



Variabilidade da temperatura de superfície diurna entre as zonas climáticas locais (LCZ)

Um estudo para a área urbana do Distrito Federal

Discente: Daniela Rocha Werneck

Orientadora: Prof. Dra. Marta Romero

Universidade de Brasília
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Variabilidade da temperatura de superfície diurna entre as zonas climáticas locais (LCZ): um estudo para a área urbana do Distrito Federal

Daniela Rocha Werneck

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo.
Área de concentração: Tecnologia, ambiente e sustentabilidade.

Orientadora: Prof. Dra. Marta Adriana Bustos Romero

Brasília
2022

Universidade de Brasília
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Variabilidade da temperatura de superfície diurna entre as zonas climáticas locais (LCZ): um estudo para a área urbana do Distrito Federal

Daniela Rocha Werneck

Projeto de tese apresentado como requisito para obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo. Área de concentração: Tecnologia, ambiente e sustentabilidade.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Marta Adriana Bustos Romero – PPG-FAU-UNB (Presidente)

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista – IG-UNB (Examinador interno)

Prof. Dr. João Paulo Assis Gobo – UNIR (Examinador externo)

Prof. Dra. Fabiana Lourenço e Silva Ferreira – IEA-USP (Examinadora externa)

Prof. Dr. Caio Frederico e Silva – PPG-FAU-UNB (Suplente)

Brasília
2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Rv Rocha Werneck, Daniela
Variabilidade da temperatura de superfície diurna entre
as zonas climáticas locais (LCZ): um estudo para a área
urbana do Distrito Federal / Daniela Rocha Werneck;
orientador Marta Romero. -- Brasília, 2022.
174 p.

Tese (Doutorado - Doutorado em Arquitetura e Urbanismo)
- Universidade de Brasília, 2022.

1. Zonas Climáticas Locais. 2. Temperatura de superfície.
3. Clima urbano. 4. Morfologia urbana. 5. Vegetação urbana.
I. Romero, Marta, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me guiou nesse caminho para alcançar esta meta, e às minhas professoras e professores pela minha formação completa na escola e universidade públicas. Em especial à minha orientadora Profa.

Marta Romero.

Aos meus pais Joval e Maria do Carmo, meu marido Frederico, minha irmã Brunna e meu irmão Daniel, pelo apoio e compreensão para tornar possível essa concretização. Dedico também aos meus avôs e avós, sempre nas minhas lembranças mais amorosas.

Aos professores Caio Silva, Gustavo Baptista, João Gobo e Erondina Azevedo pelas orientações e dedicação.

Aos amigos do Lasus e do PPG, em especial aos queridos João Francisco, Thiago, Paola, Abner, Rejane e Valmor.

À Universidade de Brasília.

Aos pesquisadores que compartilharam seus trabalhos, scripts, algoritmos e aulas virtuais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de pesquisa de doutorado.

“What is the city but the people?”

William Shakespeare

RESUMO

Variabilidade da temperatura de superfície diurna entre as zonas climáticas locais (LCZ): um estudo para a área urbana do Distrito Federal

Cidades modificam o clima em diferentes escalas de análise, criando uma condição distinta definida como clima urbano. Também são impactadas por alterações climáticas de outras escalas, como regional e global. Nota-se a influência do clima em questões como o bem-estar das pessoas, energia, saúde e poluição. Logo, deve estar no foco de trabalho do arquiteto urbanista. As transformações nos padrões de urbanização e suas interações com o clima urbano carecem de uma produção de dados para descrever o tecido urbano e captar diferentes respostas climáticas. Assim, uma descrição coerente com a realidade da cidade, tanto em escala quanto em forma e função, é necessária para o desenvolvimento de estratégias de mitigação dos efeitos de ilhas de calor, por exemplo. Partindo desse aspecto, o objetivo principal é relacionar a estrutura espacial das zonas climáticas locais (LCZ) da macrozona urbana com a temperatura de superfície, índices de vegetação e umidade no contexto climático do Distrito Federal. Para uma visão na escala da cidade, foram adotadas imagens do satélite Landsat 8 para gerar a classificação de zonas climáticas locais com a ferramenta LCZ Generator. Dados do mesmo satélite processados no Google Earth Engine foram utilizados na caracterização espectral da vegetação (índice EVI), umidade (índice NDMI) e temperatura de superfície nos períodos quente-seco e quente-úmido. A integração final dos dados espectrais e espaciais obtidos foi realizada por meio de estatística zonal no programa QGIS. Análises estatísticas de distribuição de dados, correlação e de ranqueamento de postos também avaliaram se o delineamento das LCZ resultou em valores espectrais diferentes entre as classes. Por último, realizou-se uma análise exploratória de dados espaciais (AEDE) para identificar padrões e interdependência para a temperatura de superfície. Notou-se que a temperatura de superfície é mais elevada e com respostas espacialmente variadas nas classes urbanas, principalmente onde há menor presença de vegetação sadia e menor teor de umidade na vegetação. A LCZ 8 (aberta com grandes edificações) e LCZ 3 (compacta de baixa elevação) se destacaram com temperatura de superfície média mais elevada dentre as classes de tipologias urbanas. Na AEDE, observou-se regiões com dependência espacial, sendo mais evidentes na estação chuvosa. As evidências demonstram que a classificação de LCZ pode ser útil como ferramenta de apoio para monitorar e promover uma hierarquia de áreas a serem priorizadas na implementação de estratégias de mitigação de altas temperaturas.

Palavras-chave: 1. Zonas climáticas locais; 2. Temperatura de superfície; 3. Clima urbano; 4. Morfologia urbana; 5. Vegetação urbana.

ABSTRACT

Variability of daytime surface temperature among local climatic zones: a study for the urban area of the Federal District

Cities modify the climate by creating a distinct condition defined as an urban climate but are also impacted by regional and global climate change. Also, the influence of climate is often related to people's well-being, energy, health, and pollution. Therefore, it should be in the focus of the urban architect's work. The transformations in urbanization patterns and their interactions with the urban climate lack data production to describe the urban fabric and capture different thermal responses. Based on this aspect, the main objective of this research was to relate the spatial structure of local climatic zones (LCZ) of the urban macrozone with land surface temperature, vegetation, and humidity indices in the climatic context of the Federal District. It was also aimed at disseminating spatialized information on urban heating in order to support urban architects and planners in making decisions about climate-sensitive projects. For a view of the scale of the city, images of the Landsat 8 satellite were adopted to generate the classification of local climate zones with the LCZ Generator tool. Data from the same satellite processed in Google Earth Engine were used in the spectral characterization of vegetation (EVI index), humidity (NDMI index), and surface temperature in dry and rainy seasons. The final integration of the spectral and spatial data obtained was performed by means of zonal statistics in the QGIS program. Statistical analyses of data distribution, correlation and rank of posts also evaluated whether the delimitation of the LCZ resulted in different spectral values between the classes. Finally, spatial autocorrelation data analysis was performed to identify patterns and interdependence for land surface temperature. It was noticed that the land surface temperature is higher and with spatially varied responses in urban classes, especially where there is less presence of healthy vegetation and lower moisture content in the vegetation. The LCZ 8 (large low-rise) and LCZ 3 (compact low-rise) stood out with higher average land surface temperature among the classes of urban typologies. In the autocorrelation analysis, regions with spatial dependence were observed, being more evident in the rainy season. Evidence shows that LCZ classification can be used as a tool to monitor and promote a hierarchy of areas to be prioritized in the implementation of urban heat mitigation strategies.

Keywords: 1. Local climate zones; 2. Land surface temperature; 3. Urban climate; 4. Urban morphology; 5. Urban vegetation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de população urbana x rural no Brasil com destaque para o ano 2018.	15
Figura 2. Escala espacial de trabalho.	19
Figura 3. Fluxograma do método de análise.	20
Figura 4. Representação das três escalas climáticas da atmosfera urbana.	27
Figura 5. Escalas climáticas relacionadas às escalas de projeto do arquiteto e urbanista.	30
Figura 6. Imagem termal de Atlanta – EUA exemplificando o aquecimento da superfície urbana.	31
Figura 7. Variáveis relacionadas ao desenvolvimento de ICU.	32
Figura 8. Espectro eletromagnético.	33
Figura 9. Características simplificadas das superfícies urbanas.	37
Figura 10. Sazonalidade das árvores caducas.	38
Figura 11. Corredores de vento principais e secundários (nível da vizinhança e nível da cidade).	44
Figura 12. Bandas do espectro eletromagnético com destaque para luz visível.	52
Figura 13. Imagens de Providence/Rhode Island – EUA captadas pelo sensor <i>Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer</i> (MODIS) acoplado no satélite Aqua e Terra da Nasa.	53
Figura 14. Imageamento de uma cena urbana com quatro diferentes resoluções espaciais.	54
Figura 15. Imagem termal do comércio local no Plano Piloto (CLN202) a partir de uma câmera termográfica portátil (horários: 15h e 20h).	55
Figura 16. Esquema do balanço de energia de uma área urbana hipotética.	56
Figura 17. Curvas espectrais da vegetação sadia e estressada.	60
Figura 18. Estimativa de NDVI e Biomassa para inverno (a) e verão (b) de Lisboa a partir de imagens do Landsat 8 para os anos de 2016 (b) e 2017 (a).	63
Figura 19. JK na capa da Times de 13 de fevereiro de 1956.	68
Figura 20. Catálogo Brazil Builds resultante da exposição do mesmo nome.	68
Figura 21. Localização do novo Distrito Federal.	69
Figura 22. Crítica sobre o acesso ao sol observado nas fachadas dos edifícios da cidade tradicional.	70
Figura 23. Estudo sobre a altura e afastamento entre os edifícios.	72
Figura 24. Esquema da cidade linear de Soria y Mata para Madrid contrastando com a trama urbana tradicional existente nas extremidades do eixo.	74
Figura 25. Eixos principais do Plano Piloto de Lucio Costa.	74
Figura 26. Desenho de Lucio Costa para a área residencial com faixa de arborização. ...	75
Figura 27. Proposta de Perry de unidade de vizinhança para reabilitação urbana em Long Island (EUA).	75
Figura 28. As quatro escalas do Plano Piloto.	76
Figura 29. Evolução da mancha urbana do DF.	79
Figura 30. Padrões mórficos do DF e seus tipos de malha urbana.	80
Figura 31. Classificação de padrões de estruturas urbanas para o DF, referente ao ano de 2009.	82
Figura 32. Principais tipos de vegetação do Cerrado.	82

Figura 33. Gráfico comparativo de precipitação acumulada.	86
Figura 34. Gráfico comparativo de temperatura mínima média.....	87
Figura 35. Gráfico comparativo de temperatura média do ar.	87
Figura 36. Gráfico comparativo de temperatura máxima média.	87
Figura 37. Gráfico comparativo das médias de umidade relativa do ar.....	88
Figura 38. Histograma de temperatura do ar horária para o ano de 2020 com destaque para a classe de maior ocorrência.	89
Figura 39. Gráfico de linhas dos dados de temperatura do ar registrados ao longo de 2020.	90
Figura 40. Histograma de umidade relativa do ar para o ano de 2020 com destaque para a faixa mais frequente.....	90
Figura 41. Gráfico de linhas dos dados de umidade relativa do ar registrados ao longo de 2020.	90
Figura 42. Gráfico de linhas dos dados horários de velocidade do vento registrados ao longo de 2020.	91
Figura 43. Histograma de velocidade do vento para o ano de 2020 com destaque para a faixa mais frequente.	92
Figura 44. Intensidade da ICU diurna para o ano de 2018.	94
Figura 45. Variabilidade sazonal da intensidade da ICU.....	94
Figura 46. Mudança anual da intensidade da ICU.....	94
Figura 47. Ranqueamento das projeções das maiores alterações do UTCI, referente ao mês de julho.....	97
Figura 48: Estrutura das classes do sistema LCZ. Nota-se H/W para a relação altura/largura (<i>height/width</i>) do arranjo dos elementos.	105
Figura 49: Definição das classes do sistema LCZs.	106
Figura 50: Classificação preliminar gerada no classificador LCZ do Saga Gis.	108
Figura 51: Fluxograma geral do método de mapeamento de LCZs.....	110
Figura 52: Fluxograma para discriminação de classes.....	111
Figura 53: Digitalização das áreas de treinamento. O polígono vermelho é o ROI.	112
Figura 54: Dados de entrada e saída do <i>LCZ Generator</i>	113
Figura 55: Identificação de áreas remanescentes acrescentadas na delimitação da área de estudo.	116
Figura 56: Macrozonas definidas pelo PDOT vigente do DF.	116
Figura 57: Gráfico de distribuição de frequência de áreas de treinamento identificadas no DF.	118
Figura 58: Distribuição espacial das LCZ sobre a ROI.	119
Figura 59: Resultados da acurácia geral e por LCZ.	120
Figura 60: Distribuição espacial das LCZs sobre a área de estudo.	120
Figura 61: Porcentagem da distribuição de LCZs na área de estudo.	121
Figura 62: Comparações de erros de classificação por classes similares.	121
Figura 63: Comparações de erros de classificação por classes dissimilares.....	122
Figura 64: Distribuição espacial das LCZs sobre a área de estudo após reclassificação.	122
Figura 65: Porcentagem da distribuição de LCZs na área de estudo após reclassificação.	123
Figura 66: LCZ 1 - (a) Setor Hoteleiro Norte; (b) Setor Autarquias Norte e (c) Setor Hoteleiro Norte.....	124
Figura 67: LCZ 2 – (a) Taguatinga; (b) Ceilândia e (c) Taguatinga.....	124

Figura 68: LCZ 3 – RA Itapuã	125
Figura 69: LCZ 4 – RA Águas Claras	125
Figura 70: LCZ 5: (a) Asa Sul; (b) Asa Norte; (c) Esplanada dos Ministérios e (d) Asa Norte.	126
Figura 71: LCZ 6 – Lago Norte.	126
Figura 72: LCZ 8 – (a) Taguatinga; (b) e (c) SIA.	127
Figura 73: LCZ 9 – (a) UnB/Campus Darcy Ribeiro; (b) e (c) Parkway.....	127
Figura 74: LCZ 10 – Indústrias cimentícias.	128
Figura 75. Visão geral do método de trabalho.	136
Figura 76. Etapas de processamento realizadas pelo código aberto programado para estimar a temperatura de superfície.	137
Figura 77. Representação de um gráfico <i>boxplot</i>	142
Figura 78. Temperatura de superfície diurna (13:00 UTC) estimada para a estação chuvosa.	145
Figura 79. Exemplo de variação de Ts na RA Itapoã (LCZ 3).	146
Figura 80. Temperatura de superfície diurna (13:00 UTC) estimada para a estação seca.	146
Figura 81. Variabilidade do EVI na estação chuvosa.	147
Figura 82. Variabilidade do EVI na estação seca.	148
Figura 83. Variabilidade do NDMI na estação seca.	149
Figura 84. Variabilidade do NDMI na estação chuvosa.	149
Figura 85. Gráfico de caixa da Ts (°C) de cada LCZ na estação chuvosa.	150
Figura 86. Gráfico de caixa da Ts (°C) de cada LCZ na estação seca.	150
Figura 87. Gráfico de caixa do EVI para cada LCZ na estação chuvosa.	151
Figura 88. Gráfico de caixa do EVI para cada LCZ na estação seca.	152
Figura 89. Gráfico de caixa do NDMI para cada LCZ na estação chuvosa.	152
Figura 90. Gráfico de caixa do NDMI para cada LCZ na estação seca.	152
Figura 91. Matriz de comparação de medianas de Ts entre pares de LCZ, com gradação de cores para o p-valor < 0,05 (quanto menor o p-valor, maior é a intensidade da cor).	153
Figura 92. Matriz de correlação de Spearman e gráficos de dispersão para estação chuvosa.	154
Figura 93. Matriz de correlação de Spearman e gráficos de dispersão para estação seca.	154
Figura 94. Análise exploratória de autocorrelação espacial da Ts – estação chuvosa. .	155
Figura 95. Análise exploratória de autocorrelação espacial da Ts – estação seca.	156
Figura 96. Exemplo de presença/ausência de vegetação e o efeito do sombreamento em duas áreas residenciais do DF: Asa Sul do Plano Piloto – LCZ 5 (A) e na RA Itapuã – LCZ 3 (B).	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Síntese das principais variáveis climáticas registradas nas Estações do INMET-DF para o ano de 2020. Para temperatura e umidade do ar, os valores são referentes aos registros horários máximos e mínimos.	88
Tabela 2: Valores de referência para geometria e cobertura das superfícies das LCZs.	107
Tabela 3: Conteúdo principal dos resultados disponibilizados pelo <i>LCZ Generator</i>	114
Tabela 4: Detalhamento das áreas remanescentes incorporadas na poligonal área de estudo.	116
Tabela 5: Quantitativo das áreas de treinamento.	118
Tabela 6: Quantitativo de área de LCZs.	123
Tabela 7. Síntese dos principais trabalhos analisados com relação entre LCZ e índices espectrais.	133
Tabela 8. Principais requisitos fornecido pelo usuário para o processamento da Ts com o algoritmo SC.	137
Tabela 9. Informações das imagens utilizadas.	138

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classificação das camadas da atmosfera urbana.	28
Quadro 2. Escalas climáticas e urbanas sumarizadas por Romero baseadas em aproximações sucessivas iniciando em uma visão panorâmica.	29
Quadro 3. Albedo dos principais materiais urbanos.	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEDE – Análise exploratória de dados espaciais
CDU – Camada dossel urbano
CLU – Camada limite urbana
DF – Distrito Federal
EVI – *Enhanced Vegetation Index* – Índice de vegetação realçado
GEE – *Google Earth Engine*
FVC – Fator de visão do céu
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU – Ilha de calor urbana
ICU sup – Ilha de calor urbana de superfície
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LCZ – *Local climate zone* – zona climática local
NASA – *National Aeronautics and Space Administration* – Agência Espacial Americana
NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index* – Índice de vegetação por diferença normalizada
NDMI – *Normalized Difference Moisture Index* – Índice de umidade por diferença normalizada
PDOT – Plano Diretor de Ordenamento Territorial
RA – Regiões Administrativas
REM – Radiação eletromagnética
SIG – Sistema de informação geográfica
SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico das Américas
SR – Sensoriamento remoto
TIRS – *Thermal Infrared Sensor* – Sensor infravermelho termal do Landsat 8
Ts – Temperatura de superfície
UN – *United Nations* – Nações Unidas
USGS – *United States Geological Survey* – Serviço Geológico Americano
UST – *Urban structure type* – Padrão de estruturas urbanas
WUDAPT - *World Urban Database and Access Portal Tools*
WMO – *World Meteorological Organization* – Organização Meteorológica Mundial
ZEE – Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Federal

SUMÁRIO

Agradecimentos	II
Resumo	V
Abstract	VI
Lista De Figuras	VII
Lista De Tabelas	X
Lista De Quadros	X
Lista De Abreviaturas E Siglas	XI
Sumário	XII
Apresentação	XIV
Introdução	21
1. Clima Urbano	24
Introdução	24
1.1. A cidade e suas escalas climáticas	26
1.2. Aquecimento urbano e Ilha de calor	30
1.3. Forma urbana e clima	36
1.4. Clima urbano e estratégias de adaptação e mitigação	39
1.5. Considerações finais do capítulo	46
Referências	47
2. Sensoriamento Remoto	51
Introdução	51
2.1. Sensoriamento remoto para áreas urbanas: conceitos básicos	52
2.2. Sensoriamento remoto termal: mapeando o invisível	55
2.3. Sensoriamento remoto da vegetação	60
2.4. Considerações finais do capítulo	63
Referências	64
3. O Distrito Federal	67
Introdução	67
3.1. Morfologia urbana: dos modelos conceituais à invenção da Capital Federal	68
3.2. Contexto climático do Distrito Federal	85
3.3. Considerações finais do capítulo	97
Referências	98

4. Classificação da Paisagem Urbana	103
Introdução	103
4.1. Estabelecimento de um sistema de classificação da paisagem urbana do DF	104
4.2. Método para classificação de LCZ	109
4.3. Resultados e discussões	117
4.4. Considerações finais do capítulo	129
Referências	130
5. Características Espectrais das LCZ	132
Introdução	132
5.1. Integração de LCZs com estudos de temperatura de superfície	132
5.2. Métodos	135
5.3. Resultados e discussões	144
5.4. Considerações finais do capítulo	158
Referências	159
6. Conclusões e Considerações Finais	162
6.1. Limitações da abordagem metodológica	164
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	165
Anexo I	167
Anexo II	17068
Anexo III	170

APRESENTAÇÃO

A ideia para esta tese surgiu como consequência da pesquisa de mestrado intitulada Estratégias de Mitigação de Ilhas de Calor Urbanas: Estudo de Caso em Áreas Comerciais em Brasília – DF, onde foram analisados recortes urbanos na microescala. Dentre as perspectivas para trabalhos futuros, destacou-se a procura por uma forma de transmitir sinteticamente as especificidades dos microclimas para avaliação do ambiente térmico da cidade.

Esse foi o ponto de partida para o amadurecimento da proposta de pesquisa de doutorado e a evolução para outra escala de trabalho, estabelecendo-se a escala local. Busca-se agora um aprofundamento na temática do clima urbano trabalhando com informações sobre clima e morfologia urbana especializadas e na escala adequada para o planejamento urbano e estudos de arquitetura, urbanismo e paisagismo.

Este trabalho contribui para o projeto de pesquisa “Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas – Ênfase na configuração urbana e na avaliação da sustentabilidade e desempenho ambiental”, ao qual está vinculado. O projeto de pesquisa encontra-se registrado no Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e é coordenado pela Profa. Marta Romero.

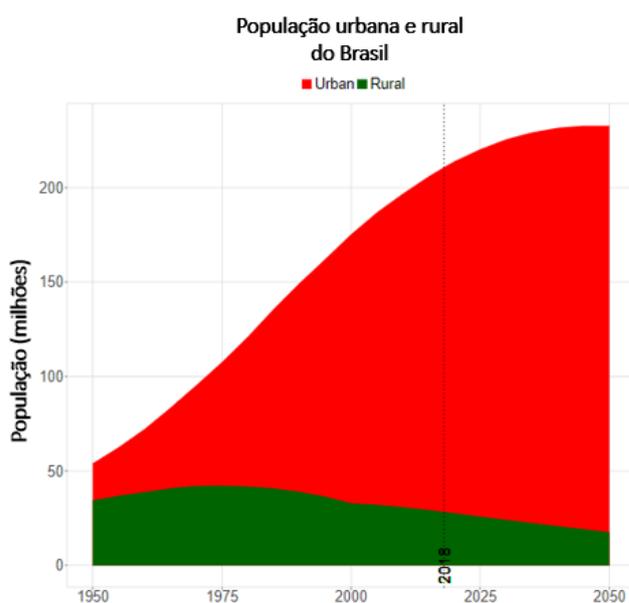
Alguns trabalhos desse grupo foram publicados dentro dessa temática, destacando-se as teses de Elen Vianna sobre o campo térmico de Brasília e de Paola Maigua, que aplicou o método de classificação de zonas climáticas locais para investigação da temperatura do ar e de superfície de Quito – Equador. Sendo assim, este trabalho parte dos conhecimentos e métodos em evolução dentro do espectro de pesquisas do LASUS – Laboratório de Sustentabilidade Aplicada à Arquitetura e ao Urbanismo da Universidade de Brasília.

INTRODUÇÃO

As cidades vêm passando por transformações em seus padrões de urbanização e, já na última década, o desenvolvimento sustentável tornou-se um dos seus maiores desafios. No Brasil, dos 17 municípios com população superior a um milhão de habitantes, 14 são capitais estaduais e, de acordo com dados do IBGE (2019), esses municípios concentram 21,9% da população do País¹.

Espera-se que a população urbana mundial até 2050 representará o dobro da atual, segundo estimativa da Nova Agenda Urbana-Habitat III (UN, 2015), apontando o quão transformador continuará sendo o processo de urbanização no século XXI. No caso do Brasil (Figura 1), a população urbana já é superior à rural e continua em ascensão. Em resposta, mais edifícios e infraestrutura estão em construção para atender à demanda por habitação, mobilidade, consumo, serviços e recreação.

Figura 1. Gráfico de população urbana x rural no Brasil com destaque para o ano 2018.



Fonte: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (UN, 2018).

Outros problemas relacionados à expansão urbana são as múltiplas formas de desigualdades na ocupação do território e que, frequentemente, são exacerbados pela falta de planejamento. Além disso, com a maior parte das atividades humanas são direcionadas ao ambiente urbano, maior pressão é observada no consumo de solo, energia e de água com implicações também no campo térmico das cidades.

Por exemplo, sabe-se que as áreas urbanas tendem a apresentar maior temperatura do que as áreas rurais pois suas estruturas construídas absorvem grande parte da radiação solar incidente, a armazena e libera na forma de

¹ O município de São Paulo continua sendo o mais populoso do país com 12,25 milhões de habitantes, seguido pelo Rio de Janeiro (6,72 milhões), Brasília (3,0 milhões) e Salvador (2,9 milhões). Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas - DPE, Coordenação de População e Indicadores Sociais – COPIS.

radiação térmica durante a noite. Dessa forma, as áreas urbanas desempenham um papel fundamental nos processos atmosféricos locais através da modificação do saldo de calor e umidade. Esses processos podem resultar na elevação da temperatura do ar em áreas urbanas comparado com áreas menos urbanizadas ou rurais (OKE, 1987). É o chamado efeito de ilha de calor urbana (ICU).

Os impactos da ICU são citados na literatura no que tange principalmente aos riscos para a saúde pública, aumento do consumo energético para resfriamento de edificações, desconforto térmico e na interação com os gases do efeito estufa em escalas reduzidas como a escala local e a microescala (NOBRE, 2011; OKE et al., 2017; MASSON, 2018). A ICU é a mais conhecida manifestação do clima urbano, mas outros fenômenos associados ou resultantes também o caracteriza como a poluição atmosférica e as inundações (LUCENA, 2013).

O problema

Presenciamos a discussão em torno do desenvolvimento sustentável², que agora abarca especialmente os compromissos das nossas cidades conforme avançamos no século XXI. Em 2015, 193 governos das Nações Unidas adotaram a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável e seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, definidos como princípios norteadores de planejamento.

Em particular, destaca-se o objetivo número 11 da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, que visa tornar cidades e assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis (UN, 2020). São apresentadas metas para habitação, mobilidade, patrimônio cultural e natural, acesso universal a espaços públicos, políticas e planos para mitigação e adaptação às mudanças climáticas, entre outras.

No mesmo ano, outro acordo global foi alcançado e 196 governos signatários assinaram o Acordo do Clima de Paris, criando um quadro que engloba sistemas de energia e tecnologias para alcançar a segurança climática. Dentro da Agenda 2030 e do Acordo de Paris, o desenvolvimento sustentável pode ser entendido como combinação de três objetivos centrais: desenvolvimento econômico, justiça social e sustentabilidade ambiental (SACHS et al., 2019).

Já é difundido que fenômenos climáticos associados às cidades consolidam a ideia de um clima propriamente urbano e é um dos principais problemas ambientais para a comunidade urbana (HEAT ISLAND GROUP BERKELEY LAB, 2020). Logo, cidades estão estabelecendo políticas para o enfrentamento do aquecimento urbano, transporte e eficiência energética.

Dada essa capacidade das cidades de se tornarem o centro dessas transformações (NOBRE, 2011), esforços são necessários para monitorar e entender a dinâmica da

² O relatório *Nosso Futuro Comum*, publicado pela ONU em 1987, nos traz a definição mais difundida de que desenvolvimento sustentável é aquele capaz de atender as necessidades das atuais gerações sem comprometer a capacidade das gerações futuras de também atenderem suas necessidades. O conceito segue incorporado em agendas de desenvolvimento, mas ainda é bastante discutido. Dependendo da área de aplicação, muitas vezes, sustentabilidade e desenvolvimento sustentável são tratados como sinônimos. Em uma visão de melhoria do sistema para responder necessidades, “o desenvolvimento sustentável é o caminho para se alcançar a sustentabilidade, isto é, a sustentabilidade é o objetivo final, de “longo prazo” (SARTORI, LATRONICO e CAMPOS, 2014, p.1).

atmosfera urbana, para então desenhar estratégias de adaptação e mitigação destinadas a compensar os impactos negativos. Entretanto, como o clima pode ser estudado por arquitetos e urbanistas na escala da cidade e para as pessoas que nela habitam?

Sant’anna Neto (2004) coloca que, para atingir critérios de desenvolvimento sustentável, a forma e uso do espaço devem ser incorporados na interpretação do clima pois “o efeito dos tipos de tempo sobre um espaço contruído de maneira desigual gera problemas de origem climática também desiguais” (SANT’ANNA NETO, 2004, p. 112). Observa-se que mesmo com o progresso da climatologia urbana, sua aplicação ainda é prejudicada pela falta de informações que descrevam aspectos da forma e função das cidades em resolução espacial detalhada (BECHTEL, et al., 2015).

Essa crítica se refere especialmente à homogeneidade na tratativa do tecido urbano em diversos mapeamentos de uso e ocupação do solo, que nos leva a um problema de reconhecimento e representação da morfologia da cidade para estudos de clima urbano. Acrescenta-se que ainda são poucas as cidades no mundo que possuem um plano climático para orientar estratégias de mitigação e adaptação aos efeitos do aquecimento urbano.

Se a influência do clima está relacionada às questões relativas ao bem-estar das pessoas, energia, saúde e poluição, logo deve estar no foco de trabalho do arquiteto urbanista. No entanto, o desenho urbano e a climatologia urbana desenvolveram-se separadamente nas últimas décadas e, portanto, a aplicação de estratégias com relevância climática, na prática, ainda provam ser difíceis ou até mesmo negligenciadas (ESCH, 2015).

Justificativa

A importância da pesquisa apoia-se na demanda por dados para apoiar arquitetos urbanistas e planejadores sobre a dimensão climática da cidade. Partindo disso, esta tese traz como objeto de estudo a área urbana do Distrito Federal, que abriga a capital do país. O projeto do arquiteto Lucio Costa para o seu Plano Piloto, inaugurado em 1960, foi baseado nos princípios do Movimento Moderno, tornando-se um marco para o urbanismo do século XX.

O seu desenho urbano apresenta soluções inéditas no contexto brasileiro para moradia, lazer e estrutura do espaço intra-urbano, além da marcante característica de cidade-parque, assim chamada pelo autor do projeto. Porém, com a crescente expansão urbana, incluindo assentamentos irregulares e condomínios fechados que ditam uma nova morfologia, a cidade não se identifica apenas pela forma e função modernistas.

Logo, considera-se relevante a demanda por transmitir de forma sintética e objetiva as especificidades dos ambientes térmicos na cidade. Assim sendo, o emprego de técnicas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e estatística são fundamentais para a integração das informações associadas à produção do aquecimento das superfícies urbanas.

Com base nesses aspectos, encontrou-se no portal World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) técnicas e ferramentas desenvolvidas para disseminar informações com escala e resolução padronizadas sobre clima urbano. A iniciativa do portal fundamenta-se no método de classificação das zonas climáticas locais (tradução livre de *Local Climate Zones*) de Stewart e Oke (2012). Esse tem como cerne a divisão da

paisagem urbana em classes simplificadas de um contexto morfológico e de temperatura, onde são “locais na escala, climática na natureza e zonal na representação” (STEWART e OKE, 2012, p. 1884, tradução da autora).

Este sistema de classificação permite comparações de parâmetros medidos dentro da cidade como temperatura do ar, umidade relativa do ar, intensidade e direção do vento, albedo, fluxos de energia, entre outros. Uma das finalidades é melhorar a comunicação dos estudos sobre temperatura na área urbana mediante um método padronizado para identificar padrões urbanos e naturais e suas condições térmicas, especialmente para observações de ICU.

Também é importante esclarecer que, neste trabalho, utiliza-se o termo mitigação com referência às modificações em pavimentos, cobertura do solo na área construída e na forma urbana que podem ser projetados para reduzir o excesso de calor gerado no espaço urbano. Essas modificações ainda envolvem medidas que, direta ou indiretamente, atuam para reduzir o calor antropogênico.

Já o termo adaptação é usado para se referir às ações da sociedade para se ajustar às condições de calor devido à urbanização, incluindo efeitos combinados de eventos extremos. Ambos termos baseados em Stewart e Mills (2021).

Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é relacionar a estrutura espacial das LCZ do Distrito Federal (DF) com suas características termais para obter informações espacializadas sobre o aquecimento das superfícies urbanas.

