



**ILHAS DE CALOR URBANAS NA “CIDADE VERDE”:
MITIGAÇÃO DE ZONAS DE CALOR NO RESIDENCIAL
PARQUE BRASIL, EM TERESINA-PI**

Ylana Leal Melo de Oliveira

PPG-FAU/UnB
2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

YLANA LEAL MELO DE OLIVEIRA

**ILHAS DE CALOR URBANAS NA “CIDADE VERDE”: MITIGAÇÃO DE ZONAS DE
CALOR NO RESIDENCIAL PARQUE BRASIL, EM TERESINA-PI**

ORIENTADORA: Profa. Dra. Marta Adriana Bustos Romero
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Brasília
2023

**FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

**ILHAS DE CALOR URBANAS NA “CIDADE VERDE”: MITIGAÇÃO DE ZONAS DE
CALOR NO RESIDENCIAL PARQUE BRASIL, EM TERESINA-PI**

YLANA LEAL MELO DE OLIVEIRA

Dissertação de mestrado submetida ao programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

APROVADA POR:

Prof.^a Dra. Marta Adriana Bustos Romero (FAU/UnB)
(Orientadora)

Prof. Dr. Caio Frederico e Silva (FAU/UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Dr. José Marcelo Martins Medeiros (UFT)
(Examinador Externo)

Prof.^a Dra. Ana Carolina Cordeiro Correia Lima (FAU/UnB)
(Suplente)

BRASÍLIA/DF, 22 DE AGOSTO DE 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

L048i Leal Melo de Oliveira, Ylana Ilhas de calor urbanas na “cidade verde”: mitigação de zonas de calor no residencial Parque Brasil, em Teresina-PI / Ylana Leal Melo de Oliveira; orientador Marta Adriana Bustos Romero. -- Brasília, 2023. 131 p.

Dissertação(Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) -- Universidade de Brasília, 2023.

- | | |
|--------------------------|------------------------------|
| 1. Ilha de Calor Urbana. | 2. Arquitetura Bioclimática. |
| 3. ENVI-met. | 4. Pavimentos brandos. |
| 5. Vegetação. | |

I. Adriana Bustos Romero, Marta, orient.	II. Título.
--	-------------

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, Y. L. M. de. (2023). Ilhas de calor urbanas na “cidade verde”: mitigação de zonas de calor no residencial Parque Brasil, em Teresina-PI. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 133 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ylana Leal Melo de Oliveira

TÍTULO: Ilhas de calor urbanas na “cidade verde”: mitigação de zonas de calor no residencial Parque Brasil, em Teresina-PI.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta qualificação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Ylana Leal Melo de Oliveira

SQSW 304, Bloco C

CEP: 70.673-403 Brasília – DF - Brasil

E-mail: ylanalmo@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Leda e Hildebaldo, meus maiores incentivadores, por todo o amor e por nunca deixarem de acreditar e investir em mim e no meu futuro.

Às minhas irmãs, Lara e Bruna, pela amizade e apoio incondicional em todos os momentos.

À minha avó Telde, minha inspiração e referência, pelas correções que enriqueceram a ortografia dessa dissertação.

À minha orientadora, Professora Marta Romero, pela paciência, apoio e por todas as trocas e conhecimentos proporcionados.

Ao Professor Caio, pela ajuda com o ENVI-met e pela experiência enriquecedora no estágio docente.

À Tia Christiane, Tia Helen, Tio Júnior e Raissa, que me acolheram e tornaram a mudança para Brasília mais fácil e leve.

Por fim, agradeço aos colegas, professores e funcionários do PPG/FAU da UnB e do LaSUS, que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta desafiadora etapa. À CAPES, que proporcionou a Bolsa de Auxílio à Pesquisa.

RESUMO

A crescente expansão urbana produz impactos na paisagem natural e afeta a qualidade ambiental e de vida da população. A ação antrópica é responsável pela supressão da vegetação e impermeabilização dos solos, ocasionando aumento de temperatura e a tendência a contribuir para a criação do fenômeno das Ilhas de Calor. Esta pesquisa trata da qualidade ambiental dos espaços públicos e da mitigação desses efeitos na escala microclimática, destacando-se como objeto de estudo os espaços públicos de conjuntos habitacionais. Nesse contexto, a cidade de Teresina, Piauí, insere-se na discussão devido às suas elevadas temperaturas e à intensa implantação de conjuntos habitacionais ao longo da sua história. O trabalho tem como objetivo principal contribuir para o estudo da adaptação de zonas de calor nos espaços públicos de conjuntos habitacionais da cidade de Teresina, de forma a incentivar a criação de espaços de maior qualidade e conforto para a população mais vulnerável e visa contribuir com a paisagem urbana das cidades e construir centros urbanos mais sustentáveis, resilientes e que promovam o bem-estar e qualidade de vida. Para tanto se discutem os conceitos acerca do clima urbano, a ação antrópica e a influência da morfologia no microclima urbano. Posteriormente, apresentou-se o histórico e a caracterização climática de Teresina, além do conceito de arquitetura bioclimática do espaço público, com enfoque nos conjuntos habitacionais e nas estratégias para adaptar as zonas de calor com o uso de pavimentos brandos e vegetação. Em seguida, foi realizada a escolha do objeto de estudo através de uso de geoprocessamento, definindo-se como estudo de caso o Residencial Parque Brasil, onde foram aplicadas fichas bioclimáticas para uma análise mais aprofundada da área. Por fim, foi realizada a simulação computacional com o software ENVI-met 5.1.1 em dois pontos definidos do objeto de estudo, e em três cenários distintos, com o uso de pavimentos brandos e vegetação, a partir de onde foram extraídos os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, temperatura de superfície e temperatura média radiante. Os resultados mostraram a eficácia das estratégias bioclimáticas na melhoria do microclima, com reduções pontuais de até 1,1°C na temperatura do ar, de 14,7°C na temperatura de superfície e aumento de 3,9% na umidade do ar. O estudo mostrou ainda a importância do índice de temperatura média radiante e que o cenário que aliou as estratégias de pavimentos brandos e vegetação foi o mais efetivo. Os resultados obtidos foram elencados em diretrizes para incentivar a criação de espaços públicos com conforto térmico e qualidade em empreendimentos de interesse social.

Palavras-chave: Ilha de calor urbana; Arquitetura bioclimática; ENVI-met; Pavimentos brandos; Vegetação.

ABSTRACT

The urban expansion impacts the natural landscape and affects the environmental quality and life of the population. Anthropogenic action is responsible for the suppression of vegetation and soil sealing, causing an increase in temperature and a tendency to contribute to the phenomenon of Heat Islands. This research deals with the environmental quality of public spaces and the mitigation of these effects on a microclimatic scale, highlighting the public spaces of housing developments as the object of study. In this context, the city of Teresina, Piauí, is part of the discussion due to its high temperatures and the intense implementation of housing developments throughout its history. The main objective of this work is to contribute to the study of the adaptation of heat zones in public spaces of housing complexes in the city of Teresina, to encourage the creation of spaces of greater quality and comfort for the most vulnerable population and aims to contribute to the urban landscape of cities and build more sustainable, resilient urban centers that promote well-being and quality of life. To achieve this, concepts about urban climate, anthropic action, and the influence of morphology on the urban microclimate are discussed. Subsequently, the history and climate characterization of Teresina were presented, in addition to the concept of bioclimatic architecture of the public space, with a focus on housing complexes and strategies to adapt heat zones with the use of cool pavements and vegetation. Then, the selection of the object of study was made through geoprocessing, defining Residencial Parque Brasil as a case study, where bioclimatic sheets were applied for a more in-depth analysis of the area. Finally, a computer simulation was carried out with the ENVI-met 5.1.1 software at two selected points of the object of study, and in three different scenarios, using cool pavements and vegetation, from which were extracted the data of air temperature, relative air humidity, surface temperature and mean radiant temperature. The results showed the effectiveness of bioclimatic strategies in improving the microclimate, with punctual reductions of up to 1.1°C in air temperature, 14.7°C in surface temperature and a 3.9% increase in air humidity. The study also showed the importance of the mean radiant temperature index and that the scenario that combined cool pavements and vegetation strategies was the most effective. The results obtained were listed in guidelines to encourage the creation of public spaces in social interest projects with higher quality.

Keywords: Urban heat island; Bioclimatic architecture; ENVI-met; Cool pavement; Vegetation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Residencial Parque Brasil (esq. superior), Residencial Jacinta Andrade (esq. Inferior) e localização do Residencial Parque Brasil (dir.).....	5
Figura 2. Esquema das escalas verticais e horizontais.....	15
Figura 3. Escalas verticais.....	16
Figura 4. Variação de temperatura entre o meio urbano e rural.....	19
Figura 5. Altura, Largura e Comprimento do cânion.....	25
Figura 6. Volume de ar contido no cânion urbano.....	25
Figura 7. Incidência solar para diferentes H/W.....	26
Figura 8. Perfil do vento em diferentes ambientes, a partir da influência do tipo de rugosidade.....	30
Figura 9. Permeabilidade do vento conforme a altura e a porosidade do obstáculo.....	31
Figura 10. Balanço de energia no pavimento.....	35
Figura 11. Refletância solar dos pavimentos convencionais de acordo com o tempo.....	35
Figura 12. Pavimentos de concreto pintados com diferentes cores.....	37
Figura 13. Pavimento retro-refletivo.....	38
Figura 14. Diferentes tipos de pavimentos permeáveis: da esquerda para direita, de concreto poroso, blocos intertravados Octabrick, blocos vazados de concreto e blocos de concreto Rima.....	41
Figura 15. Tipos de revestimento de pavimentos permeáveis.....	42
Figura 16. Disposição e densidade da estrutura vegetal para classificação da estrutura arbórea.....	45
Figura 17. Medição de Temperaturas de superfície no espaço urbano.....	48
Figura 18. Efeitos da barreira vegetal na ventilação.....	50
Figura 19. Mapa de localização da área urbana de Teresina.....	58
Figura 20. Mapa datado de 1855, inauguração da cidade de Teresina.....	59
Figura 21. Praças no mapa do Plano Saraiva. 1 Praça Marechal Deodoro da Fonseca; 2 Praça Rio Branco; 3 Praça Pedro II; 4 Praça da Liberdade; 5 Praça Saraiva; 6 Praça João Luiz Ferreira; 7 Praça Landri Sales.....	60

Figura 22. Mapa de Teresina com a marcação dos conjuntos habitacionais construídos na cidade.....	62
Figura 23. Mapa de Teresina com região subzona norte 02 em destaque.....	68
Figura 24. Mapas da temperatura de superfície para os anos de 1991 e 2021.	69
Figura 25. Mapas do índice NDVI para os anos de 1991 e 2021.	70
Figura 26. Localização dos pontos analisados na subzona Norte 02.....	72
Figura 27. Localização do Residencial Parque Brasil, zona norte e do PLN.	75
Figura 28. Áreas de intervenção do programa.	76
Figura 29. Zoneamento do Residencial Parque Brasil.	77
Figura 30. Tipologias Residencial Parque Brasil.....	78
Figura 31. Tipologia dos lotes.....	78
Figura 32. Plano urbanístico proposto em agosto de 2014.....	80
Figura 33. Plano urbanístico Residencial Parque Brasil em março de 2019.....	80
Figura 34. Imagem de satélite de 2022.....	80
Figura 35.Áreas verdes do Residencial Parque Brasil.	81
Figura 36. Ausência de arborização nas vias.....	82
Figura 37. O entorno, a base e a superfície fronteira.	83
Figura 38. Localização Ponto de Análise 01.	85
Figura 39. Ponto de análise 01 - R.03, em frente à Área Verde 06 - sentido Leste....	86
Figura 40. Ponto de análise 01 - R.03, em frente à Área Verde 06 - sentido Oeste. ...	86
Figura 41. Área Verde no Ponto 1.....	86
Figura 42. Localização Ponto de Análise 02.....	88
Figura 43. Ponto de análise 02 - R.21.....	88
Figura 44. Ponto de análise 02 - R.21.....	89
Figura 45. Edifícios no ponto 02.	89
Figura 46. Processo de simulação no ENVI-met.....	93
Figura 47. Aba de modelagem - SPACES.....	94
Figura 48. Aba dos dados climáticos - ENVI-guide.....	96
Figura 49. Perfil LAD proposto para a espécie arbórea Licania Tomentosa.....	100
Figura 50. Aba do Leonardo.....	100
Figura 51. Mapas de distribuição da temperatura do ar referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 1.....	104
Figura 52. Corte dos mapas de temperatura do ar para o ponto 1 às 15h nos cenários simulados.....	105

Figura 53. Mapas de distribuição da temperatura do ar referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 1.....	106
Figura 54. Mapas de distribuição da temperatura de superfície referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 1.....	108
Figura 55. Mapas de distribuição da temperatura média radiante referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 1.	109
Figura 56. Mapas de distribuição da temperatura do ar referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 2.....	111
Figura 57. Corte dos mapas de temperatura do ar para o ponto 2 às 15h nos cenários simulados.....	111
Figura 58. Mapas de distribuição da umidade relativa do ar referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 2.....	113
Figura 59. Mapas de distribuição da temperatura de superfície referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 2.....	114
Figura 60. Mapas de distribuição da temperatura média radiante referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 2.	115

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Etapas metodológicas.....	7
Quadro 2. Imagens e sensores remotos utilizados na análise.....	8
Quadro 3. Etapas metodológicas da simulação computacional.....	9
Quadro 4. Escalas climáticas horizontais.....	17
Quadro 5. Configuração do clima.....	18
Quadro 6. Características que contribuem para a formação das ilhas de calor e aumento do balanço energético.....	21
Quadro 7. Tipos e definições das Zonas Climáticas Locais.....	23
Quadro 8. Fatores e elementos climáticos em Teresina-PI.....	66
Quadro 9. Pontos de incidência de maiores TST e NDVI.....	71
Quadro 10. Pontos analisados.....	73
Quadro 11. Ficha Bioclimática.....	84
Quadro 12. Ficha Bioclimática - Ponto 1.....	87
Quadro 13. Ficha Bioclimática - Ponto 2.....	90
Quadro 14. Cenário original simplificado e levantamento dos materiais de superfície.....	95
Quadro 15. Modelagem dos cenários propostos.....	97
Quadro 16. Diretrizes propostas.....	117

LISTA DE TABELAS

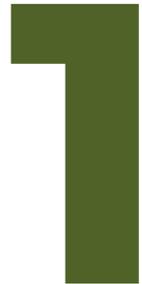
Tabela 1. Albedo e Emissividade de Superfícies Seleccionadas.....	28
Tabela 2. Albedo de diferentes tipos de pavimentos.....	36
Tabela 3. Tipos de pavimentos com alta refletância - PAR.....	39
Tabela 4. Diferenças entre áreas verdes e áreas não plantadas.	45
Tabela 5. Princípios climáticos e morfológicos para o desenho urbano.....	55
Tabela 6. Crescimento Populacional em Teresina.....	61
Tabela 7. Estudos no ENVI-met.	93
Tabela 8. Configurações de entrada no ENVI-met.	94
Tabela 9. Dados climáticos inseridos no software.	97
Tabela 10. Dados gerais - C0.....	98
Tabela 11. Dados gerais - C1.	99
Tabela 12. Dados gerais - C2.	99
Tabela 13. Resumo das diferenças médias de temperatura simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.....	103
Tabela 14. Resumo das diferenças médias de umidade relativa do ar simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.....	105
Tabela 15. Resumo das diferenças médias de temperatura de superfície simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.....	107
Tabela 16. Resumo das diferenças médias de temperatura média radiante simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.....	108
Tabela 17. Resumo das diferenças médias de temperatura do ar simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.....	110
Tabela 18. Resumo das diferenças médias de umidade relativa do ar simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.....	112
Tabela 19. Resumo das diferenças médias de temperatura de superfície simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.....	113
Tabela 20. Resumo das diferenças médias de temperatura média radiante simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.....	115

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo Geral.....	6
1.2.2 Objetivos Específicos.....	6
1.3 Procedimentos Metodológicos.....	7
2. FORMA URBANA E DESEMPENHO CLIMÁTICO	11
2.1 Clima Urbano: contexto e definições.....	12
2.1.1 Escalas de análise do clima urbano	15
2.1.2 Fatores e elementos do clima	17
2.2 Balanço de energia e Ilhas de Calor Urbanas.....	18
2.3 Morfologia e microclima urbano.....	22
2.3.1 Radiação solar e temperatura do ar.....	24
2.3.2 Ventilação urbana	29
3. ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA DO ESPAÇO PÚBLICO	32
3.1 Uso de pavimentos brandos para a adaptação de ICU.....	34
3.1.1 Tipos de pavimentos brandos	37
3.2 Vegetação no microclima urbano.....	43
3.2.1 Temperatura e Umidade do ar	47
3.2.2 Ventilação urbana	49
3.2.3 Ruídos e Poluição do ar	51
3.3 Arquitetura Bioclimática em Conjuntos Habitacionais	52
4. TERESINA: HISTÓRICO E ASPECTOS CLIMÁTICOS	57
4.1 Breve histórico e panorama habitacional.....	58
4.2 Caracterização climática.....	63

5. ZONAS DE CALOR EM TERESINA: ESCOLHA DO OBJETO DE ESTUDO	67
6. ANÁLISE BIOCLIMÁTICA: RESIDENCIAL PARQUE BRASIL	74
6.1 Ficha bioclimática.....	82
a) Ponto 1 – Rua 03.....	85
b) Ponto 2 – Rua 21.....	88
7. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	91
7.1 ENVI-met	92
7.2 Simulação computacional.....	93
7.2.1 Modelagem.....	94
7.2.2 Dados climáticos.....	96
7.2.3 Cenários hipotéticos	97
7.3 Extração e Análise dos Dados.....	100
7.4 Validação dos dados	100
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	102
8.1 Ponto 1 - P1.....	103
8.1.1 Temperatura do ar	103
8.1.2 Umidade relativa do ar.....	105
8.1.3 Temperatura de superfície	107
8.1.4 Temperatura média radiante	108
8.2 Ponto 2 - P2	110
8.2.1 Temperatura do ar	110
8.2.2 Umidade relativa do ar.....	112
8.2.3 Temperatura de superfície	113
8.2.4 Temperatura média radiante	114
8.3 Discussões.....	116

8.4 Diretrizes bioclimáticas para conjuntos habitacionais em Teresina	117
9. CONCLUSÕES	119
9.1 Limitações do trabalho	122
9.2 Perspectivas para trabalhos futuros.....	122



1. INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico, sem o devido planejamento urbano e ambiental, gera uma pressão cada vez maior na capacidade de suporte das cidades e ocasiona diversos problemas na qualidade do ambiente urbano. Este crescimento está relacionado ao processo de urbanização, responsável pelas modificações da paisagem natural e alterações no clima urbano. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2022a e 2022b), a população mundial atingiu a marca de 8 bilhões de habitantes em 2022, e deste total, 68% deverá habitar as cidades até 2050, segundo estimativas. No Brasil, mais de 84% da população brasileira vive em áreas urbanas (IBGE, 2015).

O impacto do homem na paisagem natural é uma questão multidisciplinar debatida em âmbito mundial, desde o estabelecimento de uma nova era geológica, o Antropoceno¹, ao aquecimento global e suas consequências (CAMPOS, 2018). As atividades humanas se configuram como um dos principais agentes de aceleração das alterações climáticas, responsáveis pela modificação do clima urbano em diversas dimensões, a partir da impermeabilização do solo natural, poluição atmosférica, geometria urbana e supressão da cobertura vegetal, que alteram os regimes de chuvas, o fluxo de ventos e a temperatura (CHU, LIN e CHIUEH, 2017; ROMERO, 2015).

Nesta discussão, os processos de urbanização têm um profundo impacto na superfície e uso do solo. A substituição da cobertura vegetal por materiais impermeáveis, que alteram as taxas de infiltração e evapotranspiração, ou materiais de alta absorção, que absorvem e armazenam o calor e a radiação, aliados às condicionantes climáticas e poluição, que alteram as condições microclimáticas e hídricas, ocasionam problemas socioambientais urbanos (GARTLAND, 2010; FERREIRA, 2019).

Desta forma, as áreas urbanas costumam apresentar temperaturas mais elevadas em relação às áreas rurais, configurando o fenômeno das Ilhas de Calor Urbanas (ICU). As ICU's impactam diretamente na qualidade de vida urbana, que está, em grande parte, relacionada à sensação de conforto térmico do indivíduo e é mais intensa em locais com maior grau de urbanização (SOBRAL, 2005).

Observa-se atualmente um aumento na incidência de eventos climáticos extremos nas cidades, como enchentes e zonas de calor. Geralmente, estes eventos acometem a parcela da população mais vulnerável e que menos contribui para as mudanças do clima e mostram a importância do entendimento e estudo do clima urbano e suas mudanças, na escala do microclima, para incentivar e subsidiar um planejamento urbano mais justo e adequado ambientalmente para toda a população.

Destaca-se que o intenso crescimento populacional, de forma geral, não foi acompanhado pela oferta de moradias, infraestrutura e serviços urbanos, o que aumentou o déficit habitacional e implicou ocupações de áreas de risco e periferias

¹ O termo Antropoceno é usado para designar a época geológica atual, marcada pela forte influência antropogênica nos sistemas terrestres, ou seja, a época do homem, onde seus efeitos estariam afetando o planeta de forma global, a partir das mudanças climáticas, modificações do uso do solo e extinção de espécies naturais. Teve o seu início nos finais do século XVIII, que coincide com o aumento nas concentrações de CO₂ e CH₄, e, também, com a invenção da máquina a vapor, em 1784.

das cidades. Como estratégia para solucionar o problema, o governo em diversos âmbitos, incentivou a construção de moradias e conjuntos habitacionais nas demais cidades do país. Entretanto, observa-se que esses espaços foram construídos sem qualidade ambiental, tanto na escala do edifício, quanto nos seus espaços públicos.

Nesse contexto, a arquitetura bioclimática do espaço público se insere nas discussões acerca das mudanças climáticas, sustentabilidade, adaptação e mitigação de seus efeitos no espaço urbano, e tem como objetivo a produção de espaços públicos orientados e adaptados às condicionantes do local, e desta forma, mais resilientes às ações antrópicas, além de proporcionar conforto térmico para a população e conseqüente melhoria na qualidade de vida.

Diversos estudos têm como enfoque a análise do microclima de espaços externos e a busca por soluções para mitigar e adaptar as alterações climáticas. Dentre as principais soluções utilizadas, destaca-se a importância das áreas verdes urbanas (LOMBARDO, 1985; TORRE, 1999; BUENO-BARTHOLOMEI, LABAKI e SANTOS, 1999; SHINZATO, 2009; SILVA, 2009; LABAKI et al., 2011; ABREU, 2012; ROMERO, 2013; MINELLA, 2014; ABOELATA e SODOUDI, 2019; SILVA, 2020) e o uso de pavimentos frios e brandos (GARTLAND, 2010; AKBARI et al., 2016; KYRIAKODIS e SANTAMOURIS, 2018; WERNECK, 2018; MARUYAMA, 2020) para a adaptação do microclima e melhoria do conforto térmico e qualidade de vida nas cidades.

O presente estudo se limita a discutir e analisar as zonas de calor da cidade de Teresina, relacionadas à expansão urbana, com enfoque na escala do microclima dos espaços externos do conjunto habitacional Residencial Parque Brasil, do Programa Minha Casa Minha Vida, localizado no bairro Parque Brasil, em Teresina-PI, de forma a avaliar a qualidade ambiental do espaço e propor medidas para adaptação às altas temperaturas a partir do uso de pavimentos brandos e vegetação. A pesquisa busca ainda contribuir para o estudo do microclima em Teresina e incentivar a criação de espaços públicos com maior conforto e bioclimaticamente orientados para a população mais vulnerável.

1.1 Justificativa

Observa-se que os espaços urbanos estão crescendo cada vez mais sem a devida preocupação com as questões bioclimáticas que atuam para minimizar os

efeitos das ilhas de calor urbanas. Os novos bairros residenciais têm sido construídos sem levar em consideração a importância da arborização e dos materiais urbanos para o conforto ambiental e qualidade de vida da população.

Um exemplo disso são os projetos urbanos de habitação de interesse social, como o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), que modifica grandes áreas da paisagem natural, para a construção de moradias padronizadas, com uso de materiais de baixo custo e reprodução das tipologias em diversos tipos de clima. Desta forma, a população mais vulnerável tende a ocupar espaços sem a devida qualidade ambiental e de vida. É necessário repensar os materiais urbanos desses projetos, e a importância da arborização como aliada à adaptação dos efeitos das zonas de calor em climas tropicais.

Nesse contexto, a cidade de Teresina, capital do Piauí, ostenta o já ultrapassado título de “Cidade Verde”², devido à sua outrora arborização. A capital é conhecida por suas altas temperaturas, que frequentemente ultrapassam os 40°C, e que, segundo Andrade (2000, p.185), exercem influência sobre “os costumes, na cultura e, conseqüentemente, sobre a paisagem”. Além disso, as condições climáticas distanciam a população dos espaços públicos da cidade, uma vez que as atividades ao ar livre são realizadas em períodos específicos do dia, em busca de temperaturas mais agradáveis e, ao se deslocar durante o dia, a população prefere frequentar espaços fechados, que oferecem condições artificiais de conforto térmico.

Medeiros (2019) realizou uma análise térmica temporal da cidade de Teresina entre os anos de 1977-2016 e constatou que, quanto à sensação térmica máxima no período verificado, o estado de emergência médica foi classificado como 6, de acordo com Giles et al. (1990 apud MEDEIROS, 2019), considerado desconforto fortíssimo e perigoso. A situação reforça os cuidados e hábitos da população teresinense à exposição ao sol, através do uso de métodos para amenizar a intensa radiação solar, como guarda-sol, filtros solares e uso de roupas leves.

Entretanto, observa-se que o intenso crescimento e a expansão horizontal vêm modificando cada vez mais a paisagem e minimizando a cobertura vegetal em Teresina (ABREU et al., 2012), o que agrava a situação de desconforto térmico nos

² A cidade ganhou o título, que perdura até os dias atuais e está presente em seu hino e na identidade popular, em 1899, em uma visita do poeta Coelho Neto que, ao sobrevoar a capital, atribuiu de forma equivocada a vegetação dos quintais e terrenos à paisagem urbana à época (BUENO e COSTA, 2016).

espaços urbanos e diminui a qualidade de vida de seus habitantes. O título de “Cidade Verde” vem perdendo cada vez mais espaço para as superfícies impermeáveis, verticalização e grandes vazios urbanos.

A supressão da cobertura vegetal da cidade está diretamente relacionada à expansão urbana e vem aumentando gradativamente (MACHADO, PEREIRA E ANDRADE, 2010; LIMA, LOPES E FAÇANHA, 2021; LIMA, 2020). Tal cenário está fortemente relacionado à expansão do perímetro urbano de Teresina, que foi marcada pela construção de conjuntos habitacionais, feita sem uma legislação específica, desde a década de 1960.

Segundo Lima e Viana (2019), a política nacional de habitação teve bastante influência na expansão da cidade, cujas intervenções reconfiguraram o espaço urbano nas mais diversas regiões urbanas. Observa-se que boa parte dos conjuntos habitacionais foram construídos sem preocupações ambientais, resultado de uma extensa expansão horizontal, e sem a arborização devida, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1. Residencial Parque Brasil (esq. superior), Residencial Jacinta Andrade (esq. Inferior) e localização do Residencial Parque Brasil (dir.).



Fonte: PIAUILINO (2020), MEIO NORTE (2015, p.1) e Adaptado de Google Earth (2023).

Levando em conta a relação entre o uso inadequado de materiais urbanos e a ausência de vegetação nos conjuntos habitacionais com a expansão de Teresina e

suas variáveis climáticas, sente-se necessidade de um planejamento urbano orientado às suas condicionantes locais e à implantação de medidas para a adaptação das zonas de calor, especialmente nas áreas mais vulneráveis.

Esta dissertação utiliza como contexto a cidade de Teresina – PI, com delimitação do objeto de estudo o Residencial Parque Brasil (Figura 1). O estudo destaca a importância da arquitetura bioclimática do espaço público, segundo os conceitos de Romero (2013 e 2015), e do uso de vegetação e pavimentos brandos para o conforto térmico nesses ambientes, e faz parte das pesquisas do grupo de pesquisa registrado no CNPq A Sustentabilidade em Arquitetura e Urbanismo do Diretório do CNPq e do Laboratório de Sustentabilidade aplicada à Arquitetura e Urbanismo (LaSUS da FAU/UnB), nas temáticas relativas às mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas, entre os quais destacam-se as dissertações de Silveira (2007), Silva (2009), Vianna (2018), Werneck (2018), López (2020) e Andrade (2022).

Esses estudos analisaram as relações entre a vegetação, materiais urbanos, ilhas de calor e o microclima urbano no espaço público e comprovaram a importância da vegetação e de estratégias como o uso de pavimentos brandos para o conforto térmico. Como forma de complementar os estudos, essa dissertação busca avaliar a eficácia da arborização e o uso de pavimentos brandos na melhoria do microclima urbano em espaços públicos, a partir do estudo do Residencial Parque Brasil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é contribuir para o estudo da adaptação de zonas de calor e conforto térmico ambiental na cidade de Teresina e de cidades que apresentem condições climáticas similares, tendo como objeto de estudo os espaços públicos de conjuntos habitacionais.

1.2.2 Objetivos Específicos

- I. Realizar levantamento teórico acerca dos conceitos trabalhados nesta dissertação, como clima urbano e arquitetura bioclimática do espaço público;
- II. Estudar e mapear as zonas de calor na subzona Norte 02 em Teresina, através do uso de sensoriamento remoto e geoprocessamento;

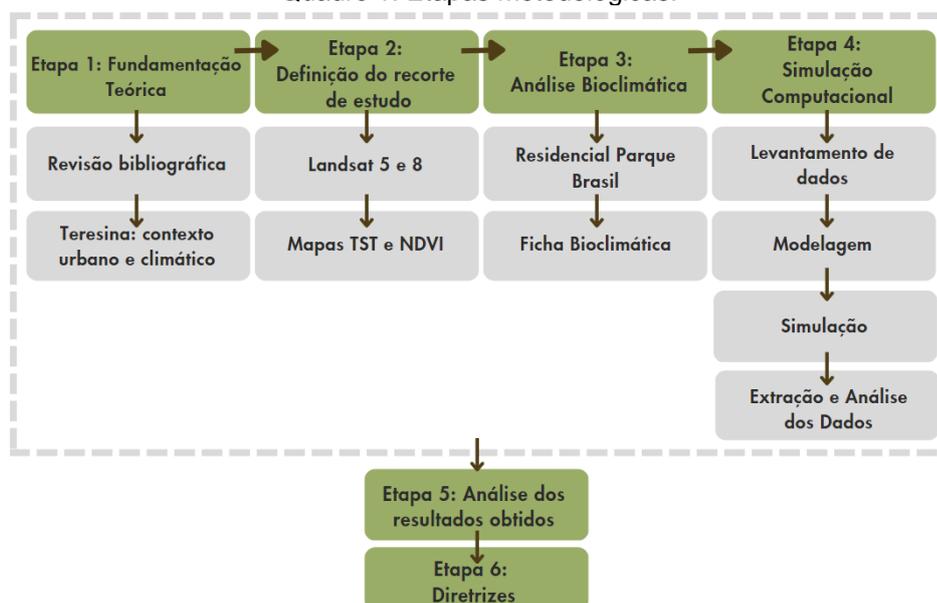
- III. Analisar a adoção de pavimentos brandos e o acréscimo de vegetação na diminuição da temperatura e desconforto térmico na área de estudo, através de simulação computacional;
- IV. Propor diretrizes para a adaptação das zonas de calor nos espaços públicos de conjuntos habitacionais em Teresina-PI.

1.3 Procedimentos Metodológicos

O método do estudo divide-se em cinco etapas, ilustradas no Quadro 1. A primeira etapa refere-se à fundamentação teórica do trabalho, com a exposição do problema e justificativa; apresentação dos conceitos trabalhados, como clima urbano, morfologia urbana e arquitetura bioclimática do espaço público; além do contexto urbano e climático da cidade de Teresina.

A segunda etapa refere-se à escolha do recorte para o estudo. Nesta etapa, foi realizada uma análise histórico-temporal da subzona Norte 02 de Teresina, através de sensoriamento remoto e geoprocessamento e dividiu-se em quatro passos: a) obtenção dos arquivos matriciais; b) processamento das imagens; c) elaboração dos mapas e d) análise dos resultados obtidos. No primeiro passo, foram adquiridos os dados matriciais gratuitos dos satélites Landsat 5 e Landsat 8, através do site do United States Geological Survey – USGS, disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

Quadro 1. Etapas metodológicas.



Fonte: Autora (2023).

Para a imagem obtida do satélite Landsat 5 (órbita 219, ponto 64, datada de 05 de setembro de 1991, às 12h23), foram utilizadas as bandas 3, 4 e 6; e para o Landsat 8 (órbita 219, ponto 63, datada de 07 de setembro de 2021, às 12h59), foram utilizadas as bandas 4, 5 e 10. A partir do processamento das imagens, foram gerados dois mapas para cada ano analisado, 1991 e 2021: mapa da temperatura da superfície e mapa do índice NDVI. As características das imagens e dos sensores utilizados estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2. Imagens e sensores remotos utilizados na análise.

Data	Sensor/Satélite	Bandas	Resolução espacial
05/09/1991	TM/Landsat 5	3, 4 e 6 (termal)	30 m (bandas 3 e 4); 120 m (banda 6)
07/09/2021	OLI/TIRS/ Landsat 8	4, 5 e 10 (termal)	30 m (bandas 4 e 5); 100 m (banda 10)

Fonte: Autora (2022).

No segundo passo, as imagens obtidas foram processadas no *software* livre QGIS 2.8.9, com o auxílio de complementos. Inicialmente, foi realizada a correção atmosférica simples (DOS1) nas bandas 3 e 4 do Landsat 5 e bandas 4 e 5 do Landsat 8, através do plugin *Semi-Automatic Classification Plugin* (CONGEDO, 2018).

No terceiro passo, os índices de Temperatura de Superfície Terrestre (TST) e de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foram calculados a partir do complemento *Land Surface Temperature*. O *plugin* fornece os algoritmos necessários para as análises, como a conversão de números digitais (ND) em radiância; a conversão da radiância em reflectância; o cálculo do NDVI; a emissividade de superfície; e a extração da TST. Dentre as variáveis oferecidas no complemento, quanto à emissividade, foi utilizado o algoritmo com base no NDVI ("Zang, Wang etal's LSE algorithm") e, para o cálculo de TST, utilizou-se o algoritmo de Planck.

Por fim, o *plugin* gerou os mapas de TST e NDVI para os anos de 1991 e 2021, que foram modificados, com utilização de falsa-cor com as cores categorizadas, para um melhor entendimento dos dados. A análise dos resultados está apresentada no tópico da escolha do objeto de estudo e possibilitou a seleção da área de recorte do presente estudo.

O uso de sensoriamento remoto permite o geoprocessamento de imagens e sobreposição de informações, possibilitando uma análise evolutiva da supressão da

cobertura vegetal e do aumento das zonas de calor nas cidades. Diversos estudos abordam o uso do sensoriamento remoto para a análise de zonas de calor: Vianna e Romero (2015), Vianna (2018), Faria e Romero (2019), Werneck, Azevedo e Romero (2019) e López (2020). Em Teresina, destacam-se as análises espaço-temporais para o estudo das consequências da urbanização na temperatura de Feitosa et al., (2011), Monteiro e Silveira (2012), Sousa et al. (2015) e Almeida Júnior, Simões e Morais (2019).

Em seguida, na terceira etapa metodológica, foi realizada uma análise bioclimática do recorte escolhido, com a aplicação de ficha bioclimática baseada na metodologia desenvolvida por Romero (2015). O seu preenchimento foi feito a partir de visitas *in loco* na área de estudo e através de documentos obtidos nos órgãos públicos responsáveis. A ficha bioclimática é composta por uma análise discursiva e outra gráfica, o que permite uma maior apreciação e compreensão dos elementos essenciais do espaço analisado.

A quarta etapa seguiu o protocolo desenvolvido por Silva, Silva e Santo (2018) e Silva et al. (2022) para simulação computacional com o *software* ENVI-met. Foi utilizada a versão 5.1.1, adaptada às variáveis de Teresina-PI e dividida em quatro etapas: a) levantamento de dados; b) modelagem; c) simulação e d) extração dos dados (Quadro 3).

Quadro 3. Etapas metodológicas da simulação computacional.



Fonte: Autora (2022).

As simulações foram realizadas em três cenários distintos: um cenário atual e dois hipotéticos: a) com a adoção de pavimentos brandos; b) com adoção de pavimentos brandos e vegetação, para verificar seus efeitos nas variáveis de temperatura do ar, umidade relativa do ar, temperatura de superfície, temperatura

média radiante e ventos, para a adaptação dos efeitos das zonas de calor, nos horários regulados segundo a Organização Mundial Meteorológica: 9h, 15h e 21h.

O uso de ferramentas computacionais possui grande aplicabilidade no estudo do microclima e das ilhas de calor urbanas, os trabalhos de Silva (2009); Castelo Branco (2009); Simões (2016); Silva (2017); Barbosa (2018); Werneck (2018); Adário, Marques e Silva (2019); Silva (2020) e Maruyama (2020) serviram de base para esta pesquisa. Após a análise dos dados extraídos e dos resultados obtidos, foram propostas diretrizes para a adaptação às ilhas de calor urbano em espaços públicos na cidade de Teresina.

2

2. FORMA URBANA E DESEMPENHO CLIMÁTICO

O presente capítulo introduz a base conceitual que fundamentou esta dissertação e está dividido em três subtópicos: 2.1) clima urbano: contexto e definições, 2.2) balanço de energia e ilhas de calor urbanas e 2.3) morfologia e clima urbano. Inicialmente, foram abordados os conceitos de clima urbano, suas escalas de análise e fatores e elementos. Para a análise das consequências da ação antrópica, foi aprofundado o estudo do balanço de energia urbano, calor antropogênico, trocas térmicas urbanas e a formação das Ilhas de Calor nas cidades. Em seguida, foi apresentada a relação entre a morfologia urbana e o microclima, e suas consequências nas variáveis climáticas de radiação solar, temperatura do ar e ventos.

2.1 Clima Urbano: contexto e definições

O estudo do clima está relacionado à análise de suas variáveis como temperatura, umidade, pressão e outros fatores ambientais. O clima pode ser definido como o conjunto de fenômenos meteorológicos característicos do estado médio da atmosfera em um determinado lugar. Enquanto o tempo é o estado médio da atmosfera em um determinado momento, o clima caracteriza-se pela investigação das características da atmosfera por um determinado período (SILVEIRA, 2007).

As atividades antrópicas são um dos principais agentes de aceleração das mudanças climáticas. O espaço construído, em contraste com o espaço natural, impacta o ambiente em diversas dimensões, de forma que a atmosfera nas cidades tende a movimentar-se e constituir-se de uma forma singular em relação ao campo, caracterizando o clima urbano (MONTEIRO e MENDONÇA, 2003).

A crescente expansão demográfica e o crescimento das cidades tornam o estudo do comportamento climático urbano cada vez mais necessário. O clima urbano se diferencia do estudo do clima, pois, além de tratar dos elementos climáticos, inclui as atividades humanas que influenciam o campo térmico urbano (VIANNA, 2018). Este, segundo Santamouris (2006), é resultante da ação do homem no espaço urbano, a partir de modificações no espaço natural que provocam alterações no balanço de radiação, ocasionando mudanças na temperatura do ar, temperatura de superfície, velocidade dos ventos, radiação solar e precipitação em determinadas áreas urbanas.

Monteiro e Mendonça (2003, p.19) afirmam que o clima urbano é “um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização”. Romero (2015) aponta que ele surge como uma categoria à parte, uma vez que o clima de uma cidade é influenciado pelos materiais superficiais que se diferenciam dos materiais naturais, destacando que:

“Os materiais urbanos possuem uma capacidade térmica mais elevada que a dos materiais das áreas do entorno e são melhores condutores. A superfície urbana apresenta um aspecto mais rugoso que as superfícies não construídas, acarretando uma maior fricção entre a superfície e os ventos que a atravessam. Ao mesmo tempo, as superfícies das edificações atuam como refletoras e radiadoras que, em seu conjunto, aumentam os efeitos da radiação incidente (ROMERO, 2015, p. 49).”

As primeiras pesquisas³ acerca do clima urbano foram desenvolvidas no século XIX, em Londres. Em 1818, Luke Howard observou as diferenças de temperatura entre o campo e a cidade, e buscou entender suas causas, atribuídas ao calor emitido pelas pessoas, animais e fontes de combustão, além de constatar a maior absorção da radiação solar no espaço urbano.

No Brasil, os estudos na temática desenvolveram-se principalmente a partir das décadas de 1960 e 1970. Destaca-se o trabalho de Monteiro (MONTEIRO E MENDONÇA, 2003), que desenvolveu o Sistema Clima Urbano – SCU, um modelo para a investigação do comportamento climático nas cidades, representado por três canais de percepção humana: o termodinâmico (conforto térmico); o físico-químico (qualidade do ar) e o hidro-meteorológico (impacto meteórico).

No âmbito do clima, Romero (2013) analisou os fatores climáticos globais (que dão origem ao macroclima), os fatores climáticos locais (que dão origem ao microclima) e os elementos climáticos. Os fatores climáticos globais são: radiação solar, latitude, longitude, altitude, ventos e massas de água e terra. Os fatores climáticos locais são: topografia, vegetação e superfície do solo. Os elementos climáticos são: temperatura, umidade do ar, precipitações e movimento do ar.

Posteriormente, Romero (2015) apresentou a relação entre a radiação solar e a geometria urbana na temperatura do ar. Na esfera do planejamento urbano, a autora estudou os espaços públicos e descreveu os elementos climáticos que são influenciados pela urbanização nas cidades: o vento, áreas verdes, o som, o mobiliário urbano, os pavimentos e a água, e apresentou uma metodologia para análise do tratamento ambiental do espaço público.

De maneira geral, constatou-se que o intenso crescimento das cidades ocasiona profundas alterações no sistema do clima urbano, decorrentes das propriedades radiativas, térmicas, aerodinâmicas e da umidade dos materiais superficiais das áreas urbanas. Tais alterações dependem da morfologia urbana, por apresentar diferentes geometrias e revestimentos, o que influencia o clima de maneira singular.

³ Destacam-se os trabalhos de Luke Howard em Londres, em 1818, que documentou o primeiro aumento do calor na cidade em relação ao campo e os trabalhos de Landsberg em 1956 com o livro *The Climate of Towns*, e de Chandler em 1965 com *The Climate of London*.

Destaca-se a importância da delimitação da escala de análise do clima urbano, uma vez que sua ocorrência não é homogênea em toda a área urbana e pode apresentar diferenças de condições climáticas entre áreas adjacentes, como por exemplo entre um bairro mais arborizado em relação a uma área densamente construída e sem vegetação.

