UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO, SÃO CARLOS
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

BOJANA GALUSIC

**Ilhas de calor urbanas em São Carlos, SP e os impactos da permeabilidade dos
revestimentos urbanos horizontais**

São Carlos

2019

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO, SÃO CARLOS
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

BOJANA GALUSIC

**Ilhas de calor urbanas em São Carlos, SP e os impactos da permeabilidade dos
revestimentos urbanos horizontais**

Dissertação de mestrado, apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração:
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientadora:
Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles

VERSÃO CORRIGIDA
(Versão original encontra-se na unidade o que aloja o Programa de Pós-Graduação)

São Carlos

2019

AUTORIZO A REPRODUCAO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRONICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G181i Galusic, Bojana
Ilhas de calor urbanas em São Carlos, SP e os
impactos da permeabilidade dos revestimentos urbanos
horizontais / Bojana Galusic; orientadora Kelen
Almeida Dornelles. -- São Carlos, 2019.
267 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e
Tecnologia -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade de São Paulo, 2019.

1. Ilha de calor urbana. 2. Permeabilidade. 3.
Revestimentos urbanos horizontais. 4. Clima urbano.
5. Planejamento urbano. I. Almeida Dornelles, Kelen
, orient. II. Título.

Bibliotecária responsável pela estrutura de catalogação da publicação de acordo com a AACR2:
Brianda de Oliveira Ordonho Sígolo - CRB - 8/8229

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Bojana Galusic**

Título da dissertação: **"Ilhas de calor urbanas em São Carlos, SP e os impactos da permeabilidade dos revestimentos urbanos horizontais"**.

Data da defesa: **31/05/2019**

Orientador: Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles
(IAU/USP)

Não votante

Profa. Dra. Luciana Bongiovanni Martins Schenk
(IAU/USP)

Prof. Dr. Érico Masiero
(DECiv/ UFSCar)

Profa. Dra. Denise Helena Silva Duarte
(FAU/USP)

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Prof. Dr. Tomás Antonio Moreira.**

Agradecimentos

À minha orientadora Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles, pelos ensinamentos, motivação, paciência e, sobretudo, pela gentileza durante o desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

Às Profa. Dra. Denise Helena Silva Duarte e Profa. Luciana Bongiovanni Martins Schenk e ao Prof. Érico Masiero, pelo aceite em participar da banca da defesa.

Às Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki e Profa. Dra. Rosana Maria Caram, pelas notas e observações feitas na fase do exame de qualificação.

Ao Prof. Dr. Victor Figueiredo Roriz, pelo empréstimo dos instrumentos HOBO, sem os quais não teria sido possível realizar este trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcel Fantin, pelas imagens do drone.

À Embrapa, especialmente ao Dr. José Ricardo Macedo Pezzopane, pela disponibilização dos dados da estação meteorológica.

Aos funcionários do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, em especial a Pedro Mattia, pela imensa ajuda na realização da pesquisa em campo.

Aos colegas do IAU, especialmente a Nayara Marucci e Simone Mesquita, pela ajuda com a pesquisa e, mais ainda, por dividir comigo a trajetória do mestrado.

Às pessoas que gentilmente permitiram a instalação dos instrumentos de medição em suas residências, mesmo sem me conhecer.

À minha família peruano-brasileira: Márcia, Felipe e Silvinha, por terem recebido uma estrangeira com muito carinho e por todos os momentos que passamos juntos nessa cidade.

Aos meus pais, Kata e Stjepan, e meu irmão Velibor, que apesar da distância física estão sempre comigo. *Hvala vam za sve.*

Finalmente, ao meu amor, meu esposo, *my everything*, José Antonio, a quem dedico este trabalho. Obrigada pela leitura e correção do texto, ajuda com o Excel, pelo apoio incondicional, pela paciência infinita, por trabalhar *for real*, por buscar incansavelmente *grace of life*, simplesmente obrigada por existir e dividir seus dias comigo apesar dos contratempos da vida. *ILY.*

RESUMO

GALUSIC, B. **Ilhas de calor urbanas em São Carlos, SP e os impactos da permeabilidade dos revestimentos urbanos horizontais**. 2019. 267 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

O fenômeno de ilhas de calor urbanas ocorre principalmente nos centros urbanos caracterizados pela grande concentração de edificações, ausência de vegetação e uso de materiais impermeáveis com grande capacidade de armazenar calor. As temperaturas elevadas causam desconforto térmico, problemas de saúde e maior consumo de energia para resfriamento de edificações. O objetivo da pesquisa presente é investigar o impacto da permeabilidade dos revestimentos urbanos horizontais na variação da temperatura do ar e na formação de ilhas de calor urbanas na cidade de São Carlos, SP. Embora São Carlos seja uma cidade de porte médio, o processo da urbanização criou áreas densamente construídas e sem muita vegetação, o que favorece o aquecimento do ar e das superfícies. Para avaliar a variação da temperatura do ar em relação às características urbanas, foram realizadas medições fixas da temperatura e umidade relativa do ar em 37 pontos que representam diferentes tipos de ocupação urbana em quatro estações do ano, durante 15 dias em cada estação. Nos entornos dos pontos de medição foi feito o mapeamento da permeabilidade dos revestimentos horizontais das superfícies. A correlação entre as variáveis climáticas e urbanísticas foi analisada para cada estação separadamente e a seguir fez-se a análise comparativa de todas as estações através da normalização dos dados climáticos obtidos por monitoramento. A partir dos dados normalizados foram elaborados mapas térmicos. Os resultados confirmam o aumento da temperatura e diminuição da umidade em locais onde predominam revestimentos impermeáveis. Desse modo, este estudo fornece subsídios importantes para o planejamento urbano, a fim de criar espaços urbanos termicamente confortáveis na cidade de São Carlos.

Palavras chave: Ilha de calor urbana. Permeabilidade. Revestimentos urbanos horizontais. Clima urbano. Planejamento urbano.

ABSTRACT

GALUSIC, B. **Urban heat island in São Carlos, SP and the impact of permeability of horizontal urban coatings**. 2019. 267 p. Thesis (MSc in Architecture and Urbanism) – Institute of Architecture and Urbanism, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

The phenomenon of urban heat island occurs principally in urban centers characterized by big concentration of buildings, absence of vegetation and use of impermeable materials with high capacity to store heat. Elevated temperatures cause thermal discomfort, health problems and higher energy consumption for cooling of the buildings. The objective of the present research is to investigate the impact of permeability of horizontal urban coatings on the variation of air temperature and formation of urban heat islands in the city of São Carlos, SP. Although São Carlos is a medium sized city, the process of urbanization created densely built up areas without a lot of vegetation, which benefits the heating of air and surfaces. In order to evaluate the temperature variation in relation to urban characteristics, fixed measurements of air temperature and humidity were performed in 37 points which represent different types of urban occupation in four seasons of the year, during 15 days in each season with interval of 30 minutes. In the surroundings of each point of measurement was performed a mapping of permeability of horizontal coatings. The correlation between climatic and urbanistic variables was analyzed for each season separately and following was done a comparative analysis of all the seasons by the use of normalization and extrapolation of climatic data. Based on the normalized data were elaborated temperature maps. The results confirm the increase in temperature and the decrease in humidity in the locations where impermeable coatings dominate. Thus, this study provides important supplies for urban planning, in order to create thermally comfortable urban spaces in the city of São Carlos.

Keywords: Urban heat island. Permeability. Horizontal urban coatings. Urban climate. Urban planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema das escalas climáticas de Oke (adaptado).....	41
Figura 2 – Arborização urbana.....	52
Figura 3 – Efeitos aerodinâmicos do vento.....	56
Figura 4 – (a) Localização do Estado de São Paulo no Brasil, (b) localização do município de São Carlos no Estado de São Paulo e (c) municípios limítrofes e localização geográfica do município de São Carlos.	74
Figura 5 – Expansão da malha urbana de São Carlos até 2002	75
Figura 6 – Vista aérea de São Carlos.....	76
Figura 7 – Zoneamento urbano.....	77
Figura 8 – Fluxograma da metodologia.....	82
Figura 9 – Locais de medição na cidade de São Carlos.....	85
Figura 10 – Sensores HOBO e as proteções	106
Figura 11 – Exemplos de instalação dos instrumentos.....	107
Figura 12 – Variação da temperatura durante a aferição no dia 21. 01. 2017	108
Figura 13 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 1	112
Figura 14 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 2.....	112
Figura 15 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 3.....	113
Figura 16 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 4.....	113
Figura 17 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 5.....	114
Figura 18 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 6.....	114
Figura 19 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 7	115
Figura 20 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 8.....	115

Figura 21 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 9.....	116
Figura 22 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 10.....	116
Figura 23 – Classificação dos revestimentos horizontais nos entornos dos Pontos 2 e 4	118
Figura 24 – Variação da temperatura do ar durante o período de medição de verão	120
Figura 25 – Amplitude térmica no período de medição de verão.....	123
Figura 26 – Variação da umidade relativa durante o período de medição de verão.	124
Figura 27 – Umidade relativa no período de medição de verão	125
Figura 28 – Variação da umidade absoluta durante o período de medição de verão	126
Figura 29 – Umidade absoluta no período de medição de verão	127
Figura 30 – Variação da temperatura no dia 21. 02. 2017	129
Figura 31 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 21. 02. 2017	131
Figura 32 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade para a medição de verão	132
Figura 33 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no verão sem o Ponto 6.....	134
Figura 34 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade para a medição de verão.....	135
Figura 35 – Relação entre umidade absoluta média e permeabilidade para a medição de verão.....	136
Figura 36 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 11.....	137
Figura 37 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 12.....	137

Figura 38 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 13	138
Figura 39 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 14	138
Figura 40 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 15	139
Figura 41 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 16	139
Figura 42 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 17	140
Figura 43 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 18	140
Figura 44 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 19	141
Figura 45 – Variação da temperatura do ar durante o período de medição de outono	142
Figura 46 – Amplitude térmica no período de medição de outono.....	143
Figura 47 – Variação da umidade relativa durante o período de medição de outono	144
Figura 48 – Umidade relativa no período de medição de outono.....	145
Figura 49 – Variação da umidade absoluta durante o período de medição de outono	146
Figura 50 – Umidade absoluta no período de medição de outono	147
Figura 51 – Variação da temperatura no dia 30. 05. 2017	148
Figura 52 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 30. 05. 2017	150
Figura 53 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no outono.....	151
Figura 54 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no outono sem o Ponto 12.....	152
Figura 55 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no outono.....	153
Figura 56 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no outono.....	154

Figura 57 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 20.....	155
Figura 58 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 21.....	156
Figura 59 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 22.....	156
Figura 60 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 23.....	157
Figura 61 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 24 (Ponto 6).....	157
Figura 62 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 25.....	158
Figura 63 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 26.....	158
Figura 64 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 27.....	159
Figura 65 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 28.....	159
Figura 66 – Variação da temperatura do ar durante o período de medição de inverno	161
Figura 67 – Amplitude térmica no período de medição de inverno.....	162
Figura 68 – Variação da umidade relativa durante o período de medição de inverno	163
Figura 69 – Umidade relativa no período de medição de inverno	165
Figura 70 – Variação da umidade absoluta durante o período de medição de inverno	166
Figura 71 – Umidade absoluta no período de medição de inverno	167
Figura 72 – Variação da temperatura no dia 04. 09. 2017.....	168
Figura 73 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 04. 09. 2017	170
Figura 74 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no inverno.....	171
Figura 75 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no inverno sem os Pontos 23 e 26.....	173

Figura 76 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no inverno	173
Figura 77 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no inverno sem os Pontos 23 e 26	174
Figura 78 – Relação entre umidade absoluta média e permeabilidade no inverno...	175
Figura 79 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 29	176
Figura 80 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 30	176
Figura 81 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 31	177
Figura 82 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 32	177
Figura 83 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 33	178
Figura 84 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 34	178
Figura 85 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 35	179
Figura 86 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 36	179
Figura 87 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 37	180
Figura 88 – Variação da temperatura do ar durante o período de medição de primavera.....	181
Figura 89 – Amplitude térmica no período de medição de primavera	182
Figura 90 – Variação da umidade relativa durante o período de medição de primavera	183
Figura 91 – Umidade relativa no período de medição de primavera	184
Figura 92 – Variação da umidade absoluta durante o período de medição de primavera.....	185
Figura 93 – Umidade absoluta no período de medição de primavera.....	186
Figura 94 – Variação da temperatura no dia 14. 12. 2017	187

Figura 95 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 14. 12. 2017.....	189
Figura 96 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade na primavera.....	190
Figura 97 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade na primavera sem os Pontos 30 e 31.....	191
Figura 98 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade na primavera.	192
Figura 99 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade na primavera sem os Pontos 30 e 31.....	193
Figura 100 – Relação entre umidade absoluta média e permeabilidade na primavera	194
Figura 101 – Amplitude térmica em todos os pontos no período de verão – dados normalizados.....	198
Figura 102 – Amplitude térmica em todos os pontos no período de outono – dados normalizados.....	199
Figura 103 – Amplitude térmica em todos os pontos no período de inverno – dados normalizados.....	199
Figura 104 – Amplitude térmica em todos os pontos no período de primavera – dados normalizados.....	200
Figura 105 – Umidade relativa em todos os pontos no período de verão – dados normalizados.....	202
Figura 106 – Umidade relativa em todos os pontos no período de outono – dados normalizados.....	203
Figura 107 – Umidade relativa em todos os pontos no período de inverno – dados normalizados.....	203
Figura 108 – Umidade relativa em todos os pontos no período de primavera – dados normalizados.....	204

Figura 109 – Umidade absoluta em todos os pontos no período de verão – dados normalizados.....	206
Figura 110 – Umidade absoluta em todos os pontos no período de outono – dados normalizados.....	207
Figura 111 – Umidade absoluta em todos os pontos no período de inverno – dados normalizados.....	207
Figura 112 – Umidade absoluta em todos os pontos no período de primavera – dados normalizados.....	208
Figura 113 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no verão para todos os pontos.....	209
Figura 114 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	210
Figura 115 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	211
Figura 116 – Relação entre umidade relativa absoluta e permeabilidade no verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	212
Figura 117 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no outono para todos os pontos.....	213
Figura 118 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no outono sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	213
Figura 119 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no outono sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	214
Figura 120 – Relação entre umidade absoluta média e permeabilidade no outono sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	215
Figura 121 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no inverno para todos os pontos.....	216

Figura 122 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no inverno sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	216
Figura 123 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no inverno sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	217
Figura 124 – Relação entre umidade absoluta média e permeabilidade no inverno sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	218
Figura 125 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no inverno para todos os pontos.....	219
Figura 126 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no inverno sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	219
Figura 127 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade na primavera sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	220
Figura 128 – Relação entre umidade absoluta média e permeabilidade na primavera sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	221
Figura 129 – Mapas térmicos: períodos de verão e outono.....	223
Figura 130 – Mapas térmicos: períodos de inverno e primavera	224
Figura 131 – Mapa térmico no período de verão.....	226
Figura 132 – Mapas térmicos sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31: períodos de verão e outono.....	228
Figura 133 – Mapas térmicos sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31: períodos de inverno e primavera	229
Figura 134 – Mapa térmico no período de verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	230
Figura 135 – Mapas da umidade relativa: períodos de verão e outono	232
Figura 136 - Mapas da umidade relativa: períodos de inverno e primavera	233

Figura 137 – Mapa da umidade relativa no período de verão.....	234
Figura 138 – Mapas da umidade relativa sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31: períodos de verão e outono	236
Figura 139 – Mapas da umidade relativa sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31: períodos de inverno e primavera	237
Figura 140 - Mapa da umidade relativa no período de verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	238
Figura 141 – Mapas da umidade absoluta: períodos de verão e outono	240
Figura 142 – Mapas da umidade absoluta: períodos de inverno e primavera.....	241
Figura 143 – Mapa da umidade absoluta no período de verão	242
Figura 144 – Mapas da umidade absoluta sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31: períodos de verão e outono	244
Figura 145 – Mapas da umidade absoluta sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31: períodos de inverno e primavera	245
Figura 146 – Mapa da umidade absoluta no período de verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31	246
Figura 147 – Mapas térmicos para o dia 21. 02. 2017.....	248
Figura 148 – Mapas térmicos para o dia 30. 05. 2017.....	250
Figura 149 – Mapas térmicos para o dia 04. 09. 2017.....	252
Figura 150 – Mapas térmicos para o dia 14. 12. 2017.....	254

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Alterações climáticas locais produzidas pelas cidades (adaptado).....	40
Tabela 2 – Albedo e emissividade de alguns materiais no espaço urbano e rural (adaptado).....	46
Tabela 3 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos saturados (adaptado).....	48
Tabela 4 – Locais e períodos de medição.....	84
Tabela 5 – Fotografias e características dos locais de medição	86
Tabela 6 – Períodos de medição das variáveis climáticas	103
Tabela 7 – Extrapolação da temperatura média no Ponto 2 para todas as estações	104
Tabela 8 – Especificações dos equipamentos (adaptado).....	105
Tabela 9 – Permeabilidade dos revestimentos em cada ponto de coleta no período de verão	117
Tabela 10 – Classificação dos revestimentos horizontais nos entornos dos Pontos 2 e 4, em porcentagem.....	119
Tabela 11 – Temperaturas médias, máximas e mínimas no período de medição de verão	121
Tabela 12 – Umidade relativa média, máxima e mínima no período de medição de verão	125
Tabela 13 – Umidade absoluta (g/m^3) média, máxima e mínima no período de medição de verão	127
Tabela 14 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 21. 02. 2017	130

Tabela 15 – Permeabilidade dos revestimentos em cada ponto de coleta no outono	141
Tabela 16 – Temperaturas médias, máximas e mínimas no período de medição de outono.....	143
Tabela 17 – Umidade relativa média, máxima e mínima no período de medição outono.....	145
Tabela 18 – Umidade absoluta (g/m^3) média, máxima e mínima no período de medição de outono.....	147
Tabela 19 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 30. 05. 2019.....	149
Tabela 20 – Permeabilidade dos revestimentos em cada ponto de coleta no período de inverno.....	160
Tabela 21 – Temperaturas médias, máximas e mínimas no período de medição de inverno	162
Tabela 22 – Umidade relativa média, máxima e mínima no período de medição de inverno	164
Tabela 23 – Umidade absoluta (g/m^3) média, máxima e mínima no período de medição de inverno	166
Tabela 24 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 04. 09. 2017.....	169
Tabela 25 – Permeabilidade dos revestimentos em cada ponto de coleta no período de primavera	180
Tabela 26 – Temperaturas médias, máximas e mínimas no período de medição de primavera.....	182
Tabela 27 – Umidade relativa média, máxima e mínima no período de medição de primavera.....	183

Tabela 28 – Umidade absoluta (g/m^3) média, máxima e mínima no período de medição de primavera.....	185
Tabela 29 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 14. 12. 2017	188
Tabela 30 – Permeabilidade dos revestimentos horizontais.....	196
Tabela 31 – Temperaturas médias, máximas e mínimas normalizadas para todos os pontos e todas as estações ($^{\circ}\text{C}$)	197
Tabela 32 – Umidade relativa média, máxima e mínima para todos os pontos e todas as estações – dados normalizados (%).....	201
Tabela 33 – Umidade absoluta média, máxima e mínima para todos os pontos e todas as estações – dados normalizados (g/m^3)	205

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	31
1.1	Objetivos.....	34
1.2	Estrutura da dissertação	35
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	37
2.1	Clima urbano.....	37
2.1.1	Escalas de abordagens.....	40
2.1.2	Fatores condicionantes do clima urbano.....	43
2.1.2.1	Uso e ocupação do solo.....	43
2.1.2.2	Propriedades termofísicas dos revestimentos urbanos	44
2.1.2.3	Permeabilidade do solo.....	47
2.1.2.4	Vegetação	48
2.1.2.5	Presença de corpos d'água	52
2.1.2.6	Geometria urbana. Rugosidade e porosidade.....	54
2.1.2.7	Ventilação	55
2.2	Ilha de calor urbana.....	57
2.2.1	Fenômeno e suas características.....	57
2.2.2	Causas.....	60
2.2.3	Estratégias de mitigação	62
2.3	Histórico dos estudos sobre ilha de calor.....	64
2.3.1	No exterior.....	64
2.3.2	No Brasil	67
3	ÁREA DE ESTUDO: SÃO CARLOS, SP.....	73
3.1	Localização.....	73
3.2	Aspectos demográficos.....	74
3.3	Aspectos históricos.....	74
3.4	Aspectos climáticos	78
4	METODOLOGIA	81
4.1	Parâmetros de ocupação urbana / físico-ambientais.....	83
4.1.1	Definição dos pontos de medição.....	83
4.1.2	Levantamento da permeabilidade dos revestimentos urbanos horizontais	100

4.1.3	Classificação digital dos revestimentos horizontais	101
4.2	Parâmetros climáticos	102
4.2.1	Variáveis e períodos de medição	102
4.2.2	Normalização dos dados	103
4.2.3	Equipamentos utilizados	104
4.2.3.1	Aferição dos instrumentos	107
4.3	Cruzamento dos dados climáticos e urbanísticos	108
4.4	Cálculo de intensidade de ilha de calor urbana	109
4.5	Elaboração dos mapas térmicos.....	110
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	111
5.1	Período de verão	111
5.1.1	Apresentação das variáveis urbanísticas.....	111
5.1.1.1	Classificação digital dos revestimentos horizontais nos Pontos 2 e 4	117
5.1.2	Apresentação das variáveis climáticas	120
5.1.3	Intensidade de ilha de calor urbana	128
5.1.4	Cruzamento dos dados climáticos e urbanísticos	132
5.2	Período de outono	136
5.2.1	Apresentação das variáveis urbanísticas.....	136
5.2.2	Apresentação das variáveis climáticas	142
5.2.3	Intensidade de ilha de calor urbana	147
5.2.4	Cruzamento dos dados climáticos e urbanísticos	150
5.3	Período de inverno.....	154
5.3.1	Apresentação das variáveis urbanísticas.....	155
5.3.2	Apresentação das variáveis climáticas	160
5.3.3	Intensidade de ilha de calor urbana	167
5.3.4	Cruzamento dos dados climáticos e urbanísticos	170
5.4	Período de primavera.....	175
5.4.1	Apresentação das variáveis urbanísticas.....	175
5.4.2	Apresentação das variáveis climáticas	181
5.4.3	Intensidade de ilha de calor urbana	186
5.4.4	Cruzamento dos dados climáticos e urbanísticos	189
5.5	Dados normalizados	195

5.5.1	Apresentação das variáveis urbanísticas	195
5.5.2	Apresentação das variáveis climáticas	196
5.5.3	Cruzamento dos dados climáticos normalizados e urbanísticos	208
5.5.3.1	Período de verão	209
5.5.3.2	Período de outono	212
5.5.3.3	Período de inverno	215
5.5.3.4	Período de primavera	218
5.6	Mapas de distribuição da temperatura e umidade relativa e absoluta	222
5.6.1	Mapas térmicos	222
5.6.2	Mapas da umidade relativa	231
5.6.3	Mapas da umidade absoluta	239
5.6.4	Mapas térmicos para os dias de referência	247
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	255
6.1	Recomendações para trabalhos futuros	257
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	259

1 Introdução

O clima tem sempre influenciado a sociedade, a vida e as atividades humanas. No entanto, o homem também impacta as condições climáticas através de suas várias atividades. De acordo com Ayoade (1996), o maior impacto do homem sobre o clima acontece durante o processo da urbanização e industrialização. A urbanização e a produção artificial do calor alteram a composição atmosférica, o meio urbano e, portanto, as condições climáticas.

Modna (2004) concorda que cidades têm grande impacto sobre as áreas naturais, porque consomem energia proveniente do seu entorno e apresentam saída de grandes quantidades de resíduos tóxicos. Cidade é um ecossistema complexo, composto por elementos naturais e elementos de origem antrópica que apresentam uma contínua transformação. Sabe-se que nas cidades, geralmente, as temperaturas do ar e a quantidade de poluentes do ar são maiores, a umidade e a velocidade dos ventos são menores e as nuvens e as precipitações mais presentes (REIS, 2004).

Este fenômeno do aumento da temperatura em áreas urbanas como resultado das atividades humanas é conhecido como ilha de calor urbana. Na definição dada por Voogt, (2004), o efeito de ilha de calor se refere tanto ao processo de aquecimento de atmosfera, quanto das superfícies urbanas, quando comparado com áreas rurais. A temperatura do ar elevada devido às ilhas de calor urbanas tem um efeito negativo sobre microclimas e na saúde humana. Por constante crescimento deste problema, existem diversas pesquisas sobre as causas de efeito de ilha de calor e sobre as estratégias para reduzi-lo.

Segundo a Organização das Nações Unidas, no ano de 2018 a população urbana representava 55% da população global e estima-se que no ano de 2050 este número vai ser aproximadamente 68%. Assim, 4,2 bilhões de pessoas, mais de metade da população mundial, vivem em áreas urbanas, estando expostas ao problema do aquecimento urbano (ONU, 2018).

Atualmente, existe a necessidade de se desenvolver estudos preditivos que quantifiquem os efeitos da ocupação urbana no microclima, a fim de subsidiar as atividades de planejamento. No Brasil, diversos estudos constataram a formação de ilha de calor urbana em diferentes cidades brasileiras (LOMBARDO, 1985; DUARTE, 2000; SAYDELLES, 2005; FIALHO, 2009; ROMERO, 2011). Mesmo assim, ainda há falta de diretrizes para projetos de planejamento urbano, que considerem estratégias para diminuir o efeito de ilha de calor e melhorar o conforto térmico dos habitantes.

Trabalhos como o de Pitton (1997) têm mostrado a importância de se considerar os aspectos climáticos das cidades no processo de planejamento. As vantagens do estudo do microclima em áreas urbanas são numerosas e podem beneficiar diretamente os projetos construtivos e urbanos.

O planejamento urbano adequado tem um grande potencial para redução do efeito de ilha de calor urbana. Assim, é muito importante que os urbanistas, arquitetos e engenheiros tomem o clima urbano em consideração na concepção nova ou alterem os projetos existentes. O conhecimento sobre como os diferentes parâmetros urbanos interferem com as variações da temperatura do ar ajuda a criar um subsídio valioso para o planejamento urbano a ser adotado na tomada de decisões de projeto.

Embora São Carlos seja uma cidade de porte médio, percebe-se que o processo da urbanização alterou as condições climáticas, criando assim uma área urbana sujeita à formação de ilhas de calor. Existem alguns estudos prévios que comprovam a formação da ilha de calor urbana em São Carlos: Souza (1996), Fontes (1998), Barbosa (2009) e Silva (2011).

Souza (1996) identificou a Avenida São Carlos, eixo viário principal na cidade, como núcleo da formação da ilha de calor e sugeriu, portanto, estabelecer regulamentação das alturas de edificações, uso do solo e mesmo intensidade de tráfego. Observou-se que os perfis morfológicos apresentam índices de adensamento de médio a baixo, enquanto o índice de áreas verdes é baixo e a distribuição irregular. A influência da área urbana nas variáveis climáticas foi maior durante a noite. Usando a relação H/W e fator de visão do céu, a autora concluiu que a geometria urbana é responsável por uma pequena parte do desenvolvimento da ilha de calor.

Fontes (1998) observou que maiores diferenças térmicas (até 10,4 °C) entre áreas urbanas e rurais ocorrem no inverno, no período noturno. Já no verão, a ilha de calor foi mais forte durante a tarde atingindo 8,7 °C. As diferenças altimétricas desempenharam um papel fundamental, pois os pontos em maiores altitudes apresentaram temperaturas mais elevadas. Embora a correlação entre a temperatura e a porcentagem de edificação fosse um pouco menor, observou-se tendência evidente para o aumento da temperatura com aumento da porcentagem de edificação. A relação entre a temperatura do ar e a porcentagem da vegetação foi inversa, com tendências claras ao aumento da temperatura em áreas menos vegetadas. Além disso, a autora destaca a importância de áreas de fundo de vale, as quais contribuem ao movimento do ar por serem zonas de diferentes pressões no meio urbano. Recomenda-se, portanto, preservar estas áreas da urbanização para alcançar a amenização climática e diminuição do efeito da ilha de calor.

Em um episódio climático de inverno observou-se a formação de ilha de calor na região central da cidade de São Carlos, SP, com intensidade de até 3 °C. A amplitude térmica foi mais pronunciada na fase de domínio da massa Polar Atlântica, em que predominam condições de céu claro. Além das características dos diferentes tipos de tempo, o campo térmico foi influenciado pelas características locais, tais como intensidade de urbanização e presença de vegetação (SILVA, 2011). Em um estudo comparativo durante um episódio climático de verão, Barbosa (2009) registrou o pico de ilha de calor durante a dominância da massa Tropical Atlântica, caracterizada pela

baixa umidade do ar e céu claro ao longo do dia. O comportamento do campo térmico mostrou forte influência do ambiente construído, sendo que as regiões mais arborizadas apresentaram temperaturas mais baixas.

Tendo em vista os estudos previamente realizados, esta pesquisa é uma continuação dos estudos do clima urbano em São Carlos e tem como tema principal a influência da permeabilidade dos revestimentos horizontais urbanos nas variações da temperatura do ar na cidade. No geral, permeabilidade do solo representa a capacidade de absorção da água na superfície do solo. O Coeficiente de Permeabilidade é um componente muito importante do Plano Diretor e representa a relação entre a área permeável e a área do terreno de um lote (PMSC, 2016). Esta pesquisa não aborda o grau da capacidade de absorção da água dos diferentes tipos de materiais e divide as superfícies horizontais (solo e coberturas) em permeáveis e impermeáveis. Esse parâmetro será chamado de *permeabilidade* ao longo do trabalho, dado que a legislação municipal vigente adota este termo.

Entende-se que o trabalho em equipe de especialistas e representantes das autoridades leva a soluções apropriadas e aplicáveis para reduzir o efeito de ilha de calor urbana. Assim, esta pesquisa apresenta-se também como base para pesquisas futuras mais detalhadas e uma contribuição à elaboração de diretrizes legislativas para o planejamento urbano definidas pelas autoridades competentes.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é identificar o efeito da permeabilidade dos revestimentos urbanos horizontais nas variações de temperatura do ar e na formação da ilha de calor na cidade de São Carlos, SP.

Os objetivos específicos são:

- Calcular a intensidade de ilha de calor urbana;

- Avaliar o efeito da permeabilidade dos revestimentos urbanos sobre a temperatura do ar e a umidade relativa e absoluta;
- Analisar o campo térmico e a distribuição da temperatura do ar e umidade relativa e absoluta na cidade de São Carlos através de mapas de temperatura e umidade;
- Fornecer subsídios para o planejamento urbano adequado, para minimizar os efeitos da ilha de calor urbana em São Carlos, resultando em maior conforto térmico no espaço urbano.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, justificativa e os objetivos deste trabalho. No segundo capítulo, segue o referencial teórico com a revisão bibliográfica referente ao clima urbano e o fenômeno de ilha de calor urbana. Apresentam-se as características desse fenômeno e alguns estudos realizados no exterior e no Brasil.

O terceiro capítulo aborda a área de estudo, o município de São Carlos, SP, com as informações sobre a localização e aspectos demográficos, históricos e urbanos. No capítulo seguinte são apresentados os procedimentos metodológicos aplicados na elaboração desta pesquisa. Após tratar dos parâmetros urbanísticos e climáticos a serem levantados durante a pesquisa, apresenta-se o procedimento adotado para a análise das variáveis coletadas.

No Capítulo 5 são apresentados os dados climáticos coletados durante as medições em quatro estações do ano e também a caracterização quanto à permeabilidade dos revestimentos horizontais nos entornos dos pontos de coleta. Finalmente, apresenta-se a normalização dos dados das quatro estações com a análise da correlação entre as variáveis urbanísticas e climáticas. O capítulo termina com a apresentação do campo térmico da cidade em forma de mapas de temperatura e umidade. O Capítulo 6 traz as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Clima urbano

Ayoade (1996) define o clima como a síntese do tempo em um dado lugar durante um período de aproximadamente 30-35 anos e refere-se às características da atmosfera durante esse período. Neste sentido, o tempo (*weather*) é entendido como estado médio da atmosfera em uma dada porção de tempo e em determinado lugar.

O clima urbano é um tipo específico do clima, definido por Monteiro (1976) como um sistema que abrange o clima de um dado espaço e sua urbanização. O clima urbano pode ser dividido em níveis menores, até o microclima, e também integrado em níveis superiores, tais como clima zonal, regional e sub-regional. Os fenômenos que não são de natureza física, geográfica e meteorológica, como fenômenos sociais e econômicos, impactam também o clima local. O aumento da população, o comportamento humano e o desenvolvimento tecnológico e urbanístico mudam a aparência das cidades e conseqüentemente o seu clima. Deste modo, os estudos de clima urbano exigem uma abordagem interdisciplinar fornecendo conhecimentos necessários para um planejamento adequado, o qual propõe e implementa as soluções para diversos problemas de natureza climática.

Já no primeiro século a.C., o arquiteto romano Vitrúvio (2002) demonstrou a preocupação com a largura de vias e as condições de insolação e ventilação ao planejar novas cidades, a fim de adequar as edificações ao clima. A industrialização no século XIX levou aos crescentes problemas urbanos que resultaram em estudos mais específicos sobre o assunto.