Os objetivos específicos são:

- Investigar o efeito da sazonalidade, tendo em vista a estação chuvosa e estação seca do DF;
- Estudar a dependência espacial da temperatura de superfície para verificar se o padrão observado é aleatório.

Questão central da pesquisa e hipótese

A incorporação do sistema de classificação de LCZ neste estudo, proporcionando uma interpretação do espaço urbano apoiada na temática climatológica, motivaram a formulação da questão central e hipótese de trabalho. Assim, coloca-se a questão de pesquisa: as classes das LCZ possuem assinatura termal típica em termos de temperatura de superfície?

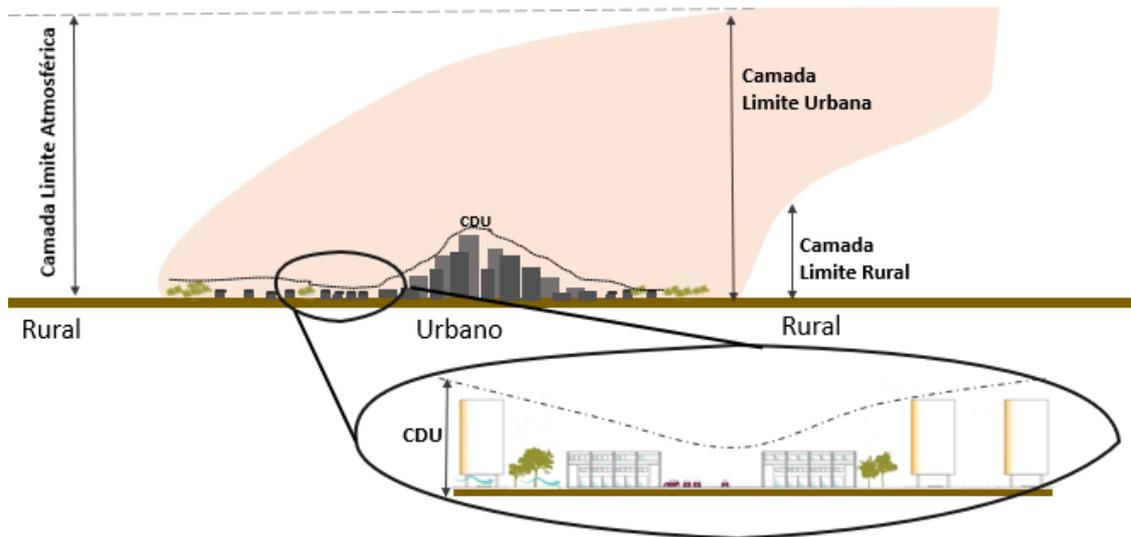
Dessa forma, a hipótese surge da relação entre as classes das LCZ e da temperatura de superfície. Portanto, parte-se do pressuposto de que o delineamento das LCZ resultaria em diferentes valores de temperatura de superfície média entre as classes.

Métodos

Esta pesquisa, de natureza aplicada, enquadra-se dentro da temática do clima urbano, na qual a determinação da escala de trabalho é fundamental. Ao estabelecer o uso do sistema de classificação LCZ, adota-se a escala local. Destaca-se ainda duas escalas verticais, tendo em vista que a cidade como um todo interfere nas condições climáticas da sua área de influência (Figura 2).

Tem-se a camada limite urbana (CLU) - acima dos telhados da cidade – que é homogênea sobre a área urbana (OKE, 2006). E, por outro lado, tem-se as condições na camada dossel urbano (CDU), abaixo os telhados dos edifícios, que podem variar significativamente a uma distância de até alguns metros, configurando diferentes microclimas (OKE, 2006).

Figura 2. Escala espacial de trabalho.



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Oke, 2006, p.3 (tradução livre).

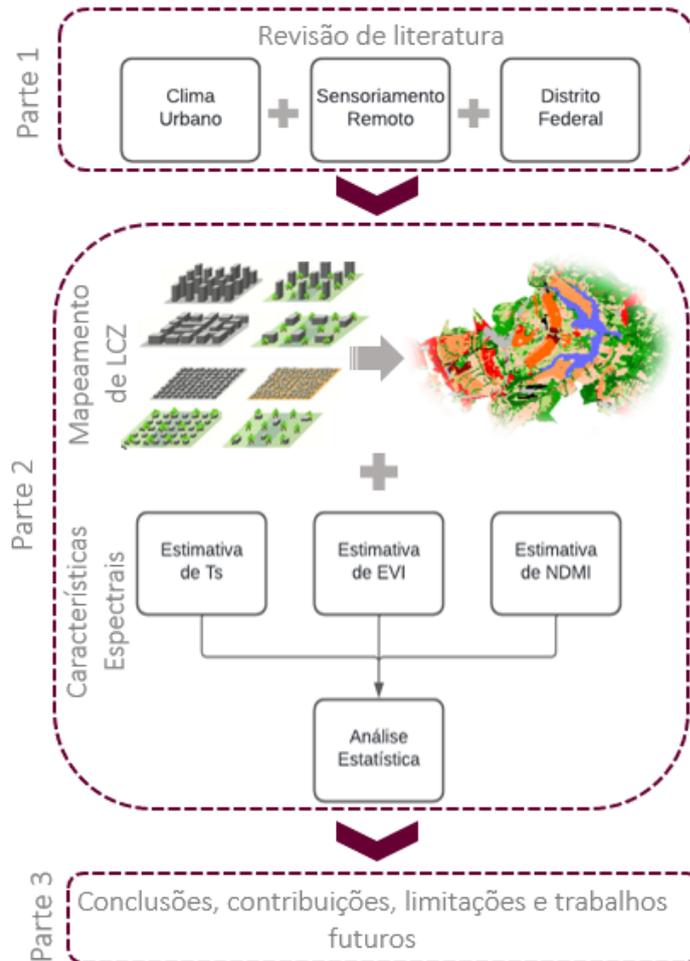
Esses microclimas formam o entorno imediato dos edifícios e das pessoas na cidade e influenciam diretamente seu conforto térmico, bem-estar, o consumo de energia, o desenho arquitetônico e urbanístico para citar alguns exemplos. Logo, as análises deste trabalho situam-se na CDU, e seu conceito será explorado no Capítulo 1.

Com relação à escala temporal para estudo da temperatura de superfície, são analisadas imagens obtidas no ano de 2020. Essas imagens estão separadas de acordo com as estações climáticas do DF: seca e chuvosa.

Definida a escala de trabalho, buscou-se uma revisão de literatura sobre clima urbano e sensoriamento remoto que podem ser aplicadas em análises urbanas. Dessa forma foi possível delinear as necessidades da base de dados para atingir os objetivos propostos. As imagens do satélite Landsat 8 (resolução espacial de 100 m para as bandas termais 10 /11 e de 30 m para as demais bandas) são estabelecidas para gerar a classificação de LCZs seguindo o método do WUDAPT. Dados do mesmo satélite são utilizados para a obtenção das características espectrais de cada LCZ identificada no DF.

A integração final da pesquisa é realizada com análises estatísticas. Primeiramente foi avaliado se o delineamento das LCZs resultou em valores espectrais diferentes entre as classes. E por último realizou-se uma análise exploratória de dados espaciais, que é um método na estatística descritiva que busca identificar padrões e interdependência entre variáveis de um conjunto de dados. A Figura 3 relaciona o fluxo de trabalho.

Figura 3. Fluxograma do método de análise.



Estrutura da tese

A tese se divide em três partes. A primeira agrupa os capítulos 1, 2 e 3 que cobrem a revisão de literatura para fundamentação teórica do trabalho. A segunda parte é constituída pelos capítulos 4 e 5, que englobam o corpo principal da tese com aplicações de técnicas de SR, geoprocessamento e estatística, além da discussão dos resultados. A última parte, o capítulo 6, dispõe da sumarização dos resultados e contribuições do trabalho.

Cada capítulo possui uma breve introdução, seguida por uma argumentação e, na parte 2, os capítulos possuem os métodos, os resultados e as discussões relativos aos seus tópicos. Os resultados de cada capítulo alimentam os subsequentes, pois possuem uma continuidade. Por fim, cada capítulo também possui as considerações finais sobre o tópico abordado e as referências utilizadas.

No capítulo 1 há uma introdução sobre o clima urbano como a temática de estudo, apresentando as contribuições dos principais pesquisadores da área, conceitos e definições com foco no aquecimento urbano. O capítulo 2 aborda fundamentos de sensoriamento remoto, especialmente o termal e da vegetação, para aplicações em estudos de clima urbano. O capítulo 3 é dedicado ao estudo da morfologia urbana do DF e seu contexto climático.

Já na parte 2, o capítulo 4 traz a explanação e aplicação do método de classificação de LCZ para a área urbana do DF, tendo como referência o ano de 2020. No capítulo 5 trabalhou-se na obtenção das características espectrais de cada LCZ e a integração dos resultados com análises estatísticas. Nos capítulos 4 e 5, foram inseridos itens detalhando os procedimentos metodológicos para geração dos produtos dos respectivos capítulos. Por fim, apresenta-se o capítulo 6 com as considerações finais advindas das conclusões dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- Bechtel, B.; Alexander, P.; Böhner, J.; Ching, J.; Conrad, O.; Feddema, J.; Mills, G.; See, L. Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4 (1), p. 199-219, 2015. DOI:10.3390/ijgi4010199.
- Esch, M. P. Designing the urban microclimate: A framework for a design-decision support tool for the dissemination of knowledge on the urban microclimate to the urban design process. Phd thesis – Delft University of Technology, Faculty of Architecture and the Built Environment, Department of Urbanism, Department of Architectural Engineering + Technology, 2015.
- INPE/CPTEC, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 18 de maio de 2020.
- Lawrence Berkeley National Laboratory. Heat Island Group. Disponível em: <https://heatisland.lbl.gov>. Acesso em: 18 de janeiro de 2020.
- Lucena, A. J. Notas conceituais e metodológicas em clima urbano e ilhas de calor. *Revista Continentes*, [S.l.], n. 2, p. 28-59, jan. 2013. ISSN 2317-8825. Disponível em: <http://www.revistacontinentes.com.br/continentes/index.php/continentes/article/view/17>. Acesso em: 29 jun. 2019.
- Masson, V. Impacts of Global Changes in Cities. In Dellasala, D., Goldstein, M. In: *Encyclopedia of the Anthropocene*. Oxford (UK): Elsevier, 2018.
- Nobre, Carlos A. Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: região metropolitana de São Paulo: relatório final. Carlos A. Nobre, coordenador – São José dos Campos, SP: INPE, 2011.
- Oke, T. R. *Boundary Layer climates*. 2 ed. London: Methuen, 1987.
- Oke, T.R. Initial Guidance To Obtain Representative Meteorological Observation At Urban Sites. World Meteorological Organization. Report n° 81, 2006. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9286
- Sachs, J. D., G. Schmidt-Traub, M. Mazzucato, D. Messner, N. Nakicenovic, and J. Rockström. Six Transformations to achieve the Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*. v. 2, no. 9, p. 805–814, 2019. Disponível em: DOI 10.1038/s41893-019-0352-9.
- Sant’anna Neto, J. L. História da climatologia no Brasil: gênese e paradigmas do clima como fenômeno geográfico. *Cadernos Geográficos/Universidade Federal de Santa Catarina*, n.7. Florianópolis: Imprensa Universitária, 2004.
- Sartori, S.; Latronico, F.; Campos, L.M.S. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: uma taxonomia no campo da literatura. *Ambient. soc.*, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 01-22, 2014.
- Stewart, I.D.; Oke, T.R. Local climate zones for urban temperature studies. *American Meteorological Society*, V.93, P. 1879-1900, 2012.
- Stewart, I.D. ; Mills, G. *The Urban Heat Island — A Guidebook*. Elsevier Inc.: Amsterdam, NL, 2021.
- UN, United Nations. 10 – Urban – Rural Linkage (Habitat III Issue Papers). New York: UN, 2015. Disponível em: http://habitat3.org/wp-content/uploads/Habitat-III-Issue-Paper-10_Urban-Rural-Linkages-2.0.pdf

UN, United Nations. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. New York: UN, 2018. Disponível em: [https://population.un.org/wup/Country- Profiles/](https://population.un.org/wup/Country-Profiles/)

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

Parte 1

1.

CLIMA URBANO

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

INTRODUÇÃO

As alterações provocadas pelas cidades em termos de produção, estilo de vida, consumo e energia, para citar alguns exemplos, também podem ser observadas na consolidação de um clima propriamente urbano. Monteiro (2015) caracterizou o clima urbano por anomalias na temperatura, umidade do ar, precipitação, dentre outros fatores, que diferenciam o clima do campo para o clima das cidades.

Essa transformação urbana levou à necessidade de investigação, observação e organização dos conhecimentos de climatologia urbana para serem aplicados à diversas regiões do planeta (MILLS, 2009). As pesquisas sobre o tema têm como principal foco a investigação dos efeitos da urbanização sobre o clima, desde a microescala até a escala global e abarca campos de estudos multidisciplinares.

As primeiras observações iniciaram-se na cidade de Londres no século XIX, com a documentação de base meteorológica de Luke Howard³ sobre o excesso de calor na cidade em comparação com o campo.

It is probable, therefore, that the Sun in summer actually warms the air of the city more than it does that of the country around. Several causes may be supposed to contribute to this: the country presents for the most part a plain surface, which radiates freely to the sky, — the city, in great part, a collection of vertical surfaces, which reflect on each other the heat they respectively acquire: the country is freely swept by the light winds of summer, — the city, from its construction, greatly impedes their passage, except at a certain height above the buildings: the country has an almost inexhaustible store of moisture to supply its evaporation — that of the city is very speedily exhausted, even after heavy rain. When we consider that radiation to the sky, the contact of fresh breezes, and evaporation, are the three principal impediments to the daily accumulation of heat at the surface, we shall perceive that a city like London ought

³ O livro *The Climate of London*, na sua 2ª edição, foi publicado em 1833 em uma versão com os registros meteorológicos expandidos até o ano de 1830 (dados coletados a partir de 1806, totalizando 25 anos de observações meteorológicas em Londres).

to be more heated by the summer sun than the country around it (HOWARD, 2007, p. 10, grifos da autora).

Pela citação, as condições para o aquecimento urbano foram atribuídas potencialmente às fontes de calor, à interferência da geometria urbana na dissipação do calor e passagem da ventilação, absorção da radiação solar pelas superfícies da cidade e à falta de umidade para evaporação.

Nota-se nos grifos da citação que, na comparação entre cidade-campo, a relação entre superfície e a visão do céu é apontada como um dos fatores para a troca de calor com a atmosfera e também remete à diferenciação da rugosidade para a passagem do vento.

Howard descreve então, pela primeira vez, o efeito da ilha de calor urbana, comparando seus registros de temperatura média entre a cidade e o campo, ao longo do dia e do ano, identificando ciclos de variações da temperatura do ar. Destacou ainda que a maior diferença ocorre durante a noite, no inverno londrino (HOWARD, 2007).

Tendo como referência as medições em Londres, Howard evidencia fundamentos gerais sobre o comportamento do aquecimento da atmosfera da cidade, sendo replicáveis para estudos em outras localidades. Mills (2009) considera que a pesquisa de Howard representa o início dos estudos e documentação sobre o clima urbano e, um século mais tarde, as de Timothy Oke marcariam a história moderna da climatologia urbana.

Oke publica em 1978 o livro *Boundary Layer Climates* e, na sua segunda edição em 1987, amplia o conteúdo relacionando as escalas climáticas, física da atmosfera, vegetação, materiais, superfície urbana e poluição do ar. O autor foca sua análise na camada próxima à superfície que se expande verticalmente até o nível das coberturas dos edifícios e trabalha formas simplificadas para a geometria urbana: os cânions urbanos.

Os parâmetros fator de visão do céu (FVC) e a relação entre a altura dos edifícios e a largura da via (H/W, do inglês *Height/Width*) são então incorporados na análise do cânion urbano. A simplificação da forma urbana permitiu muitos avanços nas pesquisas de climatologia urbana (Nunez e Oke, 1977; Stewart e Oke, 2012; Stewart *et al.*, 2013; Ching *et al.*, 2018), tanto para simulações computacionais de microclimas e balanço de energia. Estes conceitos serão abordados neste capítulo tendo em vista as convergências com os propósitos desta pesquisa.

Os desafios para as pesquisas seguem no desenvolvimento de modelagem para o clima urbano e proposição de estratégias de adaptação e mitigação dos efeitos do aquecimento urbano. Ambas dependem do grau de certeza dos métodos de identificação, que incluem uma combinação de fenômenos complexos que interagem em várias escalas: da escala humana às escalas da cidade e de uma região (REN *et al.*, 2018).

Segundo Masson (2018), são necessários estudos que abordem a interconexão de escalas adequadas às áreas urbanas para avaliação das projeções de mudanças climáticas locais, considerando que os modelos de cenários futuros não simulam a escala da cidade. Trata-se de uma referência aos modelos climáticos dos Relatórios do IPCC, que adequados às escalas global ou continental.

Sendo assim, este capítulo apresenta uma investigação teórica a partir da então chamada fase moderna dos estudos de clima urbano. Procurou-se reunir pesquisas dos

autores que trataram dos temas relacionados à sua definição, características principais e escalas de análise.

1.1. A CIDADE E SUAS ESCALAS CLIMÁTICAS

Nas escalas global e regional, o clima de uma cidade é influenciado por sua localização geográfica: latitude, altitude, continentalidade, vulnerabilidade a eventos sinóticos⁴, proximidade de massas de água, etc. São os chamados fatores climáticos, que são divididos entre globais e locais de acordo com a sua escala de atuação. Na escala local e micro, os fatores climáticos como topografia, vegetação e superfície do solo (natural ou artificial) originam o clima local e o microclima (ROMERO, 2013).

Esses fatores climáticos também influenciam o desenho urbano e arquitetônico, como podemos observar em alguns estilos arquitetônicos. Também influenciam a necessidade dos habitantes em relação ao conforto ambiental e das edificações com relação à demandas por aquecimento, resfriamento, sombreamento, etc.

Ou seja, o entendimento sobre as escalas climáticas é fundamental para a delimitação do objeto de estudo sobre o clima urbano, diferenciando sua ordem de grandeza, meios de observação, representação e análise. A abrangência das escalas varia de forma horizontal, vertical e temporal.

Oke (2006) relaciona horizontalmente três escalas aplicadas ao meio urbano: a microescala, a escala local e mesoescala, podendo englobar desde o tamanho de ruas, bairros até a cidade como um todo. Por definição temos (OKE, 2006):

- Microescala: toda superfície apresenta seu próprio microclima e seu efeito atinge seu entorno podendo variar a temperatura de superfície e a temperatura do ar e em uma curta distância. Em termos dimensionais, essa escala compreende edifícios isolados, árvores, estradas, ruas, jardins etc.
- Escala local: é a escala que a estação meteorológica padrão⁵ (automática ou manual) foi projetada para monitorar. Nas áreas urbanas, isso significa o clima de áreas com tipos semelhantes de desenvolvimento urbano (cobertura da superfície, altura e espaçamento dos edifícios, atividade etc.). A informação registrada pelas estações meteorológicas padrão compreende uma integração de características de efeitos microclimáticos decorrentes das proximidades do local monitorado.
- Mesoescala: a urbanização influencia o clima da cidade como um todo compreendendo dezenas de quilômetros de extensão. Uma única estação meteorológica não é suficiente para representar essa escala.

Na situação vertical, o pesquisador faz um recorte para estudos urbanos e elenca as camadas influenciadas pela superfície terrestre por meio de transferência de calor,

⁴ Sistemas atmosféricos de grande escala. Os fenômenos com grande (pequena) escala espacial estão associados à grande (pequena) escala temporal. A razão entre essas escalas é da mesma ordem de grandeza para todos os fenômenos (exceto para o tornado e seus vórtices menores), isto é, 10 m/s. Isso faz com que os fenômenos atmosféricos possam ser tratados como fractais, ou seja, formas geométricas que possuem estrutura similar em todas as escalas, mesmo ocorrendo em diversas escalas de tempo. A escala temporal (cuja unidade é velocidade) representa o tempo que o ar leva para percorrer toda a estrutura do fenômeno. Fonte: IAG-USP. Disponível em: <http://master.iag.usp.br/pr/ensino/sinotica/aula01/>

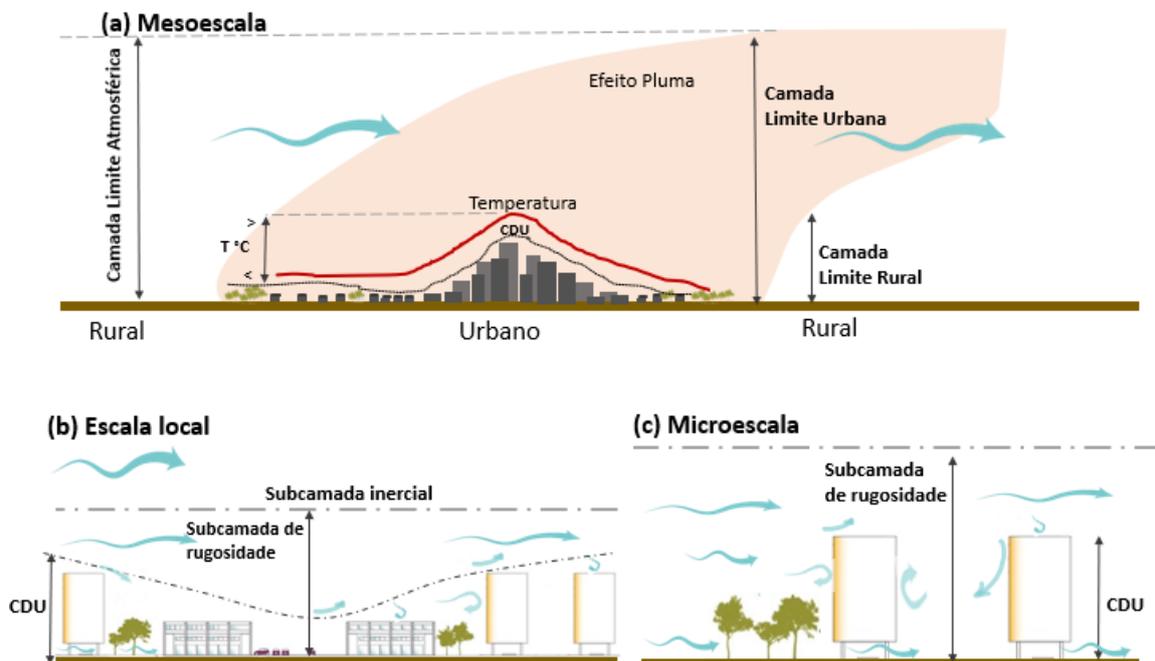
⁵ Referente à estação meteorológica padrão definida pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

arraste, dispersão de poluentes, rugosidade, evapotranspiração e transpiração. São elas: PBL - *planetary boundary layer*, UBL - *urban boundary layer* e UCL - *urban canopy layer*.

- PBL ou camada limite planetária: é a região mais baixa da troposfera e mais próxima à superfície terrestre. Também chamada de camada limite atmosférica, é definida pela presença de mistura turbulenta⁶ entre a superfície terrestre e o ar. Sua altura varia de centenas de metros a poucos quilômetros em uma escala de tempo de acordo com as horas do dia e período de insolação. Em áreas urbanas engloba a UBL e UCL.
- UBL ou Camada limite urbana (CLU): situa-se acima do nível das coberturas dos edifícios e abaixo da PBL, formando um domo sobre a cidade, podendo ter sua forma modificada pela ação do vento.
- UCL ou camada dossel urbano (CDU): próxima às superfícies da cidade, se estendendo verticalmente desde o solo até a altura média dos elementos de rugosidade, denominada Z_H , constituída por edifícios e árvores.

Na Figura 4 estão representadas as três escalas horizontais e as verticais da atmosfera urbana. A direção do vento predominante é representada com a seta horizontal na mesoescala (a). Na escala local (b) e microescala (c), as setas indicam os efeitos de turbulência do fluxo de vento típicos das respectivas escalas.

Figura 4. Representação das três escalas climáticas da atmosfera urbana.



Fonte: a autora, adaptado de Oke, 2006, p.3.

Na CDU, os efeitos microclimáticos formados pelas superfícies e pela altura dos elementos de rugosidade persistem por uma curta distância de sua fonte, mas depois são misturados horizontalmente e verticalmente pela ação do fluxo de vento. Esse

⁶ Turbulência neste contexto refere-se à natureza caótica de muitos fluxos, que se manifesta de forma irregular ou aleatória, provocando flutuações na velocidade e temperatura em torno de seus valores médios no tempo e espaço. Fonte: INPE. Disponível em: <http://chuvaproject.cptec.inpe.br/porta/saoluis/curso/fisch/aula1.pdf>

depende da magnitude do efeito, da velocidade do vento e da estabilidade atmosférica; ou seja: estável, neutra ou instável (OKE, 2006).

Os efeitos de turbulência são percebíveis na subcamada de rugosidade (RSL – *roughness sublayer*), que se estende do nível do solo até a altura de mistura, denominada Z_r , onde essa ação de mistura é concluída. De acordo com Oke (2006), estimativas e medidas de campo indicam que a altura Z_r pode ser tão baixa quanto $1,5*Z_H$ em locais densamente construídos e homogêneos e maior que $4*Z_H$ em áreas de baixa densidade construída.

Na subcamada inercial, acima da camada de rugosidade, os fluxos são constantes. Portanto, as observações de fluxos e variáveis nestes pontos caracterizam o ambiente de escala local. Já a camada mista (ML – *mixed layer*) homogeneiza as propriedades atmosféricas de modo que os perfis verticais de temperatura potencial, vapor de água, velocidade e direção do vento são quase uniformes. No Quadro 1 encontra-se uma síntese dessas definições.

Quadro 1. Classificação das camadas da atmosfera urbana.

Camada	Definição	Dimensão	Escala
UCL/Camada dossel urbano	Do solo à altura média dos edifícios/ árvores. Consiste na atmosfera exterior (exterior) e interior (interior dos edifícios).	Dezenas de metros	Micro
RSL/Subcamada de rugosidade	Do solo até cinco vezes a altura dos edifícios/árvores, incluindo a UCL. O fluxo de vento é afetado por elementos individuais.	Dezenas de metros	Micro
ISL/Subcamada inercial	Acima da RSL, onde a turbulência cria um perfil de velocidade logarítmica e a variação dos fluxos turbulentos com a altura é pequena.	~25 a 250 metros	Local
ML/Camada mista	Acima da ISL, onde as propriedades atmosféricas são uniformemente misturadas por turbulência térmica.	~250 a 2500 metros	Meso
UBL/Camada limite urbana	Toda a camada do solo até o topo da ML, influenciada por uma superfície suburbana, é chamada de camada limite urbana (UBL), ou seja, inclui UCL, RSL, ISL e ML.	Dezenas de quilômetros	Meso

Fonte: Adaptado de Oke et al., 2017. Tradução da autora.

Logo, para as intervenções arquitetônicas e urbanísticas, é fundamental o entendimento da camada dossel urbano e a sua subcamada de rugosidade. Essa, influenciada pelos aspectos tridimensionais da forma urbana nos processos de troca de calor, produz diversas condições microclimáticas. Tal característica é crucial no que difere o clima das áreas urbanas e o das áreas rurais.

Nesse sentido, surge a crítica sobre a utilização de dados climáticos provenientes de registros em aeroportos para caracterização do clima da cidade e como dados de entrada para simulações computacionais microclimáticas e termoenergéticas por exemplo.

Segundo Martins (2014), as cidades agregam pessoas, atividades, elementos naturais e superfícies artificiais dispostas de forma relativamente heterogênea no território, como um mosaico. “Também a este mosaico de texturas e formas corresponde um outro mosaico: aquele da diversidade climática e ambiental” (MARTINS, 2014, p. 28).

Assim, observamos que as cidades podem apresentar áreas mais quentes como em bairros sem vegetação e com alto tráfego de veículos e outras mais frescas como em parques urbanos, por exemplo. Dessa forma, de acordo com Alcoforado *et al.* (2005), é incorreto o termo microclima urbano no singular para designar uma estrutura por sua vez tão diversificada.

As escalas espaciais são apresentadas separadamente e não são estritamente demarcadas uma vez que sobreposições surgem entre elas denotando processos interdependentes. Rasheed e Robinson (2011, p.64) abordam essas sobreposições e interdependências na modelagem do clima urbano e seus processos globais, meso e de microescala, dando o exemplo da energia cinética turbulenta, que pode se iniciar e escalas maiores e desenvolver-se para escalas menores onde é dissipada como calor.

As condições climáticas resultantes da influência da urbanização são parte do espectro das escalas atmosféricas e estão sob o controle de eventos climáticos sinóticos que, em escalas temporais mais longas, criam o clima de fundo de um lugar (OKE *et al.*, 2017). Em escalas maiores estão os movimentos de sistemas climáticos sinóticos como anticiclones e ciclones.

O padrão de circulação local de determinada região apresenta-se controlado pela forçante térmica quando as circulações de grande escala não são significativas. Ou seja, quando há ausência de sistemas meteorológicos de escala sinótica, os efeitos de mesoescala e microescala são mais facilmente identificados.

A complexidade das escalas espaciais e temporais do clima soma-se à escala de projeto no trabalho do arquiteto e urbanista, que não são as mesmas, mas precisam ser relacionadas em prol do aprimoramento da comunicação científica e da aplicação desses conhecimentos em projetos de arquitetura, urbanismo e paisagismo.

Pensando nessa compreensão entre os profissionais que pesquisam e os que projetam, Romero (2011) e Ren *et al.* (2018) propõem conexões entre as escalas do clima e do projeto, observadas no Quadro 2 e na Figura 5. Reintera-se que neste trabalho adotou-se a escala local definida Oke, a mesma detalhada no Quadro 2.

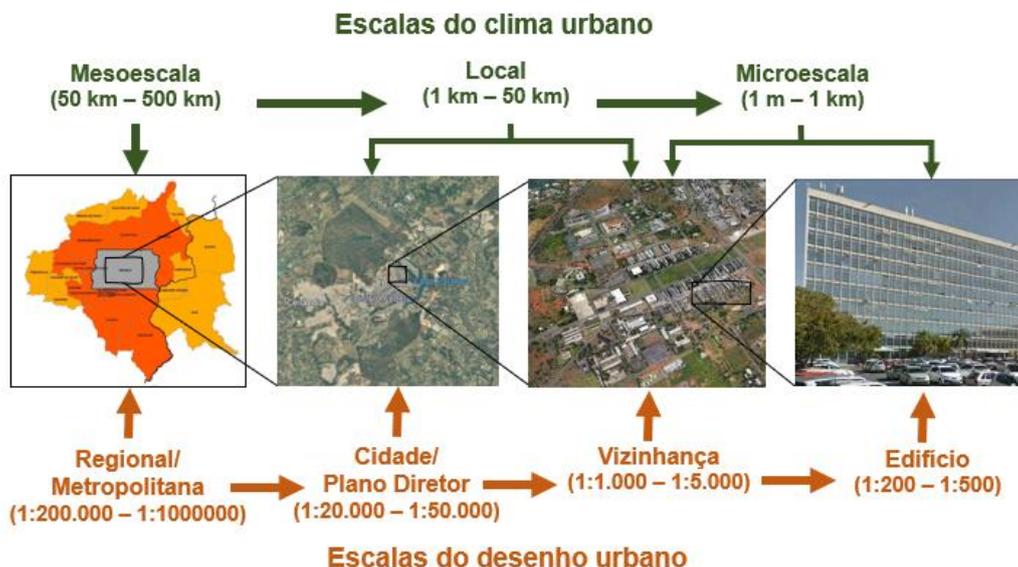
Quadro 2. Escalas climáticas e urbanas sumarizadas por Romero baseadas em aproximações sucessivas iniciando em uma visão panorâmica.

