ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE ILHAS DE CALOR URBANO EM ZONA INDUSTRIAL A PARTIR DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Angela Maria de Arruda (1); Érico Masiero (2)
(1) Mestre em Eng. Civil e doutoranda do curso de Eng. Urbana/ UFSCar, Engenheira Civil, angelaarruda@estudante.ufscar.br, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, Rodovia Washington Luiz km 235, PPGEU, (16) 3351.8295
(2) Doutor, Arquiteto, erico@ufscar.br, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, Rodovia Washington Luiz km 235, PPGEU, (16) 3351.8295

RESUMO

A maioria dos estudos sobre ilhas de calor urbano (ICUs) priorizam cidades densamente povoadas, porém as áreas industriais podem ser consideradas locais potenciais da ocorrência deste fenômeno, mesmo com população relativamente menor. Nesse estudo, foram apresentados resultados de simulação computacional utilizando o software ENVI-met e analisada a influência dos principais parâmetros que norteiam a ocorrência das ICUs na camada de dossel da região industrial de São Carlos/SP. Foi selecionado, caracterizado e classificado um recorte de uma área quanto às zonas climáticas locais (LCZs) e apresentadas as principais propriedades dos materiais construtivos visando identificar suas contribuições para o clima urbano. Os dados de entrada para a simulação foram obtidos em bancos de dados climáticos e os resultados obtidos foram comparados àqueles medidos na estação meteorológica situada na zona rural para verificação da intensidade da ICU, bem como a verificação de estudos publicados e fórmulas de regressão amplamente difundidas. A partir da análise dos resultados e discussão com outros estudos já publicados, foi possível analisar a influência dos principais parâmetros que norteiam a ocorrência das ICUs tais como: temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento, fator de visão do céu e cobertura vegetal. A maior intensidade de ilha de calor encontrada foi de 3,4ºC durante a madrugada e no período da tarde, valor próximo ao encontrado na literatura, a ser comprovado através de medições locais a posteriori.

Palavras-chave: ilhas de calor urbano, distrito industrial, ENVI-met simulação computacional.

ABSTRACT

Most studies on urban heat islands (UHIs) prioritize densely populated cities, but industrial areas can be considered potential sites for the occurrence of this phenomenon, even with a relatively smaller population. In this study, computer simulation results were presented using the ENVI-met software and the influence of the main parameters that guide the occurrence of ICUs in the canopy layer of the industrial region of São Carlos / SP was analyzed. A section of an area was selected, characterized and classified in terms of local climatic zones (LCZs) and the main properties of construction materials were presented in order to identify their contributions to the urban climate. The input data for the simulation were obtained from climate databases and the results obtained were compared to those measured at the weather station located in the rural area to verify the intensity of the ICU, as well as the verification of published studies and widespread regression formulas. From the analysis of the results and discussion with other studies already published, it was possible to analyze the influence of the main parameters that guide the occurrence of ICUs such as: temperature and relative humidity, wind speed, sky view factor and vegetation cover. The highest intensity of heat island found was 3.4ºC during the night and in the afternoon, a value close to that found in the literature, to be proven through local measurements a posteriori.

Keyword: urban heat islands, industrial district, ENVI-met, computer simulation

1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento das cidades acompanhado de inexistência ou incompletude de planejamento urbano culminou em ocupações desordenadas do espaço urbano, crescente desmatamento, impermeabilização do solo e, por conseguinte aumento da temperatura e formação das Ilhas de Calor Urbanas (ICU's) (GARTLAND, 2010).

A ICU é definida como a diferença de temperatura entre áreas urbanas e suburbanas e áreas rurais da mesma região, podendo atingir até 10°C. As causas incluem atividades urbanas e características físicas tais como alta densidade de construções, concentração de materiais construtivos de grande potencial energético de emissividade e refletância, evaporação reduzida, maior armazenamento de calor, aumento do saldo de radiação, convecção reduzida e aumento de calor antropogênico (OKE, 1981; AMORIN *et al.,* 2009; GARTLAND, 2010; NINGRUM, 2017; ROMERO *et al.,* 2019). Existem três tipos de ICUs: camada de superfície, camada limite e camada de dossel, sendo este último objeto deste estudo e medida até a altura das edificações (MOHAN *et al.*, 2020).

A temperatura do ar urbano é diretamente dependente das condições de ocupação do espaço. Em geral, ambientes urbanos tendem a ser mais quentes e menos úmidos se comparados às regiões rurais. Segundo Romero et. al., (2019), o processo de urbanização é responsável pela transformação e alteração das superfícies naturais, culminando em paisagens urbanas heterogêneas, com microclimas específicos influenciados pelas atividades humanas, vegetação, presença de água e poluição que tendem a potencializar "anomalias térmicas" como as ilhas de calor urbanas. Ressalta-se a importância de estudar as diferenças térmicas intra-urbanas para complementar o clássico estudo comparativo entre urbano e rural.

O conhecimento do comportamento do microclima destes recortes pode servir de ferramenta para tomada de decisão no planejamento urbano, pois quando este é articulado às variáveis climáticas é possível atingir melhores condições ambientais e conforto térmico dos usuários de espaços abertos (SILVA, 2017).

Visando contribuir com os estudos do conforto térmico urbano, são utilizados alguns modelos numéricos e computacionais para análise do conforto térmico em espaços abertos, a exemplo de Silva (2017), destacando-se o software ENVI-met que fornece resultados para propriedades como temperatura do ar, umidade relativa, radiação, velocidade e direção do vento, albedo das superfícies, entre outros. As simulações de ICUs auxiliam no entendimento da forma como ocorrem estes fenômenos e também na estimativa da eficácia de medidas mitigatórias.