Segundo Romero (2011), diversos fatores determinam o clima urbano, entre eles: vegetação, revestimento do solo, topografia, existência de obstáculos naturais ou artificiais que alteram o aporte da radiação solar e a ventilação do lugar. Nesse contexto, os materiais de revestimento urbanos, a incidência de áreas pavimentadas em relação às áreas verdes, a geometria dos espaços abertos, entre outras variáveis, determinam o microclima, fornecendo espaços adequados ou não para o desempenho das atividades humanas.

Dentre as principais alterações climáticas decorrentes do processo de urbanização, observou-se o fenômeno das Ilhas de Calor Urbanas (ICU's), um dos mais evidentes e estudados, consolidando-se como uma característica universal do clima urbano, especialmente nas metrópoles. De acordo com Lombardo (1985), a ICU é caracterizada pelas áreas onde a temperatura de superfície é mais elevada que as áreas rurais circunvizinhas, e está diretamente relacionada às ações antrópicas sobre o meio urbano, em relação ao uso do solo e aos condicionantes do meio.

Lombardo (1985) estudou o fenômeno na cidade de São Paulo, utilizando diferentes metodologias para o seu mapeamento, como imagens de satélite e dados de medições móveis e fixas. Os resultados demonstraram a ocorrência de temperatura horizontal superior a 10°C na cidade e a relação entre maiores índices de poluição, urbanização, densidade e menor quantidade de vegetação e permeabilidade, nas áreas com maiores temperaturas. O estudo demonstra a relação entre o uso do solo e o aumento da temperatura e a diminuição da umidade relativa do ar.

Gartland (2010) apresentou um embasamento teórico acerca das variáveis envolvidas no fenômeno das ICU's, com suas definições, causas e métodos de mapeamento. Além disso, expôs elementos para a mitigação de seus efeitos, como o uso de coberturas frias, pavimentos frios e o resfriamento por meio da vegetação, com seus efeitos na vida urbana e na melhoria da qualidade de vida nas cidades.

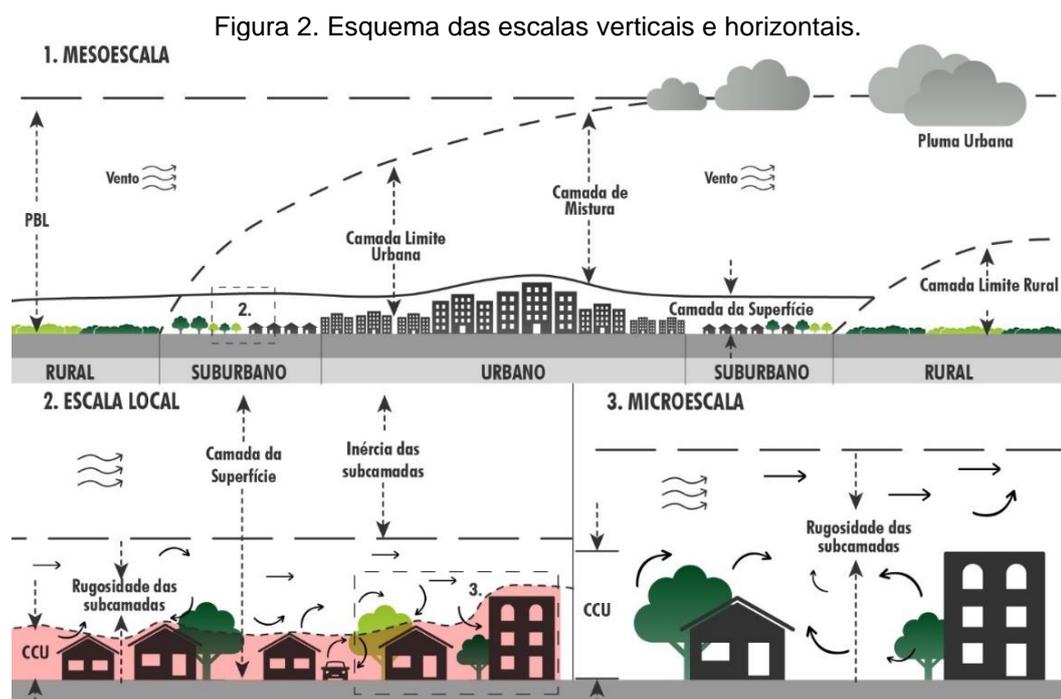
Romero et al. (2019) apresentaram a influência do desenho urbano moderno na incidência do fenômeno na cidade de Brasília. O estudo verificou a incidência de

ICU no Plano Piloto e em regiões administrativas do Distrito Federal, contemplando diversas formas urbanas e condições socioeconômicas e ambientais. Além disso, apresentaram um método de medição desenvolvido pelo Laboratório de Sustentabilidade Aplicada à Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília (LaSUS – FAU/UnB), com o uso de transectos móveis em conjunto com imagens termográficas.

A compreensão e a interpretação do clima urbano e suas variáveis e da configuração urbana do sítio é fundamental para o planejamento urbano adequado e construção de cidades mais sustentáveis, resilientes e adaptadas ao meio e às crescentes alterações climáticas. Os tópicos seguintes abordam as escalas climáticas, os fatores que influenciam o clima urbano e os elementos climáticos.

2.1.1 Escalas de análise do clima urbano

A classificação das escalas climáticas permite um maior entendimento do clima urbano e é fundamental para a delimitação do objeto de estudo, ao diferenciar sua ordem de grandeza, unidades de superfície, meios de observação, fatores de organização e técnicas de análise. Seu estudo varia em duas dimensões: vertical e horizontal (OKE, 2006), logo, é necessário considerar a altura de medição das temperaturas, que determinam os instrumentos e seus posicionamentos.

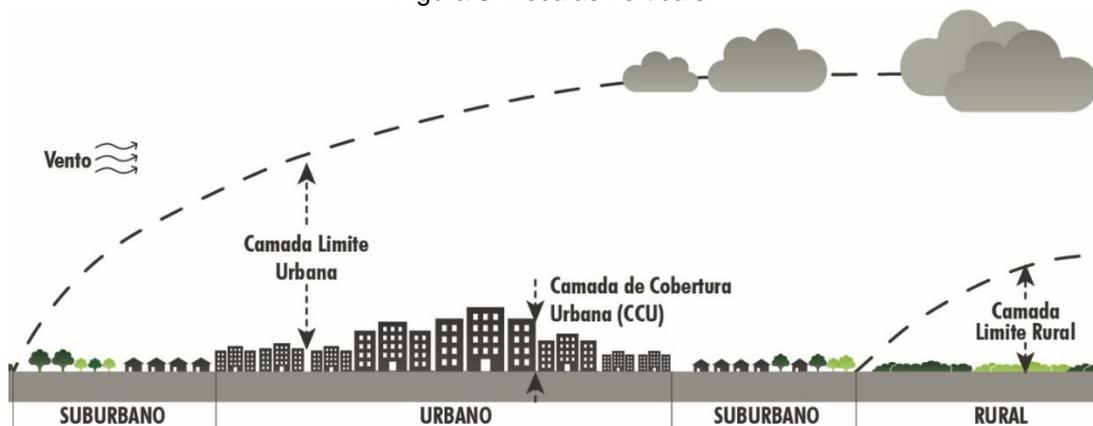


Fonte: Adaptado de Oke (2004, p.3).

Na dimensão horizontal, junto ao solo, Oke (2006) apresenta uma metodologia para a classificação do clima das áreas urbanas, dividida em três escalas: a mesoescala (relacionada ao clima regional), a escala local (inclui os efeitos da paisagem no clima, como a topografia e pode abordar desde um bairro a uma cidade) e a microescala (considera que toda superfície tem seu próprio microclima, as temperaturas podem variar em pequenas distâncias e está relacionada ao entorno imediato) (Figura 2).

As escalas verticais de Oke (2006) são baseadas em limites de altura, uma vez que na cidade as trocas térmicas não ocorrem de forma plana, e sim na Camada de Cobertura Urbana (CCU). É necessário distinguir a UCL (*Urban Canopy Layer*), traduzida como Camada de Cobertura Urbana (CCU) e a UBL (*Urban Boundary Layer*), traduzida como Camada Limite Urbana (CLU) (Figura 3). No nível da mesoescala, ou escala local, identifica-se a Camada Limite Urbana (CLU), que possui as características definidas pela natureza da superfície urbana (ROMERO, 2011).

Figura 3. Escalas verticais.



Fonte: Adaptado de OKE (1976 apud SANTAMOURIS, 2006, p.101)

No nível da microescala, localiza-se a CCU, a camada mais próxima da superfície urbana, situada abaixo do nível das coberturas das edificações e corresponde à região entre uma massa de edifícios que apresenta uma mescla de microclimas produzidos pelo entorno imediato (ROMERO, 2015). O efeito da urbanização é diferente nas duas camadas, uma vez que na CCU, a sombra dos edifícios, materiais superficiais e a geometria da camada intraurbana pode gerar diferentes níveis de temperatura. A sua altura corresponde aproximadamente à altura

média da rugosidade dos elementos da configuração urbana, cujos efeitos são identificados na Subcamada de Rugosidade (SCR) (ROMERO, 2011).

Romero (2011) apresenta no Quadro 4, as definições dos diferentes tipos de escalas climáticas horizontais, segundo Oke e Grimmond, estabelecendo a extensão de observação que deve ser considerada e exemplos no contexto urbano, para facilitar a compressão e a escolha da dimensão a ser trabalhada.

Quadro 4. Escalas climáticas horizontais.

Escala climática	Oke	Grimmond
Mesoescala	Extensão: $X > 10$ km Exemplo: cidade	Extensão: 25 km x 25 km Exemplo: área urbana Extensão: 100 km x 100 km Exemplo: cidade e seu entorno
Local	Extensão: $1 \text{ km} < X < 10$ km Exemplo: bairros Características: mesmo tipo de cobertura do solo, atividade, tamanho e distância entre os prédios	Extensão: 5 km x 5 km Exemplo: centro urbano, residencial, industrial
Microescala	Extensão: $1 \text{ m} < X < 1$ km Exemplo: edifícios, estradas, árvores, pátios, ruas Características: superfícies e objetos, temperatura do ar superficial diferentes	Extensão: 10 m x 10 m Exemplo: edifício Extensão: 30 m x 40 m Exemplo: rua, cânion Extensão: 0,5 km x 0,5 km Exemplo: quarteirão

Fonte: (ROMERO, 2011, p.79).

O presente estudo compreende as relações climáticas que ocorrem na camada intraurbana ou camada de cobertura urbana (CCU), na escala do microclima. O desempenho climático nesta camada sofre interferências do espaço construído, como a altura das edificações, orientação e construções, densidade e propriedades dos materiais da superfície urbana e predominam os fenômenos de trocas radiativas e escoamentos de ar. A escala do microclima é, muitas vezes, delimitada à edificação, entretanto, a escala de análise será a do espaço exterior, o espaço público.

2.1.2 Fatores e elementos do clima

Os fatores e elementos climáticos são objeto de amplo estudo na literatura, entretanto são tratados de forma distinta de autor para autor. Segundo Olgay (1963), os principais elementos do clima que afetam o conforto humano são: a temperatura

do ar, a radiação solar e os ventos, tratando de forma diferenciada os efeitos decorrentes da umidade.

Romero (2013, p. 19) distingue os elementos climáticos como os que possuem “a qualidade de definir, de fornecer os componentes do clima” e os fatores climáticos como os que possuem a qualidade “de condicionar, determinar e dar origem ao clima”. A autora apresenta uma classificação para a configuração do clima dividida em: fatores climáticos globais (os que dão origem ao clima); fatores climáticos locais (dão origem ao microclima) e elementos climáticos (representam os valores relativos a cada clima) (Quadro 5).

Quadro 5. Configuração do clima.

Fatores climáticos globais		Fatores climáticos locais	
	Radiação solar Quantidade/Qualidade/Inclinação do eixo terrestre/Equilíbrio térmico terrestre		Topografia Declive/Orientação/Exposição / Elevação
	Latitude		Vegetação
	Altitude		Superfície do solo Natural ou Construído/Reflexão/ Permeabilidade/Temperatura/ Rugosidade
	Ventos		
	Massas de água e terra		
Elementos climáticos			
	Radiação solar Valores médios/Variações/Valores extremos/ Diferenças térmicas entre o dia e a noite		
	Umidade do ar Absoluta/Relativa/Pressão de valor		
	Precipitações Chuva/Neve (todo tipo de água que se precipita da atmosfera)		
	Movimento do ar Velocidade/Direção/Mudanças diárias e estacionais		

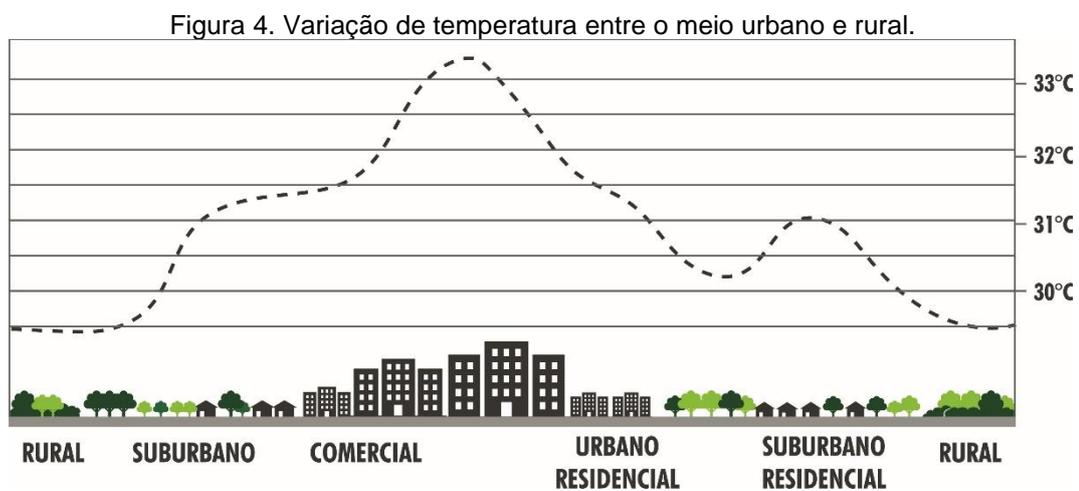
Fonte: (ROMERO, 2013, p.20).

2.2 Balanço de energia e Ilhas de Calor Urbanas

A análise do comportamento do clima permite verificar o impacto da urbanização nas temperaturas urbanas, em relação às temperaturas rurais. A alteração da paisagem natural através da impermeabilização do solo, canalização de

corpos hídricos e supressão da cobertura vegetal, altera o balanço de energia térmica e o ciclo hidrológico urbano. Desta forma, as cidades são mais quentes que o seu entorno rural, especialmente à noite. Tal fenômeno é conhecido como **Ilha de Calor Urbana** (ICU - do inglês *Urban Heat Island*, UHI) (Gartland, 2010; Lombardo, 1985; Oke, 1987; Romero et al., 2019; Santamouris, 2006).

Segundo Gartland (2010), as áreas suburbanas possuem um “oásis inverso”, de forma que as temperaturas de superfície são mais elevadas do que as áreas do entorno rural (Figura 4). Romero et al., (2019) apontam que as ICU’s caracterizam a condição microclimática em que a temperatura do ar se encontra mais elevada e a umidade relativa do ar mais baixa e, além disso, pode-se verificar alteração na velocidade dos ventos e o regime das chuvas em uma determinada área da cidade, em relação às áreas adjacentes. Lucena (2013) destaca que o fenômeno geralmente está relacionado com o aumento da temperatura do ar, entretanto, pode se referir também ao calor das superfícies ou materiais superficiais urbanos.



Fonte: Adaptado de Santamouris (2006, p.97).

Voogt e Oke (2003) apresentam a Ilha de Calor Urbana de Superfície (ICUS, do inglês *Surface Urban Heat Island* – SUHI). Enquanto a ICU convencional se restringe ao registro da temperatura do ar por meio de termômetro de estação convencional ou automática, ou de instrumentos de campo, a ICUS pode ser medida a partir de sensoriamento remoto, com a identificação da temperatura dos materiais de superfície.

Givoni (1989) aponta a importância do balanço total da radiação entre a área urbana e rural na formação das ICU's. Gartland (2010) destaca a necessidade do entendimento do balanço energético na superfície terrestre para o estudo do fenômeno. Segundo Vianna (2018), as trocas térmicas ou **balanço de energia**⁴, são os processos que diferenciam o clima urbano e estão relacionados à incidência da radiação solar nas superfícies urbanas, o que ocasiona a produção de "temperaturas artificiais", as temperaturas resultantes das trocas térmicas entre os elementos climáticos, os materiais superficiais e a forma urbana das cidades.

Portanto, todo corpo aquecido na superfície emite radiação térmica, de forma que os materiais superficiais, as pessoas e os animais em nosso meio estão em constante troca de calor por radiação (OKE, 1987). Oke (1997) apresenta os diversos aspectos da urbanização que alteram o balanço energético e as condições térmicas e influenciam o conforto térmico, potencializando as ICU's, como: a) a poluição do ar; b) calor antropogênico; c) superfícies impermeáveis; d) propriedades térmicas das superfícies; e) geometria das superfícies.

Quanto ao **calor antropogênico**, na escala do edifício, refere-se à energia emitida pelo corpo humano durante uma determinada atividade cotidiana. Na escala urbana, é o calor gerado pelas atividades humanas e derivado de diversas fontes, como os edifícios, o uso de carros, aparelhos de ar-condicionado, atividades relacionadas ao uso do solo, como as indústrias, que contribuem para o aumento do balanço energético e formação das ICU's. Dentre as trocas de calor, destacam-se a **convecção**⁵ e a **evaporação**⁶, responsáveis pelos processos físicos entre as superfícies e o ar. Nas cidades, a baixa taxa de evapotranspiração acentua ainda mais o contraste de temperatura com o entorno.

Em relação aos materiais das superfícies urbanas, a quantidade de calor sensível a ser dissipado por convecção para o ar ou absorvido na sua superfície, depende da radiação solar e da especificidade e propriedade de cada material e sua

⁴ O balanço de energia urbano se baseia na primeira lei da termodinâmica, que afirma que a energia nunca é perdida, desta forma, toda a energia absorvida pela superfície terrestre através da radiação ou do calor antropogênico, vai para algum lugar, seja para aquecer o ar (troca de calor sensível), ou ser evaporada com a umidade (troca de calor latente), ou ainda pode ser armazenada nos materiais em forma de calor.

⁵ Também denominado de troca de calor sensível, é o processo de troca de calor através de um sólido e um fluido (superfície terrestre e o ar acima dela).

⁶ Também denominado de calor latente, é a troca onde a energia é transmitida a partir da superfície terrestre em forma de vapor d'água. Além da mudança de temperatura, ocorre mudança de estado físico.

influência no clima urbano, destacando-se as propriedades de albedo e emissividade. Desta forma, o armazenamento de calor dependerá das propriedades termodinâmicas dos materiais, que serão analisadas nos tópicos seguintes. No Quadro 6 abaixo, Gartland (2010) elenca as principais causas da formação de ilhas de calor urbanas e seus efeitos no balanço de energia.

Quadro 6. Características que contribuem para a formação das ilhas de calor e aumento do balanço energético.

Fatores que contribuem para as ilhas de calor	Efeitos no balanço de energia
Ausência de vegetação	Reduz evaporação
Uso disseminado de superfícies impermeáveis	Reduz evaporação
Aumento da difusividade térmica dos materiais urbanos	Aumenta o armazenamento de calor
Baixa refletância solar dos materiais urbanos	Aumenta o saldo de radiação
Geometrias urbanas que acumulam calor	Aumenta o saldo de radiação
Geometrias urbanas que diminuem a velocidade dos ventos	Reduz convecção
Aumento dos níveis de poluição	Aumenta o saldo de radiação
Aumento do uso de energia	Aumenta o calor antropogênico

Fonte: (GARTLAND, 2010, p.16).

Quanto aos efeitos das ICU's na vida urbana, diversos estudos apresentam sua contribuição para o declínio da qualidade de vida nas cidades (Lombardo, 1985; Oke, 1987; Santamouris, 2006; Voogt, 2007; Gartland, 2010; Romero, 2015 e Vianna, 2018). Dentre os principais efeitos, em grande parte negativos, destacam-se as implicações na saúde humana, como o aumento da poluição do ar, da incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares e desconforto térmico, além dos impactos ambientais, como o aumento do consumo de energia para fins de refrigeração, desequilíbrios ambientais e aumento de eventos climáticos extremos.

Romero et al. (2019) apresentam as diversas abordagens para a identificação e mapeamento das ICU's, que dependem da escala, dos recursos disponíveis e do objetivo do estudo. Os autores ressaltam a importância de mapear e estudar o fenômeno para adaptação e mitigação de seus impactos na vida humana, sendo necessário o entendimento do clima urbano, com enfoque no microclima local das cidades, para um planejamento urbano sustentável e bioclimático.

2.3 Morfologia e microclima urbano

A análise dos impactos da urbanização revela que a morfologia urbana altera o clima urbano. Romero (2015) afirma que as trocas térmicas na cidade dependem também da forma urbana. Para Santamouris, (2006), existe uma estreita relação entre os níveis de temperatura das superfícies urbanas e a geometria das ruas. Sobre isso, é importante destacar que,

“A geometria urbana é um dos fatores geralmente relacionados com a formação de ilhas de calor urbanas. Sua variação nos ambientes urbanos pode influenciar no aumento ou na diminuição de valores de temperatura do ar em relação aos dados medidos nos arredores da cidade, na velocidade e direção dos ventos, na forma de recebimento de radiação por ondas curtas e na liberação de calor através de ondas longas (NAKATA-OSAKI, SOUZA e RODRIGUES, 2016, p.74).”

Romero (2015, p.10) afirma que “um bom desenho urbano requer uma concepção específica de ruas, edifícios e de espaços entre os edifícios na sua interação com o meio”. A autora considera a envolvente espacial como um dos elementos mais importantes na concepção do usuário, uma vez que suas percepções dependem do contexto ao seu redor. Nessa esfera, a geometria urbana criada, as dimensões de altura e profundidade dos espaços, permitirão que uma gama de trocas e sensações se estabeleçam, inclusive trocas térmicas, percebidas e diferenciadas pelo usuário (ROMERO, 2011). Desta forma,

“Para os arquitetos e urbanistas, a relação entre as duas dimensões de largura das vias e altura dos edifícios é de fundamental importância para interpretações de várias ordens, variando a relação de acordo com a densidade da área avaliada. Nesse sentido, a relação W/H auxilia na leitura das proporções do espaço urbano. (ROMERO, 2011, p.91).”

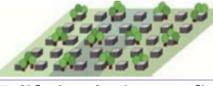
A forma urbana e seu impacto no espaço construído foram analisadas por Oke em 2004, que apresentou uma classificação morfológica genérica das estruturas urbanas, para melhorar a localização dos instrumentos meteorológicos (STEWART e OKE, 2012). Denominadas de Zonas Climáticas Urbanas (ZCU) o autor classificou as formas urbanas segundo a sua capacidade de condicionar o clima local, a partir de

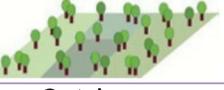
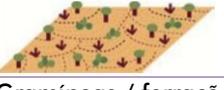
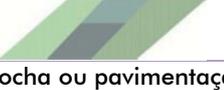
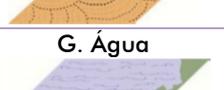
aspectos como: estrutura urbana, solo, materiais de superfície, metabolismo (atividade humana) e o potencial para a alteração do clima natural.

Entretanto, o método apresentou limitações, e posteriormente, Stewart e Oke (2012) propuseram uma classificação da paisagem denominada Zona Climática Local (ZCL) (Quadro 7), com o objetivo de padronizar os estudos das ilhas de calor no espaço urbano. As ZCL's foram divididas em 17 tipos e podem ser definidas como:

"(...) as regiões de cobertura do solo uniforme, estrutura urbana, materiais e atividade humana que, em escala horizontal abrangem centenas de metros a vários quilômetros. Cada ZCL tem um regime de temperatura de altura de tela característico que é mais aparente em superfícies secas, em noites calmas e claras e em áreas de relevo simples (STEWART e OKE, 2012, p.1884)."

Quadro 7. Tipos e definições das Zonas Climáticas Locais.

Tipologia da Construção	Descrição
<p>1. Arranha-céus compactos</p> 	<p>Edifícios altos e adensados com mais de 10 andares. Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo, em sua maior parte, pavimentada. Concreto, aço, pedra e materiais de construção de vidro.</p>
<p>2. Edifícios médios compactos</p> 	<p>Edifícios médios (3 a 9 andares) adensados. Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo, em sua maior parte, pavimentada. Materiais de construção em pedra, tijolo, telha e concreto.</p>
<p>3. Edifícios baixos compactos</p> 	<p>Edifícios baixos (1 a 3 andares) adensados. Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo, em sua maior parte, pavimentada. Materiais de construção em pedra, tijolo, telha e concreto.</p>
<p>4. Edifícios altos espaçados</p> 	<p>Arranjo aberto de edifícios altos com mais de 10 andares. Abundância de cobertura de terra permeável (plantas baixas, árvores dispersas). Concreto, aço, pedra e materiais de construção de vidro.</p>
<p>5. Edifícios médios espaçados</p> 	<p>Arranjo aberto de edifícios médios (3 a 9 andares). Abundância de cobertura de terra permeável (plantas baixas, árvores dispersas). Concreto, aço, pedra e materiais de construção de vidro.</p>
<p>6. Edifícios baixos espaçados</p> 	<p>Arranjo aberto de edifícios baixos (1 a 3 andares). Abundância de cobertura de terra permeável (plantas baixas, árvores dispersas). Materiais de construção em madeira, tijolo, pedra, telha e concreto.</p>
<p>7. Edifícios baixos ínfimos</p> 	<p>Edifícios de um único andar adensados. Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo principalmente compactada. Materiais de construção leves (por exemplo, madeira, palha, metal corrugado).</p>
<p>8. Edifícios baixos extensos</p> 	<p>Arranjo aberto de edifícios baixos extensos (1 a 3 andares). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo na maior parte pavimentada. Materiais de construção em aço, concreto, metal e pedra.</p>
<p>9. Edifícios dispersos</p> 	<p>Arranjo disperso de edifícios pequenos ou médios em um ambiente natural. Abundância de cobertura de terra permeável (plantas baixas, árvores dispersas).</p>

10. Indústria	
	Estruturas industriais baixas e médias (torres, tanques, pilhas). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo na maior parte pavimentada ou compactada. Materiais de construção em metal, aço e concreto.
Tipologia de cobertura de solo	Descrição
A. Árvores densas 	Paisagem fortemente arborizada de árvores caducas e/ou perenes. Cobertura do solo principalmente permeável (plantas baixas). A função da zona é floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.
B. Árvores dispersas 	Paisagem levemente arborizada de árvores caducas e/ou perenes. Cobertura do solo principalmente permeável (plantas baixas). A função da zona é floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.
C. Arbustos 	Arranjo aberto de arbustos e árvores curtas. Cobertura do solo principalmente permeável (solo nu ou areia). A função da zona é um cerrado natural ou agricultura.
D. Gramíneas / forrações 	Paisagem com grama ou plantas herbáceas. Poucas ou nenhuma árvore. A função da zona é pastagem natural, agricultura ou parque urbano.
E. Rocha ou pavimentação 	Paisagem rochosa ou com cobertura pavimentada. Poucas ou nenhuma árvore ou plantas. A função da zona é o deserto natural (rocha) ou o transporte urbano.
F. Solo exposto ou areia 	Paisagem com características de solo nu ou cobertura de areia. Poucas ou nenhuma árvore ou plantas. Função de zona é deserto natural ou agricultura.
G. Água 	Grandes corpos d'água abertos, como mares e lagos, ou pequenos corpos, como rios, reservatórios e lagoas.

Fonte: (STEWART e OKE, 2012, p.1885).

Nesse contexto de análise dos elementos da forma urbana e sua influência no clima, destaca-se o cânion urbano como a unidade padrão para o estudo do microclima. O microclima dos cânions é determinado pelas propriedades termodinâmicas dos materiais de superfície, a orientação em relação à radiação e os ventos, a geometria do cânion, o fator de céu visível e a presença de vegetação.

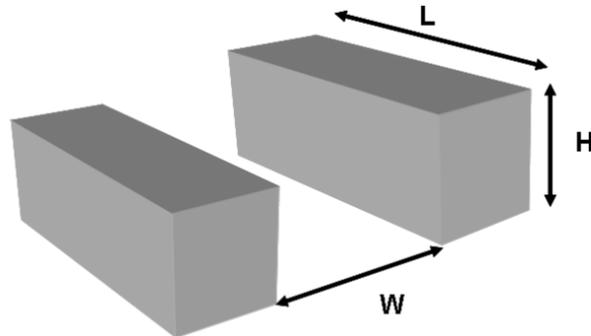
A seguir, serão apresentados os impactos da forma urbana nas variáveis da temperatura do ar e ventilação. O estudo do comportamento climático e suas consequências nos cânions urbanos tem como objetivo otimizar o consumo de energia nos edifícios e proporcionar conforto térmico nos espaços públicos das cidades.

2.3.1 Radiação solar e temperatura do ar

Os cânions urbanos são definidos pela proporção W (*width*), relacionada à largura da via e H (*height*), relacionada à altura do edifício. Oke (2006), Romero (2011) e Santamouris (2006) consideram ainda a dimensão L (*length*), relacionada à profundidade do cânion (Figura 5). Romero (2011) afirma que o cânion urbano ocorre

somente quando a proporção W/H é maior que 0,7, e que um mero afastamento entre edifícios não necessariamente constitui o cânion.

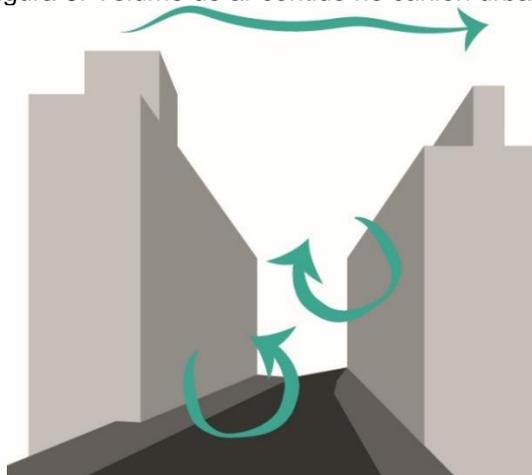
Figura 5. Altura, Largura e Comprimento do cânion.



Fonte: (SANTAMOURIS, 2006, p.106).

A geometria do cânion afeta o balanço de radiação e determina a temperatura do ar e das superfícies. Segundo Oke (1987), estes espaços compreendem as paredes e piso (geralmente a via) entre dois edifícios adjacentes. O cânion urbano possui um volume ou camada de ar interno, que consiste em três lados com superfícies ativas (paredes e piso) e três lados abertos (um sendo uma cobertura imaginária a nível do telhado, e os outros dois no sentido do comprimento e fluxo do ar) (Figura 6). Essa configuração permite a inclusão desses espaços e a interação entre os edifícios no estudo do clima urbano, ao invés de considerar os invólucros edificados como objetos isolados do contexto urbano.

Figura 6. Volume de ar contido no cânion urbano.



Fonte: Adaptado de Romero (2011, p.108).

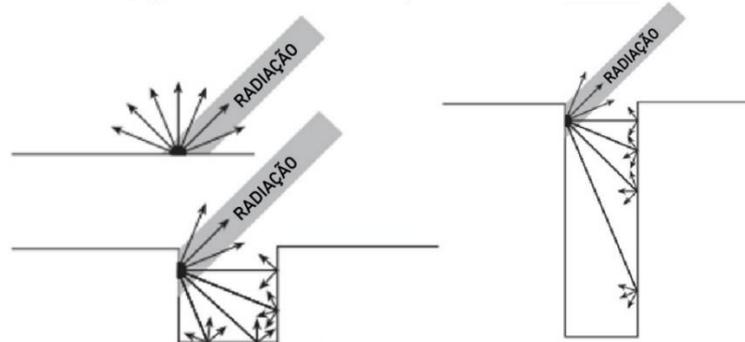
Em relação à temperatura, Oke (1988) apresenta a incidência de radiação solar nas diferentes proporções H/W e densidade das cidades. Em cidades com maior

densidade, logo, com altos índices H/W , o cânion ocasiona o aprisionamento da radiação solar e do calor urbano, especialmente à noite, atuando como ilhas de calor urbanas noturnas, devido à perda de calor por radiação de onda longa proveniente da energia absorvida pelos edifícios durante o dia.

Ludwig (1970 apud SANTAMOURIS, 2006) fez a mesma observação, apresentada na Figura 7. Para o autor, no primeiro cenário, de superfície plana, a maior parte da radiação solar absorvida é irradiada para o céu em forma de onda longa. No segundo cenário, de média densidade, $H/W=1$, a maior parte da radiação solar refletida atinge os outros edifícios e o solo, até sua absorção na altura do solo. Já em densidades maiores, de $H/W=4$, a maior parte da absorção acontece em um nível superior do cânion, reduzindo a quantidade de radiação a atingir o solo.

Outro importante fator na constituição dos cânions urbanos é o Fator de Visão do Céu (FVC), que corresponde à fração de céu visível em determinado ponto no espaço urbano. Este fator está relacionado à incidência de radiação, sombreamento e iluminação urbana. Nos cânions, boa parte da abóbada celeste é obstruída por outros edifícios, de forma que as perdas por radiação de ondas longas são reduzidas. Segundo Romero (2011), quanto maior a obstrução do céu, maior o calor na região e, conseqüentemente, quanto maior a visão do céu de uma superfície urbana, maior o resfriamento e menor a temperatura.

Figura 7. Incidência solar para diferentes H/W .



Fonte: Adaptado de Ludwig (1970 apud SANTAMOURIS, 2006, p.13).

Entretanto, Santamouris (2001) afirma que, apesar da influência dos cânions urbanos, a temperatura média do ar nas ruas é regida por fatores mais complexos. A distribuição da temperatura do ar dentro do cânion possui variações: próximo às fachadas, forma-se uma camada de ar, resultado da temperatura de superfície da fachada e do transporte vertical do ar. No meio do cânion, no nível do solo, a

temperatura do ar é diferente da próxima às fachadas e depende também do transporte horizontal de ar. O autor afirma que, na maior parte das vezes, a temperatura no meio do cânion é menor que a temperatura da camada de ar próxima às fachadas, e esta é maior do que a temperatura acima dos edifícios.

Desta forma, observa-se que as mudanças de temperatura no cânion estão, em grande parte, relacionadas à temperatura de superfície dos materiais. O entendimento das propriedades termodinâmicas dos materiais permite uma escolha consciente e direcionada na relação entre o edifício e o ambiente externo. O estudo dos materiais de revestimento das superfícies urbanas torna-se complexo devido à quantidade de materiais existentes nas cidades: água, solo natural, vegetação, além da diversidade de materiais industrializados adotados na construção civil.

Segundo Vianna (2018), o comportamento dos materiais de superfície no ambiente urbano depende da quantidade de radiação solar absorvida, o que determinará a quantidade de calor sensível a ser dissipado, por convecção, para o ar, influenciando o clima urbano. Desta forma, cada material presente na estrutura urbana possui propriedades específicas que influenciam o clima urbano, com destaque para o **albedo**⁷ e a **emissividade**⁸, que possuem importante papel no balanço de energia das cidades.

Santamouris (2006) mostra que as áreas urbanas são caracterizadas, de forma geral, por um albedo relativamente reduzido. Isso ocorre devido à maior absorção da radiação solar pelos materiais de construção e à geometria dos cânions urbanos, que influenciam a forma como a radiação solar incide nas superfícies, a partir das múltiplas reflexões da radiação ou do sombreamento dos volumes edificadas, alterando o seu albedo.

De acordo com Romero (2011), a radiação solar refletida pelos edifícios inseridos na estrutura urbana, sofre fenômenos de múltipla reflexão, sendo apenas uma pequena parte refletida para o céu. O aumento da capacidade de absorção decorrente da forma urbana, ocasiona conseqüentemente uma redução da

⁷ O albedo da superfície, ou refletância solar, é a propriedade dos materiais que indica sua capacidade de refletir a radiação solar e, segundo, é calculado a partir da radiação solar refletida dividida pela radiação solar incidente.

⁸ A emissividade está relacionada com a capacidade de uma superfície de emitir calor e, segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), mede a quantidade térmica medida por unidade de tempo.

refletividade do espaço urbano e o aumento das temperaturas, o que é denominado de redução do albedo efetivo.

Dito isso, Romero (2015) destaca que o uso de materiais com alto albedo nos edifícios, que refletem a radiação ao invés de absorvê-la e, rapidamente a devolvem ao exterior, possibilita a manutenção de temperaturas mais baixas no interior das construções, entretanto, aumenta a temperatura no espaço público exterior, pois, além da radiação incidente direta, o espaço recebe a soma das emissões.

Quanto à emissividade, Lamberts, Dutra e Pereira (2014) destacam que a propriedade está relacionada à camada superficial do material emissor, de forma que os materiais podem ser divididos em dois grupos: os metálicos, com baixa emissividade, entre 0,05 e 0,30; e os não-metálicos, com alta emissividade, entre 0,85 e 0,90. Porém, se uma chapa metálica de 0,20 for pintada com tinta não-metálica, sua emissividade passará a ser 0,90.

Desta forma, segundo os autores, um material escuro absorverá a maior parte da radiação incidente, e, por outro lado, um material claro absorverá pouco, logo, terá maior propriedade refletiva. A parcela de radiação solar absorvida pelos materiais aquece os mesmos, aumenta a temperatura de superfície e é parcialmente reemitida para o exterior. A propriedade que rege a emissão da radiação é a emissividade. A Tabela 1 apresenta exemplos de albedo e emissividade de alguns materiais:

Tabela 1. Albedo e Emissividade de Superfícies Seleccionadas.

Material	Albedo	Emissividade
Concreto	0,30	0,94
Tijolo vermelho	0,30	0,90
Tijolo de construção	-	0,45
Telhas de concreto	-	0,63
Madeira (aplainada recentemente)	0,40	0,90
Papel branco	0,75	0,95
Papel alcatrão	0,05	0,93
Gesso branco	0,93	0,91
Aço galvanizado brilhante	0,35	0,13
Folha de alumínio brilhante	0,85	0,04
Pigmento branco	0,85	0,96
Pigmento cinza	0,03	0,87
Pigmento verde	0,73	0,95
Tinta branca em alumínio	0,80	0,91
Tinta preta em alumínio	0,04	0,88
Tinta em alumínio	0,80	0,27-0,67
Cascalho	0,72	0,28
Areia	0,24	0,76

Fonte: (SANTAMOURIS, 2006, p,112).

Sobre as propriedades citadas, Santamouris (2006) destaca que os materiais com albedo elevado reduzem a quantidade de radiação solar absorvida nas estruturas urbanas, logo, mantêm suas superfícies mais frias. Já os materiais com alta emissividade são bons emissores de energia de ondas longas, e liberam a energia absorvida como radiação de onda curta. Desta forma, possuem temperatura superficial mais baixa e contribuem para a redução da temperatura do ar através da troca por convecção.

O estudo de materiais apropriados para as superfícies urbanas como medida de adaptação e mitigação das ilhas de calor urbanas possui grande importância. Diversos trabalhos avaliam os ganhos energéticos ambientais com a aplicação de superfícies frias ou brandas como estratégia para amenizar os efeitos das ICU's e proporcionar conforto térmico no ambiente urbano e serão apresentados posteriormente (GARTLAND, 2010; WERNECK, 2018 e MARUYAMA, 2020).

2.3.2 Ventilação urbana

Segundo Souza (2006), o movimento das massas de ar atmosféricas é ocasionado pelas diferenças de pressão atmosférica, decorrentes de diferentes temperaturas do ar. Quando o ar aquecido se dilata, torna-se menos denso e sobe verticalmente, resultando em zonas de baixa pressão. Nas regiões adjacentes, o ar é deslocado em direção às zonas de baixa pressão, gerando a circulação horizontal. A massa de ar aquecida sobe até certo ponto, onde volta a se resfriar e desce verticalmente, gerando zonas de alta pressão. Desta forma, a circulação do ar pode ser classificada por movimentos verticais e horizontais.

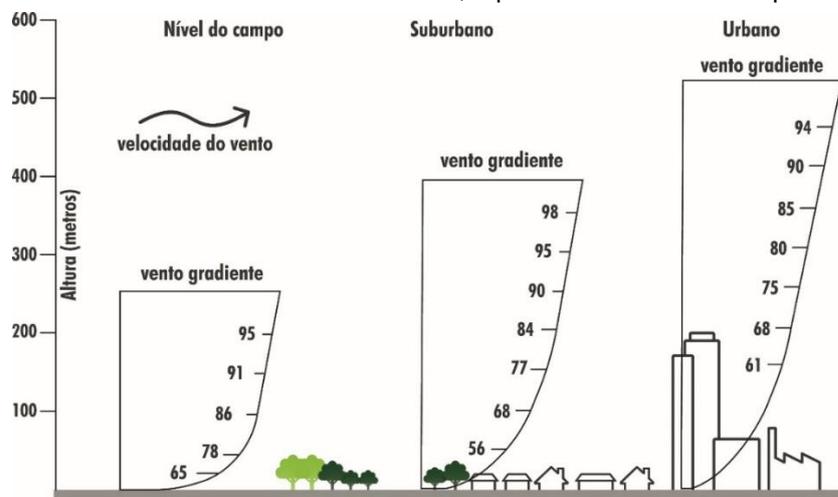
O fluxo do ar se movimenta a partir da inércia e tende a ter velocidade e direção constantes, até encontrar um obstáculo. Segundo Torres (2017), dentre os elementos climáticos, o vento é o que sofre maior modificação pelo processo de urbanização, e pode ser controlado e modificado pela morfologia urbana, o que provoca alterações na sua velocidade, produzindo efeitos aerodinâmicos como barreiras ou canalização, entre outros.

Em regiões de clima quente-úmido, a ventilação facilita a troca de calor entre o indivíduo e o meio, acelerando a perda de umidade do corpo através da evaporação ou convecção. Desta forma, o fluxo do ar está diretamente relacionado ao conforto térmico. No envoltório do edifício, a ventilação atua no resfriamento da superfície, e

no interior, atua através das aberturas, de forma a permitir trocas térmicas entre os ambientes interno e externo e proporcionar a renovação do ar.

Existem duas características da forma urbana que alteram o comportamento do fluxo de ar e sua permeabilidade na estrutura urbana: **rugosidade**⁹ e **porosidade**¹⁰. Segundo Oke (1997), a rugosidade está relacionada à altura dos elementos, sua forma e distribuição de densidade, afetando a velocidade das massas de ar que alcançam a estrutura urbana. A rugosidade, portanto, interfere no perfil vertical do vento, ou gradiente de vento (Figura 8).

Figura 8. Perfil do vento em diferentes ambientes, a partir da influência do tipo de rugosidade.