De acordo com Monteiro (1976) e Gartland (2010), o primeiro estudo do clima urbano, o qual afirmou a elevação da temperatura na cidade de Londres em comparação com áreas rurais circunvizinhas, foi o trabalho *"The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis and at Various Places Around it"* ("O clima de Londres: deduzido de observações meteorológicas feitas na metrópole e vários locais no seu entorno"), publicado por Luke Howard em 1833. Durante a análise no período 1797-1831, Howard observou que a temperatura foi mais alta e a umidade mais baixa na cidade. Ele assumiu que no inverno esse fenômeno foi causado pelos humanos, animais e "fogos" (várias fontes de combustão) na área urbana. No verão, ele atribuiu a temperatura mais elevada à alta absorção da radiação solar pelas superfícies verticais urbanas e à falta de umidade para evaporação.

O clima da cidade começou a ser amplamente estudado após a década de 1950 devido à acelerada urbanização e às notáveis alterações na atmosfera urbana, principalmente em comparação com o ambiente rural. Os primeiros estudos foram feitos no âmbito da meteorologia e climatologia. Porém, nos anos cinquenta e sessenta surge demanda de planos para a melhor gestão dos espaços urbanos, o qual leva à inclusão dos estudos do clima urbano no processo de planejamento urbano (MENDONÇA, 1994).

"Sendo o clima um dos elementos de primeira ordem a compor a paisagem geográfica, nas cidades ele é resultante da interação entre os componentes da dinâmica atmosférica zonal, regional e local e os do espaço urbano-rural construído. O clima urbano é então derivado das seguintes principais alterações no ambiente natural: retirada da cobertura vegetal, introdução de novas formas no relevo, concentração de edificações, concentração de equipamentos e pessoas, impermeabilização do solo, canalização do escoamento superficial, rugosidade da superfície, lançamento concentrado e acumulação de partículas e gases na atmosfera, e produção de energia artificial." (MENDONÇA, 1994)

O fenômeno de ilha de calor urbana é um dos mais estudados exemplos de modificação do clima em espaços urbanos. Ilha de calor urbana refere-se ao aumento de temperatura em áreas urbanas, tanto em processo de aquecimento do ar, quanto das superfícies urbanas, quando comparado com áreas menos urbanizadas (VOOGT E OKE, 2003). A aparência de padrão isotérmico representando as temperaturas em área urbana deu a origem ao nome de "ilha" por causa de similaridade com o termo geográfico (LOWRY, 1969).

Estudos de clima urbano são importantes para construir um ambiente agradável e saudável para habitantes urbanos e assegurar que os efeitos da urbanização não tenham repercussões prejudiciais em climas de escalas grandes (OKE, 1987). Segundo Landsberg (1981), a cidade muda o clima em vários aspectos, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Alterações climáticas locais produzidas pelas cidades (adaptado)

ELEMENTOS	OBSERVAÇÃO	COMPARAÇÃO COM AMBIENTE RURAL
Poluentes	Núcleos de condensação	10 vezes mais
	Partículas	10 vezes mais
	Misturas gasosas	5-25 vezes mais
Radiação	Total	0-20% menos
	Ultravioleta, inverno	30% menos
	Ultravioleta, verão	5% menos
	Duração de insolação	5-15% menos
Nebulosidade	Nuvens	5-10% mais
	Névoa, inverno	100% mais
	Névoa, verão	30% mais
Precipitação	Total	5-15% mais
	Dias com <5 mm	10% mais
	Queda de neve, centro da cidade	5-10% mais
	Queda de neve, limite da cidade	10% mais
	Tempestades	10-15% mais
Temperatura	Média anual	0.5-3.0 °C mais
	Mínima no inverno (média)	1-2 °C mais
	Máxima no verão (média)	1-3 °C mais
	Energia para aquecimento	10% menos
Umidade relativa	Média anual	6% menos
	Inverno	2% menos
	Verão	8% menos
Velocidade do vento	Média anual	20-30% menos
	Rajadas extremas	10-20% menos
	Calmarias	5-20% mais

Fonte: Landsberg (1981)

2.1.1 Escalas de abordagens

Oke (1987; 2006) define duas camadas principais, em cujos âmbitos realizam-se os estudos de clima urbano (Figura 1). A primeira camada é a camada limite urbana

(*urban boundary layer*), um fenômeno de escala local e mesoescala, cujas características são dominadas pela natureza da “superfície” urbana geral. A camada de cobertura urbana ou camada intraurbana (*urban canopy layer*), localizada ao nível de telhados é produzida pelos processos de microescala, atuando em ruas (cânions) entre as edificações e dominada pelas características de entorno imediato.

Figura 1 – Esquema das escalas climáticas de Oke (adaptado)

Fonte: Oke (2006)

Ainda segundo Oke (1987), o cânion urbano (*urban canyon*) é a unidade principal da camada de cobertura urbana, cuja forma básica é repetida por toda a área urbana. O cânion urbano corresponde ao perfil de uma via urbana ou espaço entre dois edifícios. É composto pelas duas superfícies verticais (paredes das edificações) e uma superfície horizontal, correspondendo à via de circulação urbana entre dois edifícios. Esta unidade geométrica, de natureza tridimensional, contém o volume do ar com

três lados ativos (paredes e chão) e três lados abertos (uma sendo a “tampa” imaginária em nível de cobertura e duas sendo “fins” do cânion, cuja profundidade, por simplificação, pode ser considerada infinita). O conceito de cânion permite a inclusão de interação entre edificações em formação dos microclimas de uma área urbana.

Em Romero (1988) e Romero (2011) afirma-se que os fatores condicionantes do microclima em um ponto restrito (cidade, bairro, rua) são topografia, vegetação, ventilação do lugar, quantidade de áreas pavimentadas em relação às áreas verdes e superfície do solo natural ou construído. A declividade, a orientação de vertentes, a exposição e a elevação das ondulações da superfície terrestre impactam os fluxos de ar e conteúdo da umidade e, portanto, o fluxo de calor. A vegetação pode reduzir os extremos ambientais, diminuindo a temperatura do ar, absorvendo energia e favorecendo a renovação do ar. As características mais importantes dos materiais superficiais são albedo e capacidade térmica, pois determinam a quantidade do calor absorvido e armazenado. A autora ressalta a importância de avaliação das temperaturas do ar e das superfícies e a circulação do ar dentro dos cânions urbanos, através da análise do balanço térmico, para alcançar a otimização do consumo de energia das edificações, o conforto térmico dos pedestres e a dispersão dos poluentes.

A maioria das pesquisas sobre as ilhas de calor urbanas pode ser dividida aproximadamente em abordagens de escala grande, que usam imagens de satélite obtidas através do sensoriamento remoto para localizar ilhas de calor por meio da temperatura superficial e abordagens de escala menor, que utilizam pequenas estações climáticas ou equipamentos para medições móveis com fim de determinar ilhas de calor atmosféricas por meio da temperatura do ar (COSEO; LARSEN, 2014).

Tipicamente, os estudos com sensoriamento remoto pesquisam o impacto do uso do solo e mudanças em coberturas do solo nas temperaturas superficiais, levando em conta a presença das superfícies impermeáveis (telhados e pavimentos), índices de

vegetação e outras características como altitude e topografia. Pesquisas com base em sensoriamento remoto documentam tanto a magnitude quanto à distribuição espacial das ilhas de calor urbanas em regiões extensas e também as propriedades térmicas dos materiais das edificações e pavimentos (LO; QUATTROCHI, 2003).

2.1.2 Fatores condicionantes do clima urbano

2.1.2.1 Uso e ocupação do solo

Em áreas urbanas, a ocupação do solo é geralmente caracterizada por uma alta densidade edificada e pavimentação asfaltada (ROMERO, 2011). Em um estudo extenso do campo térmico na cidade de Araraquara, SP, Barbugli (2004) observou que a massa construída e as superfícies pavimentadas desempenham o papel principal na formação de ilha de calor por causa da alta capacidade de absorção e armazenamento de calor. As regiões de alta densidade urbana indicam principalmente redução da cobertura vegetal, a qual poderia reduzir as temperaturas através da evaporação.

O grande impacto da densidade de área construída nas condições microclimáticas foi observado em Teresina, PI, resultando em aumento da temperatura do ar, diminuição da umidade relativa e alteração da velocidade e direção dos ventos em áreas densamente edificadas (BRANCO; ARAÚJO, 2001). Em Salvador, BA, foi estudada a influência dos diferentes padrões de ocupação do solo na temperatura do ar. Os padrões de ocupação foram definidos pelas variáveis: altura do gabarito/número de pavimentos e densidade ocupacional. Observaram-se menores amplitudes térmicas ao longo do dia em áreas com menor ocupação (NERY; ANDRADE; LIRA, 2003).

Vasconcelos (2014) estudou as relações entre o microclima e os coeficientes de ocupação, de aproveitamento e de cobertura vegetal dos solos em uma fração central da cidade de São Carlos, SP. Ressalta-se que planejadores urbanos e autoridades utilizam geralmente esses índices para regulamentações construtivas. Observou-se numa série de simulações com vários cenários que o coeficiente de

ocupação tem uma leve influência sobre a temperatura do ar, enquanto a presença da vegetação reduz a temperatura até 1 °C. O maior coeficiente de aproveitamento também mostrou a tendência à redução da temperatura do ar provavelmente devido à geração do sombreamento pelos edifícios altos resultando em temperaturas mais baixas próximo ao solo. No entanto, um conjunto de edifícios altos pode diminuir a porosidade da geometria urbana e agir como barreira à ventilação. Recomendaram-se futuros estudos para determinar o ponto de equilíbrio para que esse coeficiente não prejudique o balanço térmico em seu entorno.

O trabalho de Duarte (2000) visa também transformar dados microclimáticos em critérios de ocupação imediatamente aplicáveis ao planejamento urbano, produzindo diretrizes práticas para a atividade profissional. Sugere-se a aplicação de um parâmetro relacionando densidade construída (representada pelas variáveis taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento), arborização e superfícies d'água. A autora ressalta que o processo de incorporação do conhecimento sobre o meio ambiente urbano às legislações municipais é muito lento no Brasil.

2.1.2.2 Propriedades termofísicas dos revestimentos urbanos

Landsberg (1979) ressalta que a maior alteração durante o processo de urbanização é a alteração das características das superfícies. A transição de campos e florestas às áreas revestidas em concreto e asfalto produz uma alteração notável em absorção e albedo¹. O albedo de uma superfície urbanizada é em geral 10 a 20% menor do que de uma superfície rural, resultando, portanto, em maior absorção de energia.

Os materiais de uso corrente no ambiente urbano, tais como o concreto e o asfalto, apresentam significativas diferenças nas suas propriedades térmicas (a capacidade de absorção e transmissão de calor) e propriedades radiativas da superfície (reflexão e emitância) quando comparados com as áreas rurais (OKE, 1982). A maioria dos

¹ Albedo é a razão entre a quantidade da radiação solar refletida por um corpo e a quantidade da radiação solar incidente sobre este corpo (OKE, 1987).

materiais tradicionalmente usados em coberturas e pavimentos em áreas urbanas são sólidos e escuros, com alta absorção e armazenamento de calor (GARTLAND, 2010).

Segundo Mizuno et al. (1990), o tipo de revestimento das superfícies urbanas, tanto das construções como das pavimentações, impacta significativamente o movimento da temperatura do ar, influenciando-o em seu redor em um raio de 50 m - 200 m (micro-escala) a 1,5 km (escala local). Propriedades térmicas das superfícies governam as variáveis responsáveis pelas diferenças no balanço de energia radiante e nas taxas de resfriamento entre os meios urbano e rural (ASSIS, 2000).

Para Almeida (2006), as principais características dos materiais urbanos que modificam as condições microclimáticas são coeficiente de absorção da radiação solar, capacidade de armazenar calor (inércia térmica) e índice de impermeabilidade. Dornelles (2008) destaca que materiais com superfícies irregulares têm maior absortância e, portanto, apresentam temperaturas mais altas.

Segundo Efthymiou et al. (2016), a temperatura de superfície do edifício pode ser diminuída em até 10 °C usando superfícies de alta refletância. Materiais de pavimentação convencionais podem atingir temperaturas de pico do verão de 48-67 °C, transferindo o excesso de calor para o ar acima deles. Devido à grande área coberta por pavimentos em áreas urbanas eles são um elemento importante a considerar na redução da ilha de calor, pois, no geral, materiais com maior albedo têm menor temperatura de superfície. A cor dos pavimentos e envoltórios é também uma propriedade importante, porque as cores mais escuras não refletem a luz e calor tão bem como as cores claras.

Atualmente, existem vários estudos sobre o uso de pavimentos e telhados frios, os quais apresentam valores altos de albedo, mesmo tendo as mesmas cores como revestimentos convencionais (KARLESSI et al., 2011; SANTAMOURIS et al., 2011; PISELLO et al., 2014; QIN, 2015). Devido ao albedo alto, eles se mantêm mais frios quando expostos à energia solar. Oke et al. (2017) também destaca a importância de desenvolvimento dos materiais frios e enfatiza que as propriedades dos materiais,

tais como albedo e emissividade² são ferramentas poderosas para os arquitetos e urbanistas. A Tabela 2 mostra albedo e emissividade de vários materiais nos espaços urbanos e rurais, expressas entre 0 e 1. Enquanto o albedo varia bastante, a maioria dos materiais tem emissividade alta, exceto metais e alguns vidros revestidos por películas extrafinas de metal.

Tabela 2 – Albedo e emissividade de alguns materiais no espaço urbano e rural (adaptado)

Superfícies naturais			Materiais das superfícies urbanas		
Superfície	Albedo	Emissiv.	Superfície	Albedo	Emissiv.
Solo exposto			Vias		
Solo (escuro, úmido)	0,05-0,10	0,89-0,98	Asfalto	0,05-0,27	0,89-0,96
Solo (escuro, seco)	0,10-0,13	0,89-0,98	Concreto	0,10-0,35	0,85-0,97
Solo (claro, úmido)	0,12-0,18	0,89-0,98	Paredes		
Solo (claro, seco)	0,18-0,30	0,89-0,98	Concreto	0,10-0,35	0,85-0,97
Areia (deserto)	0,20-0,45	0,84-0,92	Tijolo	0,20-0,60	0,90-0,92
Vegetação baixa			Pedra	0,20-0,45	0,85-0,95
Gramma	0,16-0,26	0,90-0,98	Calcário	0,40-0,64	-
Culturas	0,18-0,25	0,90-0,99	Madeira	0,22	0,90
Áreas úmidas	0,07-0,19	-	Telhados		
Tundra	0,08-0,19	0,90-0,99	Telha cerâmica	0,10-0,35	0,90
Florestas			Cascalho, betume	0,08-0,18	0,92
Decíduas	0,13-0,20	0,90-0,99	Ardósia	0,10-0,14	0,90
Pomares	0,07-0,15		Palha	0,15-0,20	-
Coníferas	0,11-0,13	0,97-0,99	Ferro corrugado	0,10-0,16	0,13-0,28
Água			Aço galvanizado	0,37-0,45	0,25
c/ Ângulo solar >60°	0,03-0,10	0,92-0,97	Janelas		
c/ 10° < Ângulo solar <60°	0,10-0,50	0,92-0,97	Vidro claro	0,08	0,89-0,90
Neve e gelo			c/ Ângulo solar >50°	0,09-0,52	-
Neve fresca, fria, limpa	0,80-0,90	0,90-0,99	c/ 10° < Ângulo solar <50°	0,40-0,80	-
Neve úmida, limpa	0,50-0,75	-	Pinturas		
Neve velha, porosa, suja	0,40-0,50	0,82-0,89	Branca	0,50-0,90	0,85-0,95
Banquisa (primeiro ano)	0,30-0,60	0,92-0,97	Vermelha, marrom, verde	0,20-0,35	0,85-0,95
Banquisa (plurianual)	0,55-0,75	0,92-0,97	Preta	0,02-0,15	0,90-0,98
Gelo glaciário	0,20-0,40	0,97-0,98	Metais		
			Metais polidos	0,50-0,90	0,02-0,06

Fonte: Oke et al. (2017)

² Quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura (ABNT, 2005a).

2.1.2.3 Permeabilidade do solo

Permeabilidade do solo representa a possibilidade de infiltração da água na superfície do solo. Em geral, muitas superfícies em áreas urbanas e suburbanas, tais como solos cimentados, ruas asfaltadas e solos sob as edificações, são impermeáveis, o que significa que são resistentes à infiltração da água. Assim, a água da chuva escorre, sem dissipar o calor por meio da evaporação, resultando em elevação da temperatura e redução da umidade relativa do ar. Além disso, o rápido escoamento das águas pluviais pela superfície (ruas, avenidas, vias) pode ocasionar inundações (NOGUEIRA, 2011). Segundo Oke (1982), o uso de pavimentação com baixa permeabilidade em lugar do solo natural e a diminuição de áreas verdes modificam o balanço de energia alterando as trocas térmicas entre a superfície e o meio.

De acordo com Oliveira (1988), o grau da impermeabilidade do solo urbano depende da superfície do solo urbano edificado e construído, solo urbano pavimentado (passeios, ruas, avenidas) e superfície do solo urbano nu, compactado (áreas ainda desocupadas dentro do tecido urbano).

Segundo Romero (2011), a impermeabilidade dos materiais urbanos e, conseqüentemente, seu baixo teor de umidade, reduzem a possibilidade de liberação do calor pela evapotranspiração. A parte da radiação absorvida por uma superfície é usada como calor latente para evaporação da água nela contida, enquanto a energia restante é conduzida ao seu interior. Desconsiderando os efeitos de sombreamento em um entorno densamente edificado, a quantidade da radiação solar incidente em uma zona urbana não difere significativamente da área rural circundante, exceto em caso de elevada poluição do ar. No entanto, os revestimentos urbanos não conseguem realizar o processo da evapotranspiração devido à impermeabilidade, o que resulta em maior concentração do calor do que em espaços rurais.

Segundo Gartland (2010), as temperaturas das superfícies impermeáveis atingem 87,7 °C em determinadas circunstâncias, enquanto as superfícies com vegetação se aquecem até 21,1 °C. Altas temperaturas das superfícies têm como consequência a

elevação da temperatura do ar, principalmente à noite quando as superfícies quentes se resfriam e aquecem o ar ao redor. Costa (2007) estudou a influência dos revestimentos de superfícies horizontais no microclima na cidade de Natal, RN e concluiu que as diferenças microclimáticas, embora pequenas em valores absolutos (possivelmente devido às brisas marítimas), dependem de condições do ambiente construído. As superfícies horizontais existentes (cobertura e piso) influenciam a temperatura do ar, aumentando-a em locais onde predominam os materiais impermeáveis e atingindo uma diferença de 1,84 °C em comparação com locais caracterizados pela presença de materiais permeáveis.

Enquanto a maioria das superfícies urbanas pode ser considerada como impermeável, solos naturais apresentam diferentes graus de permeabilidade, expressos por coeficiente de permeabilidade k (cm/s).

Tabela 3 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos saturados (adaptado)

Tipo de solo	k (cm/s)	Permeabilidade
Pedregulho	100 – 1,0	Alta
Areia grossa	1,0 – 0,01	Média
Areia fina	0,01 – 0,001	Baixa
Silte	0,001 – 0,00001	Muito baixa
Argila	<0,000001	Praticamente impermeável

Fonte: Budhu (2010); Das (2010)

2.1.2.4 Vegetação

A vegetação apresenta um papel importante como o fator climático responsável pela regulação de umidade e temperatura e controle da radiação solar. Os benefícios em redução da temperatura decorrem parcialmente do sombreamento gerado pelas plantas e parcialmente da umidificação do ar pelo processo da evapotranspiração.

Em geral, as áreas florestadas, por exemplo, têm temperaturas inferiores às áreas com outro tipo de cobertura, como campo, por exemplo, dado que as copas, os troncos e os galhos das árvores funcionam como barreira à radiação solar e diminuem a energia disponível para o aquecimento do ar. As árvores contribuem com o aumento

de infiltração d'água no solo, proporcionando assim a quantidade de água para o processo de evaporação e evapotranspiração, o que torna o ar circundante mais úmido e mais frio (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Shinzato (2009) observou que as temperaturas superficiais do solo coberto em terra e sombreado pelas árvores são até 4 °C menores do que temperaturas do solo em sombreamento dos edifícios.

Segundo Gartland (2010), a vegetação é um componente importante para um ambiente saudável, porque traz vários benefícios às comunidades, como redução de poluição do ar, redução de enchentes, menor consumo de energia, melhoria do conforto e retirada de dióxido de carbono (CO₂). Outros benefícios seriam: redução de ruído, melhoria do ecossistema, proteção contra a luz ultravioleta, manutenção de pavimentos reduzida e melhorias estéticas.

Árvores e vegetação refrescam seu entorno através do processo da evapotranspiração e criando sombras para superfícies urbanas. Com a evapotranspiração, as plantas convertem a energia solar em água evaporada ao invés de calor, mantendo assim as temperaturas do ar mais baixas. Além disso, árvores e vegetação geram sombras e protegem as superfícies do calor do sol, o que resulta em temperaturas das superfícies mais baixas e menor armazenamento do calor (GARTLAND, 2010).

Rosenfeld et al. (1997) indica que a ausência de vegetação contribui para a formação do efeito da ilha de calor de tal maneira que afeta negativamente alguns mecanismos fundamentais para a redução de temperatura nas cidades: o sombreamento, a filtragem da poluição, a direção dos ventos e o processo de evapotranspiração. Carvalho (2001) também observou que as áreas verdes purificam, oxigenam e umedecem o ar, reduzem e filtram a radiação solar e diminuem a temperatura do ar em seu entorno gerando assim um microclima agradável.

Segundo Meier (1990), a temperatura das paredes sombreadas pelas árvores é de 5 a 20 °C menor do que a temperatura superficial das paredes não sombreadas. O *Lawrence Berkeley National Laboratory* realizou vários estudos avaliando o efeito da

vegetação sobre a temperatura do ar e da superfície e consumo de energia em edifícios. Na cidade de Sacramento, foram plantadas árvores em torno das casas, em média 3,1 árvores a 3 m de distância de cada casa. Observou-se uma redução de 7 a 40% de energia para resfriamento, sendo maior quando as árvores foram plantadas ao oeste e sudoeste de edifícios (AKBARI et al., 1992). Outro estudo realizado também pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* prediz a economia de energia para um cenário, no qual uma árvore é plantada para o oeste e outra ao sul de cada casa, em várias cidades nos EUA. Os resultados mostram a economia anual para resfriamento de 8 a 18% e economia anual com aquecimento de 2 a 8% (HUANG et al., 1990).

Vários trabalhos como Bartholomei (2003), Abreu e Labaki (2011) e Shinzato (2009) confirmam a contribuição da arborização na melhoria do conforto térmico, tanto em ambientes externos, quanto internos. A redução das temperaturas é o resultado direto da atenuação da radiação solar incidente pelas árvores. No entanto, ressalta-se a importância de considerar as características das espécies arbóreas, porque as copas densas e baixas podem impedir a ventilação e reter o calor nesses locais. Segundo Barbosa (2018), a vegetação arbórea proporciona “frescor” no local imediato da implantação, enquanto o efeito atenuante dos parques alcança áreas além de suas imediações. Modna e Vecchia (2003) afirmam que a ação da vegetação é mais significativa em impedir o aquecimento do solo do que em resfriar o ar através da evapotranspiração.

Existem várias estratégias eficazes para alcançar aumento das áreas verdes em trechos urbanos, onde falta o espaço para o plantio de árvores ou outras plantas, tais como a implantação dos tetos e fachadas verdes. Coberturas verdes trazem muitos benefícios, tais como economia de energia, arrefecimento urbano, redução de enchentes e da poluição do ar, e melhoria dos ecossistemas (GARTLAND, 2010).

Autoridades em várias cidades oferecem incentivos para a instalação dos tetos verdes, como Chicago, EUA³ ou Stuttgart, Alemanha⁴.

O desempenho da vegetação depende de densidade, disposição, dimensões, localização e espécie (ROMERO, 2011). Segundo Izard e Guyot (1983), a área vegetada deve ocupar pelo menos 30% da superfície urbanizada para alcançar um impacto microclimático.

De acordo com Shinzato (2009), o efeito da vegetação no clima é local e para que possa desempenhar o papel de amenização climática, recomenda-se a distribuição da cobertura vegetal em pequenas parcelas, de maneira uniforme por toda a cidade, e não a concentração em poucos lugares muito grandes. Além disso, para maximizar o efeito da vegetação, é importante considerar a configuração espacial da distribuição da vegetação (linear, pequenos e grandes agrupamentos). Observaram-se melhores resultados com vegetação organizada no formato linear e arborização nas calçadas, pois essa configuração facilita a passagem dos ventos. A autora também destaca que o uso da grama não tem o mesmo efeito quando comparado com as árvores, porque a densidade foliar das árvores contribui significativamente na evapotranspiração e sombreamento. Fontes e Delbin (2001) encontraram uma diferença de até 3 °C entre uma praça com superfície gramada, mas com poucas árvores e um parque com uma arborização densa.

Recomenda-se para a arborização urbana a combinação das árvores de médio e grande porte, conforme a incidência solar, para fornecer sombreamento (COELBA, 2002), como mostrado na Figura 2.

³ *Chicago Green Roofs*. Disponível em:

<http://www.saic.edu/webspaces/greeninitiatives/greenroofs/main.htm>. Acesso em novembro de 2016.

⁴ *Hof-, Dach- und Fassadenbegrünung, Stuttgart*. Disponível em:

<http://www.stuttgart.de/img/mdb/item/544697/102386.pdf>. Acesso em novembro de 2016.

Figura 2 – Arborização urbana

Fonte: COELBA (2002)

Os especialistas no assunto concordam que o efeito climático da vegetação é positivo. No entanto, durante o processo de amenização climática através da vegetação, deve-se considerar tanto o tipo e o tamanho das plantas, quanto a localização, para evitar possíveis efeitos contrários aos desejados e alcançar o melhor resultado.

2.1.2.5 Presença de corpos d'água

Além da vegetação, a presença de corpos d'água é um elemento importante na regulação dos processos evaporativos e da quantidade da água no ar.

Conforme observado por Masiero (2014), a presença dos corpos d'água impacta significativamente o microclima e o conforto térmico em espaços urbanos. Através da evaporação, a água proporciona a umidificação do ar urbano reduzindo consequentemente a amplitude térmica. O raio de influência da massa d'água no resfriamento pode atingir 1000 m dependendo das características topográficas e do ambiente construído. Recomenda-se, portanto, a inclusão do potencial evaporativo e

resfriador da água no processo de planejamento e legislação urbana com fim de gerar microclimas confortáveis e saudáveis.

Segundo Duarte (2000), a correlação entre a temperatura do ar e superfícies d'água é sempre negativa no clima tropical continental e propõe-se a criação de superfícies d'água em vários pontos espalhados em áreas urbanas para proporcionar o conforto higrotérmico e melhorar a qualidade do ar. Segundo Krüger e Pearlmutter (2008), áreas mais úmidas perdem mais calor à noite, favorecendo os ambientes menos amenos.

Oke (1987) ressalta a importância de elementos urbanos contendo água em preservação da estabilidade da temperatura, devido à alta capacidade da água em armazenar calor. A água tem calor específico cerca do dobro do calor específico do solo, portanto armazena calor mais do que a terra. Vários estudos (OKE, 1987; ROMERO, 2000; ALMEIDA, 2006;) afirmam o efeito termorregulador das massas d'água e que o clima é mais estável em áreas ao redor de corpos d'água. Observou-se que a amplitude térmica, tanto diurna quanto estacional, é menor em locais próximos à água e que, em geral, a variação das temperaturas é menor no entorno imediato de corpos d'água. Almeida (2006) assinala que a camada úmida acima da superfície d'água absorve e retém parte da radiação solar.

Masiero (2014) observou a diferença térmica de 2 °C entre pontos próximos à água e a área mais distante, diferença também encontrada por Wong, Tan e Yusuf (2012) e Yoshida et al. (2012). Barbosa et al. (2001) também afirmam o caráter de estabilizador climático da água em um estudo sobre a influência de grandes massas d'água em Maceió. Foram encontradas diferenças de até 2,2 °C entre o ponto à margem costeira e o ponto localizado a 1,5 km da costa.

Embora essas diferenças sejam pequenas em termos absolutos, podem ser significativas quando considerada a percepção humana do conforto ambiental.

2.1.2.6 Geometria urbana. Rugosidade e porosidade

A porosidade urbana apresenta maior ou menor permeabilidade do tecido urbano à passagem dos ventos. Segundo Vidal (1997), a porosidade de uma estrutura urbana depende do espaçamento entre as edificações e arranjos morfológicos e se pode analisar através dos atributos: o tipo de trama, a orientação da trama quanto aos ventos dominantes e a continuidade da trama. Já para Nogueira (2011) a porosidade apresenta a relação entre espaços abertos e confinados e define-se pelo índice de ocupação, pela estrutura de parcelamento, existência de espaços vazios e largura das vias.

A rugosidade urbana relaciona-se com as barreiras formadas pelas edificações ao deslocamento das massas do ar (VIDAL, 1997). Segundo Santos⁵ (2004, apud NOGUEIRA, 2011), o grau da rugosidade depende do volume e da geometria da massa edificada, sendo o diferencial de alturas das edificações o principal fator em alteração significativa da forma de deslocamento das massas do ar.

Em Oke (1981) e Oke (1988), destaca-se a influência da geometria urbana na formação da ilha de calor urbana. A habilidade de uma estrutura ou superfície de resfriar é diretamente relacionada à sua exposição ao céu. A exposição ao céu é expressa pelo parâmetro adimensional fator de visão do céu (Ψ_s). Quando o fator de visão do céu é $\Psi=1.0$, significa que a superfície horizontal tem o horizonte livre. Valores menores que 1 indicam a fração do céu que fica em visão da superfície, se a mesma é coberta por um obstáculo.

Qualquer elemento urbano, edifício ou equipamento pertencente ao plano do observador representa uma obstrução à abobada celeste e impacta a troca de calor entre ambas as superfícies. A redução da área de visão do céu favorece o acúmulo do calor, porque o céu apresenta normalmente temperatura mais baixa do que a superfície terrestre (ROMERO, 2011). Relacionando as temperaturas na cidade de

⁵ SANTOS, R. M. **Morfologia urbana e conforto térmico**. AUP 823: Seminário da Integração, UnB, 2004.

Belo Horizonte, MG com a geometria urbana, Assis (2010) observou que obstruções da abóbada celeste de ordem de 40% (fator de visão do céu de cerca de 60%) já são suficientes para causar o efeito de ilha de calor.

Grandes cidades densamente construídas são caracterizadas pelas edificações altas, especialmente nos centros e áreas comerciais. Comparada com a altura das construções, a largura das ruas é muito baixa. A proporção entre a largura da rua e a altura das edificações circundantes é expressa pela relação H/W (inglês: *height* – altura e *width* – largura) e este fator é segundo Oke (1982) conectado ao excesso de calor em áreas urbanas. O crescimento do fator H/W aumenta a quantidade das superfícies refletoras incrementando assim a absorção da radiação solar.

Em um espaço densamente construído acontecem fenômenos de reflexão múltipla, sendo assim apenas uma pequena fração da energia incidente é refletida para o céu e a maior parte fica retida no espaço entre as edificações. Áreas com mais porosidade proporcionam fluxo do vento, resultando em melhores trocas térmicas e renovação do ar, diminuindo assim a amplitude térmica urbana (ROMERO, 2011).

De outro lado, Barbosa (2018) afirma que a verticalização pode mitigar a sensação térmica nas regiões do clima tropical, desde que haja uma adequada aplicação dos parâmetros de parcelamento (largura das vias, calçadas, etc.) e de uso e ocupação do solo (recuos, taxa de permeabilidade, taxa de ocupação, entre outros).

2.1.2.7 Ventilação

Segundo Romero (1988), importantes fatores no planejamento urbano são ventos locais, os quais ocorrem nas camadas mais baixas da atmosfera. O vento é a variável meteorológica mais instável, pois constantemente apresenta variações na direção e velocidade, quanto ao longo de um dia determinado, tanto de um dia para outro. Além disso, a morfologia urbana também apresenta grandes variações e dificulta a caracterização do fluxo dos ventos. A Figura 3 mostra os principais efeitos aerodinâmicos do vento sobre as massas construídas.

A velocidade e a direção dos ventos em áreas urbanas são influenciadas pelo relevo, pela orientação dos edifícios, presença da vegetação, rugosidade e porosidade do tecido urbano. Conforme observado por Masiero (2014), o fluxo natural dos ventos pode ser aproveitado para resfriamento em áreas urbanas e melhoramento do conforto higrotérmico. Recomenda-se, em geral, afastar as edificações de modo a permitir a ventilação e perda de calor pelas superfícies (NERY; ANDRADE; LIRA, 2003). De acordo com Branco e Araújo (2001), percebe-se aumento da velocidade do vento em áreas com prédios com alturas diferenciadas, confirmando assim a influência da rugosidade sobre a ventilação urbana.

Figura 3 – Efeitos aerodinâmicos do vento

Segundo Lowry (1969), o contraste entre as temperaturas urbanas e rurais aumenta quando não existe a advecção⁶ de ar fresco na cidade por causa de fluxo do vento baixo ou ausente. Romero (2011) destaca que a ventilação urbana é responsável pelo resfriamento eficiente do espaço público aberto e da envoltória das edificações. Ventilação é um fenômeno dinâmico que deve ser considerado no desenho urbano e na orientação das edificações, dado que estas podem causar o efeito de canalização (cânions urbanos concentram ventos em áreas densamente construídas) ou efeito de barreira de vento.