O desenvolvimento de pesquisas para identificação da configuração da intensidade e da amplitude dos impactos desse fenômeno é de suma importância, visto que a maioria da população brasileira (84,4%) é urbana (IBGE, 2019). Junior Ugeda e Amorin (2016) afirmam que os estudos tradicionais focavam em grandes cidades e regiões metropolitanas e os resultados apontavam uma variação térmica de 3ºC a 10ºC. Contudo, com o avanço da tecnologia e equipamentos utilizados, as pesquisas passaram a abranger cidades de médio e pequeno porte e verificou-se que as modificações encontradas foram substanciais nos campos térmicos e higrométricos, com comportamentos semelhantes às grandes cidades. Entretanto, é necessário que as diferenças de temperatura do ar também sejam aferidas e comparadas entre os diversos recortes urbanos, considerando as características de ocupação do ambiente rural e a variação da geometria urbana.

Para tanto, Stewart e Oke (2012) desenvolveram um sistema de classificação chamado de Zonas Climáticas Locais - ZCLs o qual busca acoplar características típicas da paisagem, como tipo de superfície, o Fator de Visão do Céu – FVC –, a estrutura e a atividade antrópica, ao clima local. Cada ZCL tem valores característicos para as propriedades da superfície urbana, como albedo, emissividade, proporção de aspecto, permeabilidade, frações de superfície construídas e produção de calor antropogênico (THEEUWES *et al.* 2015). Entre os diversos fatores de influência no desempenho térmico de um recorte urbano estão o Fator de Visão do Céu, a presença de cobertura vegetal, as cores e texturas das fachadas, pisos e coberturas, a taxa de ocupação do solo e os principais materiais das superfícies.

Singh *et. al.* (2017) também concluíram que as ICUs estão presentes em todas as grandes e pequenas cidades do mundo com intensidades variáveis. A aglomeração industrial em Jharsuguda/Índia enfrenta este problema que pode ser atribuído a mudanças na cobertura da terra, nas atividades industriais intensas e nos processos de mineração. Observou-se que houve um acúmulo constante de calor na região, ao longo dos anos, resultando em temperaturas noturnas mais elevadas.

Sob esta ótica, esta pesquisa visa analisar os resultados simulados a partir do ENVI-met para a região industrial de São Carlos/SP e a influência dos valores encontrados para os parâmetros na formação das ICUs, tendo em vista que tais regiões podem impactar significativamente no equilíbrio climático devido ao uso excessivo de coberturas metálicas e materiais altamente impermeáveis com elevada condutividade térmica das construções. Geralmente, cidades com polos industriais possuem galpões de dimensões significativas, segue-se daí o questionamento: como tais zonas industriais influenciam na formação de ICUs, especialmente,

em uma cidade de médio porte? Qual a contribuição da configuração de um recorte urbano e dos materiais construtivos utilizados nessa área para o microclima?

2. OBJETIVO

O artigo tem como objetivo analisar a influência dos principais parâmetros que norteiam a ocorrência das ICUs em uma região industrial de São Carlos/SP e discutir os resultados de simulação computacional utilizando o software ENVI-met.

3. MÉTODO

O desenvolvimento do método desta pesquisa foi divido nas seguintes etapas:

- Caracterização da área de estudo selecionada;
- Caracterização da geometria urbana do recorte estudado a partir do sistema de classificação de Zonas Climáticas Locais - ZCLs de Stewart e Oke (2012) e dos materiais utilizados nas construções;
- Simulações do recorte urbano com ocupação industrial com o software ENVI-met com a disposição de quatro pontos receptores;
- Comparação dos resultados com as relações entre ICUs e FVC propostas por Oke (1981) na equação 1 e Souza *et al.* (2010) na equação 2 e discussão dos resultados de pesquisas relevantes e dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2018).

$\Delta T_{u-r} = 15,27 - 13,88\ FVC$ (Oke,1981) equação 1

$\Delta T_{u-r} = 15,27 - 13,88\ FVC - \kappa$ (Souza et al.,2010) equação 2

onde:

ΔT_{u-r} = diferença entre a temperatura do ar urbana e rural [ºC];
FVC = fator de visão do céu (adimensional).
κ = 24,106-30,261 FVC é o fator de correção proposto por Souza et al. (2010)

3.1. Caracterização da área de estudo selecionada

A cidade de São Carlos/SP está localizada no interior do estado de São Paulo, 22°01′02″ S e 47°53′26″ O, na região centro-oeste com população estimada de 254.484 habitantes (IBGE, 2020) e área total de 1.136.907 km². É um importante centro regional industrial e sua economia baseada em atividades industriais e agropecuárias. O clima é subtropical úmido na classificação de Köppen-Geiger, altitude de 856 m, IDH de 0,805 segundo (IBGE 2019).

Para o estudo, foi selecionado um recorte no distrito industrial da cidade de São Carlos/ SP apresentado na figura 1.

