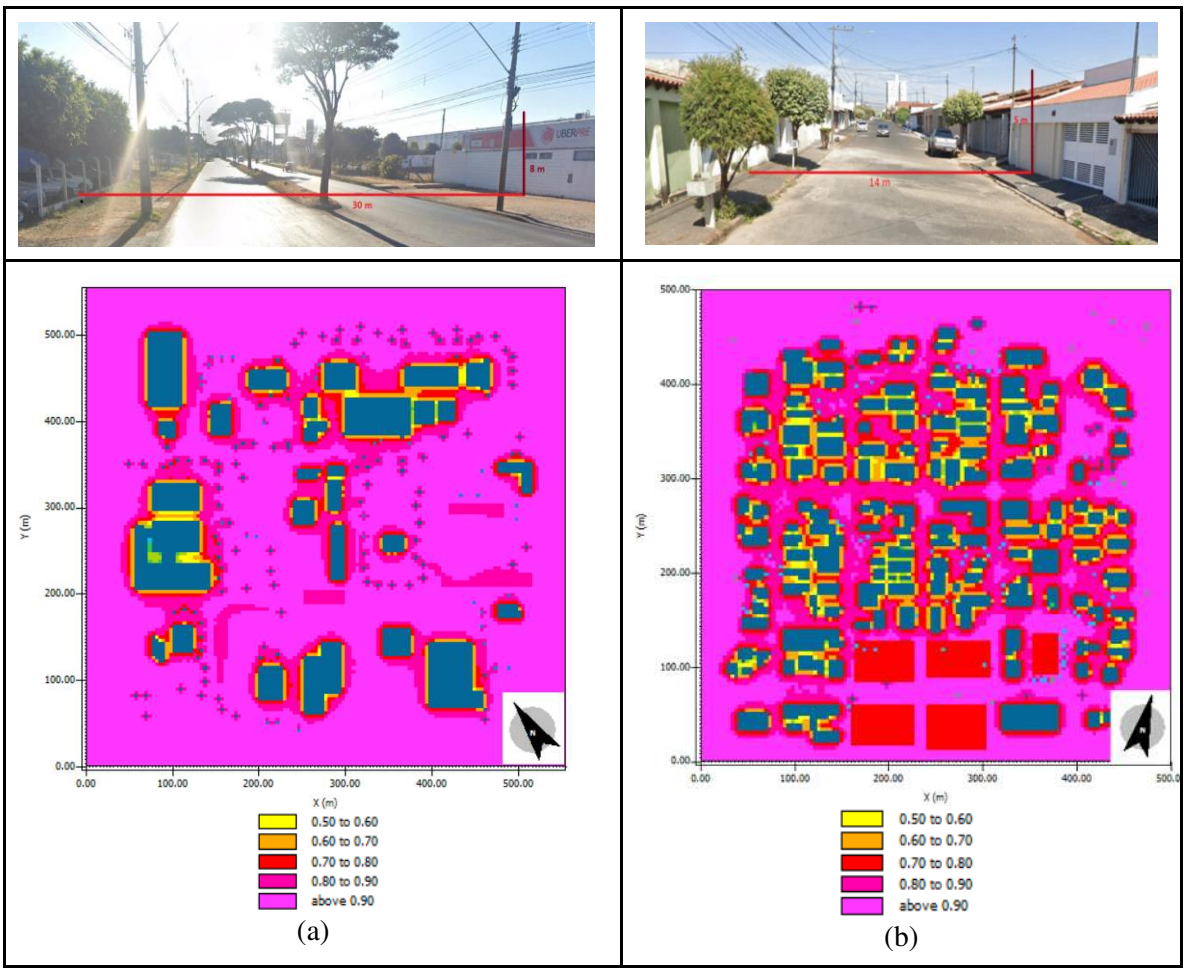


Figura 9 – SVF da AI (a) e AR (b).

Segundo Stewart e Oke (2012), Mu et al. (2020), o estudo comparativo entre as variáveis de duas LCZs distintas favorece o entendimento da influência da morfologia urbana, da estrutura e da cobertura do solo no microclima local. Sendo assim, mesmo a AI apresentando percentual elevado de superfície impermeabilizada (pavimentada), conforme visto na Figura 4, aparentemente tal percentual de pavimento asfáltico não foi capaz de influenciar no aumento da Tair após o pôr do sol, se comparada à AR e finalmente contribuir para a formação de ilhas de calor urbano (UHI). A densa ocupação do solo na área residencial pode ter contribuído para a retenção do calor no interior do cânion urbano, principalmente à noite. Durante o período de ampla radiação solar, as edificações presentes na AR ajudaram a sombrear as superfícies impermeabilizadas, atenuando o aumento abrupto da Tair.

5. CONCLUSÕES

Ao analisar duas LCZs distintas de uma mesma cidade, sendo uma LCZ residencial e outra industrial, pôde-se verificar quais as variáveis microclimáticas têm maior impacto sobre o microclima de cada recorte.

Apesar da Área Industrial (AI) ter apresentado Tair superior a AR durante o dia, no período crítico, geralmente após o pôr do sol, quando a intensidade de UHI atinge seu pico, a Tair da AI reduziu como resultado da interação de diversos fatores presentes no recorte, em especial a baixa densidade construída. Portanto, pode-se inferir que mesmo a AI apresentando Tair próximas aos 40ºC durante a tarde, tal região não contribui para a ocorrência de UHI nos bairros do entorno.

