

I

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO**

Daniel Conforte da Silva Lemos

A influência de cânions urbanos no conforto térmico: **uma abordagem cronomorfológica**

Juiz de Fora
2022

Daniel Conforte da Silva Lemos

Influência dos cânions urbanos no conforto térmico: **Uma abordagem cronomorfológica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.
Área de concentração:

Orientador: Prof. Dr. Fernando Tadeu de Araújo Lima

Coorientador: Profa. Dr. Sabrina Barbosa

Juiz de Fora
2022

Imprimir na parte inferior, no verso da folha de rosto a ficha disponível em:

<http://www.ufjf.br/biblioteca/servicos/usando-a-ficha-catalografica/>

Daniel Conforte da Silva Lemos

Influência dos cânions urbanos no conforto térmico: **Uma abordagem cronomorfológica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.
Área de concentração:

Aprovada em (dia) de (mês) de (ano)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Tadeu de Araújo Lima
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Sabrina Barbosa
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Caio Frederico e Silva
Universidade de Brasília

Prof. Dr. Fábio Sanches
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho aos meus pais e amigos que me auxiliaram e me deram suporte, e à cidade de Juiz de Fora.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força, inspiração e todas as bênçãos concedidas por Ele durante toda a trajetória.

Ao meus pais pelo apoio, carinho e incentivo durante todo o mestrado. Em especial à minha mãe, minha confidente, e melhor amiga, por todos os desabafos e todo o apoio, ao meu pai pelas conversas e pelas cervejas durante todo o processo. A meus irmãos Pedro e Matheus por todas as risadas e momentos.

A minha vó Zely, e à minhas tias queridas por todo o carinho e apoio, aos meus avôs Alvano e Carlinhos que olham por mim lá do Céu.

A Thaiza, por todo apoio, carinho, incentivo e ótimos momentos juntos, que foram primordiais. Aos meus digníssimos orientadores Fernando e Sabrina por toda sabedoria, paciência e incentivo, assim como pelo crescimento intelectual e profissional proporcionado. Aos professores Fábio e Caio pelas brilhantes contribuições durante a consolidação do trabalho.

Aos meus amigos Mauro, João Paulo, e Gabriel, grandes companheiros que me apoiaram, incentivaram e proporcionaram ótimos momentos. Um agradecimento especial ao amigo Leonardo, não só pelo apoio, como também pelo auxílio nas análises estatísticas.

Aos usuários do fórum do software Ladybug Suite Tools pela ajuda no processo de aprender a utilizar o software, pelas dúvidas sanadas, em especial ao Chris Mackey, Theodore Galanos e Mostapha Sadeghipour por toda ajuda que foi primordial para o desenvolvimento do trabalho. Ao Phillip Galvan, pelos tutoriais desenvolvidos por ele que foram postados na plataforma do Youtube, que foram primordiais para que o trabalho se desenvolvesse.

A CAPES pela bolsa de estudos.

“Em meio a tantas riquezas,
montanha fauna e flora
como não lembrar,
dessa encantada cidade querida Juiz de Fora,
linda e acolhedora
E que tem fama de carioca,
por ser pertinho do Rio de Janeiro,
é chamada mineiroca,
quem conhece sabe bem,
a beleza da região inteira,
é cheia de indústria e ferrovias
nessa cidade mineira,
antiga bela riqueza,
Um mirante muito belo,
temos parque de exposições
e também um lindo castelo,
gente bonita é mato,
que cresce na beira do rio,
um clima bem temperado,
as vezes quente as vezes frio,
tenho orgulho de ser daqui,
e repito a qualquer hora,
amo a minha cidade
e sou de Juiz de Fora.”

Poema de Rosa Maria de Oliveira

RESUMO

Com as mudanças climáticas e a tendência de intensificação da urbanização nas cidades de hoje em dia, novas pesquisas sobre o conforto nas áreas urbanas vêm ganhando crescente atenção, especialmente as que usam de ferramentas computacionais para avaliar a qualidade ambiental em diversas escalas. Os processos de urbanização geralmente ocasionam a criação de ilhas de calor urbanas e a morfologia urbana é um dos fatores que mais impacta a percepção térmica dos usuários ao limitar ou permitir a incidência solar e ventos locais, interferindo no conforto térmico percebido pelas pessoas. Assim, por meio de abordagens paramétricas, o presente trabalho visa analisar como mudanças na morfologia urbana impactaram as condições térmicas de um cânion urbano da área central de Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. As análises, que compararam três momentos diferentes da história (1940, 1980 e 2020) e um cenário hipotético, foram realizadas com o software *Ladybug Suite Tools / Grasshopper* para o software *Rhinoceros*; e foram baseados no Índice de Clima Térmico Universal (UTCI). Os mapas gerados indicam as mudanças no conforto térmico local durante seu desenvolvimento histórico. Os resultados demonstraram que, conforme a morfologia urbana se adensou e se verticalizou com o tempo, mais espaços sombreados foram criados durante períodos quentes do dia, que registraram uma redução de até 7°C do UTCI. Já no período noturno, o fenômeno se inverteu, pois as fachadas dos edifícios liberam o calor armazenado no decorrer do dia, e assim, foi registrada a diferença de até 1°C em áreas próximas aos edifícios do cânion em comparação com áreas abertas. Portanto, isso demonstra que o processo de urbanização que ocorreu com o passar dos anos, afetou fortemente as condições térmicas do cânion ao nível do pedestre.

Palavras-chave: Análise Computacional. Cânions Urbanos. Conforto térmico. Modelagem de informação da cidade. Urbanismo Paramétrico.

ABSTRACT

With climate change and the trend of intensifying urbanization in nowadays cities, new research on comfort in urban areas has been gaining increasing attention, especially those that use computational tools to assess environmental quality at different scales. Urbanization processes usually lead to the creation of urban heat islands and the urban morphology is one of the factors that most impacts the pedestrian's thermal perception by limiting or allowing solar incidence and local winds, interfering with the thermal comfort perceived by people. Thus, through parametric approaches, the present work aims to analyze how changes in urban morphology impacted the thermal conditions of an urban canyon in the central area of Juiz de Fora, Minas Gerais, Brazil. The analyses, which compared three different moments in history (1940, 1980 and 2020) and a hypothetical scenario, were performed with Ladybug Suite Tools / Grasshopper software for Rhinoceros software; and were based on the Universal Thermal Climate Index (UTCI). The UTCI maps indicates changes in local thermal comfort during its historical development. The results showed that, as the urban morphology became more denser and more verticalized over time, more shaded spaces were created during hot periods of the day, which recorded a reduction of up to 7°C in the UTCI. At night, the phenomenon reversed itself, as the facades of the building's fabric release the heat stored during the day, and thus, a difference of up to 1°C was recorded in areas near the buildings in the canyon, when compared to open spaces. Therefore, this demonstrates that the urbanization process that has taken place over the years has strongly affected the thermal conditions of the canyon at the pedestrian level.

Keywords: Computational Analysis. Urban Canyons. Thermal comfort. City information modeling. Parametric urbanism

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Ilustração aproximada de uma ilha de calor urbana.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 2: Aproximação generalizada do efeito de mudanças na cobertura de terra e seu efeito nos processos de evaporação, infiltração, escoamento e radiação refletida/absorvida.	10
Figura 3: Ilustração de uma forma típica de uma ICU atmosférica em uma mesoescala, sem a interferência dos ventos locais	11
Figura 4: Ilustração do efeito “pluma” em uma ICU com a ação de ventos moderados locais	12
Figura 5: Ilustração demonstrando os diferentes parâmetros existentes na formação de uma ICU.	21
Figura 6: Processos de áreas verdes que contribuem para a mitigação de efeitos de ICU.	24
Figura 7: Razão H/W em um cânion urbano	26
Figura 8: Processo de cálculo do FVC.	29
Figura 9: Efeito de diferentes orientações axiais nas condições térmicas de um cânion.....	32
Figura 14: Mapa demonstrando a localização de Juiz de Fora.	54
Figura 15: Traçado urbano de Juiz de Fora definido por Halfeld em 1855.....	55
Figura 16: Layout urbano da área central de Juiz de Fora.....	57
Figura 17: Perspectiva da extensão do cânion urbano da Rua Halfeld, explicitando uma possível ilha de calor em uma porção mais adensada do cânion, as áreas verdes existentes e uma estimativa da dimensão das camadas das ilhas de calor. .	58
Figura 18: Médias mensais de temperatura do ar e radiação horizontal global, entre os anos de 1981 e 2010.....	59
Figura 19: Médias mensais de precipitação acumulada e umidade relativa, entre os anos de 1981 e 2010.....	59
Figura 20: Rosa dos ventos indicando as velocidades e direções dos ventos predominantes em Juiz de Fora, os dados foram extraídos do arquivo climático “.epw” e simulados ao longo de um ano.....	60
Figura 10: Recorte delimitado para as análises.	62
Figura 11: Esquema de construção das simulações baseado nos softwares e plugins utilizados.	67
Figura 12: Sobreposição de mapas de simulações da morfologia de 1980.	Erro! Indicador não definido.
Figura 13: Exemplos de gráficos de resíduos de simulações de <i>CFD</i>	71
Figura 21: Mapa de gabaritos entre os anos de 1940 e o cenário hipotético.	75
Figura 22: Mapa de Razão H/W entre os anos de 1940 e o cenário hipotético.	77
Figura 23: Mapa de <i>Floor Space Index</i> entre os anos de 1940 e cenário hipotético.	79
Figura 24: Mapa de <i>Ground Space Index</i> entre os anos de 1940 e o cenário hipotético.....	81
Figura 25: Análises de FVC entre os anos de 1940 e o cenário hipotético.	83
Figura 26: Mapas de velocidade dos ventos às 8h no solstício de inverno (21/06)...	86
Figura 27: Mapas de velocidade dos ventos às 8h no solstício de verão (21/12).	88
Figura 28: Mapas de velocidade dos ventos às 12h no solstício de inverno (21/06).	90
Figura 29: Mapas de velocidade dos ventos às 12h no solstício de verão (21/12). ..	91
Figura 30: Mapas de velocidade dos ventos às 16h no solstício de inverno (21/06).	93

Figura 31: Mapas de velocidade dos ventos às 16h no solstício de verão (21/12). ..	95
Figura 32: Mapas de velocidade dos ventos às 20h no solstício de inverno (21/06).	96
Figura 33: Mapas de velocidade dos ventos às 20h no solstício de verão (21/12). ..	98
Figura 34: Mapas do índice UTCI às 8h no solstício de inverno (21/06).	100
Figura 35: Mapas do índice UTCI às 8h no solstício de verão (21/12).	102
Figura 36: Mapas do índice UTCI às 12h no solstício de inverno (21/06).	104
Figura 37: Mapas do índice UTCI às 12h no solstício de verão (21/12).	106
Figura 38: Mapas do índice UTCI às 16h no solstício de inverno (21/06).	107
Figura 39: Mapas do índice UTCI às 16h no solstício de verão (21/12).	109
Figura 40: Mapas do índice UTCI às 20h no solstício de inverno (21/06).	111
Figura 41: Mapas do índice UTCI às 20h no solstício de verão (21/12).	112

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Classificações de escalas climáticas segundo Ribeiro (1993).	9
Tabela 2: Características básicas de ICU de Superfície e Atmosférica.	12
Tabela 3: Resumo dos estudos sobre ICU abordados nessa seção.	18
Tabela 4: Estudos sobre cânions urbanos abordados nessa seção.	34
Tabela 5: Classificações de estresse térmico segundo os índices PMV, PET e UTCI.	42
Tabela 6: Estudos sobre software de análise de conforto térmico abordados nessa seção.	50
Tabela 7: Procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa.	53
Tabela 8: Fases de desenvolvimento de Juiz de Fora.	56
Tabela 9: Parâmetros da legislação utilizados na modelagem do cenário hipotético.	62
Tabela 10: Principais parâmetros atribuídos ao algoritmo UWG de acordo com o ano de análise.	63
Tabela 11: Parâmetros de radiação considerados por cada software.	65
Tabela 12: Categorias de desconforto térmico.	68
Tabela 13: Tamanhos de célula e níveis de refinamento utilizados nas análises de <i>CFD</i>	70
Tabela 14: Dados de velocidade e direção dos ventos para o solstício de inverno e verão.	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. FUNDAMENTAÇÃO	7
2.1. Caracterização do clima urbano e das ilhas calor urbanas	7
2.1.1. Clima urbano e sua influência em uma ilha de calor	13
2.1.2. Variáveis envolvidas em uma ilha de calor	20
2.2. Cânions urbanos	25
2.2.1. Razão H/W	26
2.2.2. Fator de Visão de Céu (FVC)	29
2.2.3. Orientação axial de cânions urbanos	32
2.2.4. Áreas verdes e corpos d'água em cânions urbanos	33
2.3. Análises computacionais e conforto térmico urbano	35
2.3.1. Análises algorítmico-paramétricas urbanas	36
2.3.2. Índices de conforto térmico	38
2.3.3. Software de análise de conforto térmico	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1. Breve histórico e caracterização de Juiz de Fora	53
3.2. Caracterização climática de Juiz de Fora	58
3.3. Coleta de dados	61
3.4. Modelagem	61
3.4.1. Modificação do arquivo climático	63
3.5. Simulações de UTCI	64
3.6. Simulações de <i>CFD</i>	69
3.7. Cálculo de parâmetros de densidade	72
4. RESULTADOS E ANÁLISE	73
4.1. Análises de fatores morfológicos	73
4.2. Análises de <i>CFD</i>	84
4.3. Análises de UTCI	99
5. CONCLUSÃO	114
6. REFERÊNCIAS	117

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A urbanização acelerada que ocorre nas cidades hoje em dia ocasiona o desmatamento de vegetações nativas, e, por consequência, uma decorrente impermeabilização do solo com o uso de materiais característicos da construção civil como o concreto e asfalto. Este processo altera os ecossistemas naturais, reduz a umidade relativa do ar, e assim, são criados diferentes microclimas em meio ao traçado urbano das cidades nos quais a temperatura do ar é maior do que em áreas rurais ou vizinhas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), e são definidos como as ilhas de calor urbanas (ICU). Este aumento da temperatura é relacionado com os materiais utilizados na construção civil, que absorvem e retêm mais radiação solar do que materiais de origem natural, e assim, ocasionam um aumento da temperatura do ar e das superfícies (KIM; BROWN, 2021; BORNSTEIN, 1968; OKE, 1982; TAHA, 1997; TRINDADE AMORIN, 2005).

Johansson *et al.* (2014) destacam que o fenômeno das ilhas de calor urbanas estimulou o surgimento de diversas pesquisas e estudos sobre conforto térmico humano e desempenho climático em espaços urbanos. Isto ocorreu pois o ambiente térmico em espaços externos urbanos é mais complexo, pois existe uma maior variação temporal e espacial de temperatura do que em espaços internos e é influenciado por uma ampla gama de fatores macro e microclimáticos. Desta maneira, fica claro que o clima de uma cidade impacta diretamente na manifestação e na intensidade do fenômeno das ICU. Oke (1982) e Gartland (2012) destaca que o fenômeno das ICU é visto como benéfico em cidades frias localizadas em latitudes elevadas. Todavia, em outros lugares no mundo, especialmente no verão e em áreas de clima tropical, o fenômeno se intensifica e, assim, se caracteriza como um problema.

Somado ao efeito das ICU, Kim e Brown (2021) ponderam que as mudanças climáticas que estão ocorrendo afetam diretamente o fenômeno. As mudanças climáticas e as ICU interagem criando os eventos de ondas extremas de calor, que geram alterações nas condições térmicas de um microclima de uma cidade. Porém, Zhang *et al.* (2010) frisam que os processos de urbanização causam um impacto mais direto na manifestação das ICU do que as mudanças climáticas. O efeito da urbanização descontrolada foi ressaltado pelos autores ao evidenciarem um aumento

gradual da temperatura do ar em áreas que se mais se adensaram com o passar do tempo. Santamouris *et al.* (2017) salientam que as ICU podem causar diversos problemas urbanos como o mau-funcionamento de infraestruturas urbanas por sobreaquecimento, enchentes urbanas devido à impermeabilização de superfícies e aumento das precipitações.

Quanto aos efeitos à saúde humana, Teixeira e Amorim (2017) ressaltam que quando os habitantes são submetidos a situações de estresse térmico por longos períodos, isso pode acarretar a prejuízos leves e até graves a saúde, como desidratação, irritabilidade, desmaios, exaustão por calor e até a morte. E isso é um problema especialmente pessoas pertencentes a grupos de risco como idosos, crianças, cardíacos, asmáticos

Assim, pode-se dizer que as ICU estão diminuindo a qualidade de vida e habitabilidade de áreas urbanas e suburbanas. De acordo com o relatório da Organização das Nações Unidas de 2018, estima-se que 28% da população global passe a viver em grandes centros urbanos até o ano de 2030, portanto, o impacto das ICU pode ser extremamente consequencial. E dessa maneira, é importante entender o fenômeno das ICU de maneira mais profunda, buscando entender suas peculiaridades e como ele se manifesta, sua intensidade e quais fatores (físicos, naturais ou climáticos) que estão envolvidos na sua criação.

De acordo com a literatura analisada, a morfologia urbana foi citada por ser um dos fatores que mais influenciam a criação de ICU em espaços urbanos. Todavia, diferentes conformações urbano-morfológicas podem limitar ou permitir a absorção da radiação solar, como também barrar a circulação dos ventos locais, assim resultando em diferentes condições de conforto. Assim, os cânions urbanos se tornaram foco de diversas pesquisas sobre conforto térmico em espaços urbanos (ASSIS *et al.*, 2013; EMMANUEL; JOHANSSON, 2006; MAYER; HÖPPE, 1987; OKE, 1988; PEARLMUTTER; BITAN; BERLINER, 1999).

Silva (2013) ressalta que os profissionais de projeto do espaço urbano escasseiam de ferramentas e indicadores para avaliar o impacto provocado pelas mudanças decorrentes do processo de urbanização. Estas ferramentas podem ser úteis para auxiliar projetistas a desenvolverem e avaliarem o desempenho projetos, ou analisarem um microclima urbano já consolidado.

Dentre as ferramentas existentes, destacam-se tipos de software de simulação computacional, que servem de apoio a pesquisas e análises de qualidade do espaço

urbano. Estas ferramentas computacionais podem auxiliar a compreender de forma mais profunda o dinamismo e a complexidade existente no clima urbano, e especialmente os microclimas. O uso dessas ferramentas podem auxiliar projetistas a identificarem índices de conforto térmico e associá-los a um projeto destinado a determinada configuração urbano-morfológica para possibilitar atingir um maior conforto térmico espacial. Como exemplo, os softwares de *Computer Fluid Dynamics*¹ (*CFD*) são ferramentas computacionais que realizam cálculos com base nas leis da termodinâmica e mecânica dos fluidos, e assim, permitem realizar análises de circulação de ventos em espaços urbanos, desse jeito, pode auxiliar pesquisas de conforto térmico.

Naboni *et al.* (2017) ponderam que o campo de estudos de conforto térmico por meio de simulações é um campo em aberto. Desse modo, é difícil encontrar ferramentas de simulação que o façam com toda a gama de fatores termodinâmicos que influenciam a natureza de um ambiente urbano. Todavia, nos últimos 5 anos, pesquisadores se empenharam em aprimorar a modelagem de microclimas em softwares de simulação, e assim, as ferramentas de simulação e análises computacionais estão constantemente em desenvolvimento.

Desta forma, o presente estudo visa como as mudanças na morfologia urbana que ocorreram com o tempo impactaram as condições térmicas da Rua Halfeld, um cânion urbano na área central da cidade de Juiz de Fora, uma área metropolitana no Estado de Minas Gerais, Brasil (OECD, 2021). O centro da cidade se desenvolveu sem considerar os efeitos de processos de verticalização, e instrumentos legais para ordenar o crescimento urbano só foram criados em 2000, com a criação do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (JUIZ DE FORA, 2016). A Rua Halfeld é uma das principais ruas comerciais de Juiz de Fora, e, durante seu desenvolvimento, a rua passou por um processo de verticalização e adensamento urbano, e assim, o conforto térmico do espaço pode ter se alterado.

Assim sendo, a relevância do presente estudo se baseia em criar uma abordagem histórica/cronológica para avaliar como processos de verticalização e densificação urbana afetam as condições de conforto térmico em espaços externos, em uma cidade de clima subtropical úmido (ALVARES, et al., 2013) como o caso de

¹ Softwares de *CFD* possuem ampla aplicação em análises de ventilação natural em edifícios, pois são baseados em equações de leis da física de termodinâmica e mecânica dos fluidos. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/fluids>> Acesso em: 23/02/2022

Juiz de Fora. Quanto aos softwares de simulação utilizados, pode-se dizer que a dissertação partiu de uma abordagem híbrida. Foram utilizados softwares de diferentes *engines*² de simulação para analisar o conforto térmico espacial. Desta maneira, foram utilizados softwares de simulação térmica e climática, juntamente com softwares de *CFD* para delimitar o conforto térmico espacial. Cabe ressaltar que poucas análises foram feitas em climas semelhantes, principalmente ao correlacionar com uma abordagem de estrutura cronológica e híbrida.

1.2. Objetivos

Objetivo geral: identificar como as diferentes morfologias afetaram o conforto térmico no cânion urbano da Rua Halfeld, por meio do uso de análises feitas em ferramentas computacionais ao longo de quatro períodos diferentes, com 40 anos de diferença entre si. Portanto, foram abordados os anos de 1940, 1980 (a partir de fotos de arquivos históricos) e 2020 e um cenário hipotético.

Objetivos específicos: como objetivos específicos, pode-se citar os seguintes:

- a) levantar a morfologia dos quatro momentos de análise por meio de fotografias e arquivos históricos, assim como pelo auxílio de softwares de modelagem.
- b) realizar simulações de *CFD* e do índice UTCI para cada ano e hora de análise utilizando o software *Ladybug Suite Tools*.
- c) Identificar as condições de conforto térmico nos quatro momentos analisados a partir dos mapas de UTCI gerados.

1.3. Estrutura da dissertação

O trabalho está estruturado nos seguintes capítulos:

Capítulo 1: este capítulo introduz o estudo, e propõe a contextualização do fenômeno de estudo, que são as ilhas de calor em cânions urbanos em ambientes de clima tropical, e o uso de ferramentas computacionais como suporte nas análises de condições térmicas em cânions urbanos. São demonstrados também a hipótese delimitada no estudo, objetivos gerais e específicos, assim como a estrutura da tese.

²*Engine*, ou “motor” do inglês, é um termo utilizado para definir um conjunto de ferramentas computacionais configuradas para desempenhar uma tarefa específica na computação. Disponível em: < <https://pt.stackoverflow.com/questions/284935/o-que-%C3%A9-uma-engine>>. Acesso em: 21/10/2021

Capítulo 2: revisão de bibliografia com base em três tópicos de estudo diferentes: ilhas de calor urbanas, cânions urbanos e conforto térmico urbano. Os tópicos foram organizados em três seções para cada um, buscando abordar estudos feitos em diferentes climas no mundo, para assim ilustrar como as condições térmicas variam de acordo com a área analisada e quais fatores climáticos e físicos estão envolvidos nos fenômenos.

Capítulo 3: é abordado um breve histórico sobre a formação da cidade de Juiz de Fora, e a área de abordagem da pesquisa é caracterizada. É feita a caracterização climática de Juiz de Fora, como também é proposta a metodologia utilizada no estudo, com base na teoria agregada na revisão bibliográfica. Assim, foram detalhados os processos de coleta dos dados utilizados, a criação do modelo de análise e montagem das simulações no software escolhido.

Capítulo 4: este capítulo apresenta os resultados das análises computacionais feitas. Primeiramente são expostos os resultados das análises de parâmetros de densidade urbana, pautados na literatura de *Pont e Haupt (2010)*. Posteriormente serão expostos os resultados das análises de *CFD*, seguidos das análises do índice de conforto térmico escolhido, o *Universal Thermal Climate Index*.

Capítulo 5: o estudo é resumido e concluído baseando-se em reflexões sobre os achados. São demonstradas também as limitações da pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO

Neste capítulo foram reunidos e discutidos trabalhos relacionados a cada tópico abordado na pesquisa, desta forma, foram abordados estudos sobre clima urbano, ilhas de calor urbanas, cânions urbanos e o conforto térmico urbano, e os tópicos foram detalhados nas suas respectivas seções. Assim, na primeira seção foram apresentados diferentes conceitos e caracterizações sobre as escalas e agentes físicos e climáticos envolvidos no clima urbano de cidades. Na mesma seção foi caracterizado e abordado o fenômeno das ilhas urbanas de calor, para criar um panorama geral dos fatores envolvidos na sua criação, e como o fenômeno se manifesta diferente em cada clima e área no mundo.

Na segunda foram abordados os cânions urbanos, e assim, foram expostos diversos estudos feitos pelo mundo, demonstrando como as variáveis físicas e climáticas interferem nas condições térmicas dentro deste tipo de morfologia urbana.

Na terceira seção foram abordados estudos de conforto térmico, assim como os diferentes índices criados, e suas aplicações em estudos de conforto térmico em espaços públicos.

2.1. Caracterização do clima urbano

Inicialmente, é necessário definir o primeiro tópico deste estudo que engloba diferentes escalas de cidades, e é objeto de constante discussão atualmente, que é o clima urbano. De acordo com Borges (2006), os estudos sobre clima urbano não são recentes. Um dos primeiros foi feito no início do século XIX por Luke Howard, um pesquisador de Londres que publicou um trabalho no ano de 1818 que observou diferenças de temperatura do ar entre áreas urbanas e rurais da cidade.

Monteiro (1976) introduziu o Sistema Clima Urbano (SCU), um sistema baseado na Teoria Geral dos Sistemas criada por Ludwig Von Bertalanffy³, um dos maiores avanços no estudo da climatologia no Brasil e que influenciou diversos trabalhos sobre clima urbano nacionalmente. O autor pondera que a cidade é a “casa” do ser humano, e é local onde a maior interação entre homem e natureza ocorre. E

³ Biólogo austríaco que fundou a Teoria Geral dos Sistemas, um estudo interdisciplinar que estabelece teorias e formulações conceituais que possam ter aplicações na realidade empírica. (WECHOWICZ, 2000)

com essa interação, o homem modifica a natureza, o que ocasiona uma série de mudanças pontuais e que se juntam, e essas mudanças, muitas das vezes, são caracterizadas pela edificação urbana. Junto a isso, soma-se outros elementos como o sistema viário interno e regional, aterro de morros, represas e outros corpos d'água e outras alterações na topografia local. Aliado a todos esses fatores, ainda se têm a dinâmica da população local, que, de acordo com o autor: “faz com que as cidades sejam os lugares onde as resultantes ambientais configuram-se como obra conjunta de uma natureza retrabalhada e aperfeiçoada aos propósitos do viver humano” (MONTEIRO, 2003, p.10). Assim, nota-se que o autor considera a interação entre o homem e a natureza como uma ação de coparticipação, e não como uma relação antagônica.

Silva (1999) acrescenta que o clima urbano é diferente do de uma área natural, não construída. O autor salienta que o clima urbano é resultante da ação antrópica sobre o espaço, isto é, os processos de urbanização alteram características do ambiente urbano. Romero (2001) complementa que o clima urbano é influenciado pelos materiais da construção civil, isto é, os materiais que constituem as superfícies urbanas possuem um menor valor de albedo⁴, maior capacidade calorífica⁵ e condutividade térmica⁶. Os materiais alteram a rugosidade urbana, e assim, geram uma maior fricção entre as superfícies e os ventos locais. Dessa maneira, as superfícies urbanas alteram o balanço da radiação no meio urbano, e por consequência, é gerado um aumento na temperatura do ar e uma redução na umidade relativa do ar. Portanto, são criadas condições climáticas diferentes de áreas naturais, que muitas das vezes, prejudicam a qualidade térmica e climática destes espaços.

Nesse sentido, as condições térmicas urbanas variam de acordo com a escala em que são avaliadas. Dessa forma, Ribeiro (1993) classificou três escalas climáticas de diferentes níveis de condições térmicas, que variam de micro a mesoclimático. As escalas foram detalhadas segundo sua escala, condições climáticas, distância de influência e nível na Tabela 1.

⁴ Albedo é um parâmetro que mensura a quantidade de radiação solar que é refletida por uma ou um conjunto de superfícies. É calculado com base na razão entre a quantidade de radiação refletida pela quantidade de radiação recebida (ROMERO, 2000).

⁵ Capacidade térmica ou calorífica (comumente representada pela letra C), é uma grandeza física que estabelece a relação entre a quantidade de calor fornecida a um corpo e a consequente variação de temperatura ocasionada. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/capacidade-termica.htm>>. Acesso em: 23/10/2021.

Tabela 1: Classificações de escalas climáticas segundo Ribeiro (1993).

Escala	Condições climáticas	Distância de atuação	Nível
Mesoclima ou Clima Local	Caracterizado por variações dentro de um clima regional, que ocorrem devido a interferência de determinadas feições fisiográficas ou antrópicas da localidade, que ocasionam mudanças no fluxo energético ou no transporte de massa da circulação regional. Oliver e Fairbridge (1987) indicam que a configuração da topografia, o tipo de solo e cobertura vegetal se caracterizam como feições da localidade, que determinam o clima predominante do local.	O mesoclima pode abranger distâncias horizontais da ordem de centenas de quilômetros quadrados, e distâncias de 1200 a 2000 quilômetros de extensão vertical, e é restrito pela Camada Limite Planetária ⁷ .	Mesoclimático
Topoclima	Corresponde à derivações do clima local em decorrência da rugosidade do terreno. Assim, por consequência, criam-se diferentes condições climáticas.	Abrange entre 0,5 e 5 quilômetros de distância horizontal, e entre 50 e 100 metros de altura.	Topoclimático
Microclima	Definido pela interação de trocas gasosas e de energia entre feições ou estruturas particularizadas (que envolvem objetos, plantas e animais) dispostas na superfície da Terra e o ar que as envolve	Se manifesta em escalas próximas ao nível do pedestre	Microclimático

Fonte: Adaptado de Ribeiro (1993).

Assim, é importante enfatizar que o foco do presente estudo é na escala do microclima, que por sua vez, é usualmente focada na escala de um edifício. Contudo, a escala local de análise deve ser ampliada de forma a compreender a escala das vias e espaços urbanos destinados ao pedestre. Givoni (1969) frisa que devem ser compreendidos os elementos climáticos que influem no conforto térmico humano e na qualidade ambiental e climática dos espaços urbanos, especialmente para projetos construídos. E dentre estes elementos, podem ser citados: radiação solar, perda de calor radioativo de onda longa, temperatura e pressão do ar, ventos, umidade atmosférica, condensações e precipitações locais.

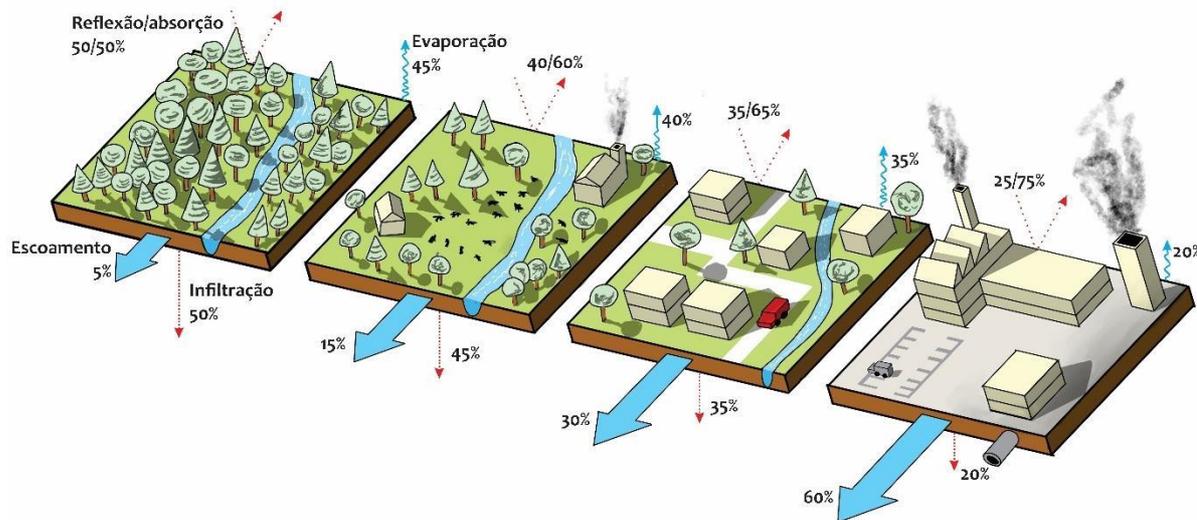
Dessa maneira, Duarte e Serra (2003) expõem que as cidades modernas são compostas por um aglomerado de diferentes microclimas urbanos, que são caracterizados por ilhas de frescor, bolsões de poluição atmosférica, mudanças no fluxo de ventos locais, e, as ilhas de calor urbanas, que são foco do presente estudo. As Ilhas de Calor Urbanas (ICU), são espaços urbanos cuja temperatura do ar é maior

⁷ Camada Limite Atmosférica ou Camada Limite Planetária, possui a altura típica de 1km, situando-se na baixa troposfera, e sofre influência direta da superfície terrestre (WALLACE, HOBBS, 2006).

quando em comparação com áreas rurais ou outras áreas vizinhas dentro das próprias cidades. Em suma, as ICU são espaços com baixa qualidade ambiental, e podem impactar a saúde dos habitantes de uma cidade.

Desta maneira, primeiramente deve-se entender quais fatores estão envolvidos na criação do fenômeno das ICU e como ele se manifesta. Assim, as mudanças que ocorrem na cobertura de solo (Figura 1), o desmatamento de áreas verdes nativas, e retirada de corpos d'água são os principais fatores que ocasionam a ocorrência de uma ICU. O fenômeno se forma, pois, superfícies naturais são substituídas por materiais que armazenam mais e refletem menos energia solar, e assim, é ocasionado um aumento da temperatura do ar. Desta forma, causa-se também uma alteração em processos de evaporação, infiltração e escoamento de água de chuvas, e por consequência, isso favorece a ocorrência de enchentes e outros problemas comuns em cidades contemporâneas (OKE *et al.*, 2017)

Figura 1: Aproximação generalizada do efeito de mudanças na cobertura de terra e seu efeito nos processos de evaporação, infiltração, escoamento e radiação refletida/absorvida.



Fonte: Adaptado de Oke *et al.* (2017)

A formação de uma ICU ocorre em diferentes camadas da atmosfera urbana de diferentes características e altitudes. Desta maneira, Fialho (2012) pondera que existem duas camadas no plano vertical das cidades, nas quais o fenômeno ocorre, que são:

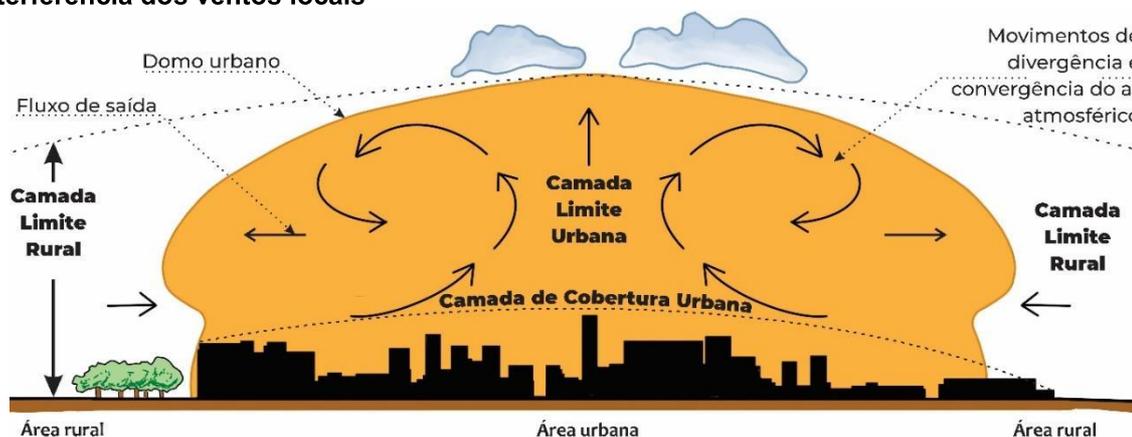
Camada de Cobertura Urbana (CCU): camada que se estende do solo até aproximadamente o nível médio da cobertura das edificações, e assim, é influenciada pelos processos em microescala que ocorrem em vias urbanas, entre edifícios etc.

Camada Limite Urbana (CLU): estende-se do nível médio da cobertura dos edifícios até a área de influência da cidade na atmosfera, variando conforme as condições meteorológicas vigentes. Esse fenômeno se desenvolve em locais com grande rugosidade urbana, e assim, pode reduzir a velocidade local dos ventos.

Voogt e Oke (2003) frisam que as camadas expostas anteriormente delimitam duas escalas distintas de manifestação das ICU, que variam de acordo com sua forma espacial, intensidade e localização de seu núcleo, que são as ilhas de calor de superfície e ilhas de calor atmosféricas. As ilhas de calor de superfície se formam abaixo da CCU, e se caracterizam pelo aquecimento das superfícies urbanas pela radiação solar, e que, por consequência, geram um aumento da temperatura do ar devido à irradiação dessa energia solar acumulada.

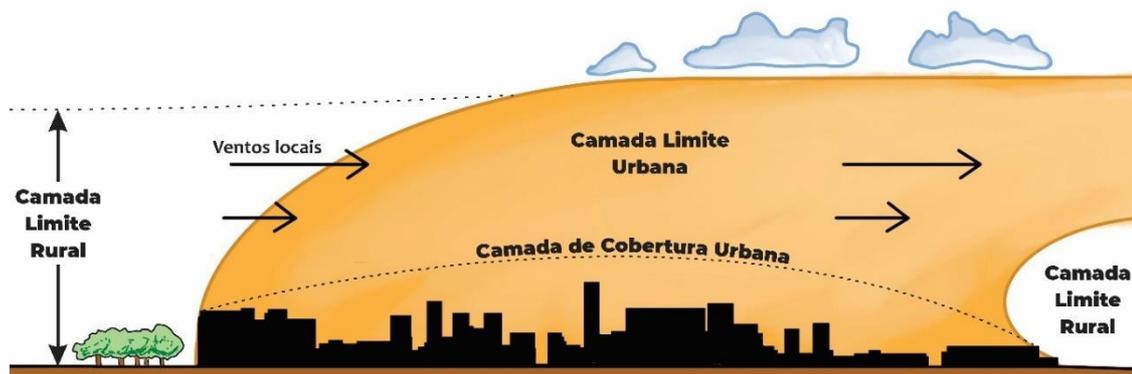
A ilha de calor atmosférica se forma entre a CCU e a CLU, criando um domo de ar aquecido conforme ilustrado na Figura 2. Clarke (1969) expõe que a ação de ventos moderados em altitudes próximas a CLU podem exercer um prolongamento do fenômeno a sota-vento e gerando a forma de uma “pluma”, que pode se alastrar por quilômetros, podendo atingir as áreas rurais próximas de acordo com a Figura 3.

Figura 2: Ilustração de uma forma típica de uma ICU atmosférica em uma mesoescala, sem a interferência dos ventos locais



Fonte: Adaptado de Oke (2002)

Figura 3: Ilustração do efeito “pluma” em uma ICU com a ação de ventos moderados locais



Fonte: Adaptado de Oke (2002)

Considerando as duas diferentes formas nas quais as ICU manifestam, é importante entender as diferenças de desenvolvimento no decorrer do dia e de intensidade entre os dois fenômenos, visto que ambos possuem diferentes escalas urbanas. A intensidade de ambos os tipos de ICU é calculada com base na diferença de temperatura entre a área urbana e rural, que geralmente é caracterizada por área aonde estações meteorológicas são instaladas. Outras características e diferenças entre as ICUs de superfície e atmosférica foram extraídas de estudos feitos pela *Environmental Protection Agency* dos EUA, e foram relacionadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características básicas de ICU de Superfície e Atmosférica.

Características	ICU Superfície	ICU Atmosférica
Desenvolvimento temporal	Presente em todas as horas do dia e noite Atinge maiores temperaturas durante o dia e no verão	Pequenas manifestações durante o dia ou pode ser inexistente Atinge maiores temperaturas durante o período noturno e inverno
Intensidade (Condições mais intensas)	Maior variação espacial e temporal: Dia: 10 a 15°C Noite: 5 a 10°C	Menor variação: Dia: -1 a 3°C Noite: 7 a 12°C
Método de Identificação	Medição indireta: sensoriamento remoto	Medição direta: Estação meteorológica fixa Transectos móveis ⁸
Representações típicas	Imagem termal	Mapa isotérmico Gráfico de temperatura

Fonte: Adaptado de *Environmental Protection Agency* (2008)

⁸ Transectos móveis consistem em veículos, equipados com sensores de temperatura e umidade fixados em uma haste de 1,5m, que percorre cidades para coletar dados climáticos em diversas partes (AMORIM, 2017)

Tendo em vista as duas maneiras com que as ICU se manifestam, cabe destacar que o foco do presente trabalho será nas ICU de superfície. O foco foi selecionado visto que é o tipo de fenômeno que é presente durante todo o decorrer do dia, tem uma maior variação temporal e espacial de temperatura durante o dia e a noite, e se manifesta próximo ao nível do pedestre, logo, seu impacto à saúde humana é mais direto. Desta forma, na próxima seção, serão apresentados estudos que abordaram as ICU de superfície pelo mundo.

2.1.1. Clima urbano e sua influência em uma ilha de calor

O clima geral de uma área é um fator que influencia na criação e na intensidade de uma ICU. Assim, de forma a ilustrar como o fenômeno se manifesta de forma diferente pelo mundo, nesta seção, serão apresentados diferentes estudos feitos em diferentes locais.

Medições foram feitas pelo uso de termômetros digitais instalado em metrô, ao longo de 16 linhas férreas em 1990 em Tóquio. Foram feitas 11 aferições em campo entre os dias 31 de maio de 1990 e 18 março de 1991, durante diferentes condições climáticas (tempos limpos, nublados etc.) As medições demonstraram um aumento gradual e estável de temperaturas de 1.0 a 1.5°C, durante o verão, entre áreas urbanas e suburbanas (YAMASHITA, 1996).

Steinecke (1999) realizou estudos de ICU em Reykjavík, na Islândia, uma cidade localizada em clima subpolar oceânico (Cfc) de acordo com a classificação climática de Köppen⁹. A cidade possui a temperatura média do ar de 4.3°C, portanto, possui baixas temperaturas e índices de radiação o ano todo devido ao ângulo solar. As análises de ICU foram feitas com base em medições utilizando termohigrógrafos¹⁰ e anemógrafos¹¹ que providenciaram dados de temperatura do ar, umidade relativa,

⁹ A classificação climática de Köppen é um sistema de classificação climática criada pelo climatologista alemão Wladimir Köppen em 1884, que fora atualizado com modificações na classificação climática pelo climatologista Rudolf Geiger, e assim, o sistema ficou conhecido como Sistema de Classificação Climática de Köppen-Geiger. O sistema divide a superfície terrestre em cinco principais grupos climáticos, e cada um é subdividido com base em padrões sazonais de precipitação e aumento ou decréscimo de temperatura. Os cinco grupos principais são (A) tropical, B (árido), C (temperado), D (continental) e E (polar) (GEIGER; ARON; TODHUNTER, 1995).