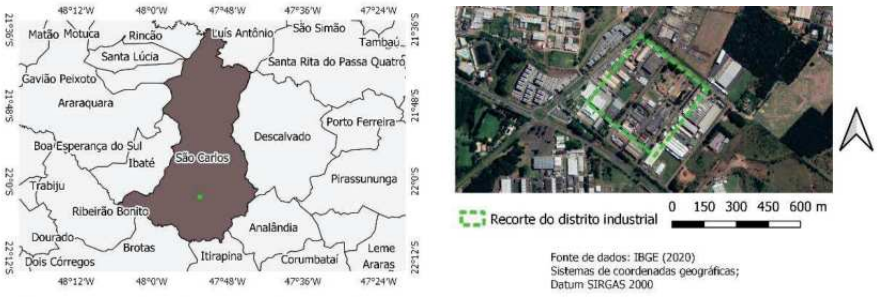


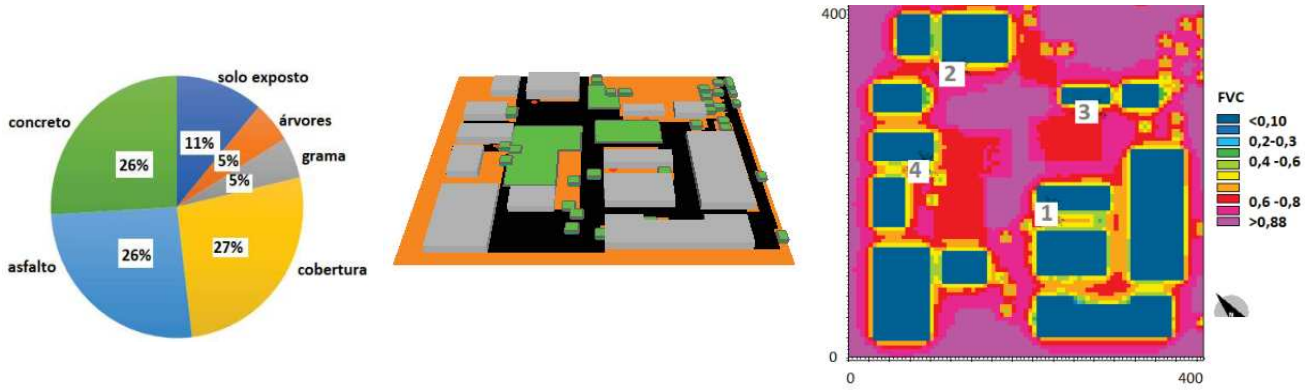
Figura 1 – Localização da cidade de São Carlos/SP e do recorte estudado (AUTORES, 2021).

3.2. Caracterização da geometria urbana do recorte estudado e dos materiais utilizados nas construções

As características construtivas e os aspectos geométricos do recorte urbano com ocupação industrial quais foram usados para a composição do modelo de estudo no ENVI-met 4.4.5 com o intuito de aferir a temperatura do ar e a caracterização das ICUs. A modelagem adotou como parâmetros: cobertura de alumínio, grama e árvores de até 3m de altura.

Na figura 2 é apresentada a composição estimada da área de estudo, a posição dos receptores e os diferentes FVCs predominantes no mesmo recorte urbano. Somente 21% da área total é permeável, e,

segundo a classificação de Stewart e Oke (2012) para ZCLs, o recorte encontra-se na ZCL 8 – grandes construções de baixa elevação e ZCL B- Vegetação arbórea esparsa.



(a) (b) (c)

Figura 2 – Elementos do recorte estudado (a) composição do recorte; (b) visão tridimensional do local estudado (c) posicionamento dos receptores e fator de visão do céu (adaptado de ENVI-met, 2021).

O que difere os receptores 1, 2, 3 e 4, conforme figura 2c, é a posição em relação à vegetação: o receptor 4 apresenta a vantagem de estar próximo a uma área de vegetação expressiva, cuja influência será discutida adiante.

Na figura 3, é possível reconhecer os materiais construtivos mais utilizados neste recorte urbano: alvenaria de blocos de concreto e cobertura de telha metálica e pavimento concreto ou asfalto.



Figura 3 – Elementos do recorte estudado (AUTORES,2021).

Segundo ABNT NBR 15220-2 (2005) tais materiais apresentam as seguintes propriedades (Tabela 1):

Tabela 1 - Propriedades térmicas dos materiais construtivos identificados neste recorte urbano

Material	Propriedades térmicas			
	Densidade de massa aparente (kg/m³)	Condutividade térmica (W/(m K))	Calor específico (J/(kg K)	Emissividade
Concreto (bloco)	2400	1,75	1,00	0,92-0,94
Reboco	2000	1,15	1,00	0,91
Telha metálica de aço	7800	55	0,46	0.07-0.08

Fonte: ABNT NBR 15220-2 (2005)

3.3. Simulações com o software ENVI-met versão 4.4.5

O modelo do ENVI-met no qual a simulação se baseou foi definido com 400 m x 400 m. Após a caracterização física dos elementos que compõem a área, foram posicionados quatro receptores para registrar dados ao longo das 22 h de simulação. A estação meteorológica do INMET (INMET, 2018), utilizada como referência e dados meteorológicos, fica localizada no campus da UFSCar, a aproximadamente 7 km ao norte receptores área de estudo.

O segundo passo consistiu em introduzir no ENVI-met os dados para realização da simulação, na ferramenta *ConfigWizard:*

Tabela 2 - Parâmetros de processamento utilizados no Envi-Met

Dados	Valores
Localidade / Coordenadas Geográficas	São Carlos/SP 22°01′02″ S, 47°53′26″ O
Data (início da simulação)	05/01/2018
Duração da simulação	22 h
Vel. Vento a 10 m da superfície (m/s)	2
Direção do vento	N
Comprimento de rugosidade	0,01

Os valores de variação de temperatura do ar e umidade relativa foram obtidos no site do INMET (2018), na estação meteorológica de São Carlos- A701, dia 05/01/2018 o qual é caracterizado com céu claro, sem precipitações, vento fraco e altas temperaturas, ideal para estudar a formação de ICUs.

Utilizando a ferramenta *Simple forcing* é possível informar os valores horários dos dados de temperatura umidade relativa do ar correspondente ao período para simulação obtidas no INMET, tornando-a mais realista.