Fonte: Adaptado de Santamouris (2006, p.101).

Segundo Vianna (2018), enquanto a rugosidade está relacionada à altura dos edifícios, a porosidade relaciona-se com a permeabilidade dos ventos e as dimensões horizontais e suas aberturas, embora possa também estar relacionada às dimensões verticais e sua distribuição na forma urbana (Figura 9).

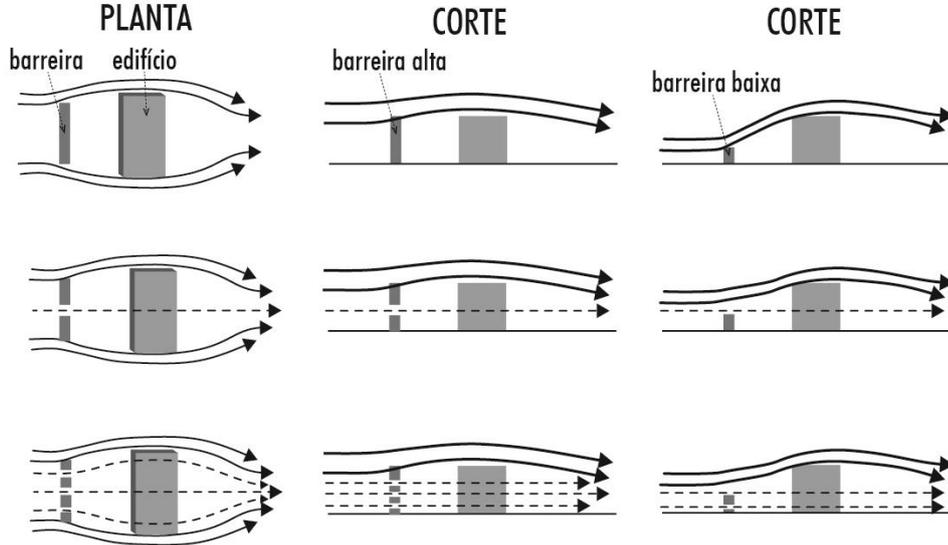
Para Romero (2011), quanto menor a porosidade da malha urbana, maior a compacidade do tecido, maior a redução da radiação solar direta por sombreamento e maior o aumento da radiação difusa, devido às múltiplas reflexões entre as edificações, logo, maior a retenção de radiação de onda longa no espaço urbano. Desta forma, regiões pouco porosas acumulam uma maior quantidade de calor, devido à redução de perdas de calor por convecção. Entretanto, regiões com maior

⁹ Oke (1997) define a rugosidade como a propriedade que expressa a morfologia geométrica da superfície, ou medida da rugosidade aerodinâmica da superfície.

¹⁰ A porosidade é compreendida como a maior ou menor permeabilidade aos ventos apresentada pela estrutura urbana (OLIVEIRA, 1988).

porosidade possuem maior fluxo de ventos e favorecem as trocas térmicas, renovação do ar e a ventilação cruzada dos espaços.

Figura 9. Permeabilidade do vento conforme a altura e a porosidade do obstáculo.



Fonte: Adaptado de Souza (2006, p.24).

3

3. ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA DO ESPAÇO PÚBLICO

Este capítulo apresenta a importância da concepção bioclimática do espaço exterior urbano ou espaço público. Para uma melhor compreensão, foi dividido em três subtópicos: 3.1) uso de pavimentos brandos para a adaptação de ICU, 3.2) vegetação no microclima urbano e 3.3) arquitetura bioclimática em conjuntos habitacionais. Primeiro são apresentadas as estratégias bioclimáticas utilizadas no presente trabalho para a adaptação das zonas de calor no espaço urbano: pavimentos brandos e vegetação, seus tipos e contribuição para o microclima urbano. Em seguida, é abordada a questão do déficit habitacional e a qualidade ambiental nos conjuntos habitacionais.

Romero (2015) destaca que o desenho de espaços públicos não é apenas o resultado da disposição dos edifícios e fachadas, mas a criação de experiências e de um espaço articulado e apto para o uso coletivo a que se destina. O ambiente externo deve ser pensado como um espaço distinto, a partir das características do meio, de modo a proporcionar conforto para os seus usuários.

A autora aponta ainda a importância do desenho de espaços externos urbanos condicionados e adaptados às variantes locais, como a topografia, latitude, biodiversidade, superfície do solo, além dos impactos da massa construída. Nesse contexto, a concepção bioclimática do espaço público visa obter, na escala urbana, o que a arquitetura bioclimática obtém no edifício, através da escolha dos materiais superficiais, espaços do som, a estética da luz e os atributos da cor.

O desenho bioclimático do espaço urbano propõe uma concepção de ruas, calçadas, edifícios e espaço entre os edifícios a partir da sua interação com as características do meio. Diversos autores destacam em seus trabalhos a importância do desenho urbano adequado ao lugar. Olgyay (1963) propôs critérios para a seleção do sítio, o tecido urbano, as condicionantes dos espaços públicos e a cobertura vegetal e o paisagismo. Oliveira (1988) elencou um conjunto de categorias de análise da forma urbana, que é ao mesmo tempo, definidor da forma e indicador de projeto, e pode ser utilizado para a análise do espaço urbano como um todo, como: a conformação espacial, uso do solo, rugosidade e porosidade, orientação, propriedades dos materiais superficiais, cor e textura.

Givoni (1989) também destacou os elementos da forma urbana que atuam no clima urbano, referentes à localização, como o tamanho e densidade; orientação e dimensão das vias; detalhes arquitetônicos dos edifícios e áreas verdes. Romero (2013) estabeleceu critérios para diferentes tipos de clima, tanto para a morfologia urbana, como as características da forma, as ruas, os lotes e a dimensão dos espaços públicos; quanto para a seleção do sítio, como a localização, ventilação e insolação.

Para Higuera (2019), o urbanismo bioclimático deve adequar o desenho urbano às condicionantes particulares do clima e território, de forma que cada situação geográfica gere um traçado urbano singular e característico. A autora define seis princípios geradores do urbanismo bioclimático: 1) um traçado que responda à insolação e aos ventos; 2) ruas adaptadas à topografia; 3) áreas verdes adequadas às demandas de umidade e evaporação ambiental; 4) quadras de acordo com a

orientação de fachadas e adequada proporção de pátios; 5) parcelamento do solo que proporcione edifícios bem orientados e 6) tipologia diversificada, de acordo com os ventos e a insolação.

Desta forma, é possível se utilizar de estratégias amplamente estudadas, no processo de concepção do desenho urbano, com o objetivo de respeitar as condicionantes locais e fornecer qualidade ambiental e de vida para a população. Dentre as estratégias que podem ser utilizadas, destaca-se, no presente estudo, as referentes à adaptação das zonas de calor, com o objetivo de promover conforto térmico e qualidade de vida nos espaços públicos, como: o uso de materiais superficiais específicos, os pavimentos brandos e o uso da vegetação.

3.1 Uso de pavimentos brandos para a adaptação de ICU

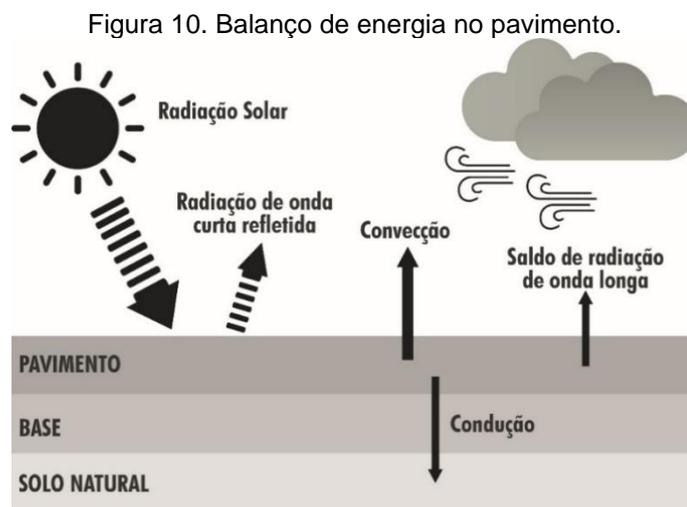
As propriedades termodinâmicas dos materiais de superfície ocasionam alterações no balanço de energia e no clima urbano. Uma das medidas para a mitigação e adaptação das zonas de calor no espaço urbano é a adoção de materiais brandos. Maruyama (2020) destaca o uso da terminologia “pavimento brando”, ao invés da denominação “pavimento frio”, ou “pavimento fresco”, adotada a partir da tradução do trabalho de Gartland (2010), uma vez que a autora não considera materiais que atingem até 50°C como frios.

Dito isso, as últimas décadas apresentaram grandes avanços no estudo das ilhas de calor urbanas e nas estratégias para a mitigação de seus efeitos. Diversas pesquisas abordam a combinação de diferentes estratégias para adaptar as cidades à inevitável urbanização e ação antrópica. Akbari (1992) apresentou a influência do uso conjunto de coberturas e pavimentos brandos com a vegetação, obtendo como resultados uma diminuição na temperatura urbana. Akbari et al. (2016) mostraram que a redução da temperatura das cidades ocasiona uma diminuição no consumo de energia nos edifícios, proporciona conforto térmico ao pedestre e retarda o efeito das reações de poluição fotoquímica, nocivas à saúde.

O balanço térmico da estrutura dos pavimentos depende da quantidade de radiação solar absorvida e armazenada, da radiação infravermelha liberada, do calor transferido para a atmosfera por convecção, do calor armazenado na massa do material e do calor conduzido para o solo. A escolha e o entendimento do tipo de pavimentação adequada é importante, pois a condutividade depende de fatores como o tipo de mistura, agregados utilizados, porcentagem dos componentes da mistura e

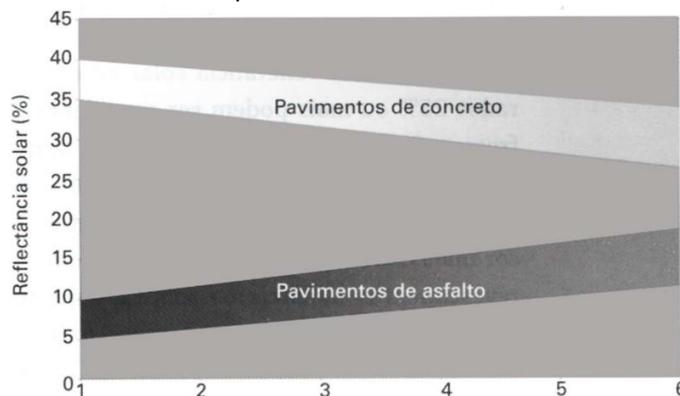
o nível de compactação (VUJOVIC et al., 2021). A Figura 10 apresenta o balanço de energia nos pavimentos urbanos.

Quanto aos pavimentos convencionais utilizados no Brasil, podem-se dividir em rígidos e flexíveis. Em relação ao tipo de revestimento, distinguem-se os pavimentos de concreto de cimento Portland e os pavimentos asfálticos (MARUYAMA, 2020). Segundo Gartland (2010), os pavimentos flexíveis, ou asfálticos, são tradicionalmente pretos ou cinza, com valores de refletância solar baixos, de 5 a 10%. Entretanto, à medida que envelhecem, tornam-se mais claros e mais refletivos.



Fonte: Adaptado de (VUJOVIC et al., 2021, p.465).

Figura 11. Refletância solar dos pavimentos convencionais de acordo com o tempo.



Fonte: (GARTLAND, 2010, p.86).

Por outro lado, os pavimentos em concreto de cimento Portland apresentam tonalidades mais claras que o asfalto e maiores níveis de refletância, entre 25 e 35% e, com o passar do tempo, tendem a apresentar menor refletância devido ao acúmulo de sujeira (Figura 11). Mas, ainda assim, os pavimentos de concreto de cimento Portland apresentam temperaturas de superfície mais amenas.

Tendo em vista que representam de 25% a 50% das superfícies totais das cidades e são os maiores contribuintes do fenômeno das ICU, Santamouris (2013) destacou o papel das propriedades térmicas dos pavimentos no espaço urbano. Quanto ao albedo, o valor da refletividade do material é determinado a partir da cor e rugosidade – cores claras apresentam menor absorvidade ao espectro solar da radiação. Segundo o autor, a emissividade é o fator mais importante que afeta a temperatura de superfície dos materiais durante o período da noite. E a permeabilidade dos pavimentos contribui para a diminuição da temperatura de superfície.

Santamouris (2013) apresenta cinco técnicas para a redução da temperatura de superfície dos pavimentos: 1) aumento do albedo (pavimentos refletivos); 2) aumento da permeabilidade das superfícies (pavimentos permeáveis); 3) aumento da capacidade de armazenamento térmico a partir da adição de elementos com alta capacidade térmica ou armazenamento de calor latente; 4) uso de sistemas mecânicos externos, como circulação subterrânea de água e 5) fornecimento de sombra às áreas pavimentadas (vegetação).

Gartland (2010) também discorre sobre as propriedades térmicas dos materiais e afirma que os pavimentos mais quentes tendem a ter uma tonalidade escura, com menores valores de refletância solar, abaixo de 25% e podem chegar aos 65°C ou mais. Já os pavimentos brandos apresentam temperaturas reduzidas em até 15°C ou mais. A autora apresenta duas maneiras de tornar os pavimentos brandos, que serão abordadas a seguir: 1) o aumento de sua refletância solar ou 2) o aumento da sua capacidade de armazenar e evaporar água. A Tabela 2 apresenta o albedo de diferentes tipos de pavimentos utilizados no tecido urbano, em relação ao solo natural e a grama.

Tabela 2. Albedo de diferentes tipos de pavimentos.

Material	Albedo	
	Faixa	Médio
Concreto Asfáltico (CA)	0,05 – 0,15	0,10
CA com Capa Reflexiva	0,20 – 0,30	0,20
Concreto Portland	0,15 – 0,35	0,25
CA Permeável	0,08 – 0,12	0,10
Concreto Portland Permeável	0,18 – 0,28	0,25
Solo	0,21 – 0,23	0,22
Gramma	0,18 – 0,20	0,19

Fonte: Li et al. (2014 apud BRITO e HELLER, 2016, p.23).

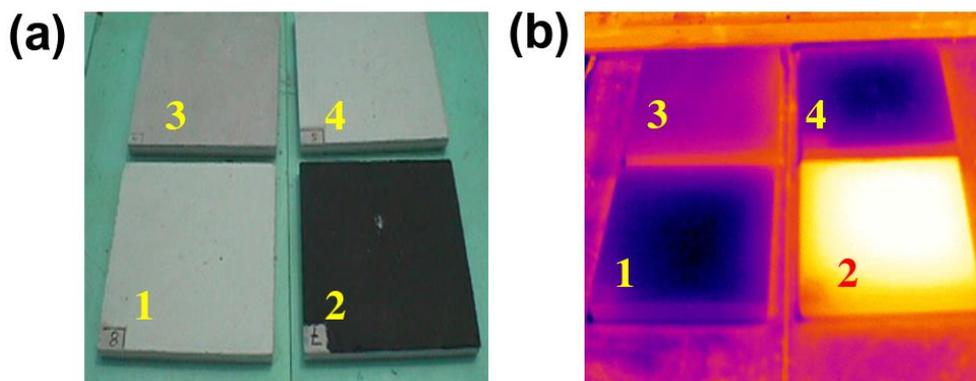
3.1.1 Tipos de pavimentos brandos

Pavimentos com alta refletância – PAR

O primeiro método para diminuir a temperatura de superfície dos pavimentos e torná-los brandos é o aumento do albedo do material. Desta forma, através do aumento da refletância das superfícies urbanas, obtém-se uma redução de calor sensível liberado para a atmosfera, de ganho de calor solar e do fluxo de radiação infravermelha térmica para a atmosfera, além de reduzir a necessidade de iluminação no período da noite e aumentar a durabilidade dos pavimentos. O processo de “perturbação radiativa negativa” pode ajudar na adaptação dos efeitos do aquecimento global (AKBARI e MATTHEWS, 2012).

Segundo Santamouris (2013), tal resultado pode ser obtido a partir: do uso de pinturas refletivas brancas na superfície do material; pintura colorida com adição de partículas refletivas do espectro infravermelho; uso de cores mais claras nos agregados ou utilização de tinturas com alternância de cores na superfície dos pavimentos. A Figura 12 apresenta na primeira imagem (a) quatro pavimentos de concreto pintados com cores frias (1 e 4), preto (2) e um não pintado (3). A imagem (b) apresenta os pavimentos na visão infravermelha, e a diferença de refletância solar é traduzida na diferença de temperatura de superfície.

Figura 12. Pavimentos de concreto pintados com diferentes cores.



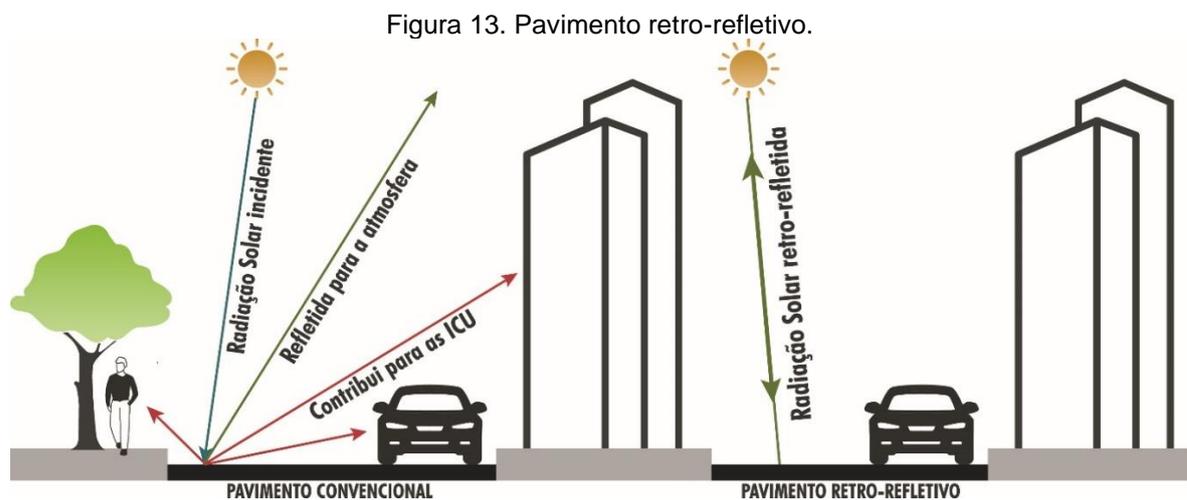
Fonte: (SANTAMOURIS, SYNNEFA e KARLESSI, 2011, p.3086).

Maruyama (2020), apresenta duas estratégias para tornar os pavimentos brandos: a) uso de insumos mais claros e b) uso de pinturas especiais. Anupam et al. (2021) realizaram uma revisão de literatura das principais limitações dos pavimentos brandos atuais e das recentes tecnologias desenvolvidas para suprir tais problemas. O estudo apresenta cinco métodos para tornar um pavimento refletivo, ao aplicar: 1)

camada de tinta refletiva na superfície do pavimento; 2) cobertura colorida reflexiva infravermelha no pavimento; 3) cobertura termocromática na superfície; 4) incorporar agregados refletivos na construção do pavimento; 5) cinzas volantes e escória na construção de pavimentos de concreto.

Entretanto, o aumento do albedo dos materiais no contexto urbano requer dois cuidados. O primeiro é relativo à manutenção exigida por materiais de cores mais claras que, ao longo do tempo, tendem a perder sua coloração devido ao tráfego e sujeiras, e dessa forma, a reduzir os valores de refletividade. O segundo é relativo ao seu comportamento na geometria urbana, pois, o albedo elevado ocasiona um alto percentual de radiação solar refletida e incidida nos edifícios do entorno, e até mesmo nos usuários, devendo-se ter cuidado também com o ofuscamento dos motoristas e pedestres.

Desta forma, o uso de pavimentos claros em rodovias diminui a visibilidade da demarcação da via e pode aumentar o risco de acidentes. Quando aplicado em calçadas, pode ocasionar o ofuscamento dos pedestres e motoristas, em superfícies com albedo muito alto (>0.50). Tal fator deve ser considerado no planejamento dos espaços públicos, entretanto, devem-se analisar as tecnologias e opções existentes para resolver os problemas de cada local.



Fonte: Adaptado de Anupam et al. (2021, p.4).

Kinouchi et al. (2003 apud VUJOVIC et al., 2021) desenvolveram uma pintura de cor escura com alto albedo e baixo brilho e aplicaram ao pavimento asfáltico, obtendo resultados de redução de até 15°C em relação ao pavimento asfáltico convencional. Outra forma de resolver tal questão é o uso de pavimentos retro-

refletivos, que possuem a capacidade de refletir a radiação solar na mesma direção de sua incidência (ANUPAM et al., 2021) (Figura 13).

Os pavimentos brandos podem ser aplicados tanto em construções novas quanto em construções existentes. Seu uso é reconhecido e incentivado pela certificação Leadership in Energy and Environmental – LEED – para novas construções. A certificação premia com créditos novas construções e projetos que utilizem pavimentos brandos em pelo menos 50% do espaço urbano do projeto. No caso de construções existentes, são premiados com um crédito os projetos que apresentem, a partir de 25% da área com estratégias de pavimento brando, com dois créditos para 50% da área e três créditos para 75% da área com estratégias de pavimentos brandos, que são: sombreamento dos pavimentos com o uso de vegetação, adoção de materiais com alta refletância solar e pavimentos permeáveis (TRAN e POWELL, 2009 apud MARUYAMA, 2020).

Maruyama (2020) apresenta os principais tipos de pavimentos com alta refletância – PAR, dividindo-os em: 1) pavimentos com alta refletância com insumos mais claros e 2) pavimentos com pinturas especiais (Tabela 3).

Tabela 3. Tipos de pavimentos com alta refletância - PAR.

Pavimentos com alta refletância - PAR	
1) Pavimentos com alta refletância com insumos mais claros	2) Pavimentos com pinturas especiais
Pavimento de concreto convencional	Filme hidrofugante (asfalto, renovação)
Pavimento de concreto com cimento branco	Selantes asfálticos coloridos e capas selantes (asfalto, renovação)
Pavimento à base de dióxido de titânio	Pinturas com alta reflexão
Whitetopping	Pinturas de baixo brilho
Pavimento à base de resinas naturais	
Técnicas mistas	

Fonte: Adaptado de Maruyama (2020).

Akbari e Matthews (2012) afirmam que o uso de pavimentos brandos mitiga os efeitos das ilhas de calor de verão e aumenta a qualidade do ar e o conforto térmico. Os autores defendem que o uso de coberturas e pavimentos brandos é vantajoso e

pode ser implementado imediatamente, independente das negociações internacionais de limite das emissões de CO₂. Além disso, propõem uma campanha internacional para o uso de materiais refletivos em coberturas e pavimentos, tanto em construções novas quanto reformas, em regiões de climas temperado e tropical.

Akbari, Menon e Rosenfeld (2009) analisaram os efeitos globais do retrofit permanente de coberturas e pavimentos urbanos em regiões tropicais e temperadas, com o uso de materiais refletivos e obtiveram o equivalente à compensação de 44 Gt (gigatoneladas) de CO₂ emitido. Menon et al. (2010) realizaram simulações para quantificar os efeitos na temperatura e "perturbação radiativa negativa" com o aumento do albedo de coberturas e pavimentos em áreas urbanas, e obtiveram uma redução da temperatura de superfície de aproximadamente 0,008K para cada aumento de 0,0003 de albedo das superfícies.

Werneck (2018) verificou o uso de revestimentos de cobertura e pavimentos com diferentes valores de refletância e emitância na temperatura do ar e temperatura média radiante em espaços públicos abertos em Brasília, através de simulação computacional. No cenário com o uso de pavimentos brandos, a análise obteve uma discreta redução da temperatura do ar e reduções mais expressivas na temperatura de superfície.

Maruyama (2020) analisou as possibilidades de uso de pavimentos brandos e infraestrutura verde para a mitigação das ICU's em São Paulo, e buscou quantificar os benefícios de atenuação de temperatura que eles podem trazer, por meio de simulações computacionais. O estudo obteve resultados positivos de redução de até 0,45°C na temperatura do ar no verão e de até 10,27°C na temperatura de superfície. A autora fez recomendações de acordo com o uso: a) nas vias: pavimento brando de Alta Reflexão - PAR de concreto de alto albedo; b) calçadas: pavimento permeável de cor clara; c) ciclovias: pavimento brando PAR de concreto permeável.

Pavimentos Permeáveis - PP

Outra estratégia para amenizar a absorção do calor nos pavimentos e torná-los brandos, é o uso de pavimentos permeáveis ou porosos. São considerados pavimentos permeáveis aqueles que permitem a absorção da água através de estruturas porosas, possibilitando sua infiltração pelo solo.

Assim como os pavimentos convencionais, consistem em uma mistura de materiais cimentícios, exceto por uma fração reduzida de agregados, o que aumenta

a porcentagem de vazios no interior do material. Podem ser utilizados para tráfego leve de veículos e de cargas, em ruas locais ou estacionamentos e possuem uma superfície permeável que permite a infiltração de água para as camadas abaixo da base. A água pode ser armazenada em um reservatório de agregados, onde é lançada para o sistema de drenagem, ou ser infiltrada pelo solo abaixo (VUJOVIC et al., 2021). A Figura 14 apresenta exemplo de diferentes tipos de pavimentos permeáveis aplicados no espaço urbano.

Figura 14. Diferentes tipos de pavimentos permeáveis: da esquerda para direita, de concreto poroso, blocos intertravados Octabrick, blocos vazados de concreto e blocos de concreto Rima.



Fonte: (PINTO, 2011, p.38)

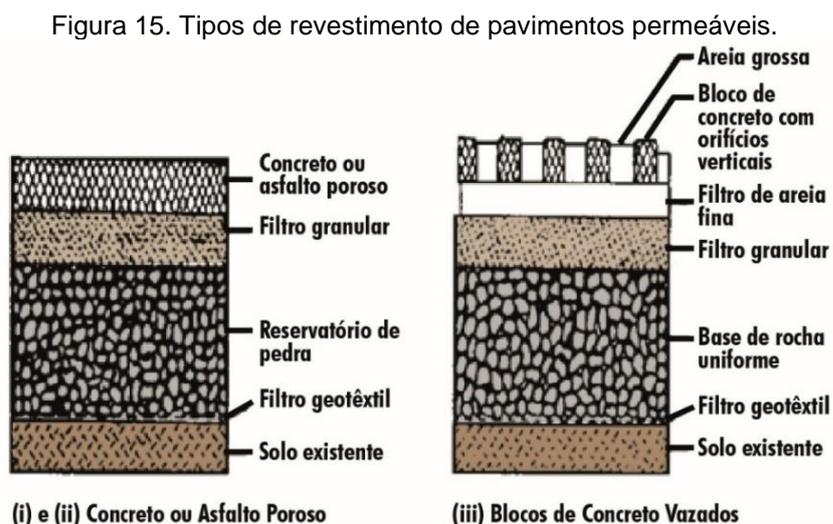
Sua aplicação no ambiente urbano traz diversos benefícios ambientais, como a redução ou eliminação do escoamento de águas pluviais que ocorrem nas superfícies dos pavimentos impermeáveis, o que proporciona uma menor alteração do ciclo hidrológico, e permite a infiltração da água como nos solos naturais (SILVA, 2019). Além disso, segundo Tennis, Leming e Akers (2004), esse revestimento atua também no suporte das cargas exercidas pelo tráfego e realiza um tratamento natural da água escoada, reduzindo ou até eliminando os poluentes através da percolação pela estrutura interna do concreto permeável e do solo.

Em relação à temperatura superficial, os pavimentos permeáveis permitem o escoamento da água durante os dias de chuva, que é evaporada nos dias de sol. O processo de evaporação da água retira o calor do pavimento, tornando-o brando e mantendo-o menos quente sob a incidência solar (GARTLAND, 2010). Além disso, outro aspecto que atua na redução do calor no espaço urbano, é a manutenção de umidade e ar no solo, o que auxilia no desenvolvimento e proteção de árvores e vegetação urbana, reguladoras naturais de temperatura, uma vez que os pisos

impermeáveis dificultam a chegada de ar e água até as raízes (TENNIS, LEMING e AKERS, 2004).

Entretanto, deve-se ter cautela quanto ao seu uso. Qin e Hiller (2016) apontam que o pavimento permeável só será brando se for mantido umedecido, caso contrário pode apresentar temperaturas mais elevadas que o piso convencional. Desta forma, seu uso é indicado para locais com climas quentes e úmidos, onde a chuva desempenha o papel de refrigerar e umedecer o pavimento. Seu uso em clima seco pode gerar temperaturas ainda mais elevadas, devido aos poros do pavimento, de forma que é sugerido que, neste caso, ele seja molhado com águas residuais (BRITO e HELLER, 2016).

De acordo com Suzuki, Azevedo e Kabbach Júnior (2014), os pavimentos permeáveis podem ser divididos em quatro tipos, conforme a sua composição: 1) revestimento e reservatório porosos, e a água é liberada a partir da infiltração no solo; 2) manta permeável e reservatório e revestimento poroso, permite que a água escoe por meio de coletor, e não por infiltração; 3) revestimento impermeável e coletor que envia a água a um reservatório poroso, que é armazenada e infiltra no solo e 4) revestimento impermeável, possui coletor que envia a água ao reservatório. Silva (2019) apresenta três principais tipos de revestimento utilizados em pavimentos permeáveis: 1) asfalto poroso, 2) concreto poroso e 3) blocos vazados (Figura 15).



Fonte: Adaptado de Urbonas e Stahre (1993 apud ARAÚJO, TUCCI e GOLDENFUM, 2000, p.23).

Observa-se a importância e efetividade do uso de pavimentos refletivos e permeáveis para amenizar as temperaturas de superfície urbanas e adaptar os efeitos das zonas de calor, especialmente em climas temperados e tropicais. Tal discussão

se insere nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU, 2023), relacionado ao ODS 11, de “Cidades e Comunidades Sustentáveis”, que busca tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis.

Akbari e Matthews (2012) destacam uma maior dificuldade de implementação de pavimentos brandos, em relação à existência de uma legislação, normas ou informações ao público geral, que incentivem seu uso. A Lei Nº 4.522/2014, ou Lei das Calçadas de Teresina (TERESINA, 2014a, p.1) “estabelece novos padrões de calçadas e critérios para a sua construção, reconstrução, conservação e utilização de calçadas no Município de Teresina”. Entretanto, em relação à escolha dos materiais de superfície utilizados, a lei destaca apenas o uso de pisos monolíticos ou peças modulares e a priorização da acessibilidade dos usuários. Destaca-se também a ausência de diretrizes sobre o tipo de pavimentação asfáltica a ser utilizada nas vias, e a falta de preocupação com as consequências bioclimáticas dos materiais empregados.

Além disso, considerando as altas temperaturas da cidade de Teresina e o predomínio de clima quente e seco em boa parte do ano, será priorizado no presente estudo, o uso de pavimentos com alta refletância (PAR), que, como destacado anteriormente, são amplamente indicados para climas tropicais e temperados, de forma a reduzir os efeitos da alta incidência de radiação solar nas superfícies. Nesse âmbito, os pavimentos permeáveis possuem a limitação da necessidade de água para obter um maior desempenho na amenização das temperaturas, uma vez que o seu processo de resfriamento se dá através do processo de evaporação.

3.2 Vegetação no microclima urbano

A presença de vegetação no espaço urbano, em quantidade e disposição adequadas, desempenha um importante papel para a qualidade ambiental e de vida nas cidades. As áreas verdes não só contribuem para o embelezamento estético e cênico dos espaços públicos, como também garantem a manutenção da identidade ecológica local, a preservação do ecossistema no ambiente construído, além de atuar no microclima urbano e proporcionar conforto térmico, melhorando a ambiência urbana em diversos aspectos.

No âmbito do microclima, Oke (1987) afirma que a presença de cobertura vegetal é um indicativo do controle de temperatura, e sua ausência é um dos principais fatores que causam as ICU's. Andrade (2022) aponta a arborização urbana como uma das principais estratégias para a mitigação das ilhas de calor urbanas. Segundo Romero (2011), a vegetação atua sobre os elementos climáticos e contribui para o controle da incidência de radiação solar, temperatura e umidade do ar, direção dos ventos, ciclo hidrológico e diminuição da poluição do ar.

Mascaró e Mascaró (2015) afirmam que a presença de vegetação influencia diversos aspectos, como o sombreamento e iluminância natural, temperatura e umidade relativa do ar e ventilação urbana, além de atuar na amenização de ruídos e de poluição atmosférica. Abreu (2008) apresenta as principais consequências da ausência de cobertura vegetal no espaço urbano: aumento da incidência de radiação solar direta e consequente aumento da temperatura do ar, redução da umidade relativa do ar, alteração do regime de ventos, aumento da emissão de radiação de onda longa, alteração do regime de chuvas, entre outros.

Segundo Ferreira (2019), os efeitos da vegetação dependem de diversos aspectos como: densidade das folhas, tipo de folhas e galhos, porte, disponibilidade de água no solo, e localização. Para Mascaró e Mascaró (2015), sua ação está relacionada à refletância, morfologia, rugosidade e resistência da superfície da folha. Romero (2011) apresenta as condições de Iazard e Guyot (1980 apud ROMERO, 2011) para que a vegetação possa exercer função na escala microclimática, que determinam que a área verde constitua um volume representativo na escala urbana, de forma que a massa vegetal represente 30% da superfície construída.

Shinzato (2009) estudou a influência da vegetação na qualidade ambiental urbana e dividiu os seus benefícios em quatro aspectos: 1) influência sobre os aspectos climáticos; 2) influência sobre os aspectos ecológicos relacionados à água; 3) influência sobre os aspectos da vida humana e 4) influência sobre os aspectos relacionados à fauna. Romero (2015) verificou a diferença de microclimas entre as áreas com vegetação e as áreas não plantadas e apresentou um comparativo entre os dois ambientes, com diferenças relacionadas à temperatura, velocidade do vento, turbulência, umidade do ar e temperatura radiante (Tabela 4).

Tabela 4. Diferenças entre áreas verdes e áreas não plantadas.

Áreas verdes	Áreas não plantadas
Capacidade calorífica e condutibilidade térmica menor	Capacidade calorífica e condutibilidade térmica maior
Reflexão pequena (albedo baixo)	Reflexão grande (albedo alto)
Taxa de evaporação alta	Taxa de evaporação baixa
Ar menos contaminado	Ar mais contaminado
Velocidade do vento reduzida	Velocidade do vento alta

Fonte: (ROMERO, 2011, p.89).

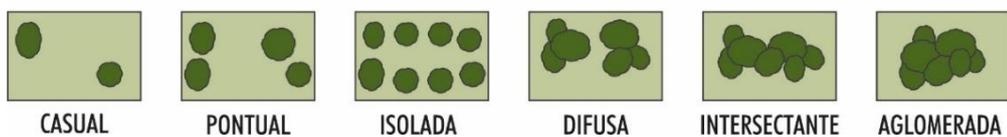
Labaki et al., (2011) destacam a importância de estudos sobre a sazonalidade e fenologia das árvores, que mudam a composição e a estrutura da planta em determinados períodos do ano, o que altera suas propriedades termorreguladoras. Além disso, as árvores costumam ocorrer em diferentes composições no espaço urbano, obtendo resultados relativos de conforto. Os tipos de composição encontrados podem ser “puras (conjuntos de uma só espécie) ou mistas (de duas ou mais espécies), e homogêneas (árvores de mesma idade) ou heterogêneas (árvores de idade e crescimento diferenciado) (LABAKI et al., 2011, p.25)”. A Figura 16 apresenta os diferentes tipos de disposição e densidade dos indivíduos arbóreos.

Figura 16. Disposição e densidade da estrutura vegetal para classificação da estrutura arbórea.

DENSIDADE DE ÁRVORES



DISPOSIÇÃO DOS INDIVÍDUOS



Fonte: Adaptado de Labaki et al. (2011, p.26).

Diversos estudos abordam a eficácia e os benefícios da vegetação no espaço urbano. Bueno-Bartholomei (2003) avaliou a atenuação da radiação solar por diferentes espécies arbóreas e o conforto térmico proporcionado, a partir de dados de radiação solar incidente, temperaturas do ar e de globo, assim como valores de umidade relativa. As espécies analisadas foram: *Senna spectabilis*, *Schinus molle*, *Bauhinia variegata*, *Cingidium jambolana*, *Clitoria fairchildiana*, *Cedrela fissilis* e

Ficus benjamina. Os resultados mostraram que a *Bauhinia variegata* teve um dos melhores desempenhos quanto à atenuação da radiação solar e melhoria do conforto térmico.

Abreu (2008) analisou o raio de influência no conforto térmico alcançado por cinco espécies arbóreas encontradas na região de Campinas, em São Paulo: Ipê-Amarelo (*Tabebuia chrysotricha* (Mart. ex DC.) Stand.), Jacarandá (*Jacaranda mimosaeifolia* D. Don.), Jambolão (*Syzygium cumini* L.), Mangueira (*Mangifera indica* L.), e Chuva de Ouro (*Senna siamea* L.). A pesquisa realizou medições de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, em pontos situados à sombra da copa e ao sol, em diferentes distâncias do tronco e obteve como resultados uma maior contribuição para o conforto térmico de agrupamentos arbóreos.

Shinzato (2009) avaliou os efeitos da vegetação nas condições microclimáticas urbanas, a partir da premissa de que a presença de vegetação influencia o microclima do seu entorno imediato. A autora buscou quantificar a intensidade e distribuição espacial dos efeitos microclimáticos da vegetação e alterações de temperatura do ar e de superfície em nível do pedestre, a partir de simulações com o software ENVI-met e obteve como resultado a indicação do uso das árvores como estratégia para amenizar o efeito de ilha de calor nas metrópoles.

Sorte (2016) realizou uma avaliação do desempenho térmico de paredes verdes, compostas por diferentes espécies vegetais nativas do bioma Cerrado, a partir de simulação computacional com o software ENVI-met. Obteve como resultados que a espécie *Arrebidaea pulchra* possibilitou paredes verdes com menores temperaturas de ar e maiores índices de umidade relativa do ar na maioria das situações.

Ferreira (2019) examinou a relação entre a vegetação, temperatura de superfície e morfologia urbana na Região Metropolitana de São Paulo, espacial e temporalmente. Os resultados evidenciaram maior temperatura de superfície diurna e noturna nas áreas mais urbanizadas, em relação às áreas menos urbanizadas. A autora verificou a correlação alta e negativa entre a temperatura de superfície e os índices de vegetação, indicando o papel da vegetação tanto na atenuação das temperaturas superficiais, quanto na possível resiliência às situações extremas de temperaturas elevadas e baixa precipitação.

Andrade (2022) analisou a contribuição da vegetação para a melhoria do microclima urbano em Brasília, Distrito Federal. A autora identificou a influência de

diferentes espécies arbóreas nas Superquadras 308 e 309 Sul, como Ipê Roxo (*Handroanthus impetiginosus*), Jacarandá (*Jacaranda mimosifolia*) e Copaíba (*Copaifera langsdorffii*). Os resultados mostraram a eficácia da vegetação na diminuição da temperatura do ar em até 0,4°C em todos os cenários.

3.2.1 Temperatura e Umidade do ar

A ação da vegetação no microclima pode ser direta, através do sombreamento, que minimiza a conversão de energia radiante em calor sensível e diminui a temperatura de superfície; ou indireta, através da evapotranspiração, que atua nas superfícies e no ar adjacente, a partir das trocas de calor.

Segundo Mascaró e Mascaró (2015), o sombreamento é uma das funções mais importantes da vegetação, e tem como principal finalidade, amenizar o rigor térmico nos períodos mais quentes. Além disso, influencia a iluminação natural do recinto urbano e dos edifícios do seu entorno. Existem critérios que devem ser levados em consideração na escolha das espécies arbóreas, como: porte, tipo de copa, folhagem e sua transmitância luminosa, e a localização das espécies, que deve considerar a infraestrutura existente, de forma que não interfira na harmonia dos elementos urbanos. A presença de árvores influencia também o resfriamento passivo nas ruas, com destaque para os cânions urbanos, de forma que os efeitos da orientação e da geometria urbana são minimizados.

O sombreamento decorrente da vegetação atua também na proteção de fachadas nos edifícios. A diminuição da temperatura de superfície das paredes externas influencia a temperatura interna do edifício e ocasiona uma redução do uso de refrigeração artificial e conseqüente economia de energia.

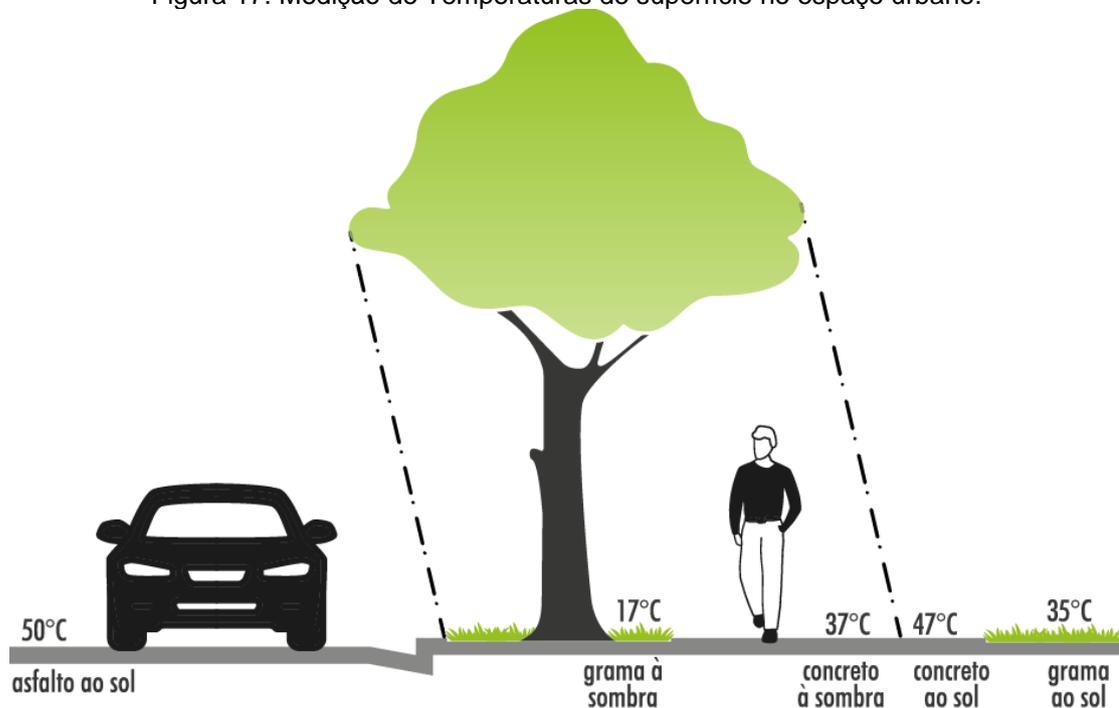
O uso de árvores no ambiente urbano serve também como estratégia para tornar os pavimentos brandos, ao diminuir a radiação solar absorvida pelos materiais (AKBARI et al., 2016). Shinzato (2009) aponta que a vegetação pode ser utilizada para o sombreamento de vias e espaços de passagem, amenizando o aquecimento dos materiais com baixo albedo, como o asfalto, e atuando na liberação do calor acumulado durante a noite. De acordo com Akbari (2001), o uso de vegetação para o resfriamento dos pavimentos é mais eficiente que a substituição dos materiais de superfície por materiais de cor mais clara ou alto coeficiente de reflexão, pois os

materiais têm a capacidade de armazenar calor, e mesmo uma superfície de cor branca pode atingir até 10°C a mais que a temperatura ambiente.