Já a Área Residencial (AR) parece ter se beneficiado da presença das edificações durante o período de intensa radiação solar através do sombreamento proporcionado. Porém, na ausência de radiação os materiais construtivos passaram a liberar o calor acumulado durante o dia e este permaneceu aprisionado no cânion prejudicando o arrefecimento.

Além disso, tanto para o recorte de AI e AR, as variáveis Tair, RH, SH apresentaram um peso estatístico significativo na caracterização do microclima. Entretanto, no recorte industrial a velocidade do vento (WS) foi

uma variável que representou uma singularidade elevada na descrição do componente principal. Em contrapartida, na área residencial o Fator de Visão do Céu (SVF) apresentou um peso maior.

O recorte dessa pesquisa foi sobre a cidade brasileira de Uberlândia - MG, com simulações computacionais no período de verão. Portanto, como sugestão para pesquisas futuras é recomendada a análise dessas áreas, com mesmo uso e ocupação, porém com a variação das propriedades térmicas das superfícies pavimentadas e coberturas, em contextos climáticos distintos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATTISTA, G., de LIETO VOLLARO, E., OCŁOŃ, P., & de LIETO VOLLARO, R. Effects of urban heat island mitigation strategies in an urban square: A numerical modelling and experimental investigation. **Energy and Buildings**, 112809, 2023.

BECHTEL, B.; ALEXANDER, P. J.; BÖHNER, J.; CHING, J.; CONRAD, O.; FEDDEMA, J.; STEWART, I. Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. **International Journal of Geo-Information**, v.4, p.199-219, 2015.

CLIMATE ONEBUILDING. **Repository of free climate data for building performance simulation**. Disponível em: https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html. Acesso em: 12 março 2023.

DEMUZERE, M., KITTNER, J., MARTILLI, A., MILLS, G., MOEDE, C., STEWART, I. D., van VLIET, J., and BECHTEL, B. **Global map of Local Climate Zones**, 2022. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.6364594.

ENVI-MET. **Decode urban nature with Microclimate simulations**. Disponível em: https://www.envi-met.com/pt. Acesso em: 08 fevereiro 2023.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados:** estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®. São Paulo: Elsevier Brasil, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA [IBGE]. **Cidades**, 2022. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br. Acesso em: 14 março 2023.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 3, p. 187-200, 1958.

LIU, Y.; XU, Y.; HAN, X. et al. Influence of the urban spatial layout of central Beijing on the atmospheric humidity field. Theor **Appl Climatol** 145, 455–471, 2021. https://doi.org/10.1007/s00704-021-03621-0

MU, Q.; MIAO, S.; WANG, Y.; LI, Y.; HE, X.; YAN, C. (2020). Evaluation of employing local climate zone classification for mesoscale modelling over Beijing metropolitan area. **Meteorology Atmos. Phys.** 132, 315–326, 2020. doi:10.1007/s00703-019-00692-7

NIKOLOPOULOU, M. **Designing Open Spaces in the Urban Environment:** A Bioclimatic Approach. RUROS: Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces. 1.ed. Greece: Centre for Renewable Energy Sources, 2004.

SANTOS, E. F. N. Análise estatística multivariada da precipitação do estado de Sergipe através dos fatores e agrupamentos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.23, n.14, jul/dez, 2018.

SHISHEGAR, N. Street Design and Urban Microclimate: Analyzing the Effects of Street Geometry and Orientation on Airflow and Solar Access in Urban Canyons. **Journal of Clean Energy Technology**, v.1, p. 52–56, 2013.

SILVA, C. M. A. da.; BARRETO, I. D. de. C.; SANTOS, E. A. B. dos.; BORGES, P. de. F.; ARAÚJO, L. S. de.; SANTOS, E. F. N. Análise das variáveis climáticas das estações agrometeorológicas do estado do Sergipe através de métodos multivariados (2011-2013). **Revista Gaia**, v.11, n.1, p. 144-156, 2017.

SILVA, V.J.; SILVA, C.R; ALMEIDA, L.S; SILVA, C.R; CARVALHO, H.P; CAMARGO, R. Mobile transect for identification of intra-urban heat islands in Uberlândia, Brazil. Rev. Ambient. Água vol. 13 n. 4, e2187 - Taubaté 2018. doi:10.4136/ambi-agua.2187

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.93, p. 1879-1900, 2012.

VIEIRA, M.; MACHADO, G. Geotecnologias e ilhas de calor urbanas: uma aplicação a Uberlândia-MG **Geographia Opportuno Tempore**.v. 4. p. 137-159, 2018. 10.5433/got.2018.v4.36161.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D; LABAKI, L. **Proposta de zoneamento climático brasileiro para edificações residenciais**. 1.ed. São Paulo, 2023.

WORLD URBAN DATABASE AND ACCESS PORTAL TOOLS [WUDAPT]. 2023. **LCZ Generator**. Disponível em: https://lcz-generator.rub.de/submissions. Acesso em: 12 março 2023.

ZHENG, Z.; REN, G; YANG, Y. Urban ventilation planning and its associated benefits based on numerical experiments: A case study in Beijing, **China, Building and Environment,** v. 222, 2022, 109383, ISSN 0360-1323, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109383.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e Centro de Estudos Geográficos (CEG) da Universidade de Lisboa (ULisboa).