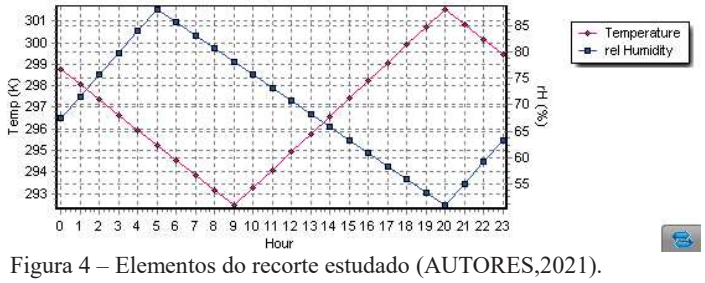


Figura 4 – Elementos do recorte estudado (AUTORES,2021).

A partir da simulação foram obtidos os dados de temperatura do ar, de umidade relativa do ar, velocidade do vento, de FVC e ocorrência de ICUs, além das imagens de variação de temperatura do ar no plano horizontal a 3m de altura e no plano vertical do recorte urbano estudado.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A forma urbana, os materiais construtivos aplicados, a densidade de ocupação, a forma das edificações e o uso do solo são capazes de alterar os fluxos regulares de reflexão, absorção e armazenamento de energia, alterando a velocidade de ganho e perda de calor e culminando em anomalias térmicas e higrométricas, as chamadas ICUs, ilhas frescas, ilhas de umidade e ilhas secas (JUNIOR UGEDA, AMORIN, 2016).

Quanto às características do recorte estudado apresentadas anteriormente, pode-se inferir que os materiais construtivos (concreto, telhas metálicas e asfalto, essencialmente) contribuem para a ICU na região através do fluxo de calor desses materiais, capazes de armazenar ou liberar energia em taxas mais baixas em comparação com os solos nas áreas rurais, resultando em um clima térmico mais conservador; isto é, os materiais construídos impactam a temperatura do ar circundante em uma taxa mais lenta e, portanto, a taxa de mudança de temperatura é mais baixa em áreas construídas em comparação com áreas rurais abertas (MOHAN *et al.,* 2020).

A refletância solar (albedo), porcentagem de energia solar refletida por uma superfície, do asfalto é considerada baixa (5%) e alta emissividade (92%), isto é, uma porcentagem alta de energia o material não consegue refletir. Já as telhas metálicas de alumínio, possuem alta refletância solar (60%) e baixa emissividade (25%) (GARTLAND, 2010).

Materiais como concreto, asfalto e telhas de alumínio possuem valores de emissão térmica em torno de 0,85. A radiação de calor do material é afetada pela baixa emissão térmica. Desta forma, a ampla utilização de superfícies de concreto ou metal pode diminuir a emissividade térmica urbana total implicando aumento dos níveis de saldo de radiação urbano (GARTLAND, 2010).

O dia selecionado para a simulação foi um dia claro e calmo, típico de verão, segundo recomendação de Gartland (2010) pois o efeito das ICUs é intensificado nestes dias, não há interferência de nuvens para a captação de energia solar e os ventos com velocidade reduzida removem o calor mais lentamente.

Na figura 5, as letras T, UR seguidas dos números indicam a temperatura e umidade do ar simulados, respectivamente nos quatro pontos estudados. Observa-se a relação inversa entre UR e a temperatura do ar T durante o período estudado, o pico máximo da UR ocorre às 5 h, enquanto o mínimo ocorre às 17 h, horário de maior temperatura do ar.

As linhas tracejadas representam as linhas de tendência da temperatura e da umidade relativa do ar medidas pelo INMET (2021) através da estação meteorológica e denominadas TC e UC, temperatura e umidade de controle respectivamente.

A relação inversa entre temperatura e umidade relativa do ar pode ser explicada pelo fato de que na transformação da água do estado líquido para o gasoso ocorre consumo de energia na forma de calor sensível transformado em calor latente e reduzindo a temperatura. Nas cidades, a escassez de água retida na superfície, por causa da impermeabilização dos solos, faz com que a energia que passaria a ser transformada em calor latente não seja utilizada e permaneça disponível como calor sensível aumentando o aquecimento das zonas urbanas (JUNIOR UGEDA, AMORIN, 2016). A configuração de temperatura e umidade relativa do ar é apresentado na figura 6.