As folhas possuem a capacidade de absorver, refletir e transmitir a energia incidente, suas propriedades radiativas dependem do comprimento de onda da radiação e seus valores são definidos a partir da sua estrutura interior e as propriedades radiativas dos pigmentos das plantas (clorofila e carotenóides) (OKE, 1987). Shinzato (2009) afirma que as folhas possuem mecanismos para evitar o estresse térmico com temperaturas elevadas, como altos valores de albedo ou a diminuição da área de superfície voltada para a radiação solar.

Rivero (1986) destaca que as folhas possuem uma alta absorção, de maneira que uma pequena quantidade de radiação é transmitida por transparência através da folha, e o restante, entre 15% e 30%, é refletida. Uma parte da energia absorvida torna-se fisiologicamente eficaz e transforma-se em energia química para a fotossíntese, e a outra em calor latente. O autor afirma ainda que a vegetação absorve cerca de 90% da radiação visível e 60% da radiação infravermelha, sendo o restante refletido ou transmitido pelas folhas.

Figura 17. Medição de Temperaturas de superfície no espaço urbano.



Fonte: Adaptado de Laurie (1978) apud Mascaró e Mascaró (2015, p.40).

Em relação à reflexão, as árvores possuem em geral baixo valor de albedo, devido à pigmentação escura das folhas e às múltiplas reflexões geradas em folhas

individuais a partir da absorção de luz pela camada mais alta das copas. Em nível de comparação, as áreas gramadas podem refletir até 20 a 22% de luz solar, e as árvores de 12 a 15% (ERELL, PEARLMUTTER e WILLIAMSON, 2011 apud MINELLA, 2014). Os efeitos no microclima podem ser observados em medições de temperatura de superfície, como mostra a Figura 17.

De forma indireta, a vegetação atua no resfriamento do ar através da umidade proveniente da evapotranspiração. A evapotranspiração das plantas não só auxilia no controle da temperatura do ar, como também contribui para a conservação da umidade do solo e do ar. Sobre o fenômeno, Abreu (2008, p.19) destaca:

“Engloba dois processos biofísicos: a evaporação da água da superfície do solo e a transpiração; a evaporação é o fenômeno físico de transformação de calor sensível em calor latente e a transpiração é a perda da água de uma vegetação viva em particular pelas folhas (...), principalmente através dos numerosos estômatos nelas existentes, excluindo o fenômeno fisiológico como a duração e formação de orvalhos.”

Segundo Romero (2011), a combinação da evaporação e transpiração é o maior mecanismo pelo qual as árvores ajudam a controlar a temperatura urbana, criando espaços com temperaturas mais amenas, a partir do “fenômeno Oásis”, caracterizado por ilhas de frescor com baixas temperaturas, resultantes da razão entre o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente. Além disso, a evapotranspiração contribui para a diminuição da amplitude térmica urbana.

Em relação à conservação da umidade do solo, de acordo com Llandert (1982), a evaporação embaixo da copa de árvores pode ser até dez vezes menor do que em uma área não arborizada. O autor demonstra que o aumento da umidade do ar decorrente da vegetação ocorre de três maneiras: 1) evapotranspiração física direta das chuvas; 2) transpiração fisiológica das plantas e 3) clorovaporização do vapor de água durante a assimilação clorofílica de CO₂ atmosférico, a partir dos raios solares.

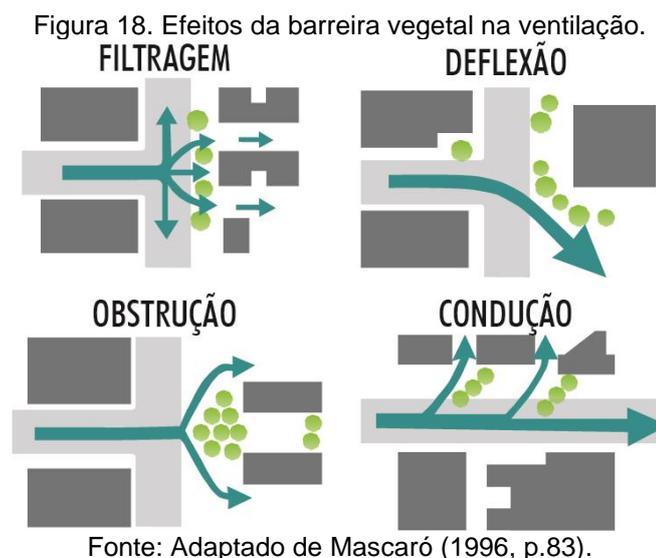
3.2.2 Ventilação urbana

A presença de cobertura vegetal influencia o comportamento dos ventos, o que afeta a sensação térmica dos usuários e o conforto térmico no espaço urbano. Segundo Mascaró e Mascaró (2015), dentre os fatores que determinam o

desempenho da vegetação com relação à ventilação, destacam-se as características do local, como a permeabilidade e perfil do espaço, orientação em relação aos ventos predominantes, densidade ocupacional e gabarito das edificações. Além disso, as características das árvores, como o porte, a forma, a permeabilidade, o período de desfolhamento e a idade também são fatores determinantes para sua influência na ventilação local.

Erell, Pearlmutter e Williamson (2011) apontam que a eficácia da barreira arbórea depende de aspectos como: sua posição em relação ao fluxo de vento, da porosidade da barreira, da altura das árvores e da distância do ponto a ser protegido. Em relação à porosidade, suas propriedades são definidas a partir do tipo de árvore, da distância entre as árvores e da sobreposição entre as fileiras. Os autores afirmam ainda que uma barreira porosa (vegetação ou cercas vazadas) é mais efetiva que uma barreira sólida (muros, edifícios), pois evita a formação de turbulência na incidência de ventos fortes. Santiago et al. (2007 apud ZANLORENZI e SILVA FILHO, 2019) e Wu et al. (2013 apud ZANLORENZI e SILVA FILHO, 2019), em estudos realizados em túnel de vento, obtiveram o melhor efeito de barreira com 35% de porosidade, sugerindo o uso de valores de 30% a 40% como ideais.

Mascaró e Mascaró (2015) apresentam os quatro efeitos básicos da vegetação em relação ao vento: canalização do vento, deflexão do vento, obstrução, filtragem (Figura 18):



a) Canalização: fenômeno que se produz de maneira significativa quando há um corredor de árvores bem definido e relativamente estreito, ou seja, com largura menor que 2,5 vezes sua altura média.

b) Deflexão: a vegetação funciona como defletora do vento, ao alterar sua direção e velocidade. A posição e a distância da árvore ao edifício ou espaço aberto a ser ventilado influencia a trajetória do vento, redirecionando-o ou afastando-o.

c) Obstrução: bloqueio da passagem do vento devido a uma barreira de vegetação, reduzindo sua velocidade e atenuando seus efeitos na diminuição da temperatura do ar. Podem ser mais eficazes que barreiras sólidas, pois a redução de velocidade se dá de forma gradual.

d) Filtragem: capacidade da barreira de vegetação de reduzir a velocidade do vento e barrar resíduos transportados. Além disso, o uso de barreiras de vegetação possibilita relativo isolamento dos usuários no interior desses espaços.

3.2.3 Ruídos e Poluição do ar

As árvores e a vegetação em geral podem ser utilizadas para a redução da poluição sonora. O adequado desenho arbóreo, com uma cobertura densa e diferentes níveis de altura, permite resultados acústicos satisfatórios. A presença de um sistema verde diminui a intensidade do som e pode ser utilizado como barreira contra ruídos, com propriedades acústicas (ROMERO, 2011 e 2015).

Segundo Mascaró e Mascaró (2015), a ação da cobertura vegetal na diminuição da intensidade da poluição sonora depende de fatores relacionados às propriedades do som, como: o tipo, a origem, a intensidade e o volume. Em relação à vegetação, deve-se levar em conta as características da espécie, o arranjo espacial em relação à fonte emissora e receptora, a altura e a densidade da barreira.

Além das árvores, os gramados, cercas vivas e arbustos também desempenham função acústica, servindo como excelentes barreiras para o ruído produzido pelo trânsito de automóveis que se propaga paralelo ao solo. De acordo com Mascaró e Mascaró (2015, p.52):

“As árvores e vegetação em geral podem ajudar a reduzir a contaminação do ruído de cinco maneiras diferentes: pela absorção do som (elimina-se o som), pela desviação (altera-se a direção do som), pela reflexão (o som refletido volta a sua fonte de origem), pela refração (as ondas sonoras mudam de direção ao redor de um objeto), por ocultamento (cobre-se o som indesejado com outro mais agradável). (...). A vegetação pode, também,

dissimular sons, na medida que se escuta seletivamente os sons da natureza sobre os ruídos da cidade.”

Em relação à qualidade do ar, as árvores removem os poluentes através da retenção de partículas na superfície da folha, podendo estas ficarem incorporadas ao solo através do contato com a folha, serem levadas pela água da chuva ou, retornar à atmosfera (SHINZATO, 2009). Segundo Romero (2011), as árvores atuam na redução dos gases poluentes, seja através da absorção direta do ozônio, ou na redução da temperatura do ar, o que reduz a emissão de hidrocarboneto e a formação de ozônio.

De acordo com Mascaró e Mascaró (2015), as folhas das árvores absorvem os gases poluentes decorrentes da queima incompleta pelos automotores de seus combustíveis e prendem partículas sobre sua superfície. Os efeitos da vegetação sobre poeiras e partículas podem ser considerados sob dois aspectos: o efeito aerodinâmico, que depende de modificações na velocidade do vento provocadas pela vegetação e o efeito de captação pelas diversas espécies vegetais. Grey e Deneke (1978 apud MASCARÓ e MASCARÓ, 2015) destacam que quatro processos estão envolvidos na amenização da poluição do ar pelas plantas: a filtragem ou absorção, oxigenação, diluição e oxidação.

Observa-se a importância da presença de vegetação no espaço urbano e seus inúmeros ganhos para o conforto térmico, proporcionando maior qualidade ambiental e de vida. Destaca-se no presente trabalho o seu uso relacionado aos pavimentos brandos, de forma a verificar a efetividade das estratégias e sua utilização de forma conjunta, com o objetivo de amenizar a temperatura do ar e de superfície na escala microclimática.

3.3 Arquitetura Bioclimática em Conjuntos Habitacionais

O déficit habitacional é um problema social presente no Brasil desde meados do século XIX, e atinge majoritariamente a população de baixa renda. Atualmente, segundo a Fundação João Pinheiro (2019), o déficit habitacional no país registrou 5,876 milhões de moradias no ano de 2019.

Com o objetivo de amenizar a situação, o Estado iniciou, a partir da década de 1930, a produção em larga escala de conjuntos habitacionais populares, através da implantação de políticas públicas, ao longo das décadas, como o Instituto de

Aposentadorias e Pensões (IAP), a Fundação Casa Popular (FCP), o Banco Nacional da Habitação (BNH), o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), e mais recentemente o Casa Verde Amarela (CVA), com a oferta de financiamentos habitacionais populares e promoção de moradias adequadas à população de baixa renda (SILVA e TOURINHO, 2015).

Atualmente, de acordo com o Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR, 2023), a política nacional de habitação é regida pelo Plano Nacional de Habitação (PlanHab), que tem como objetivo garantir o direito à moradia digna. Além disso, também é regulamentada pelo Sistema Nacional de Habitação de Interesse Social (SNHIS), que estabelece as diretrizes para a implementação da política habitacional em âmbito nacional.

Entretanto, observa-se que a construção em massa de habitações de interesse social ocasionou diversos problemas urbanos consequentes à sua implantação, como a segregação socioespacial, associada à localização desses conjuntos em regiões periféricas das cidades, ou críticas quanto à qualidade ambiental destes espaços, relacionadas à tipologia padronizada, escolha dos materiais construtivos e desenho urbano sem levar em consideração o lugar, o que contribui para a produção de cidades cada vez menos resilientes e sustentáveis. Segundo Roméro e Ornstein (2003 apud VIEIRA e ROMERO, 2013, p.2):

“Na prática, porém, a construção de conjuntos habitacionais nas últimas décadas no Brasil, tem adotado soluções urbanísticas, arquitetônicas e construtivas repetitivas e em larga escala, para atender uma população heterogênea em termos de cultura, hábitos e atitudes (ROMÉRO e ORNSTEIN, 2003 apud VIEIRA e ROMERO, 2013).”

Desta forma, as habitações de interesse social são construídas sem grandes preocupações com os aspectos bioclimáticos, conforto ambiental e eficiência energética, fatores que contribuem para a qualidade ambiental e qualidade de vida da população. Quanto ao espaço interno das residências, observa-se uma deficiência na iluminação e ventilação naturais, e a padronização dos projetos arquitetônicos não respeita as diferenças entre as famílias e os indivíduos.

No âmbito do espaço exterior, estes locais são caracterizados pela adoção de materiais construtivos de baixo custo e qualidade, muitas vezes sem a preocupação

com os condicionantes climáticos e que representam um aumento da temperatura de superfície e do ar. Além disso, observa-se uma quase ausência de cobertura vegetal, e de preocupação com o desenho urbanístico e os fatores e elementos climáticos locais, tornando o espaço mais insalubre. Sobre o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), lançado no primeiro semestre de 2009, Rufino (2015, p.62 apud OLIVEIRA et al., 2019) afirma:

“De modo geral, técnicas construtivas, arranjos espaciais e programas das unidades, desempenho e conforto ambientais e padrão de implantação (do MCMV) não correspondem às diversidades urbanas, bioclimáticas, sociais, culturais, tecnológicas das regiões, municípios ou dos bairros (RUFINO, 2015, p.62).”

A inserção dos conjuntos habitacionais na malha urbana, de forma adequada e sustentável, aborda os aspectos morfológicos e condicionantes climáticos. Segundo Ferreira (2012), a qualidade da implantação depende da sua localização, que deve fornecer estrutura como equipamentos, acessibilidade em tempo adequado para as centralidades regionais e estar inserido no serviço de transporte público. No aspecto morfológico, o autor aponta como uma boa implantação a sua adequação à topografia e uma transição harmoniosa entre os espaços públicos e privados, através de um equilíbrio entre as edificações e as áreas verdes e livres, garantindo conforto ambiental e espaços externos públicos de qualidade. Nesse âmbito, o autor propõe quatro critérios de análise:

- a) paisagismo: áreas verdes e livres de qualidade, sombreadas, para a permanência e convívio dos moradores, permitindo a permeabilidade interna nos espaços exteriores do conjunto e que promovam uma transição gradual entre os espaços privados e públicos;
- b) formas de ocupação do terreno: a área construída deve permitir a permeabilidade dos ventos e a insolação adequada em todo o conjunto;
- c) áreas comuns e de lazer: espaços de integração entre os conjuntos e a cidade, a partir do adequado tratamento das áreas privadas, comunitárias, públicas e semipúblicas;
- d) densidade e dimensionamento: o conjunto deve se adequar à morfologia e à escala do município e da região em que está inserido, e ao déficit habitacional local.

Blumenschein et al. (2015) apresentaram uma metodologia de avaliação da qualidade de habitações de interesse social. Quanto à sustentabilidade ambiental do projeto urbanístico, os autores enumeram seis princípios para esses empreendimentos, com destaque no tópico 3. conforto ambiental, que se refere à ocupação com conformidade ao relevo; composição de aberturas e espaçamentos quanto à orientação solar e eólica; coerência da densidade construtiva em relação à orientação solar e eólica; otimização ou redução da luz proveniente do céu visível; uso de materiais de superfície adequados ao conforto térmico, acústico e luminoso; obstáculos a fontes de ruídos e minimização do efeito vale.

Em relação aos aspectos ambientais e condicionantes climáticos, Romero (2013) apresenta critérios para a escolha da localização do sítio aliados aos aspectos morfológicos, para diferentes tipos de clima, que devem ser aplicados para um desenho urbano bioclimático e podem ser utilizados para a análise dos conjuntos habitacionais (Tabela 5).

Tabela 5. Princípios climáticos e morfológicos para o desenho urbano.

Critérios para a escolha do sítio	A morfologia do tecido urbano
Localização: altitude e disposição dos ventos, barreiras, declives, caminhos das águas, velocidade da drenagem	Forma: aberta, fechada, dispersa, compacta, exposição aos elementos climáticos, espaçamento entre as construções, altura dos edifícios, barreiras e condução dos ventos, diferenças entre ambientes internos e externos
Ventilação: velocidade e orientação dos ventos dominantes, depressões e concentração de poluentes	Ruas: orientação solar e sombras, presença de vegetação, dimensão das calçadas, alinhamento das edificações, materiais de superfície, tamanho, disposição ao vento
Insolação: orientação, albedo, ganhos e perda de calor	Lotes: orientação, dimensões, forma, ventilação, ocupação, reflexões, fechamentos, sombreamento a partir dos edifícios no entorno e alinhamentos Espaços públicos: materiais de superfície, compacidade, sombra, vegetação, presença de água, umidade, albedo, luminosidade, ventilação

Fonte: Adaptado de Romero (2013), p.100-110.

O estudo da escala urbana e da qualidade ambiental dos conjuntos habitacionais é de grande importância. A sua reprodução em larga escala nos

municípios segue perpetuando o modelo defasado de planejamento urbano, sem preocupação com os critérios ambientais, o que torna as cidades menos resilientes e aumenta a incidência de ICU's no ambiente urbano. A adoção de estratégias bioclimáticas visa promover o conforto ambiental e a inserção adequada destes empreendimentos na malha urbana de forma positiva, e não somente como uma fonte de calor e poluição.

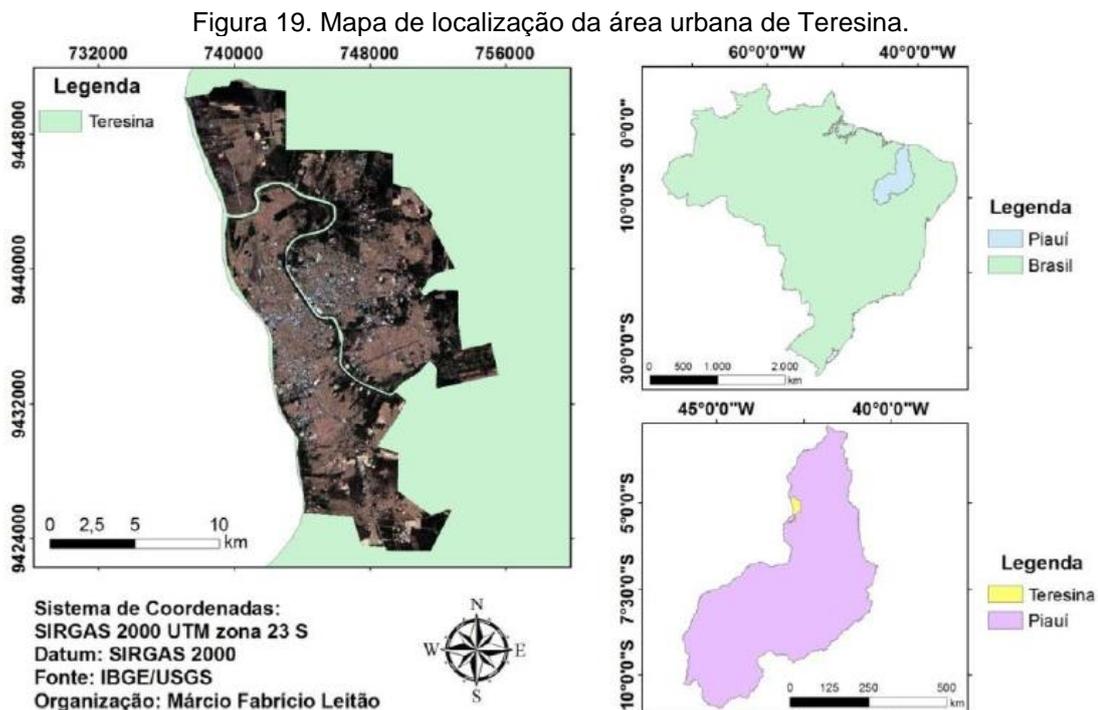
4

4. TERESINA: HISTÓRICO E ASPECTOS CLIMÁTICOS

Este capítulo abrange breve contexto histórico e panorama habitacional da cidade de Teresina, com os principais aspectos urbanísticos e ambientais, destacando a importância das políticas de habitação para a expansão e desenvolvimento da cidade. Em seguida, é apresentada a sua caracterização climática, com a descrição de seus elementos e fatores climáticos, para uma melhor compreensão das condicionantes locais.

4.1 Breve histórico e panorama habitacional

A cidade de Teresina, capital do Piauí, está localizada a 5° 05' 12" latitude Sul e 42° 48' 42" de longitude Oeste, próxima à linha do equador, na região Nordeste do Brasil, na área Meio-Norte. Situada entre dois rios, Rio Poti e Rio Parnaíba, é a única capital nordestina que não está localizada no litoral (Figura 19). Possui atualmente uma população estimada de aproximadamente 870.000 habitantes (IBGE, 2021a), distribuída em 123 bairros por sua extensão territorial de 1.391,23 km².



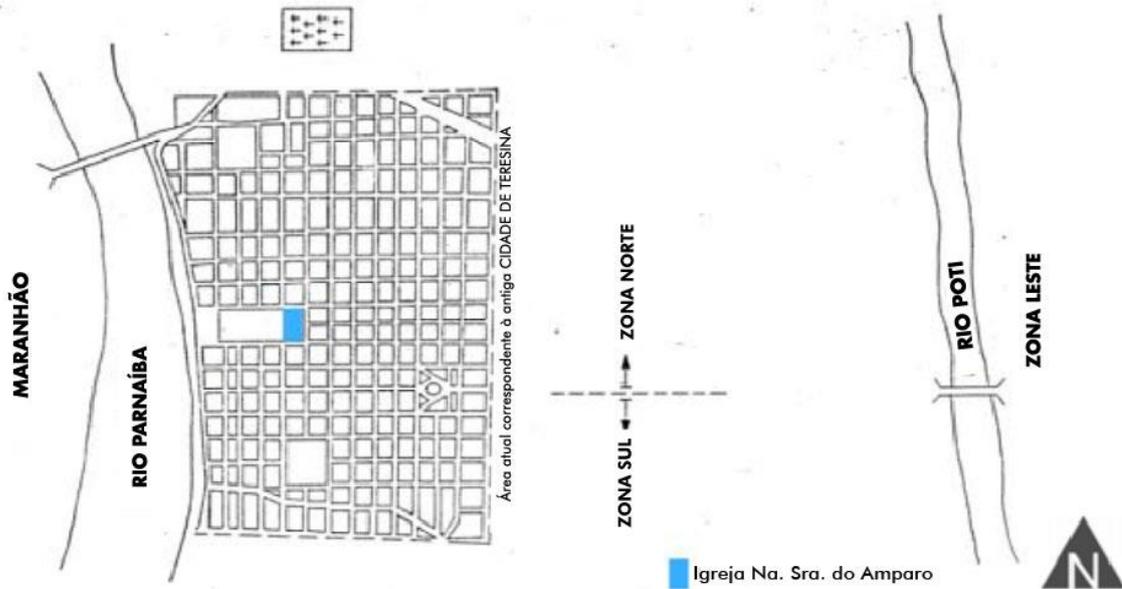
Fonte: (SOUSA et al., 2015, p.3).

Teresina foi a primeira capital brasileira planejada, ainda sob o regime imperial (BRAZ E SILVA, 2012). Fundada em 1852, a cidade foi escolhida para atender à necessidade de mudança da capital da província do Piauí, papel exercido até então por Oeiras. A escolha teve como principais pontos a neutralização do poder comercial do município vizinho de Caxias, no Maranhão, a facilidade de escoamento da produção através dos rios Poti e Parnaíba, e o aumento da integração entre o Norte e Sul do Estado (FAÇANHA, 1998).

A mudança de capital teve como idealizador o governador da província à época, Conselheiro Antônio Saraiva, cujo Plano Saraiva (Figura 20) instituiu um traçado urbano rígido, no formato ortogonal, como um tabuleiro de xadrez, baseado no modelo urbanístico português. Segundo Façanha (1998), o Plano Urbanístico de

Teresina previa um ponto central, a Igreja Matriz, a partir do qual irradiavam as ruas perpendiculares e paralelas entre si, e os quarteirões retangulares, distribuídos em uma malha de 18x12 quadras de 100,00m, região hoje compreendida como parte do Centro da cidade.

Figura 20. Mapa datado de 1855, inauguração da cidade de Teresina.



Fonte: Adaptado de PMT (1997) apud Façanha (1998, p. 53).

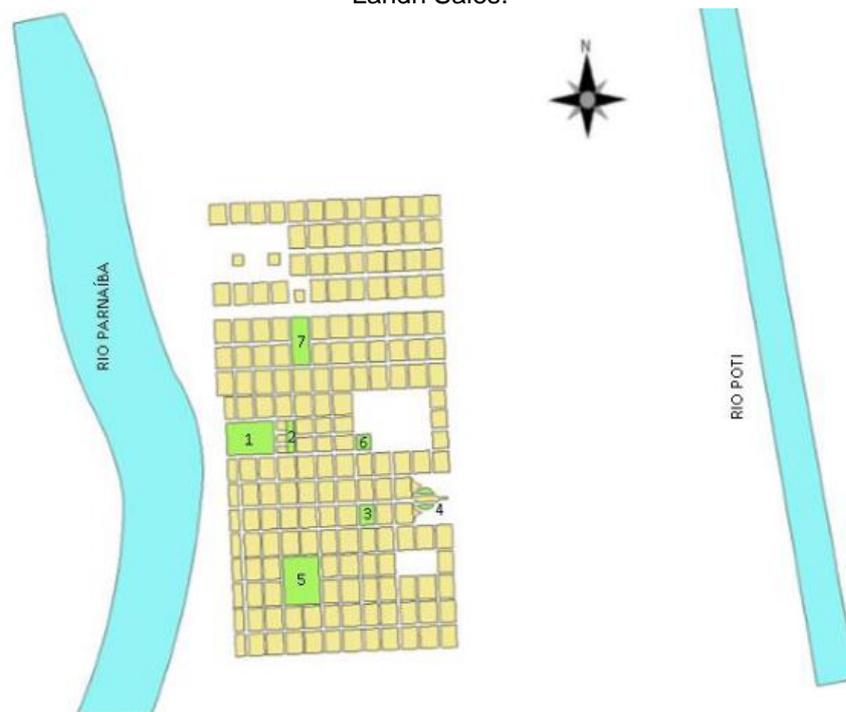
O Plano Saraiva reservou lotes livres para a implantação de futuras praças, que inicialmente foram estabelecidas como áreas descampadas, sem tratamento paisagístico e mobiliário. Segundo Miranda et al. (2015), do total de doze espaços vazios, somente alguns receberam o tratamento adequado e resultaram em praças ainda existentes (Figura 21). Machado et al. (2015) apontam que, atualmente, o sistema de praças do plano urbanístico original altera a paisagem do centro de Teresina e atua para amenizar o calor da região.

De acordo com Braz e Silva (2012, p.220), o traçado original da cidade ocasionou impactos negativos à sua malha urbana em relação ao conforto térmico, uma vez que a orientação das ruas não respeitou a orientação dos ventos dominantes, o que mostra a falta de prioridade dada aos condicionantes locais desde a sua fundação.

A expansão da cidade após aproximadamente 100 anos de existência e a ausência de um “plano regulador”, preocupava o Diretor de Obras da Prefeitura Municipal, o engenheiro Luis Pires Chaves. De acordo com ele, a cidade deveria

possuir avenidas largas e arborizadas. Entretanto, o traçado ortogonal rígido não permitiu que ocorressem grandes mudanças ao plano original. Em 1939, foi organizado o Código de Posturas, que propunha a arborização e alargamento de vias e passeios, porém o código não foi implementado de forma satisfatória, uma vez que a malha urbana engessada surgiu como empecilho (NASCIMENTO, 2002).

Figura 21. Praças no mapa do Plano Saraiva. 1 Praça Marechal Deodoro da Fonseca; 2 Praça Rio Branco; 3 Praça Pedro II; 4 Praça da Liberdade; 5 Praça Saraiva; 6 Praça João Luiz Ferreira; 7 Praça Landri Sales.



Fonte: Miranda et al. (2015, p.4).

O engenheiro Pires Chaves preocupou-se também com os espaços destinados às praças e parques que, no primeiro plano eram pouco expressivas, e determinou que 7,65% da área urbana da cidade fosse destinada a espaços livres, o que foi considerado insuficiente, devido às elevadas temperaturas que Teresina já apresentava na época (NASCIMENTO, 2002).

A implantação da nova capital ocasionou um inevitável crescimento demográfico, impulsionado pelo êxodo rural para a cidade, que se firmou como principal centro urbano do estado, sede do poder administrativo e com grande oferta de serviços e comércio. De acordo com Chaves (1998 apud KALLAS, 2008), em 1851 a cidade contava com 49 habitantes, já na década de 1860, atingiu a marca de 8 mil habitantes.

O crescimento demográfico ao longo da sua história, principalmente entre as décadas de 1950 e 1970, que pode ser acompanhado na Tabela 6, ocasionou diversos problemas urbanos, entre eles, um expressivo déficit habitacional, que pode ser observado a partir do surgimento de vilas e favelas na década de 1970 (FAÇANHA, 2003). Desta forma, destaca-se que a política nacional de habitação teve forte influência na expansão da cidade, através da produção em larga escala de conjuntos habitacionais, provenientes de programas como o Banco Nacional de Habitação (BNH) ou o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), cujas intervenções reconfiguraram o espaço urbano em diferentes regiões da cidade (LIMA e VIANA, 2019).

Tabela 6. Crescimento Populacional em Teresina.

Ano	População (hab)	Ano	População (hab)
1851	49	1950	90.723
1860	8.000	1960	144.799
1872	21.692	1970	230.168
1890	31.523	1980	388.922
1900	45.316	1991	598.411
1910	48.614	2000	714.583
1920	57.500	2010	814.230
1940	67.641	2021	871.126

Fonte: Adaptado de Façanha (1998) e IBGE (2021b).

O início das políticas públicas de habitação e construção dos primeiros conjuntos habitacionais em Teresina, se deu a partir de 1966, com a construção de cinco conjuntos (Tabuleta, São Raimundo, Primavera I, Monte Castelo e Parque Piauí), com um total de 2.950 unidades habitacionais. Destaca-se que, com exceção do Primavera I, os conjuntos habitacionais da década de 1960 foram construídos na zona Sul da cidade, impulsionando o crescimento urbano e a expansão nesse sentido (LIMA e VIANA, 2019).

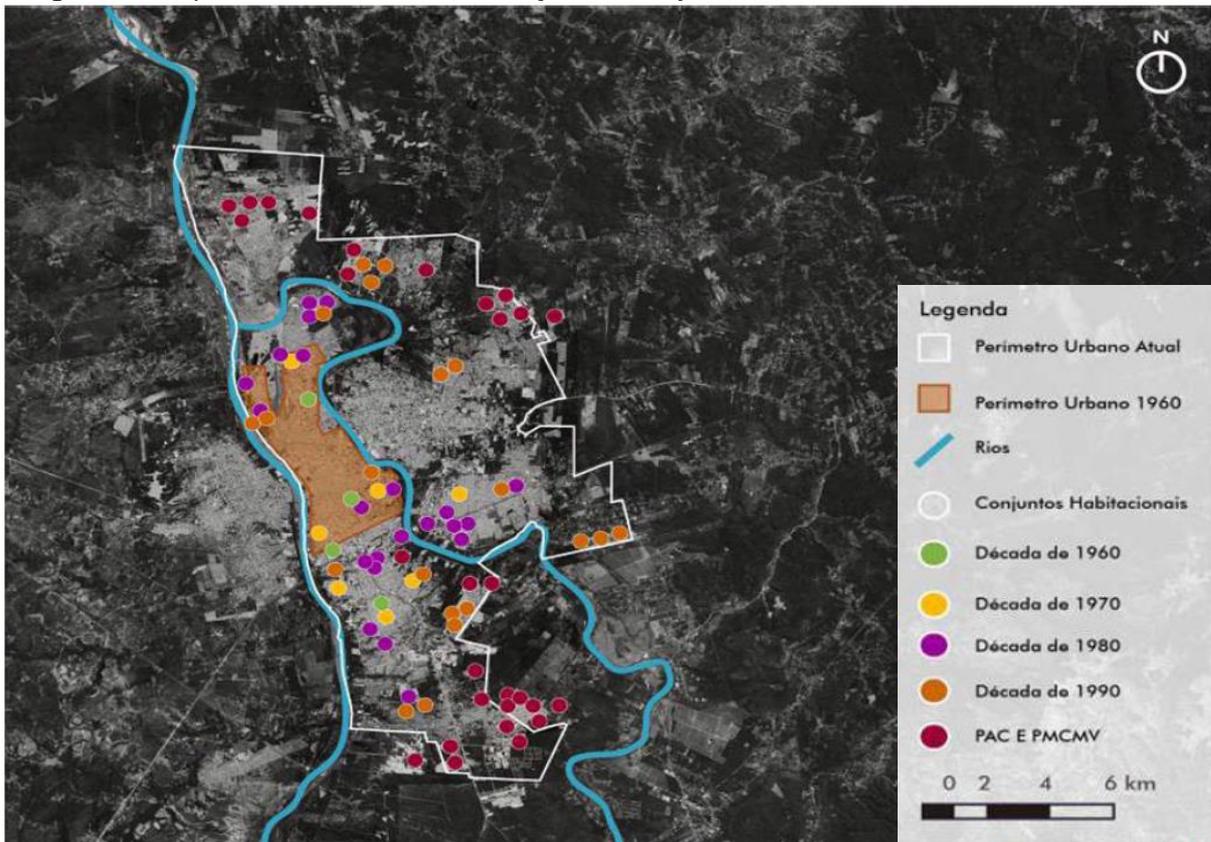
Segundo Façanha (1998), a década de 1970 marcou o espraiamento de conjuntos habitacionais na capital. Nesta época, foram construídos onze conjuntos habitacionais, distribuídos pelas zonas Norte, Sul e Leste da cidade, em um total de 7.043 unidades. O autor afirma que, é a partir dessa época que se intensifica o processo de descentralização espacial da capital e aumentam as questões sociais.

Na década de 1980, foram construídos 24 conjuntos habitacionais, totalizando 23.862 unidades, entretanto, segundo Lima (2010, p.50 apud VIEIRA e FAÇANHA, 2016), o “[...] déficit habitacional, em 1987, nos segmentos da população de baixa

renda, estava estimado em 27.000 unidades". Os anos de 1990 apresentaram uma redução na produção, reflexo da extinção do BNH. Entretanto, de 1995 a 2000 foram construídos 22 conjuntos habitacionais, com um total de 4.086 unidades nas regiões Sul, Sudeste, Leste e Norte da cidade (VIEIRA e FAÇANHA, 2016).

Os anos 2000 marcam um expressivo retorno de construções de novas habitações de interesse social, principalmente com a criação do PMCMV, que foi responsável pela construção de 28 conjuntos habitacionais com 18.269 unidades, distribuídas em três regiões da cidade (LIMA e VIANA, 2019). A Figura 22 apresenta os conjuntos habitacionais construídos nas décadas de 1960 a 1990 e os referentes ao PAC e ao PMCMV.

Figura 22. Mapa de Teresina com a marcação dos conjuntos habitacionais construídos na cidade.



Fonte: (LOPES et al., 2020, p.15).

A análise da política habitacional e o crescimento de Teresina permitem constatar a importância que teve a implantação de conjuntos habitacionais para a expansão da cidade. Entretanto, muito se fala sobre as tipologias das casas e qualidades arquitetônicas ou morfológicas dos conjuntos, que, afastados do núcleo urbano, ocasionaram a segregação socioespacial da população e a precariedade dos serviços e qualidade de vida. Entretanto, pouco se fala dos impactos ambientais que

tais conjuntos exercem na paisagem natural e urbana e suas consequências para o conforto ambiental e térmico de seus habitantes.

A implantação em massa desses conjuntos se iniciou na década de 1960, sem uma legislação que levasse em conta os fatores ambientais, sendo priorizada a questão habitacional e especulação imobiliária nessas regiões. Porém, atualmente, observa-se que a modificação do uso do solo de forma indevida, deteriora o ambiente e degrada a paisagem urbana. O presente estudo pretende analisar o Residencial Parque Brasil, conjunto habitacional fruto do PMCMV com o BNDES e a Prefeitura Municipal de Teresina, e avaliar seus espaços externos quanto à qualidade ambiental, com o intuito de melhorar a qualidade de vida da população.

4.2 Caracterização climática

O clima de Teresina, segundo a classificação climática de Thornthwaite e Mather, é C_{1s}A'a', definido como subúmido seco, megatérmico, com excedente hídrico moderado no verão e concentração de 32,2% da evapotranspiração nos meses de setembro, outubro e novembro (BASTOS e ANDRADE JÚNIOR, 2021). De acordo com a classificação de Köppen, é considerado Aw', tropical megatérmico, caracterizado por apresentar o mês mais frio com mais de 18°C e o mais seco com menos de 60mm, com chuvas atrasando para o outono (BASTOS e ANDRADE JÚNIOR, 2005).

É caracterizado por possuir amplitude térmica anual menor que 5°C e apresentar dois períodos distintos no ano: um quente e úmido (janeiro a maio) e outro quente e seco (julho a novembro). Tem como característica principal elevados índices de temperatura, que contribuem para o desconforto térmico no local e alteram a qualidade de vida e a rotina da população.

Segundo Silveira (2007), a região recebe forte radiação solar durante todo o ano, devido à sua proximidade com a linha do equador, o que ocasiona a incidência dos raios solares à cidade num ângulo próximo a 90°. A baixa altitude, associada à baixa latitude contribui para o registro de altas temperaturas durante todo o ano, uma vez que, por se localizar em uma região entre trópicos, o sol passa no zênite de cada local duas vezes por ano.

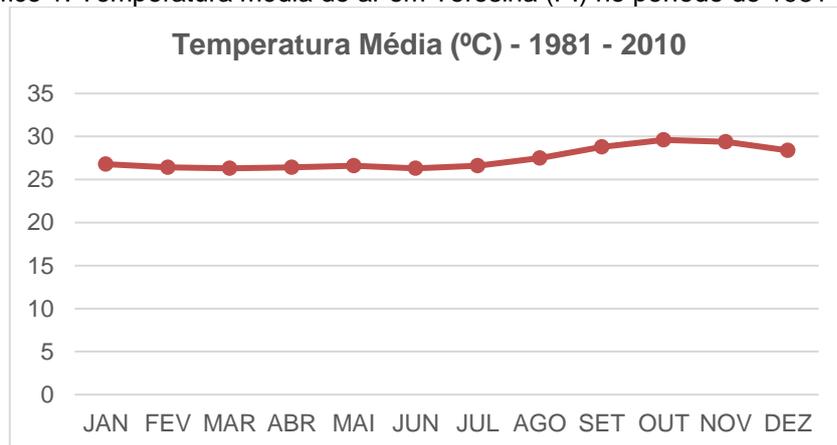
Andrade (2016) aponta a importância de considerar os fatores climáticos para o clima de Teresina, tais como a radiação solar, bastante atuante na cidade; a latitude,

fator decisivo na conformação dos elementos climáticos de Teresina, decorrente de sua posição latitudinal; e a altitude, fator com relevância no comportamento da pressão, dos ventos e da temperatura ambiente. Além disso, devem-se considerar os fatores climáticos locais naturais, como a vegetação, fator de grande importância para a cidade devido às suas altas temperaturas; os corpos d'água naturais e a topografia. E os fatores climáticos antrópicos, como o volume edificado, o traçado urbano, a impermeabilização do solo e as atividades humanas que interferem no clima urbano.

Em relação aos ventos, a cidade está localizada em uma região de calmaria e brisas leves. Silveira (2007) afirma que os ventos são fracos e atingem uma velocidade média de 1,4 m/s, com direção predominante sudeste. Nos meses mais quentes e secos, de julho a outubro, a velocidade média mensal é mais elevada, de 1,7 m/s, em contraste com o período quente e úmido, de janeiro a maio, que apresenta velocidade de 1,2 m/s.

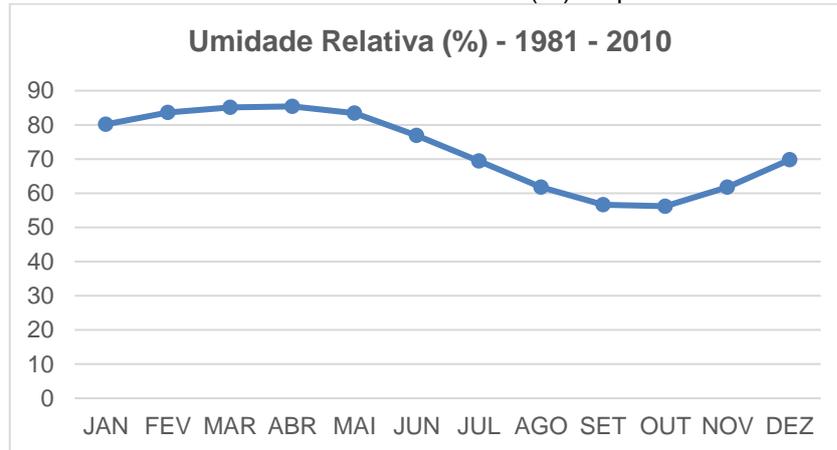
A análise das Normais Climatológicas do Brasil (INMET, 2021) para Teresina, em relação ao período de 1981-2010, apresenta temperatura do ar média mensal de 26,30°C para março e 29,60°C para outubro (Gráfico 1). Em relação à umidade do ar, apresenta média de 85,4% para o mês de abril, e valores de 56% para os meses de setembro e outubro (Gráfico 2).

Gráfico 1. Temperatura média do ar em Teresina (PI) no período de 1981-2010.



Fonte: (INMET, 2021).

Gráfico 2. Umidade relativa do ar em Teresina (PI) no período de 1981-2010.



Fonte: (INMET, 2021).

Quanto à vegetação, de acordo com Lima, Lopes e Façanha (2021), Teresina apresenta domínio morfoclimático de transição do cerrado, caatinga e amazônico. Para Andrade (2016, p. 409), a capital é repleta de “ilhas de paisagens”, que abrangem matas de cocais e caatinga, alternadas com cerrado e florestas. Em relação à arborização, Machado (2002 apud SILVA, 2009) aponta que a paisagem da região é composta por palmeiras de grande altura, como o babaçu, o buriti, o tucum, a macaúba e a carnaúba. Além dessas, outras espécies compõem a cidade, como,

“(…) árvores de grande altura, com florações ricas como ipê-amarelo e o caneleiro, árvore símbolo da cidade. Os cenários vegetados também são compostos com grande influência de espécies da caatinga e do sertão, como cactos e mandacarus (SILVA, 2009, p.37).”