Mendonça (1994) observou a formação de uma ilha fria em um local na cidade de Londrina, PR, devido aos ventos provenientes de fundos de vales, onde se mantêm temperaturas menos elevadas do período noturno, sendo um deles com um lago e parque. A intensidade de ilha fria foi maior na estação de verão, chegando até -7,4 °C às 09 horas, enquanto na estação de inverno o pico de -5 °C ocorreu no período vespertino-noturno.

2.2 Ilha de calor urbana

2.2.1 Fenômeno e suas características

Ilha de calor urbana é um dos fenômenos mais estudados do clima urbano, e representa aumento significativo de temperatura do ar e das superfícies em áreas urbanizadas em comparação às áreas rurais circundantes. Fialho (2009) ressalta que embora o termo ilha de calor seja muitas vezes usado como o elemento definidor do clima urbano, a ilha de calor não representa a realidade do clima urbano, mas um dos seus aspectos.

A temperatura do ar elevada devido às ilhas de calor urbanas tem um efeito negativo sobre microclimas e na saúde humana. Desconforto térmico em espaços urbanos resulta em aumento de uso de energia para resfriamento de edificações e vários

⁶ Advecção descreve movimento na atmosfera predominantemente horizontal (OKE, 1987).

problemas de saúde, principalmente em populações mais sensíveis, tais como crianças e idosos.

Klok et al. (2012), Lo e Quattrochi (2003) e Voogt e Oke (2003), entre outros, diferenciam entre ilha de calor superficial, com temperaturas superficiais elevadas, e ilha de calor urbana (atmosférica), com temperaturas do ar elevadas. De acordo com Lo e Quattrochi (2003), as variações das temperaturas superficiais são maiores durante o dia, enquanto as variações das temperaturas do ar são maiores durante a noite. Similarmente, a avaliação de ilhas de calor pode ser grosseiramente dividida em abordagem em escala ampla utilizando sensoriamento remoto para a medição de temperaturas superficiais e abordagem em escala menor utilizando pequenas estações meteorológicas ou dispositivos móveis para identificar ilhas de calor urbanas a partir de temperaturas do ar (COSEO; LARSEN, 2014).

Embora a intensidade da ilha de calor urbana varie de acordo com cada localidade, existem alguns padrões na variação diurna que são característicos para ilha de calor na maioria das cidades. A intensidade da ilha de calor é comumente expressa pela diferença entre as temperaturas do ar no meio urbano e rural. Essa diferença é geralmente menor pela manhã e aumenta ao longo do dia com o aquecimento das superfícies e do ar. Em geral, a intensidade da ilha de calor é maior no período noturno, uma vez que as superfícies liberam o calor armazenado durante o dia e assim continuam aquecendo o ar urbano (OKE, 1987; GARTLAND, 2010).

Há também fatores relacionados às características específicas da cidade, como tamanho, densidade populacional, além das variações diurnas e sazonais (LOMBARDO, 1985). Oke (1987) relaciona o tamanho da cidade com a intensidade de ilha de calor, especialmente para as cidades norte-americanas e europeias. Usando a população (P) como indicador do tamanho da cidade, observou-se que a intensidade de ilha de calor ΔT_{u-r} é proporcional a $\log P$. Porém, a população como medida de tamanho de cidade não é um índice satisfatório para explicar um fenômeno físico. Como existe uma relação forte entre ilha de calor e densidade urbana, Oke (1987)

expressa a intensidade da ilha de calor por geometria de cânions urbanos, usando a relação H/W (Equação 1) e o fator de visão do céu (Equação 2):

$$\Delta T_{u-r(max)} = 7,54 + 3,97 \ln (H/W) \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

$\Delta T_{u-r(max)}$: intensidade de ilha de calor urbana (°C)

H/W: relação entre altura das edificações (H) e largura da rua (W)

$$\Delta T_{u-r(max)} = 15,27 - 13,88 \Psi_{sky} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

Ψ_{sky} : fator de visão do céu

No entanto, para as condições climáticas do território brasileiro, Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2015) propõem uma adaptação do modelo de Oke para o cálculo da intensidade máxima da ilha de calor em função da relação H/W. Para os casos onde o comprimento da rugosidade $Z_0 < 2,0$ tem-se:

$$T_{(u-r)max} = 9,1098 + 3,9386 \ln (H/W) \quad (\text{Equação 3})$$

Quando o comprimento da rugosidade é $Z_0 \geq 2,0$, aplica se a seguinte equação:

$$T_{(u-r)max} = 4,4345 + 2,0358 \ln (H/W) \quad (\text{Equação 4})$$

Segundo Lowry (1969) a diferença entre as temperaturas urbanas e rurais, $T_u - T_r$, depende de uma série de fatores específicos para cada local: características topográficas, população, densidade da população, geometria da cidade, presença de grandes corpos de água perto da cidade, condições do tempo regionais e latitude por afetar diretamente a quantidade de energia solar recebida. Romero (2011) destaca que a morfologia urbana impacta fortemente a intensidade de ilha de calor, seja a combinação das formas construídas com o relevo, seja a forma resultante de ocupação urbana.

Segundo Oke (1987), o pico da ilha de calor urbana acontece cerca de três a cinco horas após o pôr do sol. O horário do pico é influenciado pela velocidade da liberação do calor armazenado e depende, portanto, do tipo dos materiais. Nas cidades, onde a maioria dos materiais libera calor lentamente, por exemplo, rocha e

concreto, a ilha de calor pode atingir seu pico após o amanhecer (GARTLAND, 2010). Duarte (2000) também afirma que a influência do espaço construído na temperatura é maior no período noturno.

Vários estudos constataam a variação espacial da ilha de calor urbana através da distribuição da temperatura do ar na malha urbana (Figura 4). Em geral, a concentração do calor é maior nos centros urbanos, com áreas densamente construídas e sem muita vegetação (OKE, 1987; GARTLAND, 2010).

Figura 4 – Distribuição horizontal da ilha de calor

Fonte: EPA (2008)

2.2.2 Causas

Gartland (2010) destaca duas causas principais da formação das ilhas de calor em áreas urbanas e suburbanas. A primeira é o uso dos materiais impermeáveis e estanques, os quais reduzem a umidade disponível para dissipar o calor do sol. A segunda razão é a configuração urbana tipo cânion, a qual, em combinação com

revestimentos e pavimentos escuros, absorve e armazena mais energia solar. Segundo a autora, outros fatores contribuindo para a formação da ilha de calor são: calor antropogênico (calor produzido pelo homem), menores velocidades do vento e poluição do ar. Para determinar a quantidade de calor antropogênico em uma cidade ou região, é necessário somar toda a utilização de energia, proveniente de diversas fontes, como edifícios, transporte, comércio e processos industriais. Segundo Landsberg (1981), a velocidade dos ventos em áreas urbanas pode ser reduzida até 60%, dado que as edificações agem como barreiras contra o vento. A ausência do vento reduz a convecção do calor das superfícies para o ar, resultando em ilhas de calor mais intensas em dias calmos e claros (TUMANOV et al., 1999).

Vários estudos apontam que a mudança no balanço energético é um fator muito importante na formação de ilha de calor (GARTLAND, 2010; OKE, 1987; LANDSBERG, 1981). Givoni (1981) afirma que a geometria do cânion (espaço tridimensional delimitado por uma rua e os edifícios que confinam a rua), as propriedades dos materiais, o efeito estufa e a redução de superfícies evaporativas são os fatores determinantes para a existência do efeito de ilha de calor.

Estudando a variação da temperatura na cidade de New Haven, EUA, Mitchell (1961) concluiu que a formação de ilha de calor urbana é consequência direta da própria cidade. Além disso, observou que a intensidade da ilha de calor coincide com o crescimento da população urbana e que o aquecimento do ar é maior em dias úteis do que durante o fim de semana.

Grande concentração dos materiais impermeáveis em zonas urbanas, junto com poluição do ar, baixa evapotranspiração resultado da redução dos espaços verdes e calor antropogênico liberado pela indústria resultam em áreas com temperaturas mais elevadas. A poluição forte do ar contribui à retenção do calor, porque minimiza as trocas radiativas entre os edifícios e a abóbada celeste (ROMERO, 2011).

Sampaio (1981) afirma que a ilha de calor funciona como uma variável dependente, explicada por dois grupos de variáveis: a) as condicionantes do meio físico e seus

atributos geoecológicos; e b) as condicionantes derivadas das ações antrópicas sobre o ambiente urbano, em termos de uso e ocupação do solo.

2.2.3 Estratégias de mitigação

Segundo Gartland (2010), a falta de conhecimento sobre ilhas de calor e benefícios de redução deste fenômeno é a razão principal pela qual as estratégias de mitigação não são amplamente aplicadas. Para iniciar o processo de mudança é essencial educar e motivar as comunidades e buscar o apoio das autoridades em forma de legislação e incentivos financeiros. A mitigação de ilha de calor urbana traria vários benefícios para as comunidades urbanas, sendo alguns deles economia de energia, melhoria de qualidade do ar, mais conforto e melhorias para a saúde, redução de temperaturas e enchentes, manutenção e redução de resíduos e benefícios estéticos. Algumas estratégias propostas pela autora são: uso dos materiais e pavimentos frios, aumento de vegetação e arborização.

Klok e Kluck (2018) destacam a importância de incluir os profissionais da área e as autoridades políticas para desenvolver e aplicar estratégias eficientes de adaptação climática do ambiente construído. Os autores estudaram programas climáticos de algumas cidades (Copenhague, Londres, Melbourne, Vancouver, Johannesburg e Chicago) e identificaram razões principais para a implementação das ações de adaptação das cidades ao estresse térmico. As razões, consequências diretas do aumento da temperatura, foram divididas em cinco grupos: saúde (problemas de saúde, mortalidade elevada, sobrecarga dos serviços de saúde e emergência, incremento de procura pelo atendimento hospitalar); infraestrutura (alta demanda de energia, emissões, interrupções de fornecimento de eletricidade, deformação de vias e ferrovias); água (alta demanda de água, baixa qualidade de água potável e água em geral, alteração do nível das águas); habitabilidade (produtividade no trabalho em espaços interiores e exteriores, falta de conforto em espaços fechados e abertos,

incômodo social); espaço livre/aberto (risco de incêndios, danos à flora e fauna, sobrecarga dos espaços verdes e praias).

As áreas verdes urbanas, especialmente árvores urbanas, trazem vários benefícios, tais como sombreamento, redução de ruídos, filtragem e dispersão da poluição atmosférica, redução de velocidade dos ventos, prevenção de erosões e redução das temperaturas urbanas pela evapotranspiração e retenção de umidade do solo e do ar. Como as árvores controlam a radiação solar direta que chega até o solo, diminuem a temperatura em seu redor imediato protegendo o recinto urbano da insolação indesejada e podem proporcionar formação dos microclimas confortáveis (BARBIRATO et al., 2007). Segundo Romero (2011), o efeito da umidificação do ar, resultado dos processos evapotranspirativos, mostra-se proporcional ao resfriamento do ar.

Existem vários estudos e muitos promotores de uso dos materiais frios para reduzir o efeito de ilhas de calor. Duas principais características distinguindo materiais frios de materiais tradicionais são alta refletância solar e alta emissividade térmica. Nesse sentido, revestimentos frios podem ser utilizados como uma estratégia de mitigação das ilhas de calor, uma vez que absorvem menor quantidade da energia solar incidente. As vantagens dos materiais frios são: redução de consumo de energia para arrefecimento, picos de demanda de eletricidade, poluição do ar e despesas com manutenção de um edifício (SANTAMOURIS et al, 2011; AKBARI E MATTHEWS, 2012; EFTHYMIOU et al, 2016). No entanto, ressalta-se a importância de considerar a geometria do local, para evitar uma possível acumulação das reflexões múltiplas dentro de um cânion urbano. (YAGHOUBIAN E KLEISSL, 2012).

2.3 Histórico dos estudos sobre ilha de calor

2.3.1 No exterior

O estudo do clima em Londres feito por Howard (1833) foi o primeiro estudo do clima em uma área urbana. Estes estudos se multiplicaram depois, principalmente na Europa e América do Norte.

Na cidade de Göteborg, Suécia, foi monitorada a distribuição das temperaturas noturnas durante um período de três anos. Observou-se que as variações de temperatura do ar no centro histórico da cidade foram insignificantes, embora diferentes locais indicassem diferenças geométricas quanto ao fator de visão do céu e relação H/W. A frequência das horas noturnas com $\Delta T_{c-o} > 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (diferença entre a temperatura do ar em cânion e temperatura em espaços abertos) foi inesperadamente pequena e a diferença máxima foi menor que $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. No entanto, a temperatura do ar diminui do centro em direção às áreas rurais indicando a amplitude térmica de $6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante as noites com ventos fracos e céu claro (ELIASSON, 1996).

Em uma pesquisa realizada na cidade de Hannover, Alemanha, foi avaliado o efeito da vegetação sobre o clima urbano em diferentes tipologias urbanas. As medições da temperatura superficial, feitas através de uma câmera infravermelha, mostram diferenças entre temperaturas das superfícies vegetadas e outras superfícies, especialmente superfícies completamente secas. As diferenças máximas de 20 K foram registradas durante períodos de insolação intensa, enquanto durante a noite as diferenças foram bastante insignificantes. As temperaturas mais baixas ocorreram acima das superfícies vegetadas horizontais. O autor destaca a importância de incluir elementos verdes para alcançar um clima urbano mais confortável (WILMERS, 1990/91).

Tan et al. (2016) estudaram estratégias de otimização de plantação de árvores em áreas urbanas com a finalidade de mitigar as ilhas de calor diurnas urbanas em cidades subtropicais densamente construídas. A pesquisa foi realizada na cidade de

Hong Kong, que apresenta uma ilha de calor diurna de até 4 °C. Dois fatores considerados na pesquisa foram o Fator de Visão do Céu (FVC) e a correlação entre a direção do vento e arranjo das árvores para a redução da temperatura do ar e temperatura radiante média. As simulações foram feitas utilizando o programa ENVI-met para vários cenários de FVC e disposição das árvores em relação à direção do vento predominante. Os resultados mostram que plantando árvores em grupos pequenos em áreas com um FVC alto reduz a temperatura do ar significativamente e mitiga a ilha de calor diurna. Além disso, sugere-se plantar árvores paralelamente em ruas que servem como corredores de vento em áreas densamente construídas.

A partir de um estudo das temperaturas superficiais elevadas na cidade de Chicago, Coseo e Larsen (2014) selecionaram oito bairros com características físicas e sociais diferentes com o objetivo de identificar fatores determinantes para a formação de ilhas de calor urbanas. Foram levantadas 14 variáveis físicas independentes, entre elas 3 referentes ao uso e cobertura do solo, 4 variáveis referentes à configuração das edificações e 7 variáveis relacionadas às fontes de calor e resfriamento próximas e na direção contra o vento. As medições foram feitas no período da tarde às 16h e às 2h da madrugada e os resultados mostraram uma diferença de 4 °C entre o ponto de medição mais quente e o mais frio no período noturno. Para as temperaturas noturnas as únicas variáveis previstas foram a porcentagem da impermeabilidade do solo (explicando 68% da variância da temperatura) e a porcentagem da área de copas de árvores. Outras variáveis não mostraram uma influência significativa. Estima-se um aquecimento de 0,74 °C a cada aumento de 10% da impermeabilidade e um resfriamento de 0,2 °C a cada aumento de 10% da área de copas de árvores. Por exemplo, o ponto de medição mais quente apresenta 95,7% da superfície impermeável, enquanto o ponto com a temperatura mais baixa apresenta 54,6% da superfície impermeável. No entanto, nenhuma variável explica significativamente a variação da temperatura durante a medição diurna. A única variável com a influência parcialmente elevada foi a distância entre o ponto de medição e o local de indústria

mais próximo. Isso pode ser por causa dos ventos, que são mais fortes durante o dia e que trazem o ar mais quente.

Uma pesquisa realizada por Klok et al. (2012) chegou a conclusões semelhantes quanto à influência das áreas vegetadas sobre as temperaturas superficiais e estimou um resfriamento ainda maior devido ao aumento da área verde. O estudo realizado em Rotterdam, Países Baixos analisou as temperaturas superficiais urbanas a partir de 16 imagens de satélite e as comparou com as temperaturas superficiais das áreas rurais circundantes. A diferença máxima de temperaturas foi de 10 °C. A superfície com a temperatura mais baixa foi água, seguida pelos campos com vegetação rasteira. Temperaturas altas foram registradas no centro da cidade e na área industrial, onde predominam superfícies impermeáveis e telhados escuros. A análise de regressão mostrou que a porcentagem da área verde foi a variável previsível mais importante. Um aumento de 10% da área verde traz a redução da temperatura superficial de 1,3 °C. Outras variáveis importantes foram albedo, porcentagem da superfície impermeável e fator de visão do céu. Fração da superfície com água não mostrou uma correlação significativa com a temperatura superficial. A comparação das temperaturas superficiais com as temperaturas do ar mostrou que a temperatura superficial apresenta variação maior. Além disso, notou-se que as regiões com maior ilha de calor superficial diurna diferem das regiões de maior ilha de calor superficial noturna, o que pode ser uma informação importante para o planejamento urbano.

Deilami e Kamruzzaman (2017) estudaram o impacto de cinco diferentes cenários de planejamento urbano sobre a intensidade de ilha de calor urbana em Brisbane, Austrália, entre os anos 2014 e 2023. Dois fatores foram identificados como significantes para o desenvolvimento da ilha de calor urbana: densidade populacional e porosidade. Os resultados das simulações mostram que a intensidade da ilha de calor urbana no ano de 2023 vai subir para todos os casos considerados em comparação com o ano de 2014. No entanto, alguns cenários apresentam um aumento da temperatura maior, tais como o cenário com a acomodação da população futura ao longo das vias de trânsito rápido e o cenário que segue o

mesmo padrão de crescimento da população e porosidade observado entre os anos 2004 e 2013. Os cenários com a acomodação da população somente em áreas centrais e somente em áreas periféricas mostraram melhores resultados, mas com a distribuição da ilha de calor diferente. A acomodação da população em áreas centrais resultaria em ilha de calor mais intensa, mas com menor área. Em segundo caso, a ilha de calor ficaria distribuída uniformemente na cidade, ou seja, com uma área maior, mas menos intensa. Os autores ressaltam a importância do planejamento urbano adequado para os bairros existentes e mais ainda a importância do planejamento urbano inicial para bairros novos. Políticas adotadas logo no início são mais eficientes, porque as estratégias aplicadas no futuro terão menos oportunidade de modificar a forma urbana já existente de um bairro ou cidade.

2.3.2 No Brasil

A preocupação com o estudo do clima urbano no Brasil começa na década de 1970 (MONTEIRO, 1976; TARIFA, 1977) e desenvolve-se rapidamente na década de 1980 (DANNI, 1980; SAMPAIO, 1981; LOMBARDO, 1985; BRANDÃO, 1987). Atualmente, profissionais de várias áreas estudam os fenômenos do clima urbano visando criar espaços urbanos confortáveis e saudáveis.

Mendonça (1994) estudou o clima urbano na cidade de Londrina, PR, na escala da camada limite urbana ao nível da superfície, a partir do levantamento de dados através de medições fixas, transectos transversais e uma imagem de satélite. No período de verão e inverno formou-se uma ilha de calor em área de forte adensamento urbano vertical e horizontal e uma ilha fria em áreas mais baixas do relevo e com boa arborização e ventilação. O pico de ilha de calor ocorreu no período da tarde, quando a temperatura do ar no local foi até 10 °C maior do que a temperatura em área rural referencial. Observou-se também que as temperaturas em área rural apresentaram variações significativas em função da umidade do solo. Quando o solo estava nu e seco, principalmente no período de verão, se aquecia

rapidamente e a temperatura do ar em área rural foi mais elevada do que em alguns pontos da área urbana. Os resultados dos dois transectos, um deles em direção oeste-leste e outro em direção norte-sul, reforçaram as constatações já observadas a partir das medições fixas. A análise das temperaturas superficiais a partir da imagem de satélite infravermelha mostrou um fenômeno interessante: a área rural foi mais aquecida do que a área urbana, coincidindo com resultados das medições feitas em estação de verão. É importante destacar que a imagem de satélite mostra temperaturas superficiais, enquanto as medições avaliaram as temperaturas do ar. Além disso, os dados provenientes do satélite foram detectados às 12h44, enquanto as medições em pontos fixos foram realizadas em 4 horários ao longo do dia. As medições na escala de camada de cobertura urbana mostraram uma influência forte do adensamento e verticalização urbana sobre as temperaturas, sendo mais elevadas e variadas quanto mais a área se apresentava urbanizada. A topografia revelou-se como outro fator importante: geralmente, os locais mais elevados eram os locais mais aquecidos. A partir das observações feitas durante a pesquisa surgiram algumas propostas para planejamento urbano de Londrina: a descentralização da construção de edificações verticais da área urbana, promoção do transporte coletivo, desenvolvimento de uma arquitetura com refrigeração natural, ampliação e criação de espaços verdes e represamento de partes de alguns cursos hídricos.

Estudando a ilha de calor na cidade de Bauru, SP, Bertacchi e Faria (2003) observaram que a distribuição espacial das temperaturas do ar foi muito semelhante em situação de verão e inverno: as áreas densamente ocupadas apresentaram as temperaturas mais elevadas, enquanto as áreas com grande recobrimento vegetal apresentaram temperaturas mais baixas. Observou-se, além disso, que as diferenças aumentam no período noturno e, em especial, durante o inverno. Em comparação com um ponto rural, as temperaturas mais elevadas foram na área central da cidade. O centro se caracteriza pela alta porcentagem de área construída e pavimentada e presença de materiais de alta inércia térmica.

Saydelles (2005) analisou o campo térmico e o fenômeno das ilhas de calor na cidade de Santa Maria, RS, aplicando a metodologia para medições em campo baseada na pesquisa de Mendonça (1994) e usando imagens de satélite infravermelhas. Verificou-se que a imposição dos fatores relevo, cobertura vegetal, altimetria e uso dos solos rurais circunvizinhos impactam fortemente o comportamento do campo térmico. A partir das imagens de satélite, observou-se que as áreas da cidade mais elevadas (diferenças de altitude entre as áreas estudadas de até 300 m) e densamente arborizadas apresentaram mais baixas temperaturas superficiais, entre 11° e 14°C. As temperaturas mais altas foram observadas nas zonas residenciais, com pouca vegetação e casas térreas, sem nenhum obstáculo à insolação direta. Os bairros residenciais também com casas térreas, porém com densidade populacional e urbana baixa e com elevada concentração de áreas verdes, apresentaram temperaturas moderadas. A maior diferença entre temperaturas urbano-rural foi de 15°C, dependendo das condições do solo rural (destinado à lavoura de soja e milho). As medições em campo, realizadas em dois dias, mostraram a formação de ilha de calor na parte central da cidade, principalmente às 21h. Em alguns locais de baixa urbanização e densa vegetação formaram-se ilhas frias de magnitude -4°C.

Pezzuto (2007) analisou o campo térmico em Campinas, SP através de medições fixas e móveis e avaliou a sensação térmica por meio de questionários sobre conforto térmico no período do verão e inverno. Observou-se uma relação direta entre os padrões de uso do solo urbano e a temperatura do ar. As diferenças térmicas entre a área verticalizada e área próxima a fundo de vale atingiram 5 °C, com contrastes maiores no período de inverno. Identificaram-se quatro Unidades Climáticas Urbanas a partir dos dados climáticos e parâmetros de ocupação. A Unidade Climática I apresentou uma ilha de calor de fraca intensidade e caracteriza-se por presença de edificações de 1 a 2 pavimentos, alto índice de áreas sem construção, presença de mata nativa, baixo índice de densidade populacional e alto índice de superfícies permeáveis. Intensidade moderada de ilha de calor foi observada nas Unidades Climáticas II e III. A primeira é uma área com elevado índice de edificações de 1 a 2

pavimentos e predominância de baixa densidade populacional, enquanto a segunda apresenta uma alta concentração de edificações de mais de 6 pavimentos, alto índice de impermeabilidade do solo e densidade populacional. A Unidade Climática IV, caracterizada pela predominância de edificações de mais de 6 pavimentos, alto índice de impermeabilidade do solo e alta densidade populacional, apresentou uma ilha de calor de intensidade forte. Avaliando a sensação térmica dos usuários, constatou-se que a área próxima ao parque urbano foi mais confortável, em ambas as estações. Além disso, observou-se que as temperaturas do ar foram sempre menores no ponto rural do que nos pontos urbanos.

Durante um estudo de ilha de calor em uma área residencial em Brasília foi provada a correlação entre o microclima e os atributos do espaço urbano. Mostrou-se que a temperatura do ar aumenta proporcionalmente ao tamanho da área com materiais superficiais impermeáveis (pavimento). Também em locais com maior obstrução da visão do céu, por exemplo, nos espaços entre edifícios pequenos, a temperatura do ar foi elevada. A correlação entre a temperatura e existência das áreas verdes (árvores de médio porte) foi negativa, concluindo que a vegetação diminui a temperatura ambiente. Analisando as edificações observaram-se as seguintes características do ambiente estudado: edifícios construídos a partir dos anos 1990 são largos, fechamento dos pilotis, apartamentos não vazados e de sacadas fechadas, ausência de brises, fachadas espelhadas, árvores ornamentais que não fornecem sombreamento, sombras de vento pelos edifícios comerciais vizinhos. Consequentemente, a velocidade dos ventos entre edificações residenciais é muito baixa o que contribui ao aumento da temperatura. Criticou-se o baixo aproveitamento do regime dos ventos em Brasília e o dimensionamento das aberturas baseado nos critérios associados à iluminação e não à área de parede, como proposto nas normas ambientais (ROMERO, 2011).

Na época das mudanças climáticas, o clima urbano é um assunto muito importante para os científicos e também para os governos, tanto no Brasil, como no exterior. Os processos, os quais impactam o clima das cidades, são complexos e diversos e isso

requer a cooperação constante dos profissionais de áreas de atuação diferentes. Arquitetura e construção civil desenvolvem um papel importante dentro desses processos, bem como o planejamento urbano. O estudo presente faz parte destes processos com uma pesquisa sobre a influência da permeabilidade dos materiais de pavimentos e coberturas sobre o clima urbano.

3 Área de estudo: São Carlos, SP

3.1 Localização

São Carlos é uma cidade de médio porte localizada na região central do Estado de São Paulo (21°35'45" e 22°09'30" de latitude Sul e 47°43'04" e 48°05'26" de longitude Oeste), na região Sudeste do Brasil (Figura 4). Possui área total de aproximadamente 1.130 km², sendo que a área urbana corresponde a 6% de área total (67,5 km²) e a área urbana ocupada é de 33,0 km². A cidade encontra-se a uma altitude média de 856 m acima do nível do mar, em uma das áreas de maior altitude do município (PMSC, 2018).

São Carlos é considerado um centro regional importante no interior do Estado de São Paulo, limitando-se ao Norte com os municípios de Rincão, Luís Antonio e Santa Lúcia; ao Sul com Ribeirão Bonito, Itirapina e Brotas, a Leste com Descalvado e Analândia e a Oeste com Ibaté, Araraquara e Américo Brasiliense (PMSC, 2018).

Figura 4 – (a) Localização do Estado de São Paulo no Brasil, (b) localização do município de São Carlos no Estado de São Paulo e (c) municípios limítrofes e localização geográfica do município de São Carlos.

3.2 Aspectos demográficos

De acordo com o último Censo de 2010, o município de São Carlos contava com 221.950 habitantes e uma densidade demográfica de 195,15 hab/km² (IBGE, 2019). Estima-se que a população da cidade no ano de 2018 era de 249.415 habitantes. A maioria da população, aproximadamente 95%, mora em áreas urbanas, embora a área urbana apresente somente 6% da área total da cidade (PMSC, 2018).

3.3 Aspectos históricos

No início do século XIX, a principal atividade econômica na região onde se localiza São Carlos foi a cultura cafeeira. Em 1857 com a construção de uma capela surge um novo núcleo urbano. São Carlos foi elevada à categoria de vila em 1865 e em 1880 obteve status da cidade. A chegada da ferrovia em 1884 proporcionou a urbanização e a dinamização econômica da região, facilitando o deslocamento populacional e gerando atividades urbanas (DEVESCOVI, 1985). Na virada do século, implementou-

se uma série de melhoramentos urbanos, tais como a construção da rede telefônica, abastecimento de água potável e esgotos domésticos, iluminação pública por energia hidroelétrica e transporte coletivo por bondes elétricos (NEVES, 2007).

A partir de 1920, devido à decadência da lavoura de café, ocorre um deslocamento campo-cidade e os novos imigrantes estrangeiros desenvolvem atividades econômicas urbanas (setor comercial e industrial). Isso levou à expansão urbana, acréscimo significativo da população urbana e aumento do número das edificações na cidade. Além disso, a prestação de serviços educativos através das escolas de ensino médio e superior contribuiu à evolução demográfica em São Carlos (DEVESCOVI, 1985). A cidade de São Carlos passou por processo da urbanização intensiva da sua população a partir de 1940 (Figura 5).

Figura 5 – Expansão da malha urbana de São Carlos até 2002

Fonte: PMSC (2004)

Devescovi (1985) destaca que o processo da ocupação do espaço urbano ocorreu de uma maneira desorganizada, resultando em vários loteamentos vazios no centro. O desenvolvimento de transporte público pelos ônibus na década de 1940 proporcionou a extensão do perímetro urbano e a ocupação dos terrenos periféricos. Rebelatto (1991) também observou que até 1970 São Carlos teve grande quantidade de terrenos desocupados no interior da cidade. A partir do início da década de 70, os loteamentos aprovados eram localizados, em sua grande maioria, nos espaços vazios existentes na cidade, garantindo adensamento da ocupação do núcleo urbano. Após 1988, novos loteamentos foram aprovados, praticamente em todas as direções, evidenciando a tendência de crescimento horizontal da malha urbana.

O traçado urbano existente tem ultrapassado as barreiras físicas que em algum momento limitaram a expansão da cidade (Figura 6). De acordo com Fontes (1998), o crescimento urbano é mais acelerado na área Oeste-Noroeste, ao redor do Shopping Center Iguatemi e no bairro Santa Felícia. Atualmente, São Carlos também revela grande potencial de verticalização nas áreas centrais (BARBOSA, 2009). O zoneamento atual da área urbana está representado na Figura 7.

Figura 6 – Vista aérea de São Carlos

Fonte: Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo (2011)

Figura 7 – Zoneamento urbano

Fonte: PMSC (2016)

3.4 Aspectos climáticos

Segundo Nimer (1979), o clima do Sudeste brasileiro caracteriza-se por sua diversificação, considerando o regime da temperatura e a distribuição espacial da umidade. Essa região encontra-se em uma zona de transição entre os climas quentes das latitudes baixas e os climas mesotérmicos de tipo temperado das latitudes médias. O que mais define o clima da região é a variabilidade térmica durante o ano, apresentando diferenças significativas entre as temperaturas máximas diárias no verão e mínimas no inverno. No entanto, o clima regional tem um caráter subtropical enquanto a variação estacional da precipitação, com uma estação muito chuvosa e outra seca. Essa notável variação climática é determinada por uma série de fatores: a latitude, a topografia acidentada, a posição na borda ocidental do oceano Atlântico e os sistemas de circulação atmosférica.

Tolentino (1967) classificou o clima da cidade de São Carlos entre Aw e Cwa utilizando a sistemática de Köppen. Aw é um clima tropical com verão úmido e inverno seco, com temperatura média de todos os meses maior que 18 °C. Cwa é um clima subtropical úmido de inverno seco com temperatura do mês mais quente superior a 22 °C. Monteiro (1973) afirma que território paulista é dominado pelas massas Tropical Atlântica e Continental, Polar Atlântica e Equatorial Continental, o que caracteriza climas tropicais alternadamente secos e úmidos.

Segundo Aguiar (1989) o clima local pode ser classificado como Cwb: clima temperado úmido de altitude, seco de inverno e chuvas de verão, com temperatura média do mês mais quente inferior a 22 °C. Além disso, 4 meses apresentam temperaturas médias mensais maiores que 10 °C e a precipitação máxima é maior ou igual a 10 vezes a precipitação mínima (precipitação de mês mais seco). Segundo o Zonamento Bioclimático Brasileiro, a cidade de São Carlos está localizada na Zona 4 (ABNT, 2005b).

A cidade de São Carlos apresenta, segundo Modna (2004), episódios de estresse térmico dominados pela localização geográfica, pelo uso do solo, pelas entradas de

massas de ar e atividades antropogênicas. Anualmente ocorrem entradas de aproximadamente 60 massas de ar polares, as quais causam mudanças bruscas no tempo da cidade, tais como diminuição da temperatura e aumento da umidade do ar (VECCHIA, 1997).

Alguns trabalhos já citados anteriormente: Souza (1996), Fontes (1998), Barbosa (2009) e Silva (2011) realizaram estudos correlacionando alguns parâmetros da ocupação urbana e variáveis climáticas (temperatura e umidade do ar) e identificaram existência de regiões da cidade com temperaturas elevadas.

4 Metodologia

Este capítulo trata da metodologia aplicada no desenvolvimento da pesquisa em questão. Apresentam-se as características técnicas dos equipamentos utilizados, variáveis climáticas e urbanísticas registradas, bem como a definição dos períodos e locais de monitoramento.