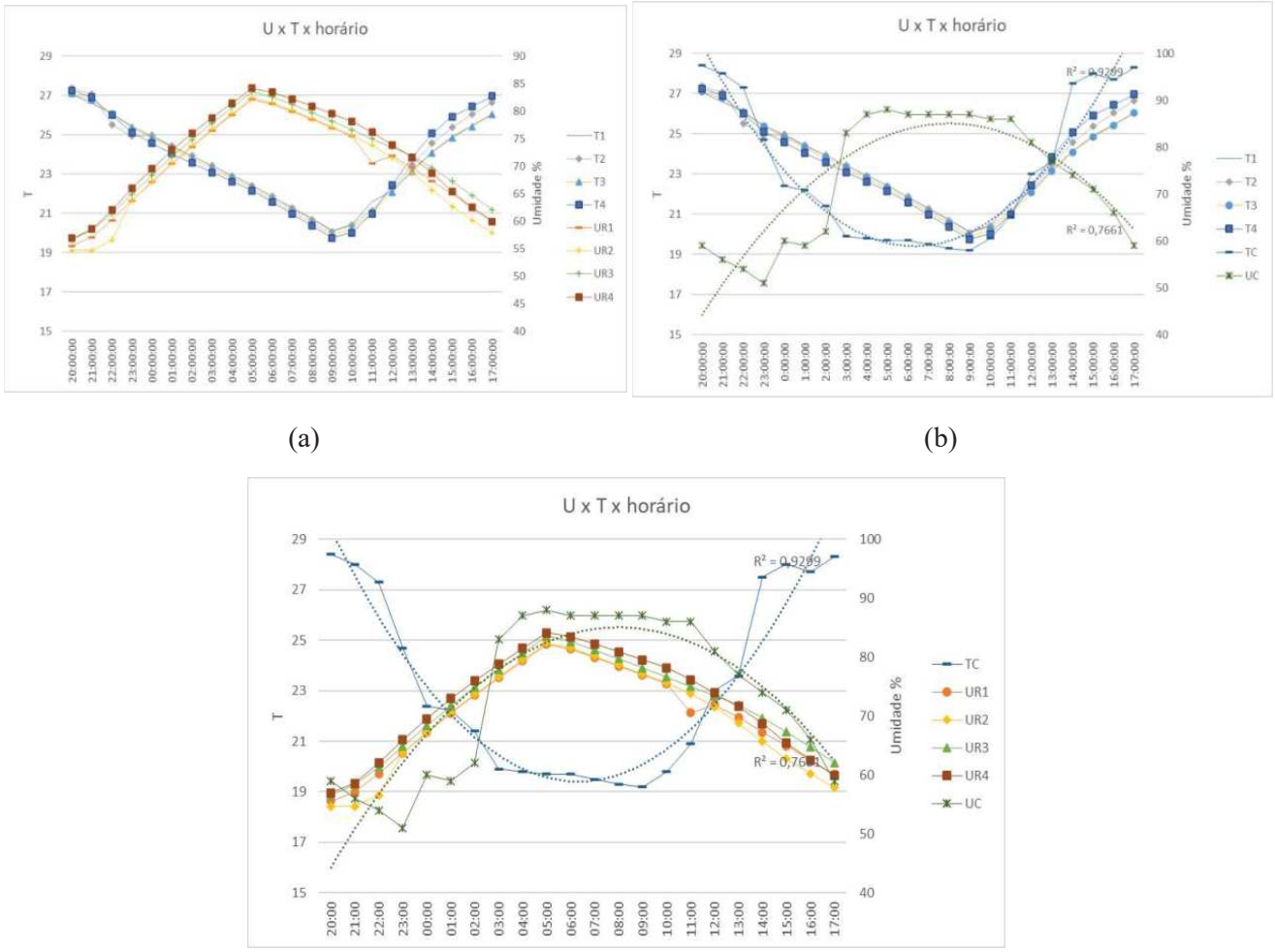


Figura 5 – Variação da umidade relativa e temperatura do ar (AUTORES, 2021).

A vegetação e os corpos d'água são alternativas viáveis para mitigação da intensidade das ICUs como demonstra Gunawardena *et al*. (2017): os espaços verdes dominados por árvores tendem a oferecer maior alívio do estresse térmico e o aumento da sua rugosidade é responsável pelo resfriamento da camada limite, enquanto "espaços azuis" mal projetados podem surtir efeito contrário na melhoria da temperatura do ar circundante. No entanto, a magnitude e o transporte do resfriamento experimentado dependem do tamanho, extensão e geometria dos espaços verdes, com alguns grandes parques solitários que oferecem resfriamento mínimo da camada limite (GUNAWARDENA *et al.,* 2017).

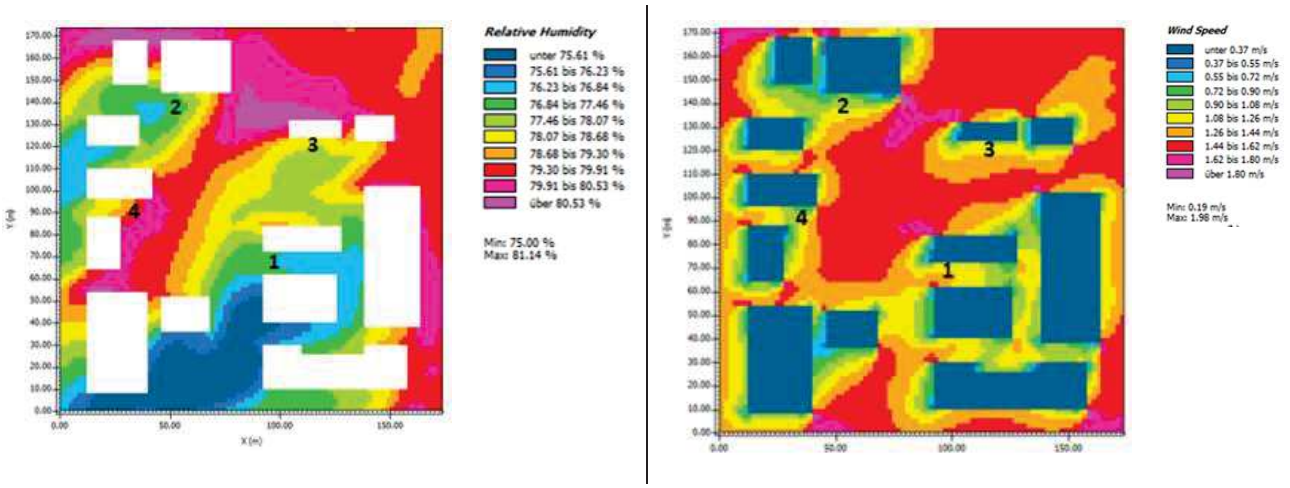
As diferenças de pressão entre regiões ou verticalmente, ou diferença de densidade geram os ventos que fluem horizontalmente. Alterações no nível do solo tais como topografia, vegetação ou construções alteram o fluxo de vento e seu padrão (ERELL; EARLMUTTER; WILLIMSON, 2011).