Autor	Escala 1	Escala 2	Escala 3	Escala 4
Abrami	Território: espaço da organização	Ambiente: espaço do recurso	Sítio Espaço produtivo	Lugar Espaço coletivo
Gregotti	Nível geográfico sobre o território	Nível topográfico sobre o circundante: o sítio	Nível do objeto	-
Morais	Nível da região	Nível do local	Nível do sítio	-
Tricart	Cidade inteira	Grupo de quarteirões	Quarteirão, grupo de blocos com características comuns	Escala da rua, incluindo as áreas construídas e os espaços vazios
Monteiro	Macroclima: Metrópole; Área metropolitana	Mesoclima: Subúrbio ou bairro de metrópole Cidade grande	Topoclima: Bairro; Subúrbio de cidade; Cidade pequena	Microclima: Setores habitacionais; Grandes edificações; Habitação
Oke	-	Mesoescala:	Escala local:	Microescala: Inclui os elementos individuais, tais

Autor	Escala 1	Escala 2	Escala 3	Escala 4
		Inclui os elementos que influenciam o clima de uma cidade	Inclui o tamanho e espaçamentos das edificações	como árvores, edifícios.
Romero	Grandes estruturas urbanas	Escala do setor/Área/Sítio	Escala do lugar	Escala do edifício

Fonte: Adaptado de Romero, 2011, p. 133.

Figura 5. Escalas climáticas relacionadas às escalas de projeto do arquiteto e urbanista.



Fonte: Adaptado de Ren et al., 2018, p.184. Imagens: CODEPLAN - <http://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/%C3%81rea-de-Influ%C3%Aancia-de-Bras%C3%ADlia-e-Proposta-de-Amplia%C3%A7%C3%A3o-da-RIDE-do-DF-e-Entorno.pdf> (esquerda) e Google Earth, data das imagens: 18/01/2018 (demais imagens de Brasília)

1.2. AQUECIMENTO URBANO E ILHA DE CALOR

A substituição da camada natural do solo, geralmente por materiais de baixa permeabilidade e alta capacidade de acumulação térmica tem implicações transformadoras na atmosfera urbana, como aponta Lombardo (1985).

As condições climáticas de uma área urbana extensa e de construção densa são totalmente distintas daquelas dos espaços abertos circundantes, podendo haver diferenças de temperatura, de velocidade do vento, de umidade, de pureza do ar etc. (LOMBARDO, 1985, p.77).

O espalhamento do tecido urbano, sua demarcação física confusa e a intensidade das atividades humanas remetem a uma dificuldade em se estabelecer onde termina a área urbana e começa a área rural. Já para um estudo de clima urbano, as fronteiras físicas da cidade não delimitam seu potencial de impacto devido ao transporte de propriedades atmosféricas pela ação vento (OKE *et al.*, 2017).

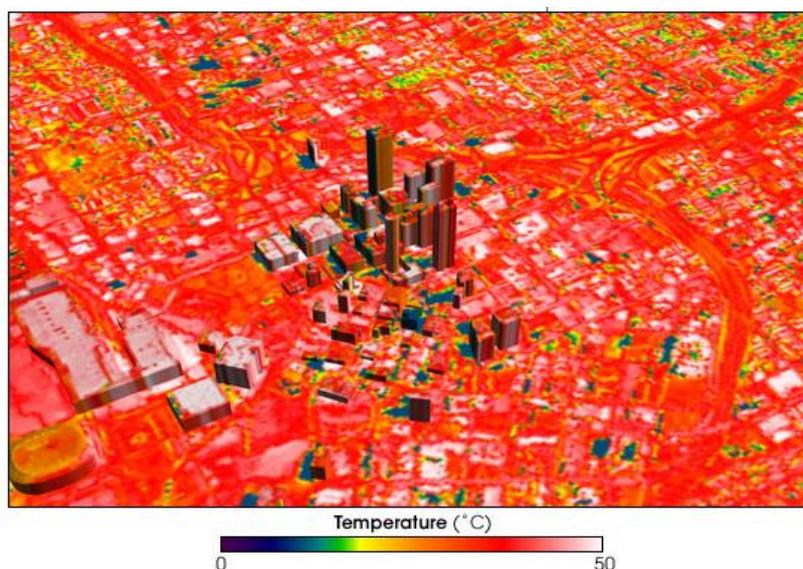
Essa discussão entre o rural x urbano foi apontada por Lowry (1977), onde o pesquisador expõe que a diferença entre as medições de temperatura do ar em um ponto rural (A) x urbano (B) não pode ser assumida como o resultado do efeito da urbanização. Lowry se baseia no clima de fundo do lugar, no clima local, nos efeitos da

urbanização do lugar onde é realizada a observação e na frequência e duração dos tipos de tempo, de forma que a condição rural do ponto A não representa a condição “pré-urbana” do ponto B e, portanto, não explica uma possível mudança climática (LOWRY, 1977, p. 132 e 135).

As atividades antropogênicas, redução da vegetação, as estruturas, materiais e geometria urbanas contrastam com os de seus arredores rurais e naturais, originando o conhecido efeito da ilha de calor urbana (ICU). O termo caracteriza áreas urbanas mais aquecidas que a vizinhança menos urbanizada e rural e se manifesta na atmosfera e na superfície e esse diferencial de temperatura é entendido como a intensidade ou magnitude da ICU (VOOGHT e OKE, 2003).

Enfatiza-se que a intensidade da ICU ($\Delta T_{\text{urbano}} - T_{\text{rural}}$) não é constante, nem no tempo nem no espaço, podendo atingir seu ápice à noite por até várias horas após o pôr do sol (ERELL, 2017). Em sua manifestação, a ICU de superfície se refere ao aquecimento relativo das superfícies urbanas (Figura 6). Já a ilha de calor atmosférica se forma na CDU, compreendendo a camada de ar onde as pessoas vivem, e na CLU, formando um domo de ar aquecido sobre a cidade, cuja forma modifica-se pela ação do vento.

Figura 6. Imagem termal de Atlanta – EUA exemplificando o aquecimento da superfície urbana.



Fonte: Fonte: NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio.

Para exemplificar a interação entre efeitos urbanos como a ICU e sistemas meteorológicos, é bastante documentado que uma condição de calma⁷ combinada com céu claro⁸ favorece o desenvolvimento de ICU na atmosfera urbana (VOOGHT e OKE, 2003). Ventos e nuvens mais fortes atenuam o aquecimento e agitam a atmosfera, de forma que os efeitos urbanos são quase inexistentes (OKE *et al.*, 2017). Portanto, ao estudar o clima urbano, torna-se necessário compreender as variáveis do efeito urbano e as não urbanas.

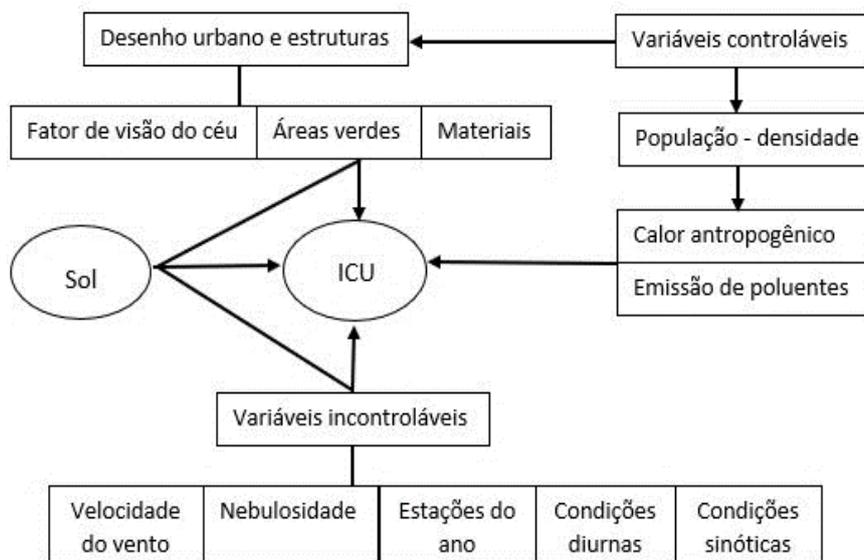
⁷ Calmaria refere-se à condição atmosférica destituída de vento ou de qualquer outro movimento do ar. Fonte: INMET: <http://www.inmet.gov.br/porta1/index.php?r=home/page&page=glossario>

⁸ Céu claro é o estado do céu sem nenhuma nuvem ou cobertura total menos de um octa (1/8 de nuvens), vistos ou detectados do ponto de observação. Fonte: INMET: <http://www.inmet.gov.br/porta1/index.php?r=home/page&page=glossario>

Nesse intuito, Memom et al., (2008) categorizaram as variáveis relacionadas ao desenvolvimento de ICU como controláveis e incontroláveis baseando-se nos efeitos temporários da atmosfera (ex. velocidade do ar e nebulosidade) e os permanentes resultantes da materialização das cidades. A Figura 7 representa esquematicamente um modelo de desenvolvimento de ICU atmosférica.

Focando nas variáveis controláveis do desenho urbano e suas estruturas, observamos diferentes superfícies climaticamente ativas. São fachadas opacas ou envidraçadas, estacionamentos e ruas com pavimentadas, coberturas metálicas, concreto, gramados, solo exposto, espelhos d'água, entre outros. Essas superfícies apresentam comportamentos diversos e, de acordo com OKE et al. (2017), podem ser compreendidos sob aspectos da radiação, propriedades ópticas e térmicas dos materiais, umidade e aerodinâmicos.

Figura 7. Variáveis relacionadas ao desenvolvimento de ICU.



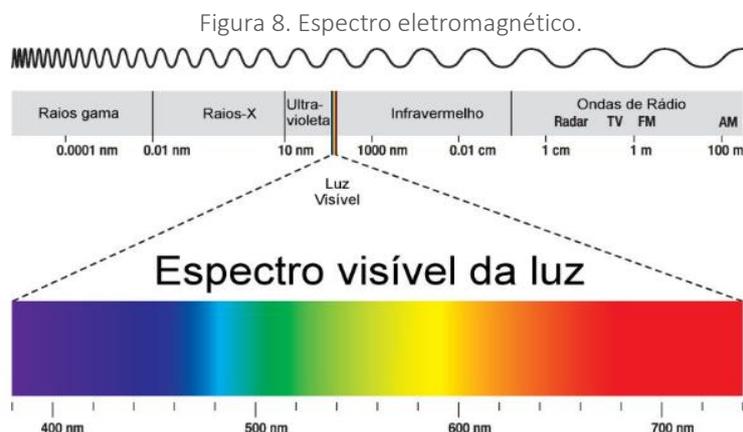
Fonte: Adaptado de Memom et al., 2008, p.121. Tradução da autora.

Radiação

A radiação é uma variável fundamental no estudo do ambiente térmico das cidades e das edificações. A radiação se propaga como radiação eletromagnética na forma de ondas. Corpos com temperaturas mais elevadas como o Sol emitem radiação térmica em ondas curtas. No meio urbano, com temperaturas de superfícies mais elevadas, há aumento da radiação emitida no espectro de ondas longas (LOMBARDO, 1985).

Antes de aquecer as superfícies da cidade, a radiação solar passa através da atmosfera, onde suas partículas constituintes e as nuvens refletem parte da radiação solar de ondas curtas para o espaço e absorvem a outra parte. A radiação restante é transmitida diretamente para as superfícies terrestres. A terra, por sua vez, reflete parte dessa radiação direta (3%) e absorve o restante. Esta radiação absorvida é emitida para a atmosfera como radiação de onda longa.

A radiação solar de onda curta absorvida pelas nuvens e pela atmosfera também é emitida como radiação de onda longa, em parte para a terra e em parte para o espaço. Durante sua passagem pela atmosfera, sofre uma decomposição formando um espectro eletromagnético com diferentes comprimentos de onda (Figura 8).



Fonte: <https://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico/>

Ainda em consequência da passagem pela atmosfera, a radiação incidente na superfície terrestre ocorre de duas formas: componente solar direta e a componente solar difusa, radiação que é redistribuída pela abóbada celeste. Logo, partindo do princípio que todo corpo aquecido emite radiação térmica, constata-se que superfícies, pessoas e animais em nosso meio ambiente estão em constante troca de calor por radiação.

Quando uma superfície recebe radiação direta sua temperatura aumenta, nesse caso há um fluxo de calor sensível entre diferentes superfícies ou entre o ar e uma superfície, em função da orientação em relação à trajetória solar. O fluxo de calor latente é o calor necessário para os processos de trocas úmidas como o processo de evapotranspiração onde o calor é retirado do ar ou da superfície para a mudança de fase da água.

O processo de troca de calor por radiação é determinante no estabelecimento da temperatura das superfícies urbanas, que influencia (e é influenciado) pela transferência de calor por convecção, bem como a transferência de calor por condução. Nas fachadas e coberturas de edifícios, a transferência por condução é fundamental no consumo energético da edificação e, no caso de superfícies translúcidas, a “energia transmitida por ondas curtas é convertida em calor ou eletricidade, desde que o edifício incorpore fontes fotovoltaicas ou coletores solares” (ROBINSON, 2011, p. 17, tradução da autora).

Já no período noturno, com a ausência da radiação solar direta, o meio urbano começa a dissipar toda energia acumulada. De acordo com o Centro Nacional de Pesquisas Meteorológicas da França (CNRM - FRANCE, 2020), o efeito do acúmulo de calor é potencializado pela geometria tridimensional da cidade que, à noite, limita o resfriamento do ar em comparação com o meio rural aberto e sem obstruções. Dessa forma a ICU não é criada apenas porque o ar urbano aquece rapidamente, mas também porque se resfria lentamente (CNRM - FRANCE, 2020).

Propriedades térmicas dos materiais

O desempenho térmico dos materiais de construção depende de suas características térmicas e óticas como o albedo (ou refletância) e a emitância de radiação de ondas longas. Estudos para mitigação dos impactos de ICU abordam o uso dos chamados materiais frios (do termo *cool materials*) que se caracterizam por alta refletância para radiação de ondas curtas e alta emitância para radiação de ondas longas (AKBARI *et al.*, 2019; MARTILLI *et al.*, 2020).

De acordo com a ABNT (2005), a refletância é a taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente. Dessa forma, o desempenho térmico dos materiais no meio urbano também dependerá da radiação solar incidente. Parcelas da radiação solar serão absorvidas, refletidas e transmitidas dependendo se a superfície é opaca ou transparente, ocorrendo ganho de calor.

Com relação à interação entre radiação solar e geometria urbana, Oke (1988) enumera dois aspectos relevantes: o albedo da superfície e o acesso solar. As superfícies urbanas apresentam albedos variados como pode ser visto no Quadro 3 .

Quadro 3. Albedo dos principais materiais urbanos.

Superfície	Albedo	Superfície	Albedo
Asfalto (novo-antigo)	0.05 – 0.2	Coberturas	
Paredes		Aço galvanizado	0.35
Concreto	0.10 – .035	Alumínio branco	0.80
Tijolo cor clara	0.30 – 0.50	Área urbana (média)	0.15

Fonte: Adaptado de Santamouris (2001, p. 162). Tradução da autora.

A configuração geométrica do tecido urbano intercepta a radiação solar podendo alterar o valor do albedo urbano pelo sombreamento e radiação refletida alterando a habilidade de uma área urbana em absorver radiação solar (SANTAMOURIS, 2001). Complexo e dinâmico, para Corbella e Yannas (2003, p. 231) o “jogo de absorção e emissão das superfícies determinará (em partes) sua temperatura”.

Umidade

A porcentagem de superfícies de permeáveis é consideravelmente menor em áreas urbanas quando comparado com as áreas rurais. Como resultado, superfícies urbanas promovem rápido escoamento da água da chuva e, devido à falta de porosidade, pouca umidade é retida nas superfícies (ROMERO *et al.*, 2019). Logo, com reduzida capacidade de infiltração de água para o solo, observa-se uma redução da umidade nas superfícies de áreas urbanas.

A vegetação desempenha importante papel no arrefecimento urbano por meio do processo de evapotranspiração. Trata-se de um conjunto de processos físicos (evaporação) e fisiológicos (transpiração) que transformam a água precipitada na superfície terrestre em vapor, sendo indisponível para uso humano, mas importante alimentador da chuva e do ciclo hidrológico (RENNÓ e BORMA, 2017). No processo de evaporação acontece a transferência de calor latente da superfície evaporativa para o ar contribuindo para o seu resfriamento.

Os corpos d'água e o solo também contribuem com o arrefecimento por meio do processo de evaporação, sendo este último dependente da condutividade hidráulica e das características de armazenamento e retenção de água (RENNÓ e BORMA, 2017).

Para os solos, é importante destacar a admitância térmica⁹, especialmente na intensidade de ilhas de calor de superfície. Segundo Arnfield (2003, p.17), os solos úmidos possuem valores de admitância térmica que não são muito diferentes dos valores típicos dos materiais urbanos, o que pode explicar a intensidade negativa de ICU diurnas encontradas em áreas tropicais úmidas. Dessa forma, a radiação solar direta em ambiente aberto favorece rápido aumento de temperatura de superfície em áreas rurais sob condições úmidas.

Outro aspecto sobre a umidade do ar é que essa resulta da contribuição natural (precipitação, evaporação, evapotranspiração) e antropogênica, sendo a queima de combustíveis fósseis uma das atividades que aumentam os índices de vapor de água no meio urbano. A poluição, o acréscimo de vapor de água, a convecção térmica associada à ilha de calor e efeitos de turbulência influem no aumento das precipitações sobre áreas urbanas (TORRES e MARTINS, 2005).

Propriedades aerodinâmicas

A ventilação no meio urbano resfria as superfícies, reduz o consumo de energia e melhora o conforto térmico humano sob condições quentes, especialmente nas regiões tropicais. Acrescenta-se que, a ventilação natural, segundo Santamouris (2012), é o instrumento mais eficaz para melhorar a qualidade do ar em áreas urbanas, protegendo a saúde.

Romero (2013) coloca que o vento é o dado meteorológico mais variável e, na escala microclimática, as características dos obstáculos urbanos são determinantes para a ocorrência de variações acrescentando complexidade para um estudo de ventilação urbana. Nesse sentido, Ghiaus e Allard (2012) afirmam que o fluxo de vento é caracterizado por forte turbulência próximos do solo quando observaram registros da variação temporal da velocidade do vento.

Na camada limite atmosférica, a “turbulência é gerada por qualquer obstáculo no solo, bem como por instabilidades térmicas” (GHIAUS e ALLARD, 2012, p. 59, tradução da autora). Logo, observa-se que o atrito e o aquecimento das superfícies são relevantes no ambiente urbano, alterando o perfil de velocidade do vento.

As superfícies contribuem para esses processos por meio da sua rugosidade e do fluxo de calor sensível. A rugosidade é uma característica aerodinâmica que, nessa escala, varia em função da natureza do terreno e da geometria dos obstáculos e é descrita pelo comprimento da rugosidade (Z_0). Assim, Z_0 é a altura na qual a velocidade horizontal do vento tende a zero (LYRA e PEREIRA, 2007).

A troca de calor pode ser expressa como o gradiente vertical da temperatura potencial vezes o comprimento da rugosidade, logo um comprimento de rugosidade menor implica em menos trocas entre a superfície e a atmosfera (LINACRE e GEERTS, 2020).

⁹ Admitância térmica pode ser entendida como a habilidade de uma superfície para armazenar/liberar calor alterando sua temperatura mediante um fluxo de calor incidente (OKE, 2009). Um material de alta admitância térmica absorve e libera o calor rapidamente. A condutividade térmica é a propriedade que controla a passagem do fluxo de calor e, devido à condutividade térmica da água ser maior do que a do ar, um solo úmido tem uma condutividade térmica maior do que um solo seco.

1.3. FORMA URBANA E CLIMA

Edifícios, parques, espaços ao ar livre, ruas, calçadas, cruzamentos, rio e árvores são exemplos de elementos que compõem o tecido urbano dando sua forma, contornos e porosidade à ele. A geometria urbana tem ação direta na alteração do fluxo de ventilação, absorção de energia e na emissão de radiação de onda longa para a atmosfera por meio de suas superfícies aquecidas (OKE, 1987).

Muitos recursos de desenho urbano influenciam o clima em escala local, como a forma, estrutura e densidade urbana, permeabilidade da superfície distribuição de edifícios e árvores, orientação e metabolismo. Existe uma forte relação entre essas características e consumo de energia em edifícios e conforto térmico de espaços ao ar livre (AKBARI *et al.*, 2016).

Além dos aspectos visuais, o estudo da geometria urbana e clima urbano pode ser explorado por meio de parâmetros morfológicos como fator de visão do céu (FVC), medida da fração do céu visível em um ponto de observação no espaço urbano, quantificando assim o grau de obstrução gerado pelo entorno. Esse aspecto atua principalmente nas alterações de trocas térmicas com o céu dificultando o resfriamento das superfícies.

Outro aspecto é a relação geométrica formada pela rua e edificações chamada relação W/H (wide/height - distância entre edifícios/altura dos edifícios). Essa relação também tem impacto direto na radiação solar incidente nas superfícies e sua absorção pelas edificações, sendo proporcional à elevação dos edifícios e o espaço entre eles (ROMERO, 2015).

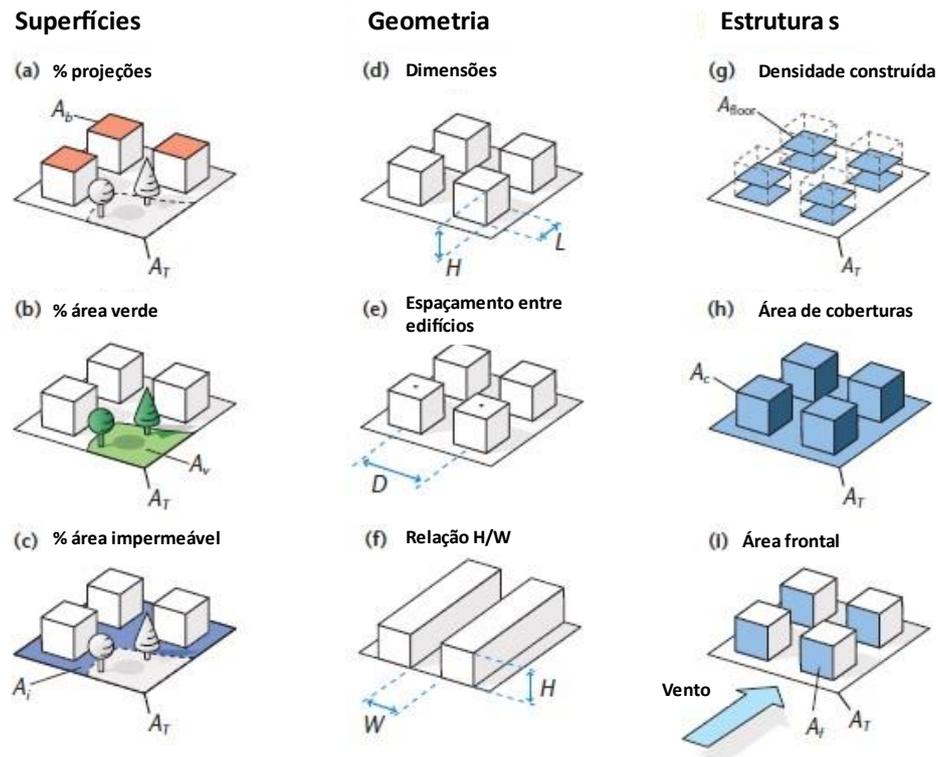
O planejamento do traçado das ruas e avenidas e esse “layout” determina sua estrutura, muitas vezes seguindo requisitos de estabelecer ligações para o transporte (ERELL, 2008, p.103). A orientação das ruas em relação ao clima urbano tem como princípio a trajetória solar ou aos ventos predominantes, como empregado em bons exemplos de adaptação ao clima do lugar à da arquitetura vernacular (ROMERO, 2013). Nos desenhos modernos e contemporâneos, essas considerações são pouco incorporadas no processo de concepção visando um impacto positivo no microclima.

Outro aspecto é a densidade urbana, que influencia e é influenciado pela estrutura da cidade. Existem várias fórmulas para esse cálculo e, geralmente, medem a densidade urbana média do número de residências por unidade de área do local ou pela razão da área total construída até a área do local, comumente apresentado assim em códigos de obras e planos diretores.

Erell (2008) coloca a densidade na forma que os climatologistas se referem: a densidade da área do plano, que é a razão entre a pegada dos edifícios (área de projeção) e a área total do lugar; ou a densidade da área frontal, que é a razão entre sua elevação (em barlavento) para a área do lugar.

Sob o ponto de vista do clima urbano, a densidade tem um efeito na exposição das superfícies urbanas à radiação solar direta e ao vento, provocando áreas de sombra e efeitos aerodinâmicos (OKE *et al.*, 2017). A Figura 9 demonstra algumas dessas características de forma simplificada.

Figura 9. Características simplificadas das superfícies urbanas.



Fonte: Oke et al., 2017, p. 21. Tradução da autora.

1.3.1. A vegetação na cidade

Os efeitos positivos da vegetação nas cidades tropicais vão além dos atributos estéticos e de bem estar, sendo possível observar sua contribuição para efeitos climáticos em várias escalas, como exemplo o efeito oásis ou ilhas de frescor, antagônico ao efeito de ilha de calor (ERELL, 2008). Esse fenômeno de arrefecimento em áreas urbanizadas produz picos de temperatura do ar mais amenas que as áreas do entorno sem vegetação (GARTLAND, 2010).

Os mecanismos de arrefecimento da vegetação mais conhecidos são a captação da radiação solar proporcionando sombra e a evapotranspiração (processo explanado no tópico anterior - Umidade), além de contribuir no controle dos ventos e na fixação de poluentes (TAHA *et al.*, 1997; ROMERO, 2011). São diversos benefícios relevantes para resiliência urbana, no entanto, nesta revisão de literatura será tratado os efeitos da vegetação sobre a temperatura do ar e de superfície.

Durante o dia, as temperaturas das superfícies e do ar são influenciadas pelo sombreamento, albedo, disponibilidade de água, compactação e pelas propriedades térmicas do solo interagindo em processos de absorção de radiação e de resfriamento evaporativo. Já à noite, as propriedades térmicas e o FVC são os principais controles de resfriamento (GARTLAND, 2010). Isso pelo fato de, à noite, na ausência de luz solar, não há processo de fotossíntese. Com os estômatos fechados não há processo de resfriamento por transpiração (RENNÓ e BORMA, 2017).

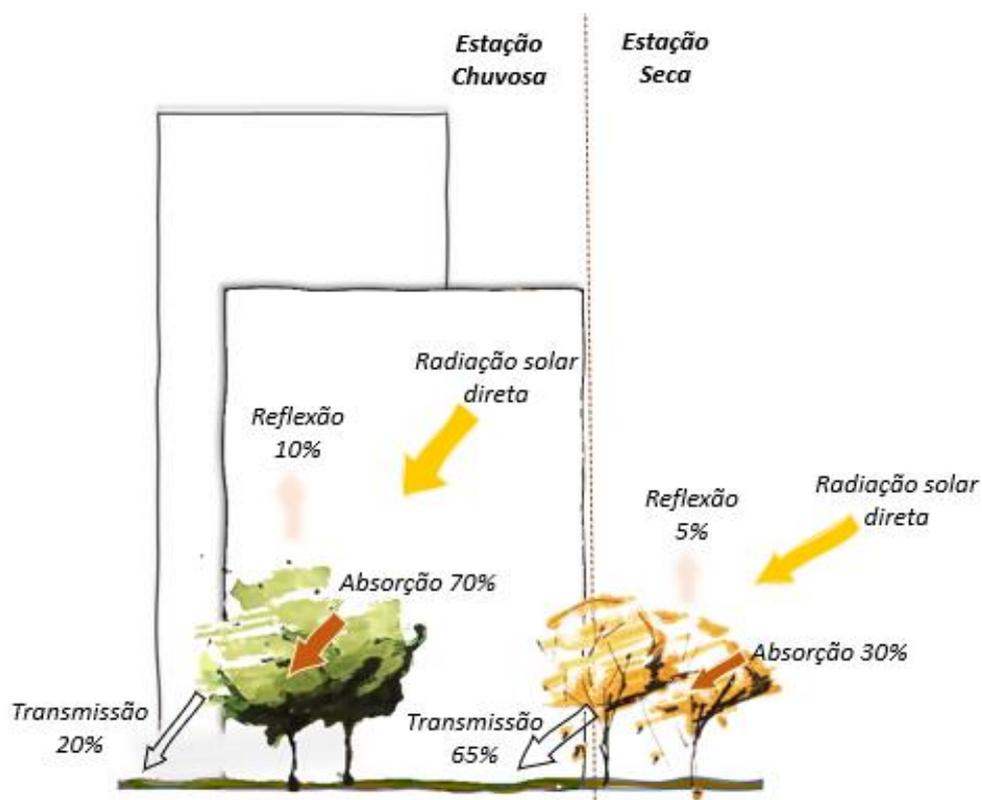
Outro efeito de arrefecimento distinguido por ser definido pela temperatura de superfície é efeito parque, derivado do termo em inglês *park cool island* (ERELL, 2008). Temperaturas radiométricas em parques urbanos, com irrigação suficiente, geralmente

são 2 - 4°C mais frias em comparação com áreas edificadas, enquanto a redução da temperatura do ar varia entre 1 - 2°C de acordo com a extensão do parque e a proporção de árvores (OSMOND e SHARIFI, 2017, p.21).

Outra característica citada que inibe o resfriamento noturno se deve à obstrução de parte do céu (expressa pelo FVC) que as árvores produzem dependendo do distanciamento entre elas. Ou seja, o efeito de resfriamento depende de uma combinação de vários fatores que, segundo Oke (1989), torna bastante complexa a interação entre árvores e o ambiente urbano. O autor faz uma analogia entre o papel das copas das árvores (“*vegetation canopy*”) com os edifícios construindo o dossel da cidade onde ambos interceptam não só a radiação solar, mas também a radiação de ondas longas provenientes do solo e das superfícies verticais (OKE, 1989, p. 336).

Erell (2008) destacou exemplos de estudos empíricos sobre a vegetação e a disponibilidade de água onde os achados científicos correlacionam o aumento na evaporação como fator responsável pela menor temperatura de superfície e temperatura do ar acima dos gramados, e não a mera presença de plantas. As estratégias visando resfriamento, portanto, dependem da disponibilidade de água para o crescimento e irrigação da vegetação e da escolha das espécies dentro do contexto do clima e sua função (Figura 10).

Figura 10. Exemplo da sazonalidade das árvores caducas.



Fonte: elaborado pela autora com base em Osmond e Sharifi, 2017, p.21.

1.3.2. Morfologia urbana sob o ponto de vista do clima: as zonas climáticas locais

A classificação da paisagem urbana proposta por Stewart e Oke (2012) é uma evolução de diversos estudos que propunham simplificar tipologias urbanas e rurais sob

a ótica do clima urbano. A proposta de classificação das zonas climáticas locais (ZCL) ou *local climate zones* (LCZs) como é referida internacionalmente, parte de classes genéricas que são desmembradas em subclasses, promovendo a simplificação dos cenários. A estrutura é culturalmente neutra para classificar e delinear paisagens urbanas em um esquema climático universal usando sensoriamento remoto em combinação com o conhecimento de especialistas locais (BECHTEL *et al.*, 2015).

Por se tratar de uma descrição genérica, as LCZs utilizam parâmetros urbanos mensuráveis na forma e função urbanas. O esquema foi desenvolvido para descrever paisagens (urbanas e naturais) que exibem comportamentos térmicos distintos devido às suas propriedades de superfície e tem sido amplamente utilizado em estudos da ilha de calor urbana.

Primeiramente, identificam-se as tipologias, definidas em escala local, a partir das características físicas diferenciadas em termos de superfície: permeáveis ou impermeáveis, que interferem no albedo, na umidade e no aquecimento e resfriamento do solo; e pelas estruturas das superfícies: altura e espaçamentos dos edifícios e da vegetação, que modificam o fluxo do ar, o transporte do calor atmosférico e nas ondas de radiação (STWEART e OKE, 2012). Neste sentido, são definidas 17 classes distinguíveis com base em características de cobertura da superfície, estrutura, material e atividade humana.

Embora as LCZ tenham o propósito original de as facilitar medições da magnitude de ICU entre tipos urbanos ($\Delta T_{LCZ 1} - T_{LCZ 2}$), o esquema também fornece uma descrição dos climas locais da camada CDU. São analisados aspectos geométricos, térmicos, radiativos e metabólicos representativos de cada LCZ.

O esquema tem recebido considerável aceitação e interesse geral por esse na área do clima urbano (CHING *et al.*, 2018; HIDALGO *et al.*, 2019; DEMUZERE *et al.*, 2019). Porém, algumas dúvidas surgem sobre a capacidade representativa de cada zona. Bechtel *et al.* (2015), identificaram a dificuldade para locar sensores para realização de registros de temperatura do ar nos protótipos para obter um sinal correspondente.