A metodologia desta pesquisa baseia-se nas metodologias propostas por Barbugli (2004) e Costa (2007), estudos sobre a influência da ocupação urbana nas condições microclimáticas, e está dividida em 4 etapas (Figura 8):

1. Seleção dos pontos de medição situados em várias regiões do município de São Carlos;
2. Classificação da permeabilidade dos revestimentos urbanos em torno de todos os pontos de medição;
3. Levantamento dos dados climáticos (temperatura, umidade relativa e absoluta do ar), por meio de medições fixas em quatro estações do ano;
4. Análise dos dados obtidos:
 - a) Cálculo de intensidade de ilha de calor urbana;
 - b) Cruzamento dos dados climáticos e urbanísticos através de cálculo de coeficiente de correlação linear entre dados climáticos e urbanísticos;
 - c) Normalização dos dados climáticos;
 - d) Elaboração dos mapas de distribuição de temperatura e umidade (relativa e absoluta) do ar.

Figura 8 – Fluxograma da metodologia

Fonte: Autora (2019)

4.1 Parâmetros de ocupação urbana / físico-ambientais

4.1.1 Definição dos pontos de medição

A escolha dos locais para a coleta de dados teve como critério principal a variedade de tipos da ocupação urbana. No entanto, o número de pontos de coleta foi limitado pela disponibilidade dos equipamentos e dependeu também da possibilidade de se instalar o equipamento de forma segura e deixá-lo durante o período de tempo necessário. A partir dessas condicionantes, o monitoramento foi feito em 36 pontos, 10 em cada grupo de medição, com repetição de medição em um dos pontos (Ponto 4), o qual representa o ponto de referência. Este ponto foi adotado como ponto de referência devido ao fácil acesso e alta segurança no local. Destes 36 pontos, 30 são casas privadas (Pontos 4-9; 11-18; 20-26 e 28-36), 4 estão localizados em campi universitários (Pontos 1-3 e 27), 1 ponto situa-se em um local de comércio (Ponto 10) e 1 ponto é o Centro de Divulgação Cultural e Científica da USP (Ponto 19). A medição no Ponto 6, realizada no período de verão, foi repetida durante o monitoramento de inverno e denominada como medição no Ponto 24, devido a um erro de instalação no verão.

A Tabela 4 apresenta os endereços de todos os pontos e períodos de coleta de dados.

Tabela 4 – Locais e períodos de medição

PERÍODO DE VERÃO: 15. 02. 2017 a 01. 03. 2017			
Ponto	Instrumento	Altitude	Endereço
1	H580	817 m	Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Centro
2	H566	835 m	Avenida João Dagnone, 1100, Jardim Santa Angelina
3	H585	862 m	Rodovia Washington Luís, 310
4	H560	858 m	Avenida José Ferro, 87, Portal do Sol
5	H582	870 m	Avenida República do Líbano, 1231, Cruzeiro do Sul
6	H565	823 m	Passeio das Palmeiras, 520, Parque Faber Castell
7	H581	855 m	Rua Benjamin Constant, 975, Vila Prado
8	H576	878 m	Avenida Francisco Falvo, 248
9	H583	814 m	Rua Benedita Stall Sodré, 147
10	H584	879 m	Avenida Getúlio Vargas, 1440, Vila Lutfalla
PERÍODO DE OUTONO: 26. 05. 2017 a 09. 06. 2017			
Ponto	Instrumento	Altitude	Endereço
4	H580	858 m	Avenida José Ferro, 87, Portal do Sol
11	H565	830 m	Avenida Eliza Gonzales Rabelo, 1070
12	H582	830 m	Passeio das Palmeiras, 321
13	H584	877 m	Rua Major José Inácio, Vila Faria
14	H576	862 m	Av. Profa Maria de Cresci Leopoldino, 775
15	H560	842 m	Rua Episcopal, 2792
16	H581	880 m	Rua Marcolino Lopes Barreto, 2000, Vila Monteiro
17	H585	841 m	Alameda dos Miosótis, 215, Cidade Jardim
18	H583	829 m	Alameda dos Narcisos, 164, Cidade Jardim
19	H566	815 m	Rua Nove de Julho, 1205, Centro
PERÍODO DE INVERNO: 01. 09. 2017 a 14. 09. 2017			
Ponto	Instrumento	Altitude	Endereço
4	H579	858 m	Avenida José Ferro, 87, Portal do Sol
20	H560	848 m	Rua José Palone, 28, Jd. Bandeirantes
21	H578	849 m	Rua Capitão Adão Pereira de Souza Cabral, 839
22	H584	812 m	Rua Paulo Fragoso Coimbra, 381, Jardim Alvorada
23	H573	798 m	Rua João Pedrino, 75
24	H583	823 m	Passeio das Palmeiras, 520, Parque Faber Castell
25	H564	870 m	Rua Joaquim da Cruz Penalva, 253, Jardim S. João Batista
26	Hobo 3	845 m	Av. Santa Madre Cabrini, 613
27	H580	858 m	Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Centro
28	Hobo 2	816 m	Rua Luiz Saia, 51
PERÍODO DE PRIMAVERA: 03. 12. 2017 a 18. 12. 2017			
Ponto	Instrumento	Altitude	Endereço
4	H566	858 m	Avenida José Ferro, 87, Portal do Sol
29	H573	870 m	Rua Ricardo de Assis Pereira, 946, Jd. Ipanema
30	H581	845 m	Rua José Geraldo Keppe, 1154
31	H579	849 m	Rua Ray Wesley Herrick, 1501
32	H582	869 m	Rua Luís Pedro Bianchim, 195
33	H585	840 m	Rua Antonio Sacramento, 93
34	H565	867 m	Av. Miguel Damha, 1000
35	H584	880 m	Rua Antonio Pirola, 12, Vila Alpes
36	H564	862 m	Major Manoel Antônio de Mattos, 138
37	H563	871 m	Rua Domingos Teixeira de Mendonça, 595

Fonte: Autora (2019)

A Figura 9 ilustra a localização dos pontos de monitoramento no mapa da cidade e novamente os períodos de medição.

Figura 9 – Locais de medição na cidade de São Carlos

Fonte: Elaboração própria a partir do Google Maps (2019)

Na Tabela 5 apresenta-se o detalhamento dos locais de medição nos 4 períodos.

Tabela 5 – Fotografias e características dos locais de medição

(continua)

ENTORNO DO PONTO 1
O Ponto 1 localiza-se no Instituto de Arquitetura e Urbanismo, na Área 1 do Campus da Universidade de São Paulo. Aproximadamente a metade da superfície horizontal é vegetada.
ENTORNO DO PONTO 2
O Ponto 2 está situado na Faculdade de Engenharia Ambiental na Área 2 do Campus da USP em São Carlos. A Área 2 do Campus da USP destaca-se por ter a maioria da superfície coberta por vegetação, com edificações espalhadas pontualmente e características semelhantes com a área rural.
ENTORNO DO PONTO 3
Uma realidade semelhante à Área 1 do Campus da USP apresenta-se no Campus da Universidade Federal de São Carlos UFSCar), a localização do Ponto 3.

(continuação)

ENTORNO DO PONTO 4

O Ponto 4, o ponto de referência adotado nesta pesquisa, está numa área predominantemente residencial, na periferia da cidade, com casas térreas e pouca vegetação.

ENTORNO DO PONTO 5

Numa área predominantemente residencial, na periferia da cidade localiza-se também o Ponto 5. As edificações são principalmente térreas e na proximidade encontram-se algumas superfícies gramadas.

(continuação)

ENTORNO DO PONTO 6

O Ponto 6 localiza-se na periferia da cidade, perto de um *shopping*, em uma região de cota elevada. A área apresenta uma mistura do uso comercial e residencial, com altos prédios residenciais e condomínios fechados com casas térreas e sobrados. O instrumento foi instalado na sacada de um apartamento no primeiro andar.

ENTORNO DO PONTO 7

O Ponto 7 está situado numa parte antiga da cidade, com uso comercial e residencial e edificações térreas. Em frente à casa onde o equipamento foi instalado encontra-se uma praça, delimitada de um lado por um estádio de futebol.

ENTORNO DO PONTO 8

A vegetação predomina no entorno do Ponto 8, localizado em um conjunto residencial na periferia, perto da Rodovia Washington Luís.

(continuação)

ENTORNO DO PONTO 9

A área do Ponto 9 está localizada numa região residencial, onde predominam edificações térreas. O local da instalação do equipamento é próximo ao Córrego Santa Maria do Leme, cuja margem é densamente arborizada.

ENTORNO DO PONTO 10

O Ponto 10 localiza-se numa área predominantemente comercial, com pouca vegetação e maior recobrimento de coberturas metálicas nas edificações.

(continuação)

ENTORNO DO PONTO 11

O Ponto 11 é também próximo ao Córrego Santa Maria do Leme, como o Ponto 9, numa área predominantemente residencial, porém mais periférica.

ENTORNO DO PONTO 12

O Ponto 12 é próximo ao Ponto 6. No entanto, o instrumento foi instalado em uma casa. A casa está localizada em um conjunto residencial com vários lotes desocupados.

(continuação)

ENTORNO DO PONTO 13

O entorno do Ponto 13 caracteriza-se por casas térreas e uma localização na periferia da cidade.

ENTORNO DO PONTO 14

O Ponto 14 está situado numa área periférica, em um condomínio fechado com vários lotes desocupados e cobertos de vegetação.

(continuação)

ENTORNO DO PONTO 15

O Ponto 15 localiza-se numa área urbanizada, entre a Área 1 do Campus da USP e a rodoviária, com vários prédios altos. Nas proximidades, encontra-se uma via importante, bem como o Córrego do Tijuco Preto, a partir dessa área parcialmente coberto.

ENTORNO DO PONTO 16

No entorno do Ponto 16 predominam casas térreas e vários locais de comércio com coberturas metálicas num terreno único.

(continuação)

ENTORNO DO PONTO 17

O Ponto 17 está localizado num bairro residencial, com entorno quase completamente construído e com pouca vegetação, a maioria sendo árvores.

ENTORNO DO PONTO 18

O Ponto 18 está localizado no mesmo bairro residencial que o Ponto 17. Apresenta porém diferentes padrões do uso do solo. O Ponto 18 localiza-se já na periferia e apresenta uma área vegetada significativamente maior.

(continuação)

ENTORNO DO PONTO 19

O Ponto 19 está localizado no centro da cidade, numa área densamente construída e parcialmente verticalizada. O uso é misto: comercial e residencial.

ENTORNO DO PONTO 20

O Ponto 20 situa-se numa área predominantemente residencial, próximo a um conjunto de lotes ainda não edificadas e recobertos em vegetação rasteira.

(continuação)

ENTORNO DO PONTO 21

O Ponto 21 está localizado próximo à Área 1 do Campus da USP, com uma praça vegetada em frente ao local de medição. A altura das edificações varia entre um e cinco pavimentos.

ENTORNO DO PONTO 22

O entorno do Ponto 22 apresenta uma porção significativa da superfície vegetada. Predominam edificações residenciais, variando entre um e seis pavimentos.

ENTORNO DO PONTO 23

O Ponto 23 está localizado numa área periférica e aproximadamente a metade da superfície está construída. A maioria das edificações são casas térreas.

(continuação)

ENTORNO DO PONTO 24 (PONTO 6)

Como a medição no Ponto 6 no período de verão apresentou uma anormalidade, a medição foi repetida no período de inverno e essa medição foi denominada Ponto 24, para evitar possível confusão durante a análise.

ENTORNO DO PONTO 25

O Ponto 25 localiza-se em uma área residencial com alguns locais de comércio. É um dos pontos com menor porcentagem de área permeável.

ENTORNO DO PONTO 26

O Ponto 26 está situado na periferia da cidade, em um bairro residencial. Em frente ao ponto de medição, há um parque com vegetação. No entanto, o restante da área ao redor do ponto está densamente edificado, com poucas superfícies permeáveis.

(continuação)

ENTORNO DO PONTO 27

O Ponto 27 está localizado na Área 1 do Campus da USP, bem como o Ponto 1. Porém, localiza-se no outro extremo do Campus. Esta porção do Campus apresenta uma quantidade quase igual de superfície vegetada e construída, enquanto a área fora do Campus é comercial, com vários prédios altos e pouca vegetação, salvo a Praça XV, o parque central do bairro.

ENTORNO DO PONTO 28

No entorno do Ponto 28 predominam superfícies impermeáveis, com vegetação em forma de grama e árvores ao longo de um córrego. A área conta com uso misto: residencial e comercial.

ENTORNO DO PONTO 29

O Ponto 29 está localizado numa área predominantemente residencial. Existem vários lotes desocupados e recobertos em grama, mas a maior parte da superfície está edificada.

ENTORNO DO PONTO 30

O Ponto 30 está localizado num bairro residencial, próximo a estabelecimentos públicos de saúde e educação. A maioria das edificações é térrea. O entorno do ponto é densamente edificado, com somente 5% da superfície permeável.

ENTORNO DO PONTO 31

O conjunto residencial onde está localizado o Ponto 31 tem a maioria dos lotes edificados, com pouca vegetação. No entanto, o condomínio está situado na periferia da cidade e o entorno dele é exclusivamente vegetado.

ENTORNO DO PONTO 32

O Ponto 32 situa-se numa área de uso misto, com residências térreas e vários locais de comércio. Em proximidade existem vários lotes desocupados, a maioria deles recoberta em grama.

(continuação)

ENTORNO DO PONTO 33

O Ponto 33 está localizado na proximidade do Ponto 4 (ponto de referência), porém mais próximo a uma via importante e com maior superfície vegetada. As edificações são casas térreas e alguns locais de comércio ao longo da via.

ENTORNO DO PONTO 34

Semelhante a outros pontos em condomínios fechados, no entorno do Ponto 34 predominam casas de um ou dois pisos. Vários lotes estão desocupados e recobertos de grama.

ENTORNO DO PONTO 35

O Ponto 35 encontra-se numa área da cidade de uso misto: residencial e comercial. As superfícies vegetadas são pequenas, com exceção de um terreno maior recoberto de vegetação rasteira e solo nu.

ENTORNO DO PONTO 36

O entorno do Ponto 36 é uma área predominantemente residencial, com alguns locais de comércio. A porcentagem da superfície permeável é de 5%, um dos pontos com menor presença dos revestimentos horizontais permeáveis.

ENTORNO DO PONTO 37

O Ponto 37 está localizado a alguns quarteirões do Ponto 36. O entorno de ambos os pontos é semelhante e a presença das superfícies permeáveis é baixa, porém um pouco maior no entorno do Ponto 37.

Fonte: Autora (2019)

4.1.2 Levantamento da permeabilidade dos revestimentos urbanos horizontais

A análise do entorno de cada ponto de medição consiste em quantificação dos revestimentos horizontais de acordo com sua permeabilidade. Os revestimentos verticais não foram considerados nesta pesquisa. Ressalta-se também que a maioria dos pontos está localizada em regiões com edificações térreas ou até 3-4 pavimentos, ou seja, nenhum dos pontos apresenta entornos extremamente verticalizados.

Para quantificar as respectivas porcentagens de permeabilidade do solo, em cada ponto de medição foi adotada uma área de influência de 0,125 km², correspondendo ao raio de 200 m. De acordo com Oke (2006), a proporção entre a altura do instrumento e o raio da área de influência para as áreas urbanas é 1:100. Considerando que a altura da instalação da maioria dos equipamentos nesta pesquisa variou entre 2 e 3 metros, adotou-se o raio de 200 m. A quantificação foi feita a partir das imagens de satélite no programa AutoCAD. As superfícies foram divididas em permeáveis e impermeáveis, sem considerar o grau da capacidade de absorção de águas pluviais de cada material. Considerou-se que as superfícies permeáveis são: área com vegetação arbórea, vegetação rasteira, solo exposto e água (rio, córrego). Asfalto, concreto, coberturas metálicas e cerâmicas e outros tipos de coberturas foram classificados como revestimentos impermeáveis.

4.1.3 Classificação digital dos revestimentos horizontais

Para dois pontos de coleta, Ponto 2 (Área 2 do Campus USP) e Ponto 4 (ponto de referência), realizou-se a classificação digital supervisionada dos revestimentos horizontais. Como base para a classificação foram utilizadas imagens aéreas de alta resolução dos entornos destes dois pontos de coleta. Imagens aéreas de alta resolução permitem a identificação de todos os tipos dos revestimentos horizontais, o que pode ser importante para as pesquisas sobre o clima urbano, tendo em vista que diferentes materiais têm comportamento térmico diferenciado.

As imagens foram obtidas em janeiro de 2019 através de drone. Foi possível realizar somente dois voos, porque o processo de autorização e organização para realizar os voos é bastante demorado e a possibilidade de fazer as imagens para esta pesquisa surgiu na segunda metade do ano 2018. Além disso, depende da disponibilidade do equipamento e condições no local, pois precisa-se de uma área livre para a decolagem e de configuração urbana, que permite a vista constante ao drone. Considerando-se que o aparelho tem custo elevado, existe também uma questão de

segurança no local. Decidiu-se, portanto, fazer as imagens do Ponto 2 porque é o ponto menos urbanizado entre todos os pontos e do ponto de referência (Ponto 4).

Inicialmente, a classificação supervisionada foi realizada no programa QGIS, através do *Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)* (QGIS, 2019). Foram estabelecidas as seguintes classes de revestimentos: vegetação (arbórea e rasteira), solo exposto, asfalto, pavimento de concreto, cobertura cerâmica, cobertura de amianto/fibrocimento, vidro, policarbonato e água (piscinas). O software realiza a classificação da imagem a partir das classes definidas pelo usuário. No entanto, as imagens de entrada têm um nível alto de detalhamento, o qual não permitiu uma classificação automática precisa e resultou em imagens de saída imprecisas. Isso acontece porque na imagem de entrada são captados os tons das cores com muita precisão e, por exemplo, uma árvore aparece com várias cores: branco, vários tons de verde, cinza e preto, dependendo da insolação e criação de sombras. Como resultado, materiais pertencentes às classes diferentes podem ter a mesma aparência e o software não consegue identificar o material “verdadeiro” da forma automática.

Na segunda etapa da classificação, realizou-se a correção manual das imagens com a classificação através do software AutoCAD, a fim de diminuir os possíveis erros da classificação automática. A classificação gerada foi conferida minuciosamente, comparada com a imagem original e as incorreções foram eliminadas.

4.2 Parâmetros climáticos

4.2.1 Variáveis e períodos de medição

Para os objetivos da pesquisa as variáveis climáticas registradas durante as medições foram a temperatura do ar e a umidade relativa. Além disso, foram obtidos os dados da umidade absoluta, uma vez que os equipamentos utilizados calculam esta variável automaticamente. Realizaram-se quatro grupos de medições durante o ano de 2017, uma para cada estação do ano (Tabela 6). A duração dos monitoramentos foi de 15 dias consecutivos, com intervalo de registro de 30 minutos. Devido à

indisponibilidade dos equipamentos, a medição durou 14 dias consecutivos durante a estação de inverno.

Tabela 6 – Períodos de medição das variáveis climáticas

Estação	Período de medição	Intervalo de medições	Total
Verão	De 15. 02. 2017 a 01. 03. 2017	De 30 em 30 minutos	15 dias consecutivos
Outono	De 26. 05. 2017 a 09. 06. 2017	De 30 em 30 minutos	15 dias consecutivos
Inverno	De 01. 09. 2017 a 14. 09. 2017	De 30 em 30 minutos	14 dias consecutivos
Primavera	De 03. 12. 2017 a 18. 12. 2017	De 30 em 30 minutos	15 dias consecutivos

Fonte: Autora (2019)

Adicionalmente foram obtidos dados da estação meteorológica da Embrapa Pecuária Sudeste, pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) para os mesmos períodos de medição. Decidiu-se adotar a estação da Embrapa como o ponto representativo para a área rural. A estação meteorológica da Embrapa está localizada na cidade de São Carlos, na Fazenda Canchim, à distância de aproximadamente 11 km do centro da cidade (latitude: 21°57'42" (Sul); longitude: 47°50'28" (Oeste); altitude: 860 m) (EMBRAPA, 2019). As variáveis climáticas registradas na estação são temperatura, umidade relativa e absoluta do ar. O intervalo de medição na estação meteorológica é de 15 minutos, assim que foram escolhidos somente os registros feitos nos mesmos horários como na pesquisa presente (a cada 30 minutos). Os dados da estação meteorológica foram disponibilizados diretamente pela Embrapa.

4.2.2 Normalização dos dados

Como o monitoramento foi feito em 4 estações diferentes, não é possível fazer uma comparação direta dos dados climáticos levantados. Para normalizar as variáveis

climáticas, trabalhou-se com diferenças dos valores médios da temperatura e umidade (relativa e absoluta) entre o ponto de referência (Ponto 4) e todos os pontos restantes. Considerou-se que a variação da temperatura e umidade de cada ponto de coleta mantinha-se constante em relação ao ponto de referência independente do mês de medição (BARBUGLI, 2004).

A Tabela 7 mostra o exemplo da extrapolação da temperatura média no Ponto 2 para todas as estações. O monitoramento neste ponto foi realizado durante a primeira medição, ou seja, durante a estação de verão. A partir das temperaturas médias medidas no Ponto 2 e Ponto 4, foi calculada a diferença das temperaturas médias entre estes dois pontos, a qual é considerada constante. Para obter os valores extrapolados, utilizou-se a temperatura média medida no Ponto 4 durante as três estações restantes e a diferença das temperaturas médias entre Ponto 2 e Ponto 4 medidas no verão.

Tabela 7 – Extrapolação da temperatura média no Ponto 2 para todas as estações

Estação	Cálculo das temperaturas médias
1ª medição – verão	Valores medidos: $T_{\text{méd}} \text{ P2} = 24,59 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{méd}} \text{ P4} = 26,66 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Diferença: $T_{\text{méd}} \text{ P4} - T_{\text{méd}} \text{ P2} = 2,07 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (diferença constante)
2ª medição – outono	Valor medido: $T_{\text{méd}} \text{ P4} = 21,22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Valor extrapolado: $T_{\text{méd}} \text{ P2} = T_{\text{méd}} \text{ P4} - 2,07 \text{ }^{\circ}\text{C} = 19,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$
3ª medição – inverno	Valor medido: $T_{\text{méd}} \text{ P4} = 24,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Valor extrapolado: $T_{\text{méd}} \text{ P2} = T_{\text{méd}} \text{ P4} - 2,07 \text{ }^{\circ}\text{C} = 22,08 \text{ }^{\circ}\text{C}$
4ª medição – primavera	Valor medido: $T_{\text{méd}} \text{ P4} = 25,03 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Valor extrapolado: $T_{\text{méd}} \text{ P2} = T_{\text{méd}} \text{ P4} - 2,07 \text{ }^{\circ}\text{C} = 22,96 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fonte: Autora (2019)

4.2.3 Equipamentos utilizados

Os monitoramentos foram realizados usando 10 sensores da marca HOBO, modelo H08-003-2, fabricados pela *Onset Computer Corporation*. Os sensores deste modelo registram a temperatura do ar e a umidade relativa. A Tabela 8 mostra as

especificações dos equipamentos utilizados, de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante (ONSET, 2017).

Tabela 8 – Especificações dos equipamentos (adaptado)

Identificação	Dimensões (mm)	Escala	Precisão (a 20 °C)	Resolução (a 20 °C)	Fabricante	Figura
H560	68 x 48 x 19	-20°C a + 70°C 0 – 95 %	$\pm 0.7\text{ °C}$ $\pm 5\%$	0.38 °C	Onset Computer Corporation
H565						
H566						
H570						
H576						
H580						
H581						
H582						
H583						
H584						
H585						

Fonte: ONSET (2017)

Os sensores deste tipo são mais indicados para ambientes internos em função da maior sensibilidade à radiação solar, poeira e umidade (BARBUGLI, 2004; COSTA, 2007; ONSET, 2017). Para evitar a interferência das condições do entorno nos dados medidos e também para possibilitar a instalação no local, cada instrumento foi colocado em uma caixa protetora e fixado com adesivo Velcro. As caixas são de plástico e revestidas por fita de alumínio de baixa emissividade, com furos nos 4 lados para permitir a circulação do ar (Figura 10).

Figura 10 – Sensores HOB0 e as proteções

Fonte: Galusic e Dornelles (2017)

Durante a instalação dos equipamentos, procurou-se um lugar na sombra e evitou-se a proximidade de certos materiais, tais como vidro ou cobertura de policarbonato, os quais poderiam influenciar as temperaturas medidas através de reflexão, emissão ou grande absorção de calor. Sendo assim, as caixas protetoras foram instaladas em baixo de alguma estrutura construtiva e penduradas com uma corda (Figura 11). Segundo Oke (2006), para a medição de temperatura do ar recomenda-se uma altura do instrumento entre 1,25 e 2 metros em áreas não urbanas, enquanto em áreas urbanas permitem-se as alturas de até 5 metros acima do solo. Levando isto em consideração e dependendo das características de cada local, os instrumentos foram instalados em alturas entre 2 e 3 metros. Porém, nos Pontos 2 e 6, devido às

características do local, o sensor foi instalado numa altura menor que 2m e no Ponto 6 na altura de 5m (sacada de um apartamento no primeiro andar).

Figura 11 – Exemplos de instalação dos instrumentos

Fonte: Autora (2019)

4.2.3.1 Aferição dos instrumentos

A fim de assegurar que não existe discrepância de resultados entre os instrumentos utilizados, realizou-se a aferição dos instrumentos durante 5 dias, entre 18. 01. 2017 e 23. 01. 2017, sob as mesmas condições no espaço do Laboratório de Conforto Ambiental do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo (USP).

O intervalo de registro foi de 10 em 10 minutos. A análise dos resultados mostrou que a diferença entre os valores registrados não é significativa, mantendo-se dentro da precisão do equipamento. A Figura 12 mostra a variação da temperatura medida pelos instrumentos HOBO durante o dia 21. 01. 2017, o dia central da aferição.

Figura 12 – Variação da temperatura durante a aferição no dia 21. 01. 2017

Fonte: Autora (2019)

4.3 Cruzamento dos dados climáticos e urbanísticos

Para cada um dos pontos realizou-se o cruzamento dos dados climáticos e urbanísticos. As análises basearam-se na correlação entre a temperatura, umidade relativa e umidade absoluta medidas num ponto determinado e a porcentagem da permeabilidade dos revestimentos no entorno deste ponto. A covariância CoV (Equação 5) e o coeficiente de correlação linear R (Equação 6) de duas variáveis X e Y são definidos como (NOWAK; COLLINS, 2000):

$$CoV(X, Y) = E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)] \quad (\text{Equação 5})$$

$$R(X, Y) = \frac{CoV(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (\text{Equação 6})$$

Sendo:

μ_X, μ_Y : médias das variáveis X e Y ;

σ_X, σ_Y : desvios padrão de X e Y .

A partir das Equações 5 e 6, calcularam-se a covariância e o coeficiente de correlação das variáveis climáticas (temperatura, umidade relativa e absoluta) e da permeabilidade dos revestimentos. A covariância é grau de inter-relação entre duas variáveis aleatórias, enquanto o coeficiente de correlação mostra a dependência linear entre duas variáveis. Essa dependência pode ser positiva ou negativa e varia entre -1 e 1. No caso da correlação positiva, o crescimento de uma variável significa o crescimento de outra variável e consequentemente a redução de uma variável significa a redução de outra. No caso da correlação negativa, o comportamento é contrário: o crescimento de uma variável significa a redução de outra. Para o trabalho presente, o fator de correlação indica se existe uma relação linear entre a permeabilidade e a ocorrência de ilhas de calor e também entre a permeabilidade e condições da umidade relativa e absoluta.

4.4 Cálculo de intensidade de ilha de calor urbana

Conforme exposto por Oke (1987) e Gartland (2010), a intensidade de ilha de calor urbana atmosférica é geralmente calculada como a diferença das temperaturas do ar entre ambiente urbano e ambiente rural. As diferenças são geralmente maiores no período noturno, nos dias com céu claro e sem ventos. A estação meteorológica da Embrapa foi escolhida como área rural nesta pesquisa e os pontos restantes de medição foram considerados como área urbana. A ilha de calor urbana neste caso é a ilha de calor atmosférica, ou seja, calculada a partir dos valores da temperatura, e está localizada na altura das coberturas urbanas (*urban canopy layer*).

Com fim de calcular a intensidade de ilha de calor urbana em quatro períodos de medição foi escolhido um dia típico para cada medição. Este dia será chamado de “dia de referência”. Mudanças bruscas das condições climáticas, como a chuva ou entrada de uma frente quente ou fria podem mascarar o comportamento comum dos materiais urbanos, influenciando a velocidade e quantidade de calor absorvido e liberado. Dado isso, dentro de cada período de medição procurou-se um período de estabilidade, ou seja, um período de pelo menos três dias sem chuva e com a variação homogênea da temperatura. Uma vez escolhido o dia de referência, foram calculadas as diferenças das temperaturas entre a estação da Embrapa e outros pontos para todos os 48 registros durante o dia em questão.

4.5 Elaboração dos mapas térmicos

Os mapas de distribuição da temperatura e umidade relativa do ar foram elaborados a partir dos dados medidos e extrapolados no programa QGIS, versão 2.8.9, um software de sistema de informação geográfica (SIG) com código livre. As coordenadas dos pontos de medições e os valores médios da temperatura e umidade (relativa e absoluta) foram georreferenciados no programa, o qual interpola os dados através de algoritmo *Inverse Distance to a Power*.

5 Apresentação e análise dos resultados

A seguir serão apresentados e analisados os dados obtidos nesta pesquisa durante os quatro grupos de medições, representativos das estações de verão, outono, inverno e primavera, respectivamente.

5.1 Período de verão

O primeiro grupo de medição correspondente à estação de verão foi realizado no período de 15. 02. a 01. 03. 2017 em 10 pontos.

5.1.1 Apresentação das variáveis urbanísticas

Utilizando a metodologia apresentada no item 4.1.2 realizou-se a quantificação da permeabilidade dos revestimentos horizontais em cada ponto de medição. As Figuras 13 a 22 mostram as imagens de satélite e a análise da permeabilidade dos entornos de todos os pontos.

Figura 13 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 1

Fonte: Autora (2019)

Figura 14 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 2

Fonte: Adaptado de Galusic e Dornelles (2017)

Figura 15 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 3

Fonte: Autora (2019)

Figura 16 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 4

Fonte: Autora (2019)

Figura 17 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 5

Fonte: Autora (2019)

Figura 18 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 6

Fonte: Autora (2019)

Figura 19 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 7

Fonte: Autora (2019)

Figura 20 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 8

Fonte: Autora (2019)

Figura 21 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 9

Fonte: Autora (2019)

Figura 22 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 10

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 9 mostra os resultados da classificação da permeabilidade dos revestimentos urbanos horizontais no entorno dos 10 pontos de monitoramento. Destacam-se os Pontos 2 e 4, locais com maior porcentagem das superfícies horizontais permeáveis (ressaltado em verde) e menor porcentagem (ressaltado em cinza), respectivamente.

Tabela 9 – Permeabilidade dos revestimentos em cada ponto de coleta no período de verão

Permeabilidade / Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Área permeável	42%	91%	47%	12%	33%	51%	15%	61%	29%	20%
Área impermeável	58%	9%	53%	88%	67%	49%	85%	39%	71%	80%

Fonte: Adaptado de Galusic e Dornelles (2017)

5.1.1.1 Classificação digital dos revestimentos horizontais nos Pontos 2 e 4

Utilizando a metodologia apresentada no item 4.1.3, foram analisados os tipos de revestimentos horizontais nos dois pontos de medição: Ponto 2 (Área 2 do Campus USP) e Ponto 4 (ponto de referência). A Figura 23 mostra as imagens aéreas dos Pontos 2 e 4 e a classificação dos revestimentos horizontais.

Figura 23 – Classificação dos revestimentos horizontais nos entornos dos Pontos 2 e 4

Fonte: Autora (2019)

As porcentagens de cada tipo de revestimento nos entornos dos Pontos 2 e 4 são apresentados na Tabela 10. A área permeável, composta pela área com vegetação e

solo exposto, mediu 88,7% no entorno do Ponto 2 e 21,3% no entorno do Ponto 4. Percebe-se que nos entornos destes dois pontos não existem fluxos de água, quais também seriam considerados como revestimento permeável.

Tabela 10 – Classificação dos revestimentos horizontais nos entornos dos Pontos 2 e 4, em porcentagem

	Tipo de revestimento	Ponto 2	Ponto 4
Revestimentos permeáveis	Área com vegetação	87,1%	19,2%
	Solo exposto	1,6%	2,1%
Revestimentos impermeáveis	Asfalto	3,5%	15,7%
	Pavimento de concreto	5,2%	9,7%
	Cobertura de cerâmica	0	49,3%
	Cobertura do amianto/ Fibrocimento	2,2%	3,1%
	Vidro	0	0,4%
	Policarbonato	0,4%	0,1%
	Água (piscinas)	0	0,4%
Total	Permeável	88,7%	21,3%
	Impermeável	11,3%	78,7%

Fonte: Autora (2019)

Nota-se que a vegetação, arbórea e rasteira, ocupa 87,1% da superfície no entorno do Ponto 2, enquanto no entorno do Ponto 4 predomina a cobertura de cerâmica com 49,3%. As coberturas do vidro e polycarbonato e água de piscinas ocupam em ambos os casos menos que 1% da área total. Asfalto, pavimento de concreto e cobertura do amianto/fibrocimento apresentam uma porção mais significativa nos entornos destes dois pontos.