Os centros urbanos, cuja rugosidade admitida é de 0,1, são caracterizados por velocidade do vento mais baixa, fato atribuído à rugosidade da superfície construída da cidade, sendo que a velocidade do vento

tende a aumentar com o aumento da altura em relação ao solo (MACIEL, 2014), no entanto, a rugosidade admitida no modelo foi de 0,01, característico de espaços urbanos genéricos.

O FVC é adimensional e representa uma relação geométrica entre e Terra e o céu estipulando o trecho visível de céu (SOUZA *et al*., 2010). O FVC está intrinsecamente ligado à geometria urbana, resultado da imposição de limites dos elementos urbanos e suas inter-relações. Sob esta ótica, Oke (1981) afirma que a intensidade e a ocorrência das ICUs estão atreladas ao tipo de geometria urbana, geralmente descrita em função do FVC. O resfriamento das superfícies terrestres ocorre numa taxa proporcional à área visível para determinado ponto da superfície, pois o FVC, segundo Oke (1981), representa a porção do céu disponível para as trocas de calor.

Durante a noite, o FVC atua como um meio de capturar a radiação de saída, no entanto, durante o dia, bloqueia a radiação e contribui para um aquecimento mais lento das regiões industriais. Assim, as áreas abertas ou de solo descoberto tornam-se o principal componente para as altas temperaturas no meio rural (ZHANG *et al*., 2007, MOHAN *et al*., 2020).



(a) (b)

Figura 6– Perfis de (a) umidade relativa e (b) velocidade do vento às 09:00 h (altura de 3m) (AUTORES, 2021).

Ao comparar os resultados obtidos através da simulação pelo ENVI-met e os dados de referência da estação meteorológica, foi possível estimar a intensidade da ICU apresenta na figura 6, onde tu-tr (temperatura urbana – temperatura rural nos 4 receptores). Percebe-se que os receptores 2 e 3 apresentam valores próximos para a intensidade da ICU, que pode ser justificado pelo FVC similar (0,67 e 0,68, respectivamente).

Os valores máximos encontrados foram de aproximadamente 3,4°C no período noturno para o distrito industrial e no período da tarde a situação se inverte com a zona rural apresentando intensidade de ICU maior. Resultados semelhantes foram encontrados por Mohan *et al.* (2020) em estudo desenvolvido na Índia: entre as diferentes classes de uso/ cobertura do solo, a maior intensidade média da ICU da camada de dossel durante 3 meses ocorreu durante a noite nos locais industriais (2,52°C), seguidos por assentamentos rurais e urbanos (2,13°C) e áreas de cultivo (2,06°C). Quanto ao período diurno, a intensidade de ICU em terras agrícolas foi de 2,07°C mais elevada que os assentamentos urbanos e rurais (1,68°C) e indústria (1,45°C). Kruguer *et al.* (2012) estudaram a região de Glasgow e chegaram ao valor máximo de 3°C para a intensidade de ICU.

As verificações de campo realizadas Effat *et al.* (2014) mostraram que a maioria dos *hotspots* se encontra em áreas urbanas espalhadas por telhados metálicos, edifícios industriais, armazéns, pistas de aeroportos, ferrovias, estacionamentos de alta densidade e locais de disposição de resíduos sólidos. Quase todos os pontos de acesso têm escassez ou falta de áreas verdes e a temperatura da superfície pode subir para 1,2 ° C.

A maior taxa de aquecimento no ambiente rural faz com que a temperatura rural fique mais alta que a urbana pela manhã. Isso faz com que a intensidade da ICU seja reduzida aproximadamente 4 - 5 h após o nascer do sol (THEEUWES *et al.* 2015). Na figura 7 é apresentada a intensidade das ICU no recorte urbano industrial estudado.



Figura 7 – Intensidade das ICU (AUTORES, 2021).

No ponto onde está posicionado o receptor 4 (figura 8), cujo FVC=0,59, pode-se aferir que houve menores variações para a intensidade da ICU talvez por sua localização próxima à vegetação, que atua como barreira natural para o vento, maior área sombreada e auxiliar na manutenção da umidade relativa do ar.

O decréscimo na temperatura do ar no ponto do receptor 4 (FVC = 0,59) é mais acentuado à noite se comparado aos outros pontos, assim como o aumento de temperatura do ar durante o dia. Por estar próximo à vegetação (grama e árvores) ocorre troca de calor mais rapidamente através da evaporação e da evapotranspiração, favorecendo a perda de energia através da transformação do calor sensível em calor latente (UGEDA JUNIOR, AMORIN, 2016). O aumento da vegetação urbana pode facilitar a resiliência ao calor, proporcionando sombra e resfriamento evaporativo (SOLTANI, SHARIFI, 2017).

Por outro lado, os outros receptores 1, 2 e 3 estão localizados próximos a materiais com maior calor específico e menor capacidade térmica como os materiais de construção e pavimentação se comparado aos materiais naturais. Desta forma, a mesma quantidade de energia causa maior aquecimento no meio urbano do que na zona rural, exceto em casos de solo exposto (UGEDA JUNIOR, AMORIN, 2016).