Essa questão levou à identificação que, uma vez que o processo é uma simplificação da cidade, cada classe inevitavelmente terá uma certa heterogeneidade interna. Isso significa que, para fins de classificação, é crucial o conhecimento das áreas para precisar os limites das classes. No Capítulo 4 é apresentada a aplicação da classificação de LCZ para o Distrito Federal.

1.4. CLIMA URBANO E ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO E MITIGAÇÃO

Na cruzada para o antropoceno¹⁰, os estudos relacionados ao clima e sua interação com a cidade abordam não só ICU mas também o ciclo hidrológico e alagamentos, poluição atmosférica, mobilidade, eficiência energética, infraestrutura verde e azul, sociedade, saúde e economia urbana, envolvendo especialistas de várias áreas do conhecimento. Diante do exposto neste capítulo, percebe-se que desde as contribuições iniciais de Luke Howard às robustas pesquisas de clima urbano de Tim Oke, houve uma

¹⁰ Termo baseado no conceito liderado por Paul Crutzen (Prêmio Nobel de Química) de que a humanidade atua como uma força geofísica, vetor de uma mudança ecossistêmica global, tendo seu início atribuído ao período da Grande Aceleração (meados do século XX), marcando o encerramento do Holoceno (VEIGA, 2019).

consolidação da literatura, principalmente na conceituação, observação e documentação (MILLS, 2009).

Há um vasto material afirmando que habitantes de áreas urbanas estão suscetíveis a episódios relacionados ao clima e ao impacto das mudanças climáticas sobre o meio urbano, principalmente em cidades que experimentam a expansão da sua população sem planejamento (NOBRE, 2011; UN, 2015, 2015a). Com o avanço dos estudos sobre as mudanças climáticas globais, um foco de luz foi disparado para o papel das cidades. Para se orientar à sustentabilidade urbana, o viés dos estudos nos anos recentes voltou-se para os efeitos urbanos que precisam ser mitigados e que exigem uma capacidade de adaptação das cidades e do estilo de vida (CALTHORPE, 2010, LARSEN, 2015; CHING *et al.*, 2018).

A climatologia urbana tornou-se um campo de estudo de colaboração interdisciplinar e em escala internacional segundo Hidalgo *et al.* (2019). Internacional na difusão de pesquisas e na organização de redes de trabalho (como exemplo o IPCC e a WMO) e interdisciplinar na convergência inerente de diversas áreas do conhecimento contribuindo para o “avanço das fronteiras” e na transferência de “métodos de uma área para outra, gerando novos conhecimentos ou disciplinas” (PHILIPPI JR, 2018, p.5).

Sobre os avanços pode-se citar a produção de dados urbanos e novos conhecimentos relacionados com a evolução dos modelos numéricos para simulação de ICU e microclimas, sensoriamento remoto urbano, *open data*¹¹, *open source*¹², *crowdsourcing*¹³ e os esforços na padronização de métodos descritivos como as LCZs pelo WUDAPT e os mapas climáticos urbanos (conhecidos em inglês como UCMMap). UCMMaps são difundidos na Alemanha e Hong Kong e atingem o refinamento de apontar diagnóstico e recomendações para zoneamento territorial e código de obras.

Para Hidalgo *et al.* (2019), essa interdisciplinaridade não deve se concentrar apenas em aspectos técnicos, metodológicos e ferramental, mas também materializar-se no planejamento urbano integrando-se ao conhecimento local. A aquisição de dados para estudos de clima urbano é fundamental visto que uma descrição coerente com a realidade da cidade, tanto em escala quanto em forma e função, é necessária para as implementações de estratégias de mitigação e adaptação aos efeitos das ilhas de calor. Nos tópicos seguintes serão discutidas estratégias de mitigação/adaptação e integração de conhecimentos sobre o clima urbano.

1.4.1. Adaptação e mitigação dos efeitos do aquecimento urbano

Os planejadores urbanos, arquitetos urbanistas e outros profissionais têm procurado compreender localmente os efeitos associados ao clima urbano e às mudanças climáticas quanto à magnitude, impactos, espacialização e temporalidade

¹¹ Termo que indica dados abertos e permitidos para utilização sem restrição de direitos autorais ou patente como exemplo o Geoportal do GDF.

¹² Termo que indica que um programa possui seu código fonte aberto e receptivo às contribuições de outros desenvolvedores como o programa SAGA GIS.

¹³ Termo popular de tecnologia da informação para coletar e compartilhar observações do cotidiano podendo ser aplicado ao clima urbano. São dados como imagens e textos que fornecem informações temporais e espaciais por meio de dispositivos móveis, mídias sociais e infraestrutura de telecomunicações, como exemplo o Open Street Map. Possui a crítica da comunidade científica pelo volume de dados que pode ser gerado e que carece de validação (MAO e LONG, 2014).

para lançar mão de estratégias de mitigação e adaptação. Como já foi referido, impactos positivos ou negativos não são distribuídos uniformemente no meio urbano.

Os impactos negativos advindos do excesso de calor e das inundações se conectam também à disponibilidade de recursos como água e energia, afetando a saúde humana, serviços e gestão pública. Heinrichs *et al* (2013, p. 1868) tratam essa questão com o conceito de “segurança ecológica”, entendida por uma relação crítica entre meio ambiente e segurança humana, essenciais para sustentar as funções econômicas e sociais das cidades. A partir de avaliações de risco pode-se abordar a vulnerabilidade e possíveis respostas com medidas de adaptação.

As medidas de adaptação, segundo Heinrichs *et al.* (2013), caracterizam-se pela capacidade de se preparar para os riscos e oportunidades, nesse caso uma adaptação proativa, ou capacidade para ajustar-se à efeitos negativos potenciais ou reais (ex.: eventos extremos) – adaptação reativa. Para os autores, a capacidade adaptativa sempre envolve processos de aprendizado relacionados principalmente à longo prazo (HEINRICHES *et al.*, 2013, p. 1870).

A vulnerabilidade pode ser de vidas humanas ou de sistemas naturais sujeitos à efeitos das mudanças climáticas (NGUYEN *et al*, 2018). Uma estratégia de adaptação envolve a identificação da exposição do país a impactos atuais e futuros com base em projeções de clima, a identificação e análise da vulnerabilidade à esses possíveis impactos e a definição de diretrizes que promovam a adaptação voltadas para cada setor.

Os fatores de exposição ao clima incluem a temperatura, a precipitação, a evapotranspiração e o balanço hidrológico, bem como os eventos extremos de chuva e secas. Percebe-se que se trata de um sistema complexo entre cidade e meio ambiente onde vários fatores são tratados simultaneamente para produzir informações ao planejamento urbano.

O Brasil criou em 2016 o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima¹⁴ (PNA), um instrumento elaborado em colaboração com a sociedade civil, setor privado e governos estaduais para promover a redução da vulnerabilidade nacional à mudança do clima e realizar uma gestão do risco. Os setores abordados no PNA são: agricultura, recursos hídricos, segurança alimentar, biodiversidade, cidades, gestão de risco de desastres, indústria e mineração, infraestrutura, povos e populações vulneráveis, saúde e zonas costeiras.

As estratégias para as cidades são firmadas sobre a integração das esferas governamentais para a redução da vulnerabilidade atual e futura e, na esfera federal, quatro eixos estratégicos são destacados: planejamento urbano, habitação social, saneamento ambiental e mobilidade urbana. As diretrizes abordadas são do tipo sem arrependimento, ou seja, almejam promover os benefícios agora, com ou sem mudanças climáticas. Para Di Giulio *et al.* (2016), críticas ao PNA apontam pouca projeção no país relacionadas à complexidade na adaptação, incertezas às projeções climáticas e limitações econômicas, institucionais e políticas.

As avaliações de vulnerabilidade são mais comumente conduzidas a partir dos modelos climáticos para o nível regional. Modelos climáticos globais como os produzidos pelo IPCC possuem resolução para a escala planetária/continental

¹⁴ Instituído por meio da Portaria nº 150. O primeiro e único Relatório de Monitoramento e Avaliação do Plano está disponível em: <https://www.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao>. Último acesso em 15 de maio de 2020.

necessitando de técnicas estatísticas como o *downscaling* para regionalizar os dados. Cidades carecem então de dados de clima futuro compatíveis com sua escala (MASSON, 2018). Outra carência é o desenvolvimento de sistemas de previsão climática e monitoramento do clima urbano (DUARTE *et al.*, 2019).

Serviços meteorológicos geralmente fazem registros orientados às condições não urbanas ou em aeroportos, focados em previsão do tempo, agricultura e defesa (HIDALGO, *et al.*, 2019). Em geral, as dificuldades de se obter dados climáticos para as cidades (clima atual, séries históricas e cenários futuros) contribuem para que as ações sejam mais dedicadas à mitigação em vez de medidas de adaptação, seja para os efeitos do aquecimento urbano com ou sem mudanças climáticas (NGUYEN *et al.*, 2018).

Mudando o foco para as estratégias de mitigação, a primeira questão que deve compreender seria quais efeitos negativos do clima urbano devem ser mitigados e onde são proeminentes no território. Segundo Martilli *et al.* (2020), as estratégias devem reduzir os impactos negativos do calor urbano, em vez de focar em mitigar a magnitude da ICU, uma vez que é improvável que essas estratégias reduzam a magnitude da ICU (relativizando com a área rural). Mas, poderão reduzir os picos de temperaturas na cidade durante o dia, o que é benéfico uma vez que há alta demanda de consumo energético para resfriamento neste período (ERELL, 2017).

Logo, a eficácia de uma estratégia depende das características térmicas, sociais, econômicas, culturais e não apenas da diferença urbano-rural. Também a avaliação do conforto térmico e seus índices podem ser adaptados a diferentes climas e culturas, mas não muda o fato de serem independentes das diferenças térmicas urbano-rurais (MARTILLI *et al.*, 2020, p.2).

Estudos demonstraram que a ilha urbana de calor leva a um aumento do consumo de energia para ar condicionado. Akbari *et al.* (2016) apontam um aumento do pico e demanda global de eletricidade por sistemas ativos de condicionamento de ar. Outros estudos relatam também uma diminuição no desempenho desses sistemas ativos atribuídos principalmente às características do envelope do edifício, ao microclima e ao comportamento dos ocupantes (OSMOND e SHARIFI, 2017; ZINZI e SANTAMOURIS, 2019).

A temperatura do ar elevada acelera os processos químicos na atmosfera, particularmente a formação de ozônio troposférico¹⁵ em reações entre compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio (NOx), originários da poluição do ar (ERELL, 2017).

De acordo com Nogueira (2018), enquanto o ozônio na atmosfera superior fornece uma triagem essencial da radiação UV, sua presença em altas concentrações na CDU é tóxica e pode resultar em doenças respiratórias. Outro poluente emitido em áreas urbanas com impacto local e global é o carbono negro¹⁶ que também altera o albedo terrestre (NOGUEIRA, 2018).

Em geral, as estratégias para mitigar o aquecimento urbano almejam reduzir o ganho térmico e facilitar as perdas térmicas de acordo com o contexto urbano e

¹⁵ O ozônio troposférico é formado na troposfera através de reações fotoquímicas (na presença de raios UV) sofridas por compostos emitidos pelas atividades antrópicas (NOGUEIRA, 2018).

¹⁶ O carbono negro é um aerossol atmosférico produzido por combustão de material carbonáceo em altas temperaturas cujas fontes de emissão são: queimadas, atividades industriais, transporte (motores a diesel). É uma substância que absorve a radiação solar e não permite que a radiação refletida pela superfície terrestre saia da atmosfera, por isso contribui para elevar a temperatura do ar (NOGUEIRA, 2018).

climático. As técnicas recomendam reduzir temperatura de superfícies como em coberturas e pavimentos (alto albedo e emissividade), vegetação urbana, água, ventilação e sombreamento.

Materiais frios

As características térmicas dos materiais de construção contribuir significativamente para esse armazenamento de calor. Portanto, aplicação de materiais com maior refletividade, menor capacidade térmica e, no caso de materiais de pavimentação, maior permeabilidade pode ser uma método que atenda os objetivos da mitigação do aquecimento das superfícies urbanas.

Os chamados materiais frios podem ser aplicado como pavimentação urbana, construção de telhados e paredes. Um material de superfície frio possui alta emissividade (ondas longas) e alta refletância solar (albedo) ou, no caso de materiais permeáveis, um alto nível de umidade incorporada a ser evaporada ou infiltrada para o solo atuando redução do fluxo de calor sensível entre a atmosfera e a superfície pavimentada (SANTAMOURIS, 2013).

Uma vantagem para uma ação mitigadora envolvendo pavimentos e coberturas é a grande disponibilidade de áreas nas cidades para sua implementação (ruas, calçadas, estacionamentos e telhados) (GARTLAND, 2010). Entretanto, o aumento do albedo pode intensificar as interações térmicas entre o pavimento e outras superfícies do entorno como paredes dos edifícios e o próprio corpo humano por causa do aumento da radiação refletida.

Outro ponto a ser estudado se refere à probabilidade dessas superfícies com albedo alto (portanto de cores claras) escurecerem com o tempo em função do depósito de sujidades perdendo sua capacidade de reflexão (LI, 2012). Já as pesquisas com os pavimentos permeáveis estão direcionadas para o aumento de sua capilaridade, constatando que sua resposta térmica depende da disponibilidade de água para evaporação (SANTAMOURIS, 2013). De forma geral, ainda existem limitadas informações científicas sobre o desempenho térmico desses materiais a médio e longo prazo.

Vegetação

Como já foi visto, os mecanismos pelos quais a vegetação afeta a troca de energia entre superfícies e o ambiente são pelo processo de evapotranspiração e pelo sombreamento. As estratégias podem ser resumidas em:

- A vegetação pode sombrear as fachadas dos edifícios, reduzindo a carga radiante do seu envelope. Em climas com estações que exigem aquecimento e resfriamento, as espécies decíduas são frequentemente utilizadas na arborização de ruas e em estruturas como treliças. Como exemplo, a pesquisa de Sorte (2016) testou espécies com hábito trepador do bioma cerrado, que podem ser empregadas em paredes verdes, e identificou espécies que melhor desempenham em termos de redução de temperatura do ar e maiores taxas de umidade relativa do ar no contexto climático de Brasília.
- As coberturas verdes também se valem do sombreamento e evapotranspiração das plantas para obter temperaturas mais baixas na superfície e menores ganhos de calor. O desempenho do conjunto depende da

densidade da folhagem, espessura do substrato e seu teor de água (ERELL, 2008).

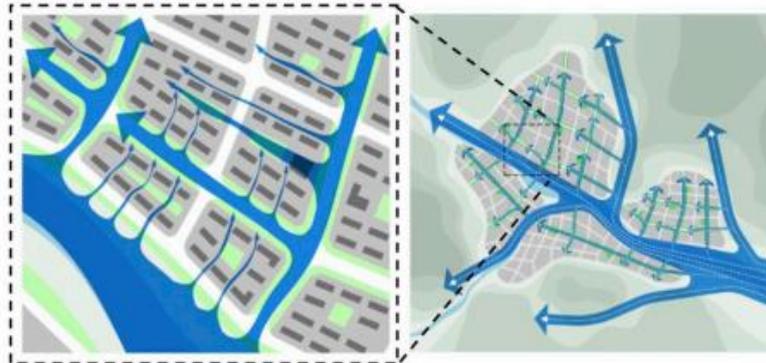
- O dossel das árvores proporciona sombreamento das superfícies minimizando também o ganho de calor no nível do pedestre (ROMERO, 2015).
- Os gramados utilizam os mesmos princípios para resfriamento da superfície, exceto por não fornecerem sombra. Vianna (2018) estudou a temperatura de superfície desses exemplos em Brasília por meio de sensoriamento remoto e, no período da seca, não observou esse efeito de resfriamento. É um comportamento dependente da disponibilidade de água para irrigação.

Ventilação

A ventilação urbana depende de fluxos de vento em várias escalas e das características das cidades tanto do ponto de vista do ambiente construído (porosidade, rugosidade) quanto do clima local (OKE, 2006). Elaborar corredores de vento pode contribuir para a qualidade do ar na dispersão de aerossóis e para o conforto térmico dos pedestres, especialmente em zonas de clima tropical úmido (REN *et al.*, 2018).

Os corredores de vento devem ser interligados com espaços abertos, como parques, praças, corpos d'água e áreas com construções espaçadas criando corredores principais e secundários orientados ao vento predominante do verão. A Figura 11 propõe uma representação dos corredores de vento em níveis.

Figura 11. Corredores de vento principais e secundários (nível da vizinhança e nível da cidade).



Fonte: Ren *et al.*, 2018, p. 173

Estratégias combinadas

Dependendo do contexto urbano, climático e econômico, uma gama de estratégias de mitigação podem ser utilizadas de forma combinada e flexibilizadas para acompanhar a sazonalidade. Espaços públicos maiores, como praças e parques podem se beneficiar mais com pavimentos permeáveis e vegetação em geral, pois há espaço para o plantio. Técnicas com água em movimento podem ser usadas quando houver espaço e recurso disponível para aumentar o resfriamento evaporativo (exceto em climas úmidos) em combinação com aspersores (ROMERO, 2015).

Superfícies com alto albedo em fachadas e pavimentos não são recomendados para espaços com alto fluxo de pedestres devido ao ofuscamento e aumento da temperatura média radiante (WERNECK, 2018). Esses materiais podem ser empregados em telhados ou em combinação com vegetação em espaços com baixo fluxo de

pedestres. Fachadas e coberturas verdes podem ser usadas em edifícios e cânions urbanos com limitação de espaço para plantio.

Nessa ótica, segundo Romero (2015) há um enfoque para compreender o lugar com seus condicionantes físicos, climáticos, culturais e históricos para o desenvolvimento de uma arquitetura bioclimática para o espaço público e privado, otimizando as relações energéticas com o microclima.

As contribuições de arquitetos como Barush Givoni (1976) e Victor Olgyay (1998) apresentam análises bioclimáticas para vários climas, relações com o conforto térmico e recomendações relevantes a nível do urbano como tipos de moradia, orientação de ruas e vegetação. Já consideravam um amplo escopo e, atualmente, somados aos avanços da climatologia, indicam um complexo problema que exige uma resposta integradora para o planejamento da cidade.

1.4.2. Alianças entre clima, planejamento urbano e sociedade

No novo milênio, as cidades se tornaram uma força emergente entre novas formas de governança do clima, agindo diretamente na política climática e buscando respostas urbanas para os efeitos do clima (NGUYEN *et al.*, 2018).

Heinrichs *et al.* (2013) exploraram algumas diferenças das políticas estratégicas entre as cidades do hemisfério norte e sul. Para esses autores, no hemisfério norte, as cidades geralmente comprometem-se com medidas de infraestrutura como proteção estratégica contra os impactos das mudanças climáticas. Além disso, tomam medidas para alcançar maior autonomia em termos de consumo e produção de recursos como por exemplo a produção de energia descentralizada, estratégias de eficiência energética em edificações e políticas de estabilização de GEE. Já no hemisfério sul, as respostas são mais pontuais e menos estratégicas, podendo ser relacionadas com a limitação dos recursos econômicos, desigualdades sociais e pela própria agenda política menos interessada em infraestrutura.

Outra característica do impulso das cidades está no entendimento de fazer parte de aglomerações urbanas globais por meio de redes de coalizões, compartilhando as melhores práticas e reunindo poderes (HEINRICH, 2013). Toma-se como exemplo o *C40 Cities*¹⁷, uma rede de colaboração que reúne megacidades e cidades com objetivo de enfrentamento às mudanças climáticas, conduzindo ações urbanas mensuráveis que reduzam as emissões dos GEE e os riscos climáticos (C40 Cities, 2020).

A *Cool Cities Network* faz parte da estratégia da C40 Cities e apoia os esforços da cidade para reduzir o impacto do efeito da ilha de calor urbano, trabalhando em parceria com a *Global Cool Cities Alliance*¹⁸. As cidades participantes da rede priorizaram três áreas em torno das quais estão compartilhando políticas e estratégias: monitoramento e medição de dados de ICU, vulnerabilidade por stresse térmico e soluções de infraestrutura verde e materiais frios. Em se tratando de materiais, há uma necessidade a nível de normas técnicas e laudos que definam padrões para a indústria tendo em vista a implementação apropriada da tecnologia em edifícios e espaços públicos. No mercado brasileiro, essas informações ainda são escassas para quem projeta.

¹⁷ Fazem parte as cidades brasileiras: Curitiba, Salvador e São Paulo.

¹⁸ Aliança lançada em 2010 com objetivo de acelerar a transição mundial para cidades mais frescas e saudáveis por meio de programas de mitigação de ICU e eficiência energética. Fonte: <https://globalcoolcities.org/>

Outro exemplo de aliança é a *Climate Heritage Network*, uma rede de apoio voluntário de organizações de artes, cultura e patrimônio comprometidas em ajudar suas comunidades a combater as mudanças climáticas e alcançar as ambições do Acordo de Paris. O foco é apoiar organizações de jurisdições que investem em ações climáticas concretas, como as da *Under 2 Coalition*¹⁹ e o *Global Covenant of Mayors for Climate & Energy*. Esse exemplo é a maior aliança global para a liderança climática das cidades (mais de 10 mil cidades), onde prefeitos, em parceria com outras redes e organizações como o *Local Governments for Sustainability - ICLEI*²⁰ e as Nações Unidas (UN), aceleram iniciativas mensuráveis de clima e energia que levam a um futuro de baixa emissão e resiliente ao clima.

Esses exemplos são notórios da busca de transferência de conhecimento sobre o clima para a escala da cidade e do edifício que precisam se materializar nas soluções urbanas. Complementando essas redes de parcerias, é importante citar o portal WUDAPT como um dos principais no sentido de fornecer ferramentas para operacionalizar as informações do clima na cidade de forma padronizada (CHING *et al.*, 2018). Essas ferramentas serão trabalhadas nesta tese e discutidas nos capítulos seguintes.

1.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi destacado que mais da metade da população mundial vive nas cidades e, para acomodar as necessidades da população urbana e suas atividades, superfícies naturais foram convertidas em superfícies impermeáveis. Essas modificações superficiais e atmosféricas alteraram o clima local, tornando as cidades mais quentes que as áreas não urbanizadas ao redor. Esse calor relativo é amplamente conhecido como o efeito de ilha de calor urbana e pode ser problemático para as cidades tropicais, pois aumenta a demanda de energia no verão, afeta a saúde e o conforto térmico.

A determinação da escala espacial é fundamental para o entendimento, observação e modelagem do clima urbano. Nas escalas global e regional, o clima de uma cidade é influenciado por seu cenário geográfico: latitude, continentalidade, abertura a eventos sinópticos, proximidade da água, topografia circundante etc. Esses fatores também influenciam o desenho urbano que, cruzando para a microescala, desdobra-se em condições de aquecimento urbano, ou de frescor e influencia comportamentos e atividades de seus habitantes, por exemplo demandas por refrigeração em edifícios, sombreamento, entre outros.

Foi discutido o papel da vegetação, do calor antropogênico e da geometria urbana, cujas estruturas formam barreiras (menor visão do céu) que impedem que a radiação emitida pelas superfícies aquecidas seja liberada para a atmosfera e também altera o movimento do ar dificultando as trocas convectivas intensificando o aquecimento urbano. Adicionalmente, as superfícies impermeabilizadas e as propriedades térmicas

¹⁹ Trata-se de uma comunidade global de governos estaduais e regionais comprometidos com ações climáticas em conformidade com o Acordo de Paris, reunindo mais de 220 governos que representam mais de 1,3 bilhão de pessoas e 43% da economia global. Fonte: <https://www.under2coalition.org/about>

²⁰ ICLEI é uma rede global de mais de 1.750 governos locais e regionais para o desenvolvimento urbano sustentável, ativos em mais de 100 países, influenciando a política de sustentabilidade e ações locais para desenvolvimento de baixa emissão, baseado na natureza, equitativo, resiliente e circular. Fonte: <https://www.iclei.org/>

dos materiais de construção proporcionam temperaturas de superfície mais altas e reduzem a infiltração de água para o solo.

Destacou-se o método das LCZs (STEWART e OKE, 2012) para a análise das diferenças de temperatura dentro das áreas urbanas, entre zonas com estruturas urbanas diferentes, mudando a abordagem rural-urbano. Esse método padronizado será adotado para investigar um dos questionamentos da tese.

Os desafios recentes apontam para estratégias de mitigação e de adaptação dos impactos negativos da ICU por meio de estudos de ventilação urbana, vegetação e alteração dos materiais das superfícies observando as variações térmicas intraurbanas. Logo, a intensidade da ICU não é relevante para a definição ou avaliação de estratégias de mitigação dos efeitos do aquecimento urbano e não é necessariamente um fenômeno que requer mitigação, como exemplo as cidades de clima frio que podem se beneficiar da ICU durante o inverno (MARTILLI *et al.*, 2020).

REFERÊNCIAS

- Akbari H.; Cartalis, C.; Kolokotsa, D.; Muscio, D.; Pisello, A. L.; Rossi, F.; Santamouris, M.; Synnefa, A.; Wong, N. H. e Zinzi, M. Local climate change and urban heat island mitigation techniques – the state of the art, *Journal of Civil Engineering and Management*, 22:1, 1-16, 2016.
- Alcoforado, M. J.; Lopes, A.; Andrade, H. e Vasconcelos, J. Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa. Relatório 4. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa, 2005.
- Arnfield, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*. London: v. 23, n.1, p. 1-26, 2003.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220. Desempenho Térmico em Edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- Bechtel, B.; Alexander, P.; Böhrer, J.; Ching, J.; Conrad, O.; Feddema, J.; Mills, G.; See, L. Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4 (1), p. 199-219, 2015. DOI:10.3390/ijgi4010199.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível online em www.ibge.gov.br. Acessado em 26 de abril de 2018.
- BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Normais climatológicas para Brasília – DF. 2015.
- Câmara Municipal de Leiria, Portugal. Plano Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas – Relatório final. 2018. Disponível em: <https://www.cm-leiria.pt/cmleiria/uploads/writer_file/document/3490/PMAAC-LEIRIA.pdf> Acessado em 28 de dezembro de 2019.
- Calthorpe, P. *Urbanism in the age of climate change*. New York: Island Press, 2010.
- Ching, J., G. Mills, B. Bechtel, L. See, J. Feddema, X. Wang, C. Ren, O. Brousse, A. Martilli, M. Neophytou, P. Mouzourides, I. Stewart, A. Hanna, E. Ng, M. Foley, P. Alexander, D. Aliaga, D. Niyogi, A. Shreevastava, P. Bhalachandran, V. Masson, J. Hidalgo, J. Fung, M. Andrade, A. Baklanov, W. Dai, G. Milcinski, M. Demuzere, N. Brunzell, M. Pesaresi, S. Miao, Q. Mu, F. Chen, and N. Theeuwes. WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 99, 1907–1924, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0236.1>>
- CNRM France. Centre National de Recherches Météorologiques. Climate urbain. Disponível online em: <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?rubrique134&lang=fr>

- Coenen, L.; Davidson, K. e Gleeson, B. Situating C40 in the Evolution of Networked Urban Climate Governance. *Glob Policy*, 10: p. 723-725, 2019. doi:10.1111/1758-5899.12759
- Corbella, O.; Yannas, S. Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos - conforto ambiental. Rio de Janeiro: Revan, 2003. 288p.
- Demuzere, M.; Bechtel, B.; Middel, A.; Mills, G. Mapping Europe into local climate zones. *PLoS One*, 14(4): e0214474, 2019. Disponível em: <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0214474>
- Di Giulio, G. M.; Martins, A. N. B. e Lemos, M. C. Adaptação climática: Fronteiras do conhecimento para pensar o contexto brasileiro. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 30, n. 88, p. 25-41, 2016.
- Dobraszczyk, P. Sunken Cities: Climate Change, Urban Futures and the Imagination of Submergence. *Int. J. Urban Reg. Res.*, 41: 868-887, 2017. doi:10.1111/1468-2427.12510
- Duarte, D. H. S.; Di Giulio, G. M. e Rocha, H. R. Oportunidades e desafios da urbanização para adaptação climática na megacidade de São Paulo, Brasil. In: XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2019, João Pessoa. Anais ... Porto Alegre: ANTAC, 2019. v. I. p. 794-803.
- Erell, E. The application of urban climate research in the design of cities. In: *Advances in Building Energy Research*, v. 2, Issue 1, p. 95-121, Taylor & Francis: 2008. Disponível online em: doi:10.3763/aber.2008.0204
- Erell, E. Is Urban Heat Island Mitigation Necessarily a Worthy Objective? In: *PLEA 2017*, Edimburgo, 2017. Anais. Edimburgo: p. 1693-1701.
- Gartland, L. Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- Ghiaus, C. e Allard, F. Natural ventilation in the urban environment. London: Earthscan, 2012.
- Hidalgo, J., Lemonsu, A. e Masson, V. Between progress and obstacles in urban climate interdisciplinary studies and knowledge transfer to society. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1436: p. 5-18, 2019. Disponível em: doi:10.1111/nyas.13986
- Howard, Luke. The climate of London. IAUC – International Association for Urban Climate Edition, 2007. Disponível em: <https://www.urban-climate.org/documents/LukeHoward_Climate-of-London-V1.pdf>. Acessado em 28 de dezembro de 2019.
- Larsen, L. Urban climate and adaptation strategies. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13: p. 486-492, 2015. Disponível em: doi:10.1890/150103
- Linacre, E. e Geerts, B. Roughness length. Wyoming University. Disponível em: <http://www.das.uwyo.edu/~geerts/cwx/notes/chap14/roughness.html>. Acessado em 28 de janeiro de 2020.
- Lyra, G. B. e Pereira, A. R. Parâmetros de rugosidade aerodinâmica sobre vegetação esparsa em região semi-árida. *Rev. bras. meteorol.*, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 262-272, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862007000200011>.
- Lombardo, M. A. Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Editora Hucitec, 1985. 244p.
- Lowry, William P. Empirical Estimation of Urban Effects on Climate: A Problem Analysis. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)* 16, no. 2, p. 129-135, 1977. Disponível em: www.jstor.org/stable/26178142. Acessado em 27 de April de 2020.
- Martilli, A.; Krayenhoff, E.S. e Nazarian, N. Is the urban heat island intensity relevant for heat mitigation studies? *Urban Climate*, 31, p. 1-4, 2020.
- Martins, T. A. L. De condicionantes solares à oportunidades de desenho urbano: otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto de clima tropical. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- Masiero, E. e Souza, L. Ocupação do solo e microclimas em São José do Rio Preto, SP. In: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, Anais. Campinas, Brasil, 2015.

- Masson, V. Impacts of Global Changes in Cities. In: Dellasala, D., Goldstein, M. Encyclopedia of the Anthropocene. Elsevier. Oxford (UK), 2018.
- Mills, Gerald. Luke Howard, Tim Oke and the study of urban climates. In: Eighth Symposium on the Urban Environment. Phoenix, Arizona, 11 – 15 Janeiro, 2009.
- Mirzaei, P. A. Recent challenges in modeling of urban heat island. Sustainable Cities and Society, v. 19, p. 200–206, 2015.
- Memon, R. A.; Leung, D.; Chunho, L. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. Journal of Environmental Sciences, v. 20, p. 120–128, 2007.
- Monteiro, C. A. F.; Mendonça, F. (org.) Clima urbano. 2. Ed. São Paulo: Contexto, 2015. 191p.
- NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio. Zoom and Spin Around Atlanta: Daytime Thermal View of the Heat Island. Disponível em: <https://svs.gsfc.nasa.gov/1052>. Acesso em: 05 de Junho de 2020.
- Nguyen, T.M.P.; Davidson, K. e Gleeson, B. Metropolitan Strategies and Climate Governance: Towards New Evaluative Approaches. Int. J. Urban Reg. Res., 42, p. 934-951, 2018. doi:10.1111/1468-2427.12662
- Nogueira, T. Poluição atmosférica e clima. Apresentação de aula da disciplina AGM 5832, IAG: USP, São Paulo, 2018.
- Nunez, M. e Oke, T.R. The energy balance of na urban canyon. Journal of Applied Meteorology, p. 11 – 19, 1977.
- Oke, T. R. Boundary Layer Climates. 2ª edição, Routledge, 1987.
- Oke, T. R. The micrometeorology of the urban forest. Philosophical Transactions of the Royal Society London, B, vol 324, p. 335–349, 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.1989.0051>
- Oke, T.R. Urban Environments. In: The Surface Climates of Canada, Bailey, W.G.; Oke, T.; Wayne R. (ed.). Rouse, 303–327. Montreal: McGill-Queen’s University Press, 1997.
- Oke, T.R. Initial Guidance To Obtain Representative Meteorological Observation At Urban Sites. World Meteorological Organization. Report n° 81, 2006. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9286
- Oke, T.R.; Mills, G.; Christen, A. e Voogt, J. Urban Climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- Osmond, P. e Sharifi, E. Guide to urban cooling strategies. Low Carbon Living CRC, 2017, 75p.
- Philippi Jr, A. Interdisciplinaridade, internacionalização e interação: pressupostos para pesquisa e ensino de qualidade. Apresentação de aula da disciplina AGM 5832, IAG: USP, São Paulo, 2018.
- Rasheed, A.; Robinson, D. The urban climate. In: Computer modelling for sustainable urban design – physical principles, methods & applications. In: Robinson, D. (ed.). Taylor & Francis: 2011.
- Ren, C.; Yang, R.; Cheng, C.; Xing, P.; Fang, X.; Zhang, S.; Wang, H.; Shi, Y.; Zhang, X.; Kwok, Y. e Ng, E. Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan – The implementation in Chinese cities. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 182, p. 170-188, 2018.
- Rennó, C. D. e Borma, L. S. Processos hidrológicos – Evapotranspiração. INPE: 2017. Apresentação digital. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/~camilo/prochidr/pdf/03evapotranspiracao.pdf>
- Robinson, D. Computer modelling for sustainable urban design – physical principles, methods & applications. Robinson, D. (ed.). Taylor & Francis: 2011.
- Romero, M. A. B. Princípios bioclimáticos para o desenho urbano. Brasília: Editora Unb, 2013. 128p.
- Romero, M. A. B. Arquitetura bioclimática do espaço público. 4ª reimpressão. Brasília: Editora Unb, 2015. 226p.