Estes resultados diferem levemente dos resultados da classificação da permeabilidade realizada utilizando como base as imagens do Google Maps e apresentada anteriormente. As imagens obtidas através do drone apresentam uma resolução significativamente mais alta, o que permite identificar diferentes tipos dos

revestimentos, por exemplo, pátios vegetados dentro de residências ou contornos de árvores. A classificação supervisionada considerou árvores como área permeável e, além disso, existe uma diferença temporal de dois anos entre as duas imagens de base. No entanto, a classificação da permeabilidade com as imagens do Google Maps possibilita uma boa aproximação das condições urbanísticas em locais de medições.

5.1.2 Apresentação das variáveis climáticas

A Figura 24 apresenta os valores da temperatura do ar para todo o período de medição de verão em todos os pontos e na estação meteorológica da Embrapa. Percebe-se que no geral as temperaturas nos pontos de medição mantiveram-se acima das temperaturas na estação da Embrapa. Destacam-se os Pontos 2 e 6, com temperaturas mais baixas e mais elevadas, respectivamente. Durante todo o período de monitoramento as temperaturas mantiveram-se entre aproximadamente 20 °C e 35 °C, com picos de temperatura registrados no Ponto 6.

Figura 24 – Variação da temperatura do ar durante o período de medição de verão

Fonte: Autora (2019)

Percebeu-se que as temperaturas máximas no Ponto 6 apresentaram valores significativamente altos em comparação com as temperaturas máximas em outros pontos. Estes picos de temperatura foram registrados sempre no final da tarde e considerando a orientação do local de instalação, acredita-se que o instrumento ficou exposto à incidência de radiação solar direta. Por isso, a medição foi repetida durante o inverno, quando os ângulos de incidência solar são diferentes e, neste caso, não foram registrados picos de temperatura semelhantes aos picos de verão.

Os valores das temperaturas médias, máximas e mínimas em cada ponto e na estação da Embrapa são apresentados na Tabela 11. Os valores médios da temperatura variaram entre 24,6 °C (Ponto 2) e 26,9 °C (Pontos 6 e 7), resultando em uma diferença média espacial na cidade de 2,3 °C entre pontos medidos. A temperatura máxima de 38,3 °C foi atingida no Ponto 6, enquanto no Ponto 3 foi registrada a temperatura mínima de 18,7 °C. Isso resulta em uma amplitude térmica de 19,6 °C, considerando todos os pontos e todo o tempo de medição.

Tabela 11 – Temperaturas médias, máximas e mínimas no período de medição de verão

Temp. / Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Embrapa
Média	26,3	24,6	25,1	26,7	25,8	26,9	26,9	25,7	25,3	26,5	24,1
Máxima	32,3	31,9	32,8	34,4	32,8	38,3	35,7	32,3	31,9	36,6	32,4
Mínima	20,2	19,0	18,7	21,7	20,2	20,2	20,2	20,6	19,8	19,8	17,8
Amplitude térmica	12,2	12,9	14,1	12,7	12,6	18,1	15,5	11,8	12,1	16,8	14,6

Fonte: Autora (2019)

A estação da Embrapa apresentou a menor temperatura média de 24,1 °C e a menor temperatura mínima de 17,8 °C. Além disso, a partir do gráfico apresentado na Figura 24, nota-se que as mínimas diárias são registradas sempre na estação da Embrapa. Este resultado é semelhante aos resultados apresentados em Souza (1996), um estudo sobre ilha de calor em São Carlos: as temperaturas mínimas são sempre maiores na área urbana do que aquelas na área rural. Ainda segundo Souza (1996), a morfologia urbana dificulta a perda de calor para o espaço através de emissão de ondas longas, enquanto as áreas rurais têm a capacidade maior de resfriamento. Isso

acontece principalmente nos horários noturnos, quando o processo de transferência de calor predominante é através de emissão de ondas longas.

Já a temperatura máxima durante todo o período de medição mediu 32,4 °C na Embrapa, valor mais alto do que em quatro pontos de medição e mais baixo do que em outros pontos. O gráfico apresentado na Figura 24 mostra também que as máximas diárias foram menores na estação da Embrapa. Isso difere um pouco dos resultados apresentados em Souza (1996): a autora afirma que as temperaturas máximas são geralmente maiores na área rural, devido ao maior acesso da radiação solar e menor concentração de poluentes do que na área urbana.

A Figura 25 mostra a amplitude térmica em cada ponto, sendo o Ponto 6 com maior amplitude de 18,1 °C. Este valor deve-se à provável incidência da radiação solar direta neste local de medição. A menor amplitude térmica de 11,8 °C foi medida no Ponto 8. A estação da Embrapa apresentou amplitude térmica de 14,6 °C, valor superado pelo Ponto 6, como já mencionado, e pelos Pontos 7 e 10, pontos com pouca área permeável, 15% e 20% respectivamente. Souza (1996) também afirma que as amplitudes térmicas (mensais e diárias) são geralmente maiores na área rural.

Figura 25 – Amplitude térmica no período de medição de verão

Fonte: Autora (2019)

A Figura 26 apresenta a umidade relativa do ar para todo o período de medição de verão em todos os pontos e na estação meteorológica da Embrapa. A umidade relativa variou entre aproximadamente 30% e quase 100%, sendo um pouco mais baixa durante os dias centrais da medição. A umidade relativa foi mais alta na estação da Embrapa durante quase todo o período de medição, superada somente pela umidade relativa registrada nos Pontos 2 e 9 durante algumas horas de um dia. Quanto aos locais de medição, notam-se os valores altos da umidade relativa nos Pontos 2 e 9.

Figura 26 – Variação da umidade relativa durante o período de medição de verão

Fonte: Autora (2019)

Os valores da umidade relativa média, máxima e mínima em cada ponto são apresentados na Tabela 12. Os valores médios da umidade relativa variaram entre 53,9% (Ponto 7) e 67,7% (Ponto 2), resultando em uma diferença média espacial na cidade de 13,8% para os locais de medição. Na estação da Embrapa foi registrada a maior umidade relativa média de 71,7% e também a maior umidade relativa máxima de 98,8%. Outros locais com a umidade relativa máxima alta foram os Pontos 3 e 2, pontos com bastante área vegetada. Os valores mínimos da umidade relativa foram medidos nos Pontos 6, 7 e 10, pontos com menos de 20% da área permeável, exceto o Ponto 6. Entre os valores mínimos da umidade relativa, os maiores foram registrados nos Pontos 2 e 3 e não na estação meteorológica. Isso significa que estes pontos têm a capacidade de manter a umidade relativa alta, provavelmente devido à arborização nestes locais.

Tabela 12 – Umidade relativa média, máxima e mínima no período de medição de verão

UR / Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Embrapa
Média	55,8	67,7	62,5	56,0	57,6	56,7	53,9	59,4	61,8	54,9	71,7
Máxima	80,6	87,1	92,1	75,2	82,0	83,5	82,0	79,3	85,2	79,3	98,8
Mínima	29,7	39,5	39,5	29,7	32,4	26,7	27,3	34,6	32,6	27,0	34,0
Amplitude da UR	50,9	47,6	60,6	45,5	49,6	56,8	54,7	44,7	52,6	52,3	64,8

Fonte: Autora (2019)

A estação da Embrapa e os Pontos 3 e 6 foram os locais com maior amplitude da umidade relativa e os Pontos 4 e 8 com menor (Figura 27). A umidade relativa atingiu o valor máximo de 98,8% na estação da Embrapa, enquanto a mínima foi no Ponto 6 e mediu 26,7%. Registrou-se assim uma amplitude da umidade relativa de 72,1%, considerando todos os pontos e todo o tempo de medição. Nesta medição a umidade relativa foi quase sempre maior em área rural, enquanto Souza (1996) ressalta que o comportamento da umidade relativa é extremamente variado, ora maior em área rural, ora maior em área urbana.

Figura 27 – Umidade relativa no período de medição de verão

Fonte: Autora (2019)

Embora seja uma unidade menos familiar na literatura da área, optou-se por fazer também a análise utilizando a umidade absoluta, tendo em vista que os valores foram disponibilizados pelo software de leitura dos instrumentos HOBO.

Como pode ser visto na Figura 28, a umidade absoluta na estação da Embrapa manteve-se mais alta do que em outros locais durante todo o período de medição, exceto durante alguns dias em momentos de pico da umidade absoluta, em quais a umidade absoluta no Ponto 2 esteve superior. No geral, os mesmos pontos com a umidade relativa mais alta apresentaram os valores da umidade absoluta mais altos também.

Figura 28 – Variação da umidade absoluta durante o período de medição de verão

Fonte: Autora (2019)

Na Tabela 13 são apresentados valores médios, máximos e mínimos da umidade absoluta do ar em todos os pontos e na estação da Embrapa (expressos em g de vapor / m³ de ar seco). Destacam-se entre os pontos de medição, novamente, o Ponto 2 com valores médios mais altos e os Pontos 7 e 10 com valores mais baixos.

No entanto, a maior umidade absoluta média, máxima e mínima foi registrada na Embrapa. O valor mínimo entre todos, de 9,2 g/m³ foi registrado nos Pontos 1 e 3.

Tabela 13 – Umidade absoluta (g/m³) média, máxima e mínima no período de medição de verão

UA / Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Embrapa
Média	13,2	14,8	13,8	13,5	13,3	13,7	13,0	13,7	13,9	12,9	15,3
Máxima	18,0	18,7	18,3	17,6	17,8	17,4	17,4	18,3	18,4	17,0	19,2
Mínima	9,2	10,8	9,2	9,7	9,6	9,9	9,4	10,2	9,5	9,5	11,7
Amplitude da UA	8,8	7,9	9,1	7,9	8,2	7,5	8,0	8,1	8,9	7,5	7,5

Fonte: Autora (2019)

A Figura 29 mostra a amplitude da umidade absoluta em todos os pontos e na Embrapa. A Embrapa e os Pontos 6 e 10 apresentaram a menor amplitude da umidade absoluta de 7,5 g/m³, enquanto a maior foi registrada no Ponto 3. Isso difere um pouco das amplitudes da umidade relativa, já que a maior foi registrada precisamente na estação da Embrapa, e a menor nos Pontos 4 e 8.

Figura 29 – Umidade absoluta no período de medição de verão

Fonte: Autora (2019)

5.1.3 Intensidade de ilha de calor urbana

A partir do gráfico apresentado na Figura 24, percebe-se que os dias 19. 02., 20. 02. e 21. 02. apresentaram uma variação homogênea da temperatura, sem chuva e entrada de frentes frias ou quentes. Portanto, o dia 21. 02. foi escolhido como dia de referência para este período de medição. Na Figura 30 pode ser vista a variação da temperatura no dia 21. 02. Nota-se que a temperatura na estação meteorológica da Embrapa foi mais baixa durante a maioria do tempo. No período entre as 12h e as 18h a temperatura na estação da Embrapa foi mais alta do que a temperatura no Ponto 2 e parcialmente do que a temperatura no Ponto 8. Estes dois pontos têm entornos com bastante vegetação e a maior área permeável durante a medição de verão de 91% e 61% respectivamente. A temperatura máxima de 35,7 °C neste dia foi registrada nos Pontos 6 e 10, às 17h e 16h respectivamente. Como mencionado no item anterior, este resultado difere da afirmação de que as temperaturas máximas diárias são sempre registradas na área rural (SOUZA, 1996). Na estação da Embrapa, às 6h foi registrada a menor temperatura mínima de 21,3 °C. Percebe-se também que as diferenças entre a temperatura na Embrapa e nos outros pontos não são significativas no período matutino (entre as 8h e 12h), mas aumentam a partir do meio-dia.

Figura 30 – Variação da temperatura no dia 21. 02. 2017

Fonte: Autora (2019)

Para todos dos 48 registros da temperatura no dia 21. 02. foi calculada a diferença da temperatura entre a estação da Embrapa e todos os pontos de medição. As diferenças máximas e os horários de ocorrência são apresentados na Tabela 14. As diferenças máximas em relação à estação da Embrapa foram significativas com valores de 2,0 °C (Ponto 2) a 6,0 °C (Pontos 1 e 7). Nos 7 pontos estas diferenças foram registradas no período noturno, das 20h30 às 23h. Em dois pontos, Pontos 6 e 3, as diferenças máximas ocorreram no final da tarde, às 17h e 19h respectivamente. Somente no Ponto 2 a diferença máxima foi registrada de manhã, às 10h. Estes resultados indicam a formação de ilhas de calor urbanas de até 6,0 °C em alguns locais da cidade e confirmam que a ilha de calor urbana é um fenômeno noturno, como afirmado em vários estudos anteriores (OKE, 1987; SOUZA, 1996; BERTACCHI E FARIA, 2003; SAYDELLES; 2005). Isso difere dos resultados apresentados em Fontes (1998), num estudo do clima urbano em São Carlos, os quais mostram que no verão a ilha de calor foi mais forte durante a tarde.

Tabela 14 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 21. 02. 2017

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temp. (°C)	6,0	2,0	2,6	4,8	4,1	5,0	6,0	3,3	3,7	5,6
Horário	20h30	10h	19h	20h30	21h	17h	20h30	23h	20h30	20h30

Fonte: Autora (2019)

Os pontos com menor diferença da temperatura em relação à Embrapa foram o Ponto 2 (com diferença de 2,0 °C) e o Ponto 3 (com diferença de 2,6 °C), como pode ser visto na Figura 31. Como já mencionado anteriormente, o Ponto 2 está situado na Área 2 do Campus da USP e com 91% da área permeável e bastante vegetação (rastreira e arborização) apresenta semelhanças com a área rural. Neste local as temperaturas não atingem valores muito altos (em comparação com a estação da Embrapa e outros pontos de medição) e a umidade, tanto relativa, quanto absoluta, fica alta. O Ponto 3 está situado no Campus da UFSCar e tem 47% da área permeável. Além disso, o local dentro do Campus onde foi instalado o instrumento tem bastante arborização. Tendo em vista as características destes dois locais, conclui-se que eles, além de não apresentar picos altos da temperatura no período diurno, perdem o calor rapidamente, provavelmente devido à alta concentração da vegetação no entorno.

Os locais com maior diferença da temperatura em relação à estação da Embrapa foram Pontos 1 e 7 (com diferença de 6,0 °C), seguidos pelo Ponto 10 com diferença de 5,6 °C (Figura 31). As diferenças máximas nestes três pontos foram registradas no mesmo horário: às 20h30. O Ponto 1 está localizado na Área 1 do Campus da USP e apresenta uma realidade semelhante ao Ponto 3 (UFSCar), com um pouco menos da superfície permeável (42%), menos arborização e próximo a um córrego. As temperaturas nos Pontos 1 e 3 e na Embrapa não diferem muito no período das 12h às 17h. No entanto, a diferença da temperatura no período noturno no dia 21.02. entre o Ponto 1 e a estação da Embrapa foi significativa atingindo o valor de 6,0 °C. Conclui-se que neste local, após o pôr do sol não acontece uma perda rápida do

calor recebido durante o dia. Isso pode ser consequência das propriedades termofísicas dos materiais utilizados para revestimentos horizontais e também verticais neste local. Os Pontos 7 e 10 apresentam menor área permeável, 15% e 20% respectivamente, valores mais baixos junto com o Ponto 4. O Ponto 7 está situado num bairro residencial com edificações térreas e pouca vegetação, exceto uma praça localizada na frente da casa onde foi instalado o instrumento. No entanto, o instrumento foi instalado no quintal, atrás da casa e este fato provavelmente reduziu a possível influência da praça na perda de calor no local da instalação. O Ponto 10 está localizado numa área comercial, com predominância de coberturas metálicas e mínima presença da vegetação. As superfícies permeáveis são na sua maioria solo exposto, o qual tem comportamento térmico diferente das superfícies permeáveis com vegetação. Portanto, as temperaturas diurnas atingem valores altos neste local e não acontece um resfriamento rápido no período noturno.

Figura 31 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 21. 02. 2017

Fonte: Autora (2019)

5.1.4 Cruzamento dos dados climáticos e urbanísticos

A partir das Equações 5 e 6, calculou-se o coeficiente da correlação entre a temperatura média e a permeabilidade ($R = -0,66$). Ajustou-se, por meio da regressão linear, aos resultados obtidos uma reta $y = mx + c$. Os coeficientes da reta são definidos por expressões $m = -2,2293$ e $c = 26,864$ (Figura 32). Nota-se a tendência à redução da temperatura média em pontos com mais altos índices da permeabilidade. A exceção é o Ponto 6, com 51% da área permeável, porém com temperatura média de 26,9 °C, valor ultrapassado somente pela temperatura média medida no Ponto 7. Este resultado deve-se provavelmente ao fato do instrumento ter recebido a radiação solar direta, como explicado anteriormente. Além do Ponto 7, os Pontos 4 e 10 apresentam altas temperaturas e baixas porcentagens da permeabilidade. Destaca-se também o Ponto 2, localizado na Área 2 do Campus da USP, com extremamente alta permeabilidade e baixa temperatura média.

Figura 32 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade para a medição de verão

Fonte: Autora (2019)

Analisando os dados apresentados na Figura 32, percebe-se que o Ponto 6 é o que mais se afasta da reta ajustada pela regressão linear entre permeabilidade e temperatura média. Também foi analisada a variação da temperatura em todos os pontos ao longo do dia e notou-se que a variação da temperatura no Ponto 6 apresentou um comportamento semelhante ao dos outros pontos: os picos de temperatura aconteceram no período da tarde, aproximadamente entre 13h e 18h. No entanto, o valor máximo da temperatura foi registrado quase todos os dias no Ponto 6 e as diferenças entre este ponto e outros pontos “mais quentes” chegaram a 4 °C. A diferença com os pontos restantes nos momentos de pico foi ainda maior e mediu até 10 °C. Este resultado deve-se provavelmente ao fato de o instrumento ter recebido a radiação solar direta por um tempo curto durante a tarde. A caixa protetora atenuou parcialmente a influência da radiação solar, mas ainda assim houve interferência na temperatura medida.

Em função do acima exposto, foi feita uma análise sem considerar o Ponto 6. Obteve-se uma correlação melhor entre a temperatura do ar e a permeabilidade, com o coeficiente de correlação de -0,81, como mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no verão sem o Ponto 6

Fonte: Autora (2019)

A

Figura 34 mostra uma correlação positiva entre a umidade relativa e a permeabilidade dos materiais. O coeficiente de correlação entre estas unidades foi igual a 0,78. Novamente, distingue-se o Ponto 2 com a maior umidade e a maior permeabilidade do seu entorno. Enquanto os Pontos 4, 7 e 10 apresentaram temperaturas mais elevadas, a umidade relativa média nestes locais não ultrapassa 56%, o que representa uma diferença de 11,7% com o Ponto 2.

Embora o valor da umidade relativa mínima fosse registrado no Ponto 6, o comportamento da umidade relativa no Ponto 6 não diverge dos outros pontos. A retirada do Ponto 6 não muda significativamente o coeficiente de correlação entre a umidade relativa e a permeabilidade (igual a 0,8 sem considerar o Ponto 6), assim não foi feita uma representação gráfica para este caso.

Figura 34 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade para a medição de verão

Fonte: Autora (2019)

A Figura 35 mostra a relação entre a umidade absoluta média e permeabilidade no verão. O coeficiente de correlação foi positivo e resultou quase igual ao coeficiente de correlação para a umidade relativa com o valor de 0,81. Sem considerar o Ponto, este valor não muda, assim que não foi feita a representação gráfica para este caso.

Figura 35 – Relação entre umidade absoluta média e permeabilidade para a medição de verão

Fonte: Autora (2019)

5.2 Período de outono

O segundo grupo de medição correspondente à estação de outono e foi realizado no período de 26. 05. a 09. 06. 2017 em 10 pontos. A medição foi repetida no Ponto 4, ponto de referência.

5.2.1 Apresentação das variáveis urbanísticas

As Figuras 36 a 44 mostram as imagens de satélite e a porcentagem das superfícies horizontais permeáveis e impermeáveis nos entornos de todos os pontos, feita a partir da metodologia apresentada no item 4.1.2. Ressalta-se que a medição foi repetida no Ponto 4. A análise do entorno do Ponto 4 foi apresentada no item 5.1.1.

Figura 36 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 11

Fonte: Autora (2019)

Figura 37 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 12

Fonte: Autora (2019)

Figura 38 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 13

Fonte: Autora (2019)

Figura 39 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 14

Fonte: Autora (2019)

Figura 40 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 15

Fonte: Autora (2019)

Figura 41 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 16

Fonte: Autora (2019)

Figura 42 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 17

Fonte: Autora (2019)

Figura 43 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 18

Fonte: Autora (2019)

Figura 44 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 19

Fonte: Autora (2019)

Na Tabela 15 são apresentadas as porcentagens da permeabilidade dos revestimentos horizontais em todos os pontos de coleta. Em comparação com os locais da primeira medição, nota-se a menor porcentagem da área permeável em todos os pontos, sendo o entorno do Ponto 11 com a maior porcentagem da superfície permeável de 50% (ressaltado em verde). Destacam-se também os Pontos 15 e 17 com somente 9% da área permeável e o Ponto 19 com 6% da área permeável (ressaltado em cinza).

Tabela 15 – Permeabilidade dos revestimentos em cada ponto de coleta no outono

Permeabilidade / Ponto	4	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Área permeável	12%	50%	33%	14%	39%	9%	22%	9%	40%	6%
Área impermeável	88%	50%	67%	86%	61%	91%	78%	91%	60%	94%

Fonte: Autora (2019)

5.2.2 Apresentação das variáveis climáticas

A Figura 45 ilustra o comportamento da temperatura do ar durante todo o período de coleta em todos os pontos e na estação da Embrapa. A temperatura mediu aproximadamente entre 15 °C e 30 °C, ou seja, 5 °C a menos em comparação com a medição de verão. Foi registrada uma queda de temperatura durante quatro dias no meio de medição. Embora a temperatura na Embrapa estivesse menor do que nos pontos de medição no geral, durante várias noites os mínimos da temperatura foram registrados nos Pontos 11 e 18.

Figura 45 – Variação da temperatura do ar durante o período de medição de outono

Fonte: Autora (2019)

As temperaturas médias, máximas e mínimas são apresentadas na Tabela 16. O valor mais alto da temperatura média foi registrado no Ponto 12 com 22,1 °C, enquanto que o valor mínimo da temperatura média foi registrado no Ponto 18 com 19,8 °C, seguido pela Embrapa com 19,9 °C. Isso resulta em uma diferença média espacial na cidade de 2,3 °C, igual à registrada no período de verão. A temperatura máxima de 31,1 °C foi registrada no Ponto 12, e a temperatura mínima de 9,8 °C foi registrada

nos Pontos 11 e 18, resultando em uma amplitude térmica de 21,3 °C considerando todo o tempo de medição em todos os pontos.

Tabela 16 – Temperaturas médias, máximas e mínimas no período de medição de outono

Temp. / Ponto	4	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Embrapa
Média	21,2	20,0	22,1	21,0	20,6	20,8	21,7	21,1	19,8	21,4	19,9
Máxima	29,1	29,5	31,1	25,2	27,5	27,5	30,3	27,9	27,9	27,5	27,9
Mínima	12,6	9,8	13,3	14,9	11,4	11,4	13,3	12,6	9,8	11,8	10,2
Amplitude térmica	16,6	19,7	17,8	10,3	16,1	16,1	17,0	15,4	18,1	15,8	17,7

Fonte: Autora (2019)

A amplitude térmica para todos os pontos e Embrapa é apresentada na Figura 46. Destacam-se o Ponto 13 com a menor amplitude térmica de 10,3 °C e o Ponto 12 com a maior amplitude de 19,7 °C.

Figura 46 – Amplitude térmica no período de medição de outono

Fonte: Autora (2019)

A Figura 47 ilustra a umidade relativa do ar em todos os pontos durante todo o tempo de medição. A umidade relativa manteve-se acima de 35% com os picos

medidos na estação da Embrapa com valores entre 90 e 100%. No geral, a umidade relativa foi mais alta na Embrapa, similarmente aos dados medidos na primeira medição. Entre os pontos de medição, destacam-se os Pontos 11 e 18, nos quais a umidade relativa superou em alguns momentos a da Embrapa. Estes locais têm 50% e 40% da superfície permeável no entorno e estão situados próximo aos córregos com margens arborizadas.

Figura 47 – Variação da umidade relativa durante o período de medição de outono

Fonte: Autora (2019)

Os valores da umidade média, máxima e mínima para cada ponto são mostrados na Tabela 17. Registrou-se a variação da umidade relativa média entre 57,5% (Ponto 16) e 74,9% (Embrapa), resultando em uma diferença da umidade relativa espacial de 18,9%. Entre os pontos de medição com as médias da umidade relativa mais altas destacam-se os Pontos 11 e 18. O valor mais alto da umidade relativa de 99,1% foi encontrado na Embrapa e o mais baixo de 31,2% no Ponto 16. Tem-se, assim, uma amplitude da umidade relativa de 60,9% considerando todos os pontos e todo o tempo de monitoramento.

Tabela 17 – Umidade relativa média, máxima e mínima no período de medição outono

UR / Ponto	4	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Embrapa
Média	59,3	69,0	58,0	59,6	62,9	62,1	57,5	60,0	66,3	60,1	74,9
Máxima	83,5	87,1	80,6	76,1	89,4	92,1	85,2	82,0	89,4	85,2	99,1
Mínima	32,4	34,6	32,8	40,4	37,8	37,5	31,2	33,0	34,4	37,9	38,1
Amplitude da UR	51,1	52,5	47,8	35,7	51,6	54,6	54,0	49,0	55,0	47,3	61,0

Fonte: Autora (2019)

Na Figura 48 podem ser vistas as amplitudes da umidade relativa em todos os pontos. O Ponto 13, o ponto com menor amplitude térmica, apresenta também a menor amplitude da umidade relativa de 35,7%. O Ponto 13 está localizado numa área residencial com pouca vegetação e com 14% da área permeável. Tanto como durante a primeira medição, quanto nesta medição, a maior amplitude de 61% foi registrada na estação da Embrapa, seguida pelo Ponto 18 com 55%.

Figura 48 – Umidade relativa no período de medição de outono

Fonte: Autora (2019)

A Figura 49 apresenta o movimento da umidade absoluta durante a medição de outono. Percebe-se uma queda significativa da umidade absoluta nos dias centrais

do monitoramento, diferentemente da umidade relativa, a qual foi mantida bastante homogênea durante toda a medição. Nota-se também que a estação meteorológica da Embrapa teve a umidade absoluta acima dos outros pontos durante todo o tempo de coleta.

Figura 49 – Variação da umidade absoluta durante o período de medição de outono

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 18 mostra os valores da umidade absoluta média, máxima e mínima em todos os pontos (expressos em g de vapor / m³ de ar seco). A média mais alta foi registrada na Embrapa, com 12,7 g/m³, valor bastante mais alto do que em outros pontos. O Ponto 11 apresentou a média de 11,7 g/m³, enquanto os pontos restantes apresentaram valores uniformes, entre 10,8 e 11,1 g/m³. Os valores máximos mais altos foram registrados novamente na Embrapa e no Ponto 11, enquanto o menor valor de 6,0 g/m³ foi medido no Ponto 17.

Tabela 18 – Umidade absoluta (g/m^3) média, máxima e mínima no período de medição de outono

UA / Ponto	4	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Embrapa
Média	10,8	11,7	11,1	10,9	11,1	11,1	10,8	11,0	11,1	11,1	12,7
Máxima	13,7	14,8	14,1	13,7	13,9	14,0	13,8	14,0	14,0	14,5	16,0
Mínima	6,4	7,1	7,2	6,8	6,5	6,3	6,3	6,0	6,4	6,7	7,0
Amplitude da UA	7,3	7,7	6,9	6,9	7,4	7,7	7,6	8,0	7,6	7,8	9,0

Fonte: Autora (2019)

A amplitude da umidade absoluta está apresentada na Figura 50. A maior amplitude foi registrada na estação da Embrapa e a menor nos Pontos 12 e 13. Este resultado difere do resultado encontrado na medição de verão quando a estação da Embrapa apresentou a menor amplitude da umidade absoluta.

Figura 50 – Umidade absoluta no período de medição de outono

Fonte: Autora (2019)

5.2.3 Intensidade de ilha de calor urbana

Analisando o gráfico apresentado na Figura 45 percebe-se que a variação da temperatura foi homogênea durante os primeiros seis dias da medição e depois

ocorreu uma queda significativa por causa da entrada da chuva. Dia 30. 05. foi escolhido como dia de referência para este período de medição e a variação da temperatura durante este dia pode ser vista na Figura 51. Nota-se que a temperatura na estação meteorológica da Embrapa esteve mais alta do que a temperatura nos Pontos 11 e 18 até 8h30 e mais alta em comparação com vários pontos até 17h. Os Pontos 11 e 18 foram os pontos com maior porcentagem da área permeável nesta medição (50% e 40% respectivamente) e ambos estão localizados na periferia da cidade, próximos à área vegetada e um córrego com margens arborizadas. Destacaram-se também por apresentar a umidade (relativa e absoluta) alta em comparação com outros pontos. Depois das 17h a temperatura da Embrapa foi mais baixa do que temperatura em todos os pontos. A variação da temperatura no Ponto 12 mostra um pico de grande intensidade no período matutino, o que confirma a suspeita de instrumento ter recebido a radiação solar direta neste período. Sem considerar esta ocorrência, a temperatura máxima de 27,5 °C neste dia foi registrada no Ponto 16.

Figura 51 – Variação da temperatura no dia 30. 05. 2017

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 19 mostra as diferenças máximas da temperatura entre a Embrapa e os pontos de medição e os horários da diferença máxima no dia 30. 05. As diferenças máximas foram registradas às 17h30 em sete pontos, num ponto às 19h30 e num ponto às 20h30. O único ponto com a diferença máxima no período da manhã, às 9h30 foi o Ponto 12, devido à exposição à radiação solar direta. Desconsiderando o Ponto 12, a intensidade de ilha de calor urbana varia entre 2,7 °C no Ponto 18 e 4,6 °C no Ponto 16. O Ponto 16 apresenta 22% da área permeável e o local de instalação do instrumento fica longe da vegetação e perto de locais de comércio com coberturas metálicas. No período das 18h30 e 20h30 a diferença da temperatura no Ponto 12 variou entre 3,8 °C e 4,6 °C, um valor semelhante aos valores em outros pontos. Em comparação com a medição de verão quando as diferenças maiores foram registradas depois das 20h30, no período de outono a ilha de calor está mais forte mais cedo, às 18h30. Isso está provavelmente relacionado com o pôr do sol, o qual acontece mais cedo na estação de outono. Além disso, as diferenças foram menores no outono.

Tabela 19 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 30. 05. 2019

Ponto	4	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Temp. (°C)	3,1	3,5	7,7	3,5	3,1	3,9	4,6	3,9	2,7	3,5
Horário	18h30	18h30	9h30	20h30	18h30	18h30	18h30	19h30	18h30	18h30

Fonte: Autora (2019)

Na Figura 52 estão representadas as diferenças máximas das temperaturas medidas na Embrapa e nos pontos restantes. Não foi considerada a diferença máxima no Ponto 12, senão a diferença registrada às 18h30. Além dos Pontos 12 e 16, as diferenças máximas ocorrem nos Pontos 15 e 17, dois pontos com somente 9% da área permeável no entorno e quase sem vegetação.

Figura 52 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 30. 05. 2017

Fonte: Autora (2019)

5.2.4 Cruzamento dos dados climáticos e urbanísticos

Calculou-se a partir das Equações 5 e 6, o coeficiente de correlação entre as variáveis climáticas (temperatura, umidade relativa e absoluta) e a permeabilidade dos revestimentos. O fator de correlação entre a temperatura média e a permeabilidade de -0,48 não é alto, mas nota-se uma ligeira tendência ao aumento da temperatura em pontos com menor porcentagem da superfície permeável, como mostra a reta com coeficientes $m = -2,1555$ e $c = 21,484$ (Figura 53). Destacam-se os Pontos 18 e 11 com menores temperaturas médias de 19,8 °C e 20 °C respectivamente e mais altas porcentagens de permeabilidade (40% e 50% respectivamente).

Como na primeira medição no caso do Ponto 6, percebe-se que o Ponto 12 afasta-se significativamente da reta ajustada aos resultados. Similarmente, foi analisado o movimento da temperatura em cada momento de registro no Ponto 12 e comparado com outros pontos. Notou-se que no período matutino, entre 8h30 e 9h30, aconteceram picos de temperatura no Ponto 12, com diferenças de até 10 °C com outros pontos. Mesmo com as medidas de precaução durante a instalação, este

instrumento foi provavelmente instalado em um local com incidência de radiação solar direta neste curto período. Portanto, decidiu-se fazer uma análise de correlação desconsiderando o Ponto 12 e obteve-se o coeficiente de correlação de -0,77 (Figura 54).

Figura 53 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no outono

Fonte: Autora (2019)

Figura 54 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no outono sem o Ponto 12

Fonte: Autora (2019)

Já para os dados da umidade, obteve-se uma correlação melhor. O fator de correlação de 0,67 e a covariância de 0,4 confirmam o crescimento da umidade relativa com o aumento da área permeável (Figura 55). Os índices não mudam significativamente quando se elimina o Ponto 12, resultando em um coeficiente de correlação de 0,81. Desse modo, a relação entre a umidade relativa e a permeabilidade sem o Ponto 12 não está representada graficamente.