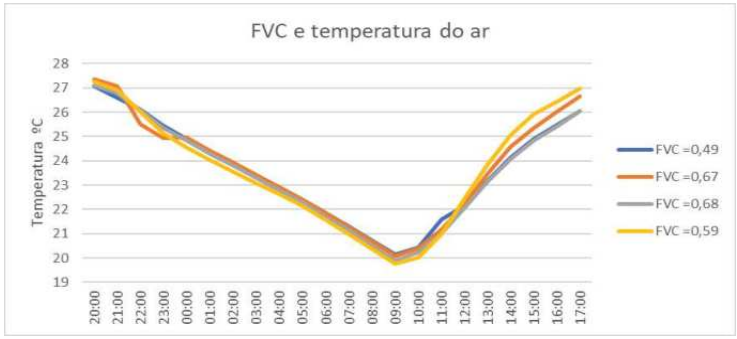


Figura 8– Relação entre FVC e temperatura do ar (AUTORES, 2021).

Como o receptor 4 (FVC= 0,59) foi o que apresentou maiores diferenças quanto à temperatura do ar ao longo do tempo simulado, foram realizadas seções verticais para estudar a distribuição da temperatura nesse ponto e entender a distribuição de temperatura na camada limite urbana.

A figura 9 apresenta os diferentes comportamentos da camada limite urbana: à noite, a camada rural esfria e pode ser relativamente rasa (~ 100 m). Por outro lado, a camada limite urbana noturna permanece mais profunda (~ 400 m) porque se mantém alimentada pelo calor armazenado nas edificações durante o dia (armazenamento ou fluxo de calor do solo) (THEEUWES *et al.* 2015).

Para fins comparativos foram utilizadas a equação 1 de Oke (1981) que associa a intensidade das ICUs ao FVC e a equação 2 sugerida por Souza *et al.* (2010) a partir da inserção de um fator de correção à equação 1:

$$\Delta T_{u-r} = 15{,}27 - 13{,}88\ FVC \qquad \text{Equação 1}$$

$$\Delta T_{u-r} = 15{,}27 - 13{,}88\ FVC - \kappa \qquad \text{Equação 2}$$

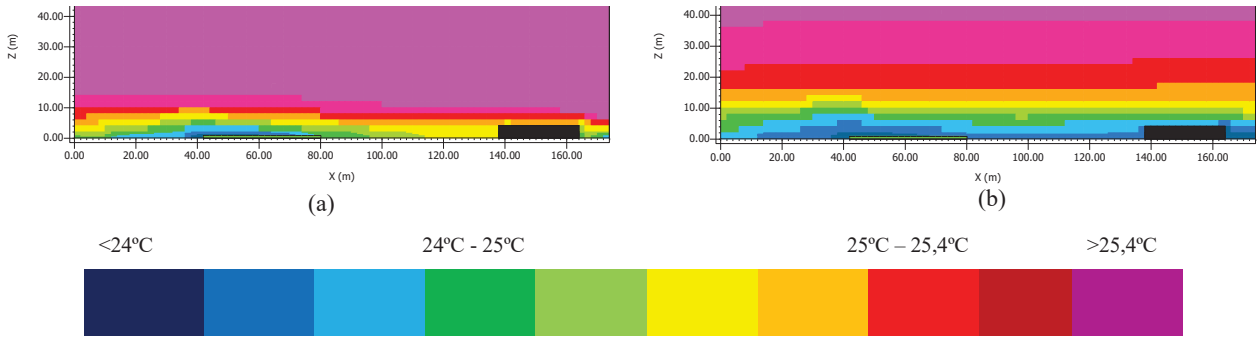


Figura 9 – Cortes para y = 95 m (posição do receptor 4): a) 00:00 h; b) 06:00 h; (AUTORES, 2021).

Assim como constatado por Souza *et al.* (2010) a fórmula de regressão apresentada por Oke (1981) prevê intensidades de ICUs acima do medido em campo e neste caso simulado computacionalmente, em torno de 70%. Tal discrepância pode ser resultado das condionantes utilizadas durante a formulação, distintas no caso brasileiro e também por se tratar de pontos com FVC baixo se comparados ao estudo dos autores supracitados, que mostrou que a aderência dos valores medidos à formula torna-se mais expressiva para pontos com FVC acima de 0,82.

Os dados encontrados para o receptor de FVC=0,68 foram comparados aos resultados encontrados por Souza et al. (2010) e apresentados na figura 10.



Figura 10 – Comparativo dos resultados simulados com apresentados por Souza et al (2010) (AUTORES, 2021).

Percebe-se que houve discrepâncias entre os resultados, sendo que o acréscimo da intensidade da ICU foi mais abrupto para os dados simulados e o horário de pico aconteceu 3 h após os resultados comparados. Espera-se que a partir dos resultados coletados em campo, seja possível encontrar correlações coesas entre os valores simulados e os valores medido, pois segundo Gal e Kántor (2010), softwares de simulação de ambientes climáticos como o ENVI-met tendem a superestimar os resultados durante período prolongado de sombra e a subestimar quando há luz solar.

Foi observado que das 20:00h às 22:00 h, a diferença entre temperatura rural e urbana se manteve negativa, invertendo a situação das 23:00 h às 06:00 h, portanto foram realizadas duas comparações distintas de acordo com os horários das simulações e tomadas as médias entre tais horários, apresentadas na figura 11 comparados aos valores estimados através da equação 2.

Os autores explicam que o ajuste proposto para o intervalo de FVC 0,68 a 0,82 o que justifica a aderência dos resultados propostos pela equação 2 no gráfico da figura b.