- Romero, M. A. B.; Baptista, G. M. de M. ; Lima, E. A. de ; Werneck, D. R. ; Vianna, E. O. ; Sales, G. de L. Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas. Brasília: Universidade de Brasília, 2019. v. 1. 151p. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/34661>
- Santamouris, M. Appropriate materials for the urban environment. In: Santamouris, M. (Org.) Energy and Climate in the Urban Built Environment. London: James & James, 2001.
- Santamouris, M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, pp. 224-240, 2013.
- Stewart, I.D.; Oke, T.R. Local Climate Zones For Urban Temperature Studies. *American Meteorological Society*, v.93, p. 1879-1900, 2012.
- Stewart, I.D.; Oke, T.R. e Krayenhoff, S. Evaluation of the local climate zone scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 34: 1062-1080, 2014. Doi:10.1002/joc.3746
- Synnefa, A.; Santamouris, M. Mitigating the Urban Heat Island with Cool Materials for the Buildings' Fabric. In: Santamouris, M. and Kolokotsa, D. (Ed.) *Urban Climate Mitigation Techniques*. New York: Routledge, 2016.
- Taha, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, v. 25, p. 99–103, 1997.
- UN, United Nations. 15 - Urban resilience (Habitat III Issue Papers). New York: UN, 2015a. Disponível em: http://habitat3.org/wp-content/uploads/Habitat-III-Issue-Paper-15_Urban-Resilience-2.0.pdf
- UN. United Nations. Nova Agenda Urbana - Habitat III, 2016. Disponível em: <<https://habitat3.org/the-new-urban-agenda>>. Acesso em: 8 de julho de 2019.
- Veiga, J. E. O antropoceno e a ciência do Sistema Terra. São Paulo: Editora 34, 2019, 152 p.
- Voogt, J. A.; Oke, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, v. 86, n. 3, p. 370–384, 2003.
- Zinzi, M. e Santamouris, M. Introducing Urban Overheating—Progress on Mitigation Science and Engineering Applications. *Climate*, v. 7, p. 15, 2019. Disponível em: doi:10.3390/cli7010015

2.

SENSORIAMENTO REMOTO

APLICAÇÕES EM ESTUDOS SOBRE O CLIMA URBANO

INTRODUÇÃO

A evolução do sensoriamento remoto (SR), de forma geral, está ligada ao “desenvolvimento da fotografia e à pesquisa espacial” e pode ser resumido como um conjunto de técnicas que permitem obter informação sobre objetos na superfície do planeta, sem que haja contato físico entre o sensor e o objeto a ser imageado (NOVO e PONZONI, 2001, p.1).

Esse processo é realizado por sensores e equipamentos específicos para registrar dados da interação da radiação eletromagnética com os materiais terrestres (MENEZES e ALMEIDA, 2012). Esses sensores podem ser compreendidos como “câmeras que enxergam não somente a luz visível, mas também a radiação em outros comprimentos de onda” como o infravermelho, por exemplo (SOUSA, 2010, p.5)

O SR pode ser empregado em metodologias aplicadas às pesquisas de clima urbano, principalmente para fenômenos como as ilhas de calor urbanas de superfície. Em estudos de temperaturas intra-urbanas, a partir do uso das informações de bandas termais, pode-se obter detalhes da distribuição da temperatura superficial da malha urbana e fazer correlações com uso do solo, forma urbana, presença de corpos d’água e áreas verdes.

Outras possibilidades englobam estudos de séries temporais da temperatura de superfície, relação entre ICU de superfície e atmosférica, classificação do uso do solo, monitoramento de serviços ecossistêmicos, avaliação de albedo e umidade das superfícies. Soma-se o planejamento espacial de ações de saúde pública associada à mitigação dos efeitos da ICU, estresse térmico e eventos extremos.

Com a disponibilização de imagens gratuitas, como as da série Landsat, os estudos urbanos em macro escala foram amplamente beneficiados, permitindo cobrir áreas urbanas e rurais e produção de dados com periodicidade. Desta forma, países em desenvolvimento, como o Brasil, podem promover pesquisas para planejamento urbano utilizando essa tecnologia com baixo custo.

As restrições incluem principalmente limites técnicos na discriminação dos recursos para tratar e processar imagens, uma vez que, para arquitetos e urbanistas, essa disciplina ainda não é consolidada nos currículos (FERREIRA, 2019). Neste capítulo, aborda-se o uso do sensoriamento remoto em áreas urbanas para observação da

temperatura de superfície, da vegetação e da morfologia urbana. Essa última é apresentado visando a compreensão da classificação das LCZs, de acordo com as ferramentas e método para o processamento digital de imagens propostos pelo WUDAPT.

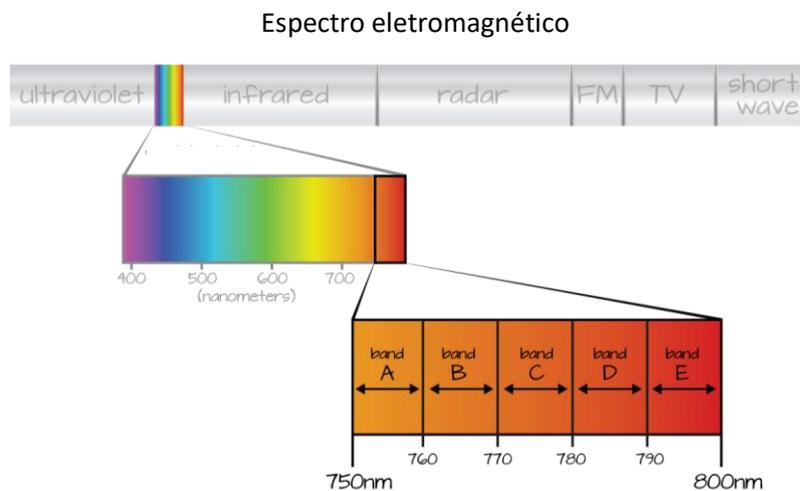
2.1. SENSORIAMENTO REMOTO PARA ÁREAS URBANAS: CONCEITOS BÁSICOS

Retomando a definição clássica do termo sensoriamento remoto (SR), destaca-se que as informação sobre objetos são obtidas sem que haja contato físico com eles. Para isso, são necessário quatro elementos: a **radiação eletromagnética** (REM), a **fonte** de REM, o **sensor** responsável pela captura e registro da REM refletida ou emitida pelo **alvo**, que é o elemento sobre o qual se quer obter informação (NOVO e PONZONI, 2001).

A coleta de dados de SR é baseada em dois tipos de sensores: os sensores ativos e os passivos. Sensores passivos medem a REM, de uma fonte como o Sol, refletida pelo alvo, neste caso os objetos da superfície terrestre como árvores e edifícios (JENSEN, 2009). Já o sensor ativo cria sua própria fonte de REM que cobrem um terreno e depois registra o fluxo radiante refletido (JENSEN, 2009). O Lidar (conhecido como varredura a *laser* ativa) é um exemplo de sensor ativo que possui um laser a bordo para emitir REM que depois é refletida pelos objetos (Earth Lab, 2020).

O espectro eletromagnético é composto por diferentes comprimentos de onda. Um instrumento espectral de SR coleta energia nas regiões do espectro eletromagnético. Cada região do espectro é chamada de banda (Figura 12). O espectrômetro coleta a energia refletida para cada pixel de uma cena, que será registrada nas bandas correspondentes. É um processo análogo a uma câmera que registra a quantidade de luz vermelha, verde e azul para cada pixel. Uma imagem de SR colorida é resultante da combinação das cores azul, verde e vermelho, associadas através de filtros às imagens obtidas em diferentes faixas espectrais.

Figura 12. Bandas do espectro eletromagnético com destaque para luz visível.

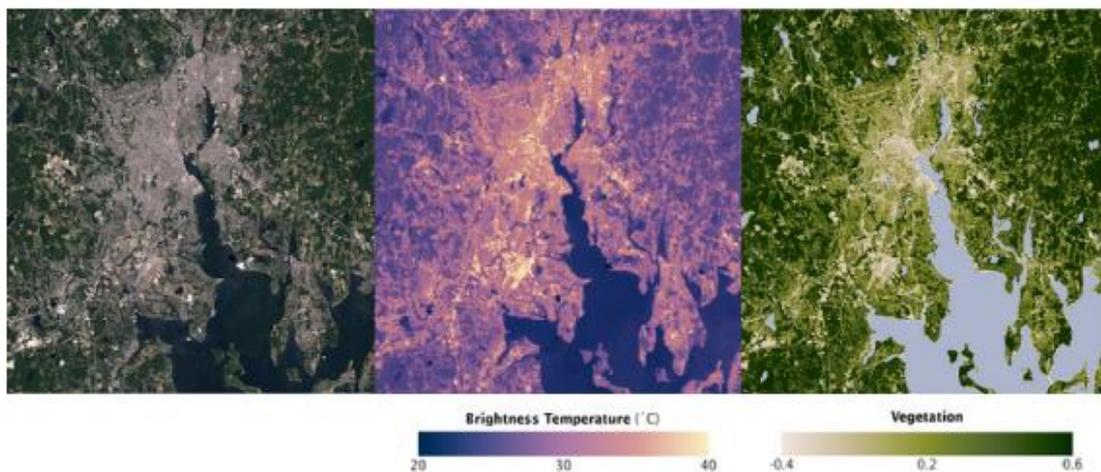


Fonte: <https://www.earthdatascience.org/courses/earth-analytics/multispectral-remote-sensing-data/introduction-multispectral-imagery-r/>

O sinal espectral é uma das propriedades mais importantes das superfícies urbanas captados com SR. Vários sensores de satélite são sistemas multiespectrais ou hiperespectrais, o que significa que eles imageam a superfície terrestre com bandas espectrais amplas. As bandas mais exploradas no SR são: visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e microondas (NOVO e PONZONI, 2001).

As informações derivadas do SR, depois de processadas, são geralmente apresentadas em forma de imagem, mapas temáticos, banco de dados, histogramas, entre outros produtos. Na Figura 13 observamos três apresentações da cidade de Providence – EUA, de acordo com as características extraídas do comprimento de luz visível destacando a ocupação no território (esquerda), contraste do aquecimento das superfícies (infravermelho termal) e cobertura vegetal (direita).

Figura 13. Imagens de Providence/Rhode Island – EUA captadas pelo sensor *Moderate-resolution Imagem Spectroradiometer* (MODIS) acoplado no satélite Aqua e Terra da Nasa.



Fonte: <https://www.nasa.gov/topics/earth/features/heat-island-sprawl.html>

As informações das faixas do espectro eletromagnético não visível agregam muito valor na análise do espaço construído para a arquitetura e urbanismo que, até então se alimentava de avaliações apenas visuais do espaço. Nos itens seguintes serão apresentadas diferentes resoluções associadas à aquisição de dados de SR que influenciam as análises urbanas para, posteriormente, avançar para o SR termal e SR da vegetação.

Resolução espectral

Um sensor capta a energia refletida pelo objeto num determinado comprimento de onda e, quanto maior for o número de medidas num determinado intervalo de comprimento de onda, melhor será a resolução espectral. Logo, a resolução espectral refere-se à largura espectral em que opera o sensor, e conseqüentemente a composição espectral do fluxo de energia (MORAES, 2002).

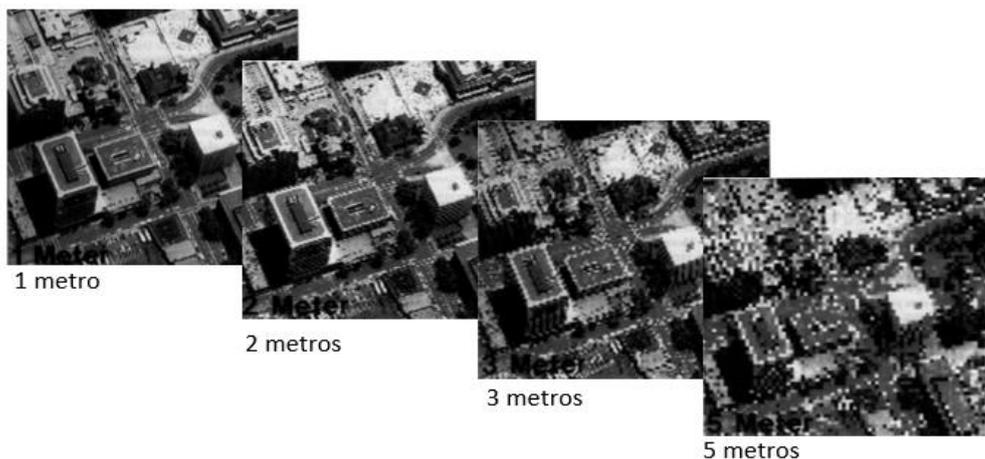
A resolução espectral de um conjunto de dados que possui mais de uma banda (multiespectral ou hiperespectral), refere-se à largura espectral de cada banda no conjunto de dados e as informações da banda são relatadas como o valor do comprimento de onda central. Embora seja geralmente fornecida uma resolução espectral geral do sensor, nem todos os sensores coletam informações em faixas de larguras uniformes.

Os ambientes urbanos apresentam alvos heterogêneos que são caracterizados por uma grande diversidade de materiais. Portanto, uma alta resolução espectral é um requisito essencial para o SR urbano (ZHOU *et al.*, 2019).

Resolução espacial

A resolução espacial de uma imagem representa a área no solo que cada pixel cobre. Se você tiver pixels menores em uma varredura, os dados aparecerão mais "detalhados". Se você tiver pixels grandes em uma varredura, os dados parecerão mais grosseiros (Earth Lab, 2020). Na Figura 14 observamos o nível de detalhamento de uma porção da superfície da cidade em função da resolução espacial, interferindo na discriminação de objetos.

Figura 14. Imageamento de uma cena urbana com quatro diferentes resoluções espaciais.



Fonte: Adaptado de Jensen, 1995, p.9.

Resolução temporal

A superfície terrestre é imageada com uma frequência, sendo essa característica dos produtos de SR. Os satélites orbitam ao redor da Terra e, através da combinação sincronizada da velocidade do satélite com a rotação da Terra torna-se possível imagear o planeta em um espaço tempo, geralmente dias (Earth Lab, 2020).

Os pesquisadores de clima urbanos usam escalas temporais diferentes, dependendo de sua aplicação, período de revisita do satélite (tempo para completar a órbita) e do fenômeno em observação, variando de forma diária, semanal, mensal, sazonal a anualmente. Outra questão é o potencial de acoplamento de escalas, um esforço atual nas pesquisas de clima urbano.

Resolução radiométrica

A resolução radiométrica define a capacidade do sistema sensor em detectar e registrar sinais, ou seja, diferenças na energia refletida ou emitida pelos elementos da superfície terrestre como rochas, água, vegetação, entre outros (MORAES, 2002). Por exemplo, o sistema sensor TM (*Thematic Mapper*) do Landsat 5 distingue até 256 tons distintos representando-os em 256 níveis de cinza (8 bits). Já o Landsat 8 possui uma resolução radiométrica de 12 bits (o equivalente a 4096 tons de cinza).

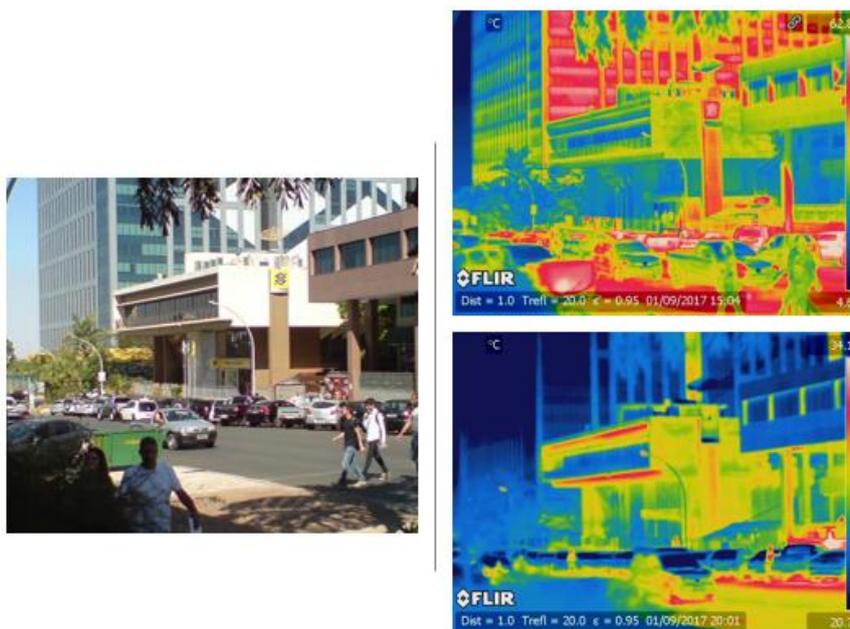
2.2. SENSORIAMENTO REMOTO TERMAL: MAPEANDO O INVISÍVEL

De acordo com o observado do espectro eletromagnético, nossa visão é limitada à região espectral do visível. A energia térmica tem um comprimento de onda muito maior do que a luz visível e, por exemplo, não podemos ver as ondas de rádio e infravermelho.

Porém, com o apoio da termografia, considerada como uma técnica que detecta, registra e processa a temperatura de superfície, temos acesso a informações no comprimento de onda do infravermelho, irradiado por qualquer superfície de um material natural ou artificial que esteja acima de 0 K, equivalente a $-273,15\text{ °C}$ (JENSEN, 2009). Dessa forma pode-se “ver” o espaço urbano de uma forma distinta e analisar processos não observados pela visão humana como o aquecimento das superfícies.

As imagens de satélite coletadas repetidamente para medir a cobertura verde e a temperatura da superfície (T_s) podem mostrar como as diferentes partes da cidade se desviam das condições médias (Figura 15). A T_s estimada do SR refere-se à quantidade de radiação emitida pela superfície da terrestre, também chamada de temperatura radiométrica, que é diferente da temperatura medida pelo fluxo de calor como em estudos de termodinâmica (Weng et al. 2019).

Figura 15. Imagem termal do comércio local no Plano Piloto (CLN202) a partir de uma câmera termográfica portátil (horários: 15h e 20h).



Fonte: acervo da autora.

Como demonstrado acima, as diferenças intra-urbanas geralmente se manifestam espacializadas em regiões de calor e frio, que, às vezes, podem ser maiores que a diferença de temperatura urbano-rural. Os impactos das áreas construídas, áreas com vegetação, massas de água, entre outros fatores que caracterizam o espaço urbano são essenciais na compreensão do fenômeno de ICU_{sup} na escala local.

Como os produtos baseados em satélite costumam ter resolução espacial menores, imagens de alta resolução auxiliam na interpretação desses padrões, porém com menor área de abrangência. A câmera termal portátil foi utilizada no exemplo da Figura 15, no comércio local do Plano Piloto de Brasília, em diferentes horários, captando

as diferenças da orientação das fachadas, cores, materiais e edifícios e as respostas térmicas na microescala.

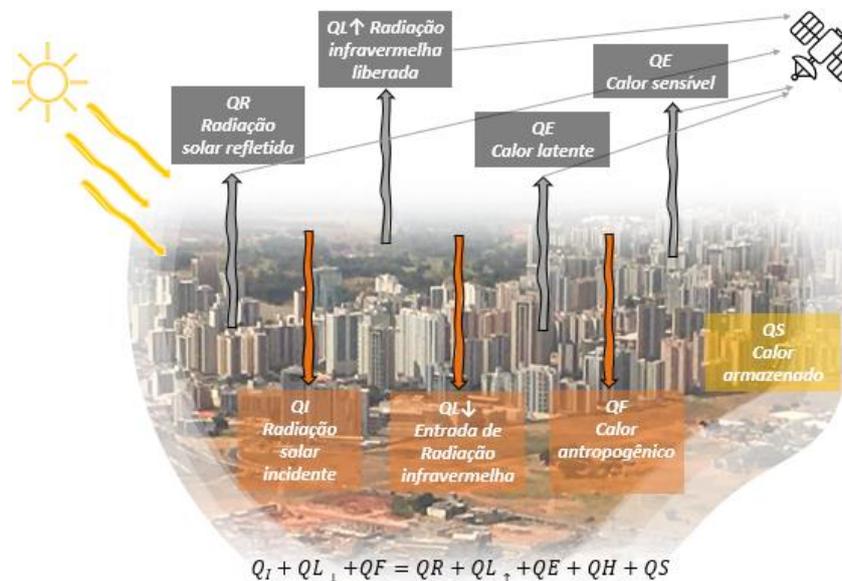
Essa variedade e complexidade de alvos em uma cena urbana e da vegetação influem no comportamento da energia, caracterizando uma anisotropia. Neste caso, as superfícies atuam refletindo diferentes quantidades de energia de acordo com a posição em que é vista e/ou iluminada, e, a magnitude destes efeitos depende de fatores como: o arranjo e a composição do dossel, o campo de visada dos sensores, a localização geográfica, as variações locais de topografia, hora do dia, entre outros (GALVÃO *et al.*, 2013).

Além do ângulo de visada dos sensores, os dados de T_s derivados de satélite são afetados por nuvens e erros internos dos sensores (JENSEN, 2009; MITRAKA e CHRYSOULAKIS, 2018). Para melhorar a precisão das informações, os pixels contaminados pela presença de nuvens podem ser removidos por algoritmos de triagem. Como resultado, pixels ausentes ou de baixa qualidade não são incomuns, especialmente em áreas urbanas, limitando a aplicação do SR na investigação da ICU_{sup} , que tem variações espaciais e temporais significativas (VOOGT e OKE, 2003).

Para Oke *et al.* (2017), a ICU_{sup} é essencialmente causada por alterações no balanço energético da superfície após a substituição de superfícies naturais por superfícies artificiais. O balanço energético de uma superfície urbana típica pode ser expresso como: radiação solar incidente (Q_i) + radiação de ondas longas recebida ($Q_{L\downarrow}$) + liberações antropogênicas de calor (Q_f) = radiação solar refletida (Q_r) + radiação de ondas longas emitida ($Q_{L\uparrow}$) + calor latente (Q_e) + calor sensível (Q_h) + armazenamento de calor (Q_s) (ZHOU *et al.*, 2019).

Os sensores térmicos acoplados em satélites medem a T_s indiretamente, detectando a radiação de onda longa ($Q_{L\uparrow}$) (Figura 16). Esse fluxo é denominado de radiância aparente por incluir influência da atmosfera e de objetos vizinhos, sendo convertida em números digitais no próprio sensor. Os números digitais da banda específica do satélite deverão ser convertidos para radiância espectral do topo da atmosfera e posteriormente para temperatura de brilho.

Figura 16. Esquema do balanço de energia de uma área urbana hipotética.



Fonte: Adaptado de Zhou *et al.*, 2019, p.10 (tradução livre).

Como observado na Figura 16, no período diurno, a ICU_{sup} é atribuída a uma redução na radiação solar refletida e no fluxo de calor latente e, em contrapartida, um aumento do fluxo de calor sensível e na radiação térmica refletida. No período noturno, sem a principal fonte de REM, é mais evidente o armazenamento do calor recebido durante o dia. O fluxo de calor antropogênico, muito variável, poderia aumentar a ICU_{sup} independente da hora do dia (VOOGT e OKE, 2003).

Fatores que afetam qualquer componente energético da superfície urbana podem influenciar a forma e intensidade da ICU_{sup} e, até mesmo desenvolver uma ICU_{sup} negativa (SANTAMOURIS *et al.*, 2015). Fatores climáticos como temperatura, precipitação, vento e condições sinóticas influenciam a ICU_{sup} pois não apenas influenciam o balanço energético, mas também a atividade da vegetação (ZHOU *et al.*, 2019). Nos tópicos seguintes são apresentados estudos sobre ICU_{sup} que agregam SR, com foco no exame da T_s sua variação intra-urbana, presença de vegetação e corpos de água.

2.2.1. Estudos sobre temperatura de superfície a partir do SR

A primeira observação do fenômeno de ICU_{sup} com SR foi publicada em 1972 por Rao (1972) e, de acordo com o levantamento de Zhou *et al.* (2019), as publicações sobre o assunto só cresceram a partir de 2005. Esse aumento pode ser atribuído, por um lado, ao crescente interesse associado à rápida urbanização e, por outro lado, aos avanços das técnicas de SR que melhorou a quantidade e a qualidade dos dados. Em particular, dados da série Landsat, disponíveis gratuitamente desde 2008 e os dados MODIS.

Os estudos de ICU_{sup} delimitados nesta pesquisa utilizaram o SR com objetivo de analisar a distribuição intra-urbana do aquecimento das superfícies (BIAS, BAPTISTA e LOMBARDO, 2003; ANDRADE *et al.*, 2007; AMORIM e MONTEIRO, 2011; AZEVEDO e SOUZA, 2013; JAMEI *et al.*, 2019) e estimar a intensidade da ICU_{sup} (STATHOPOULOU *et al.*, 2009; ALHAWITI e MITSOVA, 2016; FLORES *et al.*, 2016; XIAO *et al.* 2018). As comparações acontecem mais comumente pela diferença entre as áreas urbanas centrais e áreas de referência circundantes, podendo ser rural, suburbanas, plantações, entre outras.

No Brasil, o primeiro estudo sobre ICU foi realizado para a cidade de São Paulo por Lombardo (1985), onde foram analisados os parâmetros naturais e de uso do solo urbano compatibilizados por imagens de satélites e coleta de dados em campo. A autora encontrou um gradiente de temperatura horizontal superior a 10 °C entre o centro e a área rural e confirmou, em termos espaciais, uma alta relação entre ilha de calor e concentração de poluentes, alterações nos padrões de umidade relativa e precipitações.

No cenário do DF, Baptista (2010), Santana (2015), Vianna (2018), entre outros pesquisadores analisaram a evolução da T_s por meio de imagens termais da série de satélites Landsat. Esse assunto está abordado com mais detalhes no Capítulo 3, dentro do contexto climático do DF.

Com a promoção do método de LCZ, estudos mais recentes apresentam as relações entre a T_s e as classes mapeadas contribuindo para a discussão dos espaços heterogêneos das cidades, as diferenças de T_s entre as LCZ e as implicações no clima local (GELETIČ, LEHNERT e DOBROVOLNÝ, 2016; CAI *et al.*, 2017; ZHAO, 2018).

Desenvolvidos no Brasil, são destaques os estudos das arquitetas urbanistas Ferreira (2019), Ferreira (2020) e Maigua (2020).

Ferreira (2019) examinou a relação entre vegetação, Ts e LCZ na Região Metropolitana de São Paulo com imagens termais do satélite Aqua-MODIS de 2002 a 2017. A correlação entre a Ts e os índices de vegetação é alta e negativa em todo o período analisado. Na pesquisa para a macrozona urbana de São José dos Campos – SP, Ferreira (2020) encontrou dependência espacial da Ts por meio de uma análise exploratória de dados espaciais e destacou sua influência nos processos de retroalimentação do sistema climático urbano.

Maigua (2020) correlacionou a Ts, Tar e LCZ para a cidade de Quito – Equador, com imagens termais do satélite Landsat 8. Foram detectadas 17 LCZs e, com a aplicação de geostatística, obteve a correlação moderada negativa entre LCZ e Ts; correlação moderada negativa entre LCZ e Tar e correlação forte positiva entre Tar e Ts.

Percebe-se que o satélite Landsat 8 têm sido bastante utilizados nos trabalhos de clima urbano, principalmente pela sua série histórica, popularização e resolução espacial. O Programa Landsat teve seu primeiro satélite lançado em 1972 pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Com o Landsat 9 lançado em setembro de 2021, vislumbra-se a continuidade do seu impacto nos estudos urbanos.

O Landsat 8, foi lançado em 11 de fevereiro de 2013 com o objetivo de fornecer imagens de alta qualidade dos comprimentos de onda do visível e infravermelho de todas as massas de terra e áreas costeiras da Terra, atualizando constantemente o banco de dados do Programa Landsat (USGS, 2016).

Sua plataforma opera com dois sensores: o *Operational Land Imager* (OLI), com nove bandas espectrais, e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) com duas bandas do termal infravermelho, totalizando 11 bandas. As principais características de cada banda encontram-se no Quadro 4. Outras características gerais do satélite Landsat 8 são:

- Tipo de órbita: heliosincrônica, órbita polar que segue o movimento do sol;
- Resolução temporal: 16 dias;
- Resolução radiométrica: 12 bits (4096 tons de cinza);
- Projeção das imagens: UTM, Datum WGS 1984.

Quadro 4. Bandas espectrais do Landsat 8.

Landsat 8 - Sensores OLI e TIRS (µm)			
Banda 1	30 m	0.435 – 0.451	Visível azul – Costeiro/Aerosol
Banda 2	30 m	0.452 – 0.512	Visível azul
Banda 3	30 m	0.533 – 0.590	Visível verde
Banda 4	30 m	0.636 – 0.673	Visível vermelho
Banda 5	30 m	0.851 – 0.879	Infravermelho próximo (NIR)
Banda 6	30 m	1.566 – 1.651	Infravermelho médio (SWIR-1)
Banda 10	100 m	10.60 – 11.19	Infravermelho termal (TIR 1)
Banda 11	100 m	11.50 – 12.51	Infravermelho termal (TIR 2)
Banda 7	30 m	2.107 – 2.294	Infravermelho médio (SWIR-2)
Banda 8	15 m	0.503 – 0.676	Pancromática (PAN)
Banda 9	30 m	1.363 – 1.384	Cirrus

Fonte: Adaptado USGS, 2016, p.9.

2.2.2. Integração de técnicas de SR, medições em campo e simulação numérica

Alguns estudos citados apresentam correlações entre a T_{sup} detectada remotamente e a T_{ar} observada por estações meteorológicas fixas ou portáteis mas, algumas lacunas permanecem principalmente na comparação entre ICU atmosférica e de superfície e nos métodos para estimar a T_{ar} a partir de dados de T_{sup} obtidos por SR.

Em parte porquê os sensores térmicos fazem uma medida indireta da superfície e, também por causa da característica tridimensional da estrutura urbana, parte das superfícies ficam na sombra da visada dos sensores (VOOGH e OKE, 2003). Outros apontamentos são as propriedades termodinâmicas e radiativas, umidade, admissão térmica, emissividade das superfícies, turbulência do vento e as condições atmosféricas que podem afetar o ambiente térmico. Em adição, os resultados das técnicas de SR são influenciado pelas resoluções espaço-temporais dos dados e tempo de revisita dos satélite.

Comparativamente, medições de variáveis meteorológicas em campo podem fornecer dados continuamente e a modelagem numérica pode ser utilizada para estimar as variáveis e suportar análises presentes e futuras de maneira temporal e espacialmente uniformes. Um uso combinado dessas três técnicas pode fornecer uma imagem mais completa de um ambiente térmico urbano (ZHOU *et al*, 2019). Os dados de SR e observações de campo podem ser utilizados para avaliar e calibrar modelos numéricos (STEWART *et al*, 2013).