Figura 55 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no outono

Fonte: Autora (2019)

Para os dados da umidade absoluta foi calculada uma relação positiva, como esperado. Novamente, o coeficiente de correlação foi muito próximo ao valor calculado para a umidade relativa e mediu 0,66. Esse valor não muda quando se tira o Ponto 12 do cálculo e para essa correlação não foi feita uma representação gráfica.

Figura 56 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no outono

Fonte: Autora (2019)

5.3 Período de inverno

O terceiro grupo de medição correspondente à estação de inverno foi realizado no período de 01. 09. a 15. 09. 2017 em 10 pontos. Ressalta-se que a medição foi repetida no ponto de referência, Ponto 4, bem como no Ponto 6. Como já explicado no item 5.1.4, existe a possibilidade de o instrumento ter sido exposto à radiação solar direta durante a medição de verão. Decidiu-se repetir a medição no mesmo ponto na estação de inverno, com uma pequena modificação do lugar da instalação. Este ponto foi denominado Ponto 24 durante a medição de inverno.

5.3.1 Apresentação das variáveis urbanísticas

A partir da metodologia apresentada no item 4.1.2 foi realizada a classificação da permeabilidade dos revestimentos horizontais nos entornos dos pontos de medição. As Figuras 57 a 65 mostram as imagens de satélite e as porcentagens de áreas permeáveis e impermeáveis. A análise do entorno do Ponto 4 foi apresentada no item 5.1.1.

Figura 57 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 20

Fonte: Autora (2019)

Figura 58 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 21

Fonte: Autora (2019)

Figura 59 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 22

Fonte: Autora (2019)

Figura 60 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 23

Fonte: Autora (2019)

Figura 61 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 24 (Ponto 6)

Fonte: Autora (2019)

Figura 62 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 25

Fonte: Autora (2019)

Figura 63 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 26

Fonte: Autora (2019)

Figura 64 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 27

Fonte: Autora (2019)

Figura 65 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 28

Fonte: Autora (2019)

Na Tabela 20 estão apresentados os resultados da classificação da permeabilidade dos revestimentos urbanos horizontais no entorno dos 10 pontos de coleta. Além do Ponto 4, com 12% de superfície permeável, destaca-se o Ponto 25, com somente 7% de superfície permeável (ressaltado em cinza). A maior porcentagem dos materiais horizontais permeáveis apresentaram os Pontos 23 e 24, com 53% e 51% de área permeável respectivamente (ressaltado em verde).

Tabela 20 – Permeabilidade dos revestimentos em cada ponto de coleta no período de inverno

Permeabilidade / Ponto	4	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Área permeável	12%	19%	21%	46%	53%	51%	7%	21%	15%	27%
Área impermeável	88%	81%	79%	54%	47%	49%	93%	79%	85%	73%

Fonte: Autora (2019)

5.3.2 Apresentação das variáveis climáticas

Na Figura 66 está apresentada a variação da temperatura do ar durante a terceira medição. Percebe-se um crescimento gradual da temperatura em todos os pontos e na estação da Embrapa, com temperaturas noturnas em torno de 15 °C e diurnas em torno de 30 °C no início da medição, enquanto durante os últimos dias da medição as temperaturas noturnas mediam aproximadamente 20 °C e diurnas aproximadamente 35 °C. No geral, as temperaturas noturnas foram mais baixas na Embrapa, exceto durante três noites, quando no Ponto 28 foram atingidos mínimos da temperatura. No período diurno, especialmente de manhã, as temperaturas na Embrapa e outros pontos foram mais próximas.

Figura 66 – Variação da temperatura do ar durante o período de medição de inverno

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 21 apresenta as temperaturas médias, máximas e mínimas no período de inverno e também a amplitude térmica. O ponto com a maior temperatura média de 25,1 °C foi o Ponto 23, enquanto o Ponto 26 apresentou a menor temperatura média de 23,2 °C, sem considerar a Embrapa com a temperatura média de 22,7 °C. Isso resulta em uma amplitude térmica média de 1,9 °C, a 0,4 °C menor do que durante primeiras duas medições. Os picos de temperatura de 34 °C foram registrados nos Pontos 24 e 27, enquanto o valor mais baixo da temperatura durante a medição de 13,3 °C foi registrado no Ponto 26.

Tabela 21 – Temperaturas médias, máximas e mínimas no período de medição de inverno

Temp. / Ponto	4	20	21	22	23	24	25	26	27	28	Embrapa
Média	24,1	24,3	23,9	23,9	25,1	23,9	24,3	23,2	24,2	24,2	22,7
Máxima	33,2	32,8	33,2	32,8	31,9	34,0	31,1	30,7	34,0	33,2	32,0
Mínima	15,2	16,0	14,1	14,5	17,1	14,1	16,4	13,3	14,5	14,5	14,7
Amplitude térmica	17,9	16,8	19,1	18,3	14,8	19,9	14,7	17,4	19,5	18,7	17,4

Fonte: Autora (2019)

A Figura 67 ilustra as amplitudes térmicas durante a medição de inverno. O Ponto 24 apresentou a maior amplitude térmica de 19,9 °C e o Ponto 25 a menor de 14,7 °C, seguido pelo Ponto 23 com uma amplitude de 14,8 °C.

Figura 67 – Amplitude térmica no período de medição de inverno

Fonte: Autora (2019)

A Figura 68 traz a variação da umidade relativa durante o monitoramento de inverno. Nota-se que durante os primeiros três dias da medição a umidade teve valores mais altos. Depois foi registrada uma redução significativa e a umidade relativa variou entre aproximadamente 15% (o valor mínimo medido na estação da Embrapa) e

45%-50%. Assim sendo, o período de medição de outono foi o período mais seco. A estação da Embrapa e o Ponto 28 foram os locais com valores mais altos. As mínimas diárias foram medidas também na Embrapa, sempre no período de tarde, quando a temperatura do ar foi entre 30 °C e 35 °C.

Percebeu-se também que o valor mínimo da umidade relativa em todos os pontos durante últimos onze dias da medição foi 23,5%, mesmo quando a umidade relativa na Embrapa atingiu valores menores (até 17%). Nesses dias foi mantido o valor da umidade relativa entre 23,5% e 25% no período das 12h30 e 19h30. Isso indica uma possível limitação do instrumento, embora este tipo de sensor registre a umidade relativa entre 0% e 95%, de acordo com a informação fornecida pelo fabricante (ONSET, 2017). No entanto, esta ocorrência não teve um impacto grande nos dados medidos, já que a umidade relativa foi significativamente mais alta nos outros períodos de medição.

Figura 68 – Variação da umidade relativa durante o período de medição de inverno

Fonte: Autora (2019)

Na Tabela 22, estão apresentados os valores da umidade relativa média, máxima e mínima, bem como a amplitude da umidade relativa no período de inverno. Os valores médios da umidade relativa foram baixos em comparação com as primeiras duas medições e não ultrapassam o valor de 40,3% medido na Embrapa, seguido por 36,9% medido no Ponto 28. O local de instalação do instrumento do Ponto 28 está perto de dois córregos e provavelmente a proximidade dos cursos de água resultou em uma umidade relativa maior em comparação com outros pontos. As máximas e mínimas foram registradas também na estação da Embrapa.

Tabela 22 – Umidade relativa média, máxima e mínima no período de medição de inverno

UR / Ponto	4	20	21	22	23	24	25	26	27	28	Embrapa
Média	33,7	33,3	34,0	34,7	31,9	33,5	31,7	33,0	33,0	36,9	40,3
Máxima	78,8	74,4	83,8	81,1	68,7	81,1	71,0	81,1	81,1	83,7	91,5
Mínima	23,4	23,5	23,5	23,5	23,5	23,4	23,5	23,5	23,5	23,5	17,3
Amplitude da UR	55,4	50,9	60,3	57,6	45,2	57,7	47,5	58,9	57,6	60,2	74,2

Fonte: Autora (2019)

O Ponto 25 apresentou a umidade relativa média de 31,7%. Isso resulta em uma diferença média espacial de somente 8,6%, o valor menor de todas as medições. No entanto, a umidade relativa atingiu valores máximos bastante altos em primeiros três dias da medição atingindo 90% na Embrapa. Portanto, foi registrada uma amplitude de 74,2% considerando todos os pontos e todo o tempo de medição, o valor bem mais alto do que o valor da medição de outono (60,9%).

Na Figura 69 são apresentadas as amplitudes da umidade relativa, sendo a menor registrada no Ponto 23 com o valor de 45,2%, e a maior na Embrapa (74,2%). Entre os pontos de medição destacam-se Ponto 21 com a amplitude de 60,3%, seguido pelo Ponto 28 com 60,2%. Embora este período de medição estivesse mais seco de todos, as amplitudes são muito altas em todos os pontos devido à umidade relativa alta no início do monitoramento.

Figura 69 – Umidade relativa no período de medição de inverno

Fonte: Autora (2019)

A Figura 70 ilustra a variação da umidade absoluta durante a medição de inverno. Nota-se que a estação da Embrapa apresenta um comportamento diferente dos pontos de medição. Essa discrepância é provavelmente consequência do erro durante a medição, pois, os sensores HOBO não registraram umidade relativa menor que 23,5% e a umidade absoluta é calculada pelo software a partir dos dados da umidade relativa. No geral, a umidade absoluta mostrou mais variação do que a umidade relativa neste período.

Figura 70 – Variação da umidade absoluta durante o período de medição de inverno

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 23 mostra os valores médios, máximos e mínimos, bem como a amplitude da umidade absoluta durante essa medição (expressos em g de vapor / m³ de ar seco). Os valores médios foram mais baixos em comparação com as primeiras duas medições, mantendo-se entre 6,8 g/m³ no Ponto 25 e 7,3 g/m³ no Ponto 28 entre os pontos de medição. A maior umidade absoluta média de 7,7 g/m³ foi registrada na Embrapa.

Tabela 23 – Umidade absoluta (g/m³) média, máxima e mínima no período de medição de inverno

UA / Ponto	4	20	21	22	23	24	25	26	27	28	Embrapa
Média	7,1	7,1	7,0	7,2	7,2	7,0	6,8	7,0	7,0	7,3	7,7
Máxima	10,9	10,6	10,6	10,7	10,6	10,6	10,4	11,0	10,6	11,2	11,7
Mínima	5,1	5,3	5,1	5,3	5,5	5,1	5,1	5,1	5,0	5,5	4,7
Amplitude da UA	5,8	5,3	5,5	5,4	5,1	5,5	5,3	5,9	5,6	5,7	7,1

Fonte: Autora (2019)

As amplitudes da umidade absoluta podem ser vistas na Figura 71. Destaca-se a estação da Embrapa com a maior amplitude de $7,1 \text{ g/m}^3$. Os pontos de medição apresentaram amplitudes mais próximas, variando entre $5,1 \text{ g/m}^3$ no Ponto 23 e $5,9 \text{ g/m}^3$ no Ponto 26.

Figura 71 – Umidade absoluta no período de medição de inverno

Fonte: Autora (2019)

5.3.3 Intensidade de ilha de calor urbana

Analizou-se o gráfico apresentado na Figura 66 para determinar o dia de referência para a terceira medição. Percebe-se um crescimento pequeno, mas contínuo da temperatura durante toda a medição. Esse crescimento foi menor durante os primeiros três dias, assim que foi escolhido o dia 04. 09. como o dia de referência. A Figura 72 apresenta a variação da temperatura neste dia em todos os pontos e na estação da Embrapa. Nota-se que a temperatura na Embrapa foi a menor entre a meia-noite e 8h de manhã. Das 8h às 19h, a temperatura em alguns pontos foi mais baixa do que a temperatura Embrapa e no geral as temperaturas foram mais próximas do que durante a noite. Percebe-se também um pico de temperatura no

Ponto 24 de 31,1 °C às 17h. O Ponto 24 (Ponto 6) apresenta 51% da superfície permeável no entorno e fica na periferia da cidade. No entanto, o local de instalação do instrumento está orientado a um estacionamento revestido de concreto e o instrumento provavelmente recebeu calor refletido pelo estacionamento e carros no período da tarde, o que aumentou um pouco os valores da temperatura neste período.

Figura 72 – Variação da temperatura no dia 04. 09. 2017

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 24 mostra as diferenças máximas da temperatura entre a estação da Embrapa e os pontos de medição no dia 04. 09. 2017, bem como os horários das diferenças máximas. Diferentemente das duas primeiras medições com as diferenças máximas durante primeiras horas após o pôr do sol na maioria dos pontos, nesta medição os horários das diferenças máximas foram variados: das 0h30 às 5h30 de manhã (5 pontos) e das 17h às 24h (5 pontos). Mesmo com a variedade dos horários, todas as diferenças máximas ocorreram no período noturno, o que indica a existência de ilha de calor noturna de até 6,1 °C (Ponto 23). Fontes (1998) também observou

que no inverno ilhas de calor aparecem durante a noite. A menor diferença de 2,5 °C foi registrada no Ponto 21, e a maior no Ponto 23. Justamente o Ponto 23 foi o local com maior área permeável (53%) durante esta medição. No entanto, o lugar de instalação do instrumento está rodeado pelas residências densamente construídas, enquanto a área permeável fica ao redor da área construída. Provavelmente os materiais (horizontais e verticais), que rodeiam o local onde o instrumento foi instalado, não perdem calor facilmente no período noturno e isso resulta em temperaturas mais altas.

Tabela 24 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 04. 09. 2017

Ponto	4	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Temp. (°C)	3,8	3,8	2,5	3,0	6,1	3,5	4,5	4,2	3,3	2,7
Horário	1h	5h30	18h	1h	5h30	17h	23h	24h	20h30	0h30

Fonte: Autora (2019)

As diferenças máximas das temperaturas em relação à Embrapa são representadas na Figura 73. Desconsiderando o Ponto 23, outros pontos apresentam ilhas de calor entre 2,1 °C (Ponto 21) e 4,2 °C (Ponto 25). O Ponto 25 está localizado numa área residencial com somente 7% da área permeável. No geral, as diferenças são um pouco menores do que no período de outono.

Figura 73 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 04. 09. 2017

Fonte: Autora (2019)

5.3.4 Cruzamento dos dados climáticos e urbanísticos

A partir das Equações 5 e 6, foi calculado o fator de correlação entre a permeabilidade dos revestimentos e a temperatura e umidade do ar para o período de inverno. Diferentemente das primeiras duas medições, não foram obtidos índices de correlação tão altos. Inesperadamente, o fator de correlação entre a permeabilidade e a temperatura média foi positivo e mediu 0,22. Trata-se de um valor baixo, porém a correlação positiva indica o aumento da temperatura com o aumento da permeabilidade (Figura 74).

Figura 74 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no inverno

Fonte: Autora (2019)

Este resultado, contrário aos resultados obtidos para as primeiras duas medições, levou a uma análise adicional dos pontos de coleta e suas características. Analisando a Figura 74 percebe-se que os Pontos 23 e 26 tem um comportamento significativamente diferente dos outros pontos. A partir da análise do entorno destes pontos, nota-se que ambos os pontos estão localizados na periferia da cidade, no entanto, com características diferentes. O local de instalação do instrumento no Ponto 23 está numa parte construída, muito densa e quase sem superfícies permeáveis. No entanto, esta parte construída está rodeada por grandes superfícies vegetadas, que ocupam mais da metade da área de influência total. Isso resulta em um coeficiente alto de permeabilidade de 53 %, o maior entre os pontos de coleta desta medição. Porém, a temperatura média registrada neste ponto foi a mais alta entre todos os pontos também e mediu 25,1 °C.

De outro lado, o Ponto 26 apresenta 21% da superfície permeável, com duas superfícies vegetadas grandes. O instrumento foi instalado precisamente em frente a uma destas superfícies vegetadas, um parque com grande área permeável e algumas árvores. A área de influência restante está densamente construída e quase sem revestimentos permeáveis, o que resulta em um índice de permeabilidade mais baixo em comparação com o Ponto 23. No entanto, no Ponto 26 foi registrada a menor temperatura média (23,2 °C), a menor temperatura máxima (30,7 °C) e a menor temperatura mínima (13,3 °C) durante esta medição. Supõe-se que este fato é uma consequência direta da proximidade do parque, que resultou em uma redução da temperatura neste local.

Este resultado indica que o raio de influência de 200 metros pode ser apenas um valor referencial e que o maior impacto na temperatura pode ter origem nas características do entorno imediato. Levando em conta o acima exposto, analisou-se a correlação entre a temperatura e a permeabilidade sem considerar os Pontos 23 e 26. Obteve-se um coeficiente de correlação negativo e significativamente maior: -0,74 (Figura 75).

Como esperado, a correlação entre a permeabilidade e a umidade relativa média foi positiva, porém, com o coeficiente de correlação de somente 0,09, um valor muito baixo (Figura 76). Percebe-se um comportamento diferenciado dos Pontos 23 e 28. Como já mencionado, no entorno do Ponto 28 encontram-se dois cursos de água que poderiam ter influenciado nos valores altos da umidade relativa neste ponto. O Ponto 23, mesmo com 53% da área permeável, apresenta uma grande massa construída no entorno imediato do local de medição, o que provavelmente interferiu na umidade registrada neste local, diminuindo-a. No Ponto 26, onde foram registradas temperaturas menores, não houve resultados inesperados quanto à umidade relativa.

Figura 75 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no inverno sem os Pontos 23 e 26

Fonte: Autora (2019)

Figura 76 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no inverno

Fonte: Autora (2019)

Semelhante à análise feita para as temperaturas médias e a permeabilidade, realizou-se uma análise para a umidade relativa média e a permeabilidade desconsiderando-se os Pontos 23 e 26 (Figura 77). Obteve-se uma melhora no coeficiente de correlação, cujo valor aumentou de 0,09 para 0,4.

Figura 77 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no inverno sem os Pontos 23 e 26

Fonte: Autora (2019)

Como nas primeiras duas medições, a correlação entre a umidade absoluta média e permeabilidade foi semelhante à correlação entre a umidade relativa e permeabilidade. O coeficiente de correlação foi baixo e mediu 0,1 (Figura 78). No entanto, sem considerar os Pontos 23 e 16, a correlação entre a umidade absoluta média e permeabilidade não mudou, ao contrário da correlação entre a umidade relativa e permeabilidade. Vale ressaltar também que a diferença entre a umidade absoluta média mais baixa e mais alta é somente $0,9 \text{ g/m}^3$. Com esse valor é difícil estabelecer uma correlação linear.

Figura 78 – Relação entre umidade absoluta média e permeabilidade no inverno

Fonte: Autora (2019)

5.4 Período de primavera

O quarto e o último grupo de medição correspondente à estação da primavera foi realizado no período de 03. 12. a 18. 12. 2017 em 10 pontos. Novamente, a medição foi repetida no ponto de referência (Ponto 4).

5.4.1 Apresentação das variáveis urbanísticas

As Figuras 79 a 87 mostram as imagens de satélite e os resultados da classificação da permeabilidade dos revestimentos horizontais em área de influência em cada ponto de medição. A classificação foi feita a partir da metodologia apresentada no item 4.1.2. A análise do entorno do Ponto 4, ponto de referência, foi apresentada no item 5.1.1.

Figura 79 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 29

Fonte: Autora (2019)

Figura 80 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 30

Fonte: Autora (2019)

Figura 81 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 31

Fonte: Autora (2019)

Figura 82 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 32

Fonte: Autora (2019)

Figura 83 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 33

Fonte: Autora (2019)

Figura 84 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 34

Fonte: Autora (2019)

Figura 85 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 35

Fonte: Autora (2019)

Figura 86 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 36

Fonte: Autora (2019)

Figura 87 – Classificação da permeabilidade no entorno do Ponto 37

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 25 apresenta as porcentagens da permeabilidade dos revestimentos urbanos horizontais no entorno dos 10 pontos de coleta no período de primavera. Predominam revestimentos impermeáveis, sendo os Pontos 30 e 36 com somente 5% de superfície permeável, o menor valor entre todos os 36 pontos de coleta (ressaltado em cinza). Os Pontos 37 e 4 apresentam 10% e 12% de área permeável respectivamente. O local com a porcentagem mais alta dos materiais permeáveis foi o Ponto 31, com 65% de superfície permeável (ressaltado em verde).

Tabela 25 – Permeabilidade dos revestimentos em cada ponto de coleta no período de primavera

Permeabilidade / Ponto	4	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Área permeável	12%	29%	5%	65%	22%	22%	39%	13%	5%	10%
Área impermeável	88%	71%	95%	35%	78%	78%	61%	87%	95%	90%

Fonte: Autora (2019)

5.4.2 Apresentação das variáveis climáticas

A Figura 88 apresenta a variação da temperatura do ar em todos os pontos e na estação meteorológica da Embrapa durante a última medição. A temperatura apresentou variações pequenas, mantendo-se entre aproximadamente 20 °C no período noturno e 35 °C no período diurno. Os valores foram mais baixos na estação da Embrapa e bastante semelhantes nos pontos de medição. Nota-se uma queda da temperatura nos dias 07/12 e 08/12 em todos os pontos.

Figura 88 – Variação da temperatura do ar durante o período de medição de primavera

Fonte: Autora (2019)

Na Tabela 26 estão apresentados os valores das temperaturas médias, máximas e mínimas nos pontos de coleta, bem como a amplitude térmica para este período de monitoramento. As temperaturas médias foram bastante uniformes exceto na estação da Embrapa e variam entre 24,7 °C no Ponto 30 e 25,8 °C no Ponto 35, resultando em uma diferença média de somente 1,1 °C. O valor médio na Embrapa foi 23,4 °C. A mais baixa das temperaturas máximas de 30,7 °C foi registrada no Ponto 30, e a mais alta de 34,9 °C no Ponto 31. As temperaturas mínimas variam

entre 17,0 °C (Embrapa) e 20,2 °C nos Pontos 33 e 37. As amplitudes térmicas variam entre 10,9 °C no Ponto 37 e 16,5 no Ponto 32 °C (Figura 89).

Tabela 26 – Temperaturas médias, máximas e mínimas no período de medição de primavera

Temp. / Ponto	4	29	30	31	32	33	34	35	36	37	Embrapa
Média	25,0	25,4	24,7	25,3	25,2	25,6	24,9	25,8	25,2	25,2	23,4
Máxima	33,2	33,6	30,7	34,9	34,4	31,9	31,9	33,6	32,8	31,1	30,9
Mínima	19,0	19,0	18,3	19,0	17,9	20,2	18,3	19,4	18,7	20,2	17,0
Amplitude térmica	14,2	14,6	12,4	15,9	16,5	11,7	13,6	14,2	14,1	10,9	13,9

Fonte: Autora (2019)

Figura 89 – Amplitude térmica no período de medição de primavera

Fonte: Autora (2019)

A variação da umidade relativa em todos os pontos e na Embrapa durante a medição de primavera está apresentada na Figura 90. Durante a primeira metade do monitoramento, foram registradas variações mais significativas, enquanto na segunda metade a umidade foi mantida mais uniforme. Na estação da Embrapa a umidade relativa foi significativamente mais alta do que nos outros pontos.

A Tabela 27 apresenta os valores da umidade relativa média, máxima, mínima e a amplitude da umidade relativa no período de primavera. A média registrada na Embrapa (75,7%) foi muito mais alta do que a média mais alta entre os pontos da medição: 62% no Ponto 34. O Ponto 37 apresentou a umidade relativa média de 53,5%, resultando em uma diferença média espacial na cidade de 8,5%, desconsiderando a Embrapa. O Ponto 4 apresentou a umidade relativa máxima de 92,1% e os Pontos 31 e 32 a umidade relativa mínima de 23,8%. Isso resulta em uma amplitude de 68,3% durante toda a medição e considerando todos os pontos. Este valor é o mais alto de todas as quatro medições.

Figura 90 – Variação da umidade relativa durante o período de medição de primavera

Fonte: Autora (2019)

Tabela 27 – Umidade relativa média, máxima e mínima no período de medição de primavera

UR / Ponto	4	29	30	31	32	33	34	35	36	37	Embrapa
Média	59,4	58,1	58,4	59,2	59,1	55,5	62,0	54,1	56,9	53,5	75,7
Máxima	92,1	87,2	87,2	87,2	87,2	83,5	89,4	82,0	85,2	80,6	99,4
Mínima	24,1	24,5	26,0	23,8	23,8	24,2	26,2	24,8	24,0	24,4	35,7
Amplitude da UR	68,0	62,7	61,2	63,4	63,4	59,3	63,2	57,2	61,2	56,2	63,8

Fonte: Autora (2019)

A Figura 91 mostra as amplitudes da umidade relativa em todos os pontos durante a medição de primavera. Nota-se que as amplitudes foram bem uniformes, variando entre 68% no Ponto 4 e 56,2% no Ponto 37. A amplitude na estação da Embrapa foi também próxima a estes valores, com 63,8%, mesmo com a umidade média, máxima e mínima muito alta em comparação com outros pontos.

Figura 91 – Umidade relativa no período de medição de primavera

Fonte: Autora (2019)

Semelhante à variação da umidade relativa neste período de medição, a umidade absoluta na Embrapa manteve-se muito acima da umidade absoluta nos outros pontos (Figura 92). Entre os pontos de medição destacam-se o Ponto 34 com umidade mais alta e o Ponto 37 com umidade mais baixa.

Figura 92 – Variação da umidade absoluta durante o período de medição de primavera

Fonte: Autora (2019)

Na Tabela 28 encontram-se os valores da umidade absoluta média, máxima e mínima, bem como a amplitude da umidade absoluta, expressos em g de vapor / m³ de ar seco. Os valores médios nos pontos de medição variaram entre 12,2 g/m³ no Ponto 37 e 13,8 g/m³ no Ponto 34. Na estação da Embrapa a média foi muito mais alta e mediu 15,6 g/m³.

Tabela 28 – Umidade absoluta (g/m³) média, máxima e mínima no período de medição de primavera

UA / Ponto	4	29	30	31	32	33	34	35	36	37	Embrapa
Média	13,3	13,3	13,0	13,4	13,3	12,9	13,8	12,6	12,9	12,2	15,6
Máxima	18,8	18,2	18,2	18,0	18,4	18,6	18,6	17,9	18,2	17,4	19,9
Mínima	8,4	8,4	7,7	8,7	8,4	7,6	8,6	7,8	8,1	7,5	11,1
Amplitude da UA	10,4	9,8	10,5	9,3	10,0	11,0	10,0	10,1	10,1	9,9	8,8

Fonte: Autora (2019)

A amplitude da umidade absoluta foi menor na Embrapa (8,8 g/m³) e maior no Ponto 33 (11,0 g/m³). Entre os pontos de medição destaca-se o Ponto 31 com a menor amplitude de 9,3 g/m³ (Figura 93).

Figura 93 – Umidade absoluta no período de medição de primavera

Fonte: Autora (2019)

5.4.3 Intensidade de ilha de calor urbana

A partir do gráfico apresentado na Figura 88, observou-se que nos dias 12. 12., 13. 12. e 14. 12. a temperatura teve um comportamento homogêneo. Sendo assim, o dia 14. 12. foi escolhido como o dia de referência para a medição de primavera. Analisando a Figura 94, nota-se que na estação da Embrapa a temperatura foi próxima à temperatura nos pontos restantes das 7h30 às 14h30, enquanto a diferença foi mais pronunciada durante o resto do dia. No geral, as temperaturas nos pontos de medições foram semelhantes, especialmente no período noturno. Isso resulta em diferença das temperaturas máximas de 4,1 °C e em diferença das temperaturas mínimas de 2,3 °C, sem considerar a estação da Embrapa. A temperatura máxima atingiu o valor de 34,9 °C no Ponto 31, o ponto com maior área permeável (65%). No entanto, este ponto apresenta uma realidade semelhante ao Ponto 23: área central densamente construída e área vegetada ao redor, a qual fica

provavelmente longe demais do lugar da instalação do instrumento e não ajuda na perda de calor no período noturno.

Figura 94 – Variação da temperatura no dia 14. 12. 2017

Fonte: Autora (2019)

Na Tabela 29 podem ser vistas as diferenças máximas das temperaturas com a estação da Embrapa e os horários da ocorrência. Na primavera, bem como em outras três estações, foram registradas ilhas de calor no período noturno. Ilhas de calor aparecem um pouco mais cedo do que no verão e um pouco mais tarde do que no outono, provavelmente devido ao horário do pôr do sol. Percebe-se a distribuição uniforme dos horários: nos oito pontos apareceram ilhas de calor às 19h30 com a intensidade de 4,0 °C (Ponto 34) a 6,4 °C (Ponto 35). No Ponto 30 a diferença máxima foi registrada às 21h30 (4,0 °C) e no Ponto 37 às 1h30 (4,7 °C). Depois do Ponto 31, o Ponto 34 apresentou segunda maior porcentagem da área permeável (39%), enquanto os Pontos 35 e 37 apresentam 13% e 10% da área permeável respectivamente. O Ponto 30 é com 5% um dos pontos com menor área permeável, mas não apresentou ilha de calor de maior intensidade. Embora o entorno do local

de medição esteja densamente construído (bairro residencial com edificações térreas), o mesmo lugar da instalação do instrumento está próximo a um grupo de árvores. Este fato pode ter influenciado na diminuição da temperatura.

Tabela 29 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 14. 12. 2017

Ponto	4	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Temp. (°C)	5,1	4,8	4,0	4,8	5,2	5,6	4,0	6,4	5,2	4,7
Horário	19h	19h30	21h30	19h30	19h30	19h30	19h30	19h30	19h30	1h30

Fonte: Autora (2019)

A Figura 95 ilustra as diferenças máximas da temperatura na Embrapa e nos outros pontos. Percebe-se que as diferenças no geral foram mais altas do que em outras estações, estando todas acima de 4,0 °C. Isso significa que as ilhas de calor foram mais pronunciadas justamente na época da primavera, enquanto no inverno foram mais fracas. Este resultado é contrário ao resultado apresentado em Souza (1996), onde a autora afirma que no geral ilhas de calor são mais fortes no inverno e mais fracas no verão e nos meses de transição entre o inverno e verão. Vale ressaltar que nesta pesquisa o período de medição mais frio não foi durante o inverno, senão durante o outono. Os resultados dependem também da escolha dos locais e horários e duração de medição: Souza (1996) realizou medições somente numa fração da área central da cidade (4 x 6 quarteirões) e somente nos horários específicos (2 a 5 horas após o pôr do sol). De outro lado, na pesquisa presente a cobertura espacial foi muito maior e o tempo de medição mais extenso. No entanto, ambos os estudos comprovam que na cidade de São Carlos existem áreas sujeitas à formação de ilhas de calor no período noturno. Com base nesta pesquisa conclui-se que as áreas com menor presença da área permeável são mais suscetíveis ao aumento da temperatura e redução da umidade, o que resulta em formação de ilhas de calor.

Figura 95 – Diferenças das temperaturas com a área rural (Embrapa) no dia 14. 12. 2017

Fonte: Autora (2019)

5.4.4 Cruzamento dos dados climáticos e urbanísticos

Para os dados da última medição foi calculada a correlação entre as variáveis climáticas e a permeabilidade. A correlação entre a temperatura média e a permeabilidade foi positiva, com um valor baixo de 0,1 (Figura 96).

O Ponto 30, um dos pontos com menor área permeável de 5%, apresentou temperatura média mais baixa de todos os pontos. No entanto, como mencionado anteriormente, o local de instalação do instrumento fica próximo a um grupo de árvores, o que provavelmente reduziu a temperatura no entorno imediato do instrumento. A temperatura média mais alta foi registrada no Ponto 35, o ponto com pouca área permeável também (13%). Outro ponto com comportamento inesperado é o Ponto 31: quarta temperatura média mais alta e o entorno com maior porcentagem da área permeável de 65%. Analisando o entorno deste ponto, percebe-se a semelhança com o Ponto 23. Ambos os pontos estão localizados na

periferia da cidade, com área central densamente construída e área vegetada ao redor das edificações.

Figura 96 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade na primavera

Fonte: Autora (2019)

Outra circunstância interessante é o fato de ter uma pequena diferença entre temperaturas médias (somente 1,1 °C). Além disso, a maioria dos pontos está localizada num entorno predominantemente impermeável, tendo 8 dos 10 pontos menos que 30% da área permeável. Destacam-se os Pontos 34 e 31 com 39% e 65% da superfície permeável respectivamente. Com diferenças tão pequenas torna-se difícil estabelecer uma correlação entre variáveis, nem positiva ou negativa. Considerando tudo isso e semelhante à medição anterior (desconsideração dos Pontos 23 e 26), foi feita uma análise de correlação sem considerar Pontos 30 e 31. Obteve-se o coeficiente de correlação de 0,3 (Figura 97), um pouco mais alto do que para todos os pontos.

Figura 97 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade na primavera sem os Pontos 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

De outro lado, a umidade relativa apresentou mais variações durante a medição e mais diferenças entre pontos. A Figura 98 mostra a tendência de crescimento da umidade em pontos com maior presença de materiais permeáveis, resultando em um coeficiente de correlação de 0,47.

Figura 98 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade na primavera

Fonte: Autora (2019)

Sem considerar os Pontos 30 e 31, a correlação entre a umidade relativa média e a permeabilidade melhorou, resultando em coeficiente de correlação linear de 0,65, como pode ser visto na Figura 99.