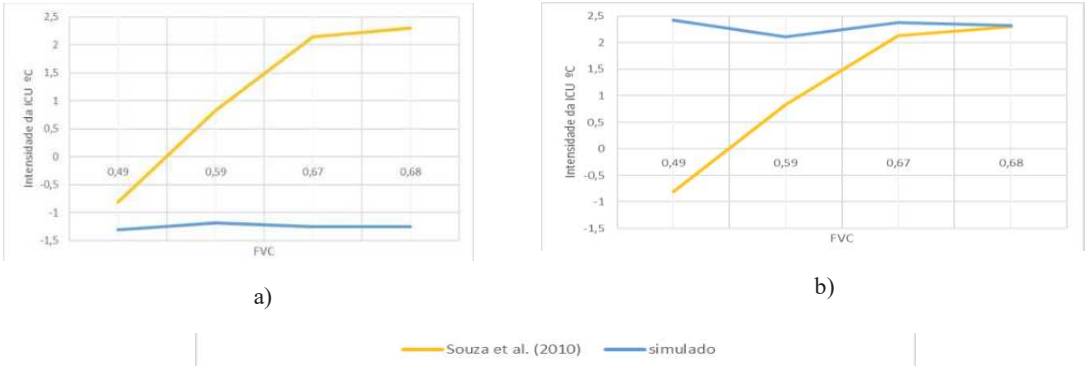


Figura 11 – Comparativo dos resultados simulados com apresentados por Souza et al (2010) (AUTORES, 2021).

5. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados e discussão com outros estudos já publicados, foi possível analisar a influência dos principais parâmetros que norteiam a ocorrência das ICUs tais como: temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento, fator de visão do céu e cobertura vegetal.

Os materiais construtivos através de suas propriedades térmicas, principalmente a absortância e a emissividade contribuem para o aquecimento das superfícies urbanas, bem como a escassez de cobertura vegetal, visto que o receptor 4, mais próximo da vegetação apresentou no geral, temperatura do ar inferiores se comparado aos outros.

Os quatro receptores estudados possuem valores de FVC próximos, o que não possibilitou inferir sobre a influência deste parâmetro nas ICUs. A fórmula proposta por Souza *et al.* (2010) se mostrou promissora para estimar a intensidade máxima das ICUs acima de 0,68.

A maior intensidade de ICU encontrada foi de 3,4ºC durante a madrugada e no período da tarde, valor próximo ao encontrado na literatura, a ser comprovado através de medições locais a posteriori, sobretudo em áreas de ocupações industriais.

O registro da influência dos fenômenos associados às trocas de calor em áreas urbanas que dependem de construções amplas e com materiais de elevada emissividade, como alvenaria de blocos de concreto, cobertura de telhas metálicas e pavimentos de concreto ou asfalto, é essencial para a compreensão da abrangência do impacto das ocupações industriais no clima urbano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorin, M.C.C.T. (2010) Climatologia e Gestão do Espaço Urbano. Revista Mercator. Disponível em: www.mercator.ufc.br

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 15220-2 (2005) Desempenho Térmico de Edificações.

Effat, H. A.; Hassan, O.A.K. (2010) Change detection of urban heat islands and some related parameters using multi-temporal Landsat images; a case study for Cairo city, Egypt Urban Clim.

Erell, E.; Pearlmutter, D.; Williamson, T. (2010) Urban Microclimate: Designing the Spaces between Buildings. London: Earthscan.

Gál, C. V.; Kántor, N. Modeling mean radiant temperature in outdoor spaces, A comparative numerical simulation and validation study. Science Direct vol. 32, June, 2020 .

Gartland, L. (2010). Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas / Lisa Gartland; Tradução Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos.

Guawardena, K. R. *et al.* (2017) Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity Sci. Total Environ.

INMET. Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Fundamentos das Normais Climatológicas do Brasil, 2018. Disponível em:< http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em 18 de janeiro de 2021.

Krüger, E. et al. (2012). Urban heat island and differences in outdoor comfort levels in Glasgow, UK. Theoretical and Applied Climatology.

Maciel, C, R. (2014) Condições microclimáticas de espaços abertos: simulação de estratégias por meio do software Envi-met. Tese de doutorado. UFMT, Cuiabá.

Mohan, M. et al. (2020) Industrial heat island.: a case study of Angul- Talcher region in India. In: Theoretical and Applied Climatology.

Ningrum, W. (2017) Urban Heat Island towards Urban Climate. Global Colloquium on GeoSciences and Engineering.

Oke, T.R. (1981) Boundary layer climates. 2ª edição.

Romero, M. A. B. et al.(2019) Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas. Brasília: Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo; ETB. DOI: http://dx.doi.org/10.18830/ISBN.978-85-67405-25-4.

Silva, I, C. S. (2017) Índice Ambiental Urbano (IAU): uma contribuição ao estudo do planejamento e do conforto térmico em espaços abertos. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Soltani A, Sharifi E (2017) Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide Front Archit Res 6: 529 - 538. https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.08.001

Souza, L.C.L. et al. (2010) Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escla do pedestre. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 155-167, out./dez. 2010.

Singh, P.; Mahavedan, B.; (2017) Heat Island Effect in an Industrial Cluster –Identification, Mitigation and Adaptation. The Energy and Resources Institute.

Stewart, I. D.; Oke, T. R. (2012) Local Climate Zones for urban temperature studies. Bull. Am. Meteorol. Soc., v. 93, n.12.

Theeuwes N. E. et al. (2015) Cool city mornings by urban heat. Environ Res Lett 10: 114022.

Ugeda Júnior, J.C. e Amorim, M.C. de C.T. (2016). Reflexões acerca do sistema clima urbano e sua aplicabilidade: pressupostos teórico-metodológicos e inovações técnicas. Revista do Departamento de Geografia.

Universidade de Wyoming. College of Engineering. Department of Atmospheric Science. Disponível em http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html. Acesso em: 26 de janeiro de 2021

Zhang, Z. et al. (2016) Life Cycle Analysis of Cool Roof in Tropical Areas Proc. Engineering vol 169 (Amsterdam: Elsevier).