Observa-se que Teresina possui variantes climáticas que propiciam o desconforto térmico para seus habitantes. A elevada temperatura do ar, alta incidência solar e a baixa umidade relativa em determinado período do ano, aliadas à inexpressiva formação de ventos na cidade, intensa impermeabilização do solo e supressão da cobertura vegetal, proporcionam desconforto e diminuem a qualidade de vida na cidade.

Como a cidade apresenta um clima misto: quente e úmido no primeiro semestre e quente e seco no segundo semestre, as necessidades de conforto térmico variam. Silveira (2007) analisou a Carta Bioclimática de Givoni para a cidade de Teresina, que apontou para o uso de ventilação como uma das principais estratégias

para obter conforto em ambientes externos, aliado ao sombreamento dos espaços para evitar o aquecimento das superfícies e das pessoas.

Entretanto, destaca-se que o clima de Teresina não pode ser simplificado, considerando apenas o período quente e úmido, ou quente e seco, uma vez que cada período possui suas demandas e exige soluções arquitetônicas específicas que garantam o conforto e a melhor qualidade de vida o ano todo. Silveira (2007, p.95) destaca que “a ventilação natural e o sombreamento das áreas externas pela vegetação devem ser amplamente empregados, entre outras estratégias, para garantirem o conforto térmico”. O Quadro 8 apresenta os fatores e elementos climáticos em Teresina.

Quadro 8. Fatores e elementos climáticos em Teresina-PI.

Fatores Climáticos	Características em Teresina-PI
Radiação	Proximidade ao equador: maior incidência solar
Insolação (hd ⁻¹)	7,5
Latitude	5° 05' 12" Sul
Altitude	Média – 72 m
Massas de água/ continentalidade	Teresina se distancia do mar (360 km), porém situa-se entre dois rios
Topografia/ relevo	Plano com suaves ondulações
Vegetação	Cerrado e Cerradão. Vegetação nativa comprometida e área urbana com pouca vegetação
Superfície do solo	Pouca cobertura vegetal
Elementos climáticos	Média anual (2020)
Temperatura do ar (°C)	Mínima: 22,8 Máxima: 34,0 Média: 28,4
Umidade relativa do ar (%)	66,7
Velocidade do vento a 2m (ms ⁻¹)	0,7
Pressão atmosférica (h Pa)	1.002,9
Precipitação (mm)	1.628,2

Fonte: Adaptado de Bastos e Andrade Júnior (2021) e Silva (2009).

5

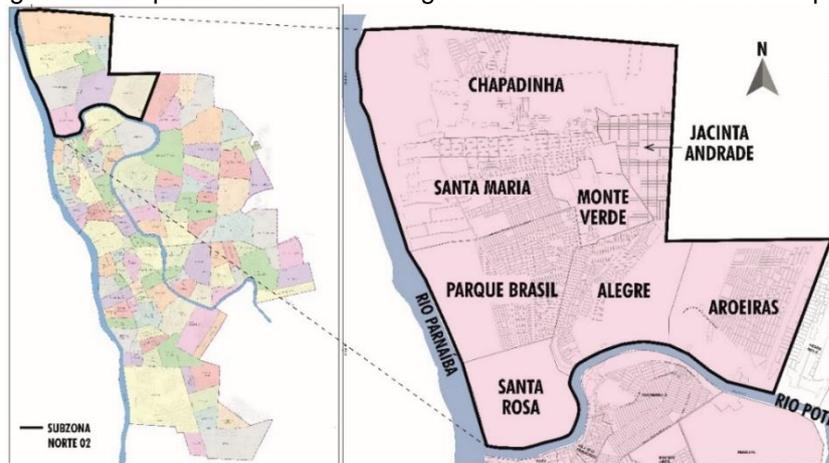
5. ZONAS DE CALOR EM TERESINA: ESCOLHA DO OBJETO DE ESTUDO

Este capítulo apresenta a escolha do objeto de estudo desta dissertação, realizada a partir da análise dos elementos que possam conduzir à criação de ilhas de calor urbanas, em um recorte da capital, onde foram levantadas as variáveis de Temperatura de Superfície e de NDVI por meio de sensoriamento remoto e geoprocessamento. A escolha do Residencial Parque Brasil se deu a partir dos dados obtidos da região e seu contexto urbano, que apresenta baixa qualidade ambiental e carece de estratégias bioclimáticas para se adaptar aos efeitos das zonas de calor.

Para a escolha do objeto de estudo, foi realizada a etapa 02 dos procedimentos metodológicos. Primeiramente, foi conduzida uma análise espaço-temporal da subzona Norte 02 em Teresina, com o objetivo de análise dos índices de Temperatura de Superfície (TST) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para os anos de 1991 e 2021, de forma a avaliar a evolução temporal da supressão da cobertura vegetal e da temperatura, relacionados à expansão urbana.

A subzona Norte 02 foi escolhida devido ao seu processo de expansão e contexto urbano (Figura 23). A zona Centro/Norte da cidade de Teresina é, segundo o Diagnóstico da Infraestrutura Socioeconômica e Cultural (TERESINA, 2014b), a região mais rica da cidade do ponto de vista ambiental, onde estão localizados os maiores atrativos locais, como os rios, as lagoas e os parques ambientais. Localizada na conurbação entre os rios Poti e Parnaíba, conta com 40 (quarenta) bairros em uma extensão territorial de 71,51km² e possui 228.906 habitantes, 29,8% da população urbana.

Figura 23. Mapa de Teresina com região subzona norte 02 em destaque.



Fonte: Adaptado de Teresina (2021, p. 1).

A subzona norte 02 compreende os bairros no extremo norte da cidade, após o rio Poti, e é composta por oito bairros: Chapadinha, Santa Maria, Jacinta Andrade, Monte Verde, Parque Brasil, Alegre, Santa Rosa e Aroeiras. A região possui um crescimento urbano relativamente recente, que, até a década de 80, era classificada como zona rural, com presença de agricultura familiar e sítios e de mata urbana. Sua ocupação se iniciou primeiramente por meio de vilas (TERESINA, 2014b).

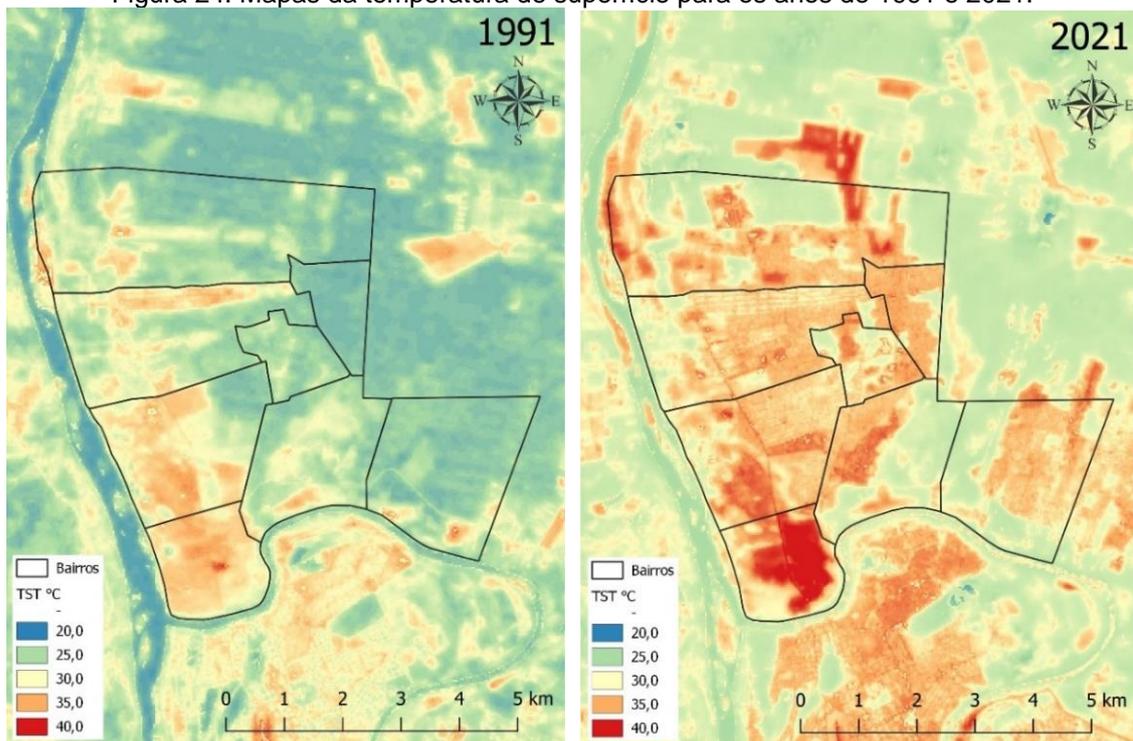
A partir da década de 90, a região foi marcada pelo reassentamento de famílias transferidas de áreas de risco. Além disso, sua ocupação está fortemente relacionada à construção de conjuntos habitacionais, que, como vistos anteriormente,

foram implantados de forma intensiva e descontínua, ocasionando o surgimento de diversos vazios urbanos na área e dificultando a ampliação da infraestrutura urbana para as novas moradias na extremidade da cidade (LOPES et al., 2020). Os conjuntos habitacionais foram construídos sem a devida preocupação com questões bioclimáticas ou de sustentabilidade, provocando intensa supressão da cobertura vegetal e impermeabilização dos solos na região, cujos efeitos nocivos podem ser observados até hoje.

Análise da Temperatura de Superfície

Considerando o recorte nos bairros em estudo, observou-se um aumento da temperatura de superfície ao longo de trinta anos, marcado pela urbanização da região, com pontos de temperatura alta podendo atingir até 42°C (Figura 24).

Figura 24. Mapas da temperatura de superfície para os anos de 1991 e 2021.



Fonte: (QGIS Development Team, 2016).

A imagem de 05 de setembro de 1991 registrou temperatura média de 30°C, com registro mínimo de 21°C e máximo de 39°C. Destaca-se que o registro máximo ocorre somente em um ponto localizado em um descampado no bairro Santa Rosa, cuja predominância de temperaturas é abaixo de 35°C. Na imagem de 07 de setembro de 2021, observa-se um aumento das temperaturas, especialmente nas áreas

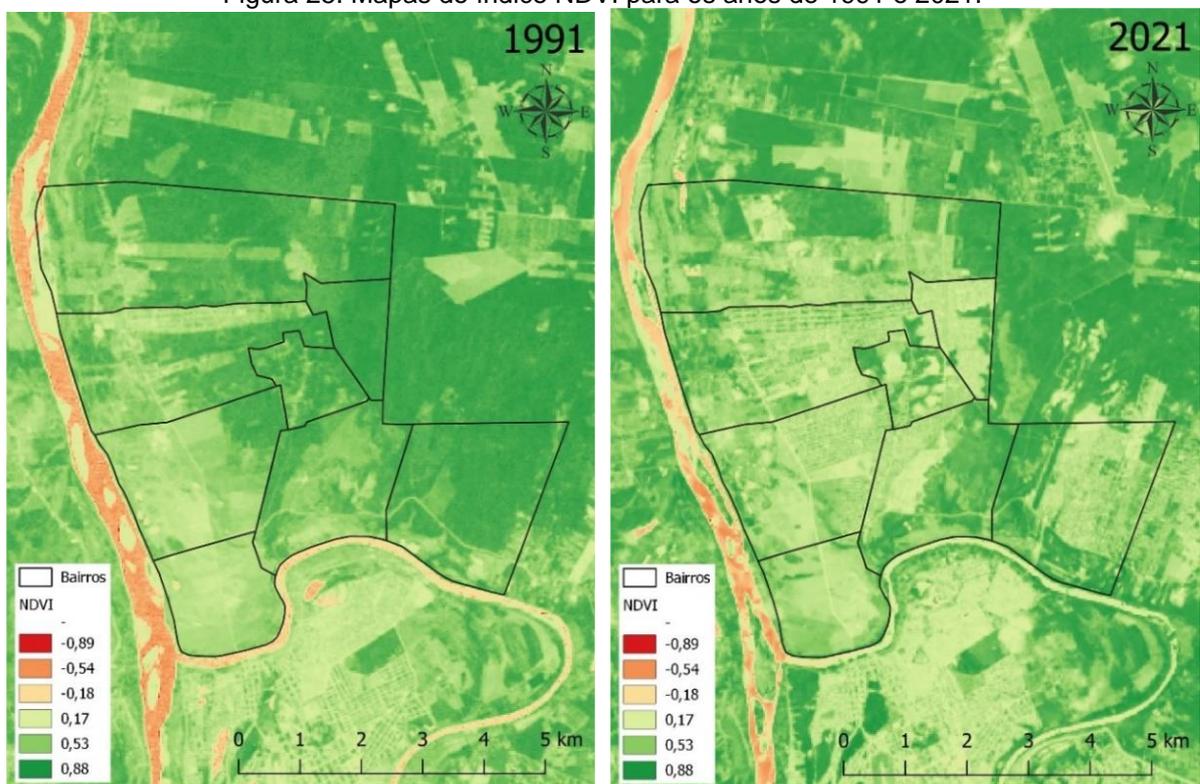
urbanizadas posteriormente, registrando mínima de 20°C e máxima de 42°C, com temperaturas acima de 37°C em diversos pontos, e predominância de registros acima de 35°C.

Análise do NDVI

Em 1991 (Figura 25), o mapa gerado teve como índice máximo 0,88 e mínimo -0,89, entretanto destaca-se que os valores negativos estão relacionados às áreas sem vegetação e registrados somente na área do rio. Na região de recorte, os valores mínimos registrados foram a partir de -0,08 e o valor máximo foi de 0,82. Observa-se uma maior quantidade de área com vegetação, em relação a 2021, especialmente no bairro Jacinta Andrade, onde o Residencial do mesmo nome, que ocupa o bairro inteiro, ainda não havia sido construído.

Em 2021 (Figura 25), o mínimo registrado foi de -0,55 e o máximo, 0,88. Dentro da região de recorte, observa-se uma predominância de NDVI inferior a 0,40 e uma maior supressão da vegetação. Os mapas de NDVI reforçam a relação entre a urbanização da região nos últimos 30 anos e a supressão da cobertura vegetal.

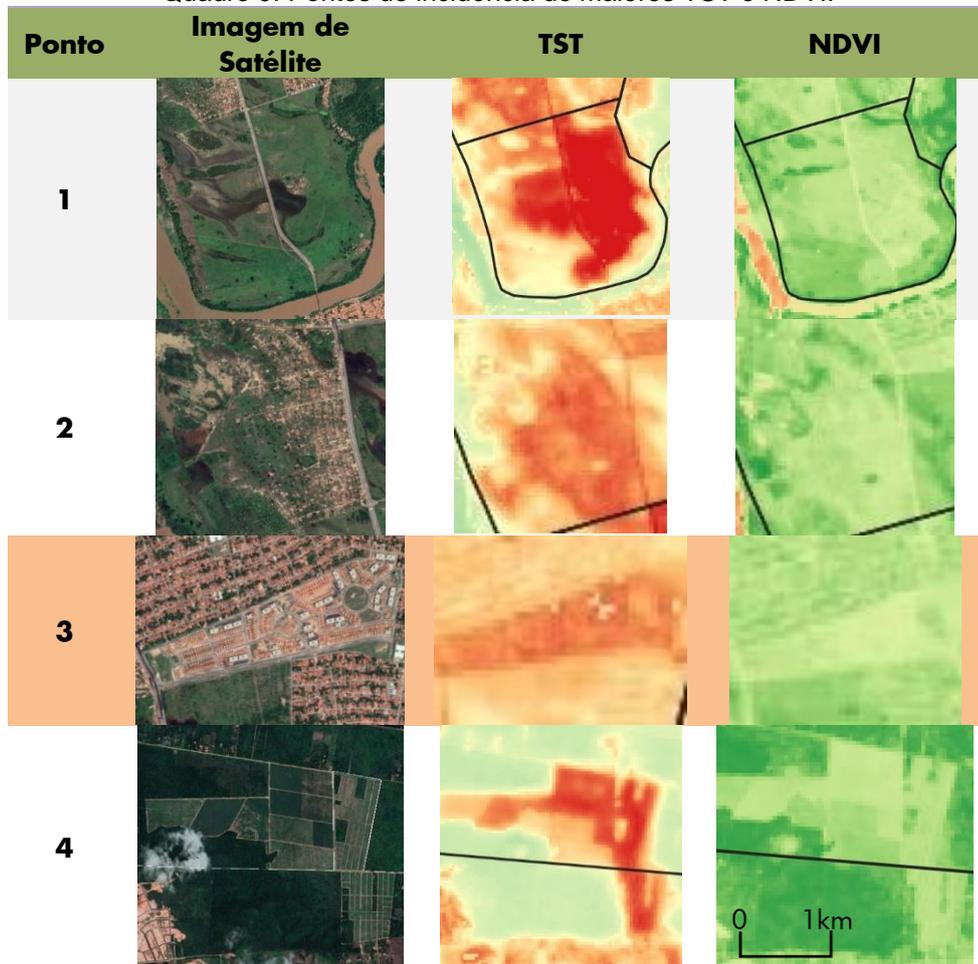
Figura 25. Mapas do índice NDVI para os anos de 1991 e 2021.



Fonte: (QGIS Development Team, 2016).

Foram então selecionados quatro pontos com os piores índices, para a análise da relação entre o processo de urbanização e o aumento da temperatura de superfície e NDVI (Quadro 9 e Figura 26). O primeiro ponto, que registrou temperaturas de até 42°C em toda a sua extensão, foi o bairro Santa Rosa. Localizado em uma ZEUS – Zona Especial de Uso Sustentável, segundo o Plano Diretor de Ordenamento Territorial de 2019, entretanto, apresenta uma situação de transição do rural para o urbano, com predomínio do uso do solo para fins agrícolas e pastoris, resultando em solo exposto e vegetação rasteira (ALMEIDA JÚNIOR, SIMÕES e MORAIS, 2019). Observa-se uma intensa supressão da cobertura vegetal na região.

Quadro 9. Pontos de incidência de maiores TST e NDVI.

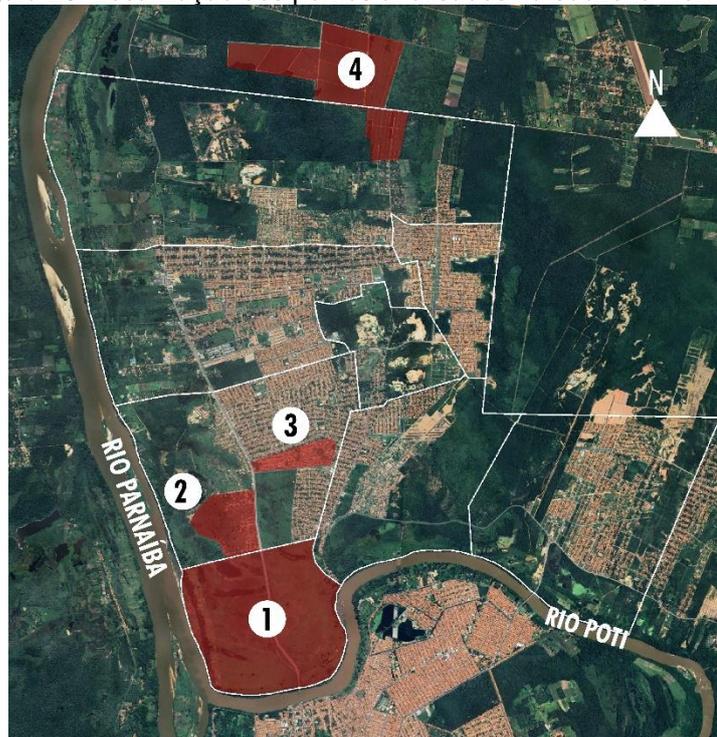


Fonte: Adaptado de Google Earth (2022) e (QGIS Development Team, 2016).

O segundo ponto está localizado no bairro Parque Brasil, inserido na ZEUS e na ZEIS (Zona Especial de Interesse Social) e registrou temperatura máxima de 38,6°C. Sua urbanização é recente, fruto de ocupação irregular em área de risco de

inundações, e se iniciou em janeiro/fevereiro de 2020, decorrente das restrições de desapropriação impostas pela COVID-19 (MARTINS et al., 2020). A ocupação é denominada atualmente de Vila Lindalma Soares, e é possível observar os seus impactos no aumento da temperatura da região.

Figura 26. Localização dos pontos analisados na subzona Norte 02.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023).

O terceiro ponto compreende o Residencial Parque Brasil, localizado no bairro de mesmo nome, que atingiu temperatura máxima de 37,7°C. O Residencial situa-se em uma ZEIS, e foi construído pela Prefeitura de Teresina, através do programa Minha Casa, Minha Vida, para abrigar as famílias que tiveram residências desapropriadas pelo Programa Lagoas do Norte. A análise da imagem de satélite mostra que a área foi densamente urbanizada, contando com 1.022 unidades habitacionais, sendo 350 casas e 672 apartamentos. Entretanto, constata-se a quase completa ausência de vegetação no espaço, o que teve impacto no aumento das temperaturas e NDVI.

O quarto ponto está localizado no extremo norte da cidade, com uma parte contida no bairro Chapadinha, e sua continuação fora do perímetro urbano. A região inserida no perímetro urbano está situada em uma MZOM - Macrozona de Ocupação Moderada e registrou 40°C. É possível observar através da imagem de satélite que

esse ponto se trata de uma região ainda não edificada, porém com intensa supressão da cobertura vegetal para o loteamento do solo.

É possível observar a relação entre a supressão da cobertura vegetal e o aumento das temperaturas de superfície, e que os pontos que registraram as maiores temperaturas possuem características comuns (Quadro 10). Os pontos 1 e 4 estão localizados em áreas para uso de pastagem e agricultura ou parcelamento do solo para loteamento, e apresentam solo exposto. Os pontos 2 e 3 estão localizados em área de ocupação irregular e em habitação de interesse social, demonstrando a ausência de qualidade ambiental para a população mais vulnerável.

Quadro 10. Pontos analisados.

Pontos	Tipo	Uso do solo
1 e 4	Solo exposto	Pastagem e agricultura / Loteamento
2 e 3	Área construída	Ocupação irregular / HIS

Fonte: Autora (2023).

A partir da análise da temperatura de superfície e supressão da cobertura vegetal relacionadas ao crescimento urbano e os resultados obtidos, foi escolhido o ponto 3, o Residencial Parque Brasil, em destaque no Quadro 9, como objeto de estudo do presente trabalho.

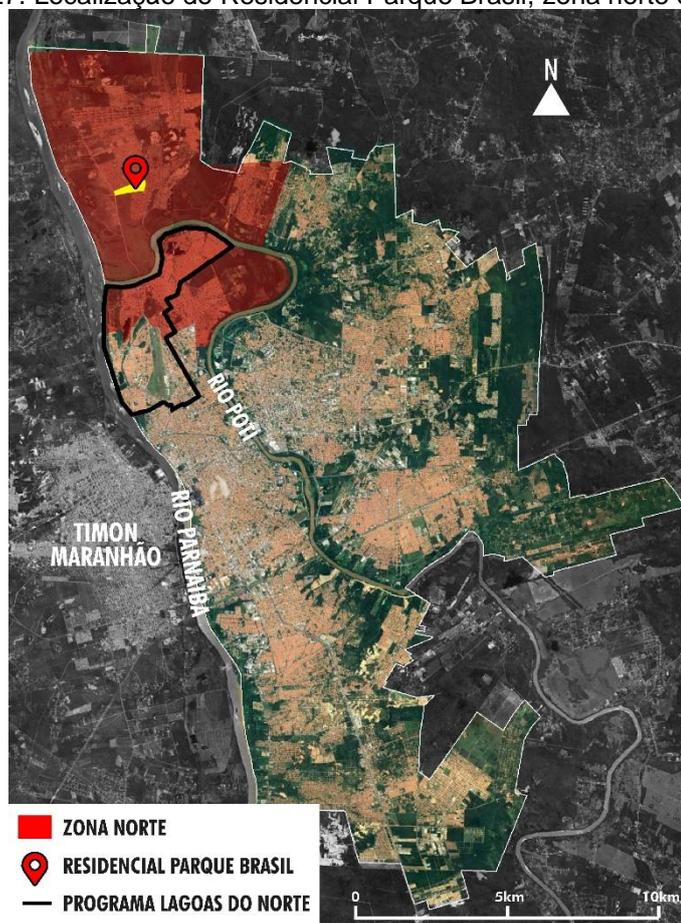
6

6. ANÁLISE BIOCLIMÁTICA: RESIDENCIAL PARQUE BRASIL

Este capítulo apresenta a análise bioclimática do Residencial Parque Brasil, realizada a partir de visitas *in loco*, registros fotográficos, análise dos planos urbanísticos e preenchimento de fichas bioclimáticas. A compreensão do comportamento dos elementos espaciais e ambientais no espaço urbano é importante para a concepção bioclimática dos espaços públicos e a identificação dos problemas encontrados é essencial para a escolha de estratégias bioclimáticas para adaptá-los.

O Residencial Parque Brasil está situado na zona Norte de Teresina, no bairro Parque Brasil (Figura 27). O empreendimento foi construído como alternativa de moradia às pessoas afetadas pelo Programa Lagoas do Norte (PLN), projeto de requalificação urbana implementado em 2008 pela Prefeitura Municipal de Teresina, com apoio do Banco Mundial. O projeto tinha como objetivo a melhoria da situação de degradação socioambiental da região norte da cidade, com destaque para os problemas de drenagem urbana das lagoas existentes na área (SOARES e LOPES, 2016).

Figura 27. Localização do Residencial Parque Brasil, zona norte e do PLN.

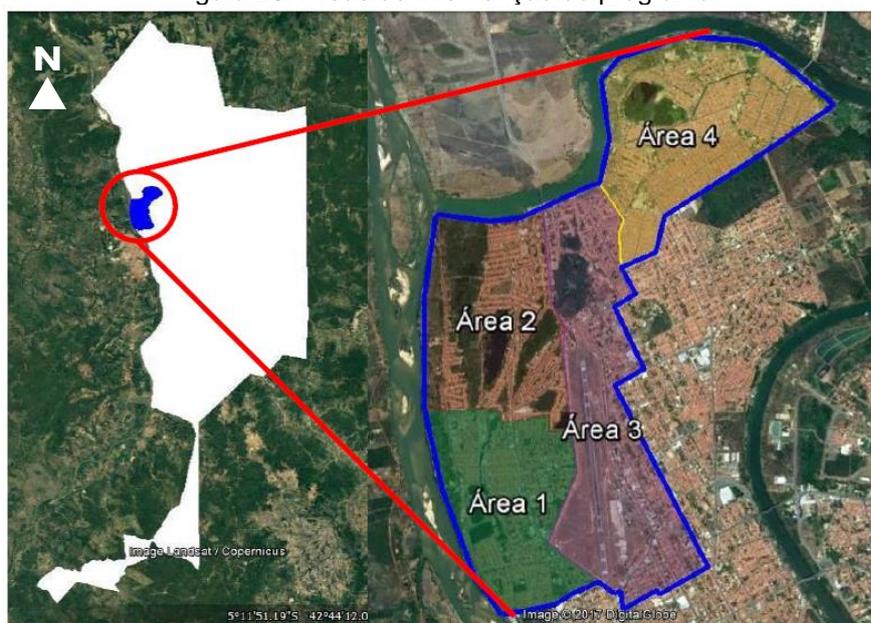


Fonte: Adaptado de Google Earth (2023).

O Programa dividiu-se em duas fases, com quatro áreas de intervenção (Figura 28) contemplando 13 lagoas e 13 bairros da região: Acarape, Aeroporto, Alto Alegre, Itaperu, Mafrense, Matadouro, Mocambinho, Nova Brasília, Olarias, Poti Velho, Parque Alvorada, São Joaquim e São Francisco, e cerca de 100 mil pessoas. A Fase I foi realizada entre 2009 e 2015, e concluiu as intervenções na Área 1, em

uma região de 288ha, impactando aproximadamente 25 mil pessoas. A Fase II foi iniciada em 2015, contemplando as demais áreas, e seguiu com o mesmo objetivo de qualificação urbana e ambiental, com enfoque na drenagem e saneamento urbano (PINHEIRO, SALES e OLIVEIRA, 2022).

Figura 28. Áreas de intervenção do programa.



Fonte: (LIMA JÚNIOR et al., 2019, p.4).

Para compreender o objeto de estudo da pesquisa, é importante contextualizar o PLN. A região contemplada pelo programa possui forte relevância histórica e socioambiental, sendo um elemento formador da identidade de seus habitantes. Berço dos primeiros assentamentos urbanos da capital, ainda no século XIX, a área destaca-se pela riqueza natural, com o encontro dos rios Poti e Parnaíba e mais de 34 lagoas que estão inseridas no contexto urbano.

Entretanto, esta população convive, desde os primórdios, com elevados níveis de vulnerabilidade urbana, relacionada à ocupação não planejada da região e áreas de risco das lagoas, ausência de saneamento, áreas de lazer, educação e saúde, e frequentes inundações. Nesse contexto, o PLN foi elaborado a partir de três componentes: 1) requalificação urbano-ambiental; 2) desenvolvimento social, comunitário e econômico e 3) modernização da gestão municipal, com o intuito de solucionar os problemas socioambientais da região e proporcionar moradia e qualidade de vida para a população (SOARES, 2017).

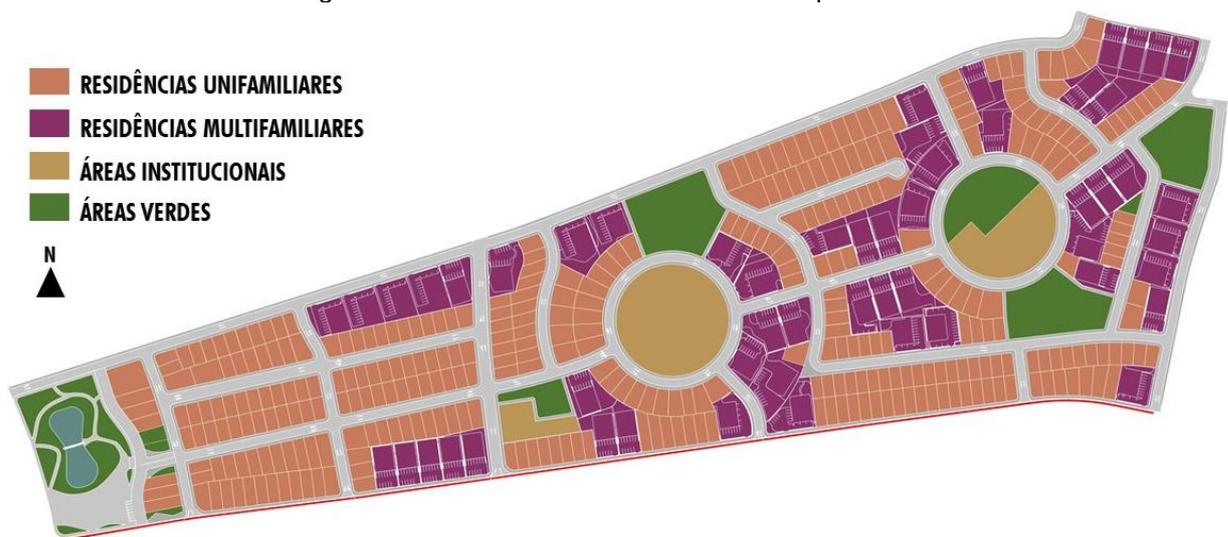
Soares (2017) afirma que as propostas e ações promovidas pelo PLN envolveram elementos do Desenvolvimento Urbano Sustentável e identificou que os

processos de diagnóstico e tomada de decisões foram baseados nas determinações do Banco Mundial, que possuem bases no Desenvolvimento Urbano Sustentável e influências de pesquisas realizadas pela ONU, como a UN-Habitat. Além disso, no âmbito municipal, o programa foi fruto do Plano de Desenvolvimento Sustentável de Teresina – Teresina Agenda 2015.

Nesse contexto, o Residencial Parque Brasil foi construído como parte do PLN, como alternativa à compensação oferecida às pessoas afetadas pelo reassentamento involuntário. As novas unidades habitacionais foram financiadas por recursos federais do Programa Minha Casa Minha Vida - PMCMV, em observância às legislações de Uso e Ocupação do Solo, Parcelamento do Solo, portarias do PMCMV, Código Florestal e normas de acessibilidade (PLN, 2020).

O residencial teve seu plano urbanístico iniciado entre 2014 e 2016, as obras foram iniciadas em 2018 e foram entregues em outubro de 2020. É composto por 672 habitações multifamiliares (apartamentos de três pavimentos), que correspondem a 66% das habitações; 350 unidades unifamiliares (lotes residencial e comercial – de usos mistos – e lotes residenciais – uso unifamiliar), que correspondem a 34% das habitações, totalizando 1.022 unidades habitacionais e 13.238,58 m² de áreas institucionais, ou 5,23% (Figura 29). O residencial ocupa terreno com área total de 252.833,85 m² (PLN, 2020).

Figura 29. Zoneamento do Residencial Parque Brasil.



Fonte: Adaptado de PMT (2019).

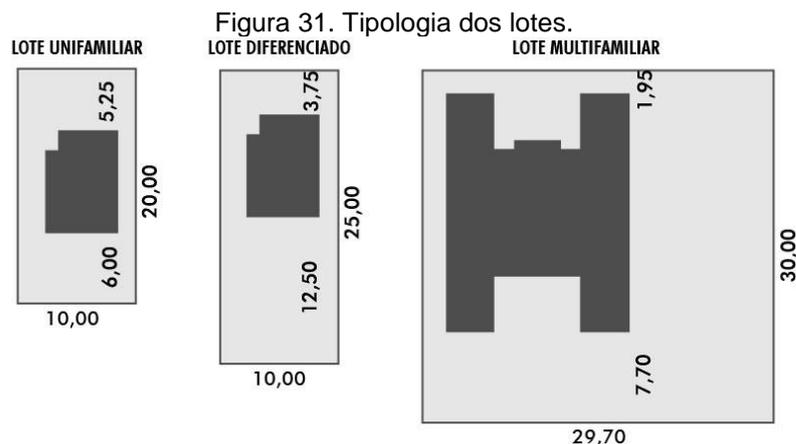
Os lotes residenciais possuem dimensão mínima de 10 x 20 m, e os lotes de uso misto de 10 x 25 m (Figuras 30 e 31). Todas as unidades multifamiliares possuem 01 vaga de garagem por apartamento (PLN, 2020). Além disso, segundo o Plano de Reassentamento Involuntário do Canal Matadouro (PLN, 2020), o residencial contemplaria ainda,

(...) pavimentação de vias; sistema de abastecimento d'água (reservatório de 200m³ e rede de distribuição); rede e estação de tratamento de esgotamento sanitário; iluminação pública; drenagem pluvial; áreas verdes; e áreas institucionais localizadas em quadras circulares, previstas para abrigarem uma escola (com área total construída de 2.750,00m² (...)) (PLN, 2020, p.58).

Figura 30. Tipologias Residencial Parque Brasil.



Fonte: Autora (2022).



Fonte: Autora (2022).

Por fazer parte do Programa Lagoas do Norte, a sustentabilidade teve importância na execução do residencial. Segundo o Plano de Reassentamento (PLN, 2020), seu projeto foi desenvolvido de modo a contemplar a sustentabilidade das edificações, aumentar a eficiência das moradias e minimizar os impactos sobre o meio ambiente, conforme os itens incorporados ao PMCMV em 2016. Ainda segundo o

documento, seria contemplada uma quantidade de árvores por unidade habitacional (casas e apartamentos), o que não foi realizado, e todas as edificações promoveriam acessibilidade universal.

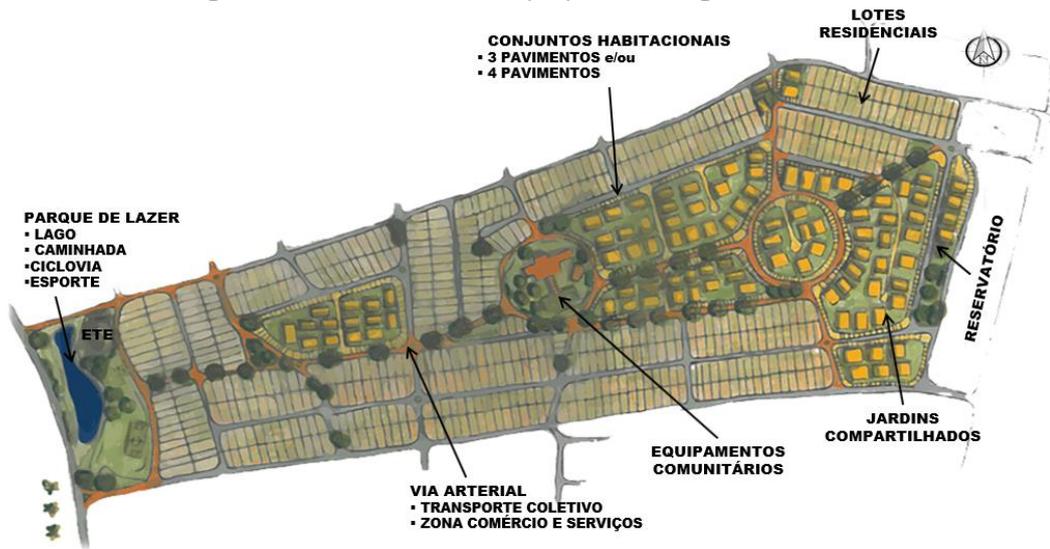
Quanto aos impactos ambientais do Estudo de Impacto de Vizinhança, no que se refere à habitabilidade, o Plano de Reassentamento afirma que a verticalização das unidades multifamiliares traria como benefícios o sombreamento da região, visto de forma positiva devido à alta incidência solar, e que a distância entre os prédios (quadras) não permitiria a formação de corredores ou a predominância de efeitos do vento nocivos, portanto, não haveria comprometimento do fator climático no entorno (PLN, 2020).

As áreas verdes correspondem a um total de 26.805,17 m², ou 10,60% da área total do condomínio. O sistema viário representa um total de 65.372,91 m² ou 25,86% da área total. Observa-se que a área de superfícies impermeabilizadas, contemplando ruas e calçadas, é quase três vezes maior que a quantidade de superfícies permeáveis, dados que, combinados com a ausência de vegetação, apontam uma provável influência no microclima e na contribuição para o desconforto térmico no conjunto.

A análise do plano urbanístico proposto inicialmente em 2014 (Figura 32) com o plano proposto em 2019 (Figura 33) e a imagem de satélite de 2022 (Figura 34) evidencia diferenças entre o que foi projetado e o que de fato foi executado e entregue à população. Em relação às áreas verdes, foi proposto inicialmente (Figura 32) um parque de lazer na entrada do conjunto residencial, com lago, pista de caminhada, ciclovia, quiosques e espaços para prática de esportes. Além disso, foram propostos jardins compartilhados entre os lotes, áreas verdes em conjunto com equipamentos comunitários, e uma quantidade razoável de árvores nas vias.

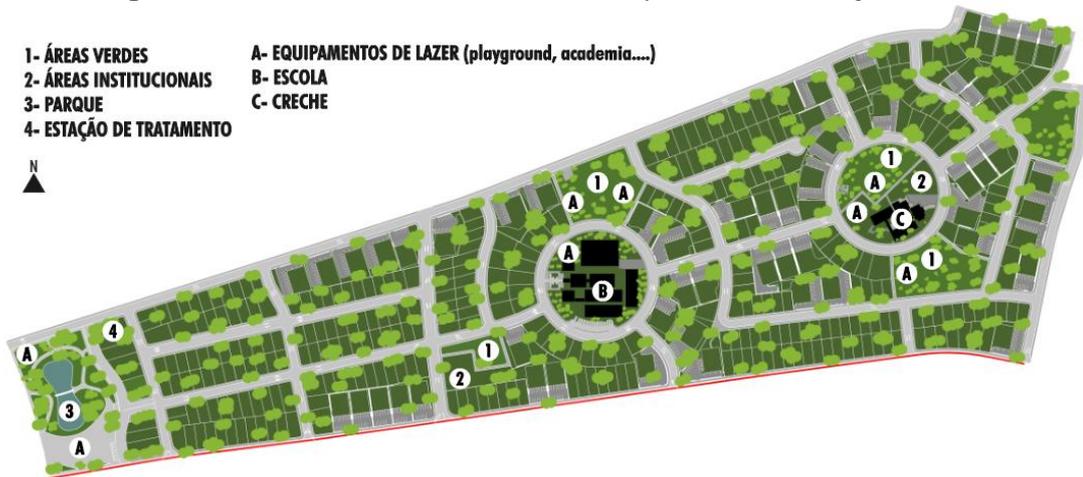
Entretanto, as imagens de satélite (Figura 34) e visitas *in loco*, mostram que o parque de lazer não foi executado e em seu terreno foi construída uma estação de tratamento de água (canto inferior esquerdo na imagem de satélite), além da quase completa ausência de arborização nas vias, e as áreas verdes utilizadas como depósitos de lixo, garagem de veículos, ou abandonadas, sem um tratamento que permita o uso pela população. Em relação aos jardins compartilhados pelas unidades habitacionais previstos inicialmente, observa-se que a maior parte das residências se encontram atualmente muradas e isoladas entre si, e sem jardim.

Figura 32. Plano urbanístico proposto em agosto de 2014.



Fonte: (PLN, 2014).

Figura 33. Plano urbanístico Residencial Parque Brasil em março de 2019.



Fonte: PMT (2019).

Figura 34. Imagem de satélite de 2022.



Fonte: Google Earth (2022).

Em relação aos equipamentos institucionais, no plano de 2019, foram incluídas uma escola e uma creche, que atenderiam à população do residencial, entretanto, observa-se na imagem atual que não foram construídas e em sua localização encontra-se uma área descampada, sem tratamento. Na visita *in loco*, constatou-se a presença de crianças jogando futebol no local onde deveria ser a escola, em um campo improvisado ao sol, o que mostra a necessidade de equipamentos de lazer e espaços para acolher as crianças.

Em relação aos espaços de lazer (playgrounds e academia nas áreas verdes), foi constatada apenas uma academia popular, entretanto, a mesma localiza-se no sol, sem proteção à radiação solar, o que dificulta o seu uso na maior parte do dia.

A Figura 35 apresenta exemplos do tratamento dos espaços verdes no residencial: as imagens 1 e 2 mostram áreas verdes sem poda ou uso para o público. A imagem 3 mostra o acúmulo de lixo e o uso de uma área verde como estacionamento para ônibus e caminhão. A imagem 4 apresenta a área onde seria o parque de lazer, e no lugar foi construída uma estação de tratamento em parte do terreno. A Figura 36 mostra a ausência de arborização e sombras nas vias e calçadas. As poucas árvores encontradas foram plantadas por moradores e são de pequeno porte.