Figura 99 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade na primavera sem os Pontos 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

A Figura 100 apresenta a correlação linear entre a umidade absoluta média e a permeabilidade para a medição de primavera. Inesperadamente, o coeficiente de correlação foi negativo, com o valor de -0,1, o que sugeriria a redução da umidade com o aumento da permeabilidade. No entanto, o valor do coeficiente está baixo, bem como a diferença entre valores máximos e mínimos da umidade absoluta (0,9 g/m³). Sem considerar os Pontos 30 e 31, o coeficiente de correlação mede 0,1, um valor baixo, mas positivo. Como os dois valores são próximos, não foi feita a representação gráfica para o segundo caso.

Figura 100 – Relação entre umidade absoluta média e permeabilidade na primavera

Fonte: Autora (2019)

Em geral, a correlação linear entre as variáveis climáticas (temperatura, umidade relativa e absoluta) e a permeabilidade mostrou uma tendência óbvia à redução da temperatura e aumento da umidade (tanto relativa, quanto absoluta) nos locais com maior área permeável. O coeficiente de correlação linear variou e foi maior no verão e no outono e menor nos períodos de inverno e primavera.

Fontes (1998) afirma que a altitude influencia significativamente na variação da temperatura e que os pontos em altitudes maiores apresentam temperaturas mais elevadas. A autora comparou pontos na área rural (altitude menor) e na área urbana com diferenças altimétricas de até 130 m. No entanto, no estudo presente não foi possível estabelecer uma correlação linear clara entre altitude e as variáveis climáticas. A correlação calculada teve valores baixos e foi ora positiva, ora negativa ou até igual a 0. Ressalta-se que as diferenças altimétricas nesta pesquisa não foram tão grandes: o Ponto 23 apresenta a altitude mínima de 798 m e os Pontos 16 e 35 a

altitude máxima de 880 m, enquanto a estação meteorológica da Embrapa está localizada na altitude de 860 m. Mesmo não sendo o local com a altitude menor, as temperaturas foram em geral menores na estação da Embrapa.

5.5 Dados normalizados

Neste item serão apresentados dados referentes a todos os pontos e todas as estações de medição. A primeira parte traz a porcentagem de permeabilidade dos revestimentos em torno de todos os pontos, enquanto a segunda parte apresenta os valores dos dados climáticos obtidos a partir da normalização para as quatro medições. Com base nos dados normalizados, será feita uma análise de correlação a partir das Equações 5 e 6. No final, serão elaborados mapas de temperatura e umidade.

5.5.1 Apresentação das variáveis urbanísticas

A Tabela 30 traz a permeabilidade dos revestimentos horizontais em torno de todos os pontos de coleta, totalizando 36 pontos. Somente 6 pontos apresentam a metade ou mais que a metade da área permeável. Entre eles destaca-se o Ponto 2 com 91% da área permeável e características de uma região rural: poucas edificações e vegetação abundante (ressaltado em verde). Por outro lado, um terço dos pontos, ou seja, 12 dos 36 pontos de coleta apresentam 15% ou menos da área permeável. É importante ressaltar que o Coeficiente de Permeabilidade (entendido como a relação existente entre a área permeável e a área do terreno de um lote) definido pelo Plano Diretor de 2016 de São Carlos é mínimo de 15% para os lotes na zona urbana (PMSC, 2016). Obviamente, o entorno analisado nesta pesquisa inclui também as vias e calçadas públicas, que não seguem nenhum regulamento quanto à permeabilidade e são feitas de materiais impermeáveis na sua maioria. Mesmo assim, alguns pontos apresentam baixíssima porcentagem dos revestimentos permeáveis em seu entorno,

tais como Pontos 30 e 36 com somente 5% da área permeável e Pontos 19 e 25 com 6% e 7% da área permeável respectivamente (ressaltado em cinza). A análise gráfica dos revestimentos apresentada anteriormente neste capítulo mostra que muitos lotes não cumprem com a exigência legal de ter pelo menos 15% da área permeável. Claramente, muitas das edificações foram construídas antes do estabelecimento do Coeficiente de Permeabilidade pelo Plano Diretor, mas muitas construções novas também não cumprem com este requisito.

Tabela 30 – Permeabilidade dos revestimentos horizontais

Ponto	Área permeável	Área impermeável	Ponto	Área permeável	Área impermeável
P1	42%	58%	P19	6%	94%
P2	91%	9%	P20	19%	81%
P3	47%	53%	P21	21%	79%
P4	12%	88%	P22	46%	54%
P5	33%	67%	P23	53%	47%
P6 (P24)	51%	49%	P25	7%	93%
P7	15%	85%	P26	21%	79%
P8	61%	39%	P27	15%	85%
P9	29%	71%	P28	27%	73%
P10	20%	80%	P29	29%	71%
P11	50%	50%	P30	5%	95%
P12	33%	67%	P31	65%	35%
P13	14%	86%	P32	22%	78%
P14	39%	61%	P33	22%	78%
P15	9%	91%	P34	39%	61%
P16	22%	78%	P35	13%	87%
P17	9%	91%	P36	5%	95%
P18	40%	60%	P37	10%	90%

Fonte: Autora (2019)

5.5.2 Apresentação das variáveis climáticas

Utilizando o método apresentado no Item 4.2.2, foram extrapolados valores da temperatura e umidade relativa e absoluta para todos os pontos e todas as estações. A Tabela 31 mostra os valores das temperaturas médias, máximas e mínimas para todos os pontos e todas as estações. Os dados reais, ou seja, dados medidos são destacados em cinza e o ponto de referência em laranja (em todas as estações com os dados medidos).

Tabela 31 – Temperaturas médias, máximas e mínimas normalizadas para todos os pontos e todas as estações (°C)

Estação	Verão			Outono			Inverno			Primavera		
Pto Temp	T _{méd}	T _{máx}	T _{mín}	T _{méd}	T _{máx}	T _{mín}	T _{méd}	T _{máx}	T _{mín}	T _{méd}	T _{máx}	T _{mín}
P1	26,3	32,3	20,2	20,9	28,8	12,2	23,8	32,8	14,9	24,7	32,8	18,7
P2	24,6	31,9	19,0	19,1	27,0	10,5	22,1	31,1	13,2	23,0	31,1	17,0
P3	25,1	32,8	18,7	19,6	27,5	11,0	22,6	31,6	13,7	23,5	31,6	17,5
P4	26,7	34,4	21,7	21,2	29,1	12,6	24,1	33,2	15,2	25,0	33,2	19,0
P5	25,8	32,8	20,2	20,4	28,3	11,7	23,3	32,4	14,4	24,2	32,4	18,2
P6	26,9	38,3	20,2	21,5	29,3	12,8	24,4	33,4	15,5	25,3	33,4	19,3
P7	26,9	35,7	20,2	21,5	29,4	12,8	24,4	33,5	15,5	25,3	33,5	19,3
P8	25,7	32,3	20,6	20,3	28,2	11,6	23,2	32,3	14,3	24,1	32,3	18,1
P9	25,3	31,9	19,8	19,9	27,8	11,2	22,8	31,8	13,9	23,7	31,8	17,7
P10	26,5	36,6	19,8	21,0	28,9	12,4	24,0	33,0	15,0	24,8	33,0	18,9
P11	25,4	33,2	20,5	20,0	29,5	9,8	22,9	31,9	14,0	23,8	31,9	17,8
P12	27,7	35,4	22,7	22,2	31,1	13,3	25,1	34,2	16,2	26,0	34,2	20,0
P13	26,4	34,2	21,5	21,0	25,2	14,9	23,9	32,9	15,0	24,8	32,9	18,8
P14	26,1	33,8	21,1	20,6	27,5	11,4	23,5	32,6	14,6	24,4	32,6	18,4
P15	26,4	34,2	21,5	20,8	27,5	11,4	23,9	32,9	15,0	24,8	32,9	18,8
P16	27,1	34,9	22,2	21,7	30,3	13,3	24,6	33,6	15,7	25,5	33,6	19,5
P17	26,6	34,4	21,6	21,1	27,9	12,6	24,1	33,1	15,2	25,0	33,1	19,0
P18	25,3	33,0	20,3	19,8	27,9	9,8	22,8	31,8	13,8	23,6	31,8	17,7
P19	26,8	34,6	21,9	21,4	27,5	11,8	24,3	33,3	15,4	25,2	33,3	19,2
P20	26,8	34,5	21,8	21,3	29,2	12,7	24,3	32,8	16,0	25,1	33,3	19,1
P21	26,4	34,1	21,4	20,9	28,8	12,3	23,9	33,2	14,1	24,7	32,9	18,8
P22	26,4	34,2	21,5	21,0	28,9	12,3	23,9	32,8	14,5	24,8	32,9	18,8
P23	27,6	35,4	22,7	22,2	30,1	13,5	25,1	31,9	17,1	26,0	34,2	20,0
P24	26,4	34,1	21,4	20,9	28,8	12,3	23,9	34,0	14,1	24,7	32,9	18,8
P25	26,8	34,6	21,9	21,4	29,3	12,7	24,3	31,1	16,4	25,2	33,3	19,2
P26	25,7	33,5	20,8	20,3	28,2	11,6	23,2	30,7	13,3	24,1	32,2	18,1
P27	26,8	34,5	21,8	21,3	29,2	12,7	24,2	34,0	14,5	25,1	33,3	19,1
P28	26,7	34,5	21,8	21,3	29,2	12,6	24,2	33,2	14,5	25,1	33,3	19,1
P29	27,1	34,8	22,1	21,6	29,5	13,0	24,5	33,6	15,6	25,4	33,6	19,0
P30	26,4	34,1	21,4	20,9	28,8	12,3	23,8	32,9	14,9	24,7	30,7	18,3
P31	27,0	34,7	22,0	21,5	29,4	12,9	24,4	33,5	15,5	25,3	34,9	19,0
P32	26,9	34,6	21,9	21,4	29,3	12,8	24,4	33,4	15,4	25,2	34,4	17,9
P33	27,2	35,0	22,2	21,7	29,6	13,1	24,7	33,7	15,8	25,6	31,9	20,2
P34	26,5	34,3	21,6	21,1	29,0	12,4	24,0	33,0	15,1	24,9	31,9	18,3
P35	27,4	35,2	22,4	21,9	29,8	13,3	24,9	33,9	16,0	25,8	33,6	19,4
P36	26,9	34,6	21,9	21,4	29,3	12,8	24,4	33,4	15,4	25,2	32,8	18,7
P37	26,8	34,6	21,9	21,4	29,3	12,7	24,3	33,4	15,4	25,2	31,1	20,2

Fonte: Autora (2019)

As Figuras 101 a 104 mostram a amplitude térmica em todos os pontos e todas as estações, a partir dos dados normalizados apresentados na Tabela 31. Nota-se que o verão foi a estação mais quente com a temperatura média de 26,5 °C, enquanto o

outono foi a estação mais fria com a temperatura média de 21 °C. As temperaturas médias no inverno e primavera foram semelhantes: 24 °C e 24,8 °C respectivamente, no entanto a amplitude térmica foi maior durante o inverno, provavelmente devido ao período com menor umidade do ar.

Os pontos têm comportamento semelhante em todas as estações devido à normalização dos dados. As menores temperaturas médias foram sempre registrada nos Ponto 2 e 18, pontos com 91% e 40% da área permeável respectivamente. As maiores médias foram registradas nos Pontos 12 e 23, pontos com irregularidades durante a instalação e no Ponto 35, ponto com 13% da área permeável.

Figura 101 – Amplitude térmica em todos os pontos no período de verão – dados normalizados

Fonte: Autora (2019)

Figura 102 – Amplitude térmica em todos os pontos no período de outono – dados normalizados

Fonte: Autora (2019)

Figura 103 – Amplitude térmica em todos os pontos no período de inverno – dados normalizados

Fonte: Autora (2019)

Figura 104 – Amplitude térmica em todos os pontos no período de primavera – dados normalizados

Fonte: Autora (2019)

Utilizando o método de cálculo apresentado na Tabela 7 foram extrapolados os valores da umidade relativa média, máxima e mínima para todos os pontos e todas as estações, como apresentado na Tabela 32. Novamente, os dados do ponto de referência (medidos em todas as estações) são destacados em laranja e os outros dados medidos em cinza.

Tabela 32 – Umidade relativa média, máxima e mínima para todos os pontos e todas as estações – dados normalizados (%)

Estação	Verão			Outono			Inverno			Primavera		
Pto \ UR	UR _{méd}	UR _{máx}	UR _{mín}	UR _{méd}	UR _{máx}	UR _{mín}	UR _{méd}	UR _{máx}	UR _{mín}	UR _{méd}	UR _{máx}	UR _{mín}
P1	55,8	80,6	29,7	59,1	83,3	32,2	33,5	78,6	23,2	59,2	91,9	23,9
P2	67,6	87,1	39,5	71,0	95,2	44,1	45,4	90,5	35,1	71,1	100,0	35,8
P3	62,4	92,1	31,5	65,8	90,0	38,9	40,1	85,3	29,9	65,8	98,6	30,6
P4	56,0	75,2	29,7	59,3	83,5	32,4	33,7	78,8	23,4	59,4	92,1	24,1
P5	57,5	82,0	32,4	60,9	85,1	34,0	35,2	80,4	25,0	60,9	93,7	25,7
P6	56,7	83,5	26,7	60,1	84,2	33,1	34,4	79,5	24,1	60,1	92,8	24,8
P7	53,8	82,0	27,3	57,2	81,4	30,3	31,5	76,7	21,3	57,2	90,0	22,0
P8	59,3	79,3	34,6	62,7	86,9	35,8	37,0	82,2	26,8	62,7	95,5	27,5
P9	61,8	85,2	32,6	65,1	89,3	38,2	39,5	84,6	29,2	65,2	97,9	29,9
P10	54,9	79,3	27,0	58,2	82,4	31,3	32,6	77,7	22,3	58,3	91,0	23,0
P11	65,7	84,9	39,4	69,0	87,1	34,6	43,4	88,5	33,1	69,1	100,0	33,8
P12	54,6	73,8	28,3	58,0	80,6	32,8	32,3	77,4	22,0	58,0	90,7	22,7
P13	56,3	75,5	30,0	59,6	76,1	40,4	34,0	79,1	23,7	59,7	92,4	24,4
P14	59,5	78,8	33,3	62,9	89,4	37,8	37,2	82,4	27,0	62,9	95,7	27,7
P15	58,7	77,9	32,4	62,1	92,1	37,5	36,4	81,5	26,1	62,1	94,8	26,8
P16	54,1	73,3	27,8	57,5	85,2	31,2	31,8	76,9	21,5	57,5	90,2	22,2
P17	56,7	75,9	30,4	60,0	82,0	33,0	34,4	79,5	24,1	60,1	92,8	24,8
P18	62,9	82,2	36,7	66,3	89,4	34,4	40,6	85,8	30,4	66,3	99,1	31,1
P19	56,7	75,9	30,4	60,1	85,2	37,9	34,4	79,5	24,1	60,1	92,8	24,8
P20	55,6	74,8	29,3	59,0	83,1	32,0	33,3	74,4	23,5	59,0	91,7	23,7
P21	56,3	75,5	30,0	59,6	83,8	32,7	34,0	83,8	23,5	59,7	92,4	24,4
P22	56,9	76,2	30,7	60,3	84,5	33,4	34,7	81,1	23,5	60,4	93,1	25,1
P23	54,2	73,4	27,9	57,5	81,7	30,6	31,9	68,7	23,5	57,6	90,3	22,3
P24	55,8	75,0	29,5	59,2	83,3	32,2	33,5	81,1	23,4	59,2	91,9	23,9
P25	54,0	73,2	27,7	57,4	81,5	30,4	31,7	71,0	23,5	57,4	90,1	22,1
P26	55,3	74,5	29,0	58,7	82,8	31,7	33,0	82,4	23,5	58,7	91,4	23,4
P27	55,3	74,5	29,0	58,6	82,8	31,7	33,0	81,1	23,5	58,7	91,4	23,4
P28	59,2	78,4	32,9	62,5	86,7	35,6	36,9	83,7	23,5	62,6	95,3	27,3
P29	54,7	73,9	28,4	58,1	82,2	31,1	32,4	77,5	22,1	58,1	87,2	24,5
P30	55,0	74,2	28,7	58,4	82,5	31,4	32,7	77,8	22,4	58,4	87,2	26,0
P31	55,8	75,0	29,5	59,2	83,3	32,2	33,5	78,6	23,2	59,2	87,2	23,8
P32	55,7	74,9	29,4	59,0	83,2	32,1	33,4	78,5	23,1	59,1	87,2	23,8
P33	52,1	71,3	25,8	55,4	79,6	28,5	29,8	74,9	19,5	55,5	83,5	24,2
P34	58,5	77,8	32,3	61,9	86,1	35,0	36,3	81,4	26,0	62,0	89,4	26,2
P35	50,7	69,9	24,4	54,1	78,2	27,1	28,4	73,5	18,1	54,1	82,0	24,8
P36	53,5	72,7	27,2	56,8	81,0	29,9	31,2	76,3	20,9	56,9	85,2	24,0
P37	50,1	69,3	23,8	53,4	77,6	26,5	27,8	72,9	17,5	53,5	80,6	24,4

Fonte: Autora (2019)

As Figuras 105 a 108 mostram a umidade relativa em todos os pontos e todos os períodos de medição. A umidade relativa média para a estação de verão foi 56,7%, enquanto as estações de outono e primavera apresentaram a umidade relativa média

quase igual, com 60,1% e 60,2% respectivamente. O período menos úmido foi o inverno com a umidade relativa média de somente 34,5%. Isso pode explicar a grande amplitude térmica nesse período. A variação da umidade relativa no inverno está muito alta devido a alguns dias com a umidade relativa muito alta no início do monitoramento.

Destaca-se o Ponto 2 com a maior umidade relativa média em todos os períodos de medição, seguido pelos Pontos 3, 9, 11 e 18. Estes pontos apresentam pelo menos 30% da área permeável e alguns estão próximos a fluxos de água. O ponto com a menor umidade relativa média, máxima e mínima em todas as estações foi o Ponto 37, ponto com 10% da superfície permeável no seu entorno, seguido pelo Ponto 35, ponto com 13% da área permeável no entorno.

Figura 105 – Umidade relativa em todos os pontos no período de verão – dados normalizados

Fonte: Autora (2019)

Figura 106 – Umidade relativa em todos os pontos no período de outono – dados normalizados

Fonte: Autora (2019)

Figura 107 – Umidade relativa em todos os pontos no período de inverno – dados normalizados

Fonte: Autora (2019)

Figura 108 – Umidade relativa em todos os pontos no período de primavera – dados normalizados

Fonte: Autora (2019)

A partir do procedimento apresentado na Tabela 7 foi realizado o mesmo cálculo para obter os valores da umidade absoluta média, máxima e mínima em todos os períodos de medição. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 33 com os dados medidos destacados em cinza e ponto de referência em laranja.

Tabela 33 – Umidade absoluta média, máxima e mínima para todos os pontos e todas as estações – dados normalizados (g/m^3)

Estação	Verão			Outono			Inverno			Primavera		
Pto UA	UA _{méd}	UA _{máx}	UA _{mín}	UA _{méd}	UA _{máx}	UA _{mín}	UA _{méd}	UA _{máx}	UA _{mín}	UA _{méd}	UA _{máx}	UA _{mín}
P1	13,2	18,0	9,2	10,5	13,4	6,1	6,8	10,6	4,8	13,0	18,5	8,1
P2	14,8	18,7	10,8	12,1	15,0	7,7	8,4	12,2	6,4	14,6	20,1	9,7
P3	13,8	18,3	9,2	11,1	14,0	6,7	7,4	11,2	5,4	13,6	19,1	8,7
P4	13,5	17,6	9,7	10,8	13,7	6,4	7,1	10,9	5,1	13,3	18,8	8,4
P5	13,3	17,8	9,6	10,6	13,5	6,2	6,9	10,7	4,9	13,1	18,6	8,2
P6	13,7	17,4	9,9	11,0	13,9	6,6	7,3	11,1	5,3	13,5	19,0	8,6
P7	13,0	17,4	9,4	10,3	13,2	5,9	6,6	10,4	4,6	12,8	18,3	7,9
P8	13,7	18,3	10,2	11,0	13,9	6,6	7,3	11,1	5,3	13,5	19,0	8,6
P9	13,9	18,4	9,5	11,2	14,1	6,8	7,5	11,3	5,5	13,7	19,2	8,8
P10	12,9	17	9,5	10,3	13,1	5,8	6,6	10,3	4,5	12,8	18,2	7,8
P11	14,4	18,5	10,6	11,7	14,8	7,1	8,0	11,8	6,0	14,2	19,7	9,3
P12	13,8	17,9	10,0	11,1	14,1	7,2	7,4	11,2	5,4	13,6	19,1	8,7
P13	13,6	17,7	9,8	10,9	13,7	6,8	7,2	11,0	5,2	13,4	18,9	8,5
P14	13,8	17,9	10,0	11,1	13,9	6,5	7,4	11,2	5,4	13,6	19,1	8,7
P15	13,8	17,9	10,0	11,1	14	6,3	7,4	11,2	5,4	13,6	19,1	8,7
P16	13,4	17,5	9,6	10,8	13,9	6,3	7,1	10,8	5,0	13,3	18,7	8,3
P17	13,6	17,7	9,8	11,0	14	6,0	7,3	11,0	5,2	13,4	18,9	8,5
P18	13,8	17,9	10,0	11,1	14	6,4	7,4	11,2	5,4	13,6	19,1	8,7
P19	13,8	17,9	10,0	11,1	14,5	6,7	7,4	11,2	5,4	13,6	19,1	8,7
P20	13,5	17,6	9,7	10,8	13,7	6,4	7,1	10,6	5,3	13,3	18,8	8,4
P21	13,4	17,5	9,6	10,7	13,6	6,3	7,0	10,6	5,1	13,2	18,7	8,3
P22	13,6	17,7	9,8	10,9	13,8	6,5	7,2	10,7	5,3	13,4	18,9	8,5
P23	13,6	17,7	9,8	10,9	13,8	6,5	7,2	10,6	5,5	13,4	18,9	8,5
P24	13,4	17,5	9,6	10,7	13,6	6,3	7,0	10,6	5,1	13,2	18,7	8,3
P25	13,2	17,3	9,4	10,5	13,4	6,1	6,8	10,4	5,1	13,0	18,5	8,1
P26	13,3	17,4	9,5	10,7	13,5	6,2	7,0	11,0	5,1	13,1	18,6	8,2
P27	13,4	17,5	9,6	10,7	13,6	6,3	7,0	10,6	5,0	13,2	18,7	8,3
P28	13,7	17,8	9,9	11,0	13,9	6,6	7,3	11,2	5,5	13,5	19,0	8,6
P29	13,5	17,6	9,7	10,8	13,7	6,4	7,1	10,9	5,1	13,3	18,2	8,4
P30	13,2	17,3	9,4	10,5	13,4	6,1	6,8	10,6	4,8	13,0	18,2	7,7
P31	13,6	17,7	9,8	10,9	13,8	6,5	7,2	11,0	5,2	13,4	18	8,7
P32	13,5	17,6	9,7	10,8	13,7	6,4	7,1	10,9	5,1	13,3	18,4	8,4
P33	13,1	17,2	9,3	10,4	13,3	6,0	6,7	10,5	4,7	12,9	18,6	7,6
P34	14,0	18,1	10,2	11,3	14,2	6,9	7,6	11,4	5,6	13,8	18,6	8,6
P35	12,8	16,9	9,0	10,1	13,0	5,7	6,4	10,2	4,4	12,6	17,9	7,8
P36	13,0	17,1	9,2	10,4	13,2	5,9	6,7	10,4	4,6	12,9	18,2	8,1
P37	12,4	16,5	8,6	9,7	12,6	5,3	6,0	9,8	4,0	12,2	17,4	7,5

Fonte: Autora (2019)

As Figuras 109 a 112 apresentam valores da umidade absoluta média, máxima e mínima em todos os pontos e todos os períodos de medição. O verão foi a estação com maior umidade absoluta média ($13,5 \text{ g/m}^3$), seguido pela primavera com $13,3$

g/m³. A umidade absoluta média no outono foi 10,8 g/m³ e no inverno 7,1 g/m³, o que confirma que o inverno foi a estação mais seca. Estes resultados diferem um pouco dos resultados da umidade relativa, a qual foi maior na primavera e outono.

Destaca-se, novamente, o Ponto 2 com maior umidade absoluta média em todas as estações, seguido pelos Pontos 11 e 34. O Ponto 11 apresentou a umidade relativa média alta também, enquanto o Ponto 34 foi o ponto com a décima maior umidade relativa média.

Figura 109 – Umidade absoluta em todos os pontos no período de verão – dados normalizados

Fonte: Autora (2019)

Figura 110 – Umidade absoluta em todos os pontos no período de outono – dados normalizados

Fonte: Autora (2019)

Figura 111 – Umidade absoluta em todos os pontos no período de inverno – dados normalizados

Fonte: Autora (2019)

Figura 112 – Umidade absoluta em todos os pontos no período de primavera – dados normalizados

Fonte: Autora (2019)

5.5.3 Cruzamento dos dados climáticos normalizados e urbanísticos

A seguir serão apresentados resultados do cruzamento dos dados climáticos normalizados e urbanísticos apresentados nos itens anteriores. Dado que dos 37 pontos as medições foram realizadas em somente 10 pontos em cada estação, uma parte considerável dos dados foi obtida através de extrapolação. Isso significa que o comportamento dos pontos não varia muito entre as estações e que quase sempre os mesmos pontos têm valores de temperatura ou umidade mais altos ou mais baixos. Como consequência deste fato, os coeficientes de correlação entre a permeabilidade e variáveis climáticas são muito próximos ou iguais ao longo das quatro estações.

5.5.3.1 Período de verão

No Ponto 2, ponto com características semelhantes com a área rural, foi medida a menor temperatura média entre todos os pontos com o valor de 24,6 °C. Os Pontos 12 e 23 apresentaram temperaturas médias mais altas de 27,7 °C e 27,6 °C respectivamente. No Ponto 6 foi registrada a temperatura máxima no período de verão de 38,3 °C e no Ponto 3 a temperatura mínima de 18,7 °C.

Percebeu-se durante a análise em capítulos anteriores que os Pontos 23, 26, 30 e 31 têm um comportamento diferenciado, devido ao posicionamento do instrumento e características físicas do local. Outros pontos com comportamento divergente e irregularidades durante a instalação foram os Pontos 6 e 12. Foram feitas as análises de correlação entre a permeabilidade e as temperaturas médias para o período de verão considerando os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 e desconsiderando-os. O coeficiente de correlação entre a permeabilidade e a temperatura média considerando todos os pontos foi negativo e mediu -0,436 (Figura 113).

Figura 113 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no verão para todos os pontos

Fonte: Autora (2019)

A Figura 114 mostra a análise de correlação sem considerar os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31. Como esperado, desconsiderando estes pontos obteve-se ainda uma correlação melhor de -0,743. Em ambos os casos, nota-se uma clara tendência à redução da temperatura do ar nas regiões com mais superfícies permeáveis.

Figura 114 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

A partir das Equações 5 e 6, calculou-se o fator de correlação entre a permeabilidade e a umidade relativa e obteve-se o valor de 0,594. Isso mostra que a permeabilidade dos materiais numa região impacta significativamente a umidade relativa do ar nesta região, sendo esse impacto maior do que o impacto na variação da temperatura do ar. A correlação entre a permeabilidade e a umidade relativa sem considerar os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 foi um pouco maior e mediu 0,713 (Figura 115). Como a diferença entre dois coeficientes fica aproximadamente 0,1, a primeira análise não está representada graficamente.

Figura 115 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

O coeficiente de correlação entre a umidade absoluta média e a permeabilidade para o período de verão considerando todos os pontos mediu 0,6. Este valor está próximo ao valor obtido para a correlação entre a umidade relativa e permeabilidade. Sem considerar os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 não teve mudança significativa, já que foi calculado o valor de 0,62 (Figura 116). O primeiro caso não está representado graficamente. Como esperado, a correlação foi positiva e indica aumento da umidade absoluta nos locais com maior área permeável.

Figura 116 – Relação entre umidade relativa absoluta e permeabilidade no verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

5.5.3.2 Período de outono

Semelhante à medição de verão, o ponto com a menor temperatura média no período de outono foi o Ponto 2 com o valor de 19,1 °C. Os Pontos 12 e 23 apresentaram novamente a temperatura média mais alta de 22,2 °C. A temperatura máxima de 31,1 °C para esta estação foi registrada no Ponto 12. Os Pontos 11 e 18, com 50% e 40% da área permeável respectivamente, apresentaram a temperatura mais baixa para esta medição (9,8 °C). A correlação entre a permeabilidade e a temperatura média foi negativa, com o fator de correlação de - 0,428 (Figura 117). Este valor é muito próximo ao valor calculado para a medição de verão (- 0,436). A proximidade destes valores poderia ser a consequência do fato de 10 valores da temperatura serem medidos e os outros extrapolados. O índice de correlação entre a permeabilidade e a temperatura média sem considerar os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 foi novamente muito próximo ao valor calculado no verão (- 0,743) e mediu - 0,718 (Figura 118).

Figura 117 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no outono para todos os pontos

Fonte: Autora (2019)

Figura 118 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no outono sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

A Figura 119 mostra a relação positiva entre a umidade relativa e a permeabilidade das superfícies horizontais no período de outono sem considerar os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31. O coeficiente de correlação calculado a partir das Equações 5 e 6 foi igual ao coeficiente de correlação calculado para o período de verão: 0,713. Consequentemente, a correlação considerando todos os pontos foi igual à correlação calculada no verão e mediu 0,594.

Figura 119 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no outono sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

Tanto como as correlações da umidade relativa e permeabilidade, as correlações calculadas para a umidade absoluta e permeabilidade foram iguais às correlações calculadas no período de verão. O coeficiente de correlação mediu 0,6 considerando todos os pontos e 0,62 sem considerar os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31. A segunda análise está representada na Figura 120.

Figura 120 – Relação entre umidade absoluta média e permeabilidade no outono sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

5.5.3.3 Período de inverno

Como durante as primeiras duas medições, o Ponto 2 apresentou a menor temperatura média durante a coleta no inverno. A temperatura média neste ponto foi 22,1 °C, enquanto a temperatura média mais alta de 25,1 °C foi medida nos Pontos 12 e 23. A temperatura mínima durante este monitoramento foi registrada no Ponto 2 e mediu 13,2 °C, seguida pelos 13,3 °C no Ponto 26. O Ponto 12 apresentou a temperatura máxima de 34,2 °C, seguido pelo Ponto 27 com 34,0 °C. Calculou-se o fator de correlação entre a temperatura média e a permeabilidade de - 0,436 (Figura 121). Como esperado, o fator de correlação foi negativo e com um valor muito próximo aos valores obtidos durante as primeiras duas coletas. O fator de correlação desconsiderando os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 foi igual ao fator calculado durante o verão: -0,743 (Figura 122).

Figura 121 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no inverno para todos os pontos

Fonte: Autora (2019)

Figura 122 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no inverno sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

O coeficiente de correlação entre a umidade relativa média e a permeabilidade foi igual aos coeficientes obtidos durante as primeiras duas medições, com o valor de 0,594. Desconsiderando os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 obteve-se também o mesmo valor como durante as primeiras duas medições: 0,713, como mostrado na Figura 123.

Figura 123 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade no inverno sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

Novamente, o coeficiente de correlação entre a umidade absoluta média e permeabilidade foi igual aos valores obtidos no verão e outono e mediu 0,6. Sem considerar os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 obteve-se o valor 0,62 (Figura 124).

Figura 124 – Relação entre umidade absoluta média e permeabilidade no inverno sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

5.5.3.4 Período de primavera

No período de primavera foram registrados comportamentos semelhantes às primeiras três medições. A menor temperatura média de 23 °C foi medida no Ponto 2 e a maior de 26 °C nos Pontos 12 e 23. O Ponto 2 apresentou a temperatura mínima para esta medição com o valor de 17 °C, enquanto o pico de temperatura de 34,9 °C foi registrado no Ponto 31. O fator de correlação entre a temperatura média e a permeabilidade foi igual às medições de verão e inverno e mediu - 0,436 (Figura 125). Consequentemente, o índice de correlação sem considerar os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 foi igual ao índice calculado no verão e inverno (- 0,743) como pode ser visto na Figura 126.

Figura 125 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no inverno para todos os pontos

Fonte: Autora (2019)

Figura 126 – Relação entre temperaturas médias e permeabilidade no inverno sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

Quanto aos dados da umidade relativa, a correlação com a permeabilidade foi novamente igual aos valores calculados durante as medições anteriores e mediu 0,594 considerando todos os pontos e desconsiderando os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 (Figura 127).

Figura 127 – Relação entre umidade relativa média e permeabilidade na primavera sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

A correlação entre a umidade absoluta média e a permeabilidade mostrou o mesmo comportamento como nas primeiras três medições, com o coeficiente de correlação de 0,6 considerando todos os pontos. Desconsiderando os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 foi obtido o coeficiente de correlação de 0,62 (Figura 128).

Figura 128 – Relação entre umidade absoluta média e permeabilidade na primavera sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

No geral, todas as variáveis climáticas (temperatura, umidade relativa e absoluta do ar) mostraram a correlação linear com a variável urbanística (porcentagem da área permeável) em todos os períodos de medição. No caso da temperatura, a correlação foi negativa e no caso da umidade (relativa e absoluta) a correlação foi positiva. Sem considerar os pontos com erros possíveis durante a instalação e interferência do entorno imediato nos dados medidos, os coeficientes de correlação linear foram entre aproximadamente 0,62 e 0,74 (-0,74 no caso da temperatura). A correlação linear com o valor de 1,0 ou -1,0 não seria realística para este estudo, tendo em vista que a permeabilidade não é o único fator determinante dos microclimas no espaço urbano. No entanto, os valores obtidos nesta pesquisa mostram claramente a influência da permeabilidade nas condições climáticas e na formação de ilhas de calor nos locais com menor área permeável.