Essas projeções são comumente associadas à produção de dados urbanos compreensíveis para formulação de políticas de expansão urbana e de mitigação/adaptação dos impactos negativos do efeito ICU. Contudo, Zhou *et al.* (2019) colocam algumas limitações no desenvolvimento dessas pesquisas: (1) heterogeneidade do espaço físico; (2) ainda existem inconsistências nas resoluções de medições entre essas três técnicas; (3) desafio para o SR caracterizar quantitativamente a estrutura urbana em 3-D e sua dinâmica espaço-temporal e (4) limitações dos modelos relativo.

Em um estudo realizado em Abu Dhabi, Manandhar *et al.* (2019) caracterizaram o ambiente urbano com o conceito de LCZ e distribuíram sensores de temperatura para acompanhar variações térmicas entre as LCZ. Posteriormente esses dados foram comparados com os dados de T_{sup} adquiridas do sensor MODIS (satélite Terra). A integração com a modelagem numérica foi desenvolvida com o programa Envi-met e os resultados da simulação foram calibrados com medições urbanas. Os resultados indicam a presença do efeito ICU em diferentes zonas. As zonas com vegetação densa apresentaram-se com temperaturas mais amenas em relação às zonas densamente construídas.

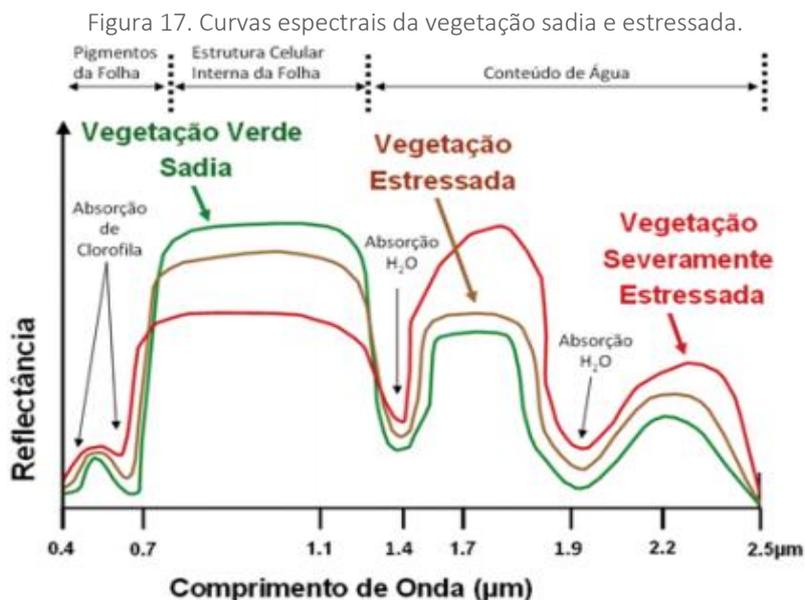
Estudos integrando métodos de SR, medições em campo e simulação numérica para explorar tendências urbanas de T_{ar} e T_{sup} ainda são escassos. Para estudos futuros, diversos autores (OKE *et al.*, 2017; MANANDHAR *et al.*, 2019; ZHOU *et al.*, 2019) concordam com incentivo à utilização abrangente de vários métodos para melhor entender o fenômeno do aquecimento urbano em escalas diferentes e projetar uma estrutura de tomada de decisão para avaliar a influência de várias políticas de planejamento urbano para mitigação e adaptação às mudanças climáticas locais.

2.3. SENSORIAMENTO REMOTO DA VEGETAÇÃO

Entre os vários benefícios já citados da vegetação urbana, a evapotranspiração e o sombreamento são fatores essenciais para amenizar temperaturas nas cidades. O que precisa ser melhor compreendido, no entanto, é como esses benefícios variam entre os tipos de vegetação, arranjo espacial, densidade e saúde das plantas. As imagens de satélite podem ser empregadas para quantificação e monitoramento da cobertura verde da cidade.

A vegetação reflete uma quantidade muito pequena de energia na faixa espectral do vermelho, pois ela utiliza boa parte desta energia no processo da fotossíntese (MORAES, 2002). Já na faixa do infravermelho próximo, a vegetação reflete muita energia, em função da estrutura celular das folhas. Dentre os elementos que compõem a vegetação (folhas, galhos, flores, frutos), as folhas são as principais nos processos de interação com a REM como o espalhamento e a absorção (NOVO e PONZONI, 2001).

Segundo Moraes (2002), conhecendo esse comportamento espectral, é possível distinguir uma vegetação sadia (Figura 17), pois essa apresenta alta absorção da energia eletromagnética na região do espectro visível, que é capturada pela clorofila destinada à fotossíntese. Dentro do espectro visível a absorção é mais fraca na região que caracteriza a coloração da vegetação. A alta reflectância no infravermelho próximo, até 1,3 μm , se deve à estrutura celular e, a partir deste comprimento de onda, o conteúdo de água na vegetação modula as bandas de absorção presentes no seu comportamento espectral (MORAES, 2002, p.18).



Fonte: Sousa Filho *et al*, 2008, p.230.

Na prática, o estudo da vegetação por meio do SR implica na interação da REM não apenas com as folhas, mas com os dosséis vegetais e seus arranjos. Dependendo da forma, densidade, orientação e distribuição espacial dos elementos que constituem um dossel vegetal, a REM refletida pode sofrer efeitos principalmente do solo e da sombra dos próprios elementos do dossel, como galhos e tronco (NOVO e PONZONI, 2001). Essa questão é relevante na escolha do índice de vegetação.

2.3.1. Índices de vegetação

Os índices de vegetação representam a atividade fotossintética da vegetação com variações estruturais do dossel (MARION et al, 2021), e podem ser obtidos por diferentes métricas. O índice de vegetação por diferenças normalizadas (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) é comumente usado como indicador para a existência e qualidade da vegetação no ambiente urbano (SOUSA FILHO et al., 2008). O NDVI é a razão entre o vermelho e o infravermelho próximo. É expresso matematicamente como:

Equação 1

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

Onde:

NIR: é valor da refletância da banda no Infravermelho próximo;

Red: é o valor de refletância da banda no Vermelho (faixa visível).

Essa equação gera um índice que poderá variar de -1 a 1, onde os valores inferiores a 0 representam regiões de corpos de água e a variação de 0 a 1, quanto mais próximos de 0 menor verdor vegetativo, quanto mais perto de 1 maior verdor vegetativo. Quando a vegetação é esparsa, o índice pode ser influenciado por interferências do solo e fatores atmosféricos, o que pode indicar a utilização de outros índices (MARION et al, 2021).

Outro problema destacado por Jackson e Huete (1991) se refere à saturação da vegetação densa, já que as bandas do vermelho e do infravermelho próximo tem pesos iguais na equação do NDVI. Um opção é a utilização do índice EVI (*enhanced vegetation index*), desenvolvido para realçar o sinal da vegetação com melhor sensibilidade em áreas com alta biomassa (por exemplo florestas) e melhor desempenho na redução de influências atmosféricas, do solo e do dossel (Huete et al, 1999).

Esses aprimoramentos permitem o cálculo do índice como uma razão entre os valores da banda do vermelho (Red), da banda do infravermelho próximo (NIR) e da banda do azul (Blue). Esse último é utilizado para correção da banda do vermelho quanto ao espalhamento atmosférico por aerossóis (USGS Landsat Missions, s.d.).

Equação 2

$$\text{EVI} = G * ((\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{C1} * \text{R} - \text{C2} * \text{Blue} + \text{L}))$$

Onde:

G: é um fator de escala;

C1 e C2: são coeficientes de correção do espalhamento atmosférico;

L: é um valor de ajuste da interferência do solo.

Em áreas urbanas, vale destacar a importância da resolução espacial do sensor definido no método do trabalho. De acordo com Ponzoni et al. (2015), *pixels* maiores tendem a incluir em seu interior um número maior de objetos com naturezas espectrais diferentes (rochas, solo, concreto, árvores, entre outros), o que pode limitar a caracterização da vegetação em áreas urbanas.

2.3.2. Aplicação de índices de vegetação em estudos de clima urbano

Os índices de vegetação, de forma geral, são comumente empregados em técnicas de monitoramento, análise de séries temporais e detecção de mudanças (HUETE et al., 1999), seja em áreas cultivadas, florestas, etc. Devido à atenção ao verde urbano como fundamental para a transição das cidades rumo a um futuro sustentável, resiliente e saudável, entre outras características desejáveis, observa-se a aplicação dessas técnicas tendo como base o tecido urbano extraído das imagens satelitais.

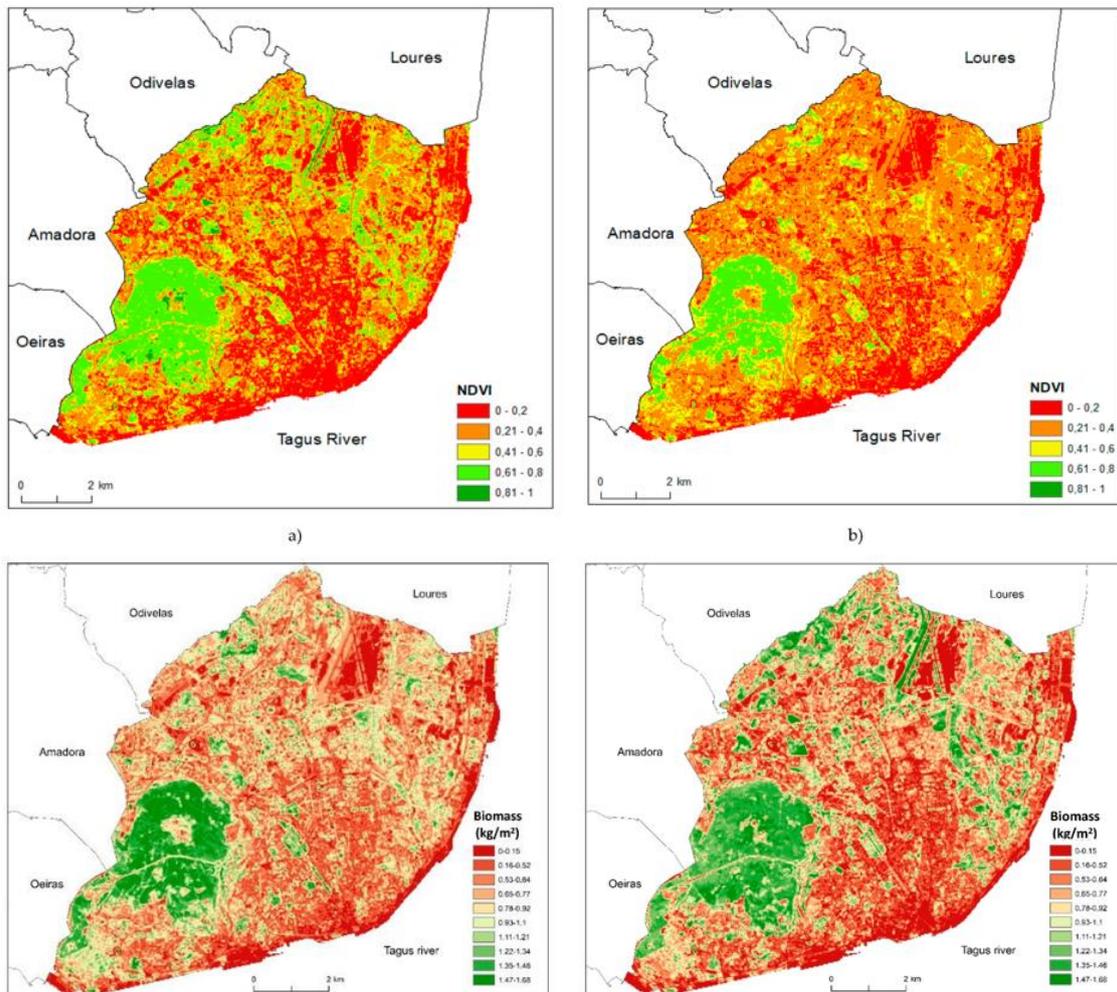
Para Pinheiro (2021), o estudo da vegetação urbana com SR proporciona múltiplos indicadores biofísicos dentro do entendimento de um ecossistema urbano, composto por: vegetação, superfícies impermeáveis antrópicas, solo e água. A interpretação varia de acordo com a escala de observação e da resolução espacial do pixel, ligando a composição da paisagem urbana e as características espectrais obtidas das imagens satelitais (PINHEIRO, 2021).

Logo, a aplicação desses índices contribuem para a compreensão da supressão da cobertura vegetal, que geralmente acompanha a impermeabilização do solo urbano e os problemas resultantes como a redução da infiltração da água no solo e o aumento do escoamento superficial. As consequências negativas associadas ao clima se traduzem nas alterações microclimáticas provocadas pela redução da umidade relativa no meio urbano, na acentuação da amplitude térmica diária e no desconforto térmico urbano.

Na escala local, esses fatores colaboram para o efeito da ilha de calor urbana. Assim, muitos estudos focam na relação entre índices de vegetação e temperatura do ar e de superfície para avaliação do efeito de resfriamento e do conforto térmico humano, especialmente no verão (BARRON et al, 2019; FERREIRA, 2019; JAMEI et al, 2019; FERREIRA, 2020).

Como exemplo tem-se o estudo de Reis e Lopes (2019) para Lisboa. Foram utilizadas imagens do Landsat 8 para estimar o potencial de resfriamento das áreas verdes com o índice NDVI, além da estimativa de biomassa seca acima do solo para situações de inverno e verão (Figura 18). Os autores observaram que uma área de 50 m² coberta por vegetação pode resfriar o ar em 1 °C, destacando que o tipo de vegetação é muito importante para o potencial de resfriamento, assim como o contexto climático.

Figura 18. Estimativa de NDVI e Biomassa para inverno (a) e verão (b) de Lisboa a partir de imagens do Landsat 8 para os anos de 2016 (b) e 2017 (a).



Fonte: Reis e Lopes, 2019.

A vegetação tem sido considerada prioritária nas intervenções do tipo soluções baseadas na natureza (Sbn), infraestrutura verde e azuis, e ainda no desenho biofílico. Para além de quantificar e qualificar a supressão da vegetação em área urbana, os índices são empregados em métricas para avaliar e monitorar os benefícios dos espaços vegetados no contexto dessas intervenções, diretamente ou indiretamente ligados à regulação climática.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O sensoriamento remoto oferece recursos úteis para avaliar mudanças na paisagem urbana em diferentes resoluções (temporal, espectral, radiométrica e espacial). Esse potencial pode ser utilizado para produção de dados urbanos informativos para o planejamento, desenho urbano e pesquisas sobre o clima da cidade.

Em se tratando do clima urbano, um recurso valorizado do sensoriamento remoto reside em sua capacidade de adquirir imagens que cobrem uma grande área urbana e também o entorno rural, podendo-se quantificar diferenças na temperatura de

superfície (sensoriamento remoto termal) e na cobertura vegetal (sensoriamento remoto da vegetação).

Como essas métricas podemos avaliar (de forma relativa e absoluta) distribuições intra-urbanas de condições potencialmente mais quentes, mais amenas, menos verdes, diferentes densidades, entre outras investigações que sejam objeto do estudo. Ou seja, essa detecção remota contribui no fornecimento de indicadores para monitorar áreas urbanas, o que inclui o campo térmico e as áreas verdes. A disponibilidade gratuita de dados e programas de processamento de imagens e de SIG possibilitam pesquisas com baixo custo e com larga possibilidade de atualização de produtos.

Para finalizar, é importante ressaltar que apesar do grande volume de estudos sobre clima urbano com técnicas de SR, a comparação e aplicação dos resultados exige cautela. Resultados obtidos para uma cidade estão limitados à aquele enquadramento climático, período de análise e métodos empregados, gerando um conjunto de fatores que interferem nos resultados dos indicadores.

REFERÊNCIAS

- Alhawiti, R. H.; Mitsova, D. Using LANDSAT-8 data to explore the correlation between urban heat island and urban land uses. *International Journal of Research in Engineering and Technology* p. 457–466, 2016.
- Andrade, L.L.; Souza, L.H; Sakuragi, J.; Castro, R.M. Estudo de ilhas de calor na cidade de São José dos Campos utilizando o canal de infravermelho termal do Landsat-5 e o aerotransportado HSS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. Anais ... Florianópolis: 2007, p.473-480, 2007.
- Amorim, M. C. de C. T. e Monteiro, A. As temperaturas intraurbanas: exemplos do Brasil e de Portugal. *Confins [Online]*, 13, 2011. DOI : 10.4000/confins.7284
- Azevedo, G. F.; Souza, N. M. DE. Uso de imagens Landsat TM 5 para análise da temperatura de superfície do Distrito Federal. Anais XVI Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, n. 2005, p. 6917–6922, 2013.
- Baptista, G. M. Ilhas de Calor. *Scientific American Brasil. Revista Digital*. Editora Moderna: São Paulo, ano 1, no. 2, pg. 24-31, 2010. Disponível em: https://issuu.com/ed_moderna/docs/aula2_final_bx?e=2064801/6634353.
- Bias, E. D. S.; Baptista, G. M. M.; Lombardo, M. A. Análise do fenômeno de ilhas de calor urbanas por meio da combinação de dados Landsat e Ikonos. XI SBSR, Belo Horizonte, p. 1741–1748, 2003.
- Bias, E., Brites, R. e Santa Rosa, A. Imagens de alta resolução especial. In: MENEZES, P.; ALMEIDA, T. (org). *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Brasília: UnB, p. 239 – 263, 2012.
- Cai, M.; Ren, C.; Xu, Y.; Lau, K.K.L. e Wang, R. Investigating the relationship between local climate zone and land surface temperature using an improved WUDAPT methodology – A case study of Yangtze River Delta, China. *Urban Climate*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.010>
- Câmara, G.; Davis, C.. *Fundamentos de Geoprocessamento*. In: Câmara, G.; Monteiro, A. M.; Medeiros, J. S. de (ed). *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos, INPE, 2004.
- DPI/INPE. SPRING: Tutorial de Geoprocessamento. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html>
- Earth Lab. Earth Lab at University of Colorado, Boulder. Disponível em: <https://www.earthdatascience.org/tags/remote-sensing/>

- Ferreira, L. S.; Duarte, D. H. Exploring the potential of WUDAPT Local Climate Zone Maps to Detect Vegetation Loss. PLEA 2018, p. 953-954, Hong Kong, nov/2018.
- Ferreira, F. L. e S. Estimativas de temperatura superficial por satélite e análise climática em município de grande porte no Brasil. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.
- Ferreira, L. S. Vegetação, temperatura de superfície e morfologia urbana: um retrato da região metropolitana de São Paulo. Tese de Doutorado da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2019.
- Geletič, J.; Lehnert, M. e Dobrovolný, P. Land surface temperature differences within Local Climate Zones, based on two Central European Cities. *Remote Sensing*, 8(10), p. 788, 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8100788>
- Huete, A.; Justice, C.; Leeuwen, W. V. Modis vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document, 1999. Disponível em: <modis.gsfc.nasa.gov/ data/atbd/atbd_mod13.pdf>.
- Jamei Y.; Rajagopalan P.; Sun QC. Spatial structure of surface urban heat island and its relationship with vegetation and built-up areas in Melbourne, Australia. *Sci Total Environ*. 659: p. 1335 - 1351, 2019. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.308
- Jensen, J.R. Issues involving the creation of digital elevation models and terrain corrected orthoimagery using soft-copy photogrammetry. *Geocarto International* 10: 1, p. 5-21, 1995. DOI: 10.1080/10106049509354475
- Jensen, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. 2da Edição traduzida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São Paulo, Parêntese, 672 p., 2009.
- Kadhim, N.; Mourshed, M.; Bray, M. Advances in remote sensing applications for urban sustainability. *Euro-Mediterr J Environ Integr* 1, 7, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41207-016-0007-4>
- Kumar D, Shekhar S. Statistical analysis of land surface temperature-vegetation indexes relationship through thermal remote sensing. *Ecotoxicol Environ Saf*. 121:p.39-44, 2015. doi:10.1016/j.ecoenv.2015.07.004
- Lombardo, M. A. Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Editora Hucitec, 1985. 244p.
- Maigua, P. Ciudad y cambio microclimático. Tese de Doutorado pelo Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 2020.
- Manandhar, P.; Bande, L.; Tsoupos, A.; Reddy Marpu, P.; Armstrong, P. A study of local climate zones in Abu Dhabi with urban weather stations and numerical simulations. *Sustainability, MDPI, Open Access Journal*, vol. 12(1), p. 1-15, 2019.
- Menezes, P.; Almeida, T. (org). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília: UnB, 2012.
- Meneses, P. e Sano, E. Classificação pixel a pixel de imagens. In: Menezes, P.; Almeida, T. (org). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília: UnB, p. 191 – 208, 2012.
- Mitraka, Z. e Chrysoulakis, N. Earth Observation for Urban Climate Monitoring: Surface Cover and Land Surface Temperature. In: Multi-purposeful Application of Geospatial Data, Rustam B. Rustamov, Sabina Hasanova and Mahfuza H. Zeynalova, IntechOpen: 2018. Disponível em: DOI: 10.5772/intechopen.71986.
- Moraes, E. C. Fundamentos de sensoriamento remoto. In: Rudorff, B. F. T. et al. Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente. São José dos Campos: INPE, 2002.
- Novo, E. e Ponzoni, F. Introdução ao sensoriamento remoto. São José dos Campos, INPE, 2001.
- Oke, T.R.; Mills, G.; Cristen, A. e Voogt, J. *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- Pinheiro, C. de A. Detecção remota: possibilidades para uma abordagem dinâmica e integrada do ecossistema urbano. *Revista de Morfologia Urbana*, v. 9, n. 1, 2021. DOI: 10.47235/rmu.v9i1.155.

- Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E.; Kuplich, T. M. Sensoriamento remoto da vegetação. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 164 p.
- Rao, P. K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53, 647– 648, 1972.
- Reis, C.; Lopes, A. Evaluating the Cooling Potential of Urban Green Spaces to Tackle Urban Climate Change in Lisbon. *Sustainability*, 11, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11092480>
- Santamouris, M.; Cartalis, C.; Synnefa, A. Local urban warming, possible impacts and a resilience plan to climate change for the historical center of Athens, Greece. *Sustainable Cities and Society*, 19, p. 281-291, 2015.
- Santana, N. C. Investigação de ilhas de calor em Brasília: análise multitemporal com enfoque na cobertura do solo. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.7, n.6, p. 1044 – 1054, 2015.
- Sousa Filho, C. R. et al. Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no remanso do fogo (MG). *Revista Brasileira de Geociências, Sociedade Brasileira de Geologia*, v. 38, n. 2, p. 228–243, 2008.
- Souza, R. Sensoriamento remoto: conceitos fundamentais e plataformas. São José dos Campos, INPE, Divisão de Sensoriamento Remoto, 2001. Disponível em: http://www3.inpe.br/crs/crectalc/pdf/ronald_ceos.pdf
- Stathopoulou, M.; Synnefa, A.; Cartalis, C.; Santamouris, M.; Akbari, H. A surface heat island study of Athens using high resolution satellite imagery and measurements of the optical and thermal properties of commonly used building and paving materials. *International Journal of Sustainable Energy*, 28, p. 59–76, 2009.
- Stewart, I.D.; Oke, T.R. Local Climate Zones For Urban Temperature Studies. *American Meteorological Society*, v.93, p. 1879-1900, 2012.
- USGS. Geological Survey (USGS). Landsat 8 (L8) data users handbook. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>.
- USGS. Landsat Missions. Landsat Surface Reflectance-derived Spectral Indices. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-surface-reflectance-derived-spectral-indices>
- Vianna, E. O. O campo térmico urbano: ilhas de calor em Brasília – DF. Tese de Doutorado pelo Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 2018.
- Voogt, J. A. e Oke, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, v. 86, n. 3, p. 370–384, 2003.
- Wong, M.M.F., Fung, J.C.H. e Yeung, P.P.S. High-resolution calculation of the urban vegetation fraction in the Pearl River Delta from the Sentinel-2 NDVI for urban climate model parameterization. *Geosci. Lett.* 6, 2 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40562-019-0132-4>
- Zhao, C. Linking the local climate zones and land surface temperature to investigate the surface urban heat island, a case study of San Antonio, Texas, US. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume IV-3, 2018.
- Zhou, D.; Xiao, J.; Bonafoni, S.; Berger, C.; Deilami, K.; Zhou, Y.; Froking, S.; Yao, R.; Qiao, Z.; Sobrino, J.A. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sensing*. 11, 48, p. 1 – 36, 2019.

3.

O DISTRITO FEDERAL

MORFOLOGIA URBANA E CONTEXTO CLIMÁTICO

INTRODUÇÃO

A nova capital do Brasil foi inaugurada em 1960 e tornou-se um marco na para o urbanismo do século XX. O projeto do arquiteto Lucio Costa, baseado principalmente nos princípios do Movimento Moderno, englobava recomendações inéditas no contexto brasileiro para moradia, lazer e estrutura do espaço intra-urbano.

A concepção urbana é baseada em separação de funções, legíveis nos seus marcos, estilo dos edifícios, espaçamentos e nas áreas livres do Plano Piloto. Contudo, segundo Holanda (2010), a paisagem urbana do Distrito Federal “é mais complexa do que sugere a dicotomia Plano Piloto/Cidades-Satélites” (HOLANDA, 2010, p.19).

O autor se refere às primeiras cidades satélites com conceito modernista, ao surgimento dos acampamentos de trabalhadores que resistiram às pressões para deixar o Plano Piloto, assentamentos irregulares e aos condomínios fechados que ditam uma nova forma de expansão urbana. Ou seja, a cidade não se identifica apenas pela forma e função modernistas de origem. E como é a morfologia urbana do Distrito Federal hoje?

Todas as formas e funções, as originais e as novas, são fundamentais para este estudo com base em LCZ. Sendo assim, o objetivo deste capítulo é caracterizar a morfologia urbana e o contexto climático da capital federal, procurando-se também relações entre o planejamento da cidade e a climatologia urbana.

Para tal, realizou-se uma revisão de literatura sobre os antecedentes que influenciaram o Movimento Moderno na arquitetura e urbanismo no Brasil e suas abordagens climáticas, o projeto urbanístico do Plano Piloto e a conformação das 33 Regiões Administrativas do Distrito Federal no ano 2020.

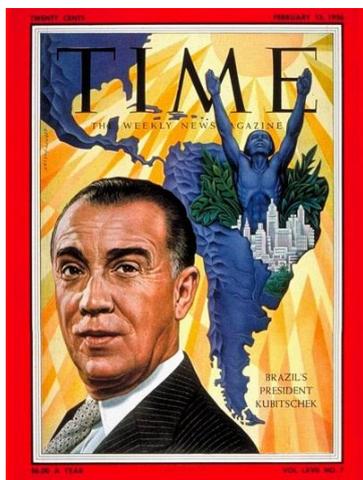
Finaliza-se o capítulo com o contexto climático. Consultou-se autores que analisaram o campo térmico da cidade e principalmente dados do INMET, dados satelitais e do Painel de Mudanças Climáticas no DF e RIDE da Secretaria do Meio Ambiente do Governo do Distrito Federal (SEMA-DF).

3.1. MORFOLOGIA URBANA: DOS MODELOS CONCEITUAIS À INVENÇÃO DA CAPITAL FEDERAL

O anúncio da transferência da capital do Rio de Janeiro para a região central do país e o concurso de projetos para o Plano Piloto foi noticiado no Brasil e no exterior. Frente à esse empreendimento estava o presidente Juscelino Kubitschek, que foi capa da revista *Time* em 1956 (Figura 19) divulgando a nova imagem do país com o lema: “Cinquenta anos em Cinco” (TIME, 1956, s.p.).

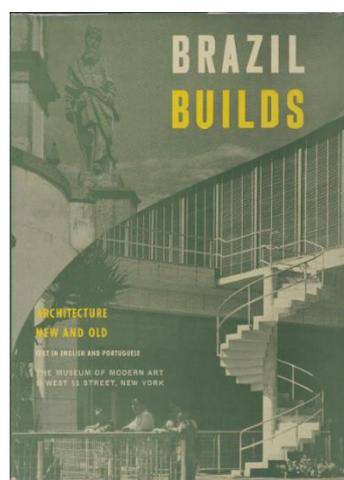
A arquitetura moderna brasileira já havia se destacado internacionalmente, sendo até tema de uma exposição em 1943 chamada *Brazil Builds* no MOMA (*The Museum of Modern Arts*) em Nova York (Figura 20). O modernismo encontrou representatividade em edifícios públicos, como no Ministério da Educação e Saúde (MES)²¹ na antiga capital Rio de Janeiro e, deu identidade também para a arquitetura e urbanismo da nova capital.

Figura 19. JK na capa da Times de 13 de fevereiro de 1956.



Fonte: <http://content.time.com/time/covers/0,16641,19560213,00.html>

Figura 20. Catálogo *Brazil Builds* resultante da exposição do mesmo nome.



Fonte: <https://www.architectural-review.com/essays/building-brazil-from-the-cariocas-to-the-paulistas-to-the-now>

O estudo para definição do local de construção da cidade foi iniciado com a Comissão Cruls, conhecida assim pelo nome do seu cientista chefe, Dr. Luís Cruls. A Comissão esteve no planalto central em duas missões, no final do séc. XIX, à procura de um sítio para a nova capital, encontrando o triângulo formado por três lagoas (Feia, Mestre D'armas e Formosa).

Em 1954, a firma norte-americana Donald J. Belcher e Associados foi contratada pelo governo brasileiro para executar os levantamentos necessários para a definição do local, dentro de uma área de cerca de 50.000 Km². A escolha final foi feita a partir de uma avaliação de cinco sítios selecionados, cuja “preocupação dominante é a vocação

²¹ Com a mudança da capital para Brasília, o edifício passou a se chamar Palácio Gustavo Capanema. Esse projeto contou com a colaboração do arquiteto francês Le Corbusier e a equipe de trabalho era composta por Lucio Costa, Affonso Eduardo Reidy, Jorge Moreira, Carlos Leão, Oscar Niemeyer e Ernani Vasconcellos.

urbanística do local e os condicionamentos estruturais de solo, topografia, clima e hidrologia” (BERTRAN, 1992, p.68).

O processo resultou na demarcação do DF (Figura 21), localizado na região Centro-Oeste do país, em uma unidade de relevo denominada planalto central, entre os paralelos 15° 30' e 16° 03' e os meridianos 47° 18' e 48° 17' (oeste de Greenwich). O DF abrange uma extensão de 5.779km² e sua altitude possui a cota de referência de 1.070 metros acima do nível do mar.

Figura 21. Localização do novo Distrito Federal.



Fonte: Produzido pela autora com dados espaciais disponibilizados pelo IPEA-GEO (s.d.).

Em 1956, após a definição do sítio vencedor, constituiu-se o Lago Paranoá, cuja referência para sua criação remonta da 2ª missão Cruls e foi retratado por Juscelino Kubitschek como “moldura líquida da cidade” (Arquivo Público do Distrito Federal, s.d.). Já o projeto para o Plano Piloto foi alvo de um concurso de projeto vencido por Lucio Costa em 1957.

O projeto urbanístico foi baseado nos princípios do Movimento Moderno, especialmente na Carta de Atenas²², elaborada no contexto do IV C.I.A.M (*Congrès Internationaux d'Architecture Moderne*), realizado em 1933. Nos tópicos seguintes analisa-se os antecedentes que influenciaram o desenho urbano do Plano Piloto até o marco legal da preservação dos seus princípios urbanísticos, consolidado pelo documento Brasília Revisitada.

3.1.1. Antecedentes

O IV C.I.A.M teve o tema “A cidade funcional” e gerou diferentes publicações que retrataram as reflexões acerca do urbanismo moderno. As publicações analisadas nesta tese são: as conclusões do congresso foram publicadas pela Revista AC-GATEPAC de Barcelona no mesmo ano; o livro “A Carta de Atenas”, de Le Corbusier, publicado em 1943 e “*The Town-Planning Chart*”, publicada no livro “*Can our cities survive?*” de Jose Sert em 1942.

É importante atentar-se ao conteúdo dessas publicações, pois nos encontros do C.I.A.M circulavam as principais ideias e debates do movimento moderno que também

²² O IV C.I.A.M. foi realizado em um barco a caminho de Atenas. O livro “A Carta de Atenas” foi publicado em 1943 por Le Corbusier refletindo não só as narrativas do C.I.A.M, mas também sua visão de planejamento urbano.

influenciaram arquitetos brasileiros como Lucio Costa²³. Para o arquiteto Sigfried Giedion, um dos fundadores do C.I.A.M, o planejamento urbano tornou-se tema central do movimento moderno a partir do III C.I.A.M, sendo considerado indispensável na resolução dos problemas aquitetônicos e urbanos. Vale aqui ressaltar que o olhar era voltado para as cidades industrializadas do Hemisfério Norte, uma vez que os envolvidos eram geralmente Europeus e Norte-Americanos.