Figura 35. Áreas verdes do Residencial Parque Brasil.



Fonte: Autora (2022).

Figura 36. Ausência de arborização nas vias.



Fonte: Autora (2022).

6.1 Ficha bioclimática

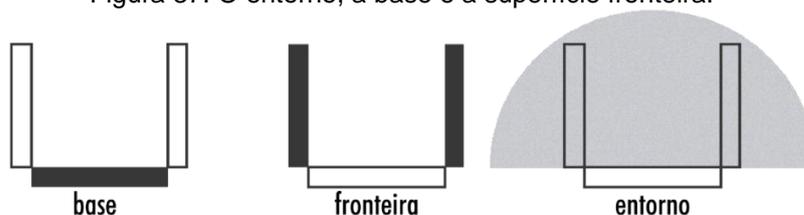
Para a análise bioclimática do Residencial Parque Brasil, foi utilizado o método desenvolvido por Romero (2015). A autora propôs uma análise do espaço público, a partir de componentes espaciais e ambientais, e sua concepção como uma unidade ordenada pelos elementos ambientais, climáticos, históricos, culturais e tecnológicos. Essa metodologia recorre à conjugação dos elementos formais mais relevantes do edifício e do espaço urbano e permite a verificação de inter-relações no espaço público a partir de um conjunto tripartido.

O método aborda três componentes básicos que compõem o espaço: o entorno, que compreende o espaço urbano mais imediato do espaço público em questão; a base, que corresponde ao espaço sobre o qual se assenta o espaço público; e a superfície fronteira, constituída pelo espaço que forma o limite ou marco do espaço arquitetônico de interesse (Figura 37) e considera que tais componentes espaciais devem ser tratados de maneira simultânea com as propriedades físicas dos materiais construtivos (ROMERO, 2015).

Em relação aos componentes ambientais, são considerados essenciais numa perspectiva bioclimática: o entorno climático, a estética da luz, os atributos da cor e o espaço do som. A ficha bioclimática proposta por Romero (2015) (Quadro 11) apresenta os aspectos espaciais e ambientais agrupados de forma temática, existindo entre eles uma correspondência entre as características inerentes do entorno, base e

fronteira. Desta forma, é possível identificar por exemplo, as características do entorno em relação aos ventos, sol, som, ao mesmo tempo das suas características ambientais de cor e variáveis climáticas. A ficha permite ainda o registro gráfico das análises. Segundo Romero (2015), a avaliação desse conjunto de componentes aproxima a concepção bioclimática dos espaços públicos.

Figura 37. O entorno, a base e a superfície fronteira.



Fonte: Adaptado de Romero (2015, p.155).

Quadro 11. Ficha Bioclimática.

ESPACIAIS		AMBIENTAIS				
ENTORNO	ACESSOS	SOL	SENSAÇÃO DE COR	COR		
		VENTO	RESSONÂNCIA DO RECINTO	SOM		
		SOM	SOMBRA ACÚSTICA			
	CONTINUIDADE DA MASSA	DIRETA	RADIÇÃO			
	CONDUÇÃO DOS VENTOS	DIFUSA				
REFLETIDA						
A BASE	COMPONENTES E PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS	ÁREA DA BASE	UMIDADE RELATIVA	CLIMA		
		PAVIMENTOS	TEMPERATURA DO AR			
		VEGETAÇÃO	VELOCIDADE DO VENTO			
		ÁGUA	TEMPERATURAS SUPERFICIAIS	COR		
		MOBILIÁRIO URBANO	ALBEDO			
			AMBIENTE SONORO			
			VARIAÇÃO SAZONAL			
		FRONTEIRA	CONVEXIDADE	CONVEXIDADE	CONJUNTO DE CORES	COR
				CONTINUIDADE DA SUPERFÍCIE	TONALIDADE	
				TIPOLOGIA ARQUITETÔNICA	MANCHAS DE LUZ	LUZ
ABERTURAS	ESTÉTICA DA LUZ					
TENSÃO	LUMINÂNCIA					
DETALHES ARQUITETÔNICOS	INCIDÊNCIA DA LUZ			CLIMA		
NÚMERO DE LADOS	DIREÇÃO DO FLUXO					
ALTURA	ABSORÇÃO			COR		
ÁREA TOTAL DA SUPERFÍCIE	REFLEXÃO					
	MATIZES			SOM		
	CLARIDADE					
	PERSONALIDADE ACÚSTICA					
	QUALIDADE SUPERFICIAL DOS MATERIAIS					

Fonte: Romero (2015, p.159).

Para a aplicação das fichas bioclimáticas no Residencial Parque Brasil, foram escolhidos dois pontos, que serão analisados a seguir.

a) Ponto 1 - Rua 03

O primeiro ponto de análise está localizado na região central do Residencial Parque Brasil, na Rua 03, uma das principais do conjunto, que se estende, com diferentes nomes, por quase toda sua dimensão horizontal, de Leste a Oeste (Figura 38). O ponto situa-se em um recorte predominantemente residencial, em frente à Área Verde 06 e próximo à Área Institucional 03.

Figura 38. Localização Ponto de Análise 01.



Fonte: Google Earth (2022), adaptado pela autora.

O Ponto 1 está localizado em uma região plana, sem grandes alterações topográficas, e possui, ao norte da via, residências unifamiliares. Na parte sul à via, está localizada a Área Verde 06 e a Área Institucional 03, além do estacionamento do conjunto de edifícios no recorte. A Figura 39 apresenta a visão do pedestre na Rua 03, no sentido Leste. Observa-se, a partir da imagem, uma ausência de arborização nos passeios e na área verde, o que ocasiona forte incidência solar. A Figura 40 apresenta a visão do pedestre na Rua 03, sentido Oeste. A Figura 41 apresenta a Área Verde 06, contida no recorte, e pode-se observar o seu descaso, com acúmulo de lixo e ausência de árvores ou de estrutura que permita o uso por parte da população.

Figura 39. Ponto de análise 01 - R.03, em frente à Área Verde 06 – sentido Leste.



Fonte: Autora (2022).

Figura 40. Ponto de análise 01 - R.03, em frente à Área Verde 06 - sentido Oeste.



Fonte: Autora (2022).

Figura 41. Área Verde no Ponto 1.



Fonte: Autora (2022).

Quadro 12. Ficha Bioclimática - Ponto 1.

ESPACIAIS		RESIDENCIAL PARQUE BRASIL – PONTO 1	AMBIENTAIS		
ENTORNO	ACESSOS		SENSAÇÃO DE COR	COR	
	SOL		Predomínio do preto do asfalto e cores claras e neutras das edificações		
	VENTO		RESSONÂNCIA DO RECINTO	SOM	
	Apesar da barreira de edifícios verticais, o fluxo do vento se mantém		Inexistente - espaço aberto		
	SOM		SOMBRA ACÚSTICA	RADIÇÃO	
Espaço exposto, sem barreiras de som. Som de trânsito e cotidiano dos moradores	Inexistente - espaço aberto				
CONTINUIDADE DA MASSA	Massa descontínua devido a vazios urbanos	DIRETA	CLIMA		
CONDUÇÃO DOS VENTOS	Circula livremente entre os espaços abertos – baixa altura da massa do entorno imediato	Intensa, o dia inteiro			
A BASE	ÁREA DA BASE		DIFUSA	RADIÇÃO	
	PAVIMENTOS		Escassa – pouca nebulosidade		
	Impermeáveis e quentes: Concreto – calçadas		REFLETIDA	CLIMA	
	Asfalto – rua e estacionamentos		Escassa		
	Permeável: Solo exposto		UMIDADE RELATIVA	COR	
	VEGETAÇÃO		Baixa		
Pouca: Vegetação rasteira sem poda	TEMPERATURA DO AR	COR			
ÁRVORES pontuais - plantadas por morador	Elevada – espaço sem proteção				
AGUA	Inexistente	VELOCIDADE DO VENTO	COR		
MOBILIÁRIO URBANO	Iluminação pública	Acompanha o entorno – sem barreiras			
FRONTEIRA	CONVEXIDADE		TEMPERATURAS SUPERFICIAIS	COR	
	Inexistente		Elevadas – exposição total e ausência de vegetação		
	CONTINUIDADE DA SUPERFÍCIE		Fragmentada devido a vazio entre edifícios e áreas verdes	ALBEDO	COR
	TIPOLOGIA ARQUITETÔNICA		Residências unifamiliares populares	Misto: Baixo – cores escuras (asfalto) / Alto – cores claras (residências)	
	ABERTURAS		Poucas aberturas nas residências; vazios entre lotes	AMBIENTE SONORO	COR
	TENSÃO		Baixa	Pouco ruidoso	
	DETALHES ARQUITETÔNICOS		Repetitivo – residências uniformes, sem muitos detalhes	VARIACÃO SAZONAL	COR
	NÚMERO DE LADOS		Dois lados construídos – laterais da via	Predomínio de amarelo no período seco	
	ALTURA		1 pavimento – aprox. 3m.	CONJUNTO DE CORES	COR
	ÁREA TOTAL DA SUPERFÍCIE			Claras e neutras	
				TONALIDADE	COR
				Neutra	
				MANCHAS DE LUZ	LUZ
		Provenientes dos postes			
		ESTÉTICA DA LUZ	LUZ		
		Escassa, pouca iluminação artificial, áreas verdes e institucionais sem iluminação			
		LUMINÂNCIA	LUZ		
		Baixa			
		INCIDÊNCIA DA LUZ	LUZ		
		Sobre as calçadas e rua			
		DIREÇÃO DO FLUXO	CLIMA		
		Para baixo			
		ABSORÇÃO	CLIMA		
		Elevada – especialmente no asfalto			
		REFLEXÃO	COR		
		Predomínio nas superfícies claras das residências			
		MATIZES	COR		
		Dominante clara			
		CLARIDADE	COR		
		Contraste claridade das edificações com asfalto			
		PERSONALIDADE ACÚSTICA	SOM		
		Tranquilo: sons do tráfego e de ruído local da população			
		QUALIDADE SUPERFICIAL DOS MATERIAIS	SOM		
		Duros e emissores de calor			

b) Ponto 2 - Rua 21

O ponto de análise 02 (Figura 42) está localizado a leste do Residencial Parque Brasil, na Rua 21. O ponto situa-se em uma rua de sentido Norte-Sul, e possui tanto residências unifamiliares, quanto edifícios multifamiliares, atuando como sombra para o sol da manhã e possível barreira de ventos, predominantes da orientação sudeste. O recorte contempla ainda a área verde 04, ao sul, e a área verde 05, ao norte, ambas sem tratamento, arborização e uso para a população. Além disso, observa-se na Figura 42 o ponto 1, uma área verde pública que foi murada e incorporada à residência de um morador.

Figura 42. Localização Ponto de Análise 02.



1 - ÁREA VERDE PÚBLICA INCORPORADA À RESIDÊNCIA

Fonte: Google Earth (2022), adaptado pela autora.

Figura 43. Ponto de análise 02 - R.21.



Fonte: Autora (2022).

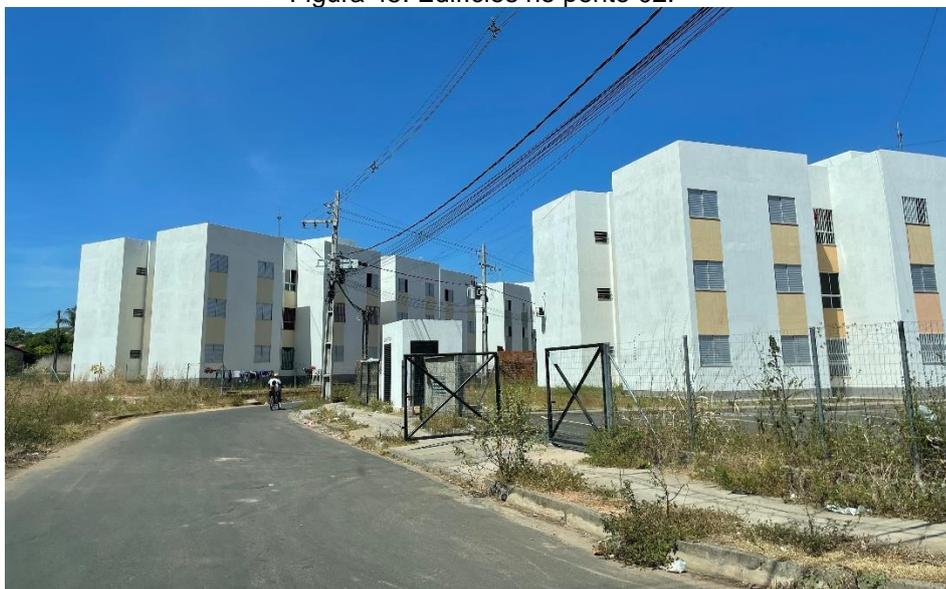
As Figuras 43, 44 e 45 apresentam a vista do pedestre na via, e é possível observar a completa ausência de arborização e a diferença de escala entre as unidades habitacionais unifamiliares e multifamiliares.

Figura 44. Ponto de análise 02 - R.21.



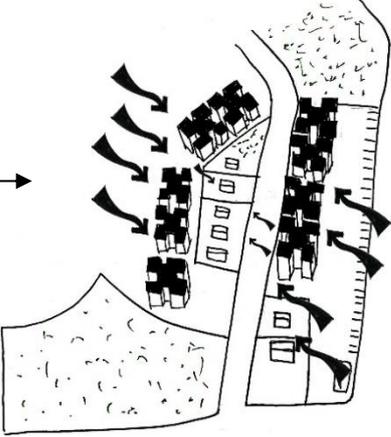
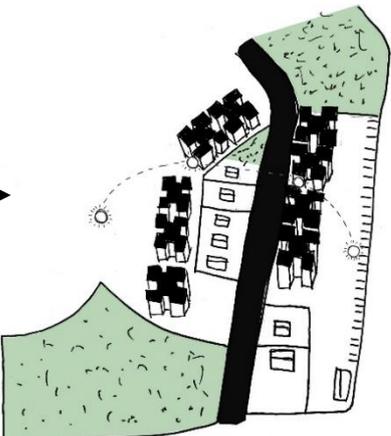
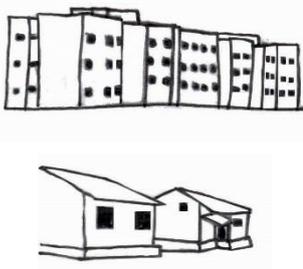
Fonte: Autora (2022).

Figura 45. Edifícios no ponto 02.



Fonte: Autora (2022).

Quadro 13. Ficha Bioclimática - Ponto 2.

ESPACIAIS		RESIDENCIAL PARQUE BRASIL – PONTO 2	AMBIENTAIS	
ENTORNO	ACESSOS		SENSAÇÃO DE COR Contraste cores claras e frias (edificações) e escuras e quentes (via, muro e tijolos)	COR
	SOL Área exposta ao sol em determinadas horas do dia – sombra decorrente da massa edificada		RESSONÂNCIA DO RECINTO Inexistente	SOM
	VENTO Canalizado – apresenta barreira decorrente da massa de edifícios de três andares		SOMBRA ACÚSTICA Inexistente	
	SOM De veículos e de pessoas		DIRETA Intensa, o dia inteiro	RADIÇÃO
CONTINUIDADE DA MASSA Massa contínua densa nos dois lados da via, com diferentes alturas	DIFUSA Escassa – pouca nebulosidade			
CONDUÇÃO DOS VENTOS Circulação afetada pela altura da massa	REFLETIDA Escassa	UMIDADE RELATIVA Baixa, agravada pela ausência de árvores	CLIMA	
ÁREA DA BASE	TEMPERATURA DO AR Elevada – espaço sem proteção	VELOCIDADE DO VENTO Menor que do entorno – apresenta barreira		
A BASE	COMPONENTES E PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS			TEMPERATURAS SUPERFICIAIS Elevadas – exposição total e ausência de vegetação
	PAVIMENTOS Impermeáveis e quentes: Concreto – calçadas Asfalto – rua		ALBEDO Misto: Baixo – cores escuras (asfalto) / Alto – cores claras (residências)	
	Permeável: Solo exposto		AMBIENTE SONORO Pouco ruidoso	
	VEGETAÇÃO Quase inexistente. Ausência de árvores		VARIACÃO SAZONAL Inexistente	
	ÁGUA Inexistente		CONJUNTO DE CORES Claras e neutras	COR
FRONTEIRA	MOBILIÁRIO URBANO Iluminação pública Lixeira		TONALIDADE Neutra	
	CONVEXIDADE Inexistente		MANCHAS DE LUZ Provenientes dos postes	LUZ
	CONTINUIDADE DA SUPERFÍCIE Sensação de continuidade – edifícios e muros		ESTÉTICA DA LUZ Escassa, pouca iluminação artificial	
	TIPOLOGIA ARQUITETÔNICA Casas unifamiliares populares e edifícios multifamiliares		LUMINÂNCIA Baixa	
	ABERTURAS Poucas aberturas nas edificações		INCIDÊNCIA DA LUZ Sobre as calçadas e rua	
	TENSÃO Lisa, ausência de elementos nas fachadas / uniforme		DIREÇÃO DO FLUXO Para baixo	
	DETALHES ARQUITETÔNICOS Repetitivo – habitações uniformes, sem muitos detalhes		ABSORÇÃO Elevada – especialmente no asfalto	CLIMA
	NÚMERO DE LADOS Dois lados construídos – laterais da via		REFLEXÃO Predomínio nas superfícies claras dos edifícios	
	ALTURA 1 pavimento – aprox. 3m. 3 pavimentos – aprox. 9m		MATIZES Contrastes claro e escuro	
	ÁREA TOTAL DA SUPERFÍCIE		CLARIDADE Contraste claridade das edificações com asfalto	COR
	PERSONALIDADE ACÚSTICA Tranquila	SOM		
	QUALIDADE SUPERFICIAL DOS MATERIAIS Duros e emissores de calor			

7

7.SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MICROCLIMA

Esta seção apresenta os aspectos referentes à quarta etapa metodológica, realizada a partir de simulações computacionais no *software* ENVI-met, versão 5.1.1, para avaliar a eficácia do uso de pavimentos brandos e vegetação na adaptação dos efeitos das ICU's no espaço urbano do Residencial Parque Brasil. Inicialmente, foi realizada uma análise dos dois pontos escolhidos, a partir dos seus dados físicos, geográficos e climáticos. Em seguida, é apresentada a etapa de modelagem dos edifícios, vegetação e solo. A terceira etapa é referente à simulação computacional dos cenários definidos, realizada no período seco, de temperaturas mais elevadas e menor umidade relativa do ar. E por fim, foram extraídos os dados relativos aos índices microclimáticos.

7.1 ENVI-met

A simulação computacional é uma importante ferramenta de pesquisa para a análise dos fenômenos urbanos. O método permite avaliar e compreender os efeitos relacionados ao clima urbano e verificar cenários com adoção de estratégias para a adaptação dos impactos das ICU's e para a melhoria do microclima.

De acordo com Silva e Romero (2020), o campo do ambiente construído pode ser beneficiado pelo uso de ferramentas computacionais, que servem como subsídios técnicos, a partir do seu uso para o incentivo da qualidade ambiental urbana. Além disso, as simulações que auxiliam na compreensão dos fenômenos ambientais e têm como objetivo a avaliação do desempenho do ambiente construído, podem ser denominadas de simulações bioclimáticas.

Nesse âmbito, destaca-se o *software* ENVI-met, um simulador ambiental em três dimensões, com capacidade para simular as interações entre a superfície, a vegetação e a atmosfera no espaço urbano. O programa oferece diversos parâmetros ambientais relacionados ao clima urbano, como a temperatura do ar, a umidade relativa do ar, a radiação e ventilação, e apresenta cálculos de radiação de onda curta e longa, reflexão e irradiação do edifício e vegetação, fluxo do sombreamento, entre outros (SILVA e ROMERO, 2020).

O uso do *software* apresenta vantagens, dentre elas, a simplicidade de execução da modelagem, a possibilidade de gerar resultados para diversas horas do dia, a inserção de estratégias de adaptação como vegetação e pavimentos brandos, e a medição de parâmetros de conforto térmico, a partir dos *plug-in* Leonardo e Biomet. O programa oferece cinco modalidades para uso (básico, estudante, pesquisador, setor público e empresarial). O perfil básico foi o escolhido para esta pesquisa, é gratuito e permite o desenvolvimento de simulações sem custo, porém apresenta algumas limitações.

O ENVI-met tem sido utilizado em diversos estudos, para a análise das alterações antrópicas no ambiente construído e no microclima urbano, e para a adaptação dos efeitos das ICU's, a partir da adoção de estratégias bioclimáticas. Dentre as estratégias mais utilizadas, destaca-se o uso de vegetação e pavimentos brandos no espaço urbano, para obter maior conforto térmico e resultados mais satisfatórios de temperatura do ar, umidade e temperatura de superfície (Tabela 7).

Tabela 7. Estudos no ENVI-met.

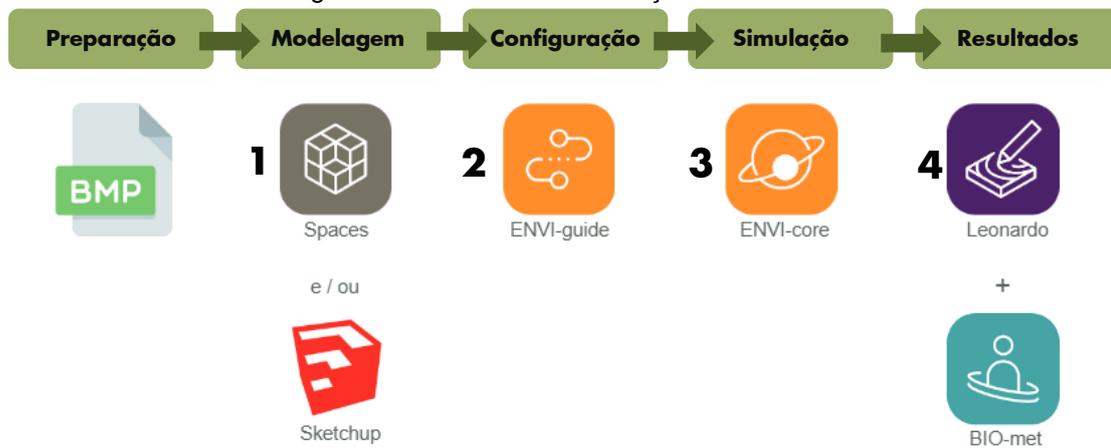
Autor	Estratégia de adaptação	Resultados	Local do estudo
(SILVA, 2009)	Vegetação	Redução de até 3,11°C na temperatura do ar	Teresina/PI
(SHINZATO, 2009)	Vegetação	Redução de até 1,5°C na temperatura do ar	São Paulo/SP
(WERNECK, 2018)	Pavimentos brandos e vegetação	Redução de até 1,13°C na temperatura do ar	Brasília/DF
(CAMPOS, 2018)	Pavimentos brandos e vegetação	Redução de até 2,0°C na temperatura do ar	Rio de Janeiro/RJ
(SILVA, 2020)	Vegetação	Redução de até 7°C PET	Brasília/DF
(MARUYAMA, 2020)	Pavimentos brandos e vegetação	Redução de até 2,21°C na temperatura do ar	São Paulo/SP
(CARDOSO, 2021)	Telhados e pavimentos reflexivos	Redução de até 0,45°C por aumento médio de 0,10 no albedo	Presidente Prudente/SP
(ANDRADE, 2022)	Vegetação	Redução de até 0,4°C na temperatura do ar	Brasília/DF

Fonte: Silva (2009); Shinzato (2009); Werneck (2018); Campos (2018); Silva (2020); Maruyama (2020); Cardoso (2021) e Andrade (2022).

7.2 Simulação computacional

O processo de simulação computacional no *software* ENVI-met 5.1.1 é composto pelas seguintes etapas (Figura 46): (1) Modelagem dos cenários; (2) Inserção dos dados climáticos da área de estudo; (3) Simulação computacional; (4) Extração e análise dos dados simulados, que serão exploradas nos tópicos seguintes.

Figura 46. Processo de simulação no ENVI-met.

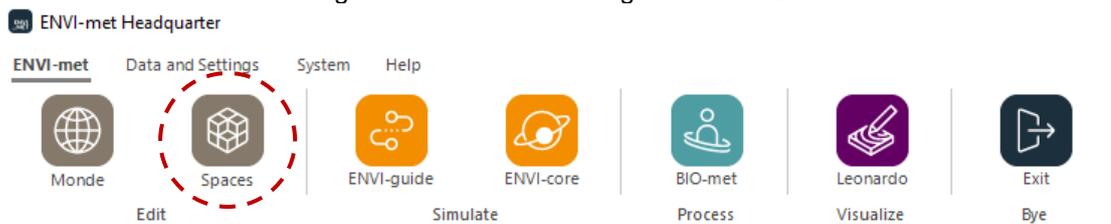


Fonte: (SILVA et al., 2022, p.5).

7.2.1 Modelagem

A primeira etapa, de modelagem, é realizada no ícone SPACES, localizado na aba ENVI-met (Figura 47), onde é inserida a imagem em bitmap, e são preenchidos os dados sobre o espaço físico do modelo com as configurações de entrada (Tabela 8), como posição geográfica, tamanho do modelo e dos grids, que são as células que compõem a malha ortogonal da interface do *software* (eixos x, y e z).

Figura 47. Aba de modelagem - SPACES.



Fonte: ENVI-met V. 5.1.1.

Na versão *basic*, utilizada no estudo, o tamanho do grid está limitado a 50 x 50 x 40. Para a modelagem, a dimensão das células foi definida em 2,5 x 2,5 x 3m, distribuídas em um recorte de 100 m x 100 m, o que resultou em um grid de 40 x 40 x 30. O norte foi rotacionado em cada um dos pontos de análise, para melhor se adequar ao *software*. Ainda nas configurações da área, deve-se editar o valor de *nesting grids*, que foi definido em 5.

Tabela 8. Configurações de entrada no ENVI-met.

Configurações de entrada	
Grids	40 x 40 x 30
Tamanho do modelo	100 x 100 m
Nesting grids	5
Size grid cell in meter	dx=2.5 dy=2.5 dz=3
Name of position	Teresina
Position on earth	Lat: -5.09 Long: -42.80

Fonte: ENVI-met V. 5.1.1.

Em seguida, com a imagem de satélite da área em bitmap inserida, é realizada a modelagem do cenário. Os materiais de superfície, alturas, fachadas, são definidos buscando parâmetros mais próximos da realidade, dentre as opções nos bancos de dados do programa. O *software* disponibiliza também uma biblioteca de árvores, e a possibilidade de editar ou criar espécies na aba "ALBERO".

7.2.1.1 Levantamento dos materiais superficiais

Os edifícios são modelados a partir da sua altura. Aqui, foi definido 3 metros para cada pavimento, de forma que as residências unifamiliares foram consideradas com 3m e os edifícios multifamiliares foram considerados com 9m de altura. Depois, a vegetação foi inserida no modelo, e dividiu-se em dois tipos: grama e árvores. A arborização é encontrada apenas no Ponto 1.

A modelagem dos solos e superfícies é realizada a partir do levantamento dos materiais de superfície do objeto de estudo. Foram identificados dois tipos de superfície nos pontos 1 e 2: 1) asfalto nas vias e estacionamentos; 2) concreto nas calçadas e dois tipos de solo: 1) grama e 2) solo exposto. Os dados coletados estão apresentados de forma simplificada no Quadro 14.

Quadro 14. Cenário original simplificado e levantamento dos materiais de superfície.

Ponto	Imagem de satélite do cenário original	Cenário original simplificado	Grau de rotação do Norte
P1			-14° N 
P2			-74° N 
	Grama		

	Solo exposto
	Asfalto
	Calçadas em concreto
	Residências unifamiliares (3m de altura) e edifícios multifamiliares (9m de altura)
●	Árvores (apenas no ponto 1)

Fonte: Adaptado de Google Earth (2023).

7.2.2 Dados climáticos

A segunda etapa é referente à inserção dos dados climáticos, no ícone ENVI-guide (Figura 48), onde são adicionadas as informações de data e hora de início da simulação, além da quantidade de horas que se deseja simular e as variáveis climáticas para a data escolhida (SILVA et. al, 2022).

Figura 48. Aba dos dados climáticos - ENVI-guide.



Fonte: ENVI-met V. 5.1.1.

Para a elaboração do arquivo climático, é necessária a obtenção de dados meteorológicos referentes ao dia da simulação. Na ausência de dados, devem-se utilizar os da cidade mais próxima geograficamente, e com características semelhantes. Estes dados são inseridos na opção *Meteorology* da aba ENVI-guide. Existem dois métodos para a inserção dos dados climáticos: *Simple Forcing* e *Full Forcing*. A versão *basic* do ENVI-met 5.1.1 permite apenas o uso do *Simple Forcing*, onde é necessária a coleta, pelo próprio pesquisador, de cada dado climático da cidade onde se localiza a área de estudo, sendo: velocidade média dos ventos (m/s), temperatura do ar (°C) máxima e mínima, umidade relativa do ar (%) máxima e mínima, umidade relativa a 2500m (g/kh) e direção dos ventos em graus, elementos que interferem diretamente na sensação de conforto térmico.

Foram simuladas 46 horas, de forma que as primeiras 20 horas foram utilizadas para estabilização dos dados. O horário inicial inserido foi 6h e a simulação de cada cenário levou aproximadamente 24h para finalizar. A Tabela 9 apresenta os dados climáticos levantados para o estudo:

Tabela 9. Dados climáticos inseridos no software.

SIMPLE FORCING		
Parâmetros	Valor	Fonte
Velocidade do vento (10m)	1,4 m/s	(SILVEIRA, 2007)
Direção do vento	135°	(SILVEIRA, 2007)
Temperatura máx do ar (2m)	38,9°C	INMET para 31.10.2022
Temperatura mín do ar (2m)	21,8°C	INMET para 31.10.2022
Umidade Relativa máx (2m)	84%	INMET para 31.10.2022
Umidade Relativa mín (2m)	22%	INMET para 31.10.2022
Umidade atmosférica (2.500m)	2.12	Universidade de Wyoming Estação do aeroporto de Natal

Fonte: INMET (2023) e SILVEIRA (2007).

7.2.3 Cenários hipotéticos

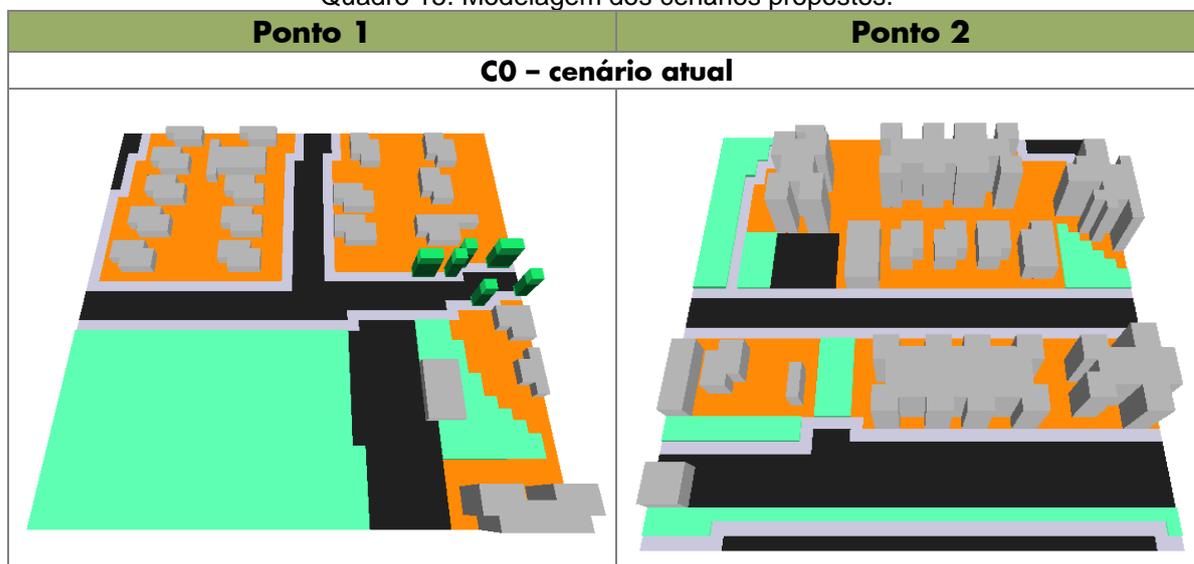
Para a análise da eficácia das estratégias de adaptação dos efeitos das ICU's, foram propostos dois cenários para cada ponto, além do atual (Quadro 15):

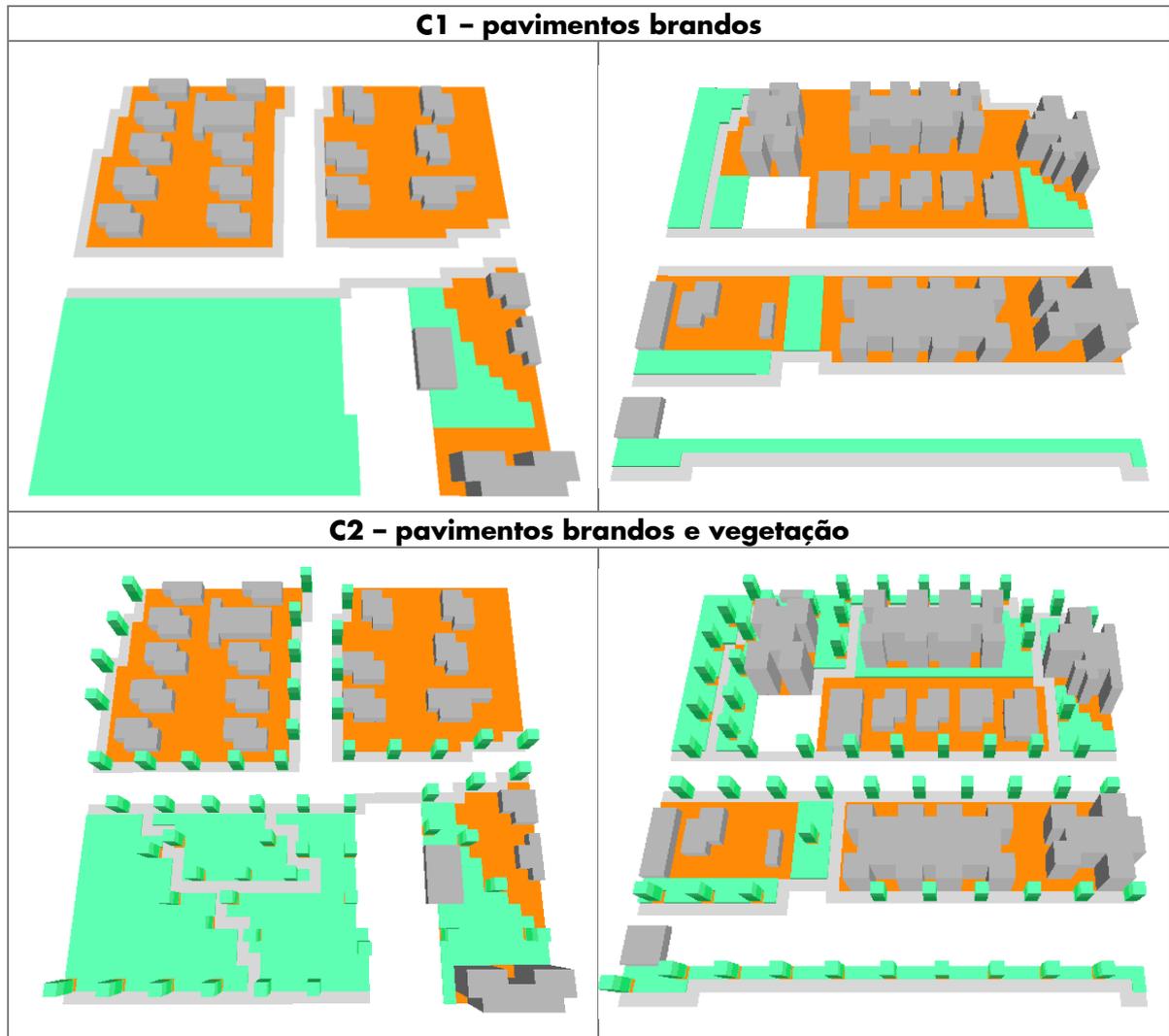
C0 – cenário atual, com pavimentos convencionais;

C1 – cenário com adição de pavimentos brandos nas calçadas e vias a partir do aumento da refletância;

C2 – cenário C1, com adição de vegetação.

Quadro 15. Modelagem dos cenários propostos.





7.2.3.1 Cenário 0: caso controle, pavimento convencional

O primeiro cenário, denominado de caso controle, apresenta a situação atual dos pontos 1 e 2. Foram utilizadas as configurações de pavimentos convencionais que mais se aproximam da realidade (Tabela 10). Por se tratar de uma representação simplificada, nos materiais de paredes e coberturas foram mantidos o padrão designado pelo *software*, iguais para todas as edificações.

Tabela 10. Dados gerais - C0.

Dados gerais do cenário 0	Valores
Edificações	Albedo:
-Paredes e Coberturas:	-0.42
[000000] Default Wall - moderate insulation	-0.42
Calçadas	Albedo: 0.30
[0100PP] Pavement (Concrete), used/dirty	Emissividade: 0.90

Vias [0000ST] Asphalt Road	Albedo: 0.20 Emissividade: 0.90
Vegetação [0100XX] Grass 25 cm aver. dense [0000T1] Tree 10 m very dense, leafless base	-

7.2.3.2 Cenário 1: pavimentos brandos

Para o segundo cenário, C1, foram alterados os valores de albedo das calçadas e vias, considerando o uso de pavimentos com alta refletividade – PAR (Tabela 11). No P1, as áreas relativas aos pavimentos representam aproximadamente 26%, e no P2, aproximadamente 32% da área total. Segundo Maruyama (2020) e Werneck (2018), os pavimentos brandos novos podem variar entre 0,40 e 0,80 de albedo. Entretanto, considerando as condições climáticas locais com alta intensidade de radiação solar, foram escolhidos valores intermediários para este cenário, de forma a evitar desconforto luminoso ou múltiplas reflexões nas edificações. Portanto, o albedo foi alterado de 0.30 para 0.50 nas calçadas, e de 0.20 para 0.60 nas vias.

Tabela 11. Dados gerais - C1.

Dados gerais do cenário 1	Valores
Calçadas	Albedo: 0.50
Vias	Albedo: 0.60

7.2.3.3 Cenário 2: pavimentos brandos e vegetação

O cenário 2, C2, foi elaborado para avaliar o uso de duas estratégias em conjunto: os pavimentos brandos selecionados no cenário 1, e a vegetação, utilizada como mecanismo de sombreamento dos pavimentos. Além da arborização nas vias e calçadas, foram criados passeios com vegetação entre os edifícios e nas áreas verdes existentes, levando em consideração os caminhos informais identificados nas imagens de satélite. Foi acrescentado no banco de dados do *software* a árvore oiti (*licania tomentosa*), bastante utilizada na arborização de Teresina (Tabela 12). Essa espécie também foi utilizada no estudo de Werneck (2018), e foram usados os mesmos dados de altura, índice foliar e perfil LAD obtidos em seu estudo (Figura 49).

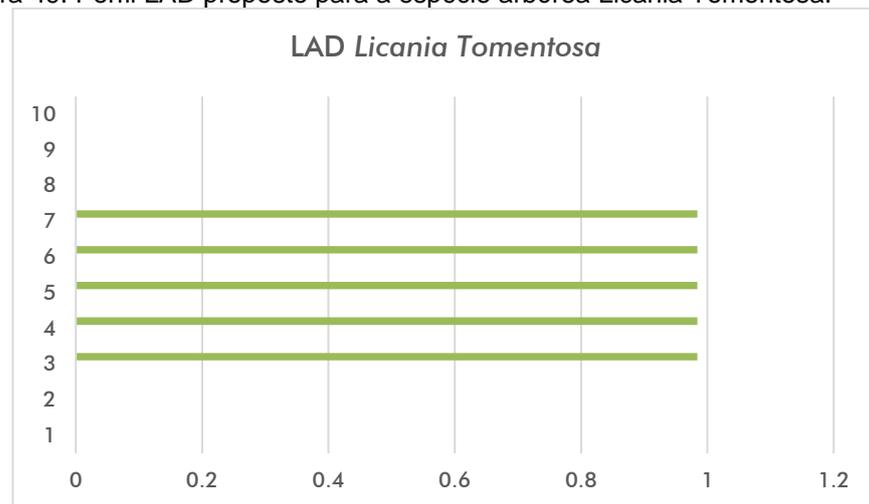
Tabela 12. Dados gerais - C2.

Dados gerais do cenário 0	Valores
Calçadas	Albedo: 0.50
Vias	Albedo: 0.60
Vegetação	

[0100XX] Grass 25 cm aver. Dense	-
Oiti (vegetação modificada no DB Manager)	Altura (m): 7,5 IAF (m ² /m ²): 4,734 LAD (m ² /m ³): 0,984

Fonte: Adaptado de Werneck (2018).

Figura 49. Perfil LAD proposto para a espécie arbórea Licania Tomentosa.



Fonte: Adaptado de Werneck (2018, p.85).

7.3 Extração e Análise dos Dados

Para a análise do microclima a partir das simulações computacionais, os dados são extraídos por meio do *plugin* Leonardo (Figura 50). Para o estudo, foi escolhido o dia 31 de outubro de 2022, o mais quente do ano durante o período seco (setembro a dezembro) de acordo com os dados do INMET, e os horários de 09h, 15h e 21h, indicados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Os resultados são apresentados em forma de mapas de manchas.

Figura 50. Aba do Leonardo.



Fonte: ENVI-met V. 5.1.1.

7.4 Validação dos dados

Para a validação dos dados, é realizada uma análise crítica a partir dos resultados simulados, a fim de verificação da margem de erro. Podem ser utilizados procedimentos metodológicos para isso, na falta de um sistema de validação do

software ENVI-met, a partir da comparação dos dados simulados referentes às condicionantes climáticas, como temperatura e umidade relativa do ar e os dados históricos registrados pela estação do INMET para o dia simulado no estudo.

8

8.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados e discussões obtidos a partir das simulações computacionais realizadas no *software* ENVI-met 5.1.1, para os três cenários definidos para os pontos 1 e 2 de análise no Residencial Parque Brasil: C0 – apresenta a situação atual, com pavimentos convencionais; C1 – modifica os materiais de superfície por pavimentos brandos; C2 – alia as estratégias de pavimentos brandos e vegetação. Os dados gerados são apresentados por meio de mapas e quadros comparativos.

Para a análise do microclima, foram utilizadas as variáveis de temperatura e umidade relativa do ar, temperatura de superfície e temperatura média radiante. A variável de velocidade do vento não foi considerada relevante, de acordo com os resultados próximos a zero em todos os cenários, não podendo ser considerada uma estratégia bioclimática para a região do objeto de estudo. Por fim, após os resultados obtidos, foram elencadas as diretrizes para as áreas públicas em conjuntos habitacionais em Teresina.