5.6 Mapas de distribuição da temperatura e umidade relativa e absoluta

A seguir serão apresentados mapas térmicos e mapas da umidade relativa e absoluta para todas as estações, elaborados a partir dos dados apresentados na Tabela 31 no programa QGIS.

5.6.1 Mapas térmicos

As Figuras 129 e 130 apresentam mapas térmicos de quatro estações, com base em valores da temperatura média em todos os pontos. Percebe-se que a estação mais fria foi o outono, enquanto o verão foi a estação mais quente. As temperaturas foram semelhantes durante o inverno e a primavera. Foi utilizada a mesma escala de cores para todas as estações, com a temperatura média mínima de 19,15 °C registrada no outono e a temperatura média máxima de 27,66 °C registrada no verão. Dado que os valores dentro de cada estação foram muito próximos (por exemplo, a amplitude térmica média durante a primavera mediu somente 1,1 °C), a diferença entre pontos não fica muito perceptível.

Figura 129 – Mapas térmicos: períodos de verão e outono

Fonte: Autora (2019)

Figura 130 – Mapas térmicos: períodos de inverno e primavera

Fonte: Autora (2019)

Na Figura 131 está representado o mapa térmico de verão, com a escala de cores ajustada aos valores desta estação, variando entre a temperatura média mínima de 24,59 °C e a temperatura média máxima de 27,66 °C. Destacam-se duas regiões com temperaturas médias mais baixas: no leste a região da Área 2 da Campus da USP (Ponto 2) e no quadrante nordeste a região da UFSCar e do córrego Santa Maria do Leme (Pontos 3, 9, 11 e 18). Estas duas regiões apresentam uma quantidade significativa de área vegetada e alguns corpos de água. Nestes casos trata-se de áreas verdes contínuas e de grande extensão, o que resulta em regiões mais frias. De outro lado, a região sudoeste apresenta temperaturas médias mais elevadas, uma região residencial e periférica, densamente construída, com predominância de superfícies impermeáveis e pouca vegetação (áreas verdes pequenas e pontuais, principalmente arborização de vias). Existe a possibilidade de que o centro da cidade seja também uma região mais quente, no entanto, a medição foi feita em somente um ponto no centro da cidade, o que não é suficiente para uma análise mais profunda. Como o comportamento dos pontos é semelhante em todas as estações, não serão apresentados mapas térmicos com escalas ajustadas para as estações restantes.

Figura 131 – Mapa térmico no período de verão

Fonte: Autora (2019)

Conforme exposto anteriormente, os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 mostraram comportamento diferenciado durante as medições, afastando-se das retas obtidas durante a análise de correlação. Portanto, foram elaborados mapas da temperatura e

umidade relativa sem considerar estes pontos. Nas Figuras 132 e 133 são apresentados mapas térmicos para todas as estações sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31. Percebe-se que o campo térmico mudou e as temperaturas maiores estão concentradas na região sudeste da área de medição (Pontos 33, 35, 36 e 37). Esta região está densamente construída, predominantemente residencial e com baixa concentração de materiais permeáveis. Está situada próximo à região industrial da cidade, onde está localizado o Ponto 10. As áreas com as temperaturas mais baixas ficaram as mesmas: os Pontos 2, 3, 9, 11 e 18.

Figura 132 – Mapas térmicos sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31: períodos de verão e outono

Fonte: Autora (2019)

Figura 133 – Mapas térmicos sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31: períodos de inverno e primavera

Fonte: Autora (2019)

O mapa térmico para o período de verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 está mostrado na Figura 134. Percebe-se melhor a diferença das temperaturas entre os pontos e a distribuição das regiões mais frias e mais quentes. Os mapas de outras estações não estão representados, porque são muito similares ao mapa para o período de verão.

Figura 134 – Mapa térmico no período de verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

5.6.2 Mapas da umidade relativa

Os mapas da umidade relativa, elaborados a partir dos valores médios da umidade relativa, para as quatro estações estão representados nas Figuras 135 e 136. Nota-se a grande diferença entre a estação mais seca, o inverno, e as outras estações, bastante semelhantes em termos da umidade. Foi utilizada a mesma escala de cores para todas as estações, com a umidade média mínima de 27,8% e a máxima de 71,06%.

Figura 136 – Mapas da umidade relativa: períodos de inverno e primavera

Fonte: Autora (2019)

A Figura 137 traz o mapa da umidade relativa no período de verão. As áreas com a umidade média mais alta são a Área 2 da Campus da USP (Ponto 2), na região leste da cidade, o Campus da UFSCar (Ponto 3) e as margens do córrego Santa Maria do Leme (Pontos 9, 11 e 18), as mesmas regiões onde foram registradas temperaturas menores. Na região sul da cidade localizam-se os pontos com a umidade média mais baixa: Pontos 12, 33, 35 e 37.

Figura 137 – Mapa da umidade relativa no período de verão

Fonte: Autora (2019)

Para os dados da umidade relativa foram também elaborados mapas excluindo os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 como pode ser visto nas Figuras 138 e 139. Não houve mudanças significativas na distribuição da umidade relativa na cidade em comparação com os mapas elaborados para todos os pontos. A umidade relativa menor está localizada na região sul, nos entornos dos Pontos 33, 35 e 37, e a umidade relativa maior nos Pontos 2, 3, 9, 11 e 18.

Figura 138 – Mapas da umidade relativa sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31: períodos de verão e outono

Fonte: Autora (2019)

Figura 139 – Mapas da umidade relativa sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31: períodos de inverno e primavera

Fonte: Autora (2019)

A Figura 140 mostra o mapa da umidade relativa para o período de verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31. A distribuição da umidade relativa neste caso não difere muito da distribuição quando se consideram todos os pontos.

Figura 140 - Mapa da umidade relativa no período de verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

5.6.3 Mapas da umidade absoluta

Mapas de distribuição da umidade absoluta durante as quatro estações estão representados nas Figuras 141 e 142. Semelhante aos mapas da umidade relativa, nota-se que o período de inverno foi o período com menor umidade absoluta média, enquanto o verão e a primavera apresentaram maiores valores da umidade absoluta média. Quanto à umidade relativa, período de outono teve valores médios próximos às estações de verão e primavera. No entanto, em termos da umidade absoluta, o período de outono foi mais seco em comparação com estes dois períodos. A escala de cores varia entre $6,02 \text{ g/m}^3$ (valor médio mínimo, extrapolado para o Ponto 37 no período de inverno) e $14,79 \text{ g/m}^3$ (valor médio máximo, registrado no Ponto 2 no período de verão).

Figura 141 – Mapas da umidade absoluta: períodos de verão e outono

Fonte: Autora (2019)

Figura 142 – Mapas da unidade absoluta: períodos de inverno e primavera

Fonte: Autora (2019)

Para visualizar melhor as diferenças entre os pontos, a Figura 143 mostra a distribuição da umidade absoluta no período de verão. Outros períodos não serão apresentados, dado que os pontos mostram comportamentos semelhantes durante todas as estações.

Figura 143 – Mapa da umidade absoluta no período de verão

Fonte: Autora (2019)

A região com a menor umidade absoluta média no verão é, novamente, a região sudeste da cidade com os Pontos 10, 35, 36 e 37. Destacam-se os Pontos 2 e 11 com a maior umidade absoluta média, seguidos pelo Ponto 34 na região norte da cidade. Este ponto apresenta 39% da superfície permeável no entorno e está localizado na periferia da cidade, num conjunto residencial com vários lotes ainda não edificados e bastante área vegetada.

Os mapas da umidade absoluta sem considerar os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31 são apresentados nas Figuras 144 e 145. Não houve mudança significativa em relação aos mapas elaborados considerando todos os pontos.

Figura 145 – Mapas da umidade absoluta sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31: períodos de inverno e primavera

Fonte: Autora (2019)

A Figura 146 mostra a distribuição da umidade absoluta no período de verão sem considerar os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31. Novamente, o mapa está muito parecido com o mapa com todos os pontos. A região sudeste apresenta umidade absoluta média menor, e os Pontos 2, 11 e 34 a maior.

Figura 146 – Mapa da umidade absoluta no período de verão sem os Pontos 6, 12, 23, 26, 30 e 31

Fonte: Autora (2019)

5.6.4 Mapas térmicos para os dias de referência

A Figura 147 apresenta os mapas térmicos para o dia de referência no período de verão (21. 02. 2017) com base em três conjuntos de dados: temperaturas medidas às 15h e às 21h e as diferenças máximas com a temperatura registrada na estação da Embrapa (intensidade de ilha de calor urbana). Nota-se que às 15h os locais com as temperaturas mais altas foram os Pontos 6, 7 e 10, enquanto o Ponto 2 apresentou a menor temperatura. Já no horário de 21h, os Pontos 1, 7 e 10 apresentaram temperaturas maiores e o Ponto 2 novamente teve a temperatura menor. Justamente o Ponto 2 foi o ponto com a menor diferença em comparação com a Embrapa, seguido pelo Ponto 3. Ilhas de calor de maior intensidade foram registradas nos Pontos 1, 7 e 10. O Ponto 1, como mencionado no item 5.1.3, apresenta 42% da superfície permeável no entorno e as diferenças altas foram provavelmente registradas devido às propriedades dos materiais utilizados no entorno. Os Pontos 7 e 10 têm entornos com poucas superfícies permeáveis e pouca vegetação.

Figura 147 – Mapas térmicos para o dia 21. 02. 2017

Fonte: Autora (2019)

A Figura 148 ilustra os mapas térmicos para o dia 30. 05. 2017, dia de referência no período de medição de outono. Nota-se que às 15h as maiores temperaturas foram registradas nos Pontos 4 e 16. O Ponto 4, ponto de referência, apresenta 12% da área permeável no entorno, enquanto o local de instalação do instrumento no Ponto 16 está rodeado por uma área densamente construída, mesmo apresentando 22% da superfície permeável na área de influência. Às 21h as temperaturas mais altas foram registradas nos Pontos 12 e 16 e o Ponto 12 apresentou a maior diferença com a estação da Embrapa. No entanto, esta diferença foi registrada no período matutino, provavelmente devido à exposição à radiação solar direta do instrumento. Sem considerar esta ocorrência, a ilha de calor com maior intensidade foi registrada no Ponto 16.

Figura 148 – Mapas térmicos para o dia 30. 05. 2012

Fonte: Autora (2019)

Os mapas térmicos para o dia 04. 09. 2017 (dia de referência para o período de inverno) são representados na Figura 149. Às 15 horas a temperatura mais baixa foi registrada no Ponto 28, o qual apresenta 27% da área permeável no entorno e está localizado perto de um córrego. A temperatura mais alta foi medida no Ponto 27, ponto com 15% da área permeável. No período noturno, às 21h, as temperaturas foram maiores nos Pontos 23 e 26 e a menor no Ponto 28. O Ponto 23 apresentou a maior diferença com a estação da Embrapa e as características deste ponto são apresentadas no item 5.3.4.

Figura 149 – Mapas térmicos para o dia 04. 09. 2017

Fonte: Autora (2019)

Na Figura 150 podem ser vistos os mapas térmicos para o dia de referência durante a medição de primavera (dia 14. 12. 2017). As maiores temperaturas às 15h foram medidas nos Pontos 31 e 32. O Ponto 32 apresenta 22% da área permeável no entorno, enquanto o Ponto 31 têm características semelhantes aos Pontos 16 e 23 (entorno imediato do local da instalação do instrumento densamente edificado). Às 21h as temperaturas foram uniformes variando entre 26,3 e 27,9 °C. Destaca-se a região sudeste da cidade com temperaturas maiores (Ponto 33 e 35). Precisamente estes pontos apresentaram ilhas de calor de maior intensidade.

Figura 150 – Mapas térmicos para o dia 14. 12. 2017

Fonte: Autora (2019)

6 Considerações finais

Atualmente, o crescimento das áreas urbanas ocorre quase paralelamente com a degradação do ambiente natural. Como consequência do desenvolvimento urbano descontrolado, surgem vários problemas para os habitantes destas áreas, sendo ilhas de calor um deles. Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo analisar o impacto dos revestimentos urbanos horizontais na formação das ilhas de calor urbanas na cidade de São Carlos, SP. Trabalhos como este, que visam compreender os aspectos ambientais do crescimento urbano, são muito importantes para as cidades de porte médio, como São Carlos, tendo em vista que estas cidades ainda estão em fase de crescimento e podem aproveitar diretrizes para um desenvolvimento mais sustentável.

Com base nos dados coletados durante quatro períodos de medições em quatro estações do ano, verificou-se a influência da permeabilidade dos revestimentos urbanos na variação da temperatura do ar e na formação de ilhas de calor urbanas. Os valores da temperatura do ar foram mais elevados nos pontos em cujos entornos predominam materiais impermeáveis.

Identificaram-se ilhas de calor nos horários noturnos em todos os períodos de medição. As temperaturas noturnas foram sempre mais baixas na área rural, enquanto durante o dia as temperaturas em alguns pontos urbanos foram menores. A intensidade de ilha de calor foi maior na primavera e verão, e menor no inverno. A maior intensidade de ilha de calor acontece sempre no período noturno, por volta do

pôr do sol ou depois, e estes momentos de pico variam de acordo com o horário do pôr do sol, no geral. No inverno, os horários de maior intensidade de ilha de calor foram mais variados, atingindo o pico de madrugada em alguns pontos. Ressalta-se que o período de medição no outono foi o mais frio e não daquele no inverno.

No verão e primavera foram registradas ilhas de calor urbanas de até 6 °C e 6,4 °C respectivamente e no outono até 4,6 °C. Tirando os pontos com comportamento diferenciado e características específicas do entorno, no inverno a ilha de calor atingiu o valor de 4,5 °C. As ilhas de calor foram mais pronunciadas nos locais densamente construídos, com poucas superfícies permeáveis e pouca vegetação. Nos locais com maior presença dos revestimentos permeáveis e vegetação (e proximidade dos fluxos de água em alguns casos), ocorreram ilhas de calor de intensidade entre 2 °C e 3,5 °C.

Confirmaram-se, portanto, as afirmações de Costa (2007) e Romero (2001) de que os revestimentos urbanos impermeáveis propiciam o aquecimento do ar, pelo impedimento do processo da evaporação da água. Considerando que a umidade, tanto relativa como absoluta, foi menor nos pontos com maior porcentagem dos revestimentos horizontais impermeáveis, supõe-se que isso ocorre devido ao impedimento do processo da evaporação da água, como afirmado por Romero (2001). Verificou-se, portanto, a importância de considerar a implicação climática da permeabilidade dos revestimentos urbanos no planejamento urbano, a fim de diminuir o efeito de ilhas de calor urbanas e melhorar o conforto térmico em áreas urbanas. Desse modo, considera-se que os principais objetivos definidos no início da pesquisa foram alcançados.

A permeabilidade dos revestimentos horizontais numa determinada região não é o único fator condicionante do microclima nessa região. Vários outros fatores da ocupação urbana, tais como a altitude, a porosidade e rugosidade das edificações, as condições de ventilação e os materiais dos revestimentos verticais impactam de uma maneira complementar nas condições microclimáticas de um local. Além disso, cada

tipo de material tem um comportamento termofísico específico, o que significa que nem todos os materiais impermeáveis absorvem e emitem a mesma quantidade de calor. Similarmente, os materiais permeáveis, por exemplo, solo nu e área vegetada, têm características diferenciadas e influenciam a temperatura e a umidade de maneiras diferentes. Existem também diferenças entre as áreas vegetadas somente com grama e outras com grama e árvores, pois árvores têm mais superfície disponível para realizar a evapotranspiração e proporcionam sombra. A presença de corpos d'água impacta significativamente na umidade no seu entorno. No entanto, como verificado no presente trabalho, o coeficiente de permeabilidade ou simplesmente a porção dos materiais permeáveis já é um indicador de suscetibilidade de um local à formação de ilhas de calor urbanas.

Sugere-se, portanto, a revisão do Coeficiente de Permeabilidade estabelecido pelo Plano Diretor do Município São Carlos. A percentagem da permeabilidade definida pelo Plano Diretor de 2017 é 15% para a zona urbana. No entanto, os resultados desta pesquisa mostraram o aumento da temperatura do ar nos locais com permeabilidade menor de 20%. O planejamento urbano adequado tem um grande potencial para a redução do efeito de ilha de calor urbana. Neste sentido, a presente pesquisa traz uma contribuição importante em fornecer subsídios para o planejamento urbano em cidades de porte médio como São Carlos. Assim sendo, recomenda-se a consideração dos parâmetros do clima urbano como uma das principais tarefas da legislação vigente.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

Quanto às limitações desta pesquisa, vale ressaltar que não foram considerados outros fatores condicionantes do clima urbano. Também não foi considerado o conforto térmico dos usuários, o qual requer outra abordagem e poderia contribuir ao entendimento melhor das condições climáticas da cidade. Isso poderia dar

continuidade a esta pesquisa, tanto como a análise das temperaturas superficiais a partir das imagens térmicas, obtidas através de satélite ou câmeras infravermelhas.

Outra metodologia, que provavelmente vai ser utilizada cada vez mais e foi aplicada parcialmente neste estudo, é o levantamento fotográfico com drones, o qual permite uma classificação precisa dos revestimentos urbanos horizontais. Junto com o levantamento das variáveis climáticas, esta metodologia proporciona uma análise melhor das respostas climáticas aos materiais do ambiente construído e suas características.

Finalmente, salienta-se que durante este estudo foi possível realizar somente 10 medições simultâneas, devido à disponibilidade dos equipamentos e locais para a instalação dos equipamentos. Isso resultou na necessidade de extrapolar uma parte dos dados. No entanto, a metodologia apresentada e testada nessa dissertação pode ser aplicada em uma escala maior ou em outras realidades, tanto em outras cidades quanto em outras regiões da cidade de São Carlos, onde ainda falta fazer estudos semelhantes.

Referências bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.220 – Desempenho térmico de edificações**. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

_____. **NBR 15.220 – Desempenho térmico de edificações**. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

ABREU, L. V., LABAKI, L. C. As árvores e a mitigação da temperatura do ar: qual a extensão de sua influência? In: XI ENCONTRO NACIONAL E VIII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2011, Búzios. **Anais...** Búzios: ANTAC, 2011.

AGUIAR, R. L. **Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana de São Carlos-SP: contribuição ao planejamento**. Dissertação (Mestrado) – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

AKBARI, H., DAVIS, S., DORSANO, S., HUANG, J., WINERT, S. **Cooling our Communities – A Guidebook on Tree Planting and Light Colored Surfacing**. US Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Climate Change Division, 1992.

AKBARI, H., MATTHEWS, H. D. Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. **Energy and buildings**, v. 55, p. 2-6, 2012.

ALMEIDA, E. M. A. **A configuração urbana e sua relação com os microclimas: estudo de frações urbanas na cidade de Maceió**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/noticia/?id=269950>> Acesso em: 31. 07. 2017.

ASSIS, E. S. **Impactos da forma urbana na mudança climática: método para a previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – FAU, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

BARBIRATO, G. M., SOUZA, L. L., TORRES, S. C. **Clima e Cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos**. Maceió: EDUFAL, 2007.

BARBOSA, A. **Urbanismo bioclimático: Efeitos do desenho urbano na sensação térmica**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

BARBOSA, R. V. R. **Estudo do campo térmico urbano de São Carlos (SP): análise da intensidade da ilha de calor urbano em episódio de verão**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

BARBOSA, R. V. R., FERNANDES, M. F., MORAIS, C. S., BARBIRATO, G. M. A influência de massas d'água em ambiente climático urbano de Maceió – Alagoas. In: VI ENCONTRO NACIONAL E III ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2001, São Pedro. **Anais...** São Pedro: ANTAC, 2001.

BARBUGLI, R. A. **Influência do ambiente construído na distribuição das temperaturas do ar em Araraquara/SP**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

BARTHOLOMEI, C. L. B. **Influência da vegetação no conforto térmico urbano e no ambiente construído**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, 2003.

BERTACCHI, M. L., FARIA, J. R. G. Ilhas de calor na cidade de Bauru (SP): as diferenças de temperatura e a configuração do solo local. In: VII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E III CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANTAC, 2003.

BRANDÃO, A. M. P. M. **Tendências e oscilações climáticas na área metropolitana do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1987.

BRANCO, A. E. C., ARAÚJO, V. M. D. O desenho urbano e sua relação com o microclima: um estudo comparativo entre duas áreas centrais em Teresina – Piauí. In: VI ENCONTRO NACIONAL E III ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2001, São Pedro. **Anais...** São Pedro: ANTAC, 2001.

BUDHU, M. **Soil Mechanics and Foundations**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

CARVALHO, M. M. **Clima urbano e vegetação: estudo analítico e prospectivo do Parque das Dunas em Natal**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2001.

COELBA – Concessionária do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica no Estado de Bahia. **Guia de Arborização Urbana**. Bahia: Diretoria de Gestão de Ativos, Departamento de Planejamento dos Investimentos, Unidade de Meio Ambiente, 2002.

COSEO, P., LARSEN, L. How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain Urban Heat Islands in Chicago. **Landscape and Urban Planning**, vol. 125, p. 117-129, 2014.

COSTA, A. D. L. **O revestimento de superfícies horizontais e sua implicação microclimática em localidade de baixa latitude com clima quente e úmido**. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2007.

DANNI, I. M. A ilha térmica de Porto Alegre. Contribuição ao estudo de clima urbano. **Boletim gaúcho de geografia**, Porto Alegre, n. 5, p. 33-48, 1980.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DEILAMI, K., KAMRUZZAMAN, MD. Modelling the urban heat island effect of smart growth policy scenarios in Brisbane. **Land Use Policy**, vol. 64, p. 38-55, 2017.

DEVESCOVI, R. C. B. **Urbanização e acumulação**: um estudo sobre a cidade de São Carlos. Dissertação (Mestrado em Administração e Planejamento Urbano), EAESP/FGV, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DUARTE, D. H. S. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental**. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2000.

EFTHYMIOU, C., SANTAMOURIS, M., KOLOKOTSA, D. KORAS, A. Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation. **Solar Energy**, vol. 130, p. 148-160, 2016.

ELIASSON, I. Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. **Atmospheric Environment**, vol. 30, n. 3, p. 379-392, 1996.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/pecuaria-sudeste/infraestrutura>>. Acesso em: 15. 06. 2019.

EPA – U. S. Environmental Protection Agency. **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies**. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-05/documents/reducing_urban_heat_islands_ch_1.pdf>. Acesso em: 25. 02. 2019.

FIALHO, E. S. **Ilha de calor em cidade de pequeno porte: Caso de Viçosa, na Zona da Mata Mineira**. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FONTES, M. S. G. C. **Efeito climático das áreas de fundo de vale no ambiente urbano: o caso de São Carlos - SP**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

FONTES, M. S. G. C., DELBIN, S. A qualidade climática dos espaços públicos urbanos: um estudo de caso na cidade de Bauru-SP. In: VI ENCONTRO NACIONAL E III

ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2001, São Pedro. **Anais...** São Pedro: ANTAC, 2001.

GALUSIC, B., DORNELLES, K. A., Estudo da ilha de calor urbana em São Carlos/SP: Como a permeabilidade dos revestimentos urbanos horizontais intervêm nas variações da temperatura do ar. In: XIV ENCONTRO NACIONAL E X ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2017, Balneário Camboriu. **Anais...** Balneário Camboriu: ANTAC, 2017.

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

GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. London: Applied Science Publishers, 1981.

HUANG, Y. J., AKBARI, H., TAHA, H. The wind-shielding and shading effects of trees on residential heating and cooling requirements. ASHRAE Winter Meeting. **ASHRAE Proceedings**, 96 (pt. 1), 1990.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **São Carlos**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-carlos/panorama>>. Acesso em: 07.11.2018.

IZARD, J. L., GUYOT, A. **Arquitectura bioclimática**. México: Gustavo Gili, 1983.

KARLESSI, T., SANTAMOURIS, M., SYNNEFA, A., ASSIMAKOPOULOS, D., DIDASKALOPOULOS, P., APOSTOLAKIS, K. Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat island and cool buildings. **Building and Environment**, vol. 46, p. 570-576, 2011.

KLOK, E. J. (L.), KLUCK, J. Reasons to adapt urban heat (in the Netherlands). **Urban Climate**, vol. 23, p. 342-351, 2018.

KLOK, L., ZWART, S., VERHAGEN, H., MAURI, E. The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 64, p. 23-29, 2012.

KRÜGER, E. L., PEARLMUTTER, D. The effect of urban evaporation on building energy demand in arid environment. **Energy and Buildings**, vol. 40, p. 2090-2098, 2008.

LANDSBERG, H. E.

Atmospheric changes in a growing community (The Columbia, Maryland experience). **Urban Ecology**, vol. 4, p. 53-81, 1979.

_____. **The Urban Climate**. New York: Academic Press, 1981.

LO, C. P., QUATTROCHI, D. A. Land-Use and Land-Cover Change, Urban Heat Island Phenomenon, and Health Implications: A Remote sensing approach. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 69, n. 9, p. 1053–1063, 2003.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor da metrópole paulistana**. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

LOWRY, W. P. **Weather and Life**: an introduction to biometeorology. New York: Academic Press, 1969.

MASIERO, É. **Análise da influência de corpos d'água em microclimas urbanos: Estudo de caso em São José do Rio Preto, SP**. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

MEIER, A. K. Measured Cooling Savings from Vegetative Landscaping. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, CA, American Council for an Energy Efficient Economy. **Proceedings...** 1990.

MENDONÇA, F. de A. **O Clima e o Planejamento Urbano das Cidades de Porte Médio e Pequeno**: Proposições Metodológicas para Estudo e sua Aplicação à Cidade de Londrina/PR. 322f. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia FFLCH/Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

MENDONÇA, F., DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MITCHELL, J. M. The Temperature of Cities. **Weatherwise**, v. 14 (6), p. 224-258, 1961.

MIZUNO, M., NAKAMURA, Y., MURAKAMI, H., YAMAMOTO, S. Effects of land use on urban horizontal atmospheric temperature distributions. **Energy and Buildings**, n. 15-16, p. 165-176, 1990/91.

MODNA, D. **Influência das áreas verdes urbanas na temperatura e na umidade do ar em São Carlos – SP**. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade de São Paulo – EESC, São Carlos, 2004.

MODNA, D., VECCHIA, F. Calor e Áreas Verdes: um estudo preliminar do clima de São Carlos, SP. VII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E III CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANTAC, 2003.

MONTEIRO, C. A. F, **A dinâmica climática e as chuvas do Estado de São Paulo**. Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e clima urbano**. (Tese - Livre docência), Universidade de São Paulo, Faculdade de filosofia, letras e ciências humanas - Departamento de Geografia, São Paulo, 1976. 181 p.

NAKATA-OSAKI, C. M., SOUZA, L. C. L., RODRIGUES, D. S. Uma ferramenta para cálculo da máxima intensidade da ilha de calor noturna. In: XIII ENCONTRO NACIONAL E IX ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2015, Campinas. **Anais...** Campinas: ANTAC, 2015.

NERY, J. M. F. G., ANDRADE, T. C. Q., LIRA, I. S. Temperatura do ar e padrões de ocupação em Salvador. In: VII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E III CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANTAC, 2003.

NEVES, A. P. D. **São Carlos: na esteira do tempo**. São Carlos: Edufscar Imprensa Oficial, 2007.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979.

NOGUEIRA, A. M. P. **Configuração urbana e microclimas: estudo em loteamento horizontal de Maceió-Alagoas**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

NOWAK, A. S., COLLINS, K. R. **Reliability of Structures**. Boston: McGraw Hill, 2000.

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparisons of scale model and field observation. **Journal of Climatology**, v. 1, p. 237-254, 1981.

_____. The energetic basis of the urban heat island. **Quartely Journal of the Royal Meteorology Society**, vol. 108, n. 455, p. 1-24, 1982.

_____. **Boundary Layer Climates**. Routledge, 1987.

_____. Street Design and Urban Canopy Layer Climate. **Energy and Buildings**, n. 11, p. 103 – 113, 1988.

_____. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. WMO/TD-No. 1250, 2006.

OKE, T. R., MILLS, G., CHRISTEN, A., VOOGT, J. A. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

OLIVEIRA, P. M. P. **Cidade apropriada ao clima: a forma urbana como instrumento de controle do clima urbano**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 1988.

ONSET. Disponível em: < www.onsetcomp.com/products/data-loggers/h08-003-03 > Acesso em: Fevereiro 2017.

Organização das Nações Unidas. Disponível em: < <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html> >. Acesso em: 23. 06. 2019.

PEZZUTO, C. C. **Avaliação do ambiente térmico nos espaços urbanos abertos. Estudo de caso em Campinas, SP**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2007.

PISELLO, A. L., ROSSI, F., NICOLINI, A., FILIPPONI, M., PALOMBO, M. Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model. **Applied Energy**, vol. 114, p. 621-631, 2014.

PITTON, S. E. C. **As cidades como indicadores de alterações térmicas**. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos. **Dados da cidade (Geográfico e Demográfico)**. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/conheca-sao-carlos/115442-dados-da-cidade-geografico-e-demografico.html>>. Acesso em: 07. 11. 2018.

PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos. **Lei N° 18.053: Plano Diretor do Município de São Carlos**. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/pdf/2017/pde/lei18053%20-%20Plano%20Diretor%20-%20digital.pdf>>. Acesso em: 07.11.2018.

QGIS User Guide. Disponível em: <https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/user_manual/index.html>. Acesso em: 25. 02. 2019.

QIN, Y. A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 52, p. 445-459, 2015.

REBELATTO, D. A. N. **A influência do processo de ocupação do solo na bacia do rio Gregório em São Carlos (SP) sobre a incidência de enchentes nas áreas próximas ao mercado municipal**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

REIS, P. O. B. **Incorporação de diretrizes bioclimáticas e de acessibilidade no projeto urbano. Estudo de caso na cidade de Jaboticabal, SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. São Paulo: Projeto, 1988.

_____. **Arquitetura do lugar: uma visão bioclimática**. São Paulo: Nova Técnica Editorial, 2011.

ROSENFELD, A., H., ROMM, J. J. AKBARI, H., LLOYD, A. C. Painting the town white and green. **Journal Technology Review**, vol. 100, ed. 2, p. 52-59, 1997.

SAMPAIO, A. H. L. **Correlação entre uso do solo e ilhas de calor no ambiente urbano: o caso de Salvador**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

SANTAMOURIS, M., SYNNEFA, A., KARLESSI, T. 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.

SAYDELLES, A. P. **Estudo do campo térmico e das ilhas de calor urbano em Santa Maria-RS**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SHINZATO, P. **O impacto da vegetação nos microclimas urbanos**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SILVA, L. F. D. **Estudo do campo térmico da cidade São Carlos (SP) em um episódio climático de inverno**. Tese (Doutorado Engenharia Ambiental) – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SOUZA, L. C. L. **Influência da geometria urbana na temperatura do ar ao nível do pedestre**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

TAN, Z., LAU, K. K., NG, E. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. **Energy and Buildings**, vol. 114, p. 267-274, 2016.

TARIFA, J. R. Análise comparativa da temperatura e umidade na área urbana e rural de São José dos Campos (SP). **Geografia**, Rio Claro, v. 2, n. 4, p. 59-80, 1977.

TOLENTINO, M. **Estudo crítico sobre o clima da região de São Carlos**. São Carlos: Concurso de monografias municipais, 1967.

TUMANOV, S., STAN-SION, A., LUPU, A., SOCI, C., OPREA, C. Influences of the city of Bucharest on weather and climate parameters. **Atmospheric Environment**, vol. 33, n. 24, p. 4173-4183, 1999.

VASCONCELOS, J. S. **Índices urbanísticos e o ambiente térmico: estudo em uma fração da -cidade de São Carlos-SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

VECCHIA, F. A. S. **Clima e ambiente construído: a abordagem dinâmica aplicada ao conforto humano**. Tese (Doutorado em Ciências com ênfase em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

VIDAL, R. D. M. Análise bioclimática da área do Campus da UFRN. In: IV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, 1997.

VITRUVIUS, P. **Ten books on architecture**. New York: Cambridge University Press, 2002.

VOOGT, J. A. **Urban Heat Islands: Hotter Cities**. Disponível em: <www.actionbioscience.org/environment/voogt.html> Acesso em: 23. 07. 2017.

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

WILMERS, F. Effects of Vegetation on Urban Climates and Buildings. **Energy and Buildings**, v. 15-16, p. 507-514, 1990/91.

WONG, N. H., TAN, E., YUSUF, S. K. Influence of water body on air temperature in Singapore Climate. In: ICUC8 – 8th International Conference on Urban Climates, 2012, Dublin. **Proceedings...** Dublin: UCD, 2012.

YAGHOUBIAN, N., KLEISSL, J. Effect of reflective pavements on building energy use. **Urban Climate** v. 2, p. 25-42, 2012.

YOSHIDA, A., YASUDA, R., TAKENAKA, K., KINOSHITA, S. Mobile Observation of Air Temperature and Humidity Distributions in Osaka-Nakanoshima Area during Summer Sea Breeze. In: ICUC8 – 8th International Conference on Urban Climates, 2012, Dublin. **Proceedings...** Dublin: UCD, 2012.