No debate sobre a cidade funcional do IV C.I.A.M, foram selecionadas 33 cidades de diferentes origens e climas como Londres, Paris, Los Angeles, entre outras. Os problemas urbanos apontados eram o crescimento populacional, rápida expansão urbana e demandas por moradia e novos desafios advindos da produção mecanizada, transporte, novas técnicas construtivas, novos ideais de recreação e saúde e o espaço aéreo da cidade (SERT, 1944, p. 2). Le Corbusier (1993) afirmava que o problema da habitação prevalece sobre todos os outros.

Os métodos de pesquisa destacavam o uso de câmeras e da aviação para o registro preciso do ambiente urbano e para a obtenção da visão aérea que revela uma nova “*urban façade*” (SERT, 1944, p. 2). Soma-se o uso da estatística e de uma biologia urbana para estudar a vida das cidades e suas condições de habitabilidade. Foram realizados questionários divididos em quatro funções: **habitação, trabalho, recreação e transporte**. Essas funções são também os eixos para as soluções que visam a cidade funcional e que podem ser identificados no Plano Piloto de Brasília.

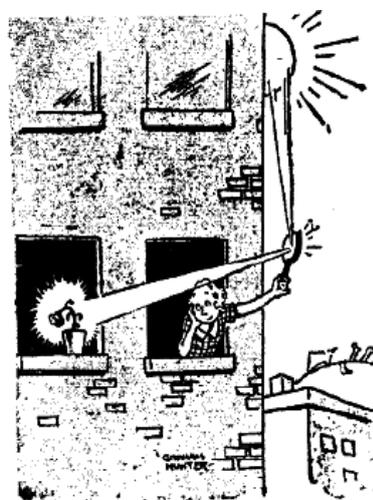
Embora as cartas de Atenas façam recomendações para superar os problemas urbanos de forma generalizada, aspectos que se relacionam com o clima aparecem em todas as funções, discutindo principalmente a poluição do ar, insolação e redução de áreas verdes, com foco em higiene e saúde humana. As premissas iniciais já chamam atenção para as características climatológicas e topográficas do lugar como condicionantes urbanísticas (LE CORBUSIER, 1993; SERT, 1944).

As observações principais sobre habitação foram produzidas sobre a leitura da densidade habitacional e sua distribuição na cidade, do rápido crescimento das áreas periféricas, condições sanitárias e redução de áreas verdes. As condições sanitárias inadequadas foram relacionadas à falta de acesso à luz do sol, ventilação, exposição aos ruídos, poeira e poluição das vias congestionadas.

A morfologia urbana da cidade tradicional com edifícios ocupando os dois lados da rua foi criticada quanto à exposição solar inconsistente. Dependendo da orientação, alguns edifícios não recebem insolação suficiente e não conseguem iluminar suas áreas internas (Figura 22). Também foi criticada a falta de um zoneamento para localização de áreas residenciais com foco nos fatores que melhoram a saúde humana.

As publicações se diferem na discussão da implantação das edificações: Le Corbusier (1993) é

Figura 22. Crítica sobre o acesso ao sol observado nas fachadas dos edifícios da cidade



Fonte: Sert, 1944, p.49.

²³ Lucio Costa participou da formação do Grupo Brasileiro do C.I.A.M em 1945 junto com Oscar Niemeyer, Alcides Rocha Miranda, Affonso Reidy, entre outros.

direto no ponto 27²⁴ da sua carta quanto à proibição do alinhamento das habitações ao longo das ruas, em detrimento à alta velocidade dos veículos, poeira, poluição e circulação de pedestres. Sua resolução estaria da divisão dos fluxos dos automóveis e dos pedestres, no afastamento das edificações criando uma canalização própria para acesso de pedestres, elevação da altura das edificações (ponto 28) e liberação do solo para favorecer superfícies verdes (ponto 29).

Já na “*The Town-Planning Chart*” observa-se a mesma proibição direcionada apenas para as vias principais de trânsito. As resoluções são direcionadas para a garantia de exposição solar mínima, fixação de diferentes limites de densidade de acordo com a localização e diferenças entre distritos residenciais. Discutia-se também as técnicas de construção para edifícios em altura, suficientemente espaçados, liberando espaço para serviços comunitários, lazer, estacionamentos, luz, sol, ar e vista livre.

Sert (1944) analisou a relação entre crescimento populacional, áreas de alta densidade e árvores com uma conseqüente redução de áreas naturais, áreas verdes e espaços livres na cidade. Afirmou que a ausência de árvores é um indicador para retratar condições de vida abaixo do padrão sob ponto de vista sanitário (SERT, 1944, p.23). As recomendações abrangem desde a localização das áreas residenciais para fora do alcance da poluição das indústrias como a diversificação da densidade populacional.

Concluindo, as cartas se empenharam em trazer um conjunto de intenções generalizadas para transformar os problemas das cidades estudadas em um melhor lugar para a vida humana. Sampaio (2001) acrescentou em sua análise a visão de um aporte ideológico por trás do C.I.A.M, em que a cidade ideal moderna deveria superar a cidade real cheia de erros.

O autor trouxe à tona um elemento central do discurso do C.I.A.M: a economia do tempo de deslocamento entre as quatro funções, questionando a interpretação tão difundida de indicação de setores monofuncionais que foram levadas à prática em vários lugares, por exemplo o Plano Piloto de Brasília (SAMPAIO, 2001).

Uma vez que esta tese se insere na temática do clima urbano, é interessante identificar o papel da climatologia urbana e sua conexão com a arquitetura e o urbanismo na época, para além das breves pontuações trazidas pelas cartas de Atenas aqui analisadas. Para tal, é fundamental resgatar qual era a situação das pesquisas na área de clima urbano, sua divulgação e como se relacionaram com a ascensão do modernismo durante o século XX.

Parte-se das contribuições originam-se da Alemanha que, de acordo com Chiri e Giavagnorio (2015), foi o centro do debate de um planejamento urbano climático, entre outras pesquisas da Austria, França e Inglaterra. Os autores destacam que até o final da década de 20, os estudos descreviam as modificações que a cidade provocava sobre o clima, como causa-efeito, e ainda procurava-se estabelecer uma disciplina especializada no microclima urbano.

Em 1927, o livro *Das Klima der Bodennahen Luftschicht* do meteorologista Rudolf Geiger foi pioneiro na micrometeorologia. No seu prefácio, Geiger destacava a ausência de um estudo sistematizado nesse campo. O livro foi traduzido para o idioma inglês como *The Climate Near the Ground*²⁵, publicado em 1950. Conta com uma revisão

²⁴ A publicação de Le Corbusier (1993) é dividida em pontos em contagem contínua, do 1 ao 95 e agregados em três partes: generalidades, estado atual crítico das cidades e conclusões.

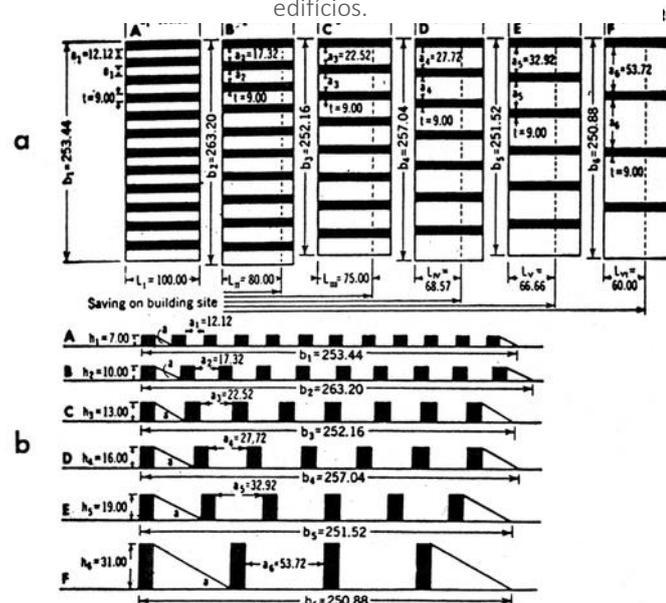
²⁵ Foi consultada a tradução da 2ª edição alemã de 1941, onde o autor acrescentou diversos trabalhos incluindo um capítulo sobre o clima da cidade (cap. 38) e da modificação do microclima pelo homem (cap.

incluindo a criação de novos microclimas por meio da industrialização e urbanização, efeitos do aquecimento na economia, temperatura ao ar e até em condições de aclimação humana (GEIGER, 1950).

Eram emergentes as teorias da orientação solar para as implantações dos edifícios, em especial os habitacionais em larga escala. Denzer (2014) coloca que o acesso solar era uma preocupação central para os arquitetos das cidades alemãs por volta de 1920, implicando em questionamentos sobre qual a melhor orientação para as fachadas. Consequentemente observou-se o afastamento entre os blocos residenciais encaminhando para um desenho aberto.

A evolução da implantação aberta em larga escala já se manifesta no III CIAM, em 1930, com a apresentação do arquiteto alemão Walter Gropius. Em um diagrama comparativo da altura e espaçamento entre edifícios, Gropius propõe o aproveitamento do terreno condicionado pela geometria solar. A Figura 23 ilustra uma implantação de edifícios em alturas diferentes para um máximo de luz, sol e ventilação em todas as unidades. Esse tipo de implantação tornou-se uma marca do traçado urbano moderno.

Figura 23. Estudo sobre a altura e afastamento entre os edifícios.



Fonte: Gropius, 1974, p.152

Para Hebbert e MacKillop (2013), o estudo do clima urbano foi sistematizado na Alemanha e culminou na transferência de conhecimento para o planejamento urbano por meio da interdisciplinaridade da escola Bauhaus, sob direção do arquiteto modernista Mies Van Der Rohe. Antes do início da II Guerra Mundial, a microclimatologia já se fortalecia entre meteorologistas e arquitetos (CHIRI e GIAVAGNORIO, 2015).

No contexto dessa interdisciplinaridade destaca-se a publicação do livro *Das Stadtklima*²⁶ de Albert Kratzer em 1937. O físico utiliza metáforas para descrever o comportamento climático das grandes cidades: ora um vulcão que expele núvens de gás

39), reiterando o foco na higiene. O autor definiu como *near the ground* tudo aquilo que está até 2 metros da superfície do solo.

²⁶ O livro foi publicado em inglês em 1962 com apoio da *American Meteorological Society Translation Service*, com o título *The Climate of Cities*, baseado na segunda edição alemã de 1956.

e poeira resultando em um envelope opaco sobre a cidade; ora um deserto devido às modificações do seu solo e ora uma floresta, que bloqueia fluxos de ar e a velocidade do vento diminui (KRATZER, 1962). Alguns pesquisadores (HIDALGO et al, 2019; HEBBERT e MACKILLOP, 2013) lamentam a falha e o retardo da circulação desses conhecimentos e sua transferência para a prática, possivelmente pelo período entre guerras e, notoriamente, a II Guerra Mundial, exílio e imigração de pesquisadores.

No pós-guerra, a produção científica sobre o clima e o futuro das cidades obtiveram grandes avanços mas, entre os arquitetos e urbanistas, no apogeu do modernismo também fora da Europa, as práticas dos princípios climáticos foram pontuais e mais centradas nas edificações (HEBBERT e MACKILLOP, 2013). Entretanto, o planejamento urbano climático continuou proeminente em cidades alemãs. Dessa forma, vale incluir uma breve reflexão sobre o clima na perspectiva interna ao edifício e seu controle climático. E voltamos à Le Corbusier, que discursou não só sobre cidades do futuro, mas também sobre a criação de um clima artificial dentro dos edifícios.

Denzer (2014) analisou a prática arquitetônica de Le Corbusier em relação à orientação solar: ora com exposição das fachadas de vidro ao sol, ora sombreando-as, ignorando por vezes os princípios termodinâmicos. O que ainda observamos nos projetos atuais. Le Corbusier inclusive já contou com um programa no qual pregava que todos os edifícios deveriam controlar a temperatura do ar internamente em 18 °C, independente do clima e localização, como relatou Banham (1969). Isso em uma época onde os dispositivos para o aquecimento do ar interno eram comuns mas, para resfriamento, ainda não, entretanto vai ao encontro do seu discurso de uma arquitetura dita universal (BANHAM, 1969).

Em outra fase de sua trajetória, Le Corbusier empregou o *brise-soleil* para solucionar problemas de insolação, ao ponto que essa mudança direcionou a arquitetura moderna nas décadas seguintes (Barber, 2012). Mas o que interessa neste ponto não é o seu percurso em si, e sim sua influência entre os arquitetos e engenheiros brasileiros: especialmente Lucio Costa e Oscar Niemeyer. E nesse momento, o Brasil é apontado em trabalhos de historiografia (BARBER, 2012, 2019; MUMFORD, 2002, 2018) como significativo para Le Corbusier consolidar o *brise-soleil* como “modelo de integração da arquitetura, identidade, tecnologia e desenho baseado no clima” (BARBER, 2012, p.22, tradução da autora).

Barber (2012) aposta que Le Corbusier “encontrou” no Brasil da década de 30 uma integração entre arquitetura e ciências climáticas. Em 1929, Le Corbusier visitou São Paulo e a então Capital Federal Rio de Janeiro e retornou em 1936 por causa de uma consultoria para o projeto do Ministério da Educação e Saúde (MES). Sem adentrar nos bastidores desse trabalho em equipe, vale destacar a projeção internacional do edifício do MES. O *brise-soleil* se tornou um ícone da arquitetura moderna brasileira e foram amplamente explorados nos edifícios modernistas brasileiros e internacionais.

3.1.2. O PLANO PILOTO

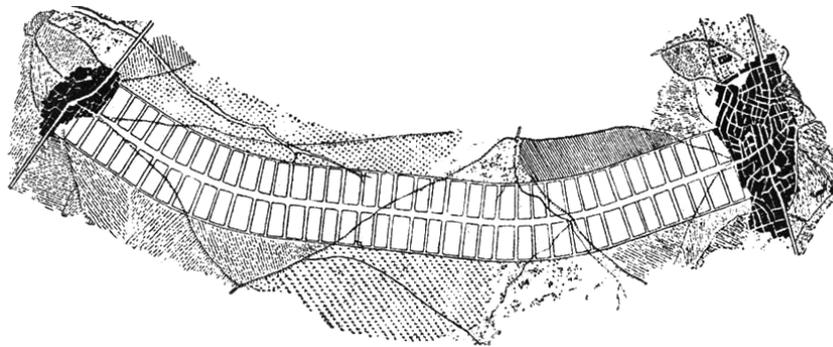
Mais de uma década depois dessas publicações olhamos para o plano apresentado por Lucio Costa que, para Panerai (2014, p.97), é o exemplo completo de “aplicação em grande escala dos princípios modernistas”. A trama urbana se distribui a partir do cruzamento de dois eixos e ao longo deles, invertendo-se a relação figura-fundo comum na cidade tradicional: agora o edifício moderno, isolado, equipara-se à ocupação dos

vazios dos espaços livres (PANERAI, 2014, p.165). Essa nova relação também separou o trânsito de pedestres e automóveis e criou uma organização urbana moderna e única, com ausência das ruas (HOLSTON, 1993).

Mas o tecido urbano do Plano Piloto não contém apenas princípios da Carta de Atenas. Panerai (2014) coloca que o Plano Piloto apresenta reinterpretações de outros conceitos apresentados em modelos como as cidades-jardins inglesas de Ebenezer Howard e Raymond Unwin em seus espaços coletivos arborizados. Pode-se elencar também a ideia dos cinturões verdes, que no modelo da cidade jardim aparecia ao longo da denominada grande avenida que vai aos extremos da cidade (HOWARD, 1902).

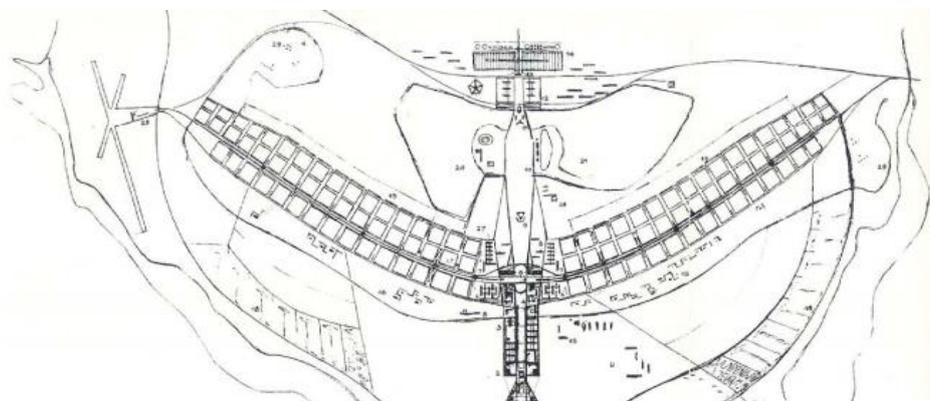
Outro conceito predecessor observado no desenho da nova capital foi discutido por Carpintero (1998): a cidade-linear de Arturo Soria y Mata de 1882, cuja base conceitual é uma estrutura física linear ao longo de um eixo de transporte que rompe com uma estrutura concêntrica, geradora de subúrbios (Figura 24 e Figura 25). Doxiadis (1967) não exergava a proposta de Soria como cidade, e sim como parte de uma cidade, ou um corredor que conecta expansões de uma cidade e não possui uma função central, o que tampouco poderia ser uma cidade.

Figura 24. Esquema da cidade linear de Soria y Mata para Madrid contrastando com a trama urbana tradicional existente nas extremidades do eixo.



Fonte: <https://legadoarturosoria.es/ciudad-lineal-arturo-soria-2/>

Figura 25. Eixos principais do Plano Piloto de Lucio Costa.



Fonte: ArPDF, CODEPLAN, DePHA, 1991, p.33.

Ainda para Carpintero (1998), essa concepção ao longo de um eixo de transporte marca um padrão de desenvolvimento projetual que foge aos difundidos pelo CIAM e que, de acordo com Holanda (2020), se orienta também ao modelo rodoviário. Ou seja, estruturado por uma trama hierarquizada de vias. Soma-se ainda à outros modelos

conceituais, como o modelo monumental quando marcou-se os espaços de representação do poder em seu tecido urbano (HOLANDA, 2020). O próprio Lucio Costa resume sua solução no Relatório do Plano Piloto como de “fácil apreensão”, “eficiente”, “monumental” e “funcional”, entre outros adjetivos, baseada em técnicas rodoviária e paisagística de parques e jardins (ArPDF, CODEPLAN, DePHA, 1991, p. 32).

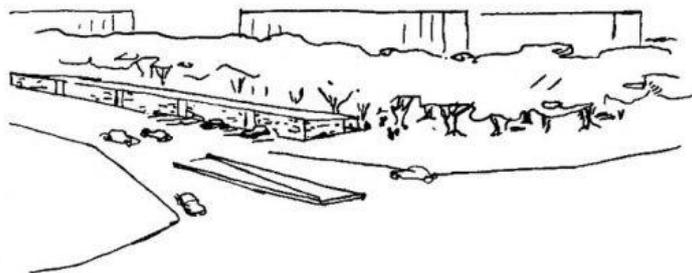
Diferentemente da cidade-linear, a centralidade aparece no plano de Lucio Costa no cruzamento dos dois eixos principais, mas a conexão com os assentamentos existentes na área demarcada para a construção da nova capital não fez parte da sua concepção: a saber Planaltina, fundada em 1859, e Brazlândia, fundada em 1934. Esses dois núcleos urbanos pré-existentes serão abordados no sub-capítulo 3.2.

Adentrando para as menores unidades urbanas, o projeto de Lucio Costa rompe novamente com o urbanismo tradicional trazendo a emblemática unidade de vizinhança com habitações coletivas cercadas por um cinturão verde (Figura 26). No lugar dos lotes delimitados da cidade tradicional, denominou-se o padrão urbano das projeções, isto é, o espaço da ocupação do edifício projetado no solo, onde o térreo é livre e configura uma relação público-privada, prevalecendo o domínio público.

Graeff (1978) cita que Costa enriqueceu essa ideia, primeiramente descrita na cidade para a era do automóvel de Henry Wright e Clarence Stein e difundidas por Clarence Perry (Figura 27). Os fundamentos tratavam de resolver a hostilidade das condições urbanas modernas com uma estrutura celular segregada das vias arteriais da cidade e percorrível a pé para acessar os serviços e facilidades do cotidiano, em especial à escola, parques locais para recreação entre vários aspectos econômicos para viabilizar os empreendimentos (PERRY, 1939).

Figura 26. Desenho de Lucio Costa para a área residencial com faixa de arborização.

14



Fonte: ArPDF, CODEPLAN, DePHA, 1991, p.25.

Figura 27. Proposta de Perry de unidade de vizinhança para reabilitação urbana em Long Island (EUA).



Fonte: Perry, 1939, p. 126.

Quanto às habitações unifamiliares isoladas, admitiu-se sua construção de forma eventual e, em termos de parâmetro morfológico, seriam afastadas entre elas em no mínimo 1 Km (ArPDF, CODEPLAN, DePHA, 1991). Por fim, a setorização das demais atividades como comércio, lazer, diversões, cultura, hospitais, entre outras, são articuladas pelo sistema viário. Adicionalmente ao histórico de sua criação, os 60 anos de desenvolvimento da cidade nos oferece outras camadas em seu tecido urbano, a serem discutidas a partir desse ponto.

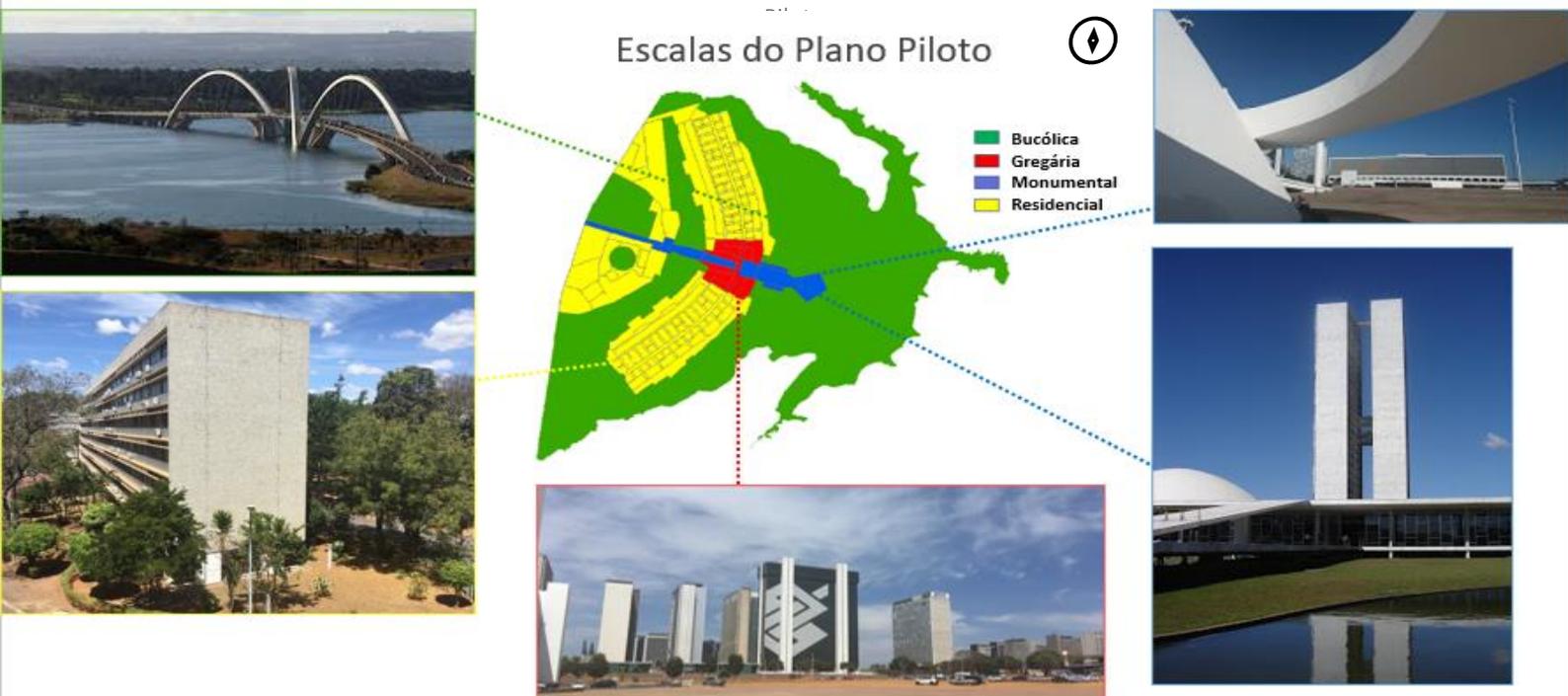
3.1.3. BRASÍLIA REVISITADA – PRESERVAR X ADENSAR X EXPANDIR

Brasília Revisitada é um documento de Lucio Costa escrito 27 anos depois da inauguração da capital, em um momento de discussão sobre sua preservação, consolidação e expansão. O documento foi organizado em três partes: Características Fundamentais do Plano Piloto; Complementação e Preservação; Adensamento e Expansão Urbana do Plano Piloto. A primeira parte traz a concepção urbana do Plano Piloto traduzida em escalas, como é conhecida hoje: monumental, residencial, gregário e bucólico (Figura 28).

A escala monumental é representada pelo eixo Leste-Oeste que concentra os mais importantes marcos visuais: a Esplanada dos Ministérios, a Praça dos Três Poderes e os espaços livres definidos pelos edifícios. Foi vetada qualquer construções acima do nível do solo no canteiro verde central, para permitir a vista livre do conjunto monumental.

A escala residencial, localizada nas áreas norte e sul ao longo do eixo norte-sul, é composta principalmente pelas superquadras, compostas por blocos com edifícios residenciais (máximo de seis andares e pilotis) que formam unidades de vizinhança, contendo comércio local, serviços e um cinturão de área verde pública de 20 metros de largura. A Portaria Nº 314/1992 ainda define a taxa de ocupação máxima para habitação nas superquadras em 15%.

Figura 28. As quatro escalas do Plano



Fonte: Imagens do acervo da autora.

A escala gregária está localizada em torno da intersecção dos eixos Leste-Oeste e Norte-Sul e se configura nos setores: financeiro, comercial, hoteleiro, hospitalar, rádio e TV. Nesse ponto a verticalização é permitida e limitada ao gabarito de 65 metros de altura. Por último, a escala bucólica foi pautada pela incorporação de espaços verdes e de lazer caracterizando uma cidade-parque, prevalecendo a cobertura vegetal do cerrado nativo e o acesso público ao lago Paranoá.

Lucio Costa fixava o carácter único da cidade com a verticalização contida na escala gregária, valorizando a horizontalidade da paisagem, além da permanência das áreas livres. Hoje, o conjunto urbanístico de Brasília está legalmente protegido em três instâncias: (1) Governo Federal - Livro do Tombo Histórico, inscrição nº 532, Portaria nº 314/92 do Iphan; (2) Governo do Distrito Federal - Decreto nº 10.829 de 14 de outubro de 1987; (3) UNESCO - Lista do Patrimônio Mundial Inscrição nº 445, em 07 de dezembro de 1987. O Plano De Preservação Do Conjunto Urbanístico De Brasília coloca como singular o seu parcelamento do solo, principalmente por meio de (SEGETH, 2017):

- projeções e lotes isolados;
- predomínio de espaços livres sobre os construídos;
- emolduramento dos edifícios pela paisagem;
- permeabilidade visual;
- livre circulação de pedestres;
- separação do trânsito de veículos da circulação de pedestres.

Com as disposições à favor da preservação do conceito urbanístico explanadas, Lucio Costa reforçou que a expansão urbana também poderia ser conflituosa às características das quatro escalas. Por isso ela se daria pelas cidades-satélites. Para contornar o distanciamento dessas em relação ao Plano Piloto, propôs também a ocupação, sobretudo residencial, em áreas próximas ao Plano Piloto, porém com a abordagem de quadras econômicas para a população de menor renda.

Outras áreas residenciais vinculadas ao Plano Piloto foram propostas observando o baixo gabarito e a extensa arborização. As habitações multifamiliares continuavam se sobressaindo à ideia de habitações isoladas, assim como a função político-administrativa da capital, onde, para Lucio Costa, não deveria se tornar uma metrópole (DISTRITO FEDERAL, 1987). No tópico seguinte retrata-se a cidade que cresceu para além do Plano Piloto.

3.1.4. A CAPITAL FEDERAL HOJE: SEIS DÉCADAS DE MUDANÇAS

Completados 60 anos em 2020, o Distrito Federal conta com uma população estimada de 3.039.444 habitantes (IBGE, 2019) evidenciando o rápido crescimento populacional e consequente expansão urbana. O Plano Piloto é hoje parte da Região Administrativa 1 – Brasília, uma das trinta e três Regiões Administrativas²⁷ (RA) do Distrito Federal. Outras regiões administrativas se destacam nesse contexto, como

²⁷ A Lei nº 4.545, de 10 de dezembro de 1964 divide o Distrito Federal em Regiões Administrativas para fins de descentralização e coordenação dos serviços de natureza local. Diversas mudanças ocorreram nos limites das RAs existentes, apresentadas na Lei Complementar 958 de 20/12/2019 que define os novos limites físicos.

Ceilândia – RA IX, com a maior população do DF (432.927 habitantes²⁸), ou como o Varjão – RA XXIII, com a maior densidade urbana (142,27 hab./ha²⁹).

Ferreira (2010) estudou a produção do espaço urbano da cidade e o divide em três momentos: a implantação, a consolidação e a expansão. A autora coloca Brasília como “cidade de frente pioneira” (FERREIRA, 2010, p.71), exercendo forte influência desde sua fase inicial atraindo o fluxo migratório para o Centro-Oeste com uma alta taxa de crescimento populacional e a extensão do seu espaço urbano. Na fase seguinte consolida-se a centralidade do Plano Piloto e os núcleos periféricos, antigas cidades-satélites e atuais RAs, que são muito diferenciados em termos de urbanização.

No Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal (PDOT) de 2009, encontramos mais dois momentos subseqüentes: a dispersão e a polarização. O parcelamento do solo rural, desconectado dos núcleos urbanos já consolidados, caracteriza a dispersão da mancha urbana. Já a polarização trata-se de uma derivação da dispersão, caracterizada pelos deslocamentos para fins de trabalho, estudos, assistência e serviços em outros núcleos urbanos, acelerando o aumento do sistema rodoviário.

Ainda de acordo com o PDOT (2009), A RA1 – Brasília, concentra aproximadamente 50 mil postos de trabalho e os também municípios limítrofes dependem de serviços e empregos ofertados no DF. Além do mais, o grau de urbanização, coesão interna, densidade e tamanho da população culminou com a formação de uma metrópole nacional (IBGE, 2020), na contra-mão do conceito original de Lucio Costa, e não mais identificada apenas pelo seu Plano Piloto.

Em 1998 foi implementada a Região Integrada de Desenvolvimento (RIDE) do Distrito Federal e Entorno, englobando 19 municípios do Estado de Goiás e 3 municípios do Estado de Minas Gerais. Não sendo suficiente a delimitação da RIDE para o enfrentamento dos problemas da região, segue em debate a criação da Região Metropolitana (RM) do DF. Essa complexa discussão, que também esbarra em um impedimento constitucional³⁰, pode ser conferida na nota técnica do CODEPLAN (2019): Região Metropolitana Do Distrito Federal.