8.1 Ponto 1 - PI

8.1.1 Temperatura do ar

A Tabela 13 apresenta os resultados da diferença de temperatura do ar para os dois cenários hipotéticos em relação ao cenário 0 (caso controle) no ponto 1, com base nas médias obtidas a partir das simulações para os horários de 9h, 15h e 21h. O recorte do ponto 1 está localizado em uma área pouco densa e com alta incidência solar direta, desta forma, a mudança de albedo dos materiais de superfície e o sombreamento proporcionado pela arborização das vias ocasionaram reduções na temperatura do ar.

O cenário 1, com adição de pavimentos brandos, apresenta uma redução média de temperatura inexpressiva no horário das 9h, e uma menor redução no horário das 15h, de $-0,1^{\circ}\text{C}$. No período da noite, o cenário obteve o maior valor, com uma redução média de $-0,65^{\circ}\text{C}$. O cenário 2, que representa o uso de pavimentos brandos aliados à vegetação como estratégia de mitigação dos efeitos de ICU, apresentou maiores reduções de temperatura durante o dia, com maior valor médio de $-0,3^{\circ}\text{C}$ no período da manhã. No período da noite, às 21h, o cenário apresentou menor redução em relação ao cenário 1, de $-0,1^{\circ}\text{C}$.

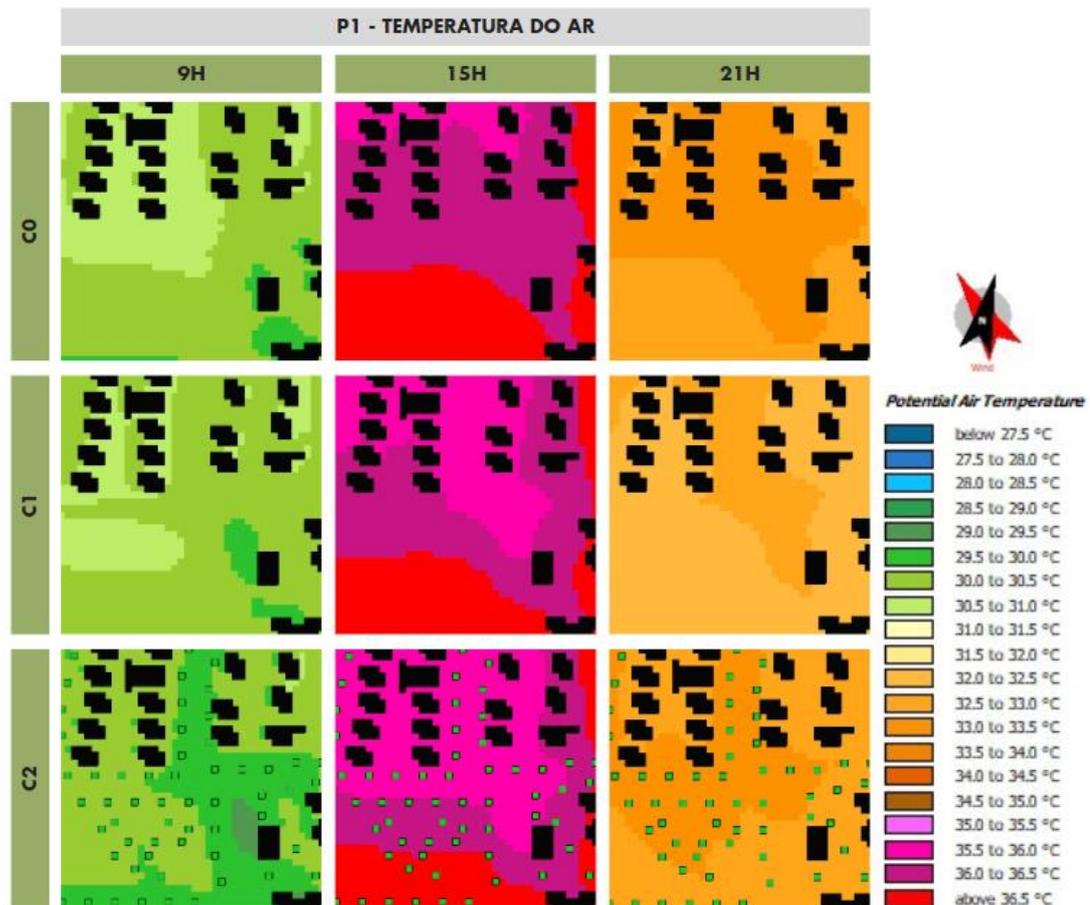
Tabela 13. Resumo das diferenças médias de temperatura simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.

Ponto 1 - Temperatura do ar			
	9H	15H	21H
Cenário 1: ΔTar ($^{\circ}\text{C}$)	0	-0,1	-0,65
Cenário 2: ΔTar ($^{\circ}\text{C}$)	-0,3	-0,2	-0,1

A Figura 51 apresenta os mapas de temperatura do ar para os três cenários simulados, nos horários estipulados. Às 9h, observa-se que o cenário 0, com pavimentos convencionais, apresenta em sua maior área temperaturas entre 30°C e 31°C . No cenário 1, as manchas com temperaturas mais elevadas são reduzidas, e a maior parte do mapa apresenta temperaturas entre $30,5^{\circ}\text{C}$ e 31°C , com redução pontual na ordem de $0,5^{\circ}\text{C}$. O cenário 2 apresentou o melhor resultado no período da manhã, com redução pontual de temperatura na ordem de 1°C . É possível observar no mapa a influência da vegetação, delimitando as áreas com maiores reduções de temperatura.

Às 15h, constatou-se uma menor redução das temperaturas, devido à alta radiação solar local, especialmente no período seco simulado. Todos os cenários apresentam variação de temperatura acima de 35,5°C. O cenário 2 mostrou um aumento da mancha de temperaturas entre 35,5°C e 36°C, principalmente nas regiões das vias com pavimentos brandos e com vegetação, apresentando redução pontual de 0,6°C, em comparação com 0,5°C no mesmo horário para o cenário 1.

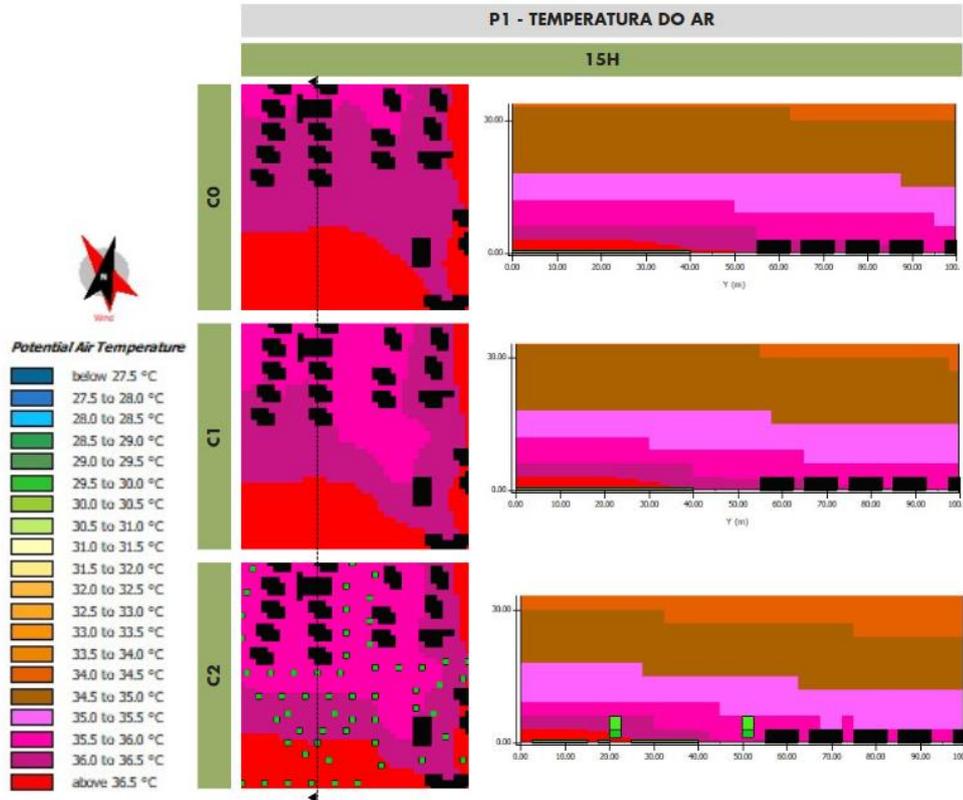
Figura 51. Mapas de distribuição da temperatura do ar referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 1.



Às 21h, o cenário 1 apresentou o melhor resultado, com a maior parte do mapa com temperaturas entre 32°C e 32,5°C, obtendo redução pontual na ordem de 0,7°C. O cenário 2 apresentou redução inexpressiva de temperatura no período da noite, com diminuição pontual de 0,1°C e observou-se um aumento da temperatura embaixo do sistema de vegetação adicionado nas vias. A Figura 52 mostra o corte dos mapas de temperatura do ar, no horário das 15h. É possível observar a influência dos pavimentos brandos e da vegetação na redução da temperatura do ar na altura do pedestre. De forma geral, as áreas mais expostas à radiação solar apresentaram

as maiores temperaturas. Além disso, a área verde sem arborização e tratamento se configurou como zona de calor no horário mais quente.

Figura 52. Corte dos mapas de temperatura do ar para o ponto 1 às 15h nos cenários simulados.



8.1.2 Umidade relativa do ar

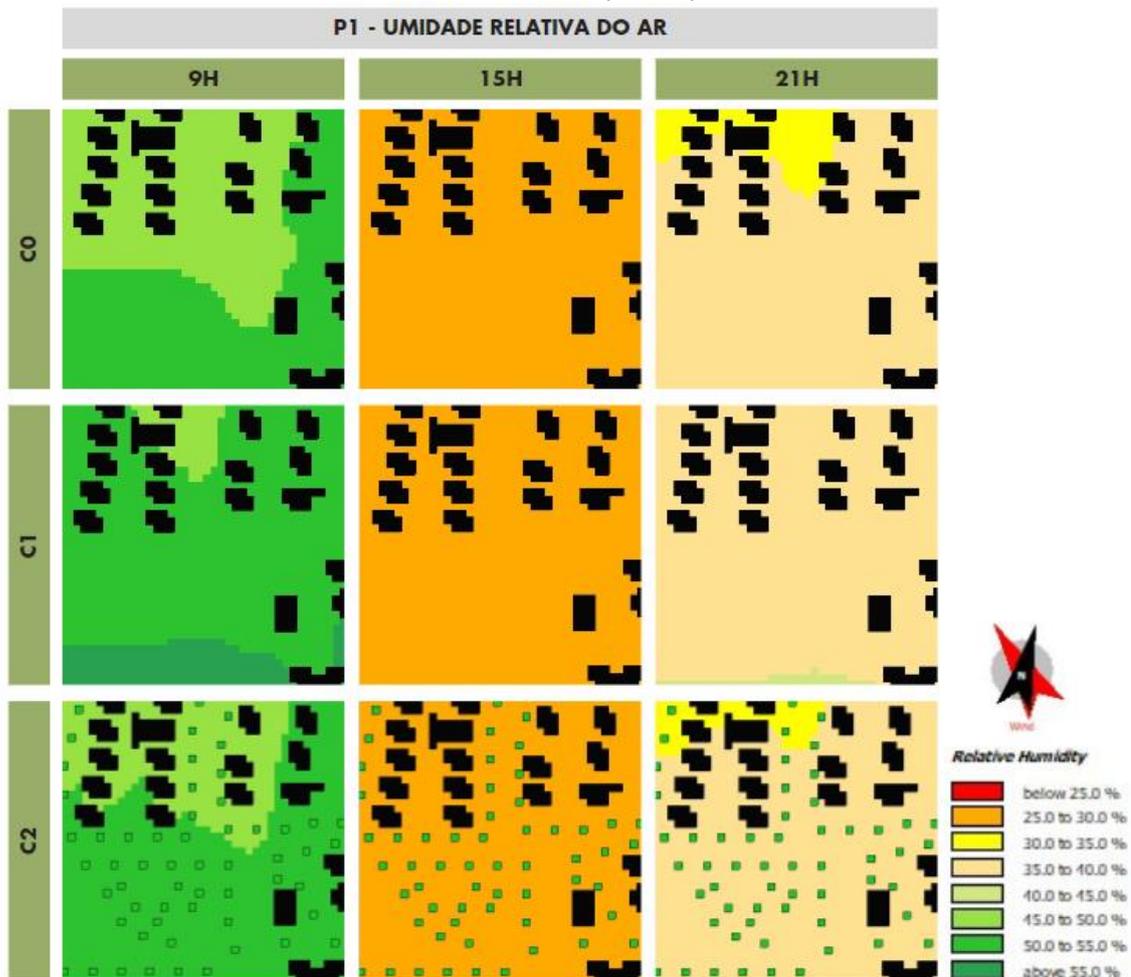
Quanto à umidade relativa do ar, a Tabela 14 apresenta o resumo das diferenças das médias entre os cenários 1 e 2, em relação ao caso controle. O cenário 1, com adição de pavimentos brandos, apresentou os maiores aumentos na umidade do ar, com média máxima de 2,75% no período da manhã. No cenário 2, com adição de pavimentos brandos e vegetação, o melhor resultado também foi atingido no período da manhã, com aumento de 1,05%. No turno da noite, às 21h, o primeiro cenário obteve um aumento na ordem de 0,75%, e não foi detectada diferença no resultado no segundo cenário.

Tabela 14. Resumo das diferenças médias de umidade relativa do ar simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.

Ponto 1 - Umidade relativa do ar			
	9H	15H	21H
Cenário 1: ΔTar (%)	+2,75	+0,4	+0,75
Cenário 2: ΔTar (%)	+1,05	+0,2	0

A Figura 53 apresenta os mapas das variações de umidade relativa do ar, para os cenários simulados nos horários estipulados. Às 9h, observa-se no cenário 1, uma redução da mancha de menores valores de umidade, entre 45 e 50%, em relação ao cenário 0, atingindo valores acima de 55% de umidade do ar, com aumento pontual de 3,9%. Às 15h, os mapas não apresentam alterações em nenhum dos cenários, com umidade entre 25% e 30% em toda a região, entretanto, obteve-se aumento pontual na ordem de 1% e 0,9% nos cenários 1 e 2 respectivamente. No período da noite, o cenário 1 apresenta o melhor resultado, com umidade entre 35% e 40% em todo o recorte, e aumento pontual de 1,1%. Neste horário, o cenário 2 foi o menos expressivo, com aumento pontual de 0,4%.

Figura 53. Mapas de distribuição da temperatura do ar referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 1.



8.1.3 Temperatura de superfície

Os resultados de temperatura de superfície foram mais expressivos que os de temperatura do ar, o que já era esperado, devido ao aumento do albedo dos materiais das vias e calçadas. No ponto 1, essa alteração corresponde a 26% da superfície horizontal do recorte simulado. No geral, as maiores reduções de temperatura de superfície ocorreram nas áreas com pavimentos brandos sob as árvores.

Na Tabela 15, observam-se os resultados das médias obtidas nas simulações. O cenário 1 apresenta a maior redução média, de até 2,9°C às 9h, em relação aos pavimentos convencionais. Os outros horários apresentaram reduções menos relevantes, de 1,25°C no período da tarde, e de 0,85°C no período da noite. O cenário 2 também apresentou reduções, com máxima de 2,15°C às 9h. O período da tarde atingiu valores de até 0,65°C, e o turno da noite teve a menor diferença, com redução inexpressiva de apenas 0,15°C.

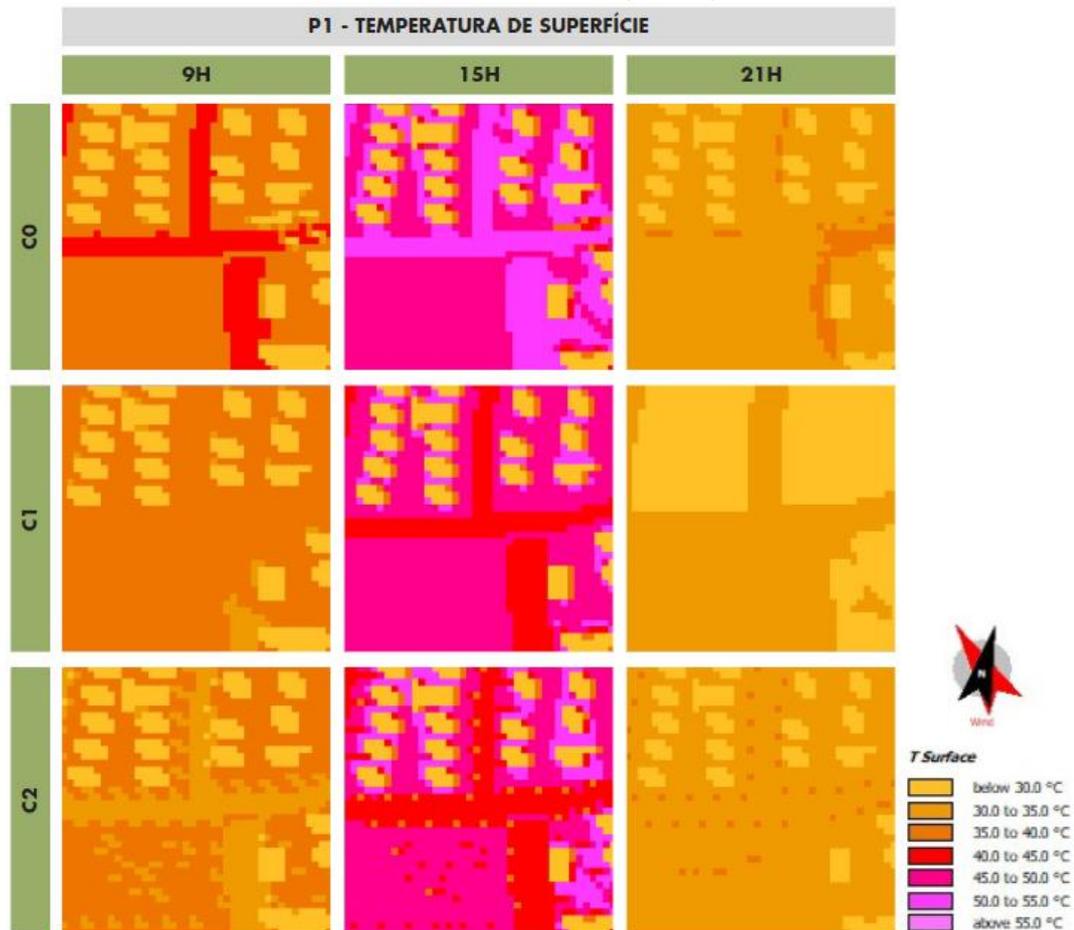
Tabela 15. Resumo das diferenças médias de temperatura de superfície simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.

Ponto 1 - Temperatura de superfície			
	9H	15H	21H
Cenário 1: ΔT_{ar} (°C)	-2,9	-1,25	-0,85
Cenário 2: ΔT_{ar} (°C)	-2,15	-0,65	-0,15

Na Figura 54, estão representados os mapas de distribuição da temperatura de superfície no recorte. No cenário 0, às 9h, observa-se a marcação das vias e calçadas como foco de calor em relação aos demais materiais de superfície. No cenário 1, obteve-se uma redução desta temperatura, igualando as vias e calçadas com os demais materiais superficiais, com redução pontual na ordem de 7,9°C. Porém, o cenário 2 apresentou os melhores resultados, com as vias, calçadas e entorno das árvores com temperaturas entre 30 e 35°C, e redução pontual na ordem de 13,7°C.

Às 15h, é possível observar alterações diretas na temperatura das vias e embaixo das árvores. O cenário 1 apresentou redução pontual de 9,2°C, enquanto o cenário 2 apresentou resultados mais expressivos ainda, com redução pontual na ordem de 13,80°C. O período da noite obteve os menores valores, com predominância de temperaturas entre 30 e 35°C e reduções pontuais na ordem de 5,6 e 2,6°C para os cenários 1 e 2, respectivamente.

Figura 54. Mapas de distribuição da temperatura de superfície referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 1.



8.1.4 Temperatura média radiante

A temperatura média radiante, junto com a temperatura do ar, possui maior importância nos mecanismos termorreguladores do corpo humano, o que influencia o equilíbrio térmico humano e conseqüentemente a sensação de conforto ambiental.

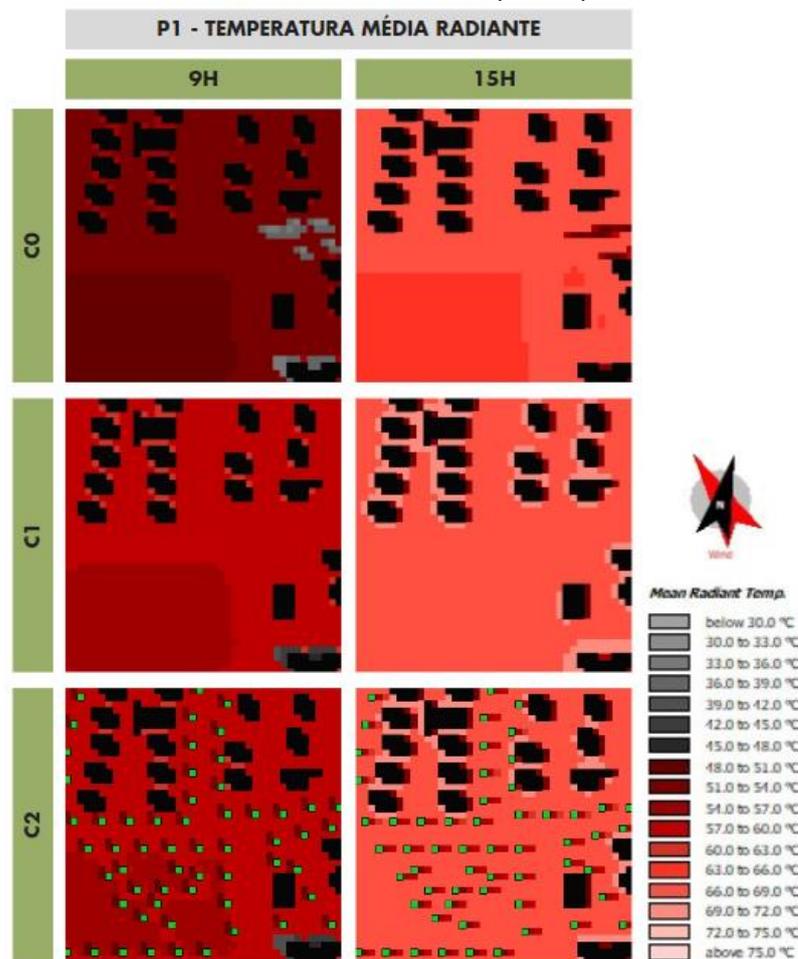
A Tabela 16 apresenta as diferenças médias de T_{mr} dos cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Os maiores valores médios foram obtidos no cenário 1, com o uso de pavimentos brandos, obtendo-se um aumento de 7,05°C às 9h. No cenário 2, com uso de pavimentos brandos e vegetação, o período da manhã também apresentou resultado elevado, com o aumento de 6,35°C. Nas demais horas do dia, as diferenças médias foram semelhantes.

Tabela 16. Resumo das diferenças médias de temperatura média radiante simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.

Ponto 1 - Temperatura média radiante			
	9H	15H	21H
Cenário 1: ΔT_{ar} (°C)	+7,05	+2,3	+2,2
Cenário 2: ΔT_{ar} (°C)	+6,35	+2	+1,95

A Figura 55 apresenta os mapas de distribuição da Tmr no ponto 1, no nível de 1,50m, do pedestre, para as 9h e 15h. No período da manhã, o cenário 1, com uso de pavimentos brandos, apresentou aumento de temperatura em praticamente toda a sua área exposta. Em contrapartida, o cenário 2, com uso de vegetação e pavimentos brandos, apresentou uma redução de Tmr embaixo das árvores, e na área verde, onde foi criado um percurso com calçada e vegetação. Isso se deve ao fato de a arborização atuar como um filtro para a radiação solar, impedindo a incidência direta de radiação nos pavimentos e sua reflexão.

Figura 55. Mapas de distribuição da temperatura média radiante referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 1.



8.2 Ponto 2 - P2

8.2.1 Temperatura do ar

A Tabela 17 apresenta as diferenças médias entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0 (caso controle), no ponto 2. Os resultados obtidos para a temperatura do ar nos cenários hipotéticos foram mais expressivos nesse recorte, em comparação ao ponto 1. O cenário 2 teve maiores reduções de temperatura do ar, ao aliar as estratégias de pavimentos brandos e vegetação, com melhor índice médio no período da manhã, na ordem de 0,55°C, e menor índice médio no período da noite, de 0,1°C. A estratégia do cenário 1 também trouxe reduções, com maior impacto às 9h, na ordem de 0,5°C, e foi menos eficaz no período da noite, com uma redução menos expressiva, de 0,15°C.

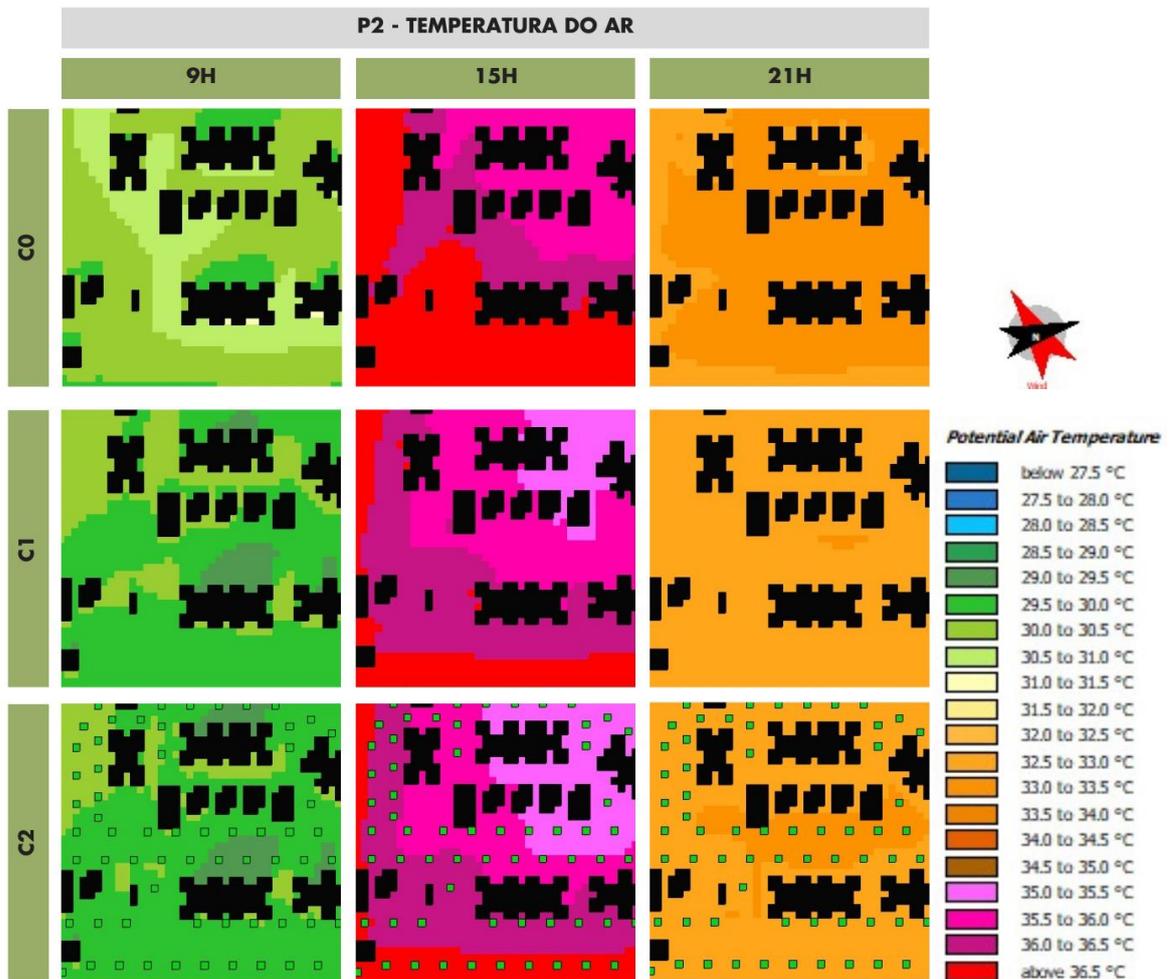
Tabela 17. Resumo das diferenças médias de temperatura do ar simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.

Ponto 2 - Temperatura do ar			
	9H	15H	21H
Cenário 1: ΔT_{ar} (°C)	-0,5	-0,2	-0,15
Cenário 2: ΔT_{ar} (°C)	-0,55	-0,25	-0,1

A Figura 56 destaca os mapas de distribuição de temperatura do ar extraídos nos três cenários simulados e nos horários definidos. Às 9h, observa-se uma predominância de temperaturas entre 30 e 31°C no cenário 0. Com a adição de pavimentos brandos, no cenário 1, constata-se uma redução pontual de até aproximadamente 1°C, especialmente nas áreas onde os pavimentos foram alterados. No cenário 2, a adição de árvores contribuiu para o aumento da mancha de temperaturas entre 29,5 e 30°C, mais amena do que no cenário controle, atuando inclusive entre os prédios, onde foram criados passeios arborizados, com redução pontual de até 1,1°C.

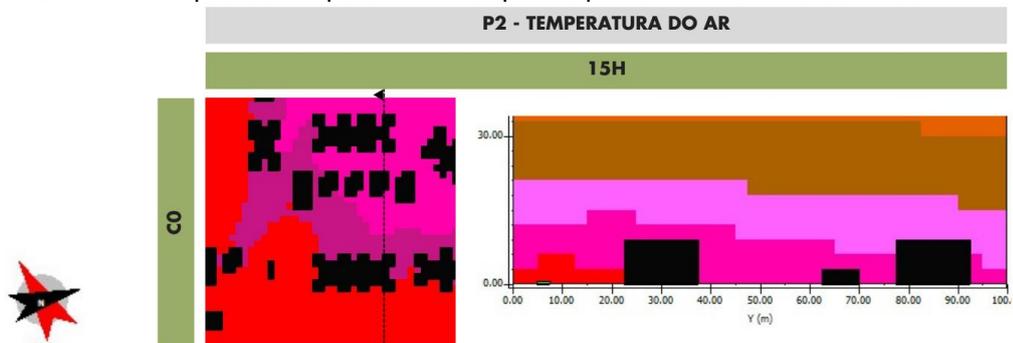
Às 15h, é possível observar as alterações na temperatura do ar no cenário 1, especialmente onde houve adição de pavimentos brandos, com uma redução pontual de 0,7°C. No cenário 2, obteve-se uma diminuição da mancha acima de 36,5°C, com redução pontual na ordem de 0,7°C. No período da noite, o cenário 1 apresentou melhor mapa, quase uniformemente com temperaturas entre 32,5°C e 33°C.

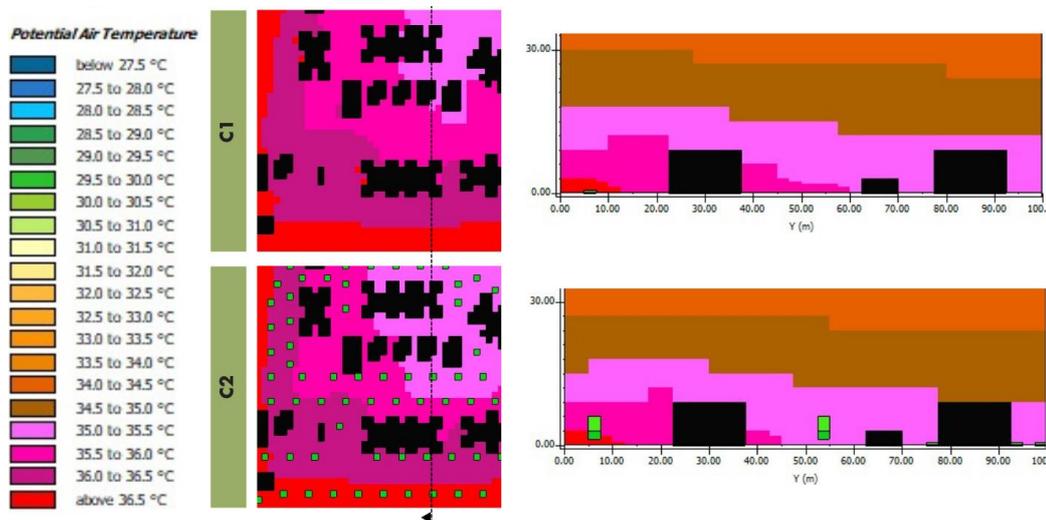
Figura 56. Mapas de distribuição da temperatura do ar referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 2.



Na Figura 57, a vista em corte dos cenários às 15h evidencia o efeito local das estratégias de pavimentos brandos e de vegetação, proporcionando uma melhoria no microclima no nível do pedestre = 1,5m.

Figura 57. Corte dos mapas de temperatura do ar para o ponto 2 às 15h nos cenários simulados.





8.2.2 Umidade relativa do ar

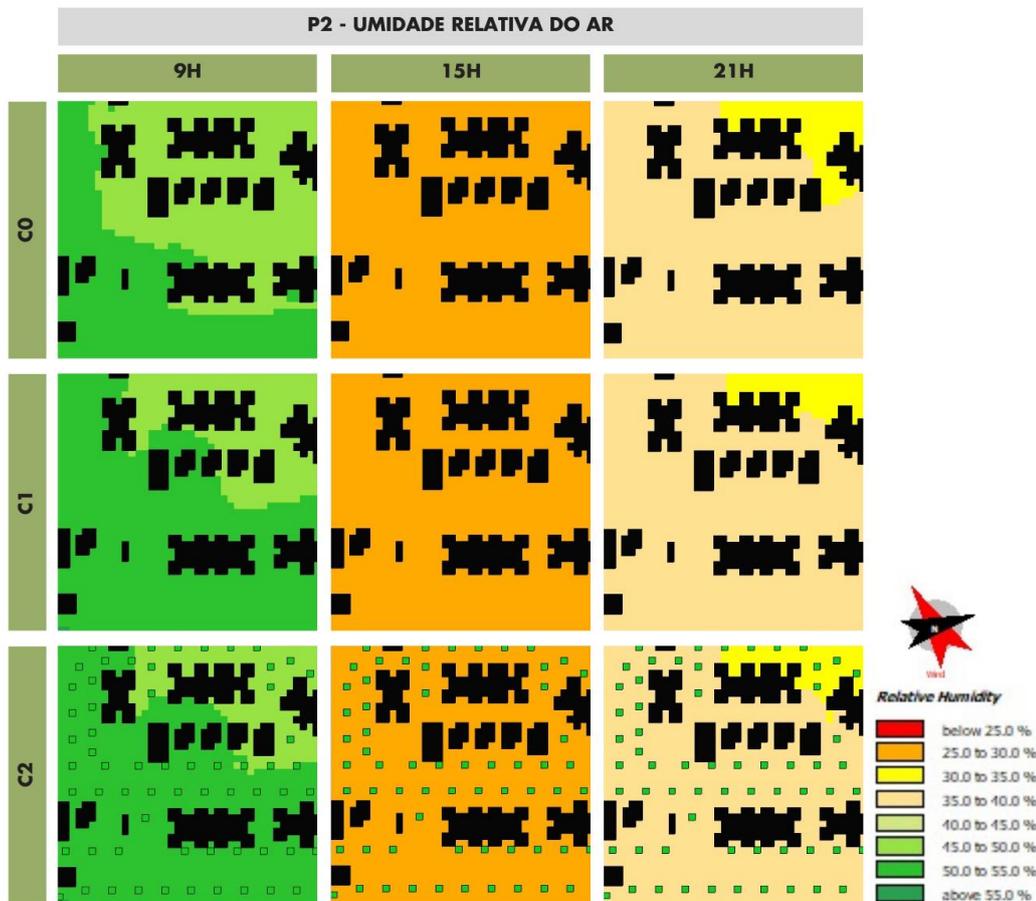
Quanto à umidade relativa do ar no ponto 2, a Tabela 18 apresenta o resumo das diferenças médias entre os cenários. O cenário de adição de vegetação e pavimentos brandos, cenário 2, teve maiores ganhos médios, de até 0,75% no período da manhã e 0,3% no período da tarde. À noite, a média dos índices foi igual para ambas as estratégias. No cenário 1, o maior aumento do índice de umidade foi de 0,65%, no período da manhã.

Tabela 18. Resumo das diferenças médias de umidade relativa do ar simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.

Ponto 2 - Umidade relativa do ar			
	9H	15H	21H
Cenário 1: ΔTar (%)	+0,65	+0,2	+0,2
Cenário 2: ΔTar (%)	+0,75	+0,3	+0,2

Nos mapas de distribuição da umidade relativa do ar no ponto 2 (Figura 58), o período da manhã teve as maiores alterações. Os cenários 1 e 2 tiveram uma redução da mancha de umidade entre 45% e 50%, e um aumento da mancha de umidade entre 50 e 55%, com ganho pontual de 2,8 e 2,9% respectivamente. Nos períodos da tarde e da noite não houve alterações significativas nos mapas, com predominância de índices entre 25% e 30% e reduções pontuais de 0,9% às 15h e predominância de 35% a 40% e reduções pontuais de 0,4% às 21h.

Figura 58. Mapas de distribuição da umidade relativa do ar referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 2.



8.2.3 Temperatura de superfície

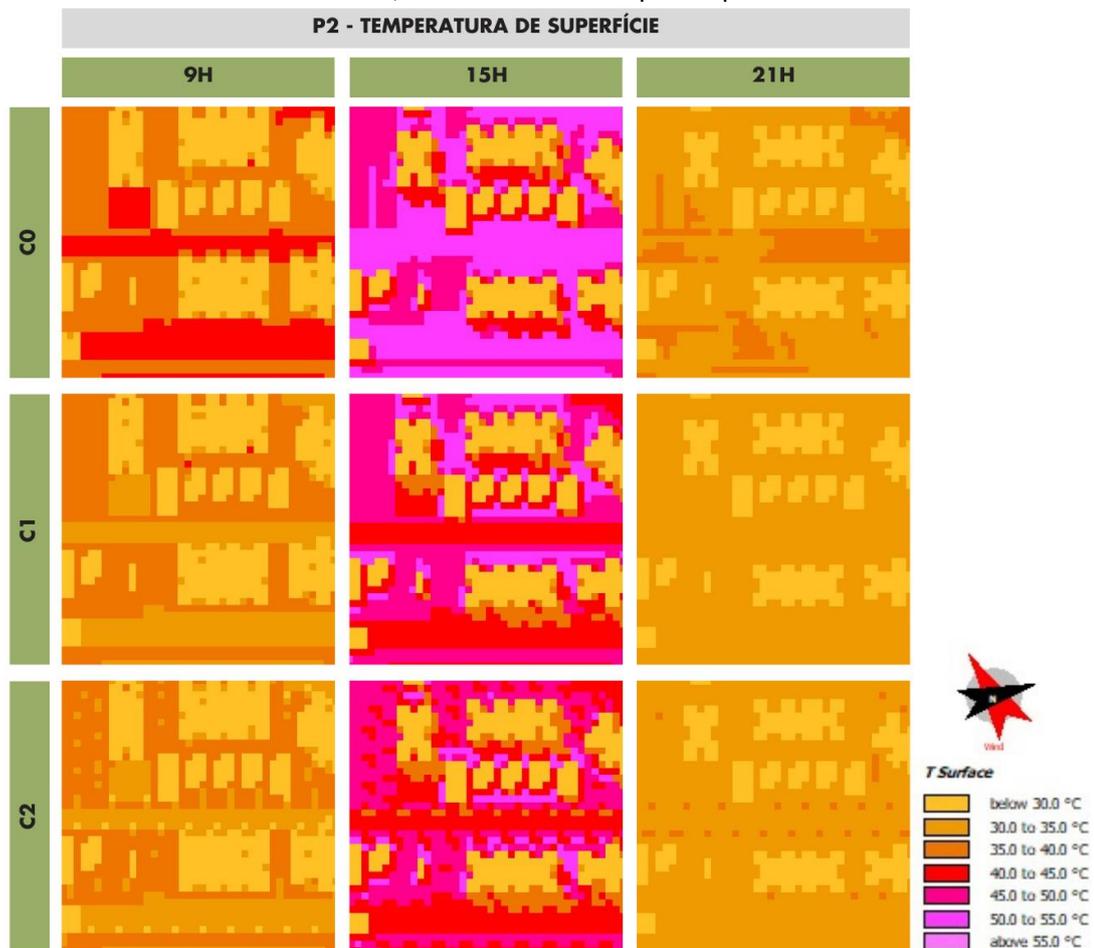
Os resultados médios da redução de temperatura de superfície para o cenário 1 foram maiores no ponto 2 em comparação ao ponto 1 (Tabela 19). A principal via do ponto 2 está localizada na orientação norte-sul, com edifícios de 9m no entorno próximo, ocasionando sombras em boa parte do dia. Desta forma, a radiação solar e reflexões são menos intensas nos materiais de superfície do que no ponto 1. O cenário 2, com adição de pavimentos brandos e vegetação, apresentou maior redução de temperatura de superfície, com índice médio de 2,3°C no período da manhã. Nos demais períodos, os resultados foram menos expressivos.

Tabela 19. Resumo das diferenças médias de temperatura de superfície simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.

Ponto 2 - Temperatura de superfície			
	9H	15H	21H
Cenário 1: ΔT_{ar} (°C)	-1,75	-0,95	-0,55
Cenário 2: ΔT_{ar} (°C)	-2,3	-1,25	-0,05

Os mapas da Figura 59 mostram a redução da temperatura de superfície com o uso das estratégias de pavimentos brandos e vegetação. No cenário 1, às 9h, obteve-se uma redução pontual de 9,6°C. No mesmo horário, no cenário 2, é possível observar redução pontual de 14,7°C nas vias cujos pavimentos brandos estão sob a copa das árvores. Às 15h, os mapas dos cenários 1 e 2 mostram a redução de temperatura de superfície no desenho das vias e embaixo das árvores, com reduções pontuais na ordem de 10,1 e 13,3°C respectivamente. No período da noite, pode-se observar nos mapas que ocorreram reduções menos expressivas, com valores pontuais na ordem de 2,7 e 2,9°C para os cenários 1 e 2, respectivamente.

Figura 59. Mapas de distribuição da temperatura de superfície referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 2.