¹⁰ Aparelho de medição microclimática que registra a temperatura e umidade relativa do ar. Disponível em: <<https://www.engenhariacivil.com/dicionario/termohigrografo>>. Acesso em: 25/10/2021.

¹¹ Instrumento que registra continuamente a direção (em graus) e a velocidade do vento (em m/s). Disponível em: <<http://www2.fatecjabu.edu.br/estacao/index.php?page=instrumentos>>. Acesso em: 25/10/2021.

velocidade e direção dos ventos por hora. As medições realizadas entre novembro de 1991 e setembro de 1992, e esse período foi caracterizado por um inverno ameno, com temperaturas acima de zero, especialmente no período de janeiro. Por fim, foi evidenciada a existência de “ilhas frias urbanas”, ou melhor dizendo, espaços urbanos nos quais a temperatura se 4°C mais fria quando em comparação com áreas rurais, e assim, se tornam mais frias durante o verão.

Brazel *et al.* (2000) executou pesquisas ecológicas¹² de longa duração, que buscaram entender o efeito das ICU na cidade de Phoenix, no Arizona, nos Estados Unidos. As análises foram feitas de forma cronológica, utilizando dados climáticos disponíveis pela Rede Global de Clima Histórico, e abordaram dados do ano de 1900 até o ano de 1995. Por fim os autores destacaram uma ICU de magnitude de 3 a 8°C mais quente em áreas centrais do que as áreas rurais, e a análise cronológica destacou um aumento de 0.5°C por década, ao longo da última metade do século.

Bornstein (1968) e Gaffin *et al.* (2008) analisaram as ICU existentes em Nova Iorque. Utilizando transectos móveis em um helicóptero e dados de estações climáticas, foi possível coletar dados de temperatura do ar e pressão em diferentes alturas e áreas da cidade. Os resultados apontados por Bornstein (1968) indicaram uma diferença de temperatura máxima de 1.6 °C entre áreas urbanas abaixo de 25m de altura, e decresceu a zero acima de 300m de altura. Gaffin *et al.* (2008) examinaram que o efeito da ICU nas cercanias do Central Park variou entre 2 e 2.5 °C apenas, o que demonstra o efeito mitigador das áreas verdes urbanas. A análise cronológica feita pelo autor, através de dados climáticos disponíveis desde o ano de 1900, identificaram que o processo de urbanização que ocorreu na cidade de Nova Iorque é responsável por aproximadamente um terço do aquecimento que a cidade tem experienciado desde 1900. Este aquecimento ocorreu devido a verticalização, que reduziu a velocidade dos ventos na camada limite urbana.

Souza e Alvalá (2014) estudaram o efeito das ICU na cidade de Manaus, a partir de conjuntos de dados coletados entre os anos de 2000 e 2008 de estações meteorológicas presentes dentro da cidade e do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, localizado a 30km da cidade, para se obter a diferença de temperatura em dois lugares distintos. Os dados foram obtidos durante diferentes condições climáticas

¹² Tipo de pesquisa baseada em investigar as relações entre ecossistemas e o clima local, abordando questões de desertificação, urbanização, desmatamento etc. Disponível em: < <https://lternet.edu/network-organization/iter-a-history/>>. Acesso em: 26/10/2021.

e em diferentes altitudes. Assim, a maior diferença de temperatura média observada entre área urbana e rural detectada ocorreu nos meses de setembro e outubro, atingindo 2.12 e 2.08 °C de diferença. A temperatura máxima ocorreu durante as 14h e 15h, que variou entre 2.22 °C dentro o dossel urbano e 1.43 °C em camadas superiores.

Coltri *et al.* (2007) analisaram o efeito da morfologia e a intensidade da ICU de inverno, em áreas centrais da cidade de Piracicaba, no estado de São Paulo. As análises foram baseadas em imagens de dados térmicos infravermelhos extraídos do satélite *Landsat 7*¹³. Os dados foram extraídos nos dias 13/05/2002 (outono, época de safra) e no dia 17/08/2002 (inverno, período entressafra) e assim, foi verificado que o perfil geral da ICU de inverno de Piracicaba é diferente do observado na maioria dos centros urbanos. Isto é, foi verificado que a ICU é menos intensa nos bairros centrais e nas bordas da cidade, pois são locais com mais áreas verdes. Os autores definiram que o perfil da ICU de inverno de Piracicaba é, em média, 3.3 °C mais intensa que a ICU de outono. Esta variação ocorre devido a sazonalidade da cultura da cana-de-açúcar local, ou melhor dizendo, pelo fato de o solo da região ficar exposto no inverno, que contribui para o aumento da temperatura na zona rural. No outono o solo rural é coberto pela safra de cana, o que ameniza o fenômeno da ICU.

Teixeira e Amorim (2017) mapearam ICUs na cidade de Rancharia – SP, através de procedimentos de modelagem relacionando temperatura do ar com o tipo de uso de solo atribuído. Os autores utilizaram imagens do satélite *Landsat 7*, obtidas no dia 20 de janeiro de 2014 às 10:20. Dessa forma, na data analisada, a cidade estava sob influência da massa Tropical Continental, o que gerou ventos fracos de 1m/s vindos da direção leste, e sem precipitação, o que ocasionou a manifestação de ICU de até 5 °C de intensidade.

Peres *et al.* (2017) fizeram análises cronológicas do efeito das ICU na cidade do Rio de Janeiro, utilizando imagens obtidas através de satélites *Landsat* obtidas entre 1984 e 2015, cobrindo um período de 32 anos. Pelas imagens de satélite, foram mapeados quatro tipos diferentes de uso do solo na cidade: urbano, corpos d'água, vegetação e rural ou urbano de baixa densidade. Os resultados indicaram um

¹³ O satélite *Landsat 7* faz parte de uma série de 8 satélites lançados pelo programa estadunidense United States Geological Survey. Estes satélites foram enviados para sensoriamento remoto a partir de sensores instalados para gerar imagens da Terra que auxiliam os mais diversos tipos de estudos e pesquisas. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/landsat>>

aumento de 1.9°C e 0.9°C em áreas de uso urbano e urbano de baixa densidade respectivamente, com exceção de áreas vegetadas.

Nascimento e Oliveira (2012) analisaram o desenvolvimento das ICU em Goiânia de 1986 a 2010, utilizando imagens do satélite *Landsat 6* e técnicas de geoprocessamento para obter uma análise comparativa entre os anos. Os autores quantificaram e classificaram os dados de temperaturas de superfície de acordo com a proporção em porcentagem e área urbana em que as classes ocorrem. Assim, os autores identificaram que para a classe de temperaturas abaixo de 22°C , sua área reduziu cerca de 32,5% entre os anos. Ao passo em que as temperaturas de $22,1^{\circ}\text{C}$ a 24°C , diminuíram sua área em cerca de 15,4% entre os anos de 1986 e 2010. As classes de $24,1$ a 26°C , $26,1$ a 28°C e $28,1$ e 38°C (e cabe destacar que esta última categoria era inexistente no ano de 1986) apresentaram um aumento de 10,6%, 23,6% e 13,6%. Em suma, os resultados demonstraram que a urbanização ocasionou uma inversão na representatividade das classes de temperatura superficial, que passaram a oscilar além do predomínio de temperaturas abaixo de 24°C .

A manifestação do fenômeno das ICU varia de acordo com as condições meteorológicas prevalentes, isto é, o efeito das ICU é mais intenso durante clima calmo e limpo e fraco durante clima nublado e com ventos. Isto ocorre pois em dias de céu aberto, mais energia solar é coletada pelas superfícies urbanas, e por consequência, mais calor é liberado para o meio urbano (GARTLAND, 2008).

Estudos feitos por Clay *et al.* (2016) e Imran, Kala e Muthukumaran (2019) no clima temperado das cidades de Adelaide e Melbourne (respectivamente), na Austrália, buscaram relacionar a incidência das ICU com as condições meteorológicas predominantes. Os autores partiram de medições com o uso transectos móveis e simulações computacionais, e, fizeram as análises nos períodos de 2011 a 2015 e 2000 a 2009 respectivamente. Dessa forma, foi observado que a ICU é mais proeminente em climas de céu aberto, e sua incidência varia de acordo com as diferentes conformações de vias urbanas da cidade. Assim, as análises feitas durante clima limpo indicaram que as ICU nos parques urbanos da cidade, que possuem mais arborização, sofreu uma redução de 4°C . Foi constatado um aumento da intensidade das ICU de superfície de até 2.8°C em áreas mais adensadas.

Oke (1987) complementa as ICU atingem seu pico de temperatura durante o período noturno, pois à noite as superfícies urbanas passam a liberar toda a energia solar acumulada durante o dia, e assim, causam um aumento da temperatura do ar.

Dessa maneira, medições em campo realizadas através de transectos móveis na cidade de Granada, na Espanha, e Bucareste na Romênia buscaram identificar o efeito das ICU noturnas nas cidades durante dias nublados e dias limpos. Em Granada foi analisado que os picos de temperatura das ICU noturnas ocorreu em áreas mais adensadas, com edifícios mais altos e ruas mais estreitas. A diferença de temperatura nestas áreas em comparação com áreas rurais foi até 3.5 °C mais quente, ao passo em que próximo aos parques, a diferença de temperatura foi de apenas 1 °C, o que demonstra a capacidade mitigadora das áreas verdes. Em Bucareste, a ICU noturna indicou uma diferença de apenas 1 °C durante dias nublados, enquanto em dias de clima limpo, a intensidade da ICU foi de 3,6 °C. O maior pico de temperatura identificado ocorreu seis horas após o sol se pôr, e atingiu cerca de 4 °C de diferença entre áreas urbanas e rurais (MONTAVEZ *et al.*, 2000; TUMANOV *et al.*, 1994).

Em climas tropicais como no Brasil, o efeito de ICU noturnas pode ser mais intenso devido às características climáticas locais. Assim, Amorim (2005) realizou medições de ICU noturnas através de transectos móveis na cidade de Presidente Prudente, no Estado de São Paulo. As medições foram feitas em um único dia de julho, no ano de 2002, entre 20:00h e 20:45h. Assim, foram detectadas variações de temperatura entre áreas urbanas e rurais de até 9.6 °C, caracterizando um fenômeno de alta intensidade que se manifestou em áreas mais densas da cidade.

Nóbrega, Santos e Moreira (2016) avaliaram a intensidade das ICU noturnas da cidade de Recife, através de medições feitas em campo por termo-higrômetros em 9 pontos diferentes, do dia 8 de maio ao dia 8 de junho do ano de 2014. Foram evidenciadas ICU noturnas de até 2.5 °C de diferença de temperatura média entre os 9 pontos mensurados às 00h. Rocha, Souza e Castilho (2011) examinaram ICU noturnas em duas diferentes avenidas na cidade de São José do Rio Preto, no estado de São Paulo. Foram usados dados climáticos de estações meteorológicas locais, assim como foram estabelecidos 4 pontos diferentes de medição nestas avenidas, e com presença de vegetação no entorno. Dessa maneira, foram coletados de temperatura do ar, utilizando termo-higrômetros, instalados a uma altura de 4,5m em relação ao solo, e as medições foram feitas do dia 8 ao dia 22 de abril de 2010. E assim, os autores evidenciaram que a ICU noturna foi mais intensa em áreas mais adensadas da cidade, e essas áreas atingiram 4 °C de aumento da temperatura do ar.

Os estudos abordados foram organizados com base na Tabela 3, para apresentar de forma resumida os diferentes climas analisados, métodos utilizados,

momentos avaliados e resultados obtidos. Dessa maneira, é evidente que as ilhas de calor urbanas se caracterizam como um problema global, tendo as características climáticas locais, topografia e o ambiente construído como agentes mais influentes na sua criação. A avaliação das condições térmicas de ICU podem ser feitas a partir de um conjunto de metodologias diferentes, que auxiliam a identificar os espaços urbanos nos quais o desconforto térmico ocorre. A compreensão dos fatores que implicam na formação do fenômeno podem orientar a orientar proposição de diretrizes que proporcionem a criação de espaços urbanos confortáveis para os habitantes, e que permitam um maior balanço espacial de energia, favorecendo um maior desempenho energético das edificações.

Tabela 3: Resumo dos estudos sobre ICU abordados nessa seção.

Referência	Local	Clima (classificação de Köppen)	Método utilizado	Momentos analisados	Resultados obtidos
Yamashita (1996)	Tóquio, Japão.	Quente temperado (Cfa)	Medições por termômetros digitais instalados em carros de metrô urbanos.	31 de maio de 1990 a 18 de março de 1991	Aumento gradual e estável de temperaturas de ICU de 1.0 a 1.5°C entre áreas urbanas e suburbanas.
Steinecke (1999)	Reykjavík, Islândia.	Subpolar oceânico (Cfc)	Medições por termohigrógrafos e anemógrafos.	Novembro de 1991 e setembro de 1992.	Foram evidenciadas ilhas frias urbanas, espaços cuja temperatura do ar chegou a 4°C mais fria do que em áreas rurais.
Brazel <i>et al.</i> (2000)	Phoenix, Estados Unidos da América.	Tropical subtropical desértico (Bwh)	Análise cronológica de dados climáticos disponíveis na base de dados <i>Global Historical Climate Network</i> .	Entre os anos de 1900 e 1995	Foram identificadas ICU de 3 a 8°C em áreas urbanas, e um aumento de 0.5°C da intensidade das ICU por década.
Bornstein (1968) e Gaffin <i>et al.</i> (2007)	Nova Iorque, Estados Unidos da América.	Subtropical úmido (Cfa)	Análise de dados climáticos, medições usando transectos móveis e estações de medição climática.	Entre julho de 1964 e dezembro de 1966 e entre os anos de 1900 e 2002, respectivamente.	Bornstein (1968) evidenciou uma diferença de temperatura máxima de 1.6°C entre áreas urbanas abaixo de 25m de altura, e decresceu a zero acima de 300m de altura. Gaffin <i>et al.</i> (2007) identificou que o processo de urbanização que ocorreu na cidade de Nova Iorque é responsável por aproximadamente um terço do aquecimento que a cidade tem experienciado desde 1900.
Souza e Alvalá (2012)	Manaus, Brasil.	Úmido de floresta tropical (Af)	Análise de dados climáticos de estações meteorológicas.	Entre os anos de 2000 e 2008.	A maior intensidade de ICU ocorreu entre os meses de setembro e outubro, atingindo 2.12 e 2.08°C de diferença

					entre áreas urbanas e periféricas. O período do dia no qual o fenômeno foi mais intenso foi entre 14 e 15h, alcançando 2.22 °C de intensidade.
Coltri <i>et al.</i> (2014)	Piracicaba, Brasil.	Tropical de savana (Aw)	Análise de imagens extraídas do satélite <i>Landsat 7</i> .	Dias 13/05/2002 e 17/08/2002	Foi identificado que o perfil da ICU de inverno é 3.3 °C mais intensa que a ICU de outono, devido à sazonalidade da cana de açúcar.
Teixeira e Amorim (2017)	Rancharia, Brasil.	Tropical de savana (Aw)	Análise de imagens extraídas do satélite <i>Landsat 7</i> .	Dia 20 de janeiro de 2014 às 10:20	Foi identificada uma ICU de 5 °C de intensidade sob a ação de uma massa tropical continental, com céu limpo, ventos fracos.
Peres <i>et al.</i> (2017)	Rio de Janeiro, Brasil.	Tropical de savana (Aw)	Análise de imagens obtidas do satélite <i>Landsat</i> e mapeamento de uso do solo	Entre os anos de 1984 e 2015	Aumento de 1.9 e 0.9 °C em áreas de uso urbano e urbano de baixa densidade.
Nascimento e Oliveira (2011)	Goiânia, Brasil.	Tropical de savana (Aw)	Análises de imagens do satélite <i>Landsat 6</i> e técnicas de geoprocessamento	Entre os anos de 1986 e 2010	Os resultados demonstraram que a urbanização ocasionou uma inversão na representatividade das classes de temperatura superficial, que passaram a oscilar além do predomínio de temperaturas abaixo de 24 °C.
Clay <i>et al.</i> (2016) e Imran, Kala e Muthukumaran (2019)	Adelaide e Melbourne, Austrália.	Mediterrâneo (Csa) e oceânico (Cfb)	Medições através de transectos móveis, e análises feitas em simulações computacionais	Entre 2011 e 2015 e 2000 e 2009 respectivamente.	O efeito das ICU analisadas foi mais intenso durante clima limpo e de céu aberto, e sua intensidade variou de acordo com as diferentes morfologias de vias urbanas. Foi evidenciado que as ICU foram 2.8 °C mais intensas em áreas adensadas, e as áreas verdes reduziram efeito das ICU em aproximadamente 4 °C
Montavez <i>et al.</i> (2000)	Granada, Espanha.	Mediterrâneo (Csa)	Análises de dados climáticos de estações meteorológicas.	Foram observados dados de 1901 a 1990.	Os picos de ICU noturnas ocorreu em áreas mais adensadas da cidade, chegando a 3,5 °C mais quente que as áreas rurais. Nos parques da cidade, a diferença foi de apenas 1 °C.
Tumanov <i>et al.</i> (1994)	Bucareste, Romênia.	Subtropical úmido (Cfa)	Medições utilizando estações microclimáticas estrategicamente posicionadas.	Foram observados dados entre maio e dezembro de 1994.	A ICU noturna foi mais intensa em dias limpos, atingindo 3,6 °C de intensidade, e em dias nublados, atingiu apenas 1 °C.
Amorim (2005)	Presidente Prudente, Brasil.	Clima tropical (Cwa)	Medição de ICU noturnas através de transectos móveis.	Julho de 2002, entre 20h e 20:45h.	Foram detectadas ICU noturnas de até 9.6 °C, que ocorreram em áreas mais adensadas da cidade, caracterizando um fenômeno de alta intensidade.

Nóbrega, Santos e Moreira (2016)	Recife, Brasil.	Tropical de altitude (Cwa)	Dados climáticos extraídos de estações meteorológicas locais, e medições feitas em 9 pontos diferentes usando termo-higrômetros.	8 de maio ao dia 8 de junho	Foram evidenciadas ICU de intensidade de 2.5 °C de aumento da temperatura média do ar nos 9 pontos analisados às 00h.
Rocha, Souza e Castilho (2011)	São José do Rio Preto, Brasil.	Tropical de savana (Aw)	Medições de temperatura do ar através de termo-higrômetros e uso de dados climáticos de estações meteorológicas locais.	Foram feitas do dia 8 ao dia 22 de abril de 2011.	Foram coletados de temperatura do ar, através de termo-higrômetros, instalados a uma altura de 4,5m em relação ao solo, e as medições foram feitas do dia 8 ao dia 22 de abril de 2010. E assim, os autores evidenciaram que a ICU noturna foi mais intensa em áreas mais adensadas da cidade, e essas áreas atingiram 4 °C de aumento da temperatura do ar.

Fonte: Criado pelo autor.

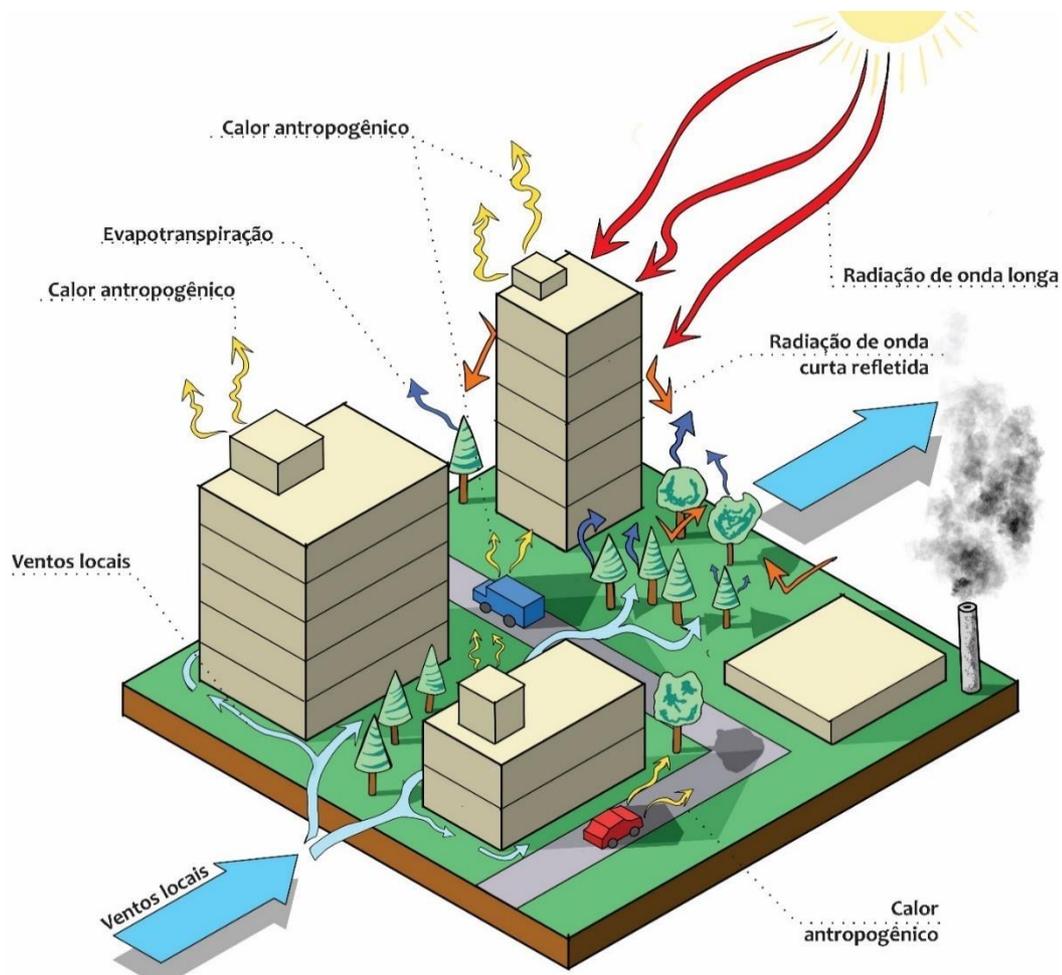
2.1.2. Variáveis envolvidas em uma ilha de calor

Os trabalhos apresentados anteriormente descrevem as ICU em escalas meso e macroclimáticas, ou seja, abordaram o fenômeno na escala de uma cidade, e demonstraram como o clima local, as características topográficas, a presença da vegetação local e como as diferentes morfologias urbanas interferem nas ICU. Todavia, fez-se necessário compreender os fatores envolvidos na criação de uma ICU em uma escala microclimática, isto é, próxima ao nível do pedestre, pois seu impacto à saúde humana pode vir a ser mais direto. Portanto, de acordo com Oke (1981) são destacados os seguintes fatores independentes que ocasionam mudanças nas condições térmicas de um espaço urbano e geram uma ICU (Figura 4):

- a) Calor antropogênico: calor gerado pelo movimento humano, automóveis, iluminação pública e por equipamentos de ar-condicionado e calefação (provenientes das edificações).
- b) Poluição do ar: poluentes emitidos por queima de combustíveis fósseis provenientes de automóveis aumentam a absorção de radiação de ondas curtas e a reflexão de ondas longas para a atmosfera.
- c) Propriedades de superfícies urbanas: impermeabilidade, albedo, transmitância e absorvância térmica.

- d) Presença ou ausência de massa vegetativa: vegetação urbana auxilia na mitigação do estresse térmico por consequência dos processos de evapotranspiração.
- e) Presença ou não de corpos d'água: aumentam a evaporação, e assim, mitigando o estresse térmico.
- f) Envelope termal de edifícios ou Morfologia urbana: a forma urbana pode ocasionar múltiplas reflexões da radiação do sol, assim como bloqueá-la, como também reduzir a velocidade dos ventos.

Figura 4: Ilustração demonstrando os diferentes parâmetros existentes na formação de uma ICU.



Fonte: Criado pelo autor.

Quanto a esses parâmetros, Doulos, Santamouris e Livada (2004), e Gartland (2008) demonstraram que à medida que o calor antropogênico, aumenta, a intensidade de uma ICU também se agrava. O calor emitido pela queima de combustíveis fósseis de fontes móveis e estacionárias (que por sua vez aumenta o

nível de poluentes e reduz a qualidade do ar urbano), por edifícios (especialmente calor advindo de equipamentos de ar-condicionado etc.), maquinários e pelo próprio movimento de pessoas é maior em densos centros urbanos, que por sua vez, pode ser significativo o bastante para afetar o balanço de energia e influenciar a formação de uma ICU.

Os efeitos dos materiais na manifestação do fenômeno das ICU foi apontado por Oke (1987), que destaca que as ICU possuem horários de pico da temperatura do ar, este pico comumente ocorre de três a cinco horas após o sol se pôr, e algumas vezes podem ocorrer antes. Este pico de temperatura varia de acordo com os materiais utilizados nas cidades, uma vez que materiais que liberam calor mais rapidamente (solo seco, madeira, folhagem de árvores), atingem este pico antes do sol se pôr. Por outro lado, cidades cujos materiais liberam calor lentamente (materiais típicos da construção civil como concreto, aço, asfalto e pedras) podem não atingir este pico até o pôr do sol, e assim, pode gerar uma piora ou melhora no efeito das ICU noturnas, conforme os materiais usados nas cidades.

Yang, Wang e Kaloush (2014) e Santamouris *et al.* (2012) ressaltam a influência do albedo, um parâmetro que é definido pela razão de ondas de radiação refletidas para as que incidem em uma superfície ou conjunto de superfícies. Os autores demonstraram que materiais mais reflexivos (mais próximos da cor branca) absorvem menos radiação e, por consequência, resulta em temperaturas de superfície mais amenas durante o dia.

Taha *et al.* (1988) estudaram o albedo de materiais na cidade de Sacramento, na Califórnia, buscando entender o que ocorreria às condições térmicas da cidade se alterassem o albedo de materiais da pavimentação urbana e de telhados dos edifícios e se adicionassem 10 ou 30% a mais de áreas verdes. Os resultados indicaram uma redução da temperatura média das superfícies de até 15°C e de 1.2°C da temperatura do ar durante os períodos mais quentes por consequência da combinação das duas ações citadas.

Assim, as propriedades de materiais de superfícies urbanas podem causar uma maior variação das temperaturas de superfícies no decorrer do dia, e cabe ressaltar que esta variação acontece em maior intensidade do que em comparação com a temperatura do ar (GARTLAND, 2008). As temperaturas de superfície podem variar de 27 a 50°C a mais do que a temperatura do ar durante o dia, e podem assim, influenciar na temperatura do ar, criando uma ICU. Portanto, o uso de materiais tem

um papel primordial para manter um equilíbrio térmico nos espaços urbanos, reduzir a radiação solar absorvida e assim manter a temperatura do ar a níveis mais confortáveis.

Como observado anteriormente, a adição de áreas verdes em áreas urbanas é uma boa diretriz para mitigação dos efeitos negativos das ICU (RAZZAGHMANESH, BEECHAM E SALEMI, 2015). Como destacado por Riginato e Labaki (2003), a ausência de áreas verdes em espaços públicos, junto ao uso de materiais que absorvem calor, têm sido um dos principais fatores que ocasionam o desbalanço térmico em espaços públicos. Assim, a implantação de vegetação urbana pode ocasionar mudanças climáticas em níveis macro, meso e microclimáticos.

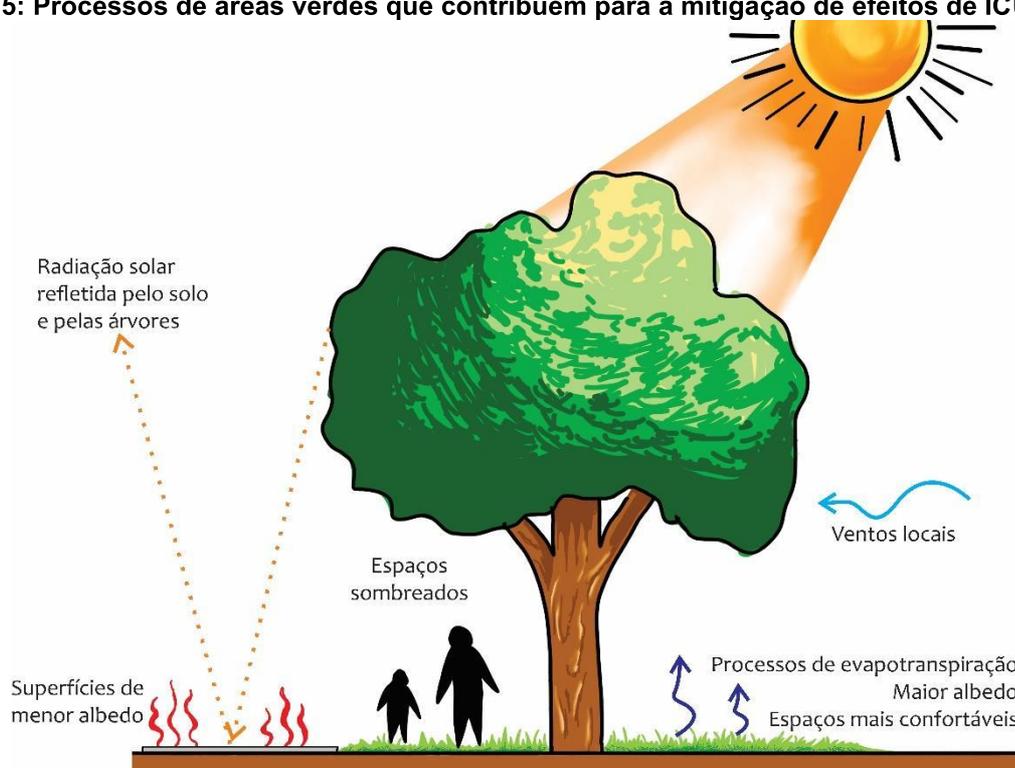
Olgay (2015) expõe alguns benefícios que a implantação de vegetação urbana pode trazer aos seres humanos: o sombreamento produzido por árvores e vegetação, captação de poeira e de poluentes suspensos no ar, e por consequência, geram uma melhora na qualidade do ar. O efeito mitigador térmico de áreas verdes foi destacado como o maior entre os benefícios (Figura 5). Gartland (2008), Coutts *et al.* (2007), Zölch (2019), Rahman *et al.* (2017), Chokhachian *et al.* (2019), Cohen, Potchter e Matzarakis (2011), Souch e Souch (1993) e De Abreu-Harbach *et al.* (2015) reiteram que árvores e vegetação em espaços públicos refrescam os espaços em suas proximidades através de quatro processos:

1. Evapotranspiração: conversão da energia do sol em água vaporizada invés de calor, o que aumenta a umidade relativa do ar e mantém as temperaturas nas proximidades a níveis mais amenos. Todavia, aglomerados de árvores podem manter os níveis de umidade elevados, e assim, podem afetar as condições térmicas urbanas.
2. Sombreamento: a copa das árvores fornece sombreamento do calor do sol, e mantém as superfícies urbanas mais frias e reduzem a energia que armazenam. O sombreamento possui efeito mais significativo que o da evapotranspiração durante dias quentes, e é mais efetivo com o plantio estratégico de árvores sem que haja a sobreposição de copas.
3. Vento: as áreas verdes maximizam o potencial de resfriamento gerado pelos ventos locais. Porém, para que a potencialização do resfriamento ocorra, projetistas devem se atentar à direção principal dos ventos, para que as áreas verdes sejam implantadas de forma a não bloquear a circulação dos ventos

locais. Da mesma forma, não é recomendável que as árvores sejam plantadas em grupos, pois podem dificultar as trocas de calor no espaço urbano e a amenização dos microclimas.

4. Albedo: a vegetação pode desempenhar um papel semelhante a materiais reflexivos, ou de alto albedo, e assim, podem auxiliar na mitigação dos efeitos das ICU. Áreas gramadas e arborizadas refletem mais e armazenam menos radiação solar ao longo do dia, e assim contribuem na manutenção da temperatura do ar a níveis mais amenos.

Figura 5: Processos de áreas verdes que contribuem para a mitigação de efeitos de ICU.



Fonte: Adaptado de Coutts *et al.* (2007).

Assim como a presença de vegetação, a existência de corpos d'água resulta em um impacto semelhante ao das áreas verdes. Como analisado por Lin *et al* (2019), que realizaram análises do impacto da proximidade de áreas urbanas a região metropolitana do Delta do Rio Pearl, na China. Os autores analisaram que o aumento em 10% da cobertura de corpos d'água ocasionou uma diminuição de até 11.33% do efeito das ICU. O efeito de resfriamento advindo dos corpos d'água se estendeu até 100m de distância de acordo com as análises.

O efeito da morfologia tende a ser mais complexo e varia de acordo com variáveis físicas e climáticas que foram expostas anteriormente. Melhor dizendo,

diferentes conformações morfológicas podem tanto limitar ou permitir a incidência solar e a circulação dos ventos locais, o que pode resultar em diferentes condições de conforto térmico urbano. Assim, na próxima seção, serão abordados os cânions urbanos, que são um tipo de morfologia urbana presente em muitas cidades contemporâneas.

2.2. Cânions urbanos

O termo “cânion urbano”, também conhecido como “cânion de rua” foi descrito por Nunez e Oke (1977) como uma área delimitada por paredes (geralmente fachadas de edifícios) e o solo (comumente uma rua) entre dois edifícios adjacentes. As edificações em ambos os lados da rua criam um ambiente que se assemelha às formações naturais de cânions.

Em áreas tropicais, cânions urbanos profundos podem ser uma opção de morfologia aceitável, pois podem gerar sombreamento, e assim, reduzir a temperatura do ar a níveis mais confortáveis durante momentos quentes do dia. Ao passo em que a morfologia pode atrapalhar a dispersão de calor para a abóbada celeste no final do dia, e assim, causar uma piora no efeito de uma ilha de calor noturna (KOWALSKI, 2019; MUNIZ-GÄAL *et al.*, 2020).

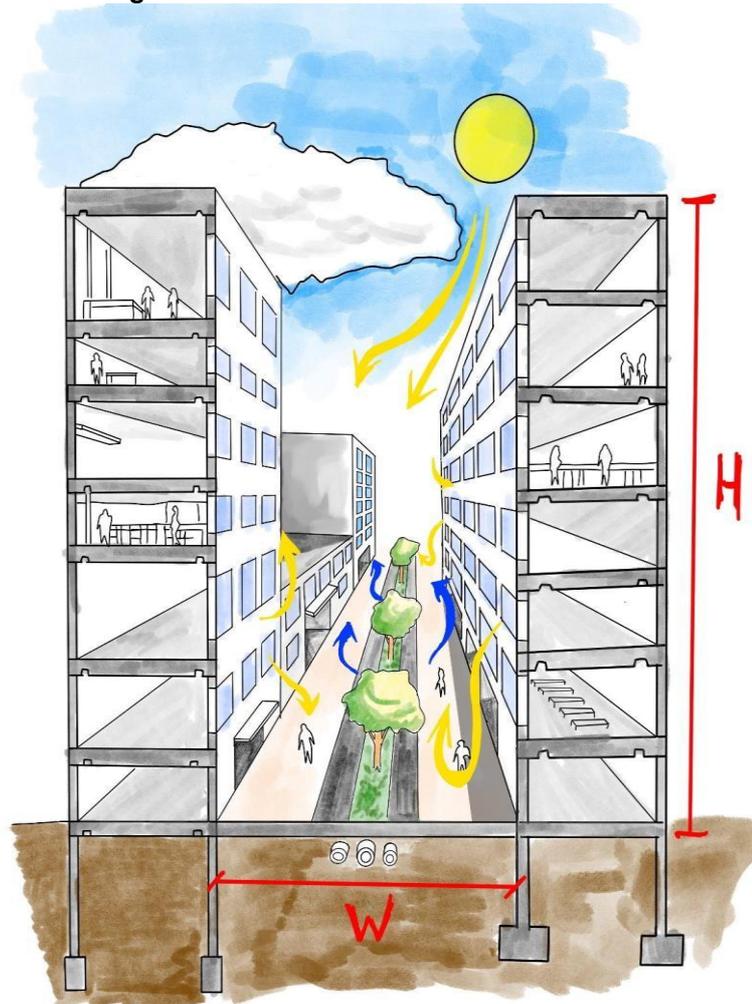
Assim, é importante entender o efeito dos cânions urbanos no conforto térmico local, especialmente em áreas de clima tropical, aonde estratégias para mitigar o efeito das ICU podem auxiliar arquitetos, urbanistas e outros profissionais envolvidos no planejamento urbano a considerarem os microclimas urbanos em um estágio anterior de projeto, podendo assim, projetar espaços urbanos mais termicamente confortáveis (RAJAGOPALAN; LIM; JAMEI, 2014).

Assim, serão apresentados estudos que analisaram a influência da morfologia urbana nas condições térmicas de cânions urbanos. Buscou-se agrupar os estudos de acordo com cada parâmetro físico e climático que foi abordado, que assim, influenciam nas condições térmicas de um cânion. Assim serão expostos estudos que abordam os parâmetros físicos que são: razão H/W, Fator de Visão de Céu (FVC) e orientação axial do cânion.

2.2.1. Razão H/W

A razão H/W, ou razão de aspecto, foi um parâmetro físico firmado por Oke (1981) para auxiliar avaliações do balanço de temperatura e das condições térmicas em cânions urbanos. É descrito pela divisão da altura média dos edifícios (H) pela distância entre os lados opostos do cânion (W) conforme a Figura 6.

Figura 6: Razão H/W em um cânion urbano



Fonte: Criado pelo autor (2021).

Vardoulakis *et al.* (2003), Evola (2020), Jareemit e Srivanit (2019) e Ali-Toudert e Mayer (2005) destacam que a Razão H/W estabelece classificações para os cânions, assim, é possível categorizar os cânions da seguinte maneira:

- Cânions regulares: razão $H/W \approx 1$, sem grandes aberturas nas fachadas dos edifícios que compõem o cânion.
- Cânion de avenida (ou raso): razão $H/W < 0.5$

- Cânion profundo: razão $H/W \approx 2$

Através de um segundo parâmetro: a razão L/H , que é a divisão do comprimento do cânion (L), que compreende a distância entre uma ponta a outra do cânion pela altura média dos edifícios, é possível estabelecer subclassificações para os cânions, que são:

- Cânion curto: razão $L/H \approx 3$
- Cânion médio: razão $L/H \approx 5$
- Cânion longo: razão $L/H \approx 7$

Uma outra classificação se baseia em critérios de simetria dos edifícios do cânion:

- Cânion simétrico: as edificações que compõem o cânion possuem aproximadamente a mesma altura.
- Cânion assimétrico: as edificações que compõem o cânion possuem alturas diferentes.

Bourbia e Boucheriba (2010) realizaram medições de temperatura do ar em cânions urbanos nas cidades de Constantina, na Argélia, localizada em região de clima do mediterrâneo. Os autores fizeram as medições durante o verão, para caracterizar o período de maior desconforto térmico, e assim, identificaram que as áreas com maior razão H/W possuíam temperaturas mais amenas. Nestas áreas, conforme a razão H/W aumenta, a altura média dos edifícios também aumenta, e assim, conforme o ângulo de incidência solar, a morfologia bloqueia a radiação solar, e assim, criaram-se espaços sombreados, nos quais a temperatura do ar era mais amena do que em áreas de incidência solar direta.

Emmanuel e Johansson (2006) fizeram análises em cânions localizados na cidade de Colombo no Sri Lanka. O autor partiu de medições em campo para avaliar o conforto térmico nos cânions analisados. Assim, os resultados dos estudos indicaram que áreas dos cânions com maior razão H/W possuíam espaços sombreados nos quais as temperaturas eram mais amenas quando em comparação com espaços mais abertos (ou com baixa razão H/W). Foi observado que a velocidade dos ventos é maior em locais cuja razão H/W é menor, e vice-versa, visto que a morfologia pode se comportar como uma barreira física que pode bloquear os ventos locais, dependendo de sua direção principal.

Bakarman e Chang (2015) analisaram os efeitos de diferentes razões H/W de cânions presentes na cidade de Riyadh, na Arábia Saudita. Foram realizadas medições de temperatura do ar ao nível do pedestre e das coberturas dos edifícios, entre os dias 13 e 30 de julho de 2013 e em três momentos diferentes do dia (7h, 14h e 18h). Dessa maneira, as análises apontaram que a intensidade das ICU aumentou conforme a razão H/W diminuiu. A temperatura aferida em cânions profundos e rasos demonstrou ser 5 e 15% mais alta do que nos ambientes rurais respectivamente.

Morini *et al.* (2018) executaram ensaios com modelos de cânions urbanos em escala reduzida na cidade de Perugia. Os cânions possuem razões H/W iguais a 1, 0,5 e 2 respectivamente e foram aplicados materiais na cor branca e cinza nas superfícies verticais do modelo. Posteriormente, os estudos foram conduzidos durante o mês de agosto de 2013, representando o mês mais quente. Primeiramente os autores realizaram análises com softwares de simulação de *CFD* para melhor compreender os fluxos de ventos no modelo. Depois, os valores de temperaturas de superfície e do ar e a velocidade dos ventos foram captados com estações de medição microclimáticas. E, dessa maneira, os resultados apontaram que as diferenças de temperatura do ar foram maiores no cânion de razão H/W = 0,5, pois a geometria influenciou na quantidade de energia absorvida dentro do cânion. As múltiplas reflexões da radiação solar entre o ar e as superfícies do cânion ocasionam um maior aprisionamento de energia, e conseqüentemente, isso atrapalha o decréscimo de temperatura no cânion.