8.2.4 Temperatura média radiante

A análise de temperatura média radiante para o ponto 1 também se aplica ao ponto 2. A Tabela 20 mostra o resumo das diferenças médias entre os cenários 1 e 2 para os três horários. Às 9h, o cenário 1 apresentou maiores ganhos, com aumento

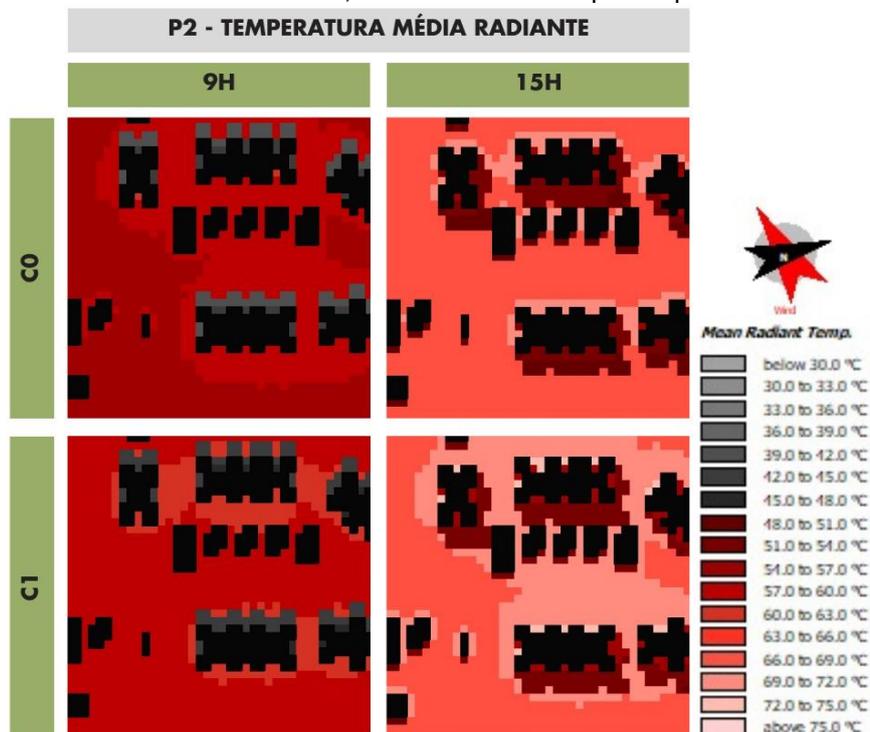
de 2,4°C. No período da noite, o cenário 2 apresentou maior índice, na ordem de 3,05°C.

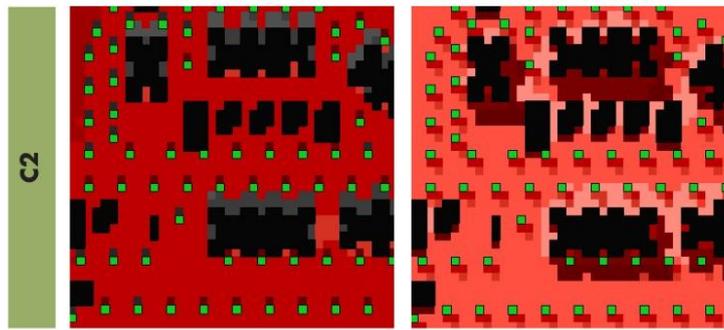
Tabela 20. Resumo das diferenças médias de temperatura média radiante simuladas entre os cenários 1 e 2 em relação ao cenário 0. Altura de referência = 1,5m.

Ponto 2 - Temperatura média radiante			
	9H	15H	21H
Cenário 1: ΔT_{ar} (°C)	+2,4	+1,6	+0,3
Cenário 2: ΔT_{ar} (°C)	+1,05	+0,55	+3,05

Os mapas da Figura 60 mostram que às 9h, o cenário com pavimentos brandos apresentou maiores ganhos de Tmr, com aumento pontual na ordem de 2,6°C nas áreas expostas à radiação. Entretanto, o cenário 2 apresenta redução pontual de Tmr na ordem de 12,4°C nas áreas sombreadas, proporcionadas pela arborização. Às 15h, no cenário 1, as áreas com pavimentos brandos expostos apresentaram maiores aumentos na Tmr, especialmente na região entre os edifícios de 9m de altura, que criam um efeito de cânion com proporção W/H=3,5. No cenário 2, observa-se uma redução da Tmr na ordem de 12,7°C embaixo da vegetação.

Figura 60. Mapas de distribuição da temperatura média radiante referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o ponto 2.





8.3 Discussões

Em relação à temperatura do ar, os resultados mais expressivos para ambos os pontos (1 e 2) foram obtidos no cenário 2, com uso da estratégia de pavimentos brandos aliada à arborização das vias e passeios, e o horário com maior redução de temperatura ocorre no período da manhã, atingindo redução pontual na ordem de 1,1°C. Às 15h, as reduções obtidas foram semelhantes nos cenários e pontos simulados, com reduções pontuais na ordem de 0,5°C a 0,7°C. O período da noite teve os resultados menos expressivos em ambos os pontos simulados, com reduções pontuais na ordem de 0,1 e 0,2°C, destoando apenas no cenário 1 do ponto 1, com redução de 0,7°C.

Para a umidade relativa do ar, o uso de pavimentos brandos obteve resultados positivos, com maiores ganhos em relação ao uso da estratégia aliada à arborização no ponto 1. Os maiores valores foram registrados no turno da manhã, com aumento pontual máximo na ordem de 3,9% entre todos os cenários simulados. O período da tarde obteve resultados semelhantes nos cenários simulados, variando ganhos pontuais na ordem entre 0,9 e 1%. Às 21h, os resultados foram os menos expressivos, com ganho pontual de 0,4% em três cenários (cenário 1 do ponto 2 e cenários 1 e 2 do ponto 2) e ganho pontual de 1,1% no cenário de pavimentos brandos do ponto 1.

Reduções mais significantes foram obtidas com a temperatura de superfície, ao substituir os pavimentos convencionais por pavimentos brandos, a partir do aumento do albedo dos materiais, o que reduz a transferência de calor sensível para a atmosfera, a emissão de ondas longas e consequentemente reduz a temperatura de superfície (AKBARI et. al, 2016). As maiores reduções foram identificadas no cenário 2, com o uso de pavimentos brandos e vegetação, ao atingir diminuição pontual máxima na ordem de 14,7°C. O período da tarde também obteve resultados satisfatórios com ambas as estratégias, com reduções pontuais entre 9 e 13°C.

Outro aspecto relevante a se considerar no estudo é o uso da variável de temperatura média radiante, uma vez que foi utilizada a estratégia de pavimentos brandos a partir do aumento de albedo dos materiais, o que ocasiona um aumento nas reflexões da radiação solar. Segundo Werneck (2018), o aumento da T_{mr} contrabalança os efeitos positivos da estratégia, pois afeta o nível de conforto térmico devido ao aumento da carga radiante que incide no indivíduo.

Li, He e Harvey (2016) avaliaram os impactos do uso de pavimentos brandos no conforto térmico humano e obtiveram que o aumento da refletividade dos materiais de superfície ocasiona um aumento da T_{mr}, como resultado do aumento da radiação refletida, atingindo o corpo humano, que conseqüentemente produz um maior índice PET. Desta forma, a indicação para uso de pavimentos com alta refletância reduz a temperatura de superfície, como verificado no presente estudo, porém pode reduzir o conforto térmico, especialmente nos dias mais quentes, realidade preocupante com o contexto climático da cidade de Teresina.

Entretanto, observou-se que a T_{mr} diminuiu nos cenários com vegetação, de forma que a presença do verde no ambiente traz efeitos benéficos através da redução da troca de calor entre o homem e o ambiente ao seu redor. A arborização atua como um filtro para a radiação solar, ao fornecer sombra para os pavimentos e desta forma, diminuir as reflexões, evitando também efeitos de ofuscamento.

8.4 Diretrizes bioclimáticas para conjuntos habitacionais em Teresina

De acordo com a pesquisa realizada, e considerando as variáveis climáticas que interferem no microclima das áreas externas dos conjuntos habitacionais, as diretrizes bioclimáticas que resumem os resultados obtidos e buscam proporcionar maior conforto térmico e qualidade para estes espaços são:

Quadro 16. Diretrizes propostas.

Nº	Diretriz	Estratégia
I	Uso de pavimento brando PAR, de concreto, nas vias, com albedo mínimo de 0,60, porém, deve-se ter cuidado com albedos muito elevados ou cores demasiadamente claras, em áreas expostas ao sol, passíveis de múltiplas reflexões para os edifícios e pedestres.	Pavimentos brandos - PAR
II	Adoção de pavimento brando PAR, de concreto, nas calçadas, com albedo mínimo de 0,50, com os mesmos cuidados do item anterior.	Pavimentos brandos - PAR

III	Não é recomendável o uso de pavimentos permeáveis, pois estes não são indicados para climas quentes e secos, uma vez que sua propriedade de resfriamento necessita de água para agir, e em ambientes sem a presença de água, com chuvas escassas e altas temperaturas, estes pavimentos tendem a atingir temperaturas mais elevadas do que o pavimento convencional.	Pavimentos brandos - PP
IV	Criação de um plano de arborização para as vias e calçadas em conjuntos habitacionais, com acompanhamento e manutenção, uma vez que o sombreamento é essencial para uma maior eficácia dos pavimentos brandos e evita problemas de ofuscamento e reflexões no nível do pedestre.	Vegetação
V	Incentivo à arborização de quintais e casas nos conjuntos habitacionais. O solo exposto se mostrou uma fonte de calor, especialmente nas horas mais quentes do dia, e o aumento da vegetação nestes espaços aumentaria o conforto térmico e a qualidade de vida dos usuários.	Vegetação

Fonte: Autora (2023).

9

9.CONCLUSÕES

Nesta seção, serão apresentadas as conclusões da pesquisa, com relação à hipótese e os resultados obtidos, as limitações encontradas e perspectivas para pesquisas futuras.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a contribuição do uso de pavimentos brandos e vegetação para a melhoria dos efeitos de zonas de calor, no contexto de conjuntos habitacionais na cidade de Teresina. Foram escolhidos como objeto de estudo dois recortes do Residencial Parque Brasil, com configurações urbanas distintas, para enriquecer a análise microclimática.

Destaca-se que a pesquisa utilizou uma integração de métodos para a realização das análises, com uso de diferentes tecnologias – sensoriamento remoto, geoprocessamento e simulação computacional – realizando uma análise a partir do macro, com imagens de satélite de um recorte na escala da cidade, para o micro, com modelos tridimensionais dos recortes escolhidos, na escala da rua e calçadas.

A escolha do objeto de estudo se deu a partir de uma pesquisa com o uso de sensoriamento remoto e geoprocessamento, com imagens dos satélites Landsat 5 e 8, visando identificar as zonas de calor na sub-região norte da capital. Os resultados apontaram o Residencial Parque Brasil como uma zona de calor, e a análise mais aprofundada do objeto de estudo mostrou a quase completa ausência de arborização no espaço e uso de pavimentos convencionais, apesar das condições climáticas da cidade de Teresina. A partir destes resultados, foram escolhidos dois pontos dentro do residencial para análise microclimática.

A metodologia para a análise do residencial foi realizada em duas etapas, onde inicialmente foram preenchidas fichas bioclimáticas, para auxiliar na compreensão do espaço físico e sua interação com a base, a superfície fronteira e o entorno. Em seguida, foi utilizada a simulação computacional para análise do cenário controle e de dois cenários hipotéticos. Os dados foram validados a partir de uma análise crítica dos resultados, através da comparação das variáveis obtidas com os dados climáticos fornecidos pelo INMET.

As simulações foram realizadas no período quente e seco, e foram utilizados os dados climáticos para o dia 31.10.2022, considerado o mais quente do ano, segundo dados históricos do INMET. Foram simulados 6 (seis) cenários diferentes, com tempo médio de 24h para cada simulação. O *software* Envi-met mostrou-se eficaz para a análise proposta, ao permitir a criação de cenários e extração de diversas variáveis do microclima.

No geral, os resultados obtidos mostraram a eficácia do uso de pavimentos brandos como estratégia para amenizar os efeitos das ICU's na cidade de Teresina, que, apesar de valores menos expressivos, atingiram redução pontual de temperatura

do ar de até 1°C nas áreas expostas ao sol, além do aumento da umidade relativa do ar e significativa redução das temperaturas de superfície. Entretanto, sua aplicação deve ser realizada considerando que o aumento do albedo do material não deve causar desconforto e ofuscamento nos pedestres e motoristas, ou proporcionar múltiplas reflexões para os edifícios no entorno. A temperatura média radiante deve ser considerada nos estudos para a aplicação da estratégia, uma vez que é essencial para o conforto térmico.

Por outro lado, a combinação do uso de pavimentos brandos e vegetação se mostrou ainda mais efetiva, com redução pontual de temperatura do ar de até 1,1°C, aumento da umidade relativa do ar, maior redução da temperatura de superfície, e diminuição da T_{mr}. O sombreamento proporcionado pela arborização favorece a redução da T_{mr} a partir da diminuição da incidência solar, de forma que atua no aumento da sensação de conforto térmico.

Os melhores resultados foram obtidos às 9h, e os menos expressivos, às 21h, resultados satisfatórios para as condições climáticas de Teresina, que possui alta amplitude térmica e tende a ter noites mais amenas e dias e tardes mais quentes. Entretanto, às 15h, no período mais quente e seco, apesar de menores do que os diurnos, os resultados ainda foram efetivos para a amenização dos efeitos das ICU's.

Desta forma, o estudo mostra que é possível o uso de estratégias bioclimáticas para a mitigação dos efeitos de zonas de calor na cidade de Teresina, com enfoque em conjuntos habitacionais. Estes espaços necessitam de um plano de arborização que seja colocado em prática, e não apenas no papel. O uso da vegetação, estratégia tão comum, traz melhorias não só para o clima urbano, como mostrado no estudo, mas para o embelezamento estético, para a saúde física, mental, para a fauna local e ainda ajuda a criar cidades cada vez mais resilientes às alterações climáticas.

Aliado a isso, a escolha de pavimentos brandos nestes espaços, ao invés de materiais convencionais em projetos replicados para os mais diversos climas no país, mostra uma preocupação com os condicionantes climáticos e com a qualidade de vida da população que irá ocupar estes espaços. É preciso habitar a cidade segundo suas condições climáticas, e preparar os espaços públicos para oferecer conforto térmico e qualidade aos habitantes. Além disso, os resultados obtidos trazem benefícios além do conforto, e atuam na sensação de bem-estar nos indivíduos, o que melhora a

qualidade de vida em diversos aspectos, a paisagem urbana e a relação com o espaço urbano. É necessário pensar e construir as cidades como espaços mais saudáveis, resilientes e sustentáveis para as futuras gerações.

9.1 Limitações do trabalho

Uma limitação do trabalho refere-se ao uso da versão *basic* do *software* Envi-met 5.1.1, que restringiu a dimensão da área de estudo e o método da simulação. Outra questão é a limitação da simulação estática do programa, sugerindo-se para trabalhos futuros, modelos de simulação dinâmicos ou medições *in loco* com uso de transectos móveis. Além disso, destaca-se o longo tempo de simulação do programa, que levou em média 24h por cenário que, por questões de aprimoramento, tiveram que ser repetidas cerca de três vezes cada uma.

Outra limitação foi a distância geográfica do objeto de estudo, o que impossibilitou medições locais para a validação dos resultados das simulações, e a pandemia da COVID 19, que dificultou por meses o acesso aos órgãos públicos para obter documentos necessários, que se encontravam fechados devido à emergência de saúde.

Por fim, é importante ressaltar que as simulações computacionais e seus resultados não substituem a participação da população no processo de tomada de decisões, e que para etapas futuras de implementação das estratégias, é necessária uma consulta à população.

9.2 Perspectivas para trabalhos futuros

Para estudos futuros, sugere-se a análise de outras tipologias de conjuntos habitacionais, com o uso das mesmas estratégias desta pesquisa, para verificar sua efetividade em diferentes localidades na cidade.

A partir dessa análise, sugere-se também o mapeamento climático urbano de Teresina e identificação das zonas climáticas locais, através do uso de geoprocessamento, sensoriamento remoto e simulações computacionais, para proporcionar o acesso às diferentes configurações climáticas dentro da cidade e facilitar a proposição de estratégias para a mitigação das ICU's em zonas com características distintas.

Sugere-se ainda o uso de diferentes albedos para a simulação dos pavimentos, e a análise da eficácia de diferentes tipos de pavimentos brandos, como pavimento permeável, contraindicado para o clima da cidade de Teresina.

Recomenda-se a simulação no período quente e seco, com temperaturas mais críticas, entretanto, sugere-se por fim a comparação das estratégias entre os períodos quente e seco, e quente e úmido, para avaliar o comportamento do microclima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOELATA, Amir; SODOUDI, Sahar. Evaluating urban vegetation scenarios to mitigate urban heat island and reduce buildings' energy in dense built-up areas in Cairo. **Building and Environment**, v. 166, n. September, p. 12, 2019.

ABREU, Loyde Vieira. **Avaliação da escala de influência da vegetação no microclima por diferentes espécies arbóreas**. 2008. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

_____. **Contribuições das árvores para o bioclima térmico no desenho urbano em cidades tropicais: o caso de Campinas, SP**. 2012. 148 f. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

ABREU, Emanoele Lima; MOURA, Handerson Fernando Nunes; LOPES, Danilo Sousa; BRITO, Jaqueline dos Santos. Análise dos índices de cobertura vegetal arbórea e sub-arbórea das praças do centro de Teresina, PI. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 3, 2012, Goiânia. **Anais...Goiânia: IBEAS**, 2012, p. 1-11.

ADÁRIO, Júlia Lima; MARQUES, Aline Calazans; SILVA, Caio Frederico. Aplicação do Arquivo Climático na Análise do Microclima Urbano da Cidade de Juiz de Fora - MG. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15, 2019, João Pessoa. **Anais... João Pessoa: ANTAC**, 2019, p.1395-1404.

AKBARI, Hashem. **Cooling our communities: a guidebook on tree planting and light coloured surfaces**. USA: Heat Island Group, 1992.

_____. **Shade Trees Reduce building energy use and CO2 emission from power plants**. USA: Heat Island Group, 2001.

AKBARI, Hashem; CARTALIS, Constantinos; KOLOKOTSA, Denia; MUSCIO, Alberto; PISELLO, Anna Laura; ROSSI, Federico; SANTAMOURIS, Mattheos; SYNNEFA, Afroditi; WONG, Nyuk Hien; ZINZI, Michele. 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.

AKBARI, Hashem; MATTHEWS, H. Damon. Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 2–6, 2012.

AKBARI, Hashem.; MENON, Surabi; ROSENFELD, Arthur. Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO 2. **Climatic Change**, v. 94, n. 3–4, p. 275–286, 2009.

ALMEIDA JÚNIOR, Wodson da Fonseca; SIMÕES, Patrícia Priscila da Silva; MORAIS, Reurysson Chagas de Sousa . Análise da temperatura de superfície de área descampada no município de Teresina-PI com a utilização de sensoriamento remoto para os anos de 2007 e 2017. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 10, 2019, Fortaleza. **Anais...Fortaleza: IBEAS**, 2019, p.1-5.

ANDRADE, Carlos Sait Pereira de. **Representação do calor em Teresina, PI**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2000.

_____. Teresina e Clima: Indissociabilidades no estudo da cidade. **Revista Equador** (UFPI), v. 5, n. 3, p. 398–420, 2016.

ANDRADE, Renata Godinho Cordeiro de. **A contribuição da vegetação para melhoria do microclima urbano: estudo de caso em Superquadras de Brasília**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília – UNB, Brasília, 2022.

ANUPAM, B. R.; SAHOO, Umesh Chandra; CHANDRAPPA, Anush K.; RATH, Prasenjit. Emerging technologies in cool pavements: A review. **Construction and Building Materials**, v. 299, p.1-17, 2021.

ARAÚJO, Paulo Roberto de; TUCCI, Carlos E. M.; GOLDENFUM, Joel A. Avaliação da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução de Escoamento Superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 21–29, 2000.

BARBOSA, Ariela. **Urbanismo Bioclimático**: efeitos do desenho urbano na sensação térmica. 2018. 356 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

BASTOS, Edson Alves; ANDRADE JÚNIOR, Anderson Soares de. **Boletim Agrometeorológico do Ano de 2004 para o Município de Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2005.

BASTOS, Edson Alves; ANDRADE JÚNIOR, Anderson Soares de. **Boletim Agrometeorológico de 2020 para o município de Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2021.

BLUMENSCHNEIN, Raquel Naves; PEIXOTO, Elane Ribeiro; GUINANCIO, Cristiane; AMORIM, Cláudia Naves David; IKEDA, Débora Félix Rodrigues; ANDRADE, Liza; BUSON, Márcio; LEMOS, Natália; ZANONI, Vanda A. G.. **Avaliação da qualidade da habitação de interesse social**: projetos urbanístico e arquitetônico e qualidade construtiva. Brasília: UNB, FAU, 2015.

BRAZ E SILVA, Ângela Martins Napoleão. Planejamento e fundação da primeira cidade no Brasil Império. **Cadernos PROARQ**, v. 18, p. 215–236, 2012.

BRITTO, Lélío; HELLER, Lucas. **Influência da temperatura no comportamento de Pavimentos Flexíveis – uma análise direcionada às ilhas de calor**. Prime -Engenharia e Consultoria; CONCEPA/ANTT, 2016.

BUENO, José Luis de Carvalho.; COSTA, Lúcia Maria de Sá Antunes. Teresina, Cidade Verde: Para além da imagem poética, uma necessidade. **Equador**, v. 5, n. 3, p. 458–478, 2016.

BUENO-BARTHOLOMEI, Carolina Lotufo; LABAKI, Lucila Chebel; SANTOS, Rozely Ferreira dos. Estudo da atenuação da radiação solar incidente por diferentes espécies arbóreas. In: ENCONTRO NACIONAL, 5 / ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2, 1999, Fortaleza. **Anais...**Fortaleza: ANTAC, 1999.

BUENO-BARTHOLOMEI, Carolina Lotufo. **Influência da vegetação no conforto térmico urbano e no ambiente construído**. 2003. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

CAMPOS, Maíra Ribeiro. **O uso do envi-met na análise microclimática urbana: a praça Afonso Pena-Tijuca, RJ**. 2018. 155 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Arquitetura)— Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

CARDOSO, Renata dos Santos. **Modelagem do microclima e estratégias de mitigação do calor urbano em zonas climáticas locais**. 2021. 149 f. Tese (Doutorado em Geografia)— Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2021.

CASTELO BRANCO, Lorena Mileib Burgos. **Microclimas urbanos no plano piloto de Brasília: o caso da Superquadra 108 Sul**. 2009. 146 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CHU, Andrea.; LIN, Ying-Chen.; CHIUEH, Pei-Te. Incorporating the effect of urbanization in measuring climate adaptive capacity. **Land Use Policy**, v. 68, n. May, p. 28–38, 2017.

CONGEDO, Luca. **Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Release 6.0.1.1.**, 2018.

ERELL, Evyatar; PEARLMUTTER, David; WILLIAMSON, Terry. **Urban microclimate: designing the spaces between buildings**. London: MPG Books, 2011.

FAÇANHA, Antônio Cardoso. **Evolução urbana de Teresina: Agentes, Processos e formas espaciais da cidade**. 1998. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 1998.

_____. A evolução urbana de Teresina: passado, presente e... . **Carta Cepro**, v. 22, n. 1, p. 59–69, 2003.

FARIA, Nathália de Mello; ROMERO, Marta Adriana Bustos. Análise da ventilação e da temperatura superficial da superquadra 500 do sudoeste – Brasília DF. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUIDO, 16, 2019, Palmas. **Anais...**Palmas: ANTAC, 2019.

FEITOSA, Sônia Maria Ribeiro; GOMES, Jaíra Maria Alcobaça.; MOITA NETO, José Machado; ANDRADE, Carlos Sait Pereira de. Consequências da urbanização na vegetação e na temperatura da superfície de Teresina – Piauí. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 6, n. 2, p. 58–75, 2011.

FERREIRA, João Sette Whitaker (coord.). **Produzir casas ou construir cidades? Desafios para um novo Brasil urbano. Parâmetros de qualidade para a implementação de projetos habitacionais e urbanos**. São Paulo: Editora FUPAM, 2012.

FERREIRA, Luciana Schwandner. **Vegetação, temperatura de superfície e morfologia urbana um retrato da região metropolitana de São Paulo**. 197 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo)— Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Fundação João Pinheiro. **Déficit habitacional no Brasil**. Belo Horizonte: Centro de Estatísticas e Informação, 2023.

GARTLAND, Lisa. **Ilhas de Calor**: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

GIVONI, Baruch. **Urban design in different climates**. Los Angeles: World Meteorological Organization, 1989.

HIGUERAS, Ester. **Urbanismo Bioclimático**. Barcelona: Gustavo Gili, 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. **Cidades e Estados**. 2021a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pi/teresina.html>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. **Tabela 1287 - População dos municípios das capitais e Percentual da população dos municípios das capitais em relação aos das unidades da federação nos Censos Demográficos**. 2021b. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1287#notas-tabela>>. Acesso em: 17 jan. 2023.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. **PNAD - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios**. 2015. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/educacao/9127-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 27 maio 2023.

INMET. **Normais Climatológicas do Brasil**. 2021. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais#>>. Acesso em: 13 jan. 2023.

INMET. **Tabela de Dados das Estações**. 2023. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A001>>. Acesso em: 10 abril 2023.

KALLAS, Luana Miranda Esper. **Desenhando com o clima e a vegetação**: um estudo de caso do loteamento HBB em Teresina-PI. 167 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)— Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2008.

KYRIAKODIS, Georgios-Evrystheas; SANTAMOURIS, Mattheos. Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates - Results from a large-scale urban mitigation project. **Urban Climate**, v. 24, p. 326–339, 2018.

LABAKI, Lucila Chebel; SANTOS, Rozely Ferreira dos Santos; BUENO-BARTHOLOMEI, Carolina Lotufo; ABREU, Loyde Vieira de. Vegetação e conforto térmico em espaços urbanos abertos. **Fórum Patrimônio**, v. 4, n. 1, p. 23–42, 2011.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. São Paulo: PW, 2014.

LI, H.; HE, Y.; HARVEY, J. Human thermal comfort: Modeling the impact of different cool pavement strategies. **Transportation Research Record**, v. 2575, p. 92–102, 2016.

LIMA, Iracilde Maria de Moura Fé. Áreas verdes urbanas e os rios de Teresina, Piauí, Brasil. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, v. 1, n. 1, 2020.

LIMA, Sílvia Maria Santana Andrade.; LOPES, Wilza Gomes Reis; FAÇANHA, Antônio Cardoso. Alterações na cobertura do solo em Teresina, Piauí, Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 33, 2021.

LIMA, Vânia Vieira; VIANA, Bartira Araújo da Silva. A dinâmica da política habitacional brasileira em Teresina-PI. **InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 5, n. 17, p. 01–22, 2019.

LIMA JÚNIOR, Marcos Airton e Silva; PIRES, Danilo Prado; BRAUNA, Carlos Henrique da Costa; SILVA, Carlos Ernando da. A importância do sistema de esgotamento sanitário na recuperação de ambientes degradados: o caso da região lagoas do norte em Teresina, Piauí. In: Congresso Nacional de Saneamento Básico, 30, **Anais...2019**.

LLANDERT, Luis Rodriguez-Avial. **Zonas verdes y espacios libres en la ciudad**. Madrid: Instituto de Estudios de Administración Local, 1982.

LOMBARDO, Magda Adelaide. **Ilha de calor nas metrópoles: O exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1985.

LOPES, Wilza Gomes Reis; LIMA, Amanda Lages de; MATOS, Karenina Cardoso; LEITE, Nícia Bezerra Formiga. A influência de políticas públicas habitacionais na expansão urbana: estudo do Residencial Jacinta Andrade, Teresina, Piauí. **Revista Jatobá**, v. 2, p. 34, 2020.

LÓPEZ, Diana Paola Maigua. **Ciudad y Cambio Climático**. Relación entre Local Climate Zone (LCZ), temperatura de la superficie (Ts) y Temperatura del Aire (Ta) en la Ciudad de Quito, Ecuador. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

LUCENA, Andrews José de. Notas conceituais e metodológicas em clima urbano e ilhas de calor. **Revista Continentes**, v. 2, n. 2, p. 28–59, 2013.

MACHADO, Nívea; ALENCAR, Vitória; LUÍS, Wanderson; MATOS, Karenina; LOPES, Wilza. Alterando o microclima de Teresina-PI com o sistema de espaços livres das praças do Plano Saraiva. In: COLÓQUIO QUAPÁ-SEL, 10, 2015, Brasília. **Anais...Brasília**, 2015.

MACHADO, Roselis Ribeiro Barbosa; PEREIRA, Eugênia Cristina Gonçalves; ANDRADE, Laíse de Holanda Cavalcanti. Evolução temporal (2000-2006) da cobertura vegetal na zona urbana do município de Teresina-Piauí-Brasil. **REVSBAU**, v. 5, n. 3, p. 97–112, 2010.

Mais de três mil casas já foram entregues no Residencial Jacinta Andrade. **Meio Norte**, 26 de fev. 2015. Disponível em: <<https://www.meionorte.com/noticias/mais-de-tres-mil-casas-ja-foram-entregues-no-residencial-jacinta-andrade-266286>>. Acesso em: 8 mar. 2023.

MARTINS, Leonardo Madeira; LIMA JÚNIOR, João Macedo; SOUSA, Keyciane Alves de; SOARES JÚNIOR, George Ney Lopes; MOURA JÚNIOR, Francisco dos Santos Moura; ROCHA, Paulo Vítor Guimarães; BATISTA, Valeska Alves Carneiro. Ocupações urbanas em áreas de risco: o caso da Vila Lindalma Soares em Teresina-PI. In: ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES, 2, 2020, Rio de Janeiro. **Anais do II Encontro Nacional de Desastres**. 2020.

MARUYAMA, Cíntia Miua. **Pavimentos brandos para a mitigação das Ilhas de Calor: o caso do Jardim da Luz e seu entorno em São Paulo/SP**. 268 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

MASCARÓ, Lúcia Raffo de. **Ambiência Urbana**. Porto Alegre: Sagra DC Luzzatto, 1996.

MASCARÓ, Juan Luis; MASCARÓ, Lúcia Raffo. **Vegetação urbana**. Porto Alegre: Masquatro, 2015.

MEDEIROS, Raimundo Mainar de. Sensações térmicas do período de 1977-2016 em Teresina-PI, Brasil. **Formação (Online)**, v. 26, n. 49, p. 235–258, 2019.

MENON, Surabi; AKBARI, Hashem; MAHANAMA, Sarith; SEDNEV, Igor; LEVINSON, Ronnen. Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO2 offsets. **Environmental Research Letters**, v. 5, n. 1, 2010.

MINELLA, Flávia Cristina Osaku. **Desenho urbano climaticamente orientado**: a influência da vegetação no ambiente térmico externo. 226 f. Tese (Doutorado em Tecnologia) — Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2014.

MIDR. Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional. **PlanHab – Plano de Habitação Nacional**, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/habitacao/planhab-2040>>. Acesso em: 30 maio 2023.

MIRANDA, Amanda Gomes; LIMA, Amanda Lages de; SANTOS, Camila Monteiro; MEDEIROS, Sandra Batista; MATOS, Karenina Cardoso; LOPES, Wilza Gomes Reis. Análise do sistema de praças do centro urbano de Teresina-PI. In: COLÓQUIO QUAPÁ-SEL, 10, 2015, Brasília. **Anais...**Brasília: 2015.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo; MENDONÇA, Francisco. **Teoria e Clima Urbano**: um projeto e seus caminhos. Em: Clima Urbano. São Paulo: Contexto, 2003.

MONTEIRO, Felipe Ferreira; SILVEIRA, Ana Lúcia Ribeiro Camilo da. Uso de dados de sensoriamento remoto para identificação de ilhas de calor em Teresina - PI. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, n. 7, p. 43–50, 2012.

NAKATA-OSAKI, Camila Mayumi; SOUZA, Léa Cristina Lucas de; RODRIGUES, Daniel Souto. 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.

NASCIMENTO, Francisco Alcides do. **A cidade sob o Fogo**: Modernização e violência policial em Teresina (1937-1945). Teresina: Fundação Monsenhor Chaves, 2002.

OKE, Timothy Richard. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. London: Group, Taylor & Francis, 1987.

_____. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, v. 11, p. 103–113, 1988.

_____. **Surface climate processes**. Montreal: McGill-Queen's University Press, 1997.

_____. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. World Meteorological Organization, n. 81, p. 51, 2004.

_____. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and observing methods**. Canada: World Meteorological Organization, 2006.

OLGYAY, Victor. **Design with climate**. New Jersey: Princeton University, 1963.

OLIVEIRA, Thiago Alves de; SOUZA, Lilian Aparecida; FERREIRA, Cássia de Castro Martins; CASSAB, Clarice. O conforto térmico como dimensão do habitar em conjuntos habitacionais: o caso do Parque das Águas em Juiz de Fora – MG. **Entre Lugar**, v. 10, n. 20, p. 122–151, 2019.

OLIVEIRA, Paulo Marcos Paiva de. **Cidade apropriada ao clima - a forma urbana como instrumento de controle do clima urbano**. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1988.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2023. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 28 ago. 2023.

ONU. UN-Habitat. **World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities**. 2022a. Disponível em: <<https://unhabitat.org/wcr/>>. Acesso em: 27 de maio 2023.

ONU. Organização das Nações Unidas. **População mundial atinge 8 bilhões de pessoas**. 2022b. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2022/11/1805342>>. Acesso em: 27 de maio 2023.

PIAUILINO, Rômulo. **Residencial Parque Brasil**. 2020. 1 fotografia. 1280 x 960. Disponível em: <<https://pmt.pi.gov.br/2020/10/16/prefeitura-inaugura-residencial-e-garante-moradia-a-mais-de-mil-familias/>>. Acesso em: 8 de mar. 2023.

PINHEIRO, Laécio de Oliveira.; SALES, Denise Alves.; OLIVEIRA, Romina Julieta Sanchez Paradizo de. Programa Lagoas do Norte como indutor de crescimento econômico para a região Norte de Teresina através de políticas públicas. **Brazilian Journal of Business**, v. 4, n. 4, p. 1807–1824, 20 out. 2022.

PINTO, Liliane Lopes Costa Alves. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PLN. Programa Lagoas do Norte. **Plano de reassentamento involuntário - PRI Canal Matadouro**. 2020.

QGIS Development Team. **Versão 2.8.9**. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2016.

QIN, Yinghong; HILLER, Jacob E. Water availability near the surface dominates the evaporation of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 77–84, 2016.

RIVERO, Roberto. **Clima e Arquitetura: Acondicionamento Térmico Natural**. Porto Alegre: D. C. Luzzatto Editores, 1986.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. **Arquitetura do Lugar: uma visão bioclimática da sustentabilidade em Brasília**. 1. ed. São Paulo: Nova Técnica Editorial, 2011.

_____. **Princípios Bioclimáticos para o desenho urbano**. 3a ed. Brasília: Editora UNB, 2013.

_____. **Arquitetura bioclimática do espaço público**. 4a ed. Brasília: Editora UNB, 2015.

ROMERO, Marta Adriana Bustos; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello.; LIMA, Erondina Azevedo; WERNECK, Daniela Rocha; VIANNA, Elen Oliveira.; SALES, Gustavo de Luna. **Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas**. 1a ed. Brasília: Editora ETB, 2019.

SANTAMOURIS, Mattheos. **Energy and climate in the urban built environment**. Londres: James & James, 2001.

_____. **Environmental Design of Urban Buildings: An Integrated Approach**. Londres: Earthscan, 2006.

_____. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 224–240, 2013.

SANTAMOURIS, Mattheos, SYNNEFA, Afroditi, & KARLESSI, Theoni. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar Energy**, v. 85, p. 3085–3102, 2011.

SHINZATO, Paula. **O impacto da vegetação nos microclimas urbanos**. 173 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)— Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SILVA, Bárbara Gomes. **Simulação Computacional de Zonas Climáticas Locais do Distrito Federal: a Contribuição Da Vegetação Intraurbana**. 117 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

SILVA, Bárbara; SILVA, Caio; SANTO, Teresa. Protocolo de Simulação Computacional do Microclima Urbano para a Cidade de Lisboa, Portugal. In: COLÓQUIO IBÉRICO GEOGRAFIA, 16, Lisboa. **Anais...Lisboa**, 2018.

SILVA, Caio Frederico e. **Caminhos bioclimáticos: desempenho ambiental de vias públicas na cidade de Teresina - PI**. 155 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)— Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SILVA, Caio Frederico e; CELIS, Aneli Maricielo Cárdenas; SILVA, Bárbara Gomes; WERNECK, Daniela Rocha; AVELINO FILHO, Lucídio Gomes; GÓES, Thiago Montenegro. **Simulação microclimática com o ENVI-met 5.0** [livro eletrônico] : guia metodológico. 1. ed.. Brasília, DF : LaSUS FAU: Editora Universidade de Brasília, 2022.

SILVA, Caio Frederico e.; ROMERO, Marta Adriana Bustos. **Simulação do clima urbano do Distrito Federal: experimentando o ENVI-met**. Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 2020. p. 17–53.

SILVA, Marlon Lima de; TOURINHO, Helena Lúcia Zagury. O Banco Nacional de Habitação e o Programa Minha Casa Minha Vida: duas políticas habitacionais e uma mesma lógica locacional. **Cadernos Metrópole**, v. 17, n. 34, p. 401–417, nov. 2015.

SILVA, Ivanize Claudia dos Santos e. **Índice Ambiental Urbano (IAU): uma contribuição ao estudo do planejamento e do conforto térmico em espaços abertos**. 239 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo)— Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SILVA, Rodrigo Garozi da. **Estudo de concreto permeável como pavimento**. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)— Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2019.

SILVEIRA, Ana Lúcia Ribeiro Camillo da. **Parâmetros bioclimáticos para avaliação de conjuntos habitacionais na região tropical subúmida do Brasil**. 312 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo)— Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SIMÕES, Ezio Luiz Martins. **Bioclimatismo e forma urbana**: simulação computacional em áreas de expansão no clima quente-seco do sertão paraibano. 286 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)— Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, 2016.

SOARES, Érica Cecília de Sousa. **Desenvolvimento Urbano Sustentável**: Uma visão do Programa Lagoas do Norte, Teresina, Piauí. 185 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) —Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2017.

SOARES, Érica Cecília de Sousa; LOPES, Wilza Gomes Reis. Reabilitação ambiental urbana de áreas inundáveis: Análise do projeto de drenagem urbana do Programa Lagoas do Norte. In: Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável, 7, Maceió. **Anais...**Maceió: 2016.

SOBRAL, Helena Ribeiro. Heat island in São Paulo, Brazil: Effects on health. **Critical Public Health**, v. 15, n. 2, p. 147–156, 2005

SORTE, Pedro Dias Boa. **Simulação térmica de paredes verdes compostas de vegetação nativa do cerrado**. 126 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)— Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SOUSA, Márcio Fabrício Leitão Oliveira de; SANTOS, Débora de Abreu; MENDES, Alan Pereira da Silva Falcão; ROCHA, Maria do Espírito Santo Abreu da; MELO, Lineardo Ferreira de Sampaio. Sensoriamento Remoto aplicado à análise espaço-temporal da temperatura de superfície do município de Teresina-PI. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ÁGUAS, SOLOS E GEOTECNOLOGIAS, 1, Uberaba, 2015. Uberaba: SASGEO. **Anais...** 2015.

SOUZA, Valéria Morais Balduino de. **A Influência da Ocupação do Solo no Comportamento da Ventilação Natural e na Eficiência Energética em Edificações. Estudo de Caso em Goiânia – Clima Tropical de Altitude**. 260 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)— Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

STEWART, Iain D.; OKE, Timothy Richard. **Local Climate Zones for Urban Temperature Studies**. Vancouver: Bulletin of the American Meteorological Society, 2012.

SUZUKI, Carlos Yukio; AZEVEDO, Angela Martins.; KABBACH JÚNIOR, Felipe Issa. **Drenagem subsuperficial de pavimentos**. Conceitos e dimensionamento. 1a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

TENNIS, Paul D.; LEMING, Michael L.; AKERS, David J. **Pervious concrete pavements**. Maryland: Silver Spring, 2004.

TERESINA. **LEI COMPLEMENTAR Nº 4.522**. Prefeitura Municipal de Teresina, 2014a.

TERESINA. **Diagnóstico da infraestrutura sócio-econômica e cultural da cidade de Teresina:** contribuições da agenda 2030. Teresina: Prefeitura Municipal de Teresina, 2014b.

TORRE, José Manuel Ochoa de la. **La vegetación como instrumento para el control microclimático.** Tese (Doutorado)— Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, Barcelona, 1999.

TORRES, Simone Carnaúba. **Forma e conforto:** estratégias para (re)pensar o adensamento construtivo urbano a partir dos parâmetros urbanísticos integrados à abordagem bioclimática. 397 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Urbano)— Centro de Artes e Comunicação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

VIANNA, Elen Oliveira. **O Campo Térmico Urbano. Ilhas de Calor em Brasília - DF.** 296 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo)— Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

VIANNA, Elen Oliveira; ROMERO, Marta Adriana Bustos. O processo de formação das Ilhas de Calor em Brasília/DF. In: CONFERÊNCIA DA REDE LUSÓFONA DE MORFOLOGIA URBANA, 1, Brasília, 2015. **Anais...**Brasília: PNUM, 2015.

VIEIRA, Ângela Oliveira; FAÇANHA, Antônio Cardoso. A produção do espaço urbano e a moradia popular em Teresina (PI). In: ENCONTRO NACIONAL DE GEÓGRAFOS, 18, São Luís, 2016. **Anais....**2016.

VIEIRA, Jane Paula da Silveira; ROMERO, Marta Adriana Bustos. Habitacional de Interesse Social na Cidade de Juiz de Fora – MG. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL, 15, Recife, 2013. **Anais...**Recife: ANPUR, 2013.

VOOGT, James. **How researchers measure Urban Heat Islands.** 2007. Disponível em: <http://www.epa.gov/heatisd/resources/pdf/EPA_How_to_measur_e_a_UHI.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2022.

VOOGT, James; OKE, Timothy Richard. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, p. 370–384, 2003.

VUJOVIC, Svetlana; HADDAD, Beachara; KARAKY, Hamzé; SEBAIBI, Nassim; BOUTOUIL, Mohamed. Urban Heat Island: Causes, Consequences, and Mitigation Measures with Emphasis on Reflective and Permeable Pavements. **CivilEng**, v. 2, n. 2, p. 459–484, 2021.

WERNECK, Daniela Rocha. **Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas:** estudo de caso em áreas comerciais em Brasília - DF. 134 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)— Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

WERNECK, Daniela; AZEVEDO, Erondina; ROMERO, Marta. Estudo de aquecimento urbano com métodos de transecto móvel e sensoriamento remoto. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15, 2019, João Pessoa. **Anais...**João Pessoa: ANTAC, 2019.

ZANLORENZI, Helena Cristina Padovani; SILVA FILHO, Demóstenes Ferreira da. O uso de barreiras vegetais para controle dos ventos em espaços abertos. **Revista IPT**, v. 2, n.10, p. 112–124, 2019.