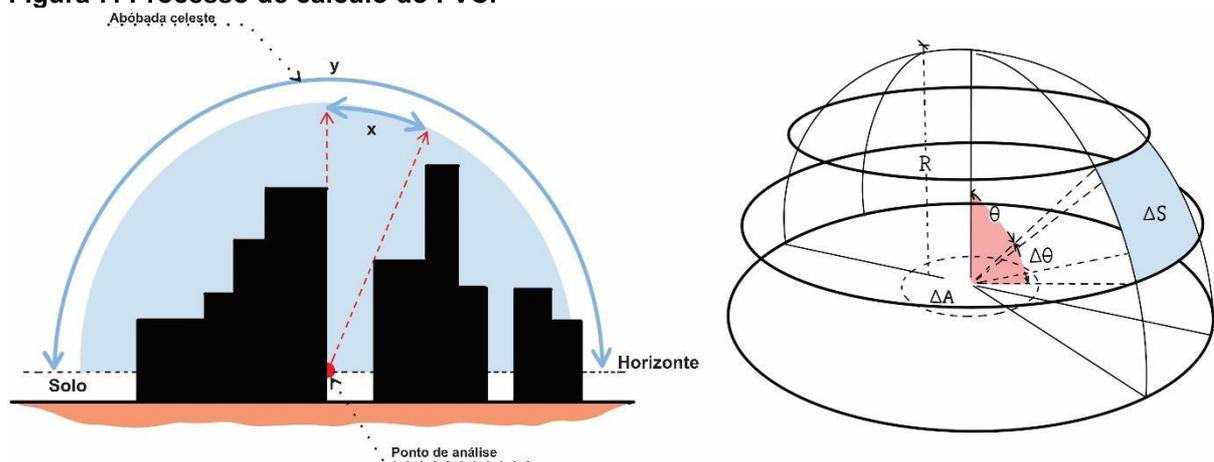
O efeito da razão H/W nas condições climáticas pode ser mais efetivo em ambientes tropicais. E assim, Cavalcante *et al.* (2017) realizou estudos em cânions urbanos presentes na cidade de Fortaleza. Os autores realizaram aferições de variáveis climáticas em campo através de estações meteorológicas, posicionadas em diferentes pontos de análise posicionados em cânions com diferentes conformações morfológicas (sendo analisados um cânion regular, raso e profundo). As medições foram feitas das 7 às 19 durante os dias 20 a 29 de janeiro de 2016 e os valores foram comparados com medições feitas em um ponto-controle, posicionado em uma área aberta. E assim, os autores observaram que o cânion profundo atingiu os menores valores de temperatura durante o dia quando em comparação com os outros pontos analisados, atingindo até 3°C de diferença, pois a morfologia bloqueou os raios solares durante momentos quentes do dia.

Por fim, destaca-se que a compreensão dos efeitos da geometria urbana de um cânion podem orientar a concepção de futuras legislações urbanas. Isto é, agentes envolvidos no planejamento urbano devem se atentar aos efeitos das diferentes geometrias urbanas no conforto térmico das cidades. De acordo com os trabalhos analisados, ficou evidente que a adoção de altas razões H/W pode ser uma boa diretriz para que a morfologia urbana possa gerar espaços sombreados, com menor temperatura do ar.

2.2.2. Fator de Visão de Céu (FVC)

O Fator de Visão de Céu é um parâmetro adimensional, definido em porcentagem, e foi criado para mensurar a fração visível do céu em determinado ponto de análise em porcentagem, e seu cálculo pode ser feito por fotografias feitas com lentes olho-de-peixe, através de simulações em softwares computacionais ou seguindo o processo da Figura 7. O valor do FVC pode variar de 0 a 1, sendo que um valor de FVC = 1 significa que o céu é completamente visível, como por exemplo em terrenos planos e abertos, sem edifícios ou árvores (NABONI, *et al.* 2017; JOHANSSON, EMMANUEL, 2006; NASROLLAHI, SHOKRI, 2016).

Figura 7: Processo de cálculo do FVC.



Fonte: Adaptado de Johansson e Emmanuel (2006) e Nasrollahi e Shokri (2016)

Chen *et al.* (2012) avaliaram o efeito da geometria urbana nas condições de conforto térmico de espaços públicos de Hong Kong, através da quantificação do FVC dos espaços analisados. As análises foram feitas através de medições em campo feitas durante o verão, nos dias 19 de setembro de 2006 e 9 de setembro de 2008, os

valores do FVC foram obtidos através do uso de ferramentas computacionais de GIS. Posteriormente foram feitas análises de regressão estatística, e os resultados apontaram que o FVC é inversamente proporcional às diferenças de temperatura do ar na camada intra-urbana (camada de ar atmosférico abaixo da CCU) durante o período diurno. Em outras palavras, o estudo sugeriu que o FVC extraído em área (invés do valor ser extraído de forma pontual) pode ser usado como fator determinante para predição de variações de temperatura em espaços urbanos.

Rossi, Krüger e Nikolopoulou (2011), e Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2016) avaliaram as relações entre o parâmetro FVC e as condições de conforto térmico a nível do pedestre, em cânions urbanos de duas cidades brasileiras. Foi analisado pelos autores que a razão H/W e o FVC possuem uma certa relação entre si, isto é, à medida em que a razão H/W aumenta, os edifícios ficam mais altos, e a rua do cânion mais estreito. Assim, a morfologia se eleva, mais radiação solar é bloqueada, portanto, o SVF decresce. Em geral, os resultados determinaram que na medida em que o FVC diminui, mais radiação solar foi bloqueada pela morfologia urbana, e assim, a temperatura do ar era mais amena a nível do pedestre. Todavia, em geral, os estudos indicaram que espaços urbanos que possuem baixo FVC e uma maior razão H/W podem prejudicar a dispersão da energia térmica que foi coletada durante o dia, e assim, pode ocasionar uma piora no efeito da ICU noturna.

Fialho (2016) analisou fenômenos de ICU em cânions urbanos da cidade de Viçosa, e usaram o FVC como um parâmetro de avaliação do fenômeno. As análises partiram da delimitação do FVC a partir de fotografias hemisféricas, e dados de temperatura do ar e umidade média relativa do ar foram coletados durante 26 dias no outono e 26 dias no inverno no ano de 2014, e posteriormente, foram feitas análises de correlação de Pearson para averiguar a associação entre a temperatura do ar e o FVC. Os resultados apontaram uma boa correlação entre as variáveis no período do inverno, todavia, há certa heterogeneidade nos dados, que impedem de dizer que a geometria urbana é responsável pelo aquecimento ou resfriamento dos espaços, pois as dinâmicas climáticas locais exercem forte influência nas condições térmicas da cidade.

Oke (1981) reitera que o FVC é uma variável relevante na criação de ICU noturnas, dada sua capacidade de análise da regulação de perda de radiação de onda longa, em geometrias adensadas de cânions em porções centrais de cidades. Desta forma, estudos realizados por Alcoforado e Andrade (2005), que investigaram a

ocorrência ICU noturnas em cânions urbanos em Lisboa, destacaram uma relação entre a temperatura do ar dos cânions analisados com o FVC. As temperaturas mínimas ocorreram de acordo com áreas de baixo FVC, ou melhor dizendo, áreas mais densas e com edifícios mais altos reduzem a visão do céu, e assim, aumentam a saída de radiação de ondas longas e reduzem a radiação de superfícies próximas, assim, amenizando o fenômeno.

Giridharan, Lau e Ganesan (2004) fizeram medições de dados climáticos em cânions de três diferentes estados na Ilha de Hong Kong. Assim as temperaturas máximas e mínimas de ICU noturnas nos três distritos analisados (Belchers, Wah Fu-1 e Wah Fu-2) foram de $1,38^{\circ}\text{C}$, $0,2^{\circ}\text{C}$ e $0,32^{\circ}\text{C}$, ao passo que o FVC calculado no estudo para os distritos foram de 0,373, 0,473 e 0,40 respectivamente; dessa forma, as variações de temperatura destacam o efeito do FVC nas condições térmicas no período noturno. Por fim, concluíram que mudanças em albedos de superfícies e no SVF, podem ser boas diretrizes para mitigar as ICU noturnas da cidade.

Collischonn e Ferreira (2015) realizaram cálculos do FVC nos mesmos pontos medições de temperatura e umidade do ar na cidade de Pelotas, no Rio Grande do Sul. Foram registrados dados climáticos no ano de 2014 nos meses de agosto, novembro e dezembro, utilizando termo-higrômetros que captaram os dados de temperatura e umidade do ar de 30 em 30 minutos. O FVC foi calculado utilizando lentes olho-de-peixe e um software computacional, e assim, ao comparar com a trajetória solar local, os resultados apontaram que as áreas mais adensadas da área central que tiveram uma maior obstrução do céu (baixo FVC) apresentaram temperaturas cerca de 70% acima da média. Os resultados demonstraram que há uma relação entre o FVC e a temperatura do ar, que é verificada não somente em noites calmas e claras, mas também na média total dos dados observados neste estudo.

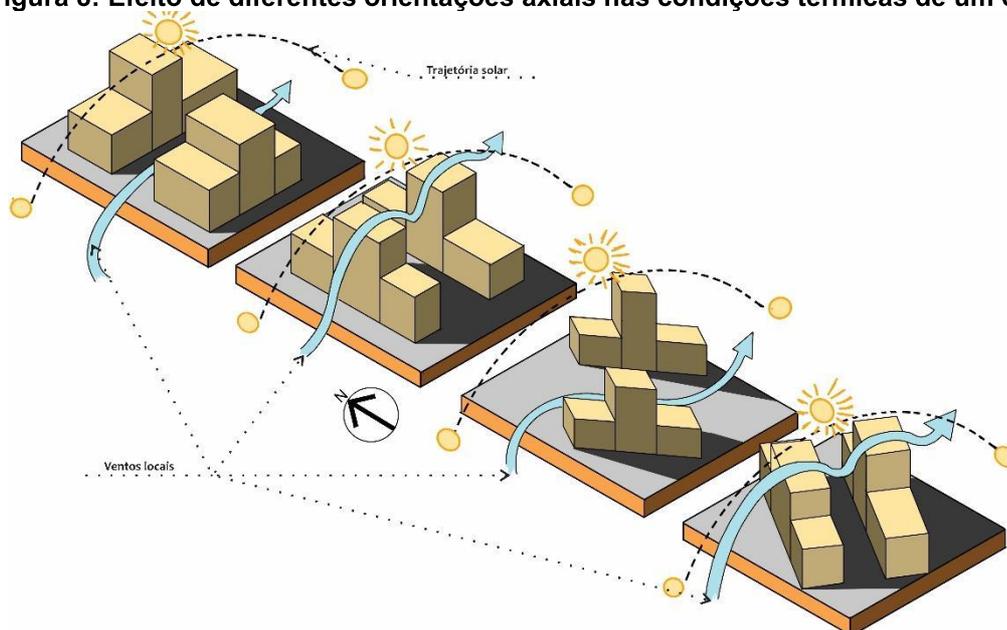
O FVC é considerado uma ferramenta útil e efetiva de ser usada por profissionais envolvidos no planejamento urbano, para conduzir estudos em áreas de grande porte e alta densidade, especialmente em áreas tropicais e subtropicais, nas quais o estresse térmico pode ser considerável. O entendimento deste parâmetro pode auxiliar na compreensão do balanço de radiação solar em um meio urbano, e dessa forma, pode orientar a proposição de diretrizes de boas práticas de planejamento urbano (CHEN *et al.*, 2012; MIAO *et al.*, 2020; MOREIRA *et al.*, 2021;

NASROLLAHI; NAMAZI; TALEGHANI, 2021; NASROLLAHI; SHOKRI, 2016; SVENSSON, 2004).

2.2.3. Orientação axial de cânions urbanos

As condições de conforto térmico em um cânion urbano podem variar de acordo com sua orientação axial (Figura 8), visto que seu posicionamento em relação a trajetória solar influencia diretamente a absorção e emissão de radiação solar e na ventilação urbana, e assim, pode exercer mudanças nos microclimas urbanos. Arnfield (1990) destaca que a orientação de uma via urbana exerce maior influência na quantidade de energia solar absorvida por fachadas de edifícios, ao passo que a razão H/W afeta a quantidade de energia ao nível do solo. O autor reitera que em altas latitudes, a posição solar é mais baixa no inverno e pode gerar mais sombreamento, e assim, reduzir processos de irradiação de energia solar, especialmente em cânions orientados de leste a oeste.

Figura 8: Efeito de diferentes orientações axiais nas condições térmicas de um cânion.



Fonte: Criado pelo autor (2021)

Andreou e Axarli (2012) e Kitous, Bensalem e Adolphe (2011) analisaram o efeito das orientações de cânions nas condições locais de ventos na cidade de Tino, na Grécia e em Ghardaïa, na parte norte do deserto do Saara, na Argélia. As análises foram feitas através de medições e simulações paramétricas em cânions com

diferentes razões H/W e orientações axiais. No estudo realizado em Tino, foram realizadas análises paramétricas através de softwares computacionais que indicaram que, com os ventos predominantes vindo do Norte, os cânions com orientação Norte – Sul possuíam condições de conforto mais favoráveis quando em comparação com os de orientação Leste – Oeste, foram observadas diferenças significativas de até 8°C de temperatura de superfície em fachadas com diferentes orientações. O estudo feito em Ghardaïa indicou que as velocidades e direção de ventos locais foram influenciados pela orientação axial dos cânions analisados, isto é, a ação dos ventos foi mais efetiva quando a direção é alinhada ao eixo dos cânions. A topografia se caracterizou como um agente que interfere no fluxo local de ventos, pois pode reduzir ou aumentar as velocidades dos ventos conforme a configuração topográfica, o que pode causar alterações nas condições externas de conforto térmico.

A definição de boas orientações axiais de vias em referência a orientação quanto ao azimute solar, e circulação de ventos locais podem fornecer diretrizes para profissionais do planejamento urbano a proporem melhores diretrizes de projetos voltados para o conforto térmico humano. A consideração de circulação adequada de ventos locais e acesso solar é vital para manter as condições térmicas urbanas a níveis aceitáveis, como também para reduzir o consumo de energia de edificações (ALI-TOUDERT, 2021; ANDREOU, 2014; NAKAMURA; OKE, 1988; SHISHEGAR, 2013).

2.2.4. Áreas verdes e corpos d'água em cânions urbanos

Syaffi *et al.* (2017) avaliaram o efeito da presença e proximidade de corpos d'água nas condições térmicas de cânions urbanos na cidade de Saitama, no Japão. Os resultados indicaram que a presença de lagos próximos a cânions urbanos pode reduzir a temperatura e manter a umidade relativa em níveis altos. Todavia, é importante notar que isto pode impactar negativamente o conforto térmico do pedestre dependendo das condições predominantes de radiação solar.

Gong *et al.* (2018) fizeram análises da relação do FVC com os efeitos das áreas verdes presentes na cidade de Hong Kong. Os resultados indicaram que houve um aumento no efeito de resfriamento que variou de acordo com a altura e tamanho da copa das árvores, que reduzem o FVC devido a densidade da copa e por consequência, reduzem a radiação que atinge o solo, e provê um processo de

refrescamento devido aos processos de evapotranspiração de superfícies de folhas das árvores. Também foi evidenciado a capacidade das árvores de absorver poluentes suspensos no ar por emissão de automóveis, e podem assim, melhorar a qualidade local do ar.

Alexandri e Jones (2008) analisaram através de simulações computacionais, o impacto de áreas verdes urbanas e a orientação axial de diferentes cânions urbanos em diferentes cidades do mundo, partindo de modelos simplificados em microescala. Foram analisados cânions com diferentes concentrações de áreas verdes e conformações urbanas, isto é, com diferentes razões H/W e com duas orientações axiais distintas: Norte-Sul (N-S) e Leste-Oeste (L-O). Os autores destacaram que a presença de massas vegetativas foi mais significativa que a orientação axial, pois evidenciaram reduções de temperatura do ar em todos os cenários analisados com uma maior existência de áreas verdes.

Por fim, deve-se notar que muitos dos estudos em cânions urbanos analisados foram feitos em cidades localizadas no hemisfério norte e próximas ao mar e outros corpos d'água, assim, as condições analisadas são diferentes do presente trabalho. A partir da literatura, também deve-se destacar que embora alguns dos estudos foram realizados no Brasil. Foram encontrados poucos trabalhos que fizeram análises cronológicas de evolução de ICU ou para entender o impacto dos cânions urbanos nas condições térmicas de cânions urbanos, especialmente em um clima subtropical úmido de inverno seco. Cabe ressaltar que poucas análises foram feitas em climas semelhantes, principalmente ao correlacionar com uma abordagem de estrutura cronológica. Dessa maneira, os estudos aqui abordados foram organizados com base na referência, local, clima (segundo a classificação *Köppen-Geiger*), método, momentos e parâmetros analisados e resultados obtidos, conforme a Tabela 4.

Tabela 4: Estudos sobre cânions urbanos abordados nessa seção.

Referência	Local	Clima (classificação de Köppen)	Método utilizado	Momentos analisados	Parâmetros físicos analisados
Bourbia e Boucheriba (2010)	Constantina, Argélia.	Mediterrâneo (Csa)	Medições através de estações microclimáticas.	Verão de julho de 2007.	Razão H/W, FVC e orientação axial.
Emmanuel e Johansson (2006)	Colombo, Sri Lanka.	Floresta tropical (Af)	Medições através de estações microclimáticas.	30 de abril a 16 de maio de 2003.	Razão H/W e FVC
Bakarman e Chang (2015)	Riyadh, Arábia Saudita.	Tropical e subtropical de deserto (Bwh)	Medições através de estações microclimáticas.	Entre os dias 13 e 30 de julho de 2013.	Razão H/W e orientação axial.

Morini <i>et al.</i> (2017)	Perugia, Itália.	Mediterrâneo (Csa)	Ensaio em modelos de escala reduzida	Agosto de 2013	Razão H/W e orientação axial.
Cavalcante <i>et al.</i> (2017)	Fortaleza, Brasil.	Tropical de savana (As)	Medições através de estações microclimáticas	7 às 19h durante os dias 20 a 29 de janeiro	Razão H/W e FVC.
Chen <i>et al.</i> (2010)	Hong Kong, China.	Subtropical úmido (Cwa)	Medições através de estações microclimáticas e análises utilizando softwares de GIS ¹⁴	19 de setembro de 2006 e 9 de setembro de 2008	FVC
Rossi, Krüger e Nikolopoulou (2011)	Curitiba, Brasil.	Marinho da costa oeste (Cfb)	Medições através de estações microclimáticas e questionários aplicados em campo.	13 dias de medições em campo entre janeiro e agosto de 2009.	Razão H/W, FVC e áreas verdes.
Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2016)	São José do Rio Preto e Bauru, Brasil.	Tropical de savana (Aw)	Medições através de estações microclimáticas e análises utilizando softwares de GIS	Outubro de 2012 e junho de 2013.	Razão H/W, FVC e rugosidade urbana.
Ferreira e Fialho (2016)	Viçosa, Brasil.	Subtropical úmido (Cwa)	Medições através de estações microclimáticas.	26 dias de outono e inverno do ano de 2014.	FVC
Alcoforado e Andrade (2005)	Lisboa, Portugal	Mediterrâneo (Csa)	Medições em campo com termógrafos digitais, e técnicas de regressão estatística.	Janeiro, março, julho e agosto de 1992.	Razão H/W, FVC e orientação axial.
Giridharan, Lau e Ganesan (2004)	Hong Kong, China.	Subtropical úmido (Cwa)	Medições através de estações microclimáticas.	Julho a setembro de 2002.	FVC.
Collischonn e Ferreira (2015)	Pelotas, Brasil.	Quente temperado (Cfa)	Medições utilizando termo-higrômetros. Software computacional para calcular o FVC.	Agosto, novembro e dezembro de 2014.	FVC
Andreou e Axarli (2012)	Ilha de Tino, Grécia.	Mediterrâneo (Csa)	Medições em campo e simulações no software <i>GreenCanyon Tool</i> .	Medições ocorreram durante os períodos de inverno e verão	Razão H/W, FVC e orientação axial.
Kitous, Bensalem e Adolphe (2011)	Ghardaïa, Argélia.	Deserto (BWh)	Medições através de estações microclimáticas e análise de dados climáticos.	Fevereiro de 2005 e agosto de 2006.	Razão H/W, orientação axial e topografia.
Syaffi <i>et al.</i> (2017)	Saitama, Japão.	Quente temperado (Cfa)	Experimentos com modelos em escala reduzida em espaços exteriores.	Julho a agosto de 2015 e 2016.	Proximidade a corpos d'água.
Gong <i>et al.</i> (2018)	Hong Kong, China.	Subtropical úmido (Cwa)	Análises utilizando imagens extraídas da ferramenta <i>Google Street View</i> e ferramentas computacionais GIS.	Sem recorte temporal.	FVC
Alexandri e Jones (2006)	Diversas cidades	Diversos climas	Simulação de modelos computacionais com base em códigos C++.	Dia típico, do mês mais quente das localidades analisadas.	Razão H/W, FVC, orientação axial e áreas verdes.

Fonte: Feito pelo autor.

2.3. Análises computacionais e conforto térmico urbano

¹⁴ Sistema de Informação Geográfica (do inglês, *Geographic Information System – GIS*), é um software computacional utilizado para capturar, armazenar, verificar e exibir dados relacionados à aspectos da superfície terrestre. Disponível em: <<https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/geographic-information-system-gis/>>. Acesso em: 27/10/2021.

A presente subseção apresenta estudos que utilizaram de análises paramétricas feitas em softwares computacionais para avaliar e simular diferentes propriedades físicas e morfológicas urbanas, assim como o desempenho da forma e do conforto térmico urbano. Primeiramente, foram abordados trabalhos que fizeram o uso de ferramentas paramétricas computacionais para analisar propriedades físicas do ambiente urbano. Adiante, estudos sobre índices de conforto térmico serão apresentados, assim como outros trabalhos que fizeram o uso de ferramentas computacionais para avaliar o conforto térmico urbano.

2.3.1. Análises algorítmico-paramétricas urbanas

O uso de ferramentas computacionais que usam da lógica algorítmico-paramétrica para avaliar o espaço urbano é uma prática recente adotada no planejamento urbano. Essas ferramentas podem auxiliar a solução de problemas existentes em grandes centros urbanos, podendo auxiliar diversas intervenções, atualizações e avaliação de modificações que ocorrem em diversas partes do traçado urbano. A lógica algorítmico-paramétrica estabelece a especificação de parâmetros de um objeto, e isso implica na existência de um conjunto de métricas que, junto com as ferramentas computacionais, podem oferecer suporte para a tomada de decisões de projetos urbanos (LIMA, 2017). Portanto, serão apresentados estudos que elaboraram ferramentas, sistemas e métricas para avaliar a densidade, o desenvolvimento e a morfologia de diferentes configurações urbanas.

Duarte *et al.* (2012) propôs a formulação de um modelo computacional denominado *City Induction*, que consiste na aplicação de três submodelos, que são encadeados em forma de uma ontologia¹⁵. O primeiro submodelo é pautado nos padrões propostos por Alexander *et al.* (1977) que se basearam em instruções de projeto urbano e em bases de dados geoespaciais para criar um sistema que possibilitou criar especificações de um plano de projeto urbano que considera tanto as qualidades físicas do local, assim como as características socioeconômicas da população a ser avaliada.

¹⁵ Gruber (1993) define “ontologia” como uma especificação formal de uma série de domínios do conhecimento, e sua interação entre eles.

O segundo submodelo é baseado na criação de um sistema que gera diferentes soluções de projeto a partir de uma linguagem padrão de design urbano, que é um processo restrito e manipulado ao longo do processo de projeto – um modelo de criação, que é baseado nas gramáticas propostas por Stiny e Gips (1972), que pautaram regras de sintaxe espacial em um plano urbano analisado, e assim, possam ser geradas soluções de projeto que correspondam a especificações dadas pelo próprio sistema.

O terceiro submodelo foi criado com base no desenvolvimento de um sistema de análise de projetos urbanos, que é pautado na teoria da sintaxe espacial proposta por Hillier e Hanson (1984). Esse submodelo aborda aspectos sociais, ambientais e de infraestrutura urbana, e essa análise é feita a partir da aplicação de uma série de técnicas de análise espacial, análise de rede, *data mining* e o reconhecimento de padrões de morfologia urbana.

Por fim, estes modelos foram unificados em um modelo geral padrão para gerar: a) um submodelo para criar programas urbanos que possam gerar especificações baseadas em características do local abordado; b) um submodelo para gerar planos urbanos que forneçam soluções de projeto que possam ser adaptadas para diferentes variações de contextos urbanos; c) geração de um modelo que permita avaliar, comparar e classificar diferentes planos urbanos alternativos.

Beirão (2012) propôs em sua tese de doutorado o conjunto de ferramentas generativas para contextos urbano, e assim, foi um desdobramento da pesquisa anterior: *City Induction*, com um foco orientado para o desenho urbano. Em suma, essa ferramenta faz uso de um conjunto de padrões de projeto urbano, que permitem a obtenção de diferentes layouts, que assim, podem ser ajustados e manipulados segundo diversos parâmetros e indicadores.

Montenegro (2015) apresenta em sua tese de doutorado, a criação de um modelo denominado *CityPlan* para formulação de programas urbanos, incluindo a criação de uma ferramenta computacional. O autor define o modelo como uma plataforma articulada capaz de gerar soluções mais maleáveis de planejamento urbano, e incorporou um *workflow* e funções computacionais que possibilitam a alteração de padrões de classificação destes modelos urbanos. Em síntese, o *CityPlan* pode ser definido como um SIG, que permite identificar e classificar dados geoespaciais, assim como a localização automática de equipamentos urbanos.

Nourian *et al.* (2015) apresentaram um conjunto de ferramentas algorítmico paramétricas denominado *Configurbanist*. De acordo com os autores, este conjunto de ferramentas pode auxiliar análises de redes urbanas considerando características físicas e cognitivas, relacionadas ao ato de caminhar e do ciclismo, em relação a aspectos físicos e topológicos da malha urbana.

Por fim, Lima (2017) propõe a criação de um sistema algorítmico-paramétrico, baseado em métricas e padrões propostos pelo modelo do Desenvolvimento Orientado pelo Transporte¹⁶ (DOT). O sistema foi denominado *CityMetrics*, e fornece suporte no processo de tomada de decisão e análise de projetos urbanos, e na organização de bairros e cidades, podendo assim contribuir para o aprimoramento das possibilidades de analisar e propor diferentes soluções em diferentes contextos urbanos. No caso desta dissertação, o uso do sistema *CityMetrics* foi de grande importância para analisar, calcular e visualizar informações sobre densidade da área urbana a ser analisada em tempo real, permitindo assim avaliar de forma dinâmica as mudanças que ocorreram na forma urbana com o passar do tempo.

2.3.2. Índices de conforto térmico

Matzarakis e Amelung (2008) ressaltam que o campo de estudos de conforto térmico ganhou notoriedade nos últimos anos, devido às mudanças climáticas e as alterações cada vez mais significativas de temperatura. O primeiro estudo feito data de cerca de 200 anos atrás, realizado por Hipócrates¹⁷ na Grécia, que investigou o efeito de mudanças climáticas regionais e sua relação com diferentes estados de saúde humana ocasionados. Melhor dizendo, Hipócrates analisou que dores nas articulações eram mais recorrentes durante o frio do inverno, ao passo em que as ondas de calor extremo podem ocasionar insolação, enxaquecas e até a morte.

¹⁶ Desenvolvimento Orientado pelo Transporte foi proposto por Calthorpe (1993), e possui as seguintes premissas: a) organização do crescimento urbano em nível regional, de maneira policêntrica e compacta e que forneça suporte à mobilidade urbana; b) posicionamento de residências e outros equipamentos urbanos a uma distância caminhável e acessível das paradas de trânsito; c) criação de vias urbanas que incentivem a caminhada e o ciclismo; d) adoção do uso de diferentes densidades, tipologias e usos urbanos; e) preservação do habitat local, zonas ribeirinhas e espaços abertos de qualidade; f) espaços públicos como foco para orientação dos edifícios e de atividades da vizinhança; g) incentivo à ocupação e ao desenvolvimento urbano ao longo de corredores de trânsito e comunidades existentes.

¹⁷ Hipócrates (460 a.C. – 377 a.C.) foi um médico grego, considerado o “pai da Medicina” e iniciador da observação clínica. Disponível em: <<https://www.ebiografia.com/hipocrates/>>. Acesso em: 24/10/2021.

O conforto térmico de um usuário em um espaço varia segundo uma série de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos, e é tomado como uma sensação humana, logo, situa-se no campo subjetivo. Os fatores físicos são determinados pelas trocas de calor entre o corpo humano com o meio; os fatores fisiológicos englobam as respostas fisiológicas do organismo, decorrentes da exposição contínua a uma determinada condição térmica, e, por fim, os fatores psicológicos englobam as diferenças na percepção e na resposta a estímulos sensoriais, que variam de acordo com experiências passadas do indivíduo. Em suma, estudos de conforto térmico visam analisar e determinar condições necessárias para criar ambientes termicamente adequados para a realização de atividades e à ocupação humana (LAMBERTS et al., 2011).

A definição adotada no presente estudo sobre conforto térmico foi baseada na *ASHRAE¹⁸ Standard 55*, que define conforto térmico como: “a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico, e é aferido através de avaliações subjetivas”.

Os índices de conforto térmico surgiram como uma necessidade de se quantificar e classificar (com base em categorias de estresse térmico e zona de conforto) os efeitos de condições térmicas de ambientes nas respostas fisiológicas humanas, estes foram baseados em estudos anteriores que buscaram criar modelos de balanço de energia do corpo humano. Assim, os índices são usualmente baseados em quatro variáveis climáticas, que são: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade dos ventos e a Temperatura Radiante Média (TRM¹⁹). A TRM é considerada um dos parâmetros mais influentes que influencia as condições de conforto térmico em espaços externos, portanto, é uma das variáveis presente em todos os índices, pois engloba a gama reflexões de ondas de radiação de ondas longas e curtas. Os índices consideram também parâmetros humanos como isolamento de roupa, cor de pele, atividade metabólica (que considera se o sujeito

¹⁸ *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) é uma associação americana fundada em 1984 de pesquisadores voltados para pesquisas sobre tecnologias sustentáveis para o ambiente construído, focados em sistemas prediais, eficiência energética, qualidade do ar em ambientes internos, refrigeração etc. Disponível em: <<https://www.ashrae.org/about>>. Acesso em: 25/10/2021.

¹⁹ De acordo com a *ISSO 7726:1998*, temperatura radiante média é definida como “definido como a temperatura uniforme de um invólucro imaginário em que a transferência de calor radiante do corpo humano é igual à transferência de calor radiante no invólucro não uniforme real”.

está imóvel, em movimento, sentado etc.) (HÖPPE, 2002; MATZARAKIS; RUTZ; MAYER, 2007)

O primeiro índice foi criado para análises de condições térmicas feitas foi criado por Fanger (1973), e que estabeleceu o índice *Predicted Mean Vote – PMV* e o índice *Predicted Percentage of Dissatisfied - PPD*. O PMV foi criado através de uma pesquisa feita com mais de 1300 pessoas, e envolveu a aplicação de questionários em ambientes termicamente controlados de laboratório com sensores de temperatura. O índice é baseado nas variáveis: temperatura de bulbo seco, temperatura radiativa, velocidade dos ventos e umidade relativa, os padrões humanos considerados são o isolamento de roupas e taxa metabólica. Assim, o autor conseguiu delimitar as respostas fisiológicas dos indivíduos a partir de uma escala adimensional estabelecida que varia de -3,5 (Estresse extremo por frio) até +3.5 (Estresse extremo por calor). Adiante, a partir dos valores obtidos do PMV, é delimitado o índice PPD que expressa a porcentagem dos ocupantes de uma edificação não satisfeitos com as condições térmicas. Todavia, a aplicação do índice é limitada a ambientes internos de edifícios, isto é, sua utilização baseia-se em limitar a temperatura operativa²⁰, para assim avaliar o conforto térmico e parâmetros de ocupância de ambientes internos de edifícios, visando ampliar o rendimento dos ocupantes das edificações.

Höppe (2002) destaca que muitos estudos foram realizados para analisar o conforto térmico em condições térmicas em espaços internos, ao passo que poucos estudos foram feitos visando abordar o conforto térmico em espaços exteriores. Mackey *et al.* (2017) ressaltam que o estudo de condições de conforto térmico em espaços urbanos levam em conta uma maior gama de variáveis climáticas quando em comparação com ambientes internos, como o fluxo mais complexo de ventos, maior variação de temperatura etc.

Assim, os novos índices que surgiram posteriormente tornaram possível a análise em espaços externos, pois passaram a considerar uma gama maior de fatores que influenciam o conforto térmico. Dessa maneira, Höppe e Mayer (1987) introduziram o índice *Physiologically Equivalent Temperature – PET*. O índice PET foi criado baseado em métricas e equações propostas no Modelo de Balanço Energético

²⁰ De acordo com a norma 55 estabelecida pela *ASHRAE*, temperatura operativa é definida pela temperatura uniforme de um ambiente fictício na cor preta e o ar dentro dele, no qual um ocupante trocaria a mesma quantidade de calor por radiação, mais convecção como no ambiente não uniforme e real. (TURNER *et al.*, 1979).

de Munique para Indivíduos (MEMI)²¹. O índice é definido pelas condições térmicas de um espaço externo que são transferidas para um ambiente interno fictício, no qual as condições térmicas são equivalentes ao meio externo. Para o cálculo do índice, as seguintes premissas são feitas:

1. A temperatura de radiação média é igual a temperatura do ar, o que é típico para espaços internos.
2. A velocidade do ar é definida em 0.1 m/s¹.
3. A pressão de vapor do ar ambiente é definida em 12hPa (umidade relativa = 50% com a temperatura do ar = 20 °C).
4. Os parâmetros de atividade humana são estabelecidos em 80W, e os valores de isolamento de roupas é de 0.9.

O índice PET é definido em °C, e é um dos mais utilizados em pesquisas de conforto térmico em espaços urbanos exteriores, todavia, sua aplicação em climas diferentes depende da calibração do índice. Melhor dizendo, de acordo com Salata *et al* (2016), a diversidade climática existente entre diferentes continentes torna necessária a calibração²² dos índices de conforto para de fato refletir as condições térmicas locais. E cabe também ressaltar que o PET não considera parâmetros adaptativos de vestimentas humanas²³.

Em 2011, a *International Society of Biometeorology* – ISB, anunciou um novo índice, o *Universal Thermal Climate Index* – UTCI. O índice se tornou um novo padrão para se descrever a “temperatura de sensação” e é usado por meteorologistas do mundo todo (JENDRITZKY; MAAROUF; STAIGER, 2015). O índice deve atender os seguintes parâmetros:

²¹ *Munich Energy Balance Model for Individuals* (MEMI) é um modelo simplificado utilizado para avaliar as cargas e trocas de calor fisiológicas do corpo humano, e serviu de base para a elaboração do índice PET (HÖPPE, 1987).

²² O processo de calibração dos índices de conforto parte de metodologias diversas, logo, não há consenso quanto a uma estratégia padrão a ser usada, como ponderado por Krüger *et al* (2018). Desta forma, habitantes de diferentes continentes e contextos climáticos apresentarem características térmicas distintas (pessoas experienciam as faixas de conforto e estresse térmico de formas diferentes), portanto, isso torna difícil haver uma comparação direta entre estudos. Salata *et al*. (2016) realizaram uma revisão de diferentes estudos, e destacou que existe uma diferença nos métodos de análise, pois autores avaliaram as condições térmicas em diferentes épocas e momentos do ano, com diferentes métodos de análise e populações de análise.

²³ Havenith *et al* (2011) definem que parâmetros de vestimenta são considerados a interface de interação térmica entre o ser humano (considerado o modelo fisiológico de termorregulação) e o ambiente, logo, a vestimenta torna possível criar um índice aplicável em climas que variam de extremamente quentes e frios.

- Ser termofisiologicamente significativa em toda a gama de troca de calor, ao envolver radiação de ondas longas e curtas.
- Ser válido de aplicação para todos os climas, estações e escalas.
- Ser útil para aplicações em biometeorologia humana como os serviços de previsão do clima e avisos sobre extremos climáticos (ondas de frio e calor etc.).

Todavia, UTCI possui certas limitações quanto a sua aplicação, e assim acordo com Park *et al.* (2014), pode ser citado o fato que é um índice definido por uma única e simples equação, que não permite o pesquisador alterar os parâmetros humanos como o isolamento de vestimentas, que são automaticamente regidos pela temperatura do ar, de forma a corresponder ao comportamento da população. A equação é definida através de valores de variáveis climáticas como temperatura do ar (T_a), temperatura radiante média (T_{rm}), velocidade dos ventos (V_v) e umidade relativa (U_r) também denotada como pressão de vapor de água. Em termos matemáticos, pode ser descrita como:

$$UTCI(T_a, T_{rm}, V_v, U_r) = T_a + offset(T_a, T_{rm}, V_v, U_r)$$

Dentre os pontos fortes do índice, pode-se mencionar que foi elaborado com base em estudos recentes sobre balanço de calor do corpo humano (FIALA, LOMAS, & STOHRER, 2001; FIALA, HAVENITH, BRÖDE, KAMPMANN, & JENDRITZKY, 2012) e efeitos de vestimentas (HAVENITH *et al.*, 2012). E segundo Bröde *et al.* (2012), pode ser considerado o estado da arte em sensação térmica humana e estudos de conforto (BRÖDE *et al.*, 2012).

Com base nos índices analisados acima de Fanger (1973), Matzarakis e Amelung (2008), e Jendritzky *et al.* (2007), as classificações de estresse térmico de acordo com cada índice citado acima foram adaptadas e organizadas na Tabela 5.

Tabela 5: Classificações de estresse térmico segundo os índices PMV, PET e UTCI.

PMV	PET	UTCI	Categorias de estresse térmico
-3,5	> 4 °C	-27 a -40 °C ou abaixo	Estresse extremo por frio
-2,5	4 a 8 °C	-27 a -13 °C	Estresse forte por frio
-1,5	8 a 13 °C	-13 a 0 °C	Estresse moderado por frio

-0,5	13 a 18 °C	0 a 9 °C	Estresse leve por frio
0	18 a 23 °C	9 a 26 °C	Zona de conforto térmico
0,5	23 a 29 °C	26 a 32 °C	Estresse leve por calor
1,5	29 a 35 °C	32 a 38 °C	Estresse moderado por calor
2,5	35 a 41 °C	38 a 46 °C	Estresse forte por calor
3,5	> 41 °C	> 46 °C	Estresse extremo por calor

Fonte: Adaptado de Fanger (1973), Matzarakis e Amelung (2008), e Jendritzky *et al.* (2007).

Em suma, cabe mencionar que os índices de conforto térmico podem ser importantes parâmetros para serem usados por urbanistas e arquitetos em diversas abordagens, variando desde a escala do edifício até a do meio urbano e da paisagem. Os índices podem auxiliar os profissionais a criar mapas bioclimáticos, que consistem em imagens que contêm os valores dos índices em forma de mapas. Dessa forma, de acordo com a resolução do mapa, torna possível para o profissional mapear áreas de desconforto térmico, e assim, propor soluções de projeto que favoreçam a criação de espaços confortáveis para o ser humano.

2.3.3. Software de análise de conforto térmico

A revolução digital que ocorreu nos últimos anos trouxeram inovações para diversos campos do saber. Especialmente para a arquitetura e urbanismo, com os softwares: *Sketchup*, *AutoCAD*, *ArchiCAD* etc., esses softwares permitiram uma maior agilidade na criação de plantas baixas, facilidade no entendimento do projeto em três dimensões, assim como a capacidade de realizar outros comandos e ações com o simples toque de alguns botões (MONTENEGRO, 2001).

Uma série de ferramentas utilizadas hoje em dia faz parte da tecnologia de *Computer Aided Design – CAD*²⁴, e posteriormente no ano 2000, a chegada da tecnologia *Building Information Modelling - BIM*²⁵ os profissionais passaram a realizar

²⁴ *Computer Aided Design*, ou projeto assistido por computador (tradução livre), é um termo que se refere ao uso de computadores para a criação, modificação, análise e otimização de projetos de arquitetura, engenharia civil, elétrica etc. Disponível em: <<https://www.ptc.com/en/technologies/cad#:~:text=Computer%20Aided%20design%20is%20a,that%20get%20to%20market%20fast.>>. Acesso em: 18/10/2021.

²⁵ A tecnologia BIM representa uma nova geração de tecnologia na concepção de projetos de arquitetura e engenharia a partir da parametrização com o auxílio de um computador (SILVA, 2013).

projetos mais organizados, e com maior nível de especificação técnica de materiais etc. (SILVA, 2013).

Dessa forma, cabe ressaltar que no caso dessa dissertação, serão abordados os softwares de análise de conforto térmico, que são um tipo de ferramenta computacional utilizada por áreas de estudo de desempenho ambiental voltados para a arquitetura e urbanismo. Estes softwares simulam as condições de conforto térmico com base em equações de termodinâmica pré-estabelecidas, e nos índices e suas respectivas métricas, e são fruto de sites de centros de pesquisas, dissertações de mestrado e teses de doutorado, e, nas últimas décadas, se encontram em constante desenvolvimento e disseminação (OLIVEIRA, 2010; MACKEY *et al.* 2017, NABONI *et al.* 2020). A aprimoração dos softwares é baseada em um processo de validação, isto é, são feitas medições em campo, e os valores são comparados com os obtidos em simulações para estabelecer uma margem de erro (IRVING, 1988; SOUZA *et al.* 2010).

Dessa maneira, serão apresentados estudos sobre conforto térmico em espaços públicos feitos em diferentes climas no mundo, e que fizeram o uso de ferramentas computacionais para avaliar as condições térmicas urbanas. Assim, Johansson (2006) estudou o conforto térmico em cânions urbanos profundos e rasos na cidade de Fez no Marrocos partindo do uso do índice PET. Foram realizadas medições em campo entre fevereiro de 2000 e agosto de 2001, através de estações meteorológicas que captaram dados de temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade dos ventos e umidade relativa. O índice PET foi calculado utilizando o software *Meteonorm*²⁶. Os resultados demonstraram que, com relação aos cânions rasos, os cânions profundos reduziram o índice PET em até 16,5 °C durante as 12h (período de maior desconforto térmico) no período do verão e 9 °C durante o inverno. Com base nas classificações de estresse térmico, a morfologia urbana foi capaz de gerar espaços sombreados, que reduziram o estresse térmico de “estresse forte por calor” para “estresse leve por calor”.

Rajagopalan, Lim e Jamei (2014) investigaram o efeito das ICU em cânions urbanos da cidade de Muar, na Malásia. Foram feitas medições com estações meteorológicas em julho de 2011, durante momentos mais quentes do dia, e no fim do dia, quando a temperatura começa a abaixar. Foi identificado que a ICU atinge 4°C

²⁶ Software de análise climática, usado para análises de anos típicos e arquivos de séries históricas. Disponível em: <<https://meteonorm.com/en/>>. Acesso em: 29/10/2021.

de intensidade durante o dia e 3,2 °C no período noturno, e posteriormente, foram feitas análises de *CFD* de fluxo dos ventos na cidade através do software *IES Virtual Environment*²⁷. Os resultados indicaram que a combinação de edifícios altos com ruas estreitas aprisionam calor e reduzem o fluxo dos ventos, o que pode resultar em temperaturas elevadas durante diferentes momentos do dia.

Em um outro estudo feito com o uso de ferramentas de análise de *CFD*, Al-Sallal e Al-Rais (2011) investigaram a performance de resfriamento passivo²⁸ em ICU existentes em diferentes contextos urbanos da cidade de Dubai. As análises foram feitas utilizando o software PHOENICS²⁹ e foram realizadas no inverno e verão. Os resultados indicaram que cânions largos ajudaram na distribuição mais uniforme dos ventos, que podem variar sua velocidade entre 0,5 e 5m/s. As velocidades simuladas são consideradas em um nível confortável, variando entre ar leve a brisa suave, de acordo com a Escala de Beaufort³⁰.

Minella, Rossi e Krüger (2009) realizaram análises em cânions urbanos na cidade de Curitiba, buscando entender a relação do FVC com a manifestação do fenômeno. Os autores partiram de medições em campo em dois pontos diferentes (com FVC igual a 0,3 e 0,61 respectivamente) e fotos feitas com lente olho-de-peixe para poder identificar a influência do FVC nas condições térmicas. As análises foram feitas no dia 9 de janeiro de 2008 em um período de cinco horas e foram aplicados pesquisas de campo através de questionários para delimitar as respostas fisiológicas com base nos índices PMV e PET. Os índices foram delimitados utilizando o programa *RayMan*³¹. Assim, as análises apontaram que o FVC influencia na quantidade de

²⁷ Conjunto de ferramentas para análise de projetos e otimização de edificações, realizam análises térmicas e de *CFD*. E são comumente usadas para análises de emissões de carbono, o que permite aos arquitetos identificarem melhores soluções passivas para projetos. Disponível em: <<https://www.iesve.com>>. Acesso em: 29/10/2021.

²⁸ Resfriamento passivo no urbanismo remete-se a técnicas de projeto que favoreçam a circulação dos ventos, permitindo uma melhor ventilação dos espaços públicos e assim, mitigando o efeito das ICU (DUGOLLI, 2013).

²⁹ Software de análise de *CFD* usado para analisar quantitativamente como fluidos se comportam em motores mecânicos, edificações, seres humanos, rios e oceanos etc. Disponível em: <<https://www.cham.co.uk/phoenics.php>>. Acesso em: 29/10/2021.

³⁰ Escala de Força dos Ventos de Beaufort é uma medida empírica que relaciona e classifica a velocidade dos ventos com condições observadas em terra ou no mar. Varia entre 0 (ventos calmos <0.5m/s) e 12 (força de furação ≥ 32.7m/s). Disponível em: <<https://www.weather.gov/mfl/beaufort>>. Acesso em: 29/10/2021.

³¹ Software desenvolvido pela Universidade de Freiburg na Alemanha, que realiza análises de radiação através de dados climatológicos, é útil para análises casos de edifícios isolados sem a presença de obstáculos no entorno imediato, e o software tem sido validado com base na margem de erro causada pelas múltiplas reflexões de radiação de onda curta, e assim varia corretamente de acordo com as diferenças entre medições reais e as simulações (MATZARAKIS, 2004).

radiação, pois quanto menor o FVC, maior a obstrução ocasionada pela geometria. Os resultados indicaram que a radiação que incide nas superfícies variou significativamente de um ponto para o outro, e os questionários apontaram que as situações de maior estresse por calor (para ambos os índices) eram mais frequentes no ponto com maior FVC (0,61).

Hermann e Matzarakis (2012) averiguaram como as condições térmicas podem ser modificadas em cânions urbanos da cidade de Freiburg, na Alemanha. As análises foram conduzidas utilizando o software *RayMan*, e se basearam em 10 anos de medições climáticas de temperatura e umidade do ar, velocidade dos ventos e radiação global³², obtidos entre 1º de setembro de 1999 e 31 de dezembro de 2009. Os dados foram usados para calcular a TRM e o índice PET. Com base nos dados climáticos, foi constatado com base no índice PET que a cidade de Freiburg se encontra em desconforto térmico por frio (muito frio, PET >4°C) em 40,8% do tempo analisado. Também foi identificado que a MRT e as condições térmicas são fortemente afetadas pela configuração urbana.

Algeciras, Consuegra e Matzarakis (2016) fizeram estudos de configurações urbanas de forma a aprimorar o conforto térmico, a nível do pedestre, em um sítio histórico em Cuba. Partindo de análises realizadas no software *RayMan*, que foram feitas nos solstícios de verão e inverno. Foram selecionadas configurações urbano-morfológicas com diferentes orientações e razões H/W. Os resultados foram apresentados com base no índice PET, e demonstraram que a distribuição espacial das condições de conforto térmico variam de acordo com a razão H/W. A orientação norte – sul se mostrou ser a mais favorável para mitigar o estresse térmico, e a razão H/W entre 1 e 1.5 é aceitável para uma boa performance térmica no verão e inverno.

Muniz-Gäal *et al.* (2018) analisaram o efeito de diferentes razões H/W nas condições térmicas de cânions urbanos da cidade de Campinas. O conforto térmico foi analisado através do índice PET e de simulações no software *ENVI-Met*³³. As simulações foram realizadas em dias representativos de inverno (21/08/2015) e verão

³² Compreende toda gama de radiação de ondas curtas que incide em uma superfície horizontal no solo. Inclui tanto a radiação direta quanto a difusa. Disponível em: <https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Global_radiation>. Acesso em: 29/10/2021.

³³ Programa desenvolvido por Michael Bruse e equipe de pesquisadores do Departamento de Geografia da Universidade de Bochum, na Alemanha. É um software capaz realizar simulações de fluxo e velocidade dos ventos, distribuição da temperatura e umidade. Considera o calor latente da vegetação e de elementos de água em seus cálculos. Apresenta resultados gráficos e tabelados de fácil interpretação. Disponível em: <<https://www.envi-met.com/>>. Acesso em: 29/10/2021.

(07/01/2016) e assim, foram simulados 48 cenários de cânions com diferentes taxas de ocupação, coeficientes de aproveitamento, orientações axiais e razões H/W. Os resultados apontaram que o cânion orientado no eixo nordeste – sudoeste teve valores maiores para o índice PET, que permaneceram acima do limite de conforto (26°C) durante 25% do dia. Cânions de maior razão H/W reduziram significativamente a variação e o valor de pico do PET durante o dia em todas as orientações analisadas.

Carfan, Galvani e Nery (2011), realizaram análises microclimáticas em dois bairros diferentes de São Paulo utilizando o software ENVI-Met. Os autores utilizaram o índice PMV e a temperatura radiante média para avaliar a interação de troca de calor entre superfícies urbanas e o meio urbano. Os resultados apontaram que o PMV variou entre 0.5 e 1.0 em superfícies asfálticas (caracterizando um leve estresse por calor de acordo com a escala do índice). Às 12h, áreas próximas a corpos d'água e gramadas tiveram seu PMV em patamares de conforto térmico (-0.5 e 1.0). Assim, esses resultados mostram o poder de mitigar o desconforto térmico das áreas verdes.

Lobaccaro e Acero (2015) executaram análises do impacto de ações de adição de áreas verdes no conforto térmico de espaços públicos da cidade de Bilbao, na Espanha. As análises foram feitas em três configurações de cânions urbanos diferentes e 5 cenários distintos de vegetação urbana, e em condições de dias de clima típico de verão. As análises foram feitas no software *ENVI-Met*, e foram pautadas no índice de conforto térmico PET. A maior diminuição do índice PET ocorreu em configurações urbanas com alta razão H/W e ao combinar árvores e grama, nessas áreas foi detectada uma redução de 10°C no índice, e 8°C em cânions largos.

Abdollahzadeh e Biloría (2020) analisaram cânions urbanos em Sidney, visando comparar o efeito de diferentes orientações axiais de cânions na incidência de radiação solar e condições de vento local. As análises foram conduzidas utilizando o software *ENVI-Met*. As condições térmicas foram analisadas com base nas métricas do índice PET. Os resultados ressaltaram a orientação solar como um dos parâmetros mais influentes nas condições de conforto térmico externas, especialmente ao associar os valores do PET com a velocidade e direção dos ventos locais. Nos cânions de orientação leste-oeste os valores do índice PET estavam em níveis de conforto térmico em 12,33% do dia (entre 6 e 18h). Cânions orientados no eixo noroeste-sudoeste apresentaram os melhores níveis de conforto térmico, e, com base nas simulações, performaram até 24,95% melhor que as outras orientações axiais.

O efeito da vegetação na temperatura do ar foi verificado por Akbari *et al.* (2016) na cidade de Montreal, no Canadá. As análises foram feitas no software *ENVI-Met*, sendo baseadas nas métricas do índice PET, e foram realizadas nos dias 21 a 23 de julho de 2013. Os resultados das análises destacaram o poder mitigador de áreas verdes em microclimas de cânions urbanos, pois as áreas verdes podem reduzir o estresse térmico de 4 até 6 °C, e tendendo a abaixar as temperaturas em outras altitudes, variando até 2 °C a 60m do solo. O efeito das áreas verdes varia de acordo com a cobertura do dossel e da geometria urbana, e as condições climáticas prevalentes.

Park, Tuller e Jo (2014) investigaram os microclimas de cânions urbanos nas cidades de Nanaimo, no Canadá e Changwon na República da Coreia. Os autores se basearam no índice UTCI e partiram de medições de temperatura e umidade relativa do ar nas duas cidades, feitas durante 11 de junho de 2009 em Changwon e em 26 de julho de 2009 em Nanaimo. Os valores da temperatura radiante média foram simulados utilizando o modelo *HURES human-urban radiation exchange simulation model*³⁴; a velocidade dos ventos e o índice UTCI foram obtidos utilizando o software *ENVI-Met*. Os resultados indicaram que áreas com incidência solar tiveram estresse moderado por calor (UTCI entre 28 e 38 °C) e áreas sombreadas registraram de nenhum estresse a estresse moderado por calor (UTCI entre 20 e 27 °C). Os autores concluíram que o índice UTCI é um índice válido e fácil de se calcular, e seus resultados podem ser apresentados em forma de mapas bioclimáticos.

Evola *et al.* (2020) realizaram trabalhos em cânions urbanos da cidade de Catania, na Itália. As análises foram feitas utilizando o software *Ladybug Suite Tools*, e os autores visaram validar o quão confiável é o workflow de simulação criado no software ao comparar dados mensurados em campo com os obtidos nas simulações. Foram feitas campanhas de medição em campo através de estações meteorológicas e outros instrumentos de aferição microclimática, as campanhas ocorreram no dia 30 de agosto de 2018 e 17 de julho de 2019, e os pontos de medição foram posicionados em áreas sombreadas e expostas ao sol. Por fim, a partir das comparações entre os dados mensurados e simulados, os resultados indicaram uma diferença de 0.6 °C em pontos sombreados, todavia, os dados de pontos expostos ao sol, indicaram que a TRM pode ser subestimada em até 6.1 °C. Estes valores subestimados, segundo os

³⁴ Modelo matemático de troca de radiação humana com o meio externo criado por Park (2011).

autores, podem ter relação com o próprio software de simulação, pois os raios do sol e suas diversas reflexões que ocorrem entre as superfícies e o ar urbano muitas vezes não são levadas em consideração.

Basso *et al.* (2019) exploraram o impacto de diferentes morfologias urbanas na incidência da radiação solar em diferentes cânions urbanos localizados na cidade de Passo Fundo. O estudo foi feito com base nas ferramentas *Radiance*³⁵ que é integrado ao software *Ladybug Suite Tools*. A análise da geometria urbana se pautou no parâmetro FVC e foi realizada durante o período de inverno (junho e julho) e verão (dezembro e janeiro). Dessa maneira, os resultados indicaram que a verticalização da morfologia aumentou as superfícies de contato com a radiação solar, e assim, mais radiação é absorvida. Foi constatado também que espaços de menor FVC obstruem a dispersão da radiação armazenada para atmosfera, o que pode ocasionar espaços em desconforto térmico.

Em síntese, com base nos estudos abordados, fica evidente que os softwares de simulação de conforto térmico podem ser úteis ferramentas para auxiliar arquitetos, urbanistas e outros profissionais a analisarem as condições térmicas de diferentes microclimas urbanos. Os softwares permitem realizar diversos tipos de simulações diferentes, como análises de radiação, ventos (como exemplo, os softwares de *CFD*) e análises de conforto térmico. Os resultados das simulações podem ser apresentados em forma de gráficos, e mapas bioclimáticos; estes mapas são gerados com base em um gradiente de cores que demonstram os locais de análise nos quais o desconforto térmico ocorre. Dessa forma, os mapas bioclimáticos podem auxiliar na proposição de diretrizes para mitigar o desconforto térmico, para que assim, sejam propostos espaços urbanos e projetos com maior qualidade ambiental. Os estudos aqui abordados foram organizados com base nas referências, locais e climas analisados, métodos, software e índices de conforto utilizados, e momentos analisados, para apresentar um panorama de quais softwares e índices são mais utilizados, conforme a Tabela 6.

³⁵ Radiance é um software criado pelo pesquisador Greg Ward Larson em 1985, na Biblioteca Nacional de Lawrence Berkeley, na Califórnia. Foi feito para realizar análises e visualização dos efeitos da iluminação em projetos. O software parte de processos de ray-tracing para calcular os efeitos da luz. Disponível em: <<https://windows.lbl.gov/software/radiance>>.

Tabela 6: Estudos sobre software de análise de conforto térmico abordados nessa seção.

Referência	Local	Clima (classificação de Köppen)	Método utilizado / Momentos analisados	Momentos analisados	Software(s) utilizados	Índice de conforto utilizado	Resultados obtidos.
Johansson (2005)	Fez, Marrocos.	Mediterrâneo (Csa)	Campanhas de medição em campo com estações meteorológicas e anemômetro. Análises em softwares de simulação computacional.	Fevereiro de 2000 e agosto de 2001 em dias diferentes	<i>Meteonorm.</i>	PET	Cânions profundos reduziram o índice PET em $16,5^{\circ}\text{C}$ durante as 12h no verão e 9°C durante o inverno.
Rajagopalan, Lim e Jamei (2014).	Muar, Malásia.	Tropical (Af)	Medições em campo com estações meteorológicas e análises de CFD.	Julho de 2011, durante diferentes horas do dia.	<i>IES Virtual Environment</i>	Não utilizou.	ICU atinge 4°C de intensidade durante o dia e $3,2^{\circ}\text{C}$ no período noturno. Cânions profundos aprisionam calor e reduzem o fluxo do ar, resultando em desconforto térmico.
Al-Sallal e Al-Rais (2011)	Dubai, Emirados Árabes.	Tropical e subtropical de deserto (Bwh)	Análises em softwares de CFD	Inverno e verão, ano não informado.	<i>PHOENICS</i>	Não utilizou.	Cânions largos ajudaram na distribuição mais uniforme dos ventos, que podem variar sua velocidade entre $0,5$ e 5m/s
Minella, Rossi e Krüger (2009)	Curitiba, Brasil.	Oceânico (Cfb)	Medições com estações meteorológicas, em dois pontos, questionários aplicados em campo e análises em softwares de simulação.	9 de janeiro de 2008.	<i>RayMan</i>	PMV/PET	O FVC influenciou na quantidade de radiação que incide nas superfícies e no conforto térmico.
Hermann e Matzarakis (2011)	Freiburg, Alemanha.	Oceânico (Cfb)	Análise de dados climáticos e análises em softwares de simulação.	1º de setembro de 1999 e 31 de dezembro de 2009	<i>RayMan</i>	PET	A cidade de Freiburg se encontra em desconforto térmico por frio (muito frio, PET $>4^{\circ}\text{C}$) em 40,8% do tempo analisado.

Algeciras, Consuegra e Matzarakis (2016)	Camagüey, Cuba.	Tropical (Aw)	Análises em softwares de simulação.	Durante os dias de solstício de inverno e verão.	<i>RayMan</i>	PET	Os valores do índice PET variaram de acordo com as diferentes razões H/W
Muniz-Gaal et al. (2018)	Campinas, Brasil.	Úmido subtropical (Cfa)	Análises em softwares de simulação.	21/08/2015 e 07/01/2016	<i>ENVI-Met</i>	PET	Cânions no eixo NE-SO tiveram maiores valores do PET. Cânions de maior razão H/W tiveram menor amplitude do PET.
Carfan, Galvani e Nery (2011)	São Paulo, Brasil.	Oceânico (Cfb)	Análises em softwares de simulação.	29/06/2009	<i>ENVI-Met</i>	PMV	Os resultados apontaram que o PMV variou entre 0.5 e 1.0 em superfícies asfálticas. Às 12h, áreas próximas a corpos d'água e gramadas tiveram seu PMV em patamares de conforto térmico (-0.5 e 1.0).
Lobaccaro e Acero (2015)	Bilbao, Espanha.	Oceânico (Cfb)	Análises em softwares de simulação ambiental.	7 de agosto de 2010	<i>ENVI-Met</i>	PET	Maior redução do índice PET ocorreu em espaços com alta razão H/W e ao combinar espaços gramados e árvores.
Abdollahzadeh e Bilorja (2020)	Sidney, Austrália.	Subtropical úmido (Cfa)	Análises em softwares de simulação.	Dia 15 de janeiro.	<i>ENVI-Met</i> e <i>Ladybug Suite Tools</i> .	PET	Cânions no eixo L-O tiveram o índice PET em níveis de conforto térmico em 12,33% do dia, os orientados no eixo NE-SO tiveram melhor desempenho de conforto térmico.
Wang e Akbari (2016)	Montreal, Canadá.	Frio temperado (Dfb)	Análises em softwares de simulação.	Do dia 21 ao dia 23 de julho de 2013.	<i>ENVI-Met</i>	PET	Foi evidenciada o poder mitigador das áreas verdes, que reduziram o índice PET de 4 a 6°C em áreas sombreadas,

							e 2 °C a 60m do solo.
Park, Tuller e Jo (2014)	Nanaimo, Canadá. Changwon, Coréia do Sul.	Ambas são de clima quente e temperado (Cfb)	Medições em campo através de estações meteorológicas, e simulações em dois softwares diferentes.	11 de junho de 2009 (em Changwon) e 26 de julho de 2009 (em Nanaimo).	<i>ENVI-Met, HURES</i> human-urban radiation exchange simulation model	UTCI	Áreas com incidência solar tiveram estresse moderado por calor (UTCI entre 28 e 38 °C) e áreas sombreadas registraram de nenhum estresse a estresse moderado por calor (UTCI entre 20 e 27 °C). Índice UTCI é válido e fácil de calcular. Apresentação dos resultados em forma de mapas bioclimáticos.
Evola <i>et al.</i> (2020)	Catania, Itália.	Mediterrâneo (Csa)	Campanhas de medição em campo com estações microclimáticas e anemômetros. E análises em softwares de simulação computacional para validar os dados	30 de agosto de 2018 e em 17 de julho de 2019.	<i>Ladybug Suite Tools</i>	UTCI	Diminuição do índice UTCI em 0,6°C em espaços sombreados. Espaços expostos ao sol subestimaram a TRM em até 6,1°C.
Basso <i>et al.</i> (2018)	Passo Fundo, Brasil.	Úmido subtropical (Cfa)	Análises em softwares de simulação.	Período de inverno (junho e julho) e verão (dezembro e janeiro).	<i>Ladybug Suite Tools</i>	Não foi utilizado	Espaços de menor FVC obstruem a dispersão de calor para a atmosfera, resultando em desconforto térmico.

Fonte: Criado pelo autor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos utilizados no estudo foram adaptados de trabalhos feitos por Evola *et al.* (2020) e Naboni *et al.* (2017,2020), que fizeram análises usando o software *Ladybug Suite Tools* para analisar as condições térmicas de ambientes urbanos. A metodologia foi estruturada em 4 partes: a) coleta de dados, b) modelagem da área analisada em quatro momentos considerados, c) condução e análise de simulações e d) análise dos dados. A Tabela 7 resume os procedimentos utilizados. Os procedimentos que foram utilizados em cada parte foram mais bem detalhados nas suas respectivas seções a seguir.

Tabela 7: Procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa.

parte 1 COLETA DE DADOS	parte 2 MODELAGEM	parte 3 SIMULAÇÕES	parte 4 ANÁLISE DOS DADOS
DADOS FÍSICOS (análise de fotos e documentos históricos)	ALTURA E IMPLANTAÇÃO DE EDIFÍCIOS	1940, 1980, 2020 e cenário hipotético (solstícios de inverno e verão)	Análise dos mapas de CFD e UTCI
DADOS CLIMÁTICOS (“.epw” ³⁶)	DADOS CLIMÁTICOS (UWG)	8h, 12h, 16h e 20h	Análise percentual de variação do UTCI

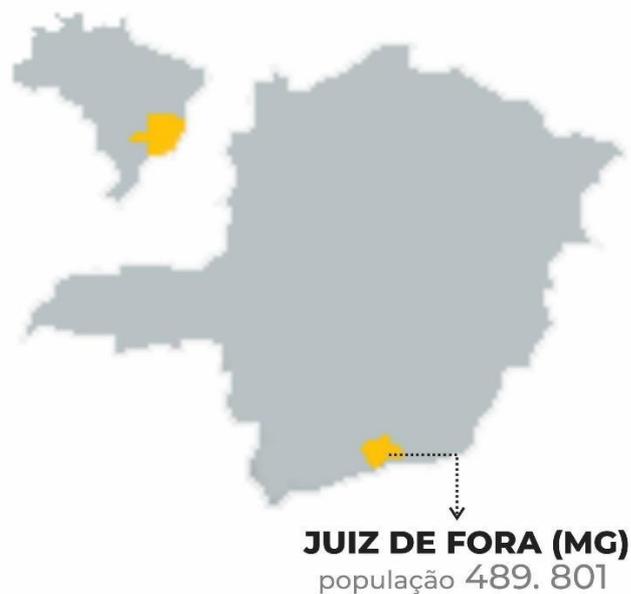
Fonte: Criado pelo autor (2021).

3.1. Breve histórico e caracterização de Juiz de Fora

A cidade de Juiz de Fora é localizada na mesorregião da Zona da Mata Mineira (Figura 9), com aproximadamente 563.769 habitantes de acordo com o censo de 2017 do IBGE. Ocupa uma área de 1.429,875 km², com aproximadamente 317,740 km² de perímetro urbano, com densidade demográfica de 359,59 habitantes por km² (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017).

³⁶ O arquivo de extensão “.epw” (ou *EnergyPlus Weather File*) é um arquivo constituído de um compilado de dados climáticos obtidos ao longo de uma série histórica. Portanto, o arquivo não caracteriza um ano em particular, mas um ano teórico (conhecido também como Ano Típico Meteorológico) composto por um conjunto de dados de diferentes meses, coletado ao longo de diversos anos.

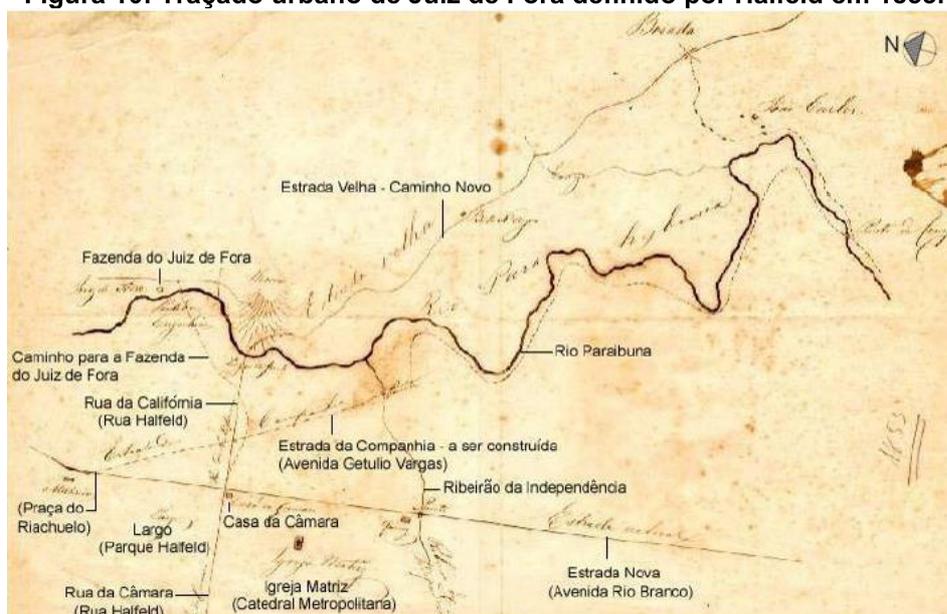
Figura 9: Mapa demonstrando a localização de Juiz de Fora.



Fonte: Criado pelo autor.

A cidade surgiu às margens do Caminho Novo, esse era uma de outras inúmeras rotas que a coroa portuguesa traçou em Minas Gerais para o escoamento do ouro do interior do país para a capital do Brasil que até então era o Rio de Janeiro. Devido ao fim do ciclo do ouro e o advento da economia cafeeira na região, foi construída a Estrada Nova do Paraibuna (Figura 10), obra do engenheiro prussiano Guilherme Fernando Halfeld que foi contratado pelo governo de Minas em 1836 para a execução da obra, pois os outros caminhos não atendiam mais as necessidades de infraestrutura para escoamento da produção cafeeira da região, se tornando mais um dos elementos que influenciaram no desenvolvimento e no traçado urbano atual de Juiz de Fora, sua construção finalizou em 1838 (CORDOVIL, 2011).

Figura 10: Traçado urbano de Juiz de Fora definido por Halfeld em 1855.



Fonte: Arquivo Histórico da Cidade de Juiz de Fora, 2007.

Posteriormente, com a construção da Rodovia União Indústria, o responsável foi o comendador Mariano Procópio Ferreira Lage, surge outro eixo de expansão da cidade. Mariano Procópio organizou e estabeleceu em Juiz de Fora a Companhia União e Indústria, atraindo a vinda de inúmeros imigrantes europeus que compunham a mão de obra da cidade acelerando o processo de desenvolvimento urbano. (CORDOVIL, 2011).

Com o fim da construção da Rodovia União Indústria, o centro da cidade começa a se formar, Halfeld criou uma trama regular das ruas do centro da cidade, traçando as ruas da Califórnia (Rua Halfeld) e Imperatriz (Rua Marechal Deodoro), com molde nos formatos tradicionais dos lotes portugueses, estreitos e compridos. (JUNQUEIRA, 2006 apud BRAIDA, 2011).

Com lotes grandes, o traçado urbano feito por Mariano Procópio incentivava a instalação de indústrias, opondo-se a morfologia de lotes pequenos de Halfeld, os dois foram agentes privados que atuavam diretamente na formação do espaço urbano, com Halfeld agindo localmente, investindo na imobilização de capital, e Mariano Procópio como um agente externo, delineando outras formas para a cidade, investindo na capacidade industrial da cidade. A primeira planta cadastral, que visou organizar o traçado urbano da área central foi criada em 1860 pelo engenheiro Gustavo Dodt, que propôs que todas as ruas da área central fossem retilíneas, ortogonais e

padronizadas, e estas deveriam se abrir em direção ao Morro do Imperador, e este traçado permanece até a atualidade (GIROLETTI, 1988).

Em 1875, a cidade recebe seu primeiro sistema ferroviário, com a Ferrovia Dom Pedro II, Juiz de Fora se torna um importante polo econômico e centro ferroviário da região. As ruas Halfeld, Marechal Deodoro e Av. Getúlio Vargas se tornam importantes polos comerciais para cidade, sendo Av. Getúlio Vargas uma linha imaginária referencial que separa espacialmente as partes baixas e altas das ruas do centro (SAMPAIO, 2010).

Em 1889, Juiz de Fora recebe uma série de melhorias urbanas, como o calçamento de vias, iluminação pública, bondes urbanos e saneamento básico, e, recebeu nessa época a alcunha de “Manchester Mineira”, pois se tornou um importante entreposto econômico do estado. Atualmente, o centro de Juiz de Fora concentra os principais centros comerciais da cidade, e se formou em um triângulo delimitado pelas Avenidas Barão do Rio Branco, Itamar Franco e Francisco Bernardino. Este triângulo é cortado pela Av. Getúlio Vargas, que é uma linha imaginária que separa as vias da área central em partes altas e baixas (SAMPAIO, 2010). As fases de desenvolvimento da cidade foram estruturadas na Tabela 8.

Tabela 8: Fases de desenvolvimento de Juiz de Fora.

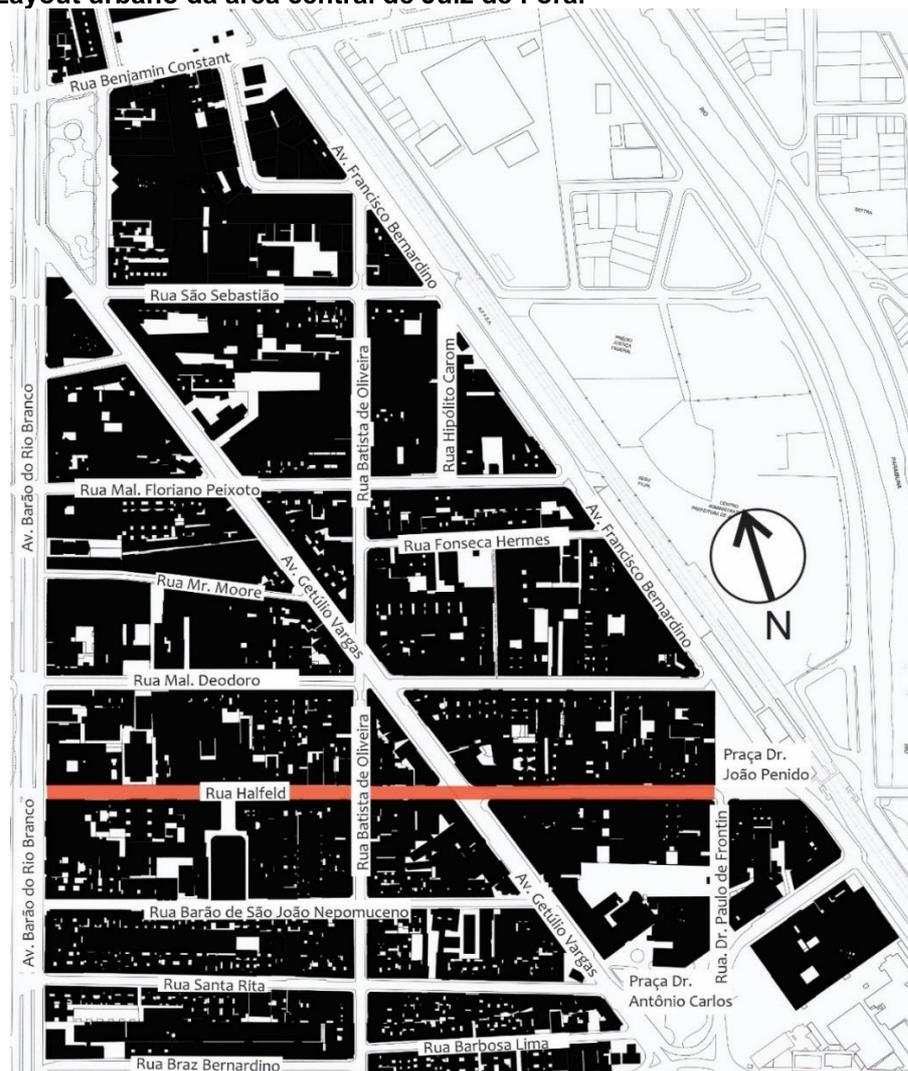
Momento Histórico	Fase de desenvolvimento
Até 1836	Época do Caminho Novo em Minas Gerais e escoamento do ouro do interior para a capital, Rio de Janeiro. Início da formação do povoado que deu origem a cidade de Juiz de Fora.
1836 a 1838	Fim do ciclo do ouro e advento da economia cafeeira, e da construção da Estrada Nova do Paraibuna para escoamento da produção de café da região. Criação de mais um eixo de expansão da cidade.
1852 a 1861	Construção da Rodovia União Indústria, atração de mão de obra de imigrantes alemães. Formação da área central e desenvolvimento econômico, urbano e industrial da cidade, que se torna um importante entreposto econômico, se eleva de vila à cidade em 1856.
1870 a 1875	Construção da Estrada de Ferro Dom Pedro II para escoamento da produção de café. Consolidação da área central como principal centro comercial da região, especialmente as Ruas Halfeld e Marechal Deodoro
1875 a 1889	Melhorias urbanas chegam à cidade: iluminação pública, bondes públicos, calçamento de vias e saneamento básico. Recebe a alcunha de Manchester Mineira.

1895 a 1960	Construção do prédio da Alfândega da Estrada de Ferro Central do Brasil em 1895, que é ocupado pela 4ª Região Militar em 1916. Canalização do Córrego da Independência em 1960.
1968 a 2007	Construção da Av. Independência (atual Av. Itamar Franco), construção do Viaduto Augusto Franco, obras nas Praças Antônio Carlos e Dr. João Penido. Interrupção do tráfego de pessoas via linha férrea em 2007.

Fonte: Cordovil (2013), Giroletti (1988), Sampaio (2010).

Assim, durante o desenvolvimento da cidade, algumas vias na área central se conformaram como grandes corredores, com edifícios em ambos os lados, portanto, se caracterizam como cânions urbanos, assim como no caso da Rua Halfeld (destacada em vermelho na Figura 11), uma das principais ruas comerciais em Juiz de Fora, que é objeto de estudo do presente trabalho.

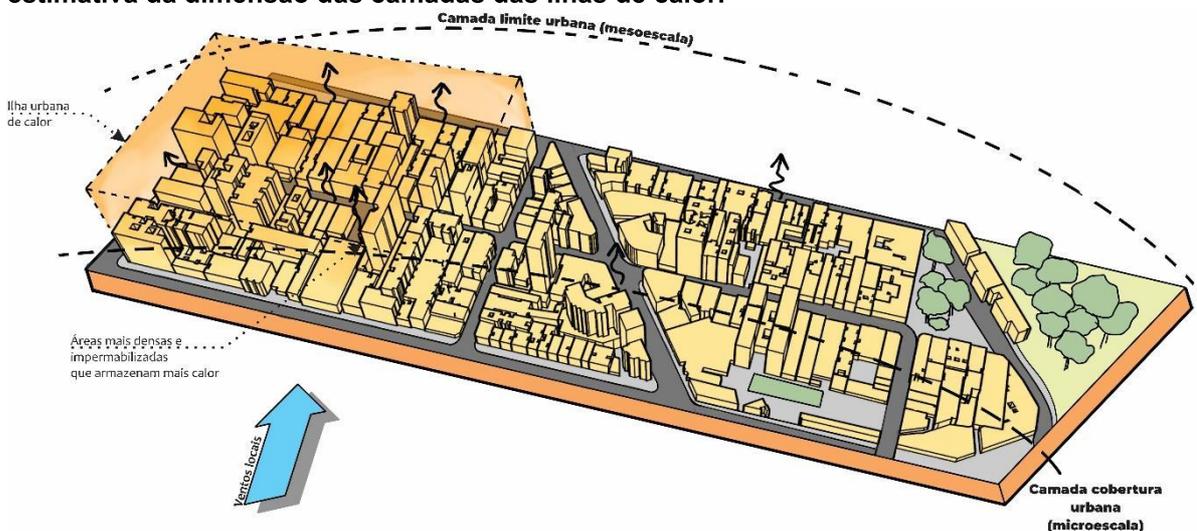
Figura 11: Layout urbano da área central de Juiz de Fora.



Fonte: Prefeitura de Juiz de Fora, modificado pelo autor (2021).

Nos trabalhos de Ferreira *et al.* (2015) e Assis (2016), foram identificadas ilhas de calor em Juiz de Fora. Foi analisado que a temperatura na área central é $7,6^{\circ}\text{C}$ maior quando em comparação com áreas vizinhas. Essa diferença pode ser explicada pela cobertura vegetal insípida e a grande densidade demográfica e habitacional. Os autores destacaram que o conforto térmico e zonas de desconforto variaram de acordo com o uso e ocupação do solo e com as condições urbano-morfológicas (Figura 12).

Figura 12: Perspectiva da extensão do cânion urbano da Rua Halfeld, explicitando uma possível ilha de calor em uma porção mais adensada do cânion, as áreas verdes existentes e uma estimativa da dimensão das camadas das ilhas de calor.



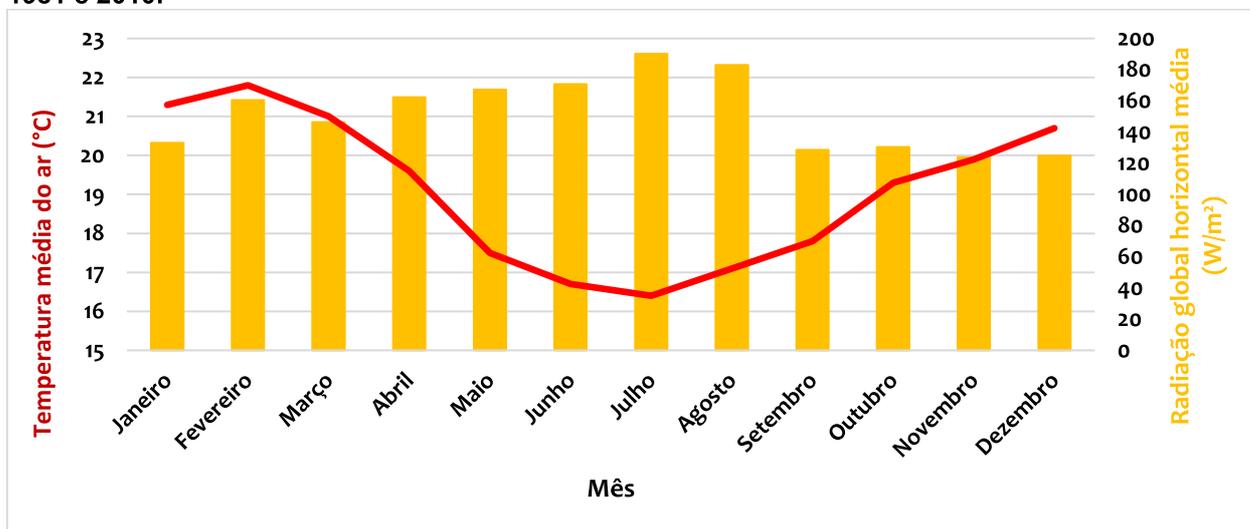
Fonte: Criado pelo autor (2021).

3.2. Caracterização climática de Juiz de Fora

Juiz de Fora é localizada na latitude $21^{\circ} 41' 20''$ sul e longitude $43^{\circ} 20' 40''$ oeste, com altitude média de 678m. Sua classificação climática segundo o sistema Köppen-Geiger é de clima subtropical úmido de inverno seco (Cwa) (ALVARES *et al.*, 2014) e possui duas estações distintas bem definidas: um inverno seco e frio, e um inverno quente e úmido, como mostra a Figura 13. Dados extraídos do INMET possibilitaram visualizar as tendências do clima da cidade, como por exemplo, durante estações frias, de maio até agosto, os níveis de radiação são maiores, podendo atingir até $190\text{W}/\text{m}^2$, os níveis de temperatura do ar encontram-se no baixo patamar dos $16,4^{\circ}\text{C}$. Durante o verão, a temperatura média do ar atinge um máximo de $21,8^{\circ}\text{C}$, e

os níveis de radiação atingem o valor mínimo de $123,9\text{W/m}^2$ em novembro, devido às condições meteorológicas (céu nublado) das estações chuvosas.

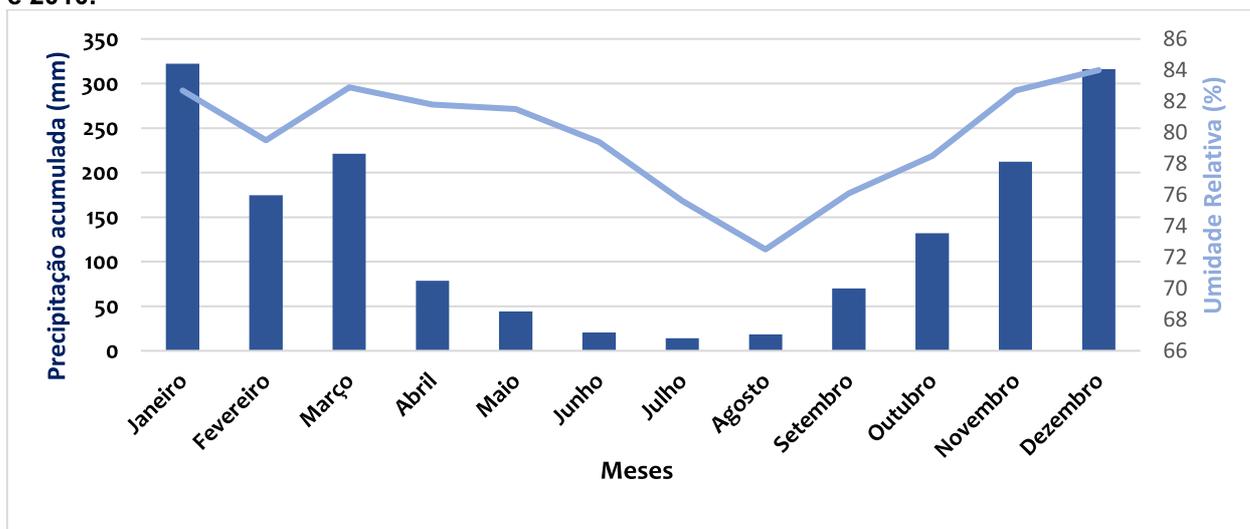
Figura 13: Médias mensais de temperatura do ar e radiação horizontal global, entre os anos de 1981 e 2010.



Fonte: Dados extraídos do Instituto Nacional de Meteorologia, gráfico feito pelo autor.

Os níveis de umidade e precipitação estão em seu nível mais baixo em julho e agosto, atingindo um mínimo de 60% e 72,5mm respectivamente. Por outro lado, durante estações quentes, umidade atinge 86% e um nível de precipitação acumulada de 300mm, aproximadamente, conforme a Figura 14.

Figura 14: Médias mensais de precipitação acumulada e umidade relativa, entre os anos de 1981 e 2010.

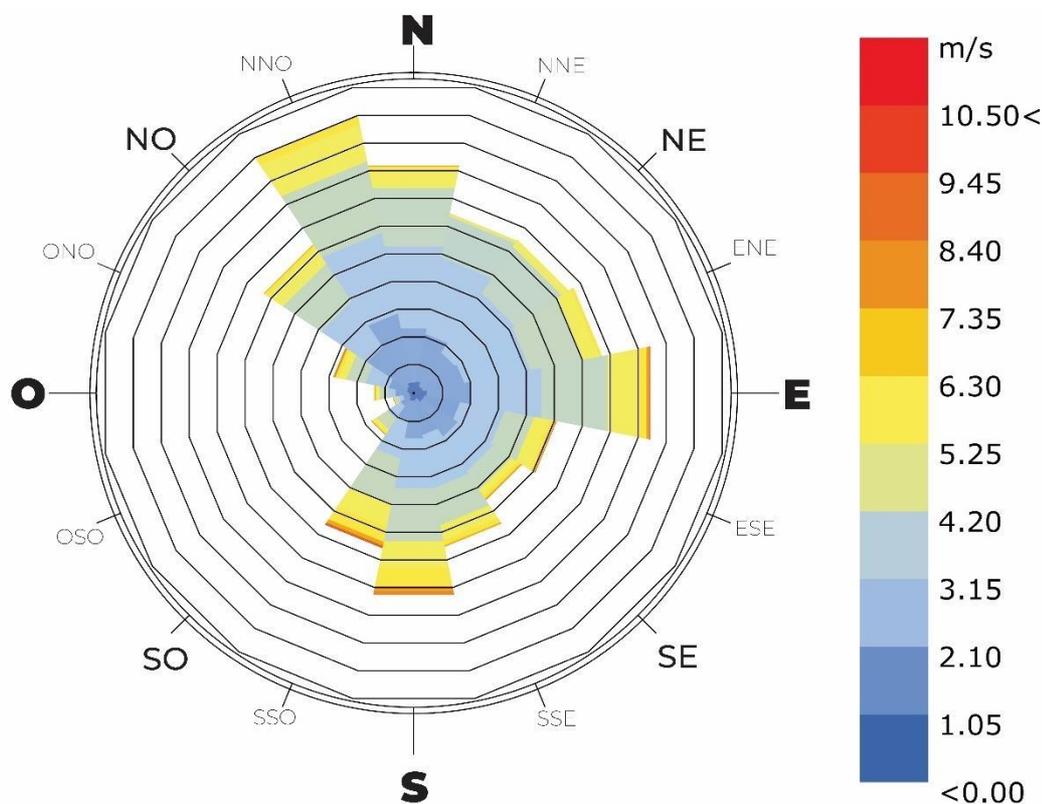


Fonte: Dados extraídos do Instituto Nacional de Meteorologia, gráfico feito pelo autor.

De acordo com a rosa dos ventos criada utilizando dados do arquivo climático e usando componentes do software Ladybug Suite Tools, as direções de ventos locais

predominante é norte-sul, com uma velocidade média de 3,09m/s. Ao mesmo tempo, de acordo com a Figura 15, nota-se a existência de mais duas direções com ventos que podem chegar a 7.35m/s na direção nor-noroeste e leste. Todavia, de acordo com o trabalho de Oliveira *et al.* (2017) realizado em Juiz de Fora, os autores destacaram que a direção dos ventos na cidade varia de acordo com a localização do ponto de medição (principalmente de acordo com a altitude) e da hora do dia, e apresentaram uma certa constância nas velocidades, isso é, na área central foram detectados ventos de até 3km/h. Por fim, os autores ressaltam que a área central possui diversas ruas que se conformam como cânions urbanos, que podem se comportar como grandes corredores de vento e que os ventos na cidade não apresentaram constância nas direções, variando de acordo com as condições morfológicas de relevo e altura dos edifícios do entorno.

Figura 15: Rosa dos ventos indicando as velocidades e direções dos ventos predominantes em Juiz de Fora, os dados foram extraídos do arquivo climático “.epw” e simulados ao longo de um ano.



Fonte: Extraído do software Ladybug Suite Tools, adaptado pelo autor.

3.3. Coleta de dados

A coleta de dados foi feita em arquivos históricos e em base de dados disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia e do *Energyplus* (<https://www.energyplus.net/>), e foi baseada na coleta de dois tipos diferentes de informações: físicas e climáticas

Dados físicos: foram coletadas as implantações e alturas dos edifícios da Rua Halfeld através de fotos e plantas cadastrais obtidas em arquivos históricos da cidade para os anos de 1940 e 1980. Para o período de 2020, foram feitas observações e fotos em campo, além do uso da ferramenta *Google Street View* foi utilizada.

Dados climáticos: o arquivo climático usado nas simulações foi extraído da base de dados do site do *Energyplus*. Também foram extraídos dados climáticos do site do Instituto Nacional de Meteorologia, para assim, tecer uma breve caracterização do clima de Juiz de Fora.

3.4. Modelagem

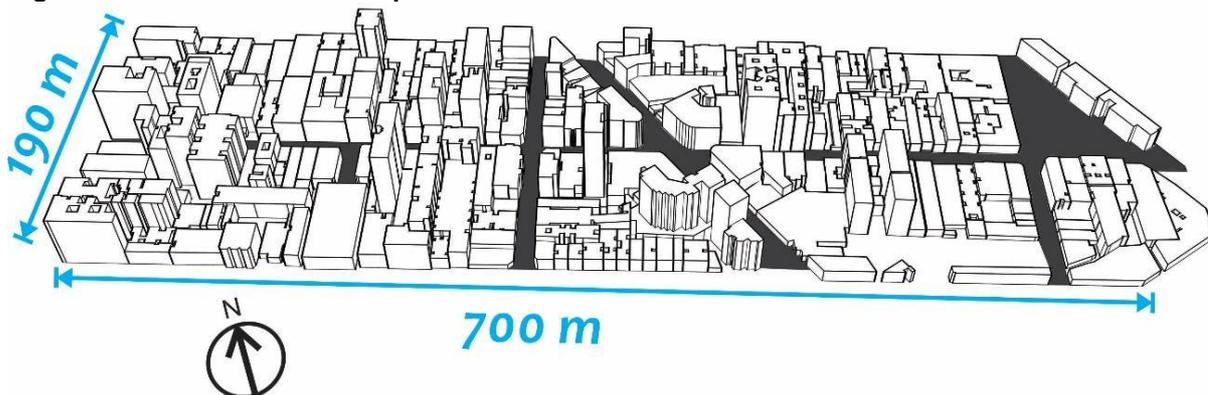
Os quatro momentos considerados foram modelados no software *Rhinoceros* 3D. O cânion da Rua Halfeld possui aproximadamente 11,5m de largura e 700m de comprimento. Primeiramente foi delimitado um recorte de 195 x 700m para a modelagem, que buscou considerar os edifícios que compõem todo o cânion, assim como os do entorno que podem, de alguma forma, exercer influência nas condições térmicas da Rua Halfeld.

O detalhamento considerado na modelagem da geometria dos edifícios foi baseado em padrões de níveis de detalhe (ou *Level of Detail* – LOD) propostos pelo modelo *CityGML*³⁷. De acordo com Gimenez *et al.* (2015), o nível de detalhe 1 (LOD-1) é apropriado para análises de condições térmicas em espaços urbanos. Assim, foram modeladas apenas as formas básicas das edificações. Sacadas, varandas, telhados, aberturas e outros elementos arquitetônicos não foram considerados. Foi

³⁷ *CityGML* é um modelo de dados aberto cujo formato é baseado em arquivos .XML. Foi feito para o armazenamento e troca de modelos virtuais de cidades em 3D. Disponível em: <<https://www.ogc.org/standards/citygml>>.

estipulado uma altura padrão de 3 metros para cada pavimento das edificações, para auxiliar a modelagem através das fotos históricas. Dessa maneira, foi delimitado um recorte de 190 x 700m para considerar todos os edifícios do cânion e os do entorno, conforme a Figura 16.

Figura 16: Recorte delimitado para as análises.



Fonte: Feito pelo autor.

Os períodos de 1940 e 1980 foram modelados utilizando plantas cadastrais e fotos existentes nos arquivos históricos de Juiz de Fora, o período de 2020 foi modelado usando o *Google Street View* e uma planta de arruamento disponibilizada pela Prefeitura da cidade. O cenário hipotético foi gerado de forma paramétrica utilizando componentes do *Grasshopper*, a taxa de ocupação, coeficiente de aproveitamento e altura dos edifícios foram modelados utilizando os valores máximos permitidos pela Lei de Uso e Ocupação do Solo de Juiz de Fora. É importante notar que algumas edificações tiveram sua altura reduzida nesse cenário hipotético, pois a altura máxima permitida pela legislação é menor do que a altura original de algumas edificações. As edificações históricas tombadas foram preservadas como estão atualmente. A Tabela 9 especifica os parâmetros utilizados na modelagem do cenário hipotético.

Tabela 9: Parâmetros da legislação utilizados na modelagem do cenário hipotético.

Altura máxima de edificações	Taxa de ocupação máxima	Coeficiente de aproveitamento máximo
21m	1° ao 3° pavimento – 100% Outros pavimentos – 65%	6,5

Fonte: Prefeitura de Juiz de Fora (2018)

É importante ressaltar que o cenário hipotético é puramente hipotético e representa uma situação na qual as edificações do cânion da Rua Halfeld utilizariam o máximo da ocupação e alturas permitidas na legislação. Notou-se um aumento do coeficiente de aproveitamento, da taxa de ocupação e das alturas dos edifícios nos anos de 1940, 1980 e 2020. E assim, foi criado este cenário hipotético para explorar como seria se essa tendência de aumento dos parâmetros de uso e ocupação do solo e das alturas dos edifícios se mantivesse, e atingisse um valor máximo num cenário hipotético. Este cenário busca ilustrar como seria a morfologia urbana se fosse usado o máximo destes parâmetros permitidos na legislação, assim como analisar como isso impactaria no conforto térmico dos usuários do espaço urbano.

3.4.1. Modificação do arquivo climático

O arquivo “.epw” foi modificado para cada período de análise, usando a ferramenta *Dragonfly*, através da aplicação do componente *Urban Weather Generator* – UWG³⁸. Esse algoritmo permite compatibilizar arquivos macroclimáticos a uma escala microclimática, dado o fato que é um componente criado para estudos sobre ICU (MACKEY *et al.*, 2017). O componente permite o usuário atribuir parâmetros como tráfego de automóveis, iluminação pública, atividade de pedestres (calor sensível ou calor antropogênico), e parâmetros físicos de edificações e do próprio espaço público, como albedo de superfícies (de edifícios, do solo e de pavimentação urbana), taxa de cobertura vegetativa etc. Os principais parâmetros foram configurados de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10: Principais parâmetros atribuídos ao algoritmo UWG de acordo com o ano de análise.

ANO DE ANÁLISE	ALBEDO (SOLO)	ALBEDO (FACHADA DE EDIFÍCIOS)	CALOR SENSÍVEL – W/m ²
1940	0.2	0.6	4
1980	0.1	0.4	10
2020	0.1	0.4	20

³⁸ Algoritmo criado pelo *Massachusetts Institute of Technology* – MIT, e permite estimar a temperatura e a umidade do ar em um dossel urbano de hora em hora, utilizando dados climáticos de uma estação meteorológica rural. Disponível em: <<https://urbanmicroclimate.scripts.mit.edu/uwg.php>>.

Cenário hipotético	0.05	0.2	50
---------------------------	------	-----	----

Fonte: Criado pelo autor (2021).

Assim, os parâmetros de albedo de solo e de fachada dos edifícios foram baseados no estudo de Pomerantz *et al.* (2000), que delimitou valores típicos de albedo para diferentes tipos de superfícies urbanas, baseando-se em equações de cálculo de albedo pré-estabelecidas e de medições em campo. Os valores de calor sensível foram pautados no trabalho de Sailor (2011), que apresentou valores padrões de calor sensível em diferentes áreas e escalas urbanas.

A adoção de valores de albedo e de calor sensível partiram de determinados pressupostos, isto é, pela análise de fotos históricas, pode-se identificar que a pavimentação urbana e os edifícios de 1940 possuíam materiais de fachada que provavelmente possuíam alto albedo, e a partir de 1980 em diante, as fachadas passaram por modificações, e assim, o albedo reduziu. O mesmo pressuposto foi feito para o calor sensível, dado que em 1940 não existia tráfego de automóveis tão intenso, e assim, foi adotado um valor menor, que foi aumentando com o passar dos anos com o surgimento de uma maior frota de automóveis na área central, com a instalação de equipamentos de ar-condicionado nas edificações, dentre outros fatores que contribuem para o aumento do parâmetro.

3.5. Simulações de UTCI

Essa presente seção visa apresentar o método utilizado para montar o algoritmo de análise de conforto térmico, entretanto, primeiramente, para realizar as simulações, foi preciso escolher um software adequado para as análises. Dessa forma, foi feita uma pesquisa sobre as limitações e potencialidades dos três principais softwares utilizados nas pesquisas abordadas na subseção 2.3.2, são eles o *ENVI-Met*, *RayMan* e o *Ladybug Suite Tools*. A pesquisa buscou reunir informações sobre quais parâmetros climáticos, humanos e físicos que cada software de simulação contabiliza em suas análises, como as diversas reflexões da radiação direta proveniente do sol que ocorrem entre as superfícies e o ar urbano, assim como parâmetros de troca de radiação do corpo humano. Assim, a partir da pesquisa de Naboni *et al.* (2017), foi adaptada e criada a Tabela 11 para apresentar um panorama geral dos parâmetros contabilizados por cada software.

Tabela 11: Parâmetros de radiação considerados por cada software.

Troca de radiação do corpo humano	<i>ENVI-Met</i>	<i>Ladybug Tools</i>	<i>RayMan</i>
Forma/Posição	Contabilizado	Contabilizado	Simplificado
Absorção de ondas curtas	Contabilizado	Contabilizado	Contabilizado
Emissividade de ondas longas	Contabilizado	Contabilizado	Contabilizado
Radiação de ondas curtas			
Radiação direta	Contabilizado	Contabilizado	Contabilizado
Radiação difusa do céu	Contabilizado	Contabilizado	Contabilizado
Radiação difusa refletida (edifícios)	Contabilizado	Simplificado	Simplificado
Radiação difusa refletida (objetos autônomos)	Contabilizado	Não contabilizado	Não contabilizado
Radiação difusa refletida (vegetação)	Contabilizado	Contabilizado	Simplificado
Radiação difusa refletida (solo)	Contabilizado	Simplificado	Simplificado
Fator de visão de céu	Deterministicamente	<i>Ray Tracing</i>	Foto olho de peixe
Fator de visão de superfície	Deterministicamente	<i>Ray Tracing</i>	Foto olho de peixe
Radiação de ondas longas			
Troca de radiação de ondas longas	Contabilizado	Contabilizado	Contabilizado
Radiação de ondas longas (edifícios)	Contabilizado	Contabilizado	Simplificado
Radiação de ondas longas (objetos autônomos)	Contabilizado	Contabilizado	Não contabilizado
Radiação de ondas longas (vegetação)	Contabilizado	Contabilizado	Não contabilizado
Radiação de ondas longas (solo)	Contabilizado	Contabilizado	Simplificado
Transpiração (vegetação)	Contabilizado	Não contabilizado	Não contabilizado
Evaporação (solo)	Contabilizado	Não contabilizado	Simplificado
Velocidade de ventos local	Contabilizado	Contabilizado	Não contabilizado
Direção dos ventos local	Contabilizado	Contabilizado	Não contabilizado
Fator de visão de céu	Deterministicamente	<i>Ray Tracing</i>	Foto olho de peixe
Fator de visão de superfície	Deterministicamente	<i>Ray Tracing</i>	Foto olho de peixe

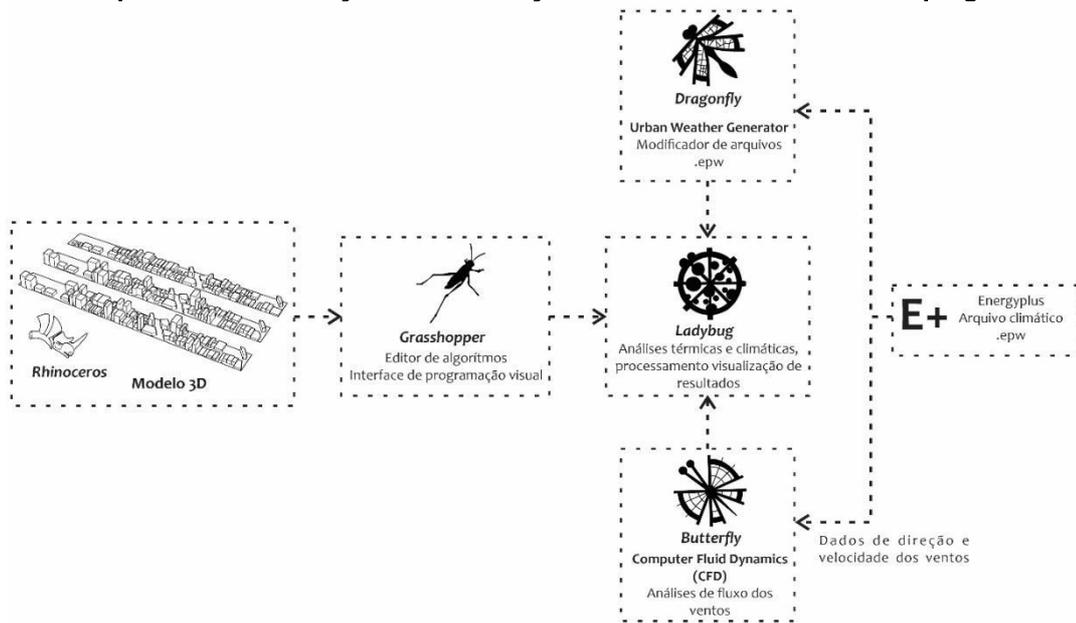
Dessa forma, de acordo com a literatura analisada previamente e com a Tabela 11, fica evidente que o software *ENVI-Met* é um dos programas que contabiliza mais parâmetros, assim como é um dos mais extensivamente utilizados em análises de condições térmicas em espaços públicos (EVOLA *et al.*, 2020). Todavia, o programa

possui certas limitações, pois o *ENVI-Met* não contabiliza geometrias complexas e o armazenamento de calor de fachadas urbanas, o que pode, portanto, subestimar os valores de temperatura do ar das ICU noturnas. Além disso, embora exista uma licença estudantil disponível gratuitamente, a grade de análise é limitada a um tamanho de uma malha de 50 x 50m, o que limita o ambiente de simulação a uma escala menor (EVOLA, 2020).

Por outro lado, o *Ladybug Suite Tools*, criado em 2012, foi inicialmente desenvolvido para análises paramétricas de opções de projeto na escala de um edifício. Com a adição de um conjunto de ferramentas embutidas no editor de algoritmos *Grasshopper*, o software assim permitiu a predição de condições de conforto em ambientes urbanos. *Ladybug* é um plugin disponível gratuitamente, possui uma interface amigável ao usuário, e é mais acessível para urbanistas, arquitetos e designers que trabalham utilizando o software *CAD Rhinoceros 3D*. Ademais, as simulações do *Ladybug* apresentam resultados bons e válidos quando comparados com dados obtidos em medições *in loco* (ROUDSARI, 2013). Assim, o *Ladybug Suite Tools* foi escolhido para as análises. O software é constituído de um conjunto de plugins diferentes: *Ladybug*, *Honeybee*, *Dragonfly* e *Butterfly*. Cada plugin realiza um tipo diferente de análise, dessa forma, os escolhidos para realização das análises foram o *Ladybug* para as análises do índice UTCI, o *Butterfly* para as análises de *CFD* e o *Dragonfly* para modificação dos arquivos climáticos.

As simulações foram feitas considerando os solstícios de inverno e verão (21 de junho e dezembro, respectivamente), às 8h, 12h, 16h e 20h, o que resultou em oito momentos diferentes de análise de condições termo espaciais. Os procedimentos para as simulações seguiram o esquema na Figura 17.

Figura 17: Esquema de construção das simulações baseado nos softwares e plugins utilizados.



Fonte: Adaptado de Evola *et al.* (2020).

O esquema de construção da simulação inicia-se com a modelagem das geometrias dentro do software *Rhinoceros 3D*. Em sequência as geometrias são inseridas no *Grasshopper* em forma de *Breps* (*Boundary Representations*) e assim, são introduzidos no *Ladybug*. O arquivo climático é modificado utilizando o componente *Urban Weather Generator* do plugin *Dragonfly* como referido anteriormente.

Para gerar resultados mais confiáveis, os dados de velocidade e direção dos ventos foram obtidos utilizando o plugin *Butterfly*, que realiza análises de *Computer Fluid Dynamics*, que são simulações baseadas nas leis de termodinâmica e mecânica dos fluidos, que possibilitam obter resultados mais precisos. Isto foi feito pois os dados de direção e velocidade dos ventos existentes na base do arquivo climático “.epw” não consideram a real distribuição de ventos dentro de espaços urbanos. Portanto, isto pode implicar em imprecisões nos resultados, pois os valores das trocas de calor por convecção em superfícies podem ser subestimados. Assim, os dados de velocidade e direção dos ventos foram incorporados ao *Ladybug*, que realiza as análises climáticas. A interferência dos ventos nas análises foi notada ao se compararem, juntamente, os mapas do índice UTCI com o de velocidade dos ventos obtido na seção anterior.

Para realizar as análises de conforto térmico, primeiramente foi necessário escolher um índice para ser usado nas simulações, e assim, o índice escolhido para as análises foi o *Universal Thermal Climate Index – UTCI* (no português, índice Climático Térmico Universal), que foi criado para análises em todos os climas. O UTCI é descrito como a sensação térmica, que é proferida por meteorologistas na TV no mundo todo. O índice é definido pela temperatura de um ambiente de referência com 50% de umidade relativa do ar, e tendo a temperatura do ar, igual a temperatura radiante, o que produz o mesmo valor de índice de esforço, como no ambiente real e mais complexo. O índice é baseado em uma única equação, e leva em conta variáveis humanas como atividade, isolamento de roupas, posição quanto ao sol etc. (NASTOS; MATZARAKIS, 2012).

O índice UTCI já foi considerado em estudos de cânions urbanos (COUTS *et al.*, 2016; PARK, TULLER, e JO, 2014) como um índice de conforto aceitável e fácil de se determinar. O índice é calculado com base nas variáveis humanas proferidas anteriormente (que são baseadas na média sobre a população) e com base em quatro principais variáveis climáticas: temperatura radiante média, temperatura do ar, umidade relativa e a velocidade e direção dos ventos locais. A escala de temperatura de níveis de estresse é detalhada na Tabela 12.

Tabela 12: Categorias de desconforto térmico.

Escala UTCI (°C)	Categorias de estresse
Acima de +46°C	Estresse por calor extremo
+38 to +46 °C	Estresse por calor muito forte
+32 to +38°C	Estresse por calor forte
+26 to +32°C	Estresse por calor moderado
+9 to +26°C	Sem estresse (Zona de Conforto)

Fonte: adaptado de Panagiotis, Nastos, Matzarakis (2011).

O cálculo do índice UTCI foi realizado através do componente *Ladybug _ Outdoor Comfort Calculator*, existente dentro do conjunto de ferramentas do *Ladybug Suite Tools*. Os dados climáticos de temperatura do ar e umidade relativa são extraídos diretamente do arquivo climático. A temperatura radiante média é calculada anteriormente, com o uso do componente *Ladybug_Outdoor Solar Temperature*

Adjustor. Este componente ajusta uma temperatura radiante média pré-conhecida (de ondas longas) para radiação de ondas curtas, para que assim, os valores possam ser usados em estudos de conforto térmico. O componente tem seu cálculo baseado em funções de *ray-tracing* do software *Radiance* e no método *SolarCal* (ARENS *et al.*, 2015) para estimar a quantidade de radiação solar direta e difusa caindo sobre um manequim virtual (MACKEY *et al.* 2017).

Por fim, para apresentar os dados em forma de um mapa, foi atribuída uma malha de análise na qual são projetados os valores do índice. Os valores são atribuídos a células de análise de 2 metros, que apresentam os valores do índice com base em uma escala de degradê de cores. Essa malha de análise foi movida a 1.1m do solo para obter os valores do índice na altura do pedestre, e dessa maneira, foram gerados os mapas do índice UTCI.

3.6. Simulações de CFD

Essa seção apresenta o método utilizado para as simulações de *CFD*, que vão auxiliar na montagem de mapas de UTCI mais precisos e confiáveis. Essas análises se baseiam em aproximar-se da realidade, com certa margem controlável de erro. Iniciam-se na discretização do ambiente real. Em outras palavras, primeiramente é gerada uma malha de análise em volta dos edifícios partindo o desmembramento do volume total dos edifícios em pequenos subvolumes (ou células), menores que o original. Para cada subvolume, são computadas equações de conservação de energia, massa e movimento. Por fim é gerada a solução da simulação, e sua precisão definida com base na convergência iterativa. Isto é, com base no número de iterações³⁹ necessárias para que os resíduos (ou erros) sejam suficientemente próximos de zero, e assim, a simulação convirja e os resultados sejam mais precisos.

As análises de *CFD* foram feitas utilizando o plugin *Butterfly*, que faz parte do conjunto de ferramentas *Ladybug*. Os procedimentos metodológicos utilizados foram baseados nos trabalhos de Franke *et al.* (2007), Kastner e Dogan (2019) e Kaseb *et al.* (2020), que propuseram diretrizes de boas práticas em simulações de *CFD*.

³⁹ Iteração é a repetição de um processo para gerar uma série de resultados. Cada repetição do processo é uma única iteração, e o resultado de cada iteração é assim, o ponto de início para a próxima iteração.

O *Butterfly* realiza os cálculos utilizando a *engine* do software *OpenFoam*⁴⁰ que realiza análises de momento estável e transiente. Porém, cabe ressaltar que o foco do presente estudo é nas análises de momento estável, pois os seus resultados representam o fluxo dos ventos em um momento estático no tempo e espaço, assim como os mapas de UTCI que também representam um momento estático, assim, são compatíveis com o objetivo da pesquisa. Dessa forma, os métodos utilizados foram padrões nesse tipo de análise de *CFD*, e assim, a primeira parte consiste na criação do túnel de vento e na malha de simulação, na qual é atribuído um tamanho de célula para análise e os níveis de refinamento⁴¹, assim, estes parâmetros foram definidos de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13: Tamanhos de célula e níveis de refinamento utilizados nas análises de *CFD*.

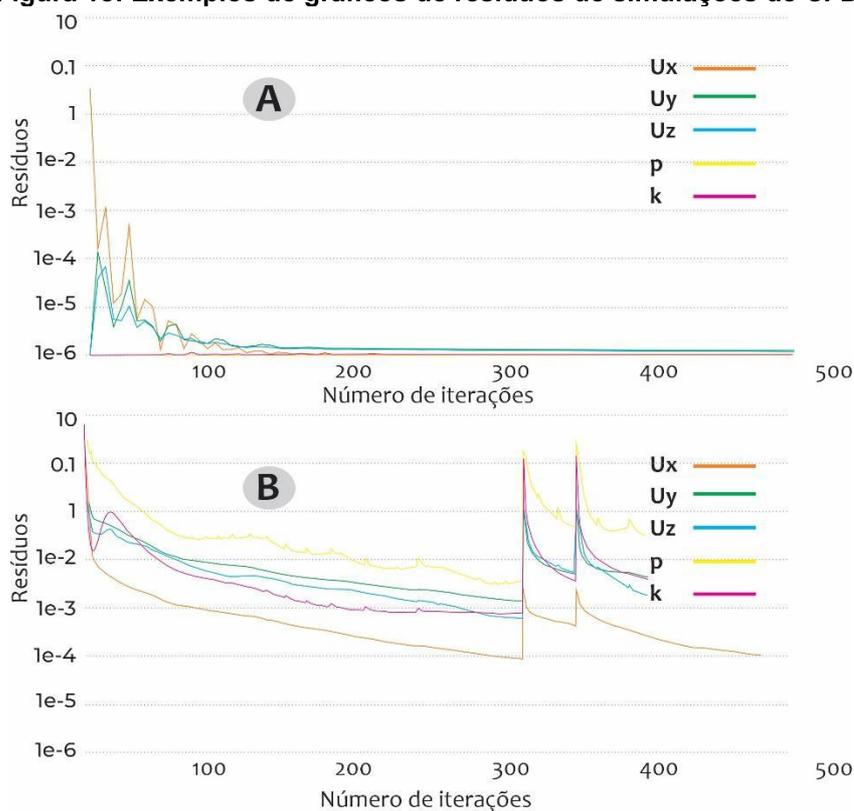
Ano de análise	Tamanho de célula (m)	Níveis de refinamento (mínimo e máximo)
1940	5	2 - 3
1980	4	2 - 3
2020	3	2 - 3

Fonte: Criado pelo autor

A etapa seguinte consiste na solução da simulação, onde os cálculos de velocidade ocorrem, com base em cálculos iterativos. Todavia, é importante ressaltar que a boa prática em simulações de *CFD* consiste em configurar o software para que a simulação ocorra de maneira estável e que, em algum ponto da solução, ela atinja a convergência, e assim, os resíduos tendam a zero. Porém, no caso do presente trabalho, as simulações não rodaram até sua convergência total, contudo, apresentaram tendência convergente e mantiveram-se estáveis, portanto, os resultados são confiáveis. A Figura 18 traz dois exemplos de gráficos de resíduos de simulações de *CFD*, por exemplo, o gráfico A demonstra uma simulação estável e com tendência convergente, portanto, seus resultados podem ser confiáveis. Ao passo que o gráfico B representa uma simulação instável e sem tendência de convergência, o que indica que o resultado da simulação pode ser impreciso.

⁴⁰ *OpenFoam* é uma caixa de ferramentas C++ de programação, para o desenvolvimento de softwares de simulação de mecânica e dinâmica dos fluidos, possui diversas aplicações como: aeronáutica, setor automobilístico, arquitetura e urbanismo etc. Disponível em: < <https://www.openfoam.com/about-esi-openCFD>>. Acesso em: 04/11/2021.

⁴¹ Em simulações de *CFD*, o nível de refinamento define o quanto a malha será subdividida em torno dos objetos de análise. Por exemplo, caso o tamanho de célula seja 4m e o nível de refinamento máximo seja 2, a célula terá o tamanho de 2m próxima aos objetos de análise.

Figura 18: Exemplos de gráficos de resíduos de simulações de CFD.

Fonte: Criado pelo autor.

As direções e velocidades foram extraídas do arquivo climático, e os valores adotados para os anos de 1940 e 1980 foram os mesmos, e os dados foram organizados na Tabela 14. Isso foi feito pois não foi possível encontrar dados de velocidade e direção dos ventos para os anos anteriores, e porque o arquivo climático é caracterizado por um compilado de dados climáticos de séries históricas, portanto, não é caracterizado por um ano em particular.

Tabela 14: Dados de velocidade e direção dos ventos para o solstício de inverno e verão.

Solstício de análise	Horário de análise	Direção dos ventos (graus)	Velocidade dos ventos (m/s)
Solstício de inverno (21/06)	8h	319	3.3
	12h	295	2.5
	16h	317	2.2
	20h	331	3.4
Solstício de verão (21/12)	8h	79	2.5
	12h	78	0.6
	16h	103	3.2
	20h	75	4

Fonte: Criado pelo autor.

Assim, as simulações visaram captar o efeito das mudanças morfológicas com o passar do tempo no fluxo de ventos, e para isso foi criada uma malha de análise de

células de 1 metro, movidas a 1.1 metros do solo, para captar a velocidade dos ventos na altura do pedestre.

3.7. Cálculo de parâmetros de densidade

Essa subseção apresenta a base teórica para fundamentar as análises de densidade urbana. As análises foram baseadas na literatura de Pont e Haupt (2010), que propuseram uma matriz de avaliação de densidade urbana, baseada em três indicadores, que são *Floor Space Index* (FSI), *Ground Space Index* (GSI) e *Network density* (N). Porém, nessa dissertação, o foco será dado aos parâmetros FSI e GSI, pois contabilizam em seu cálculo a área construída de edifícios, e assim, são indicáveis para avaliação de densidade construída, que é o foco do presente trabalho. O FSI e GSI dependem de três variáveis espaciais para serem calculados, são elas:

- **Área de base (A):** é calculada a partir da definição dos limites da área de análise, isto é, da delimitação das bordas desta área a ser analisada. Esses limites podem ser municipais (bairros, quarteirões, vias etc.), limites projetados (uma malha de pixels ou círculos, delimitada entre um raio específico, e geralmente é usada em aplicações em sistemas GIS) ou limites naturais, baseados em características naturais e morfológicas (relevo e a própria morfologia urbana).
- **Área de piso bruta (F):** determinada pela soma de todas as superfícies, mensurada por pavimento e engloba todo perímetro dos edifícios, incluindo subsolos, área de coberturas e balanços de edificações.
- **Área construída (B):** parte da mesma regra da Área de piso bruta, porém exclui áreas no subsolo, balanços etc.

E assim, se fez necessário apresentar as equações utilizadas para calcular os parâmetros com base nas variáveis expostas anteriormente. O entendimento dessas equações auxiliou a criação de um *workflow* de cálculo dos índices no editor de algoritmos *Grasshopper*. Dessa maneira, a base dos parâmetros será apresentada a seguir.

Floor Space Index: aborda toda a área construída (a intensidade de construção, como referido pelos autores) e independe da composição programática. Seu cálculo ocorre com base na equação abaixo:

$$FSIx = Fx / Ax$$

F : área útil - área bruta de piso (m²)

A : área da agregação (m²)

x : agregação (pode ser um lote de uma edificação, quarteirão, bairro etc.).

Ground Space Index: revela a relação entre áreas construídas e não-construída. É definido em metros por metros quadrados (m²/m²). Seu cálculo é feito com base na equação abaixo:

$$GSIx = Bx/Ax$$

B : *footprint* dos edifícios (m²)

A : área da agregação (m²)

x : agregação.

Em vista das equações apresentadas, os parâmetros foram calculados utilizando o sistema CityMetrics proposto por Lima (2017), e, subsequentemente, os valores foram extraídos e categorizados, e foram criados mapas de cores para apresentar as mudanças na densidade urbana que ocorreram entre os anos de análise.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos das simulações e análises feitas no software *Grasshopper* e no plugin de análise climática *Ladybug* para cada ano e momento a partir do plugin. Dessa forma, primeiramente serão apresentados os mapas e gráficos de análise de fatores físicos, primeiro sendo exibidos as análises dos parâmetros Floor Space Index e Ground Space Index que foram baseados no trabalho de Pont e Haupt (2010). Adiante serão apresentados as análises de Fator de Visão de Céu e de razão H/W. Em seguida, serão demonstradas as análises realizadas no plugin de simulações de *CFD Butterfly*, que é integrante do conjunto de ferramentas *Ladybug Suite Tools*, e por fim serão apresentadas as análises de conforto térmico baseadas no índice UTCI que foram realizadas com o *Ladybug*, os resultados foram apresentados a partir de mapas bioclimáticos.

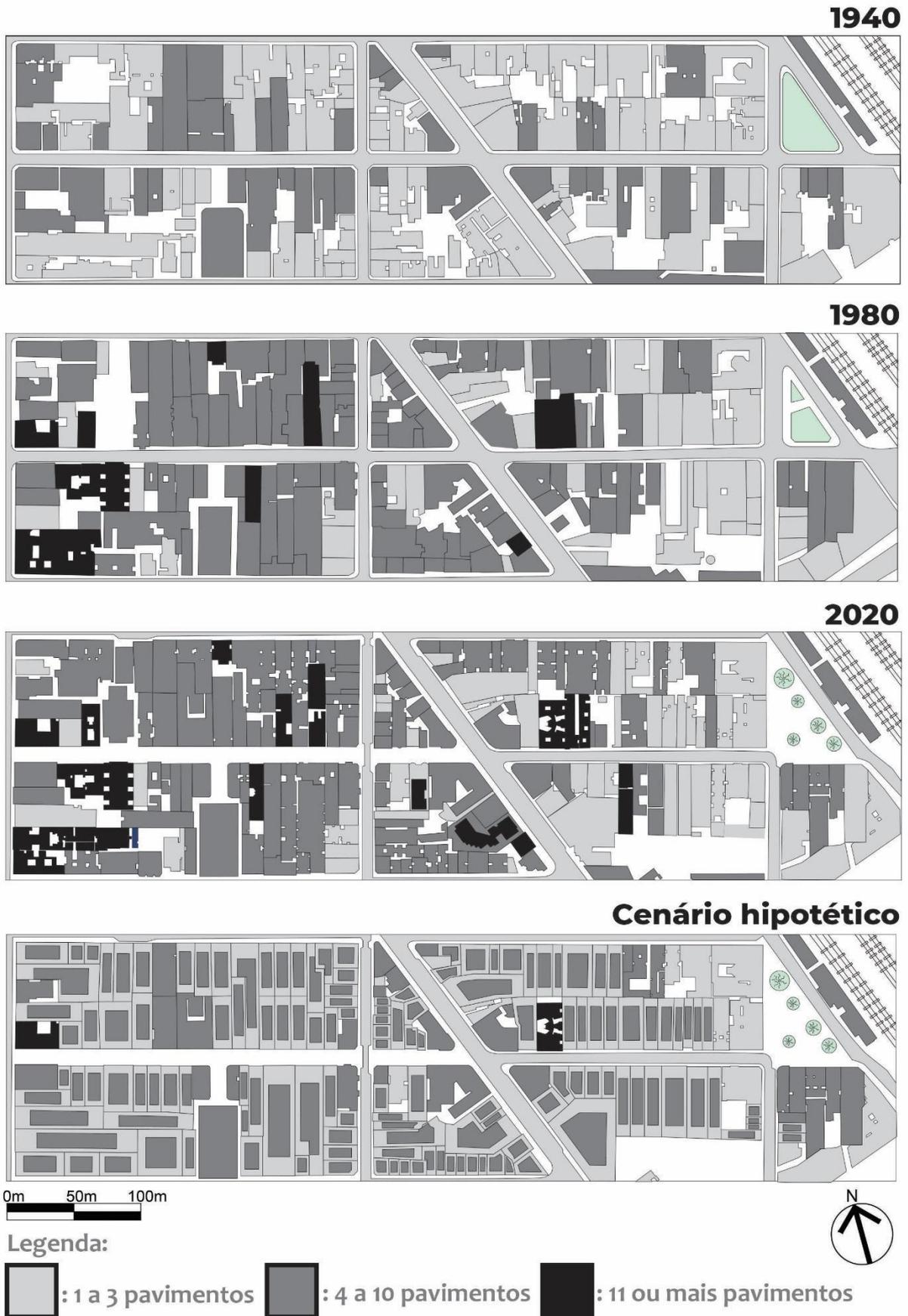
4.1. Análises de fatores morfológicos

Nessa seção, serão analisados os fatores físicos e de densidade da morfologia urbana modelada no software *Rhinoceros* para os três momentos analisados.

Primeiramente são apresentados os mapas de gabaritos de edifícios levantado a partir dos modelos feitos, conforme na Figura 19.

É possível observar que, na morfologia de 1940 os edifícios eram mais baixos, com alturas que variam entre 3 e 25 metros. A partir de 1980, a morfologia do cânion mudou significativamente. Quanto a razão H/W, ao avaliar o parâmetro considerando todos os edifícios de cada ano de análise, foi possível destacar que entre 1940 e 2020, a razão aumentou em 86%.

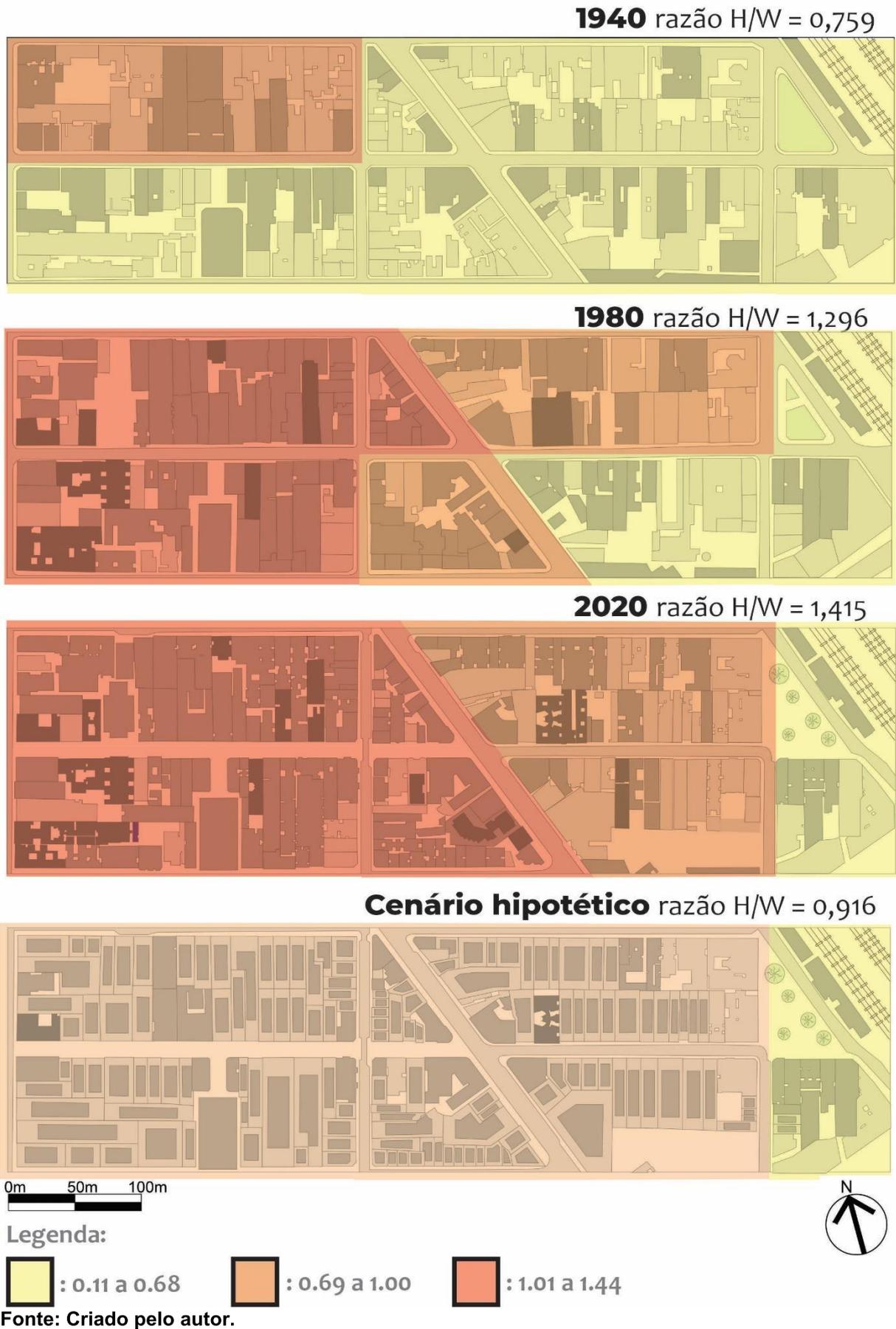
Figura 19: Mapa de gabaritos entre os anos de 1940 e o cenário hipotético.



Fonte: Prefeitura de Juiz de Fora, adaptado pelo autor.

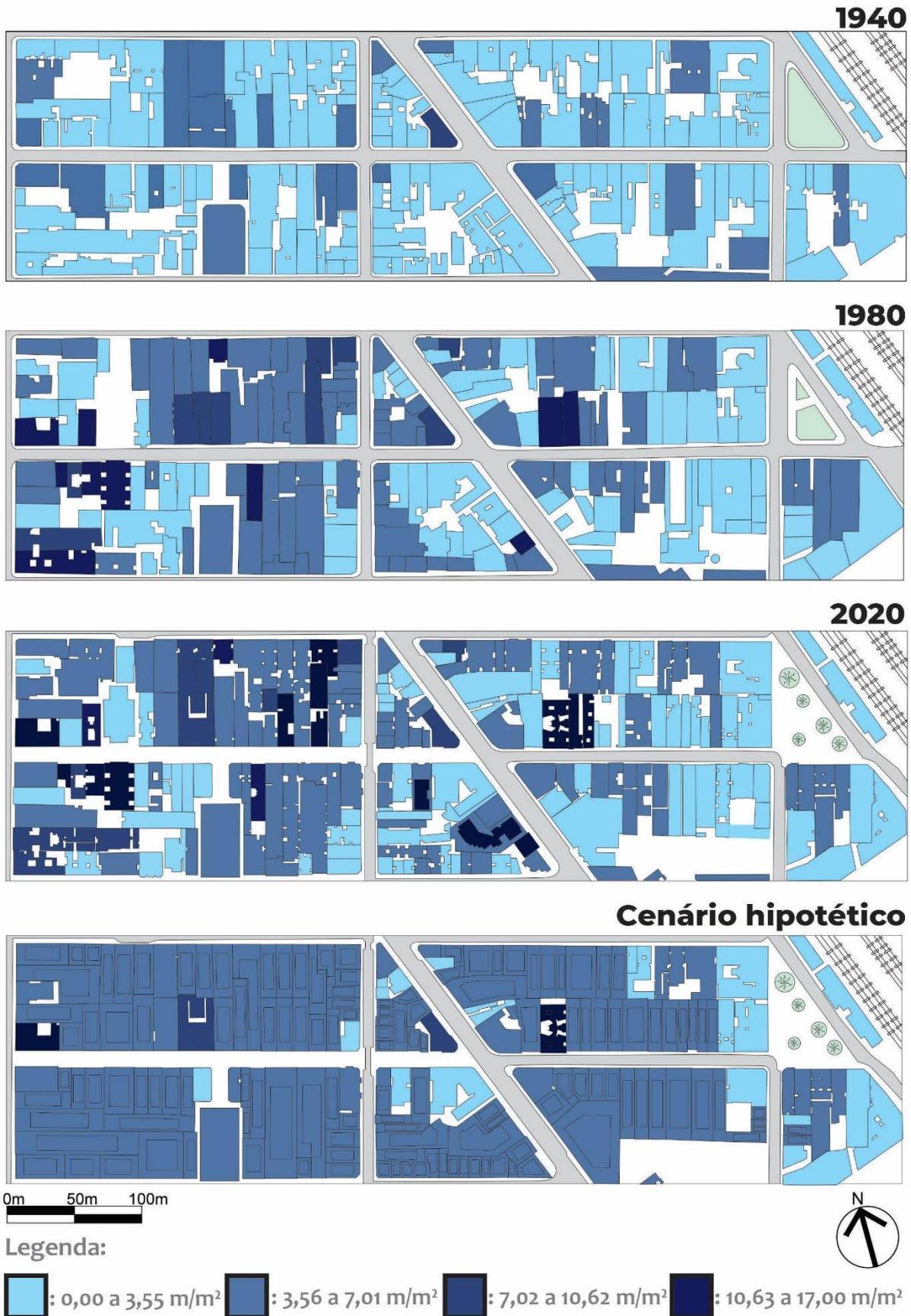
A razão H/W foi avaliada utilizando componentes do Grasshopper, e assim, ao avaliar o parâmetro considerando todos os edifícios de cada ano de análise, foi possível destacar que entre 1940 e 2020, a razão aumentou em 86%. Entretanto, no cenário hipotético, a razão H/W reduziu em 54%, devido ao decréscimo na altura da maioria dos edifícios. Todavia, cabe destacar que a rua não se caracterizou como um cânion profundo em nenhum momento de análise, pois a razão H/W permaneceu menor que 2 (ALI-TOUDERT; MAYER, 2006; EVOLA et al., 2020; JAREEMIT; SRIVANIT, 2019; MATZARAKIS; RUTZ; MAYER, 2007; VARDOULAKIS et al., 2003, 2014). Ao avaliar a razão H/W dividindo o modelo por quadras (Figura 20), o resultado foi um pouco diferente, isto é, entre 1940 e 2020, foi detectado um aumento de 48% da razão H/W em 75% das quadras analisadas. Ao passo em que entre 2020 e o cenário hipotético, a razão H/W decresceu cerca de 45% em seis das oito quadras analisadas.

Figura 20: Mapa de Razão H/W entre os anos de 1940 e o cenário hipotético.



Os parâmetros de densidade propostos por Pont e Haupt (2010) foram calculados a partir componentes do Grasshopper que permitiram calcular os parâmetros com base nas suas equações expostas anteriormente e nos modelos criados. Assim, é possível notar as áreas que ficaram mais densas com o processo de urbanização a partir do mapa de FSI da Figura 21. A morfologia de 1940 possui edifícios mais baixos e com menos pavimentos, e percebe-se a presença de mais vazios urbanos e terrenos ainda não ocupados por edifícios. A partir de 1980, observa-se o surgimento de edifícios mais altos e densos, que ocupam um maior espaço dos lotes; nota-se também que existem menos vazios urbanos, e menos ainda na morfologia de 2020. A morfologia criada para cenário hipotético gerou edifícios com um mesmo FSI de $4,69\text{m}^2$ para todos as edificações e lotes analisados, devido aos parâmetros de uso e ocupação e alturas máximas que são impostos pela legislação local. Portanto, alguns edifícios mais altos tiveram seu FSI reduzido, ao passo em que outros edifícios mais baixos tiveram seu FSI aumentado.

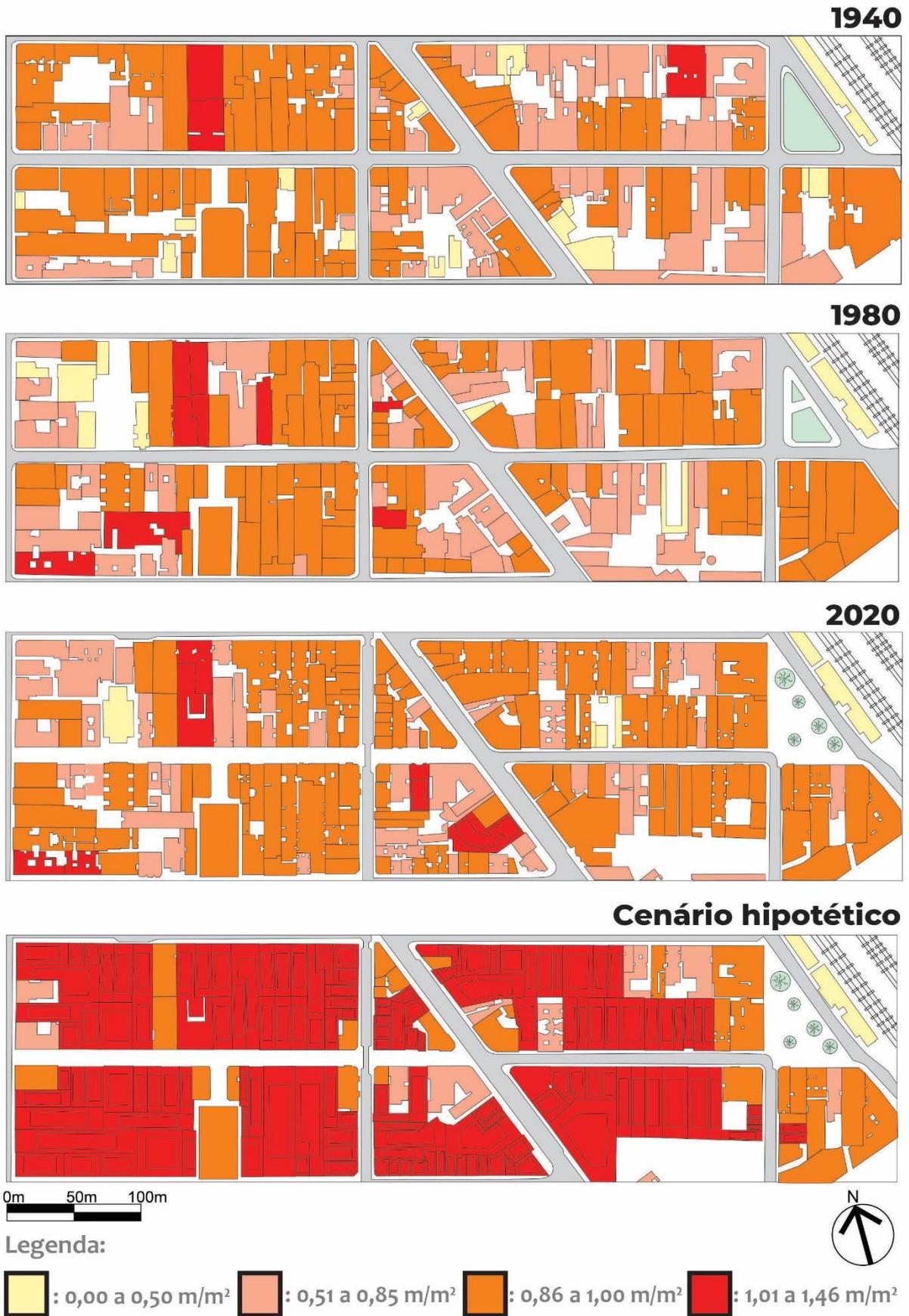
Figura 21: Mapa de *Floor Space Index* entre os anos de 1940 e cenário hipotético.



Fonte: Criado pelo autor.

Os mapas de GSI (Figura 22) indicaram resultados semelhantes aos descritos acima, isto é, nota-se que em 1940, os edifícios existentes ocupavam uma menor porção dos lotes, e existem mais vazios urbanos. Entre 1980 e 2020, os edifícios passam a ocupar uma maior parte dos lotes, e inclusive, percebe-se o surgimento de edifícios cada vez mais densos, com GSI de até $1,64\text{m}/\text{m}^2$. Entretanto, repara-se que alguns edifícios que em 1940 ocupavam uma maior porção dos lotes, passaram a ocupar um espaço menor em 1980 e 2020. O cenário hipotético indicou um aumento geral do GSI em todas as novas edificações, pois os novos edifícios ocupam 100% dos lotes, portanto, assim como o FSI, todas novas edificações possuem um mesmo valor GSI de $1,42\text{m}/\text{m}^2$. Dessa forma, edifícios que foram removidos que antes ocupavam uma menor porção do lote passaram a ocupar o lote inteiro. Em suma, as mudanças mais expressivas dos índices FSI e GSI ocorreu entre 1940 e 1980, quando aumentaram, em média, 222% e 74% respectivamente.

Figura 22: Mapa de *Ground Space Index* entre os anos de 1940 e o cenário hipotético.

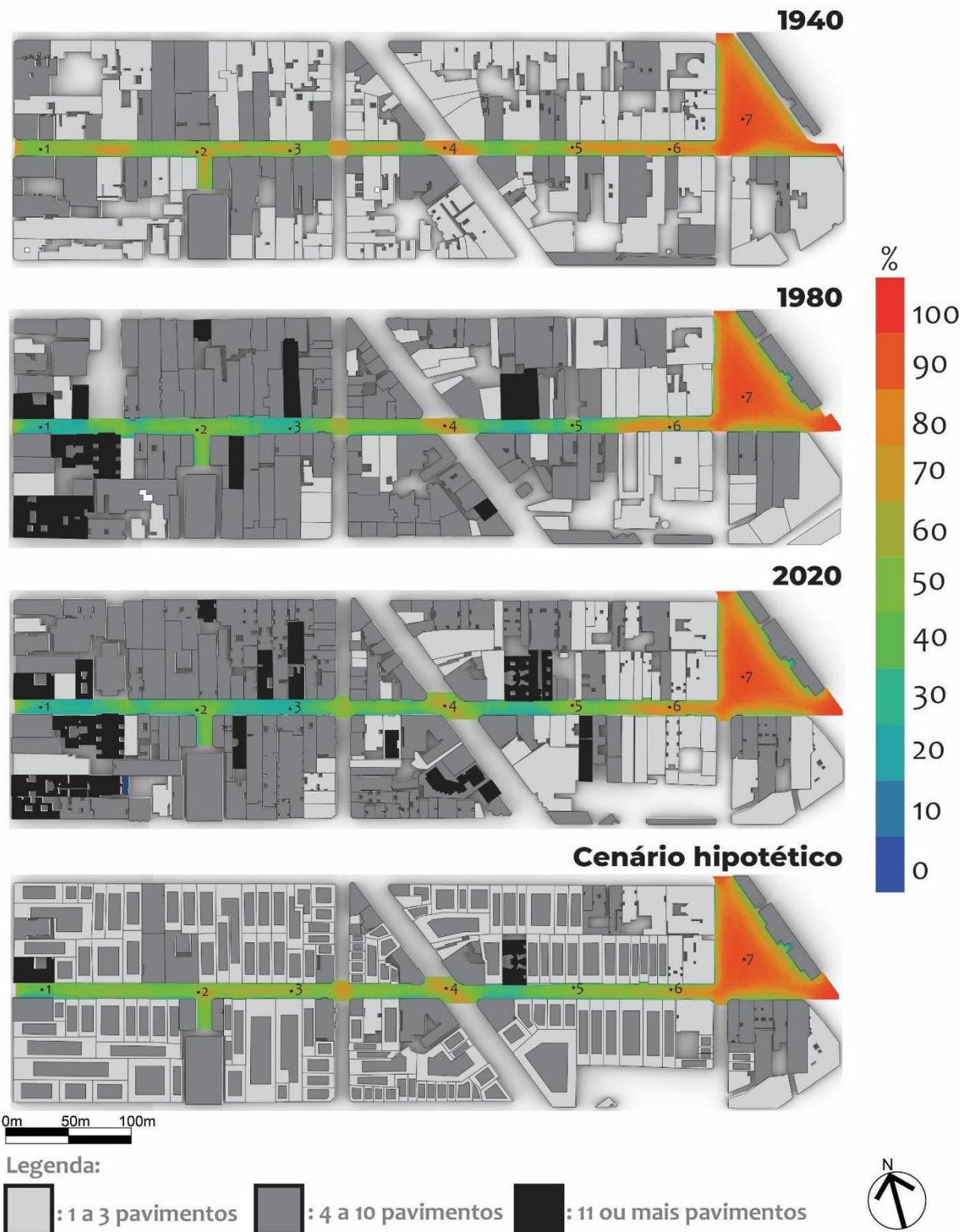


Fonte: Criado pelo autor.

Por fim, as análises do Fator de Visão de Céu foram feitas utilizando o componente *LB View Percent* presente na versão 1.1.0 do plugin *Ladybug Suite Tools*. O componente realiza os cálculos do FVC a partir de raios virtuais gerados através do artifício de *raytracing*⁴². Os resultados das análises foram apresentados através de um gradiente de cores gerados em uma malha posicionada a 1,7m de altura, para simular o FVC a partir da altura dos olhos de um pedestre, e assim, foi gerado o mapa da Figura 23.

⁴² Técnica de renderização computacional que usa “traçados de raios” para criar efeitos de luz em imagens 3D geradas por computador. Disponível: <<https://kazuk.com.br/blog/o-que-e-ray-tracing/>>. Acesso em: 04/11/2021

Figura 23: Análises de FVC entre os anos de 1940 e o cenário hipotético.



Fonte: Feito pelo autor.

Foram posicionados sete pontos de análise em diferentes locais do cânion para auxiliar nas análises feitas. Assim, em média, considerando todos os pontos, o FVC decresceu 21% de 1940 a 2020. Os pontos 1 e 3 tiveram as reduções mais

expressivas na porção visível do céu, diminuiu de 67% para 26% e de 61% para 32% durante os 80 anos analisados, respectivamente. É possível notar que os edifícios em volta dos pontos 1 e 3 passaram pelo processo de verticalização. No cenário hipotético, devido à redução das alturas dos edifícios, 6 dos 7 pontos tiveram aumentos de até 30% nos seus FVC, porém o ponto 6 teve uma redução de aproximadamente 40% no FVC, devido a elevação do gabarito dos edifícios no entorno.

Por outro lado, os pontos 6 e 7 tiveram as menores mudanças com os anos, e foram alocados no fim do cânion e em uma área aberta. Os pontos 3 e 5 tiveram um aumento do FVC após 1980, o que demonstra que pequenas mudanças no gabarito dos edifícios do entorno podem implicar em mudanças no FVC. Por fim, nota-se que o ponto 4 teve a visibilidade do céu reduzida em 23% de 1940 a 2020, embora esteja locado em um cruzamento de vias. Os resultados aqui encontrados foram similares, entretanto, menos expressivos que os achados por Basso *et al.* (2018), que realizaram análises em cânions com razão $H/W > 3$. O FVC foi maior (90-100%) em áreas abertas, o que permite uma maior visibilidade do céu. Em áreas com edifícios altos, uma parte significativa do céu foi bloqueada, e assim, o FVC reduziu em aproximadamente 60%.

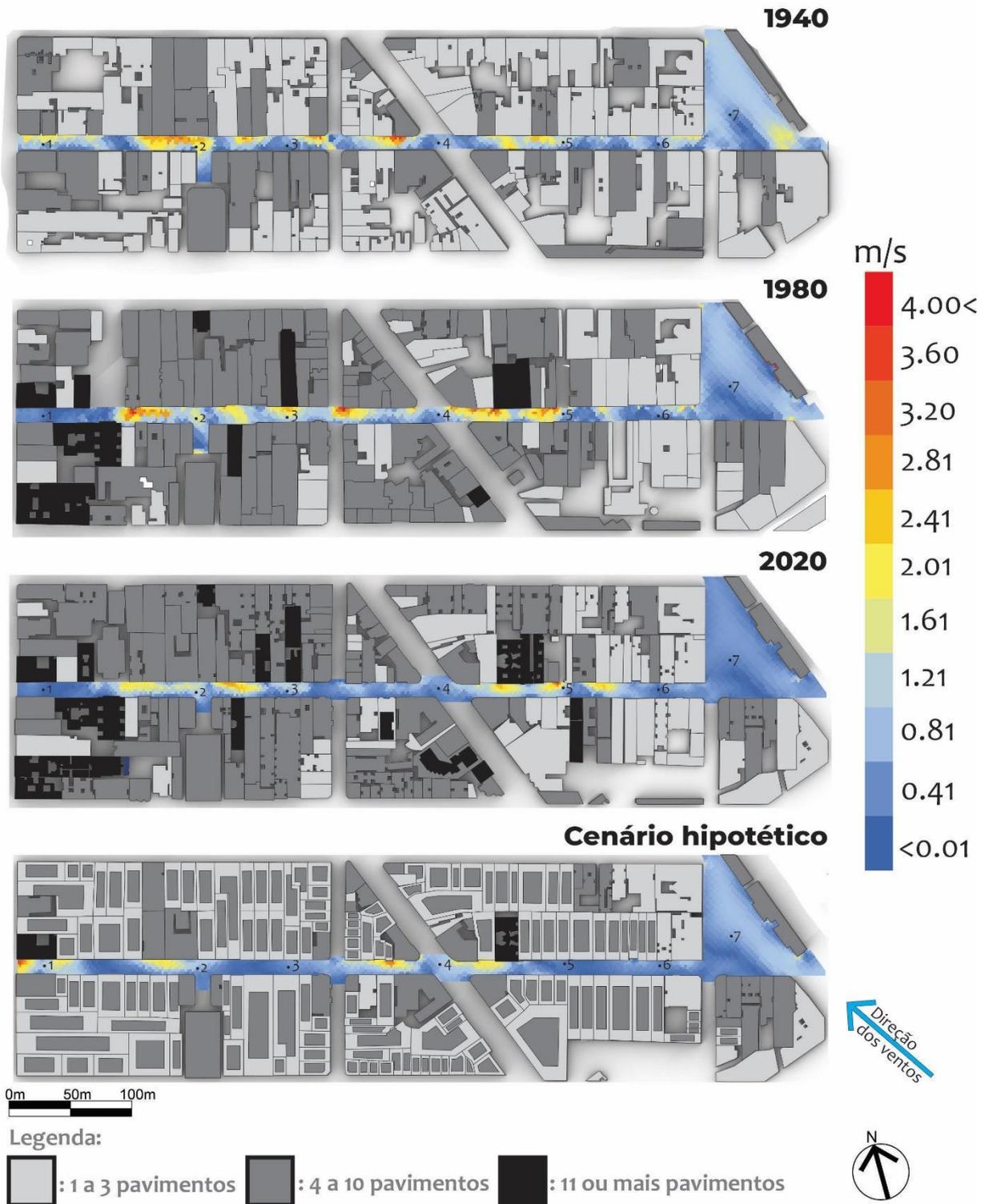
4.2. Análises de CFD

Nessa seção serão apresentadas as simulações de CFD para cada ano e momento de análise, iniciando com as às 8h (com ventos a 319 graus). É possível perceber a partir da Figura 24 que a morfologia de 1940 permite uma maior permeabilidade dos ventos, pois é notável que existem mais zonas de turbulência do que nas morfologias de 1980 e 2020. Por exemplo, os pontos 1 (sendo que esse foi posicionado no início do cânion) e 2 na morfologia de 1940 estão locados em espaços cuja velocidade dos ventos atingiu de 2.01 a 4.00m/s, ao mesmo tempo, repara-se que em 1980 e 2020, a velocidade registrada nos pontos supracitados é menor. Já no cenário hipotético, o ponto 1 encontra-se em um espaço próximo a turbulências com velocidade variando entre 2.41 e 4.00m/s.

O ponto 3 foi posicionado em um espaço mais “enclausurado” por edifícios, portanto, registrou baixa velocidade dos ventos em 1940, 1980 e no futuro, já em 2020, foram detectadas velocidades maiores no entorno do ponto. O ponto 4 situado em um

cruzamento de vias registrou baixas velocidades ao longo das simulações, sendo que o maior valor registrado de 0,41m/s foi na morfologia de 1980. É possível perceber zonas de turbulência próximas aos pontos 5 e 6 nos quatro períodos analisados, e essas zonas foram mais preponderantes em 1980. O ponto 7, que foi alocado em uma área aberta, registrou baixas velocidades em todos os períodos, pois os edifícios no entorno do ponto se comportaram como barreiras que reduziram a velocidade dos ventos.

Figura 24: Mapas de velocidade dos ventos às 8h no solstício de inverno (21/06).



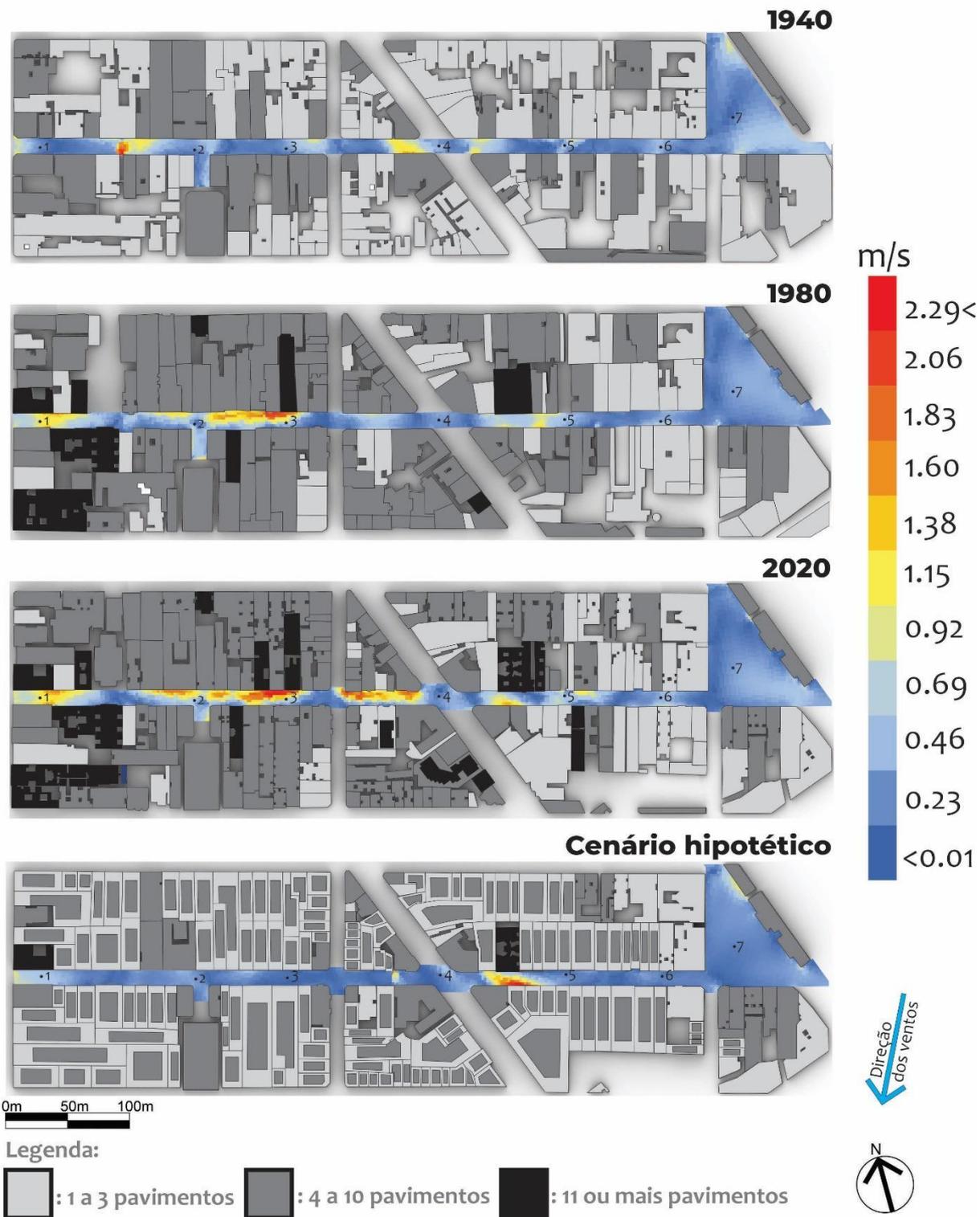
Fonte: Criado pelo autor.

No solstício de verão, as regiões de turbulência se manifestaram de forma distinta, conforme observado na Figura 25. A direção à 79 graus provocou mais zonas de turbulência nas morfologias de 1980 e 2020, isso é constatado ao notar os pontos

1,2 e 3 na morfologia de 1940 que registraram velocidades entre 0.01 e 0.46m/s, ao passo em que nas morfologias de 1980 e 2020, as velocidades notadas variaram entre 1.15 e 2.29m/s próximas aos pontos.

No ponto 4 foi possível notar que a velocidade não sofreu variações expressivas. Em comparação com o solstício anterior, no qual os pontos 5 e 6 tiveram uma maior ocorrência de zonas de turbulência, no solstício de inverno, os pontos supracitados não tiveram variações expressivas de velocidade. Já o ponto 7 apontou um aumento de 0.45m/s na velocidade dos ventos. O cenário hipotético registrou baixas velocidades em todos os pontos, pois a morfologia urbana atuou como uma barreira que limitou o fluxo dos ventos.

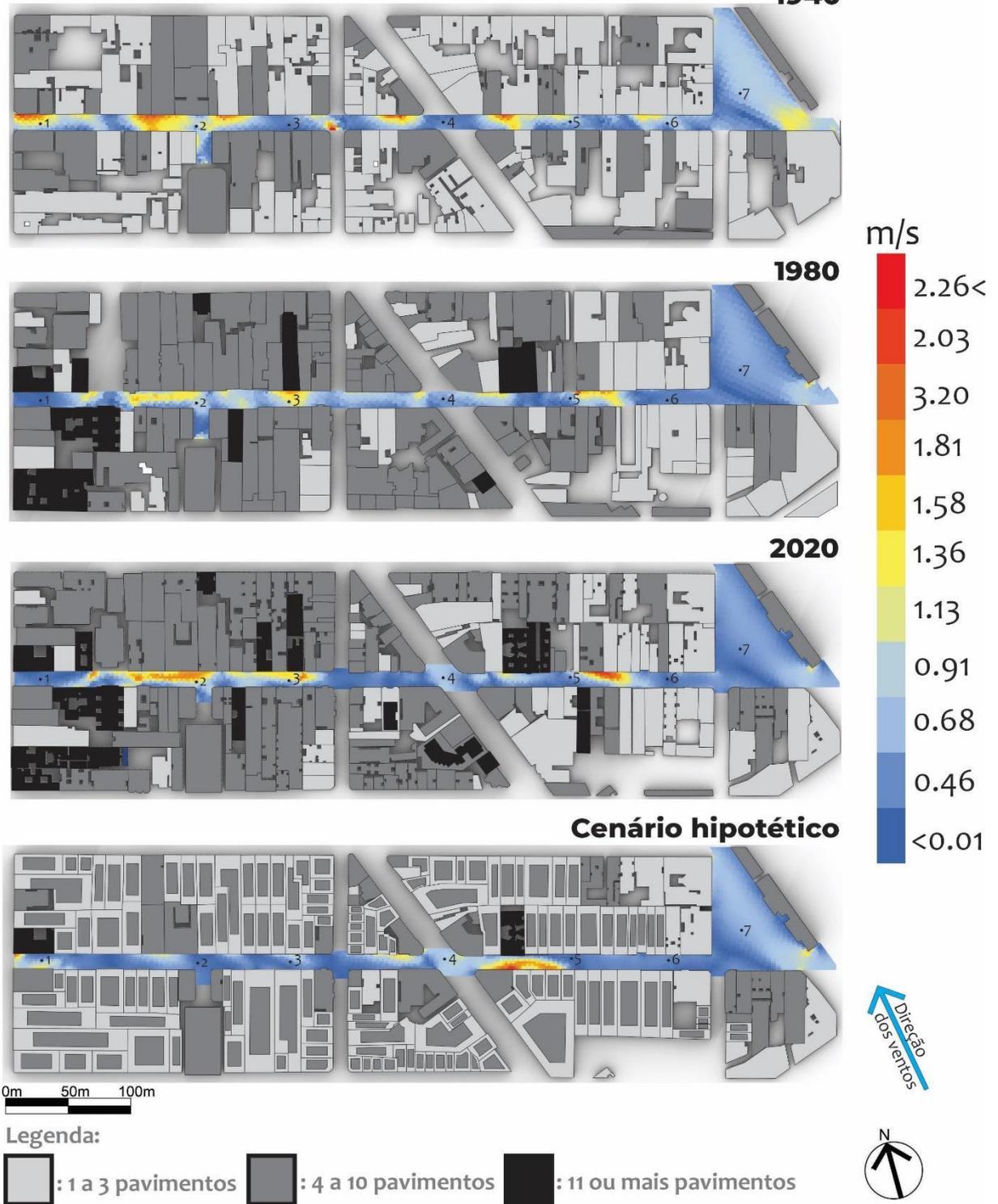
Figura 25: Mapas de velocidade dos ventos às 8h no solstício de verão (21/12).



No mapa da Figura 26, às 12h, é possível notar uma maior ocorrência de áreas com maior velocidade dos ventos nas quatro morfologias devido a direção a 295 graus dos ventos principais. O ponto 1 em 1940 registrou velocidades de até 2.26m/s, já de

1980 em diante, a verticalização dos edifícios no entorno do ponto bloquearam a circulação dos ventos, isso é percebido pois as velocidades registradas foram de 0.01 a 0.46m/s. O ponto 2 encontra-se em zonas de turbulência nos quatro períodos analisados, assim como o ponto 3, com exceção da morfologia de 1940. As velocidades registradas no ponto 4 foram maiores nos anos de 1980 e 2020 e no cenário hipotético, pois aumentaram de 0.01m/s em 1940 para aproximadamente 0.91 em 2020. Nos pontos 5 e 6 não ocorreram tantas zonas de turbulência quando em comparação com as 8h, e as velocidades apontadas no ponto 7 decresceram de 0.91 para 0.01m/s de 1940 para 2020. Nota-se que o cenário hipotético, assim como às 8h, também apresentou menor variação da velocidade dos ventos, assim como menos zonas de turbulência.

Figura 26: Mapas de velocidade dos ventos às 12h no solstício de inverno (21/06).
1940

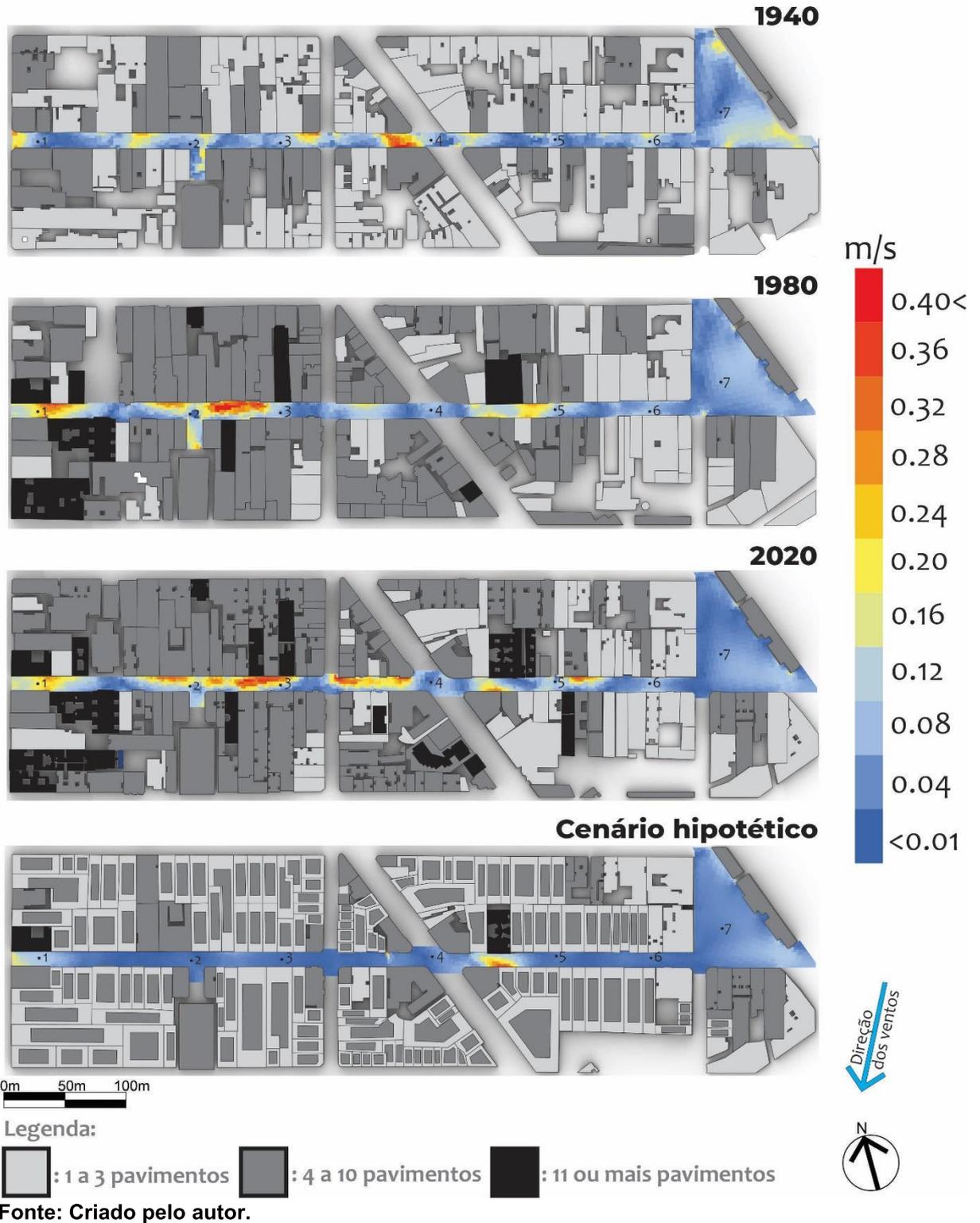


Fonte: Criado pelo autor.

No solstício de verão, a variação de velocidade registrada às 12h (Figura 27) foi a menor apontada entre todos os períodos analisados, variando entre 0.01 e 0.40m/s. Portanto, a ação do vento no conforto térmico neste momento não é tão

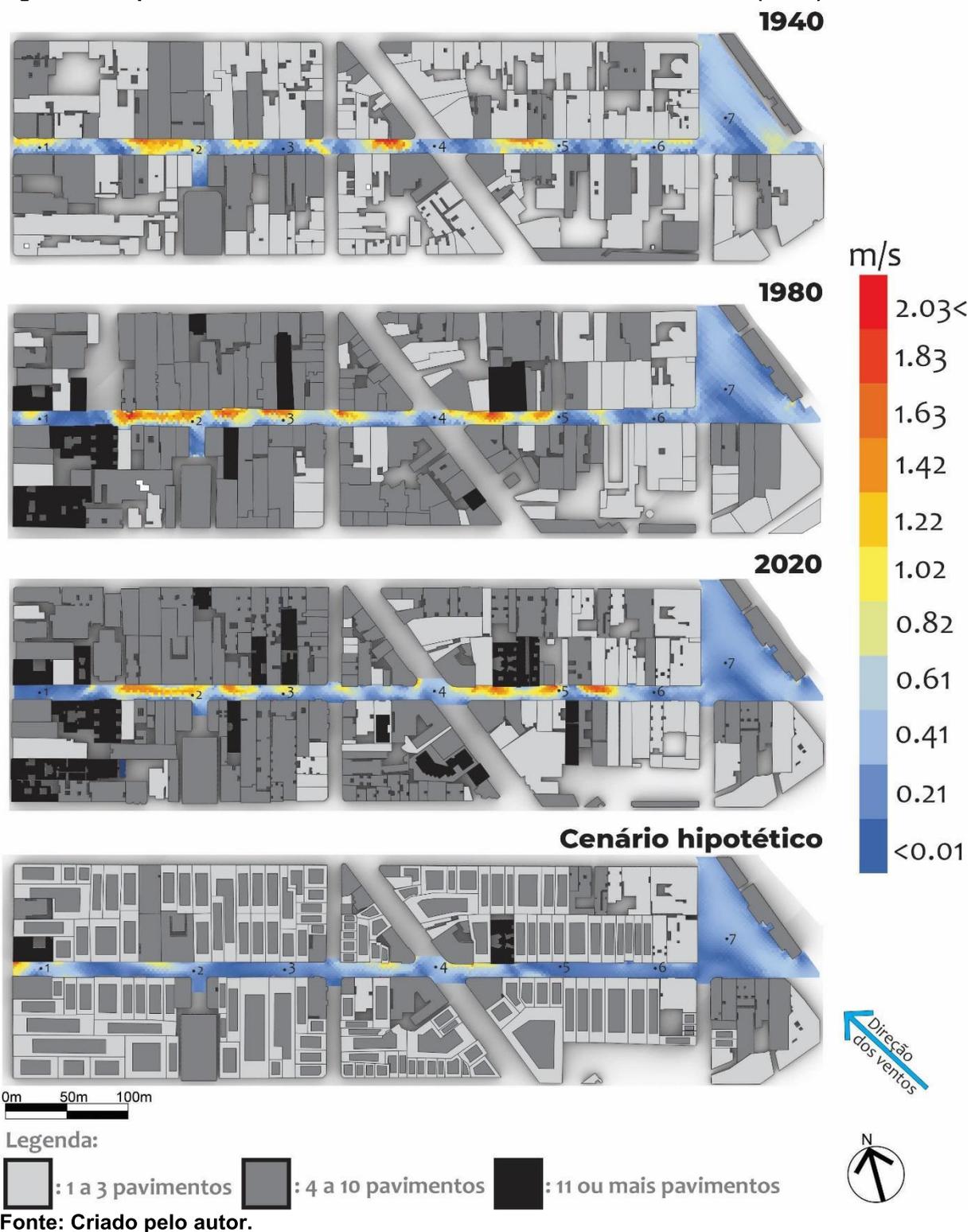
significativa ao longo do cânion, o que pode caracterizar um período de desconforto térmico por consequência da baixa velocidade registrada.

Figura 27: Mapas de velocidade dos ventos às 12h no solstício de verão (21/12).



Os ventos às 16h (Figura 28) provocaram zonas de turbulência em 1940, 1980 e 2020, e com maior frequência em 1940, e isso é observado pois a maioria dos pontos (com exceção dos pontos 4 e 7) encontram-se próximos a espaços com velocidade dos ventos variando entre 1.22 e 2.03m/s. No ponto 1, observa-se que a velocidade decaiu de 1.22 para 0.01m/s entre 1940 e 2020, e isso ocorreu devido à verticalização do entorno. Os pontos 2,3 e 5 registraram velocidades entre 1.22 e 2.03m/s. Os pontos 4 e 7 não apontaram variações significativas de velocidade entre os períodos. O cenário hipotético não registrou variações significativas de velocidade em nenhum dos pontos analisados, como também menos zonas de turbulência.

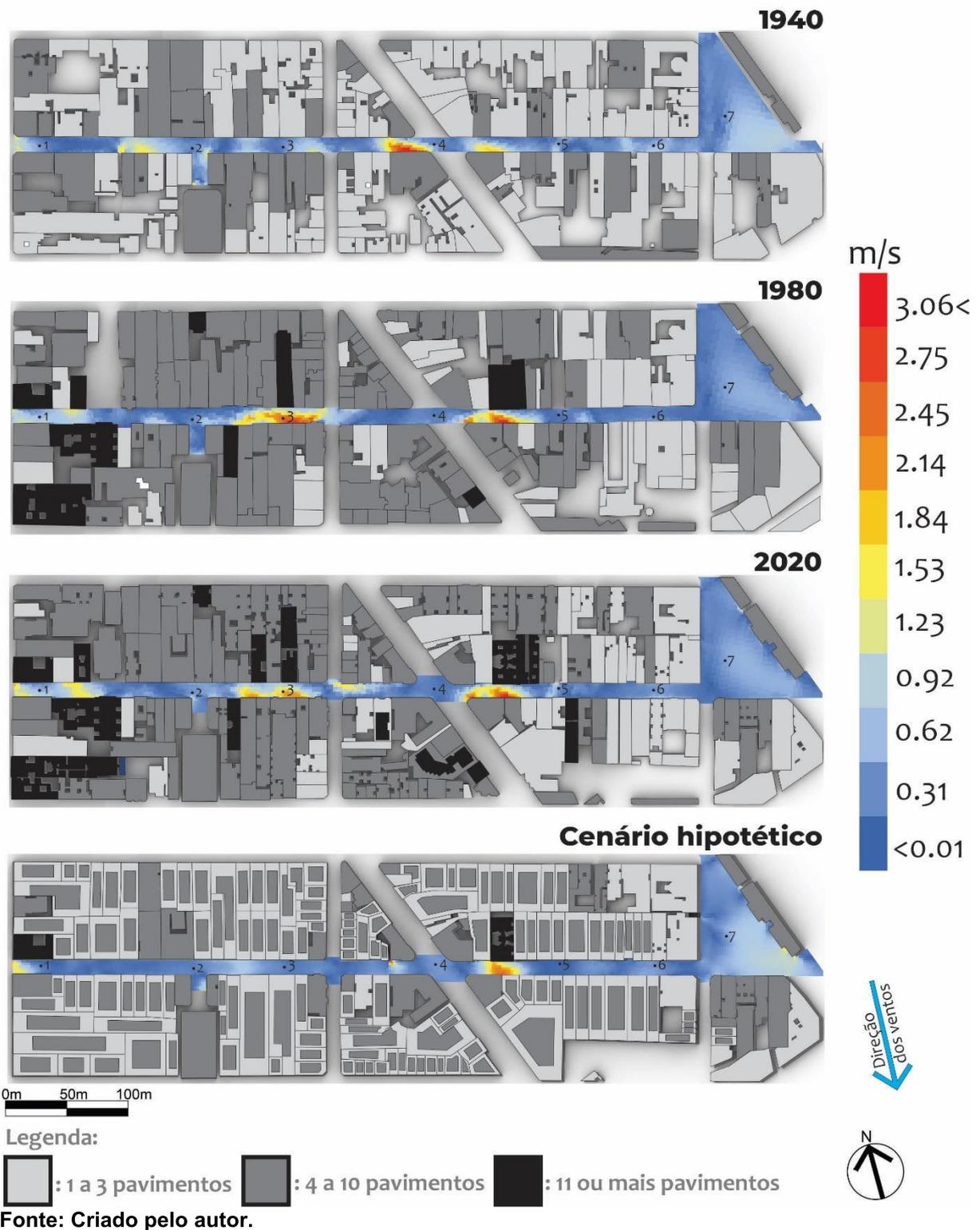
Figura 28: Mapas de velocidade dos ventos às 16h no solstício de inverno (21/06).



De acordo com a Figura 29, os ventos a 103 graus às 16h não geraram tantas zonas com maior velocidade dos ventos conforme os períodos anteriores. Nota-se que os pontos 1 e 2 encontram-se em lugares com baixas velocidades dos ventos, que variaram entre 0.01 e 0.92m/s. Todavia, o ponto 3 em 1940 registrou velocidades de

0.62m/s, ao passo que em 1980 e 2020 o ponto se localiza em regiões de turbulência com velocidades entre 1.53 e 3.06m/s. Em 1940, o ponto 4 possui regiões de turbulência no entorno próximo, e os pontos 5,6 e 7 não registraram variações significativas de velocidade, isto é, variaram a velocidade entre 0.01 e 0.92m/s. Nota-se que o cenário hipotético também não apresentou zonas de turbulência dos ventos.

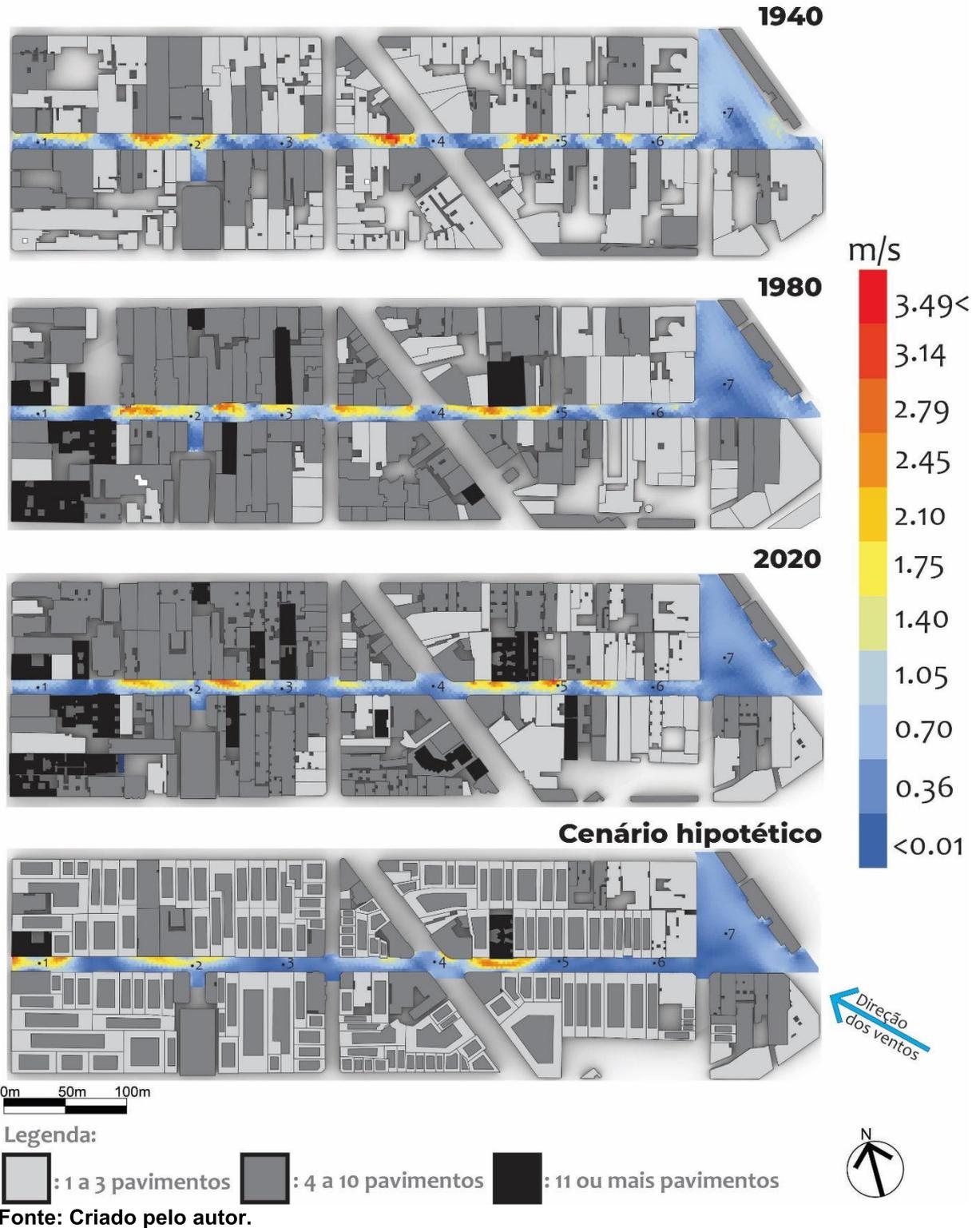
Figura 29: Mapas de velocidade dos ventos às 16h no solstício de verão (21/12).



No período noturno (Figura 30), a direção apontada foi a 331 graus, e foi o segundo período de maior velocidade registrada. Nota-se primeiramente um decréscimo de velocidade de 1.75 para 0.7m/s no ponto 1 entre 1940 e 2020. Os pontos 2,3 e 5 encontram-se em locais com turbulência, cujas velocidades variaram

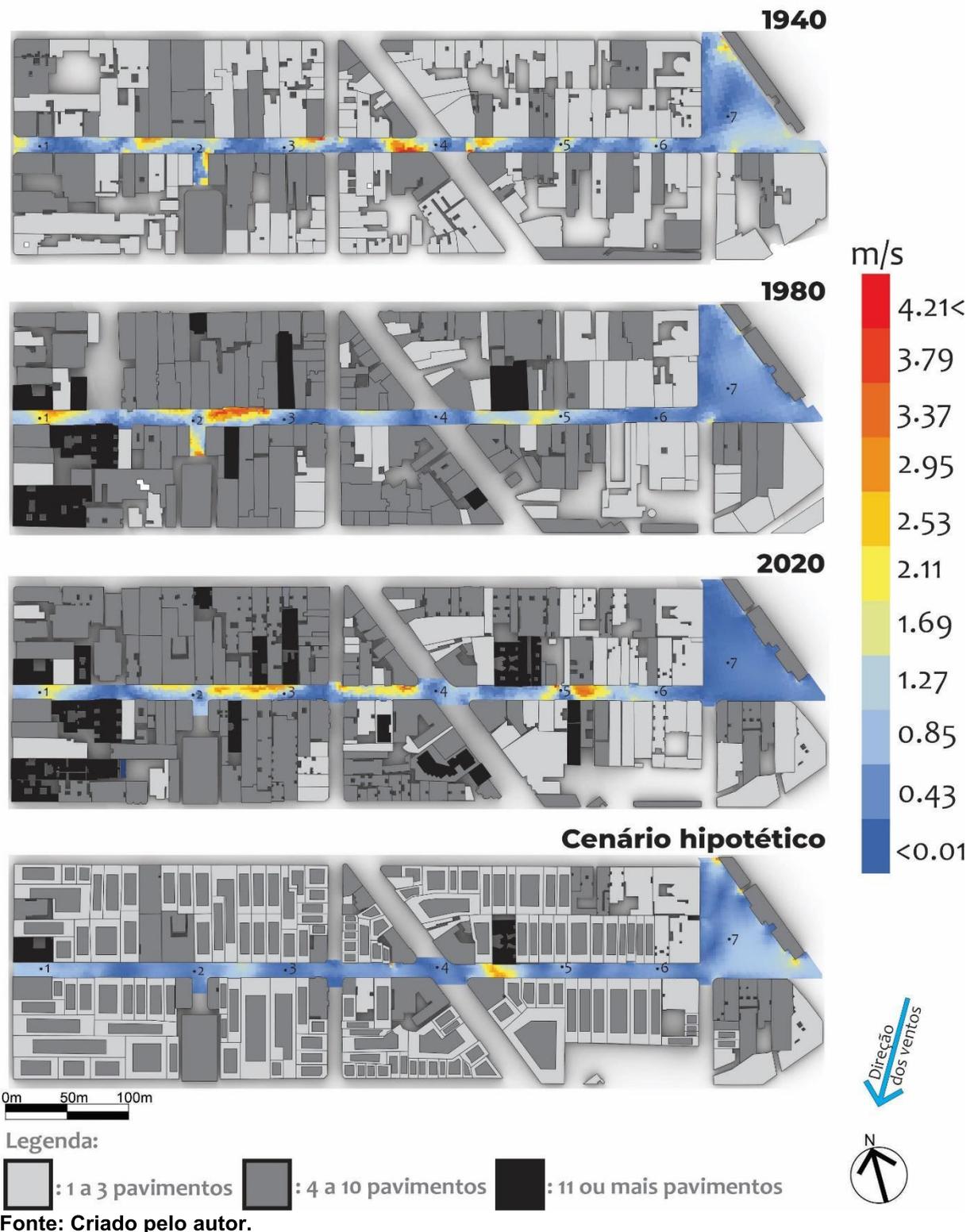
entre 1.40 e 3.14m/s. Os pontos 4 e 6 registraram diminuições de 1.05 para 0.01m/s. O ponto 7 não apontou variações significativas de velocidade.

Figura 30: Mapas de velocidade dos ventos às 20h no solstício de inverno (21/06).



A maior velocidade dos ventos registrada entre todos os anos analisados foi no período noturno do solstício de verão conforme na Figura 31, alcançando 4.21m/s, o que pode caracterizar um possível alívio no efeito da ICU noturna. A direção predominante dos ventos é de 75 graus, o que gerou zonas de maior velocidade em diversos espaços do cânion nos quatro períodos analisados. Isso é percebido através da análise por pontos, isso é, o ponto 1 em 1940 e 1980 registrou velocidade de 0.85m/s, e em 2020 e no cenário hipotético localiza-se em uma zona cuja velocidade variou entre 2.11 e 4.21m/s. Nos pontos 2 e 3, a velocidade oscilou entre 0.01 e 1.27 entre 1940 e 2020. Os pontos 4, 5 e 6 não registraram variações de velocidade significativas, todavia, o ponto 7 registrou uma diminuição de 1.27m/s para 0.01m/s entre os anos analisados.

Figura 31: Mapas de velocidade dos ventos às 20h no solstício de verão (21/12).



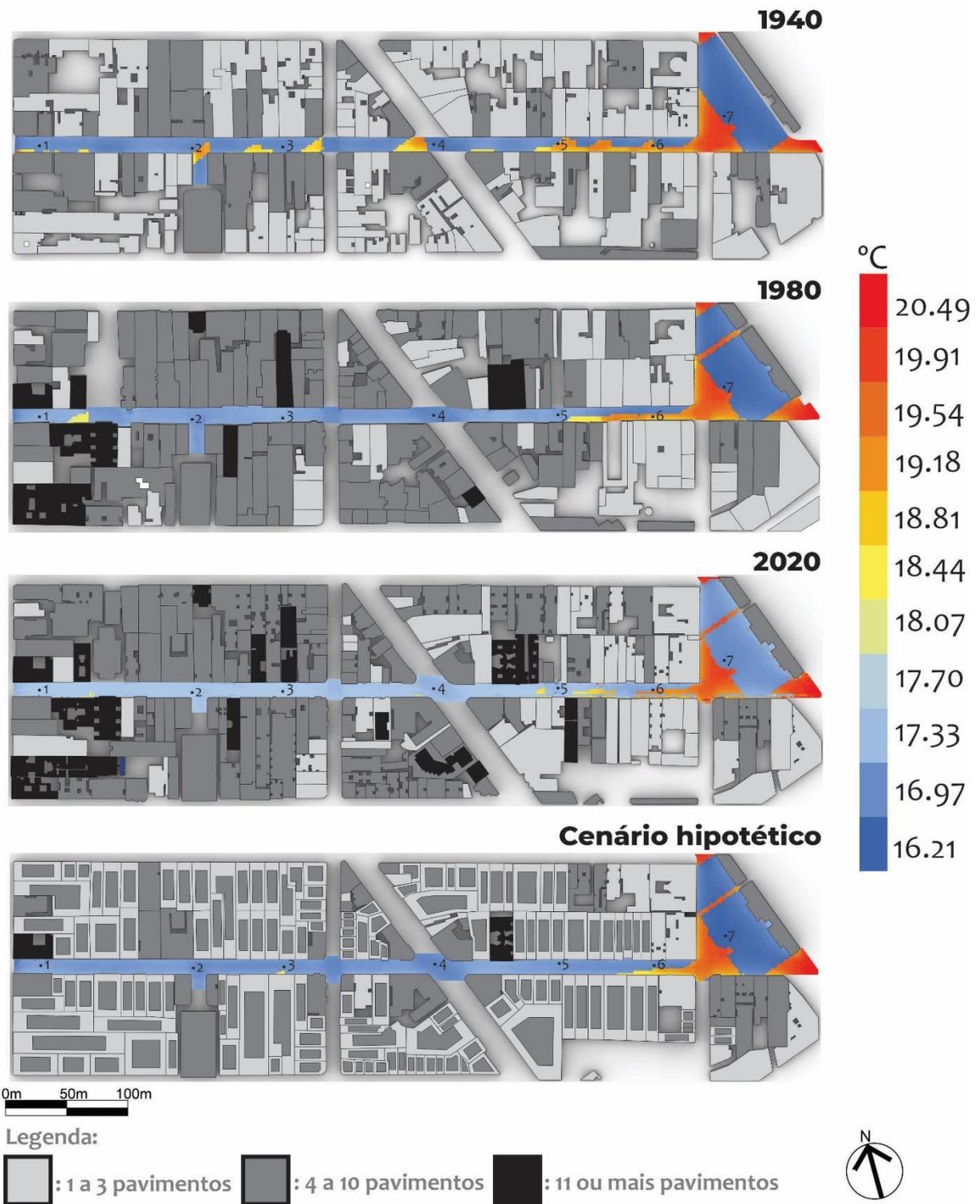
A partir das simulações, foi possível notar o efeito da morfologia na circulação dos ventos no cânion. De acordo com a direção dos ventos, a morfologia atuou como uma barreira, que impediu a penetração dos ventos no ambiente do cânion, e assim, reduzindo sua velocidade. A ação do vento foi mais efetiva quando a direção é em

ângulos próximos ou alinhada com o eixo do cânion como foi constatado nos trabalhos de Andreou e Axarli (2012) e Kitous, Bensalem e Adolphe (2011). O cânion da Rua Halfeld é orientado na direção leste – oeste, portanto, a partir da rosa dos ventos da Figura 15, nota-se a existência de ventos da direção leste com velocidades que podem chegar a 10,9m/s, portanto, pode favorecer o conforto térmico em determinadas situações climáticas. Entretanto, é notável que conforme a morfologia se adensou no cenário hipotético, menos o vento penetra no espaço do cânion, pois a morfologia atuou como uma barreira física contra o vento, e por consequência, menos zonas de turbulência foram registradas em todos os horários analisados do cenário hipotético.

4.3. Análises de UTCI

Às 8h (Figura 32), nota-se que o ângulo solar projetou espaços sombreados na maioria dos pontos de análise, portanto, o valor do UTCI é menor nessas áreas, e variou entre 16.21 e 17.33°C, o que é considerado confortável de acordo com a escala do índice. A diferença do UTCI entre espaços sombreados e iluminados pelo sol foi de até 3°C nesse momento analisado. Dessa maneira, os espaços sombreados aumentaram com a verticalização dos edifícios e o aumento da razão H/W, e o sombreamento criado ao nível do pedestre aumentou com o passar dos anos.

Figura 32: Mapas do índice UTCI às 8h no solstício de inverno (21/06).

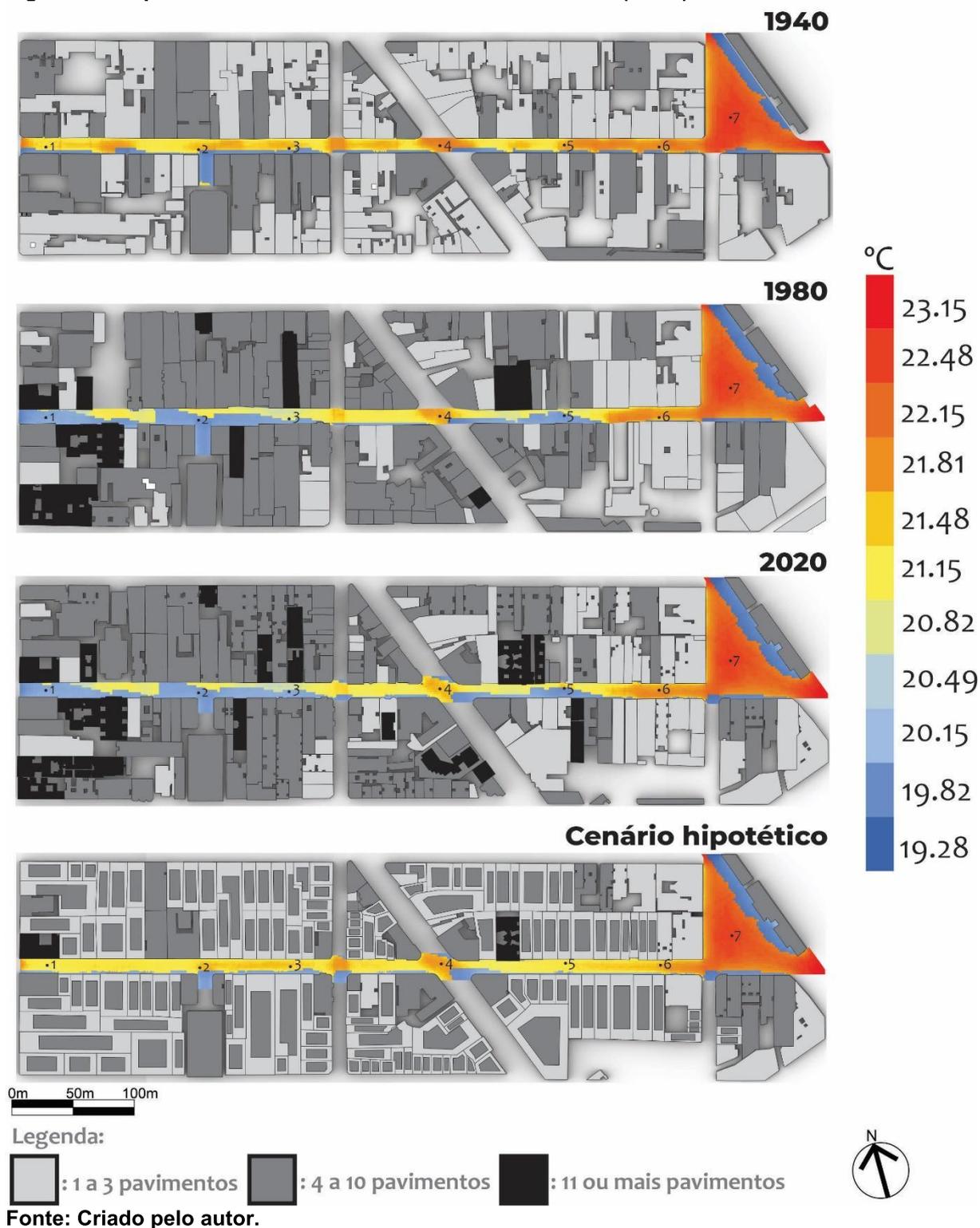


No solstício de verão, é percebido a partir da Figura 33 que a variação do UTCI se encontra no patamar de conforto térmico de acordo com a escala de desconforto do índice (9 - 26°C). Percebe-se que todos os pontos possuem temperaturas que variam entre 21.15 e 22.81°C na morfologia de 1940. Já nas morfologias de 1980,

2020 e no cenário hipotético, os pontos 1,2 e 3 foram sombreados, e assim, o UTCI abaixou em até 2°C quando em comparação com áreas expostas ao sol, como nos pontos 4,6 e 7 que mantiveram o UTCI variando entre 21.12 e 22.81°C . O ponto 5 que recebia insolação direta em 1940 e passou a ser sombreado em 1980 e 2020. Por fim, cabe notar que a escala de temperatura se encontra em níveis de conforto térmico, com temperaturas abaixo de 26°C .

Os resultados das 8h demonstraram o efeito do sombreamento provocado pelo aumento da razão H/W e redução do FVC, como nos trabalhos de Bourbia e Boucheriba (2010) e Emmanuel e Johansson (2006). A diferença do UTCI entre áreas expostas ao sol e sombreadas foi de aproximadamente 3°C em ambos os solstícios, porém, nota-se que mesmo assim, nesse horário analisado, a escala do UTCI encontra-se em níveis de conforto térmico, não havendo desconforto em áreas ensolaradas e sombreadas.

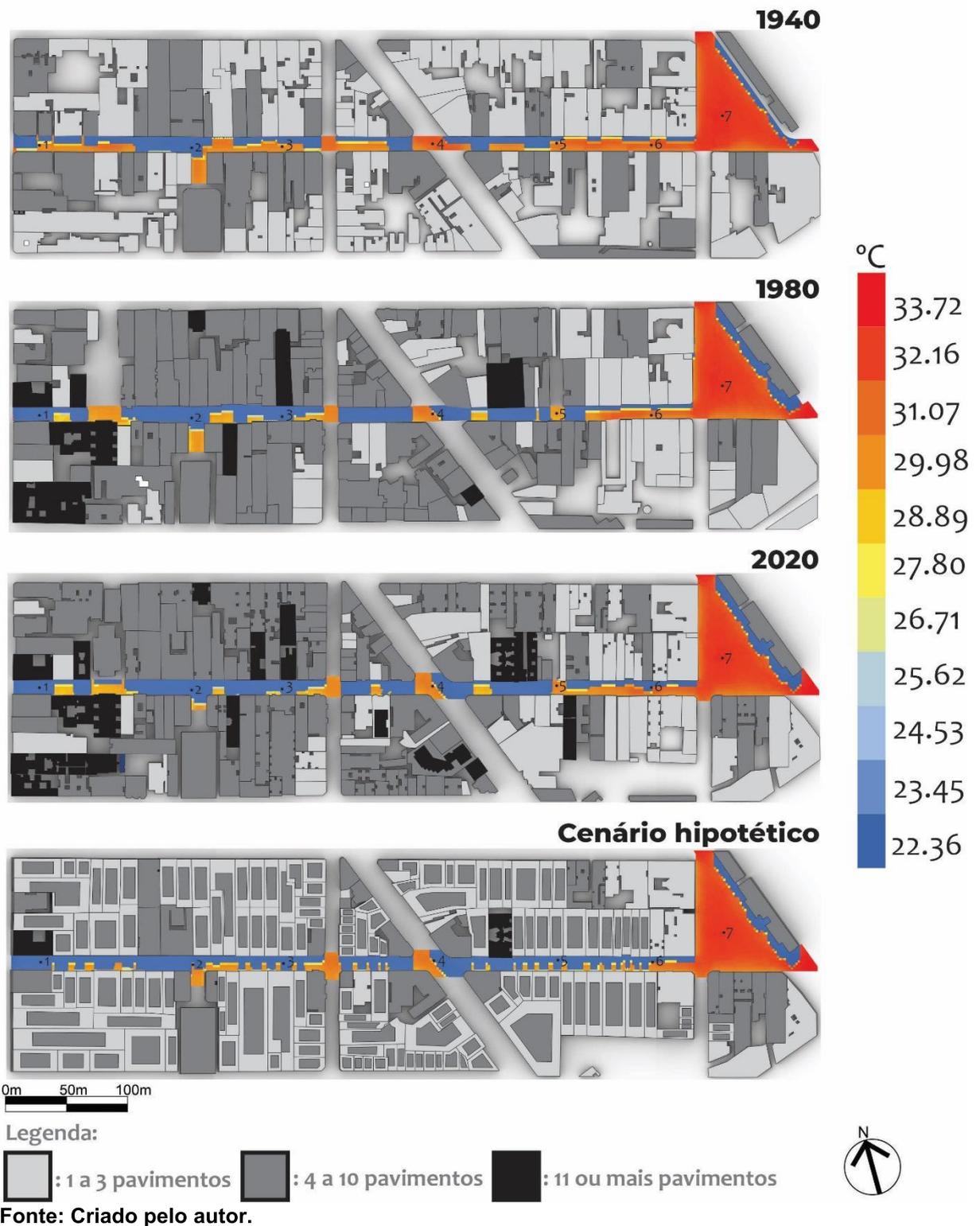
Figura 33: Mapas do índice UTCI às 8h no solstício de verão (21/12).



Às 12h, o ângulo solar é mais alto, e assim, a variação do UTCI é maior, oscilando entre 22.36 e 33.50°C. Nota-se de acordo com a Figura 34, que alguns pontos de análise estão expostos ao sol, e assim, o índice encontra-se em patamares acima de 26 °C, caracterizando estresse forte por calor. Na morfologia de 1940, a

maioria dos pontos estão expostos a luz solar, e assim, o UTCI variou entre 31.07 e 33.50 °C nestes espaços, com exceção do ponto 2, que foi sombreado pela morfologia. Em 1980 e 2020 os pontos 1,2 e 3 foram sombreados com a verticalização dos edifícios do entorno, e assim, o UTCI registrado foi de 22.36 °C caracterizando uma redução de quase 9 °C do índice quando em comparação com áreas expostas ao sol. O ponto 6 que nas morfologias de 1940 e 1980 estava exposto ao sol, e em 2020 foi sombreado pela morfologia, os pontos 4,5 e 7 tiveram o UTCI em patamares de estresse forte por calor. Assim, nota-se que os resultados são similares aos apresentados por Cavalcante *et al.* (2017), que destacaram uma redução de até 3 °C em áreas de maior razão H/W. Contudo, os resultados aqui encontrados foram mais expressivos, pois foi constatado que, comparando áreas sombreadas e expostas ao sol, o índice UTCI reduziu em até aproximadamente 11 °C no inverno e 5 °C no verão.

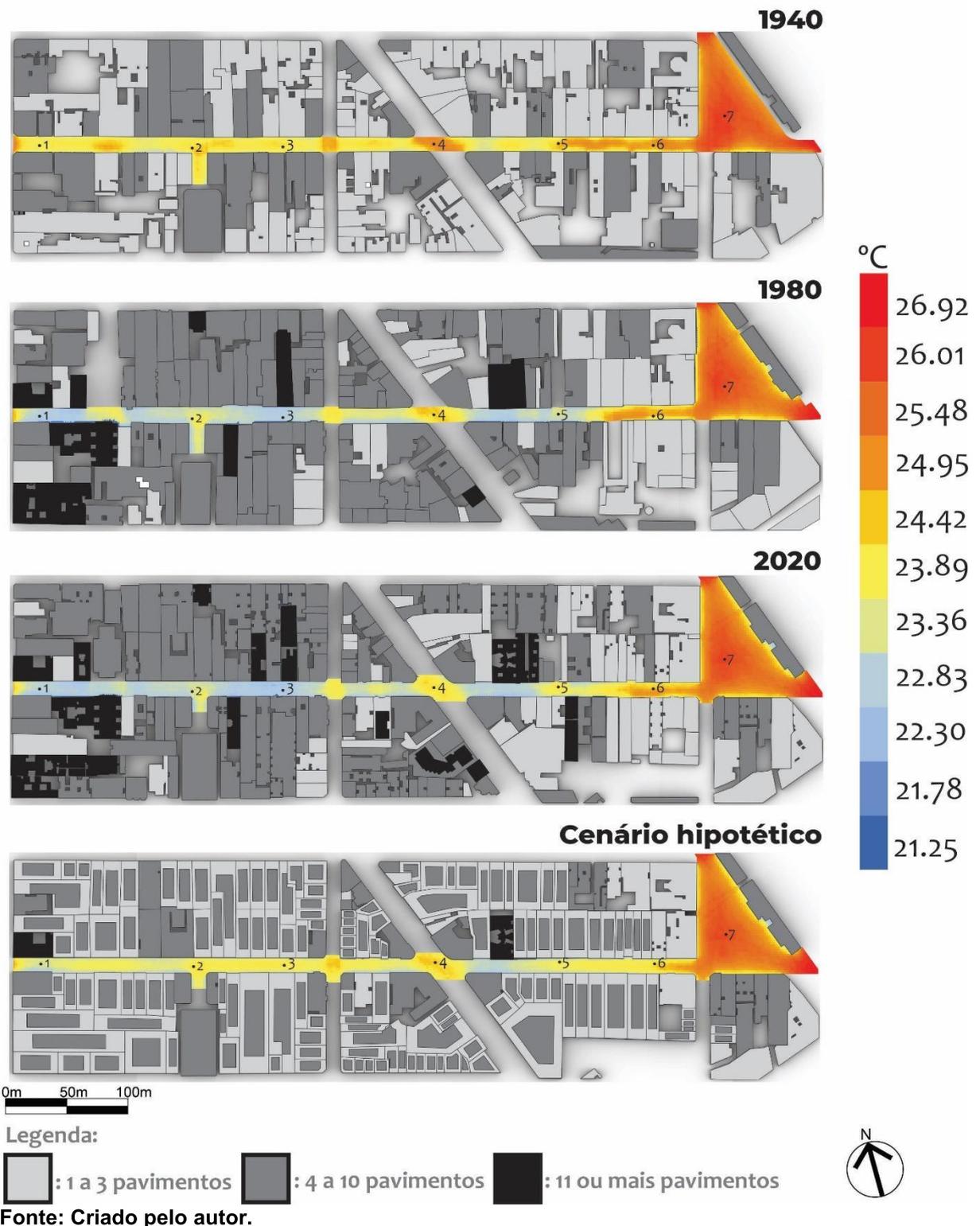
Figura 34: Mapas do índice UTCI às 12h no solstício de inverno (21/06).



A Figura 35 demonstra que o sol se encontra em ângulos mais altos às 12h, portanto, todos os pontos da morfologia de 1940 possuíam temperaturas variando entre 23.89 e 26.69°C. E em 1980 e 2020 percebe-se que os pontos 1,2,3 e 5 estão em espaços com temperaturas mais amenas, caracterizando uma redução de até

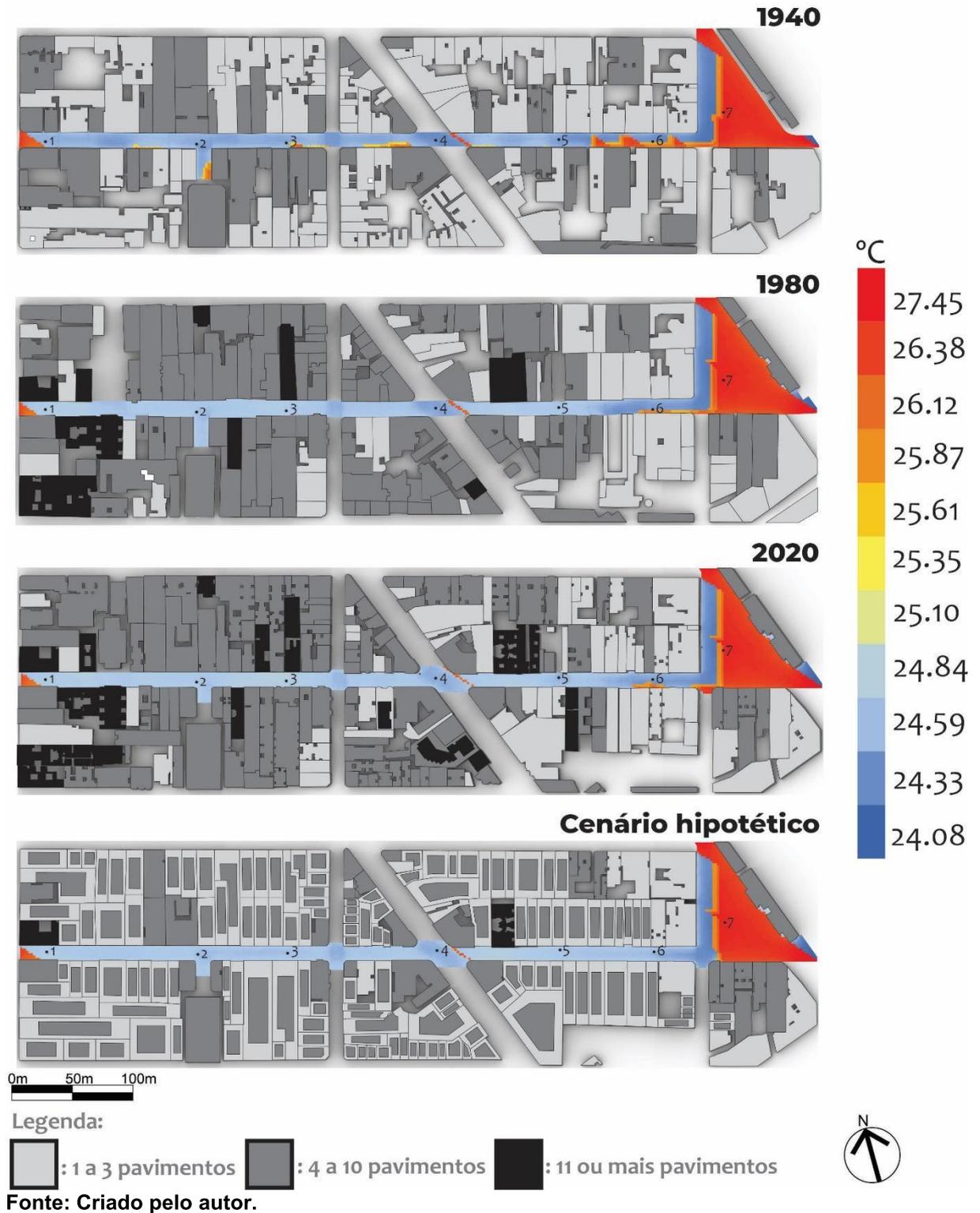
2.1 °C no índice UTCI. No ponto 4 também se notou uma redução de até 2 °C no índice. Nos pontos 6 e 7 o UTCI variou entre 23.89 e 26.69 °C. Assim, novamente é possível perceber o efeito da razão H/W em promover sombreamento e amenizar as temperaturas durante este momento do dia, porém, cabe destacar que a variação geral de temperatura se encontra na faixa de conforto térmico.

Figura 35: Mapas do índice UTCI às 12h no solstício de verão (21/12).



Na Figura 36, às 16h, nota-se que a maioria dos pontos estão sombreados pela morfologia em todos os períodos de análise, com exceção do ponto 7, que é localizado em meio a uma área aberta, com alta visibilidade do céu, que registrou valores maiores do UTCI.

Figura 36: Mapas do índice UTCI às 16h no solstício de inverno (21/06).

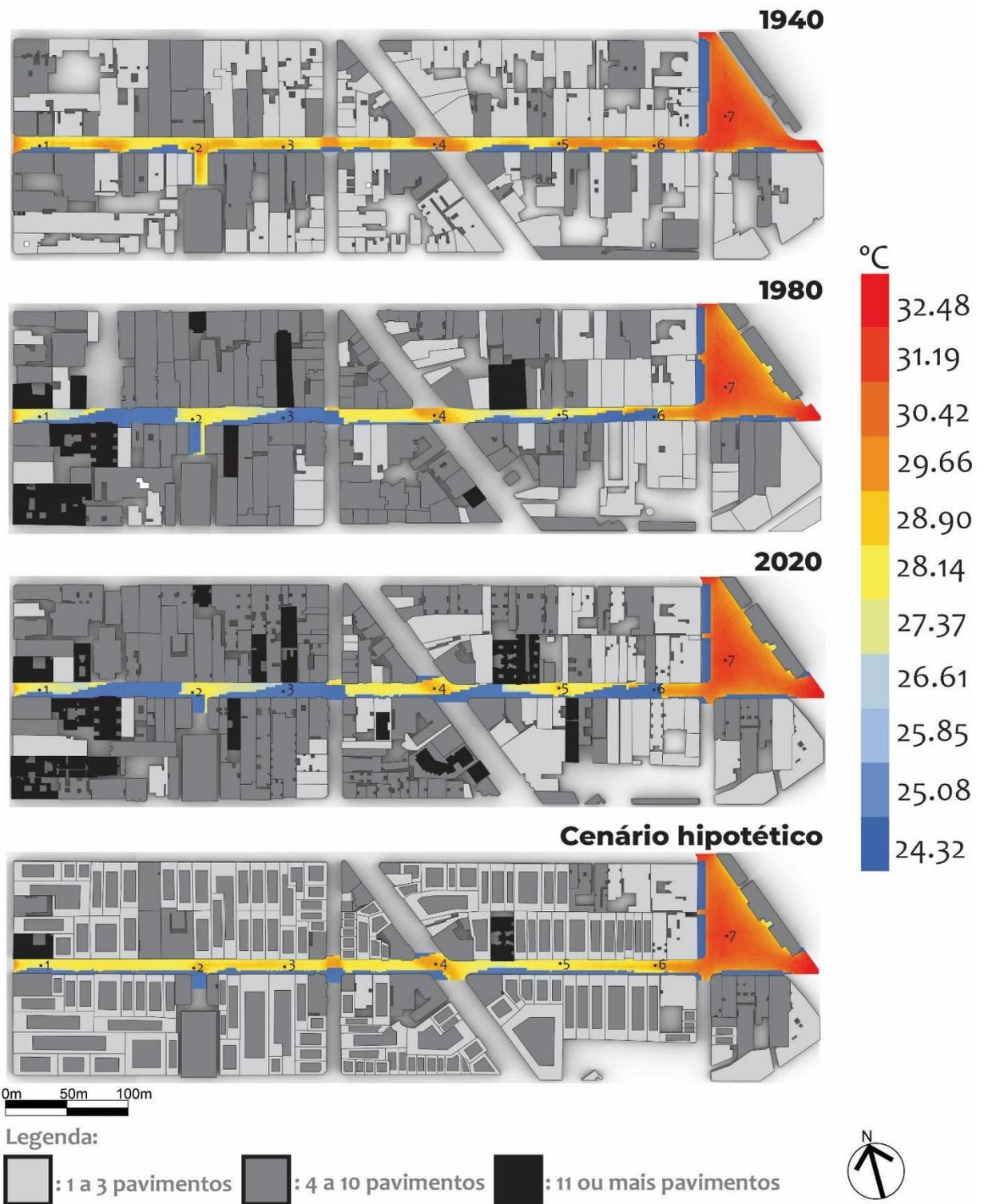


Já às 16h do Solstício de Verão (Figura 37), o índice alcançou valores acima do patamar de conforto térmico, variando entre 24.32 e 32.12 °C. Dessa maneira, devido ao ângulo solar e baixo gabarito dos edifícios da morfologia de 1940, nota-se

que todos os pontos estão expostos a temperaturas variando entre 28.14 e 32.12 °C, caracterizando estresse forte por calor. Nas morfologias de 1980 e 2020, se percebe que os pontos 1,2,3,5 e 6 foram sombreados pela morfologia e mantiveram o UTCI na escala de conforto, reduzindo o índice em até 8°C. Os pontos 4 e 7 encontram-se em espaços abertos e expostos ao sol, portanto, isso pode gerar desconforto térmico.

Park, Tuller e Jo (2014) descobriram em seu estudo feito em duas cidades no Canadá e na China que o período com maior estresse térmico por calor foi entre as 14 e 16h, dessa forma, áreas que anteriormente não possuíam estresse térmico, durante as 16h, apresentaram estresse moderado por calor de acordo com a escala do UTCI. Áreas que foram sombreadas por edifícios apresentaram uma redução de 1°C do UTCI, ao passo em que áreas ensolaradas tiveram um aumento de 1 a 2°C do índice. No caso do presente trabalho, a diferença entre áreas iluminadas pelo sol e sombreadas foi ainda mais expressiva, de aproximadamente 7°C no verão e 3°C no inverno. Portanto, isso mostra o quão expressivo pode ser o efeito de uma ICU em climas tropicais.

Figura 37: Mapas do índice UTCI às 16h no solstício de verão (21/12).



O fenômeno da ICU noturna às 20h aumentou com o passar dos anos, conforme apontam a Figura 38 e a Figura 39, demonstrando que as temperaturas de conforto aumentaram com o passar dos tempos, conforme as edificações irradiam o calor absorvido ao longo do dia no período noturno.

Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2016) encontraram um aumento de 2 °C na temperatura do ar em ICU noturnas de cânions urbanos na cidade de Passo Fundo. O aumento na temperatura ocorreu conforme a razão H/W também aumentou em diferentes cenários simulados. Tal condição é similar aos resultados encontrados nesse trabalho, na medida em que as temperaturas dentro do cânion eram maiores em áreas com edifícios altos (alta razão H/W e baixo FVC), todavia, a razão H/W aqui analisada é menor, portanto, a variação também foi menor, de apenas 1 °C, sendo importante notar o aumento na temperatura em pátios de edifícios e próximos às fachadas. Embora a análise de ICU noturnas nem sempre sejam consideradas pelos estudos, o fenômeno impacta não somente as condições de conforto térmico em espaços externos, mas também as condições térmicas internas de ambientes de edifícios naturalmente ventilados.

Figura 38: Mapas do índice UTCI às 20h no solstício de inverno (21/06).

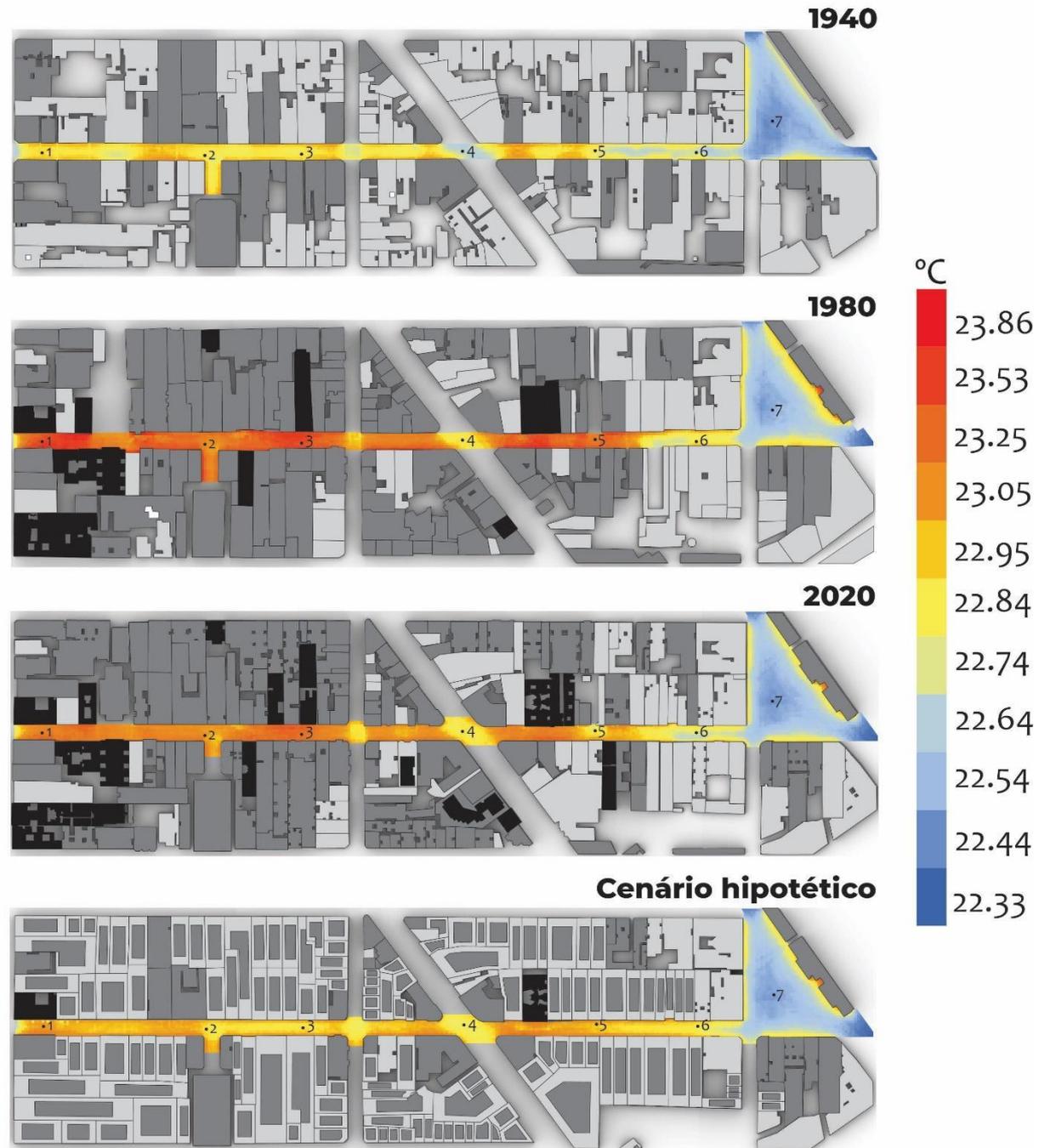
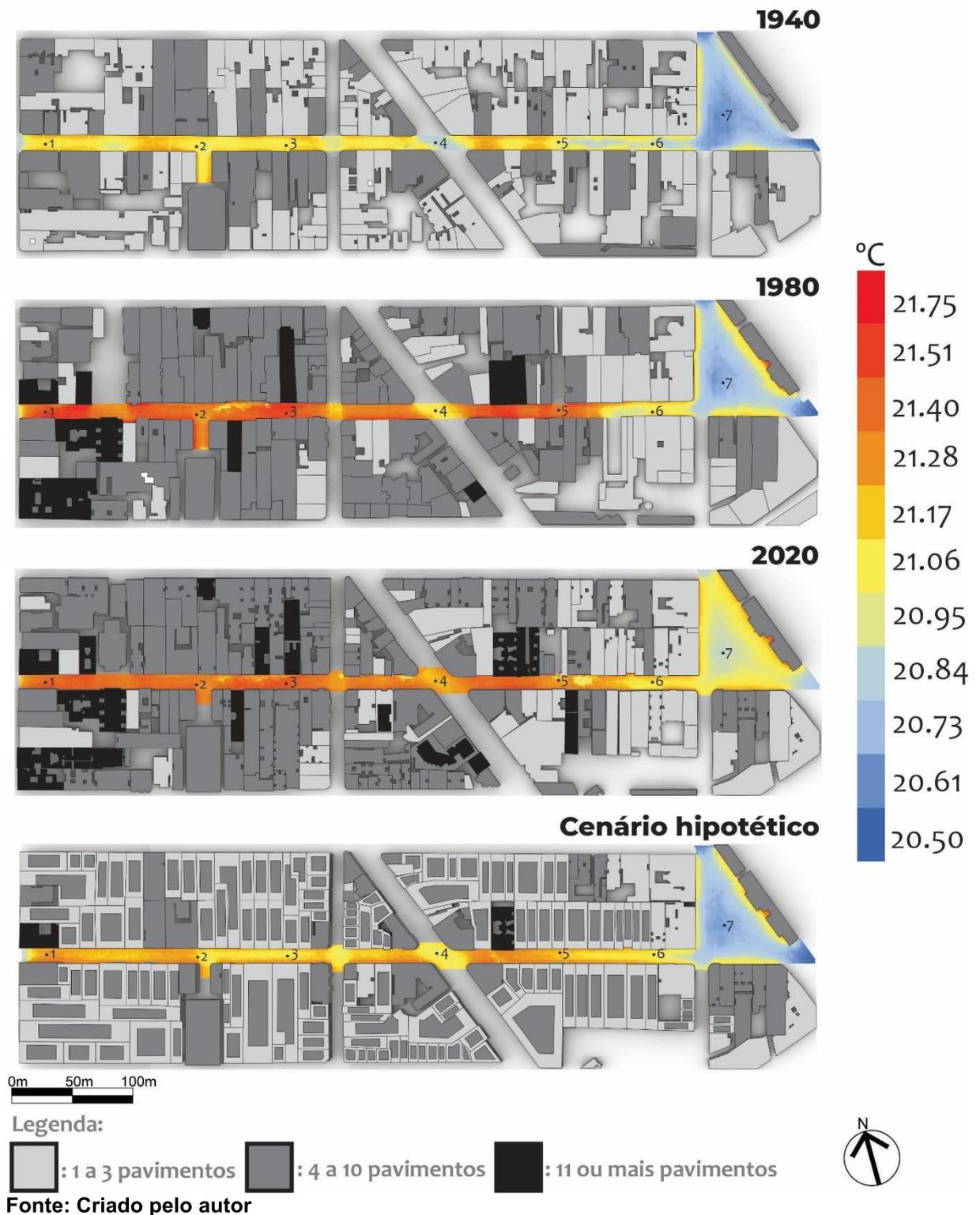


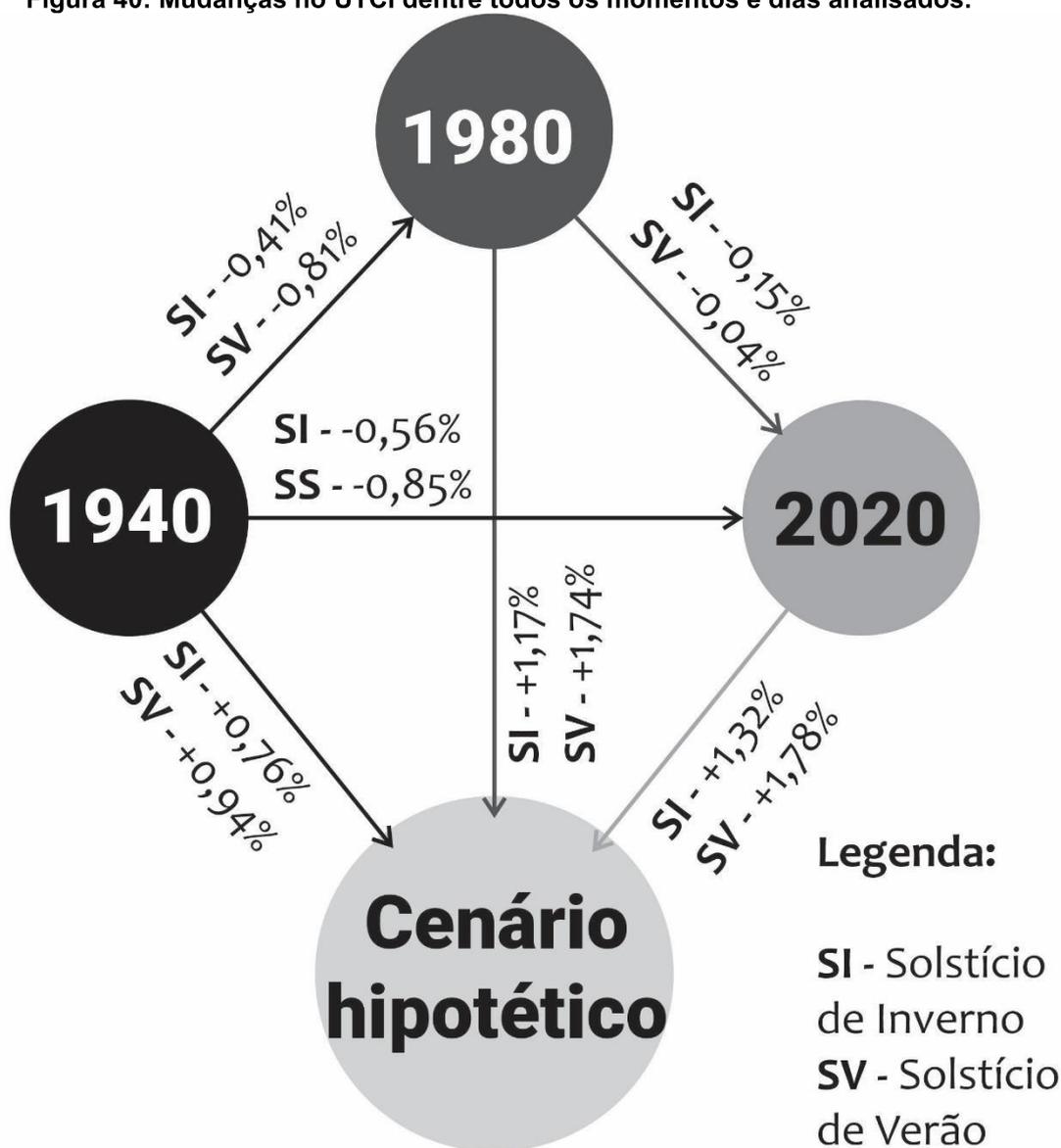
Figura 39: Mapas do índice UTCI às 20h no solstício de verão (21/12).



Por fim, uma base de dados foi criada utilizando os resultados de todas as simulações, e, assim, foi possível analisar percentualmente como o índice UTCI variou entre todos os anos e dias de análise, a partir de uma média extraída de uma base de dados com 2076 valores do índice UTCI. Como resultado, foi possível formular o

diagrama da Figura 40, assim, é notável que houve um aumento do UTCI no cenário hipotético quando comparado com períodos passados (1940, 1980 e 2020). Esse aumento ocorreu devido ao acréscimo do calor antropogênico atribuído na configuração do algoritmo UWG. Nota-se que houve um decréscimo do UTCI ao comparar os valores entre os solstícios dos anos de 1940, 1980 e 2020, o que mostra o efeito do sombreamento no conforto térmico provocado pela verticalização

Figura 40: Mudanças no UTCI dentre todos os momentos e dias analisados.



Fonte: Criado pelo autor.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou identificar como as mudanças morfológicas afetaram o conforto térmico no cânion urbano da Rua Halfeld, por meio do uso de análises feitas em ferramentas computacionais ao longo de quatro períodos de análise: 1940, 1980, 2020 e o cenário hipotético.

A análise dos resultados indicou que as mudanças no cânion urbano com o passar dos tempos afetaram significativamente as condições de conforto térmico no nível do pedestre. O índice UTCI obteve pequenas variações ao longo dos anos, especialmente entre 1940 e 1980, quando o processo de urbanização ocorreu de forma mais evidente, e atingiu seu patamar mais elevado no cenário hipotético. Observando as variações do UTCI durante os períodos diurnos, as áreas sombreadas pela morfologia aumentaram conforme a morfologia se elevou, e, por consequência, essas áreas sombreadas registraram níveis mais amenos de conforto quando em comparação com espaços expostos a luz solar. É importante notar que no cenário hipotético, alguns edifícios mais altos da morfologia de 2020 foram removidos, e assim, menos sombreamento foi criado quando comparando 2020 com o cenário hipotético. O efeito do sombreamento da morfologia foi mais expressivo especialmente durante períodos quentes do dia, às 12 e 16h. Pelo fim do dia e durante o período noturno, o fenômeno se altera, e o UTCI aumentou, especialmente em áreas próximas a edifícios altos, devido ao calor armazenado durante o dia que é liberado pelas superfícies urbanas durante a noite, e atingiu seu valor mais crítico no cenário hipotético, devido ao aumento da densidade dos edifícios e do calor antropogênico, assim como pela diminuição do albedo das fachadas de edifícios e da pavimentação urbana.

A ação dos ventos foi mais efetiva quando a direção predominante se alinha com o eixo do cânion, em contrapartida, notou-se que a morfologia urbana pode bloquear a circulação dos ventos quando a direção não é alinhada com a orientação

do cânion, assim como em áreas de maior razão H/W, as direções detectadas foram menores. Percebeu-se que o cenário hipotético teve um menor efeito dos ventos no conforto térmico, pois o aumento da densidade dos edifícios gerou uma barreira física para os ventos locais, e isso mostra o impacto do adensamento urbano no conforto térmico.

Cabe destacar algumas limitações existentes neste estudo, sendo primeiramente ressaltado que não foram realizadas medições em campo no cânion da Rua Halfeld. As análises foram feitas em software que visa captar a realidade com uma certa margem de erro, que é delimitada através de experiências de validação de suas *engines* de simulação. Dessa maneira, a falta de medições em campo faz com que os resultados careçam de uma base de dados medidos no espaço real, e assim, esses dados simulados e os medidos em campo podem ser comparados para uma base de resultados ainda mais robusta. Porém, é importante ressaltar que as *engines* de simulação dos plugins que integram software Ladybug já foram validadas por meio de trabalhos anteriores, portanto, os resultados possuem validação.

Outra limitação que foi identificada é que as análises se baseiam no uso de diferentes *engines* de simulação validadas separadamente, ao contrário de se usar uma única *engine* integrada. Essa separação de *engines* pode potencialmente aumentar a margem de erros de uma análise, pois os resultados passam de uma *engine* para a outra. Outra limitação identificada foi a simulação da temperatura radiante média, isto é, de acordo com trabalhos analisados e a descrição de alguns componentes do Ladybug, o jeito mais adequado de simular a temperatura radiante média é usando o Energyplus (ou pelo Honeybee). Todavia, alguns erros ocorreram ao tentar usar o Energyplus nas simulações, pois o software não suporta modelos complexos nos seus cálculos, portanto, pode ser o que causou os erros. Dessa forma, foi optado por não usar o Honeybee no presente trabalho, pois os modelos deveriam ser simplificados. Assim, foi utilizado o componente LB_Outdoor Solar Temperature Adjustor, que usa de recursos computacionais confiáveis para simular a temperatura radiante média de modelos simples. Contudo, o uso desse componente pode gerar resultados subestimados da temperatura radiante média, dependendo da complexidade do modelo que vai ser simulado.

A dificuldade de simular as diferentes propriedades térmicas de materiais também foi identificada como uma limitação, pois envolve diferentes parâmetros físicos de materiais da construção civil, como transmitância térmica, reflexibilidade etc.

A atribuição destes parâmetros pode aumentar significativamente o tempo de computação das simulações. No entanto, a metodologia e o índice utilizados neste estudo podem ser úteis para serem usadas para avaliar as condições térmicas de cânions urbanos e a magnitude e intensidade das variações de conforto térmico em detrimento do efeito das ICU ao longo do tempo.

O uso das ferramentas computacionais torna possível realizar também projeções para o futuro, buscando entender como o fenômeno das ICU pode se manifestar no futuro, e assim, as ferramentas de simulação podem ser úteis para orientar a criação de diretrizes futuras para mitigação das ICU, especialmente em áreas de clima tropical, onde o fenômeno pode ser mais expressivo.

Por fim, conforme mencionado na parte das análises de *CFD*, os resíduos gerados pelas simulações indicaram uma tendência de convergência. Entretanto, como as análises não foram conduzidas até o momento de convergência das simulações, os valores de velocidade dos ventos podem não ser significativamente precisos. Logo, para trabalhos futuros, pretende-se melhorar os modelos de análises, para que sejam eliminados pequenos espaços entre os edifícios que interfiram nos resultados das análises de *CFD*. Planeja-se a realização de simulações de *CFD* com malhas mais refinadas e que convirjam adequadamente, para que os resultados de velocidade dos ventos sejam mais válidos, e assim, sejam gerados mapas de UTCI apropriados.

A realização de aferições de dados climáticos em campo nos momentos analisados seria interessante para a comparação dos dados obtidos nas simulações computacionais com os obtidos em campo, e assim, compreender de forma mais profunda as condições térmicas da Rua Halfeld. Também sugere-se que sejam feitas análises da intensidade das ICU ao comparar os resultados das simulações obtidas com os de dados climáticos de estações meteorológicas.

Portanto, o entendimento da influência do sombreamento e da ação dos ventos (que é relacionado com a orientação axial do cânion) no conforto térmico em áreas urbanas é um importante parâmetro a ser considerado por profissionais do planejamento urbano ao definirem *layouts* urbanos e limites para alturas de edificações, e assim, podendo orientar diretrizes que proporcionem espaços urbanos de maior qualidade ambiental e mais confortáveis. Embora possuam limitações, as ferramentas computacionais são importantes ferramentas a serem implementadas no

processo de projeto, especialmente no meio urbano, e podem auxiliar na tomada de decisões de projeto, principalmente para mitigação do desconforto térmico.

Em conclusão, espera-se que o presente trabalho venha a acrescentar conhecimentos na área de estudos de conforto térmico no meio urbano, assim como venha a somar saberes ao campo de uso de softwares de simulação, especialmente contribuir para o aprimoramento do software *Ladybug Suite Tools*. Acredita-se que esse estudo sirva como apoio para criação de futuras diretrizes urbanas de mitigação do desconforto térmico para a cidade de Juiz de Fora, especialmente para a Rua Halfeld, para que sejam gerados espaços urbanos mais confortáveis, e que aprimorem a qualidade de vida dos habitantes da cidade.

6. REFERÊNCIAS

- ABDOLLAHZADEH, N.; BILORIA, N. Outdoor thermal comfort: Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney. **Frontiers of Architectural Research**, n. xxxx, 2020.
- AKBARI, H. et al. Local climate change and urban heat island mitigation techniques - The state of the art. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 22, n. 1, p. 1–16, 2016.
- AL-SALLAL, K. A.; AL-RAIS, L. Outdoor airflow analysis and potential for passive cooling in the modern urban context of Dubai. **Renewable Energy**, v. 38, n. 1, p. 40–49, 2012.
- ALEXANDER, C., ISHIKAWA, S., & SILVERSTEIN, M. *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*. Nova York: Oxford University Press, 1977.
- ALEXANDRI, E.; JONES, P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 480–493, 2008.
- ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. **Building and Environment**, v. 41, n. 2, p. 94–108, 2006.
- ANDREOU, E.; AXARLI, K. Investigation of urban canyon microclimate in traditional and contemporary environment. Experimental investigation and parametric analysis.

Renewable Energy, v. 43, p. 354–363, 2012.

ARENS, E. et al. Modeling the comfort effects of short-wave solar radiation indoors. **Building and Environment**, v. 88, p. 3–9, 2015.

ARNFIELD, A. J. Street design and urban canyon solar access. **Energy and Buildings**, v. 14, n. 2, p. 117–131, 1990.

ASSIS, D. Universidade Federal De Juiz De Fora Instituto De Ciências Humanas Programa De Pós-Graduação Em Geografia Débora Couto De Assis Juiz De Fora - Mg Juiz De Fora- Mg. p. 1–4, 2016.

ASSIS, E. S. DE et al. Assessment of Outdoor Thermal Comfort in Urban. **Solar Energy**, v. 4, p. 1–19, 2013.

BAKARMAN, M. A.; CHANG, J. D. The Influence of Height/width Ratio on Urban Heat Island in Hot-arid Climates. **Procedia Engineering**, v. 118, p. 101–108, 2015.

BARBOSA, Yuri. O PROCESSO URBANO DE JUIZ DE FORA – MG. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2013.

BARZEGAR GANJI, H.; UTZINGER, D. M.; BRADLEY, D. E. Create and Validate Hybrid Ventilation Components in Simulation Using Grasshopper and Python in Rhinoceros. **Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA**, v. 16, p. 4345–4352, 2020.

BASSO, L. C. et al. GEOMETRIA E MICROCLIMA URBANO: simulações computacionais em área de média densidade na cidade de Passo Fundo/RS. n. February, 2019.

BEIRÃO, J. CityMaker / Designing Grammars for Urban Design. 2012. 272 f. Tese (Doutorado em Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Delft University of Technology, Delft, 2012.

BERGHAUSER PONT, M.; HAUPT, P.; D’LAINE, C. **Spacematrix : space, density and urban form**. [s.l: s.n.].

BŁAZEJCZYK, K. et al. Principles of the new universal thermal climate index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale. **Miscellanea Geographica**, v. 14, p. 91–102, 2010.

- BORGES, Marcus. Influência da vegetação no conforto térmico em ambientes urbanos. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- BORNSTEIN, R. D. Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City. **Journal of Applied Meteorology, New York University**, 1968.
- BOURBIA, F.; BOUCHERIBA, F. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). **Renewable Energy**, v. 35, n. 2, p. 343–347, 2010.
- BRAIDA, F. Passagens em rede: a dinâmica das galerias comerciais e dos calçadões nos centros de Juiz de Fora e Buenos Aires. Juiz de Fora: Funalfa: Ed. UFJF, 2011;
- BRAZEL, A. et al. The tale of two climates - Baltimore and Phoenix urban LTER sites. **Climate Research**, v. 15, n. 2, p. 123–135, 2000.
- BRÖDE, P. et al. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). **International Journal of Biometeorology**, v. 56, n. 3, p. 481–494, 2012a.
- BRÖDE, P. et al. Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI-a case study in Southern Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 56, n. 3, p. 471–480, 2012b.
- C. A. SOUCHSOUCH, C. The effect of trees on summertime below canopy urban climates: a case study Bloomington, Indiana. **Journal of Arboriculture**, v. 19, n. 5, p. 303–312, 1993.
- A. C.; GALVANI, E.; NERY, J. T. Study of thermal comfort in the City of São Paulo using ENVI-met model Estudio del confort térmico en la ciudad de São Paulo utilizando el modelo ENVI-MET. Núm, v. 78, n. October 2011, p. 188–4611, 2012.
- CASTALDO, V. L. et al. How outdoor microclimate mitigation affects building thermal-energy performance: A new design-stage method for energy saving in residential near-zero energy settlements in Italy. **Renewable Energy**, v. 127, p. 920–935, 2018.
- CAVALCANTE, R. M. et al. Caracterização de cânions urbanos e seus efeitos climáticos em área com intenso processo de verticalização na cidade de Fortaleza-CE (Characterization of Urban Canyons and their Climatic Effects in an Area with Intense Verticalization Process in the ...). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 4, p. 1046, 2017.

CHEN, L. et al. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: A GIS-based simulation approach. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 121–136, 2012.

CHISTRIAN RICARDO RIBEIRO, ALEC PONTE GONÇALVES, F. P. B. ILHAS DE CALOR URBANAS E CONFORTO TÉRMICO HUMANO EM CIDADES DE PORTE MÉDIO: ESTUDO APLICADO EM JUIZ DE FORA (MG). **RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 39, p. 43–56, 2017.

CHOKHACHIAN, A. et al. Urban performance and density: Generative study on interdependencies of urban form and environmental measures. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, p. 101952, 2020.

CLARKE, J. F. NOCTURNAL BOUNDARY LAYER OVER CINCINNATI, OH. v. 97, n. 8, 1969.

CLAY, R. et al. Urban Heat Island traverses in the City of Adelaide, South Australia. **Urban Climate**, v. 17, p. 89–101, 2016.

COLISCHONN, E.; FERREIRA, C. V. D. O. O FATOR DE VISÃO DO CÉU E SUA INFLUÊNCIA SOBRE AS CARACTERÍSTICAS TÉRMICO-HIGROMÉTRICAS INTRAURBANAS EM PELOTAS/RS, BRASIL / The Sky View Factor and its Influence on the Intra-Urban Thermal-Hygrometric Features in Pelotas City-Rio Grande do Sul State... *Geographia Meridionalis*, v. 1, n. 1, p. 160, 2015.

COLTRI, P. P. Influência do uso e cobertura do solo no clima de Piracicaba, São Paulo: Análise de séries históricas, ilhas de calor e técnicas de sensoriamento remoto. **Universidade de São Paulo**, p. 166, 2006.

COLTRI, P. P. et al. Ilhas de Calor da estação de inverno da área urbana do município de Piracicaba, SP. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 1542, n. January, p. 33–36, 2007.

CORDOVIL, W. D. **DO CAMINHO NOVO A MANCHESTER MINEIRA: AS DINÂMICAS SÓCIO-ESPACIAIS DA GÊNESE E EVOLUÇÃO DO MUNICÍPIO DE JUIZ DE FORA NO CONTEXTO REGIONAL DA ZONA DA MATA MINEIRA JUIZ DE FORA 2013**. Juiz de Fora: [s.n.].

COUTTS, A. M.; BERINGER, J.; TAPPER, N. J. Impact of increasing urban density on

local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, n. 4, p. 477–493, 2007.

CRISTIANE, M.; TRINDADE, D. C. CLIMATOLOGIA E GESTÃO DO ESPAÇO URBANO. n. 1976, p. 71–90, 2010.

DE ABREU-HARBICH, L. V.; LABAKI, L. C.; MATZARAKIS, A. Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. **Landscape and Urban Planning**, v. 138, p. 99–109, 2015.

DE SOUZA, D. O.; DOS SANTOS ALVALÁ, R. C. Observational evidence of the urban heat island of Manaus City, Brazil. **Meteorological Applications**, v. 21, n. 2, p. 186–193, 2014.

DOULOS, L.; SANTAMOURIS, M.; LIVADA, I. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. **Solar Energy**, v. 77, n. 2, p. 231–249, 2004.

DUARTE, Denise Helena Silva; SERRA, Geraldo Gomes. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlações e proposta de indicador. In: Ambiente Construído. V.3, n.2, p7-20, abr. /jun. Porto Alegre, 2003.

DUARTE, J. P., BEIRÃO, J. N., MONTENEGRO, N., GIL, J. City Induction: A Model for Formulating, Generating, and Evaluating Urban Designs. In: ARISONA, S., ASCHWANDEN, G., HALATSCH, J., WONKA, P. (Eds.). Digital Urban Modeling and Simulation. Berlim: Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 73-98.

EMMANUEL, R.; JOHANSSON, E. Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: The case of Colombo, Sri Lanka. **Climate Research**, v. 30, n. 3, p. 189–200, 2006.

EPA, U. S.; Environmental Protection Agency. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics. 2008. Disponível online em: <http://www.epa.gov/heatisland>. Acesso em 06/11/2021

EVOLA, G. et al. A novel comprehensive workflow for modelling outdoor thermal comfort and energy demand in urban canyons: Results and critical issues. **Energy and Buildings**, v. 216, p. 109946, 2020.

FANGER, P. O. Thermal environment - Human requirements. **The Environmentalist**,

v. 6, n. 4, p. 275–278, 1986.

FERREIRA, L.; CARRILHO, S.; MENDES, P. Áreas Verdes Urbanas: Uma Contribuição Aos Estudos Das Ilhas De Frescor. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, v. 6, n. 2, p. 101–120, 2015.

FIALA, D.; LOMAS, K. J.; STOHRER, M. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. **International Journal of Biometeorology**, v. 45, n. 3, p. 143–159, 2001.

FIALHO, E. S. Ilha de calor em cidade de pequeno porte : Caso de Viçosa, na Zona da Mata Mineira. p. 259, 2009.

FRANKE, J. et al. **Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment. Cost 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models**. [s.l: s.n.].

GAFFIN, S. R. et al. Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 94, n. 1–2, p. 1–11, 2008.

GARTLAND, L. **Heat Islands: Understanding and mitigating heat in urban areas**. [s.l: s.n.]. v. 9781849771

GEIGER, R.; ARON, R. H.; TODHUNTER, P. The Climate Near the Ground Fifth edition. [s.l: s.n.].

GIRIDHARAN, R.; LAU, S. S. Y.; GANESAN, S. Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 9, p. 964–971, 2005.

GIROLETTI, D. **A Industrialização de Juiz de Fora: 1850 a 1930**. [s.l.] Editora da Universidade Federal de Juiz de Fora, 1988.

GIVONI, B. Man, Climate and Architecture. Elsevier Publishing Company Limited: Amsterdam – London – New York, 1969.

GONG, F. Y. et al. Mapping sky, tree, and building view factors of street canyons in a high-density urban environment. **Building and Environment**, v. 134, p. 155–167, 2018.

HERRMANN, J.; MATZARAKIS, A. Mean radiant temperature in idealised urban canyons-examples from Freiburg, Germany. **International Journal of**

Biometeorology, v. 56, n. 1, p. 199–203, 2012.

HILLIER, B. & HANSON, J. The social logic of space. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

HÖPPE, P. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 661–665, 2002.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **No Title**. [s.l: s.n.].

IMAM SYAFII, N. et al. Thermal environment assessment around bodies of water in urban canyons: A scale model study. **Sustainable Cities and Society**, v. 34, n. January, p. 79–89, 2017.

IMRAN, H. M. et al. Impacts of future urban expansion on urban heat island effects during heatwave events in the city of Melbourne in southeast Australia. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 145, n. 723, p. 2586–2602, 2019.

IRVING, A.D. Validation of Dynamic Thermal Models, *Energy and Buildings* 10, ISSN 0378-7788, Lausanne, Switzerland. 213-220, 1988.

JAREEMIT, D.; SRIVANIT, M. Effect of Street Canyon Configurations and Orientations on Urban Wind Velocity in Bangkok Suburb Areas. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 690, n. 1, 2019.

JENDRITZKY, G.; MAAROUF, A.; STAIGER, H. Looking for a universal thermal climate index UTCI for outdoor applications. n. January 2001, p. 353–367, 2015.

JOHANSSON, E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. **Building and Environment**, v. 41, n. 10, p. 1326–1338, 2006.

JOHANSSON, E. et al. Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies - The need for standardization. **Urban Climate**, v. 10, n. P2, p. 346–366, 2014.

JUNQUEIRA, P. T. De cidade à centralidade: formação dos centros e o processo de descentralização nas cidades de médio porte. Estudo de caso: Juiz de Fora. 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado em Urbanismo) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

KASEB, Z. et al. A framework for pedestrian-level wind conditions improvement in

urban areas: *CFD* simulation and optimization. **Building and Environment**, v. 184, n. April, p. 107191, 2020.

KASTNER, P.; DOGAN, T. A cylindrical meshing methodology for annual urban computational fluid dynamics simulations. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 13, n. 1, p. 59–68, 2020.

KIM, S. W.; BROWN, R. D. Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. **Science of the Total Environment**, v. 779, 2021.

KITOUS, S.; BENSALÉM, R.; ADOLPHE, L. Airflow patterns within a complex urban topography under hot and dry climate in the Algerian Sahara. **Building and Environment**, v. 56, p. 162–175, 2012.

KÖPPEN W., 1900 : Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geogr. Zeitschrift*, 6, 657–679.

KOWALSKI, L. F. Influência do Albedo de Pavimentos no Campo Térmico de Cânios Urbanos: Estudo de Modelo em Escala Reduzida. [s.l: s.n.].

LAMBERTS, R. et al. Conforto e Stress Térmico. **Universidade Federal de Santa Catarina - Centro tecnológico - Departamento de Engenharia Civil**, p. 87, 2011.

LIMA, F. DE A. Métricas urbanas: Sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho. Tese, p. 236, 2017.

LOBACCARO, G.; ACERO, J. A. Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons. **Urban Climate**, v. 14, p. 251–267, 2015.

MACKEY, C. et al. Wind , Sun , Surface Temperature , and Heat Island : Critical Variables for High-Resolution Outdoor Thermal Comfort Payette Architects , United States of America Massachusetts Institute of Technology , United States of America University of Pennsylvania . **Proceedings of the 15th IBPSA Conference**, p. 985–993, 2017.

MATZARAKIS, A.; AMELUNG, B. Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. **Advances in Global Change Research**, v. 30, p. 161–172, 2008.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - Application of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**, v. 51, n. 4, p. 323–334, 2007.

MAYER, H.; HÖPPE, P. Thermal comfort of man in different urban environments. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 38, n. 1, p. 43–49, 1987.

MORINI, E. et al. Planning for cooler urban canyons: Comparative analysis of the influence of façades reflective properties on urban canyon thermal behavior. **Solar Energy**, v. 162, n. October 2017, p. 14–27, 2018.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. Teoria e clima urbano: um projeto e seus caminhos. In: Clima urbano[S.l: s.n.], 2003.

MONTENEGRO, Gildo A. Desenho Arquitetônico. 4a Edição. São Paulo: Blucher, 2001.

MONTENEGRO, N. CityPlan: Contributo para o desenvolvimento de uma metodologia e ferramenta computacional para apoio ao desenho urbano. 2015. 440 f. Tese (Doutorado em Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade de Lisboa, Lisboa. 2015.

MUNIZ-GÄAL, L. P. et al. Parâmetros urbanísticos e o conforto térmico de cânions urbanos: o exemplo de Campinas, SP. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 177–196, 2018.

MUNIZ-GÄAL, L. P. et al. Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate. **Building and Environment**, v. 169, p. 106547, 2020.

NABONI, E. et al. An overview of simulation tools for predicting the mean radiant temperature in an outdoor space. **Energy Procedia**, v. 122, p. 1111–1116, 2017.

NAKAMURA, Y.; OKE, T. R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. **Atmospheric Environment (1967)**, v. 22, n. 12, p. 2691–2700, 1988.

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L. DE; RODRIGUES, D. S. Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 3, p. 73–87, 2016.

NASROLLAHI, N.; SHOKRI, E. Daylight illuminance in urban environments for visual comfort and energy performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 861–874, 2016.

NASTOS, P. T.; MATZARAKIS, A. The effect of air temperature and human thermal indices on mortality in Athens, Greece. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, n. 3–4, p. 591–599, 2012.

NINCE, P. C. DO C. et al. Usos Dos Índices Pet E UtcI Na Avaliação Do Conforto Termal No Campus Da Ufmt Em Cuiabá-Mt. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 9, n. 9, p. 2026–2036, 2013.

NÓBREGA, R. S.; SANTOS, P. F. C. DOS; MOREIRA, E. B. M. Variação Diurna-Noturna Das Ilhas De Calor Na Cidade Do Recife – Pe. **XII SBCG, Goiais, Brasil**, p. 1718–1729, 2016.

NOURIAN, P., REZVANI, S., SARIYILDIZ, S., HOEVEN, F. Configurbanist: Urban Configuration Analysis for Walking and Cycling via Easiest Paths. In: 33rd eCAADe CONFERENCE, 2015. Viena, Áustria. Anais da 33ª Conferência eCAADe. Viena, Áustria: Universidade Técnica de Viena, 2015. 553-564.

NUNEZ, M.; OKE, T. R. Energy Balance of an Urban Canyon. **Journal of Applied Meteorology**, v. 16, n. 1, p. 11–19, 1977.

OECD (2021), Urban population by city size (indicator). doi: 10.1787/b4332f92-en (Accessed on 10 May 2021)

OLIVEIRA, Rodrigo Porto. Utilização de um aplicativo de simulação computacional na avaliação de desempenho térmico de protótipos de habitação de interesse social. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2010.

OKE, T. R., G. MILLS, A. C. E J. A. V. **Urban Climates**. [s.l: s.n.].

OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat Islands. **Atmosphere**, v. 14, n. 4, p. 268–277, 1976.

OKE, T. R. Canyon Geometry and the Urban Heat Island. **Journal of Climatology**, v. 1, p. 237–254, 1981.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1–24, 1982.

- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. Vancouver: Routledge, 1987.
- OLGYAY, V. **Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism: New and expanded edition****Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism: New and Expanded Edition**, 2015.
- PARK, S.; TULLER, S. E.; JO, M. Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for microclimatic analysis in urban thermal environments. **Landscape and Urban Planning**, v. 125, p. 146–155, 2014.
- PEARLMUTTER, D.; BITAN, A.; BERLINER, P. Microclimatic analysis of “compact” urban canyons in an arid zone. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 24–25, p. 4143–4150, 1999.
- PENG, S. L.; YE, Y. H. The influence of urban heat island on urban planning. **Zhongshan Daxue Xuebao/Acta Scientiarum Natralium Universitatis Sunyatseni**, v. 46, n. 5, p. 59–63, 2007.
- POMERANTZ, M. et al. The Effect of Pavements Temperatures On Air Temperatures in Large Cities. **Lbni**, p. 22, 2000.
- POTCHTER, O.; COHEN, P.; BITAN, A. Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. **International Journal of Climatology**, v. 26, n. 12, p. 1695–1711, 2006.
- PREFEITURA DE JUIZ DE FORA/MG, 1978. Síntese do Plano Geral de Transportes. Volume 1. Instituto de Pesquisa e Planejamento. 1978.
- PREFEITURA DE JUIZ DE FORA/MG, 1997. Síntese do Plano Diretor de Transportes Urbanos. Secretaria Municipal de Transportes.
- PREFEITURA DE JUIZ DE FORA/MG, 2004. Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Juiz de Fora. Juiz de Fora: FUNALFA Edições, 2004.
- PREFEITURA DE JUIZ DE FORA/MG, 2015. Disponível em: <http://www.pjf.mg.gov.br/noticias/anexo/Anexo%20Rio%20Branco%20-%20ok.pdf>
- RAHMAN, M. A. et al. Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* trees grown in urban conditions. **Building and Environment**, v. 114, p. 118–128, 2017.
- RAHMAN, M. A. et al. Vertical air temperature gradients under the shade of two

contrasting urban tree species during different types of summer days. **Science of the Total Environment**, v. 633, p. 100–111, 2018.

RAJAGOPALAN, P.; LIM, K. C.; JAMEI, E. Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city. **Solar Energy**, v. 107, p. 159–170, 2014.

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S.; SALEMI, T. The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 15, p. 89–102, 2016.

RIBEIRO, A. G. As escalas do clima. **Boletim de geografia teoretica**, v. 23, n. 45–46, p. 288–294, 1993.

ROCHA, L. M. V.; SOUZA, L. C. L.; CASTILHO, F. J. V. Ocupação do solo e ilha de calor noturna em avenidas marginais a um córrego urbano. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 3, p. 161–175, 2011.

RODRÍGUEZ ALGECIRAS, J. A.; GÓMEZ CONSUEGRA, L.; MATZARAKIS, A. Spatial-temporal study on the effects of urban street configurations on human thermal comfort in the world heritage city of Camagüey-Cuba. **Building and Environment**, v. 101, p. 85–101, 2016.

ROMERO, M. A. B. Principios bioclimaticos para o desenho urbano. 2001.

ROSSI, FLÁVIA OSAKU MINELLA; FRANCINE A. KRÜGER, E. L. Influência Do Fator De Visão Do Céu No Conforto Térmico Em Duas. v. 1, n. February 2018, p. 193–197, 2009.

ROSSI, F. A.; KRÜGER, E.; NIKOLOPOULOU, M. A influência da configuração urbana no microclima e na sensação térmica em ruas de pedestre de Curitiba , Paraná. **Ambiente Construído**, n. 1, p. 2–11, 2011.

SAILOR, D. J. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 2, p. 189–199, 2011.

SALATA, F. et al. Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. **Sustainable Cities and Society**, v. 26, p. 318–343, 2016.

SAMPAIO, J. C. Triângulo da memória de juiz de fora. 2010.

- SANTAMOURIS, M. et al. Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas - Design realization and results of the flisvos project. **Building and Environment**, v. 53, p. 128–136, 2012.
- SANTAMOURIS, M. et al. Urban heat island and overheating characteristics in Sydney, Australia. An analysis of multiyear measurements. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 5, 2017.
- SCHOEN, L. J. et al. Thermal environmental conditions for human occupancy. **ASHRAE Standard**, v. 2013, n. 55, 2013.
- SILVA, C. F. O Conforto Térmico De Cavidades Urbanas: Contexto Climático Do Distrito Federal. p. 193, 2013.
- SILVA, Francisco de Assis Gonçalves da. O vento como ferramenta no desenho do ambiente construído: Uma aplicação ao nordeste do Brasil. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo – FAU-USP, São Paulo, 1999.
- SOUZA, Léa Cristina Lucas de; TENTE, Cezar Mecozzi; GIUNTA, Mariene Benutti; NAKATA, Camila Mayumi. Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. *Ambiente Construído*, 2010.
- STEINECKE, K. Urban climatological studies in the Reykjavik subarctic environment, Iceland. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 24–25, p. 4157–4162, 1999.
- STINY, G. & GIPS, J. Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture. In *Information Processing 71*, 1460–1465. North-Holland Publishing Company, 1972.
- TAHA, H. et al. Residential cooling loads and the urban heat island-the effects of albedo. **Building and Environment**, v. 23, n. 4, p. 271–283, 1988.
- TAHA, H. Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 99–103, 1997.
- TAM, B. Y.; GOUGH, W. A.; MOHSIN, T. The impact of urbanization and the urban heat island effect on day to day temperature variation. **Urban Climate**, v. 12, p. 1–10, 2015.
- TARLEY FERREIRA NASCIMENTO, D.; JOSÉ DE OLIVEIRA, I. Análise Da Evolução Do Fenômeno De Ilhas De Calor No Município De Goiânia-Go (1986-2010). **Boletim**

Goiano de Geografia, v. 31, n. 2, p. 113–127, 2012.

TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. C. DE C. T. Ilhas de calor: representações espaciais de cidades de pequeno porte por meio de modelagem. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, v. 21, n. 1, p. 239, 2017.

TRINDADE AMORIN, M. Intensidade e forma da ilha de calor urbana em Presidente Prudente/SP: episódios de inverno. **Geosul**, v. 20, n. 39, p. 64–82, 2005.

TURNER, S. C. et al. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. **International Journal of Refrigeration**, v. 2, n. 1, p. 56–57, 1979.

VARDOULAKIS, S. et al. Modelling air quality in street canyons: A review. **Atmospheric Environment**, v. 37, n. 2, p. 155–182, 2003.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 3, p. 370–384, 2003.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V., Atmospheric science - an introductory survey, second edition, Academic Press, 483 pp. 2006.

YAMASHITA, S. Detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric tram-cars in metropolitan Tokyo. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 3, p. 429–435, 1996.

YANG, J.; WANG, Z. H.; KALOUSH, K. E. Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a “silver bullet” for mitigating urban heat island? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 830–843, 2015.

ZHANG, K. et al. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai, China. **Environmental monitoring and assessment**, v. 169, n. 1–4, p. 101–112, 2010.