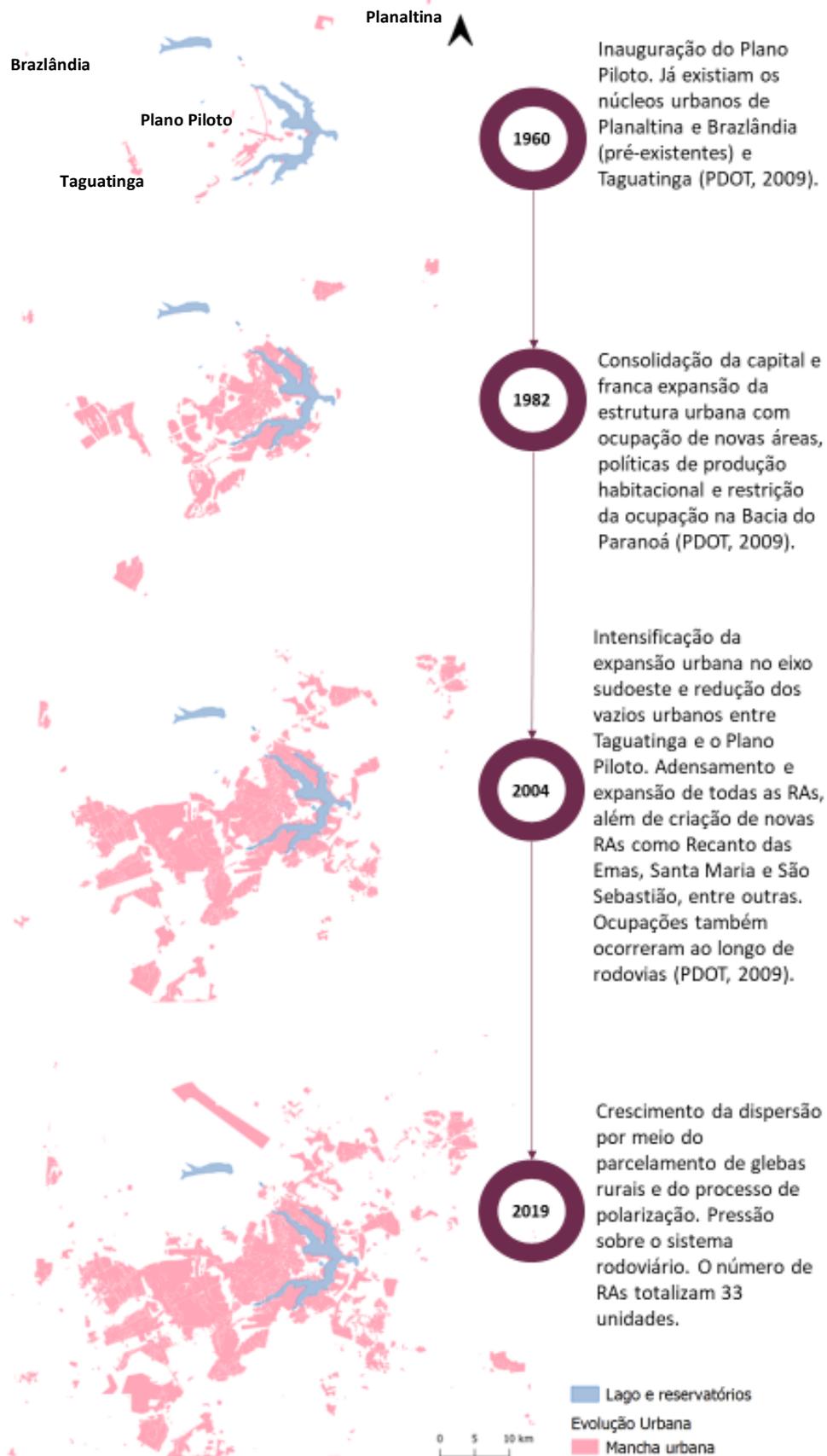
Adentrando para os aspectos da evolução da área urbana do DF, a Figura 29 apresenta uma comparação espaço-temporal, que passou de 23 km², no ano da sua inauguração, para 709 km² em 2019, de acordo com o levantamento de Chelotti e Sano (2021). O crescimento urbano apresentou uma tendência de expansão da parte central do Plano Piloto para o eixo sudoeste, onde encontram-se RAs com densidades urbanas mais elevadas e, em menor extensão, para o eixo nordeste.

²⁸ Fonte: Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios (PDAD) 2018 da Companhia de Planejamento do Distrito Federal (CODEPLAN).

²⁹ Fonte: Jatobá, 2017, p.13. Calculado tendo como referência o dado populacional do ano 2015/2016.

³⁰ A Medida Provisória n° 862, de 04 de dezembro de 2018 possibilita a criação da RM alterando artigos da Lei n° 13.089 de 12/01/2015 (Estatuto da Metrópole), que antes vetava a criação de RM que envolvessem municípios situados em mais de uma Unidade da Federação. Essa medida resolveria o impedimento legal, mas automaticamente não criou a RM do DF (CODEPLAN, 2019).

Figura 29. Evolução da mancha urbana do DF.



Fonte: Elaborado pela autora com dados espaciais da SEDUH – Geoportal IDE DF, 2019.

Para analisar espacialmente a dinâmica da mancha urbana do DF, Chelotti e Sano (2021) empregaram métricas da paisagem, chamando atenção para dois indicadores: densidade de borda, que demonstrou uma fragmentação da forma, e o índice de forma, que indicou uma mancha urbana irregular, heterogênea e geometricamente complexa.

Os autores concluíram que o DF ainda encontra-se em tendência de expansão quando notaram a inexistência de inflexão na sua curva de crescimento urbano, ou seja, ainda não atingiu um patamar de estabilização. A ocupação do território avança em áreas com vocação urbana e rural e com geomorfologia tipicamente plana, com declividades de até 5% (CHELOTTI e SANO, 2021).

Esse padrão espacial com indicação de fragmentação pode ser observado por diversos parcelamentos de glebas em áreas com destinação rural, mesmo havendo áreas com destinação urbana ainda vazias. Esses parcelamentos geralmente particionam as glebas em áreas menores e são criados como condomínios (PDOT, 2009), dificultando seu entendimento sobre o que é rural ou urbano.

No DF, a expansão urbana sobre áreas rurais, formais e informais, criados por classe de baixa renda e de média/alta renda, tem em sua origem fatores socioeconômicos, especulação imobiliária, mobilidade, entre outros discutidos por vários autores (HOLANDA, 2003; PAVIANI, 2010; JATOBÁ, 2017).

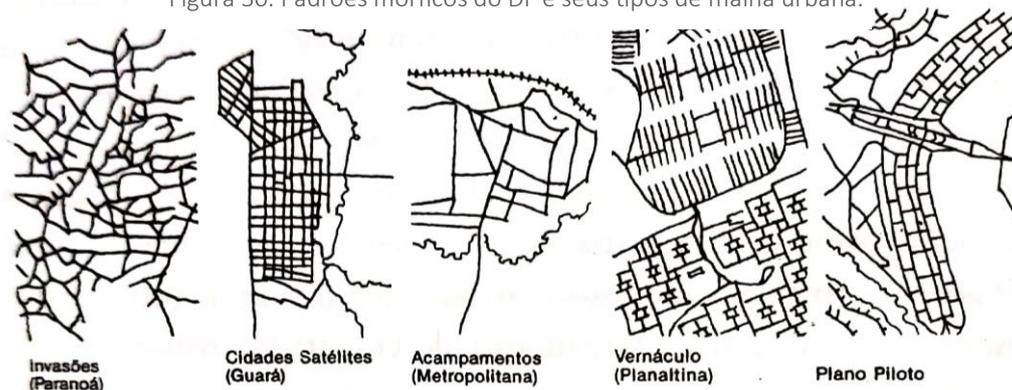
Para atender as finalidades desta tese, segue-se nos próximos tópicos com reflexões sobre a forma urbana, até aqui apreendida como dispersa, heterogênea e sem limites claros entre o rural e o urbano. Para tal, buscou-se estudos que propuseram classificar a morfologia urbana do DF, incorporando também as áreas verdes.

3.1.5. CLASSIFICAÇÕES EXISTENTES DAS MORFOLOGIAS E ESTRUTURAS URBANAS PARA O DISTRITO FEDERAL

Outros trabalhos se propuseram a classificar a morfologia urbana do DF e suas estruturas, como Kohlsdorf (1996, 2010), Holanda (2003), Castro (2017) e Castro et al. (2019). Os autores possuem objetivos de pesquisa diferentes, porém possuem em comum a busca por uma representação simplificada de padrões espaciais homogêneos da ocupação do solo.

O referencial imagético dos assentamentos do DF foi discutido por Kohlsdorf (1996, 2010) e agrupados em cinco padrões: invasões, cidades satélites, acampamentos, vernáculo e Plano Piloto (Figura 30). O vernáculo é referente à ocupação territorial preexistente à construção do Plano Piloto.

Figura 30. Padrões mórficos do DF e seus tipos de malha urbana.



Fonte: Kohlsdorf, 2010, p.260.

O Plano Piloto, acampamento de obras e cidades satélites são as ocupações territoriais seguintes e temporalmente próximas: a primeira se trata da moderna capital, a segunda destinava-se aos trabalhadores da construção da capital e a terceira consolidou-se como uma opção de moradia mais econômica em relação ao Plano Piloto. Essas três morfologias possuem malhas distintas, porém similares no princípio do funcionalismo e de malhas regulares (KOHLSDORF, 2010). Por último, a contraposição do padrão das invasões, marcado pela irregularidade e, dentre outras características, construído sem uma programação para infra-estrutura (KOHLSDORF, 2010).

Holanda (2003) apresenta sete categorias em sua classificação, derivadas dos padrões de Kohlsdorf. Acrescentou o pós modernismo ou novos tipos em formação, que são os bairros surgidos principalmente a partir dos anos 90, em que a o modernismo já não era necessariamente dominante. E por fim o padrão da cidade de muros, se referindo à proliferação dos condomínios. Esse último não é um padrão apenas periférico, mas em escalas menores nos empreendimentos fechados, como centros de compras, desconectados dos espaços públicos.

Alterando a perspectiva para a escala da vizinhança, a classificação adotada por Castro (2017) aplica o método de “Padrões de Estruturas Urbanas”, uma tradução livre do termo em inglês *Urban Structure Type* (UST). O objetivo da UST é caracterizar a organização do espaço urbano a partir de regiões espacialmente “homogêneas” em termos de cobertura do solo/terra (água, edificações, espaços verdes, áreas impermeáveis), tipo de uso (residencial, comercial, industrial, público) e características físicas (tamanho de construção, densidade, arranjo) (Hetch et al., 2013).

Castro (2017) trabalhou com esse conceito para a macrozona urbana do DF, definindo classes de UST que foram separadas tendo como base as características físicas e funcionais (Figura 31). As classes básicas foram agrupadas em cinco tipos, relacionadas à funcionalidade do território: Áreas Abertas, Áreas de Uso Comum, Áreas de Comércio e Indústria, Áreas Residenciais e Áreas em Consolidação. As principais características consideradas para a separação das classes nesse nível foram: tamanho do lote, taxa de ocupação (taxa de área construída), padrão construtivo (tipo da superfície de cobertura - telhado) e quantidade de área verde.

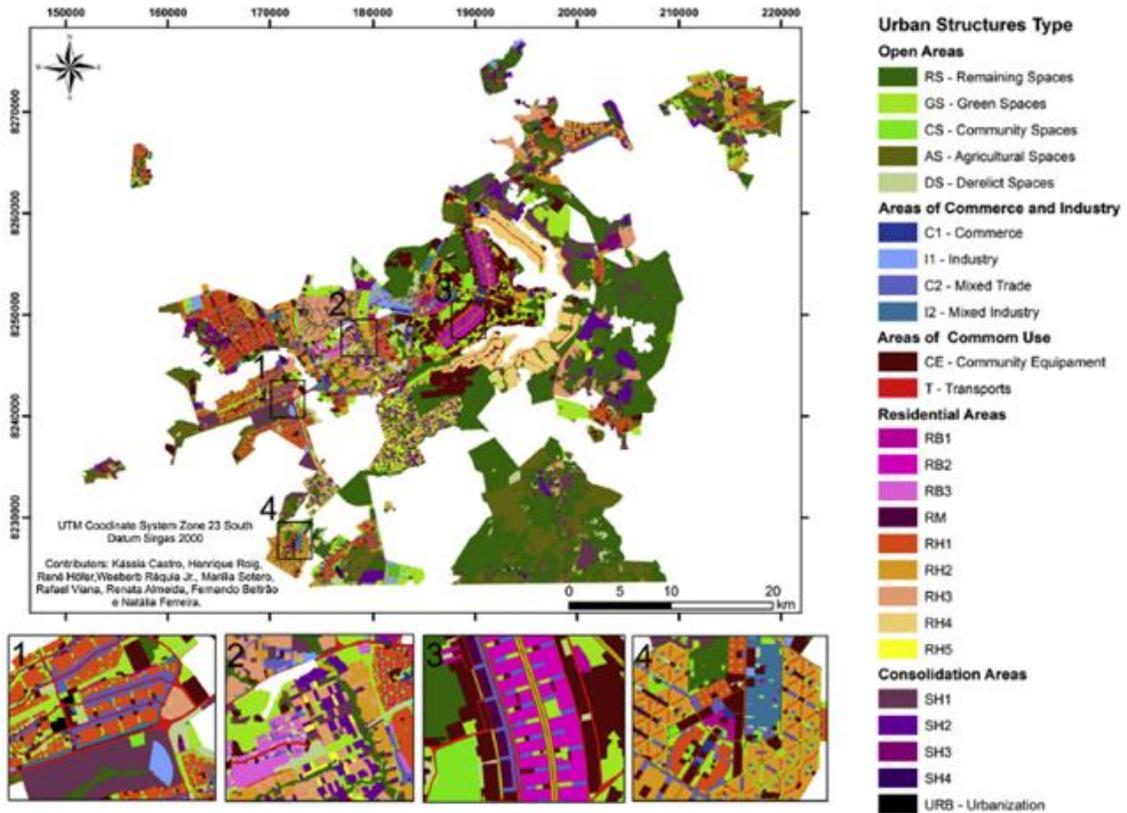
A partir desse trabalho, outras análises ambientais já foram realizadas no DF, relacionando a morfologia urbana com taxa de áreas impermeáveis (CASTRO et al., 2019), implantação de soluções baseadas na natureza (BRITO, 2020), além do trabalho inicial de Castro (2017), que analisou serviços ecossistêmico relacionados à água. A crítica ao método de UST surge do elevado número de classes e a falta de padronização da sua terminologia, o que dificulta sua implementação na gestão territorial (LEHNER E BLASCHKE, 2019).

Nesse sentido, segue o embate entre a visão genérica e a especializada, e nesse espectro flutua o nível de detalhe necessário para cada análise urbana. Assim, um método de classificação único pode ser inviável para atender a diversidade dos problemas metropolitanos do DF, ou de qualquer outra grande cidade. Além do mais, Haase & Rall (2014) apostam que a visão da estrutura e funções da cidade deve buscar um entendimento mais realista da dinâmica urbana e subsidiar cenários de priorização no planejamento.

Em síntese, o mapeamento de UST torna-se interessante, pois aborda um nível mais detalhado em relação à visão generalista comumente encontrada nos mapas de uso e ocupação do solo, onde o urbano é por vezes definido como classe única, criando

uma falsa visão de homogeneidade. Se diferencia também da escala e do foco dado à forma da malha urbana nos estudos morfológicos de Kolsdorf e Holanda. Das classificações apresentadas, a UST é a que mais se aproxima da proposta das LCZ, contudo sem o viés climático, necessário para os estudos de comparação dos elementos climáticos entre as classes e para o monitoramento ao longo do tempo.

Figura 31. Classificação de padrões de estruturas urbanas para o DF, referente ao ano de 2009.



Fonte: Castro et al., 2019, p.8.

3.1.6. ÁREAS VERDES URBANAS

O Distrito Federal foi construído no bioma Cerrado, segundo maior bioma do país. Registram-se a predominância dos latossolos e 11 tipos principais de vegetação (Figura 32): formações florestais (Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão), savânicas (Cerrado sentido restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda) e campestres (Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre) (RIBEIRO e WALTER, 2008).

Figura 32. Principais tipos de vegetação do Cerrado.



Fonte: <https://www.embrapa.br/cerrados/colecao-entomologica/bioma-cerrado>

Nas cidades, assim como o lote, a quadra, o tipo edifício e o traçado urbano, a vegetação também faz parte dos seus elementos morfológicos. Diversos termos são utilizados para fazer referência à presença da vegetação em áreas urbanas, tais como: áreas verdes, arborização, parques urbanos, florestas urbanas, etc. Segundo Bargas e Matias (2011), a diversidade de conceitos pode prejudicar a classificação e mapeamento do verde urbano, podendo levar a quantitativos e índices não condizentes com a realidade.

Nucci (2008, p. 29) afirma que área verde é uma categoria do sistema de espaços livres e não deve ser confundida com áreas livres, “uma vez que, na maioria destes últimos, não existe uma só árvore, uma espécie vegetal”. O autor se refere principalmente à impermeabilização do solo e às funções que deveriam ser atendidas, seja estética, ecológica dentre outras. Portanto, se faz necessário distinguir os termos. De acordo com a Lei Nº 12.651, Art. 3, Inciso XX, tem-se:

área verde urbana: espaços, públicos ou privados, com predomínio de vegetação, preferencialmente nativa, natural ou recuperada, previstos no Plano Diretor, nas Leis de Zoneamento Urbano e Uso do Solo do Município, indisponíveis para construção de moradias, destinados aos propósitos de recreação, lazer, melhoria da qualidade ambiental urbana, proteção dos recursos hídricos, manutenção ou melhoria paisagística, proteção de bens e manifestações culturais (BRASIL, 2012, s.p.).

Essa é a definição contemplada pelo GDF na Lei Complementar nº 961, de 26 de dezembro 2019, onde dispõe sobre a criação, implantação e gestão de parques urbanos. A mesma Lei Complementar define no Art. 3º que o parque urbano complementa o conjunto das áreas verdes urbanas na categoria de espaço livre de uso público desempenhando funções recreativa, paisagística e na prestação de serviços ecossistêmicos. Somam-se os objetivos de promover a permeabilidade do solo, a melhoria da qualidade do ar, do microclima local e da umidade do ar, arborização e o tratamento adequado da vegetação como elemento integrador na composição da paisagem urbana.

O Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Distrito Federal – IBRAM, catalogou 72 parques dentro da área urbana do DF (IBRAM, 2013). Também foram catalogadas 22 unidades de conservação. Entretanto, Camargo (2015) pondera sobre a distribuição desses parques, uma vez que existem RAs sem parques, além da proporção desigual de área verde de parque/habitante no DF. A desigualdade de distribuição de áreas verdes no DF associam-se também com áreas que apresentam alta taxa de impermeabilização do solo e baixo padrão construtivo (CASTRO, 2017).

Na classificação das UST de Castro (2017, p.37) percebe-se que, das classes residenciais, as que possuem maior área de vegetação arbórea e gramínea, pertencem ao grupo denominado “Área em Consolidação”. Essas áreas estão em transformação de ambiente rural para urbano, incluindo grilagem e processo de parcelamento legal. Por outro lado, considerando somente a vegetação arbórea, destacam os grupos residenciais mais valorizados presentes no Plano Piloto, Lagos Sul, Lago Norte e Park Way (CASTRO, 2017).

Detalhando esse quadro, o Observatório Territorial (2021) publicou um indicador para o DF de cobertura arbórea-arbustiva urbana³¹, consolidando 31,76 m²/hab. O Plano Piloto apresenta a maior extensão de cobertura arbórea-arbustiva e o Varjão, a menor. Dividindo essa extensão por número de habitantes, o Park Way alcança o primeiro posto com 736,34 m²/hab e o Varjão está no último com 4,73 m²/hab, ambos valores bastante deslocados com relação à média do DF.

De volta para as fitofisionomias do Cerrado, tem-se a questão da sua degradação, onde áreas assumidas como verdes podem ser formações campestres, e/ou são degradadas e/ou em quantidade insuficiente para promover serviços ambientais como sombreamento, sequestro e estocagem de carbono, evapotranspiração, entre outros (CAMARGO, 2015). Atentando-se sobre a fitofisionomia e dados de degradação, o IBRAM (2012) mapeou 8.255 hectares de parques. Nesse quantitativo destacam-se 4.639 hectares de vegetação nativa preservada (58%), 3.556 hectares de áreas degradadas ou perturbadas (41%) e 64 hectares (1%) destinados a lazer e recreação da população (IBRAM, 2012, p 270).

Mas, como essas áreas verdes se conectam? O PDOT (2009) traz o conceito de conectores ambientais, os quais são porções de ecossistemas naturais utilizados como elementos de conexão entre espaços naturais preservados e demais unidades de conservação e áreas protegidas. A sua definição e implantação serão realizadas com base no ZEE - Zoneamento Ecológico-econômico, onde foi apontado que as fitofisionomias do Cerrado são fragmentadas na área urbana e pouco dele resta no Plano Piloto, onde a vegetação é caracterizada por maioria de espécies exóticas (ZEE, 2012).

Outra função das áreas verdes prevista por Lucio Costa foi o cercamento das bordas da mancha urbana, proporcionando uma transição suavizada entre o edificado - não edificado, além da função de controle da expansão do Plano Piloto (PPCUB, s/d.). Os artifícios utilizados são diversos, a exemplo na Asa Sul foram implantados o Parque da Cidade e o Cemitério, separando-a da expansão prevista do Setor Sudoeste.

Esse carácter da transição entre edificado – não edificado, reforçou o papel da escala bucólica como elemento que também contribui com a estruturação da malha urbana do Plano Piloto e da identidade de cidade-parque, expressa no documento Brasília Revisitada. Já nos demais tipos morfológicos do DF, as áreas verdes não se verificam com tais funções e chegam até a serem exceção, tomando-se como exemplo a RA Itapoã e a RA Varjão.

3.1.7. RISCOS ECOLÓGICOS DO DISTRITO FEDERAL

O Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (ZEE), também chamado de Lei da Sustentabilidade do Distrito Federal, é o instrumento estratégico de planejamento e gestão ambiental territorial publicado em 2017. O ZEE orienta as políticas públicas distritais que buscam o desenvolvimento local sustentável através da compatibilização do desenvolvimento socioeconômico com os serviços ecossistêmicos considerando as presentes e futuras gerações.

Um ponto de acoragem importante do ZEE é a manutenção da capacidade de suporte ambiental do DF, medida pelos riscos ecológicos, a saber: 1) risco ecológico de

³¹ O Observatório Territorial é uma plataforma de indicadores da SEDUH – Secretaria de Estado de Desenvolvimento urbano e Habitação do Distrito Federal. O indicador baseia-se na área de cobertura vegetal arbórea e arbustiva no perímetro da ocupação urbana efetiva, entendida pela porção territorial com características urbanas, formal e informal, considerando lotes, vias, rodovias e suas faixas de domínio, áreas comuns, áreas livres, áreas verdes e parques urbanos.

perda de área de recarga de aquífero; 2) risco ecológico de perda de solo por erosão; 3) risco ecológico de contaminação do subsolo; 4) risco de perda de áreas remanescentes de Cerrado Nativo.

Assim, oficializa-se a problemática da infiltração de águas pluviais no solo, da redução do escoamento superficial e da perda de vegetação. Dentre os diagnósticos apresentados no ZEE (2017), foi demonstrado como a urbanização entre 2013 e 2019 suprimiu a vegetação nativa fora das unidades de conservação: 61% do cerrado remanescente suprimido foi substituído por uso urbano. Outro apontamento é que 59% do DF está em áreas de alto ou muito alto risco de contaminação do subsolo (ZEE, 2017). As áreas de médio e baixo risco são justamente aquelas com declividade menos propícia para ocupação urbana. Ainda, a maior parte da mancha urbana localiza-se em áreas de alto ou muito alto risco de perda de recarga de aquífero (ZEE, 2017).

A baixa infiltração de água no meio urbano pode levar à uma incapacidade em abastecer lençóis freáticos que possam servir como suprimento de água para abastecimento humano. A associação entre impermeabilização do solo e a supressão vegetal também se manifesta negativamente nas alterações dos microclimas e dos climas locais. A redução da umidade relativa do ar no meio urbano se desdobra na acentuação da amplitude térmica diária e no desconforto térmico urbano. Na escala da cidade, esses fatores colaboram para o efeito da ilha de calor urbana.

Logo, observa-se a importância das áreas verdes e dos recursos hídricos para a cidade. Presente desde a gênese do seu projeto, associada à identificação de escalas, à característica bucólica e à transição do edificado para o não-edificado, hoje o verde se orienta às questões universais relacionadas às mudanças climáticas e aos serviços ecossistêmicos em áreas naturais e urbana.

Em busca de garantias para a sustentabilidade em áreas urbanas, o ZEE indica a formulação de políticas públicas para adoção de tecnologias e qualificação dos padrões urbanos, com vistas a soluções baseadas na natureza para recarga de mananciais, redução da poluição, aumento do conforto térmico, redução das ilhas de calor e promoção da qualidade do ar.

3.2. CONTEXTO CLIMÁTICO DO DISTRITO FEDERAL

Pertence à categoria Aw na classificação climática internacional de Köppen e Geiger, ou seja, possui característica de verão chuvoso e mês mais frio com temperatura média superior a 18 °C. Apenas em uma pequena porção do extremo sul ocorre a tipologia Cwa – clima tropical, com chuva de verão e verão quente, sendo o mês mais frio com temperatura média entre 3 °C e 18 °C e o mês mais quente com temperatura média maior do que 22 °C (NASCIMENTO et al., 2017).

Já na classificação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), o DF apresenta o clima Tropical Brasil Central, quente e semi-úmido, com média de temperatura do ar maior que 18 °C em todos os meses e ocorrência de 4 a 5 meses secos. Apesar das classificações citadas serem frequentemente empregadas para sintetizar as características climáticas, compreende-se que tais metodologias tendem à generalização em um nível regional. Portanto, para os itens seguintes, compilou-se dados climatológicos e publicações com a temática do clima do DF, incluindo eventos extremos, ICU e mudanças climáticas.

3.2.1. DADOS CLIMATOLÓGICOS

Para a caracterização do clima do DF, foram utilizados como referências os dados das normais climatológicas do INMET (2022), obtidas por meio de médias de parâmetros meteorológicos, obedecendo aos critérios da Organização Meteorológica Mundial (OMM) para períodos padronizados de trinta anos. No DF, os dados climáticos começaram a ser registrados em 1961 e estão organizados em duas normais climatológicas: de 1961-1990 e 1981-2010.

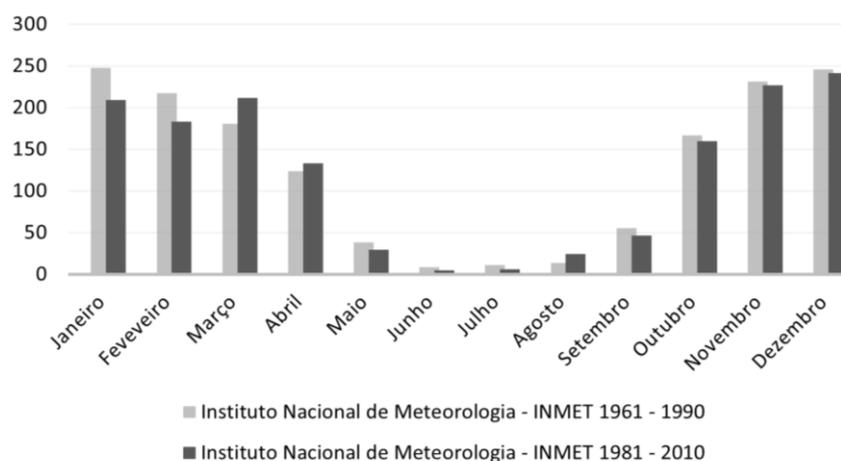
Para as análises, primeiramente resgata-se as características gerais da classificação do IBGE (2017) para o clima Tropical Brasil Central, o qual possui duas estações com características distintas:

- Temporada quente e úmida: verão;
- Temporada quente e seca: inverno.

Essas temporadas podem ser visualizadas através dos gráficos das normais climatológicas do INMET (Figura 33, Figura 34, Figura 36 e Figura 37), observando os baixos valores de pluviosidade entre os meses de maio até setembro. A temperatura média máxima ocorre em setembro com 28,30 °C e a temperatura média mínima em julho com 13 °C (1961-1990), aumentando seu valor para 13,90 °C no período de 1991-2010. A umidade relativa do ar média diminui na temporada de seca, atingindo valores médios abaixo de 50%, coincidindo com o período de temperaturas mais elevadas.

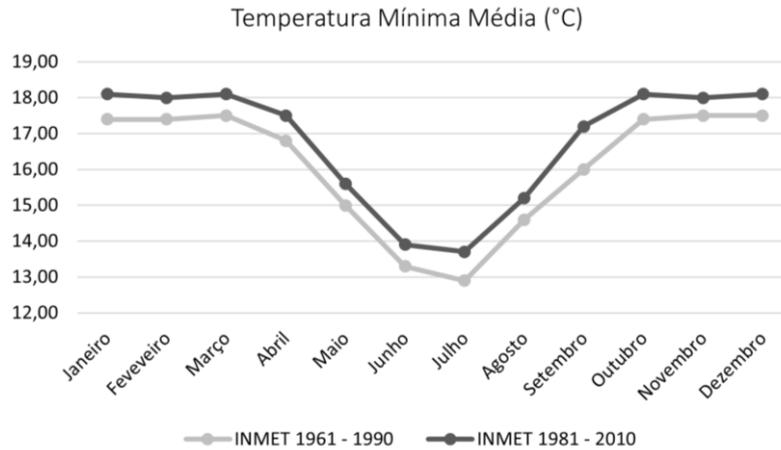
Comparando as duas normais climatológicas, observa-se a redução da precipitação acumulada na maioria dos meses, exceto março, abril e agosto (1981 – 2010: Figura 33). O maior destaque é o deslocamento da curva de temperatura mínima média da segunda normal climatológica (Figura 34), indicando o aumento dessa variável em todos os meses, chegando à maior diferença no mês de setembro, com o variação de 1,1°C. Também há alteração no mês de outubro com elevação da temperatura máxima média (Figura 36) e da temperatura média. Para a umidade do ar (Figura 37), o maior decréscimo foi observado em no mês de outubro, com variação de -3,20 pontos.

Figura 33. Gráfico comparativo de precipitação
Precipitação Acumulada (mm)



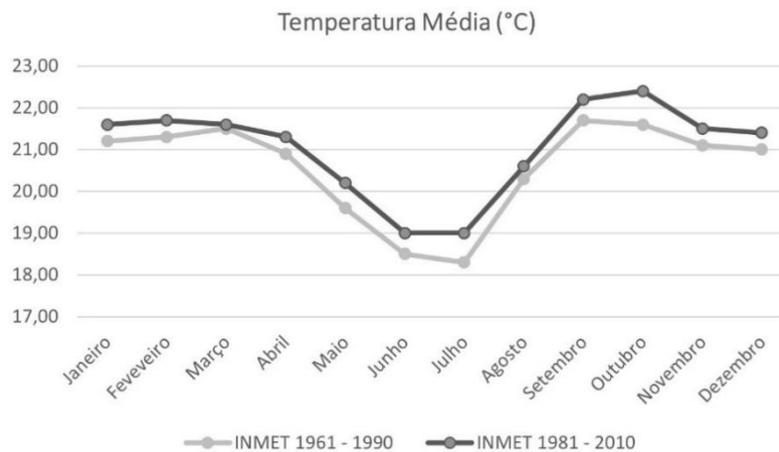
Fonte: Elaborado pela autora com dados do INMET.

Figura 34. Gráfico comparativo de temperatura mínima média.



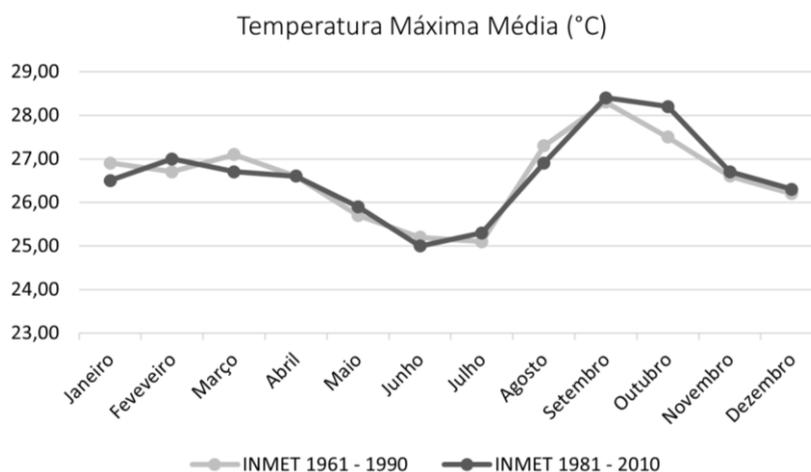
Fonte: Elaborado pela autora com dados do INMET.

Figura 35. Gráfico comparativo de temperatura média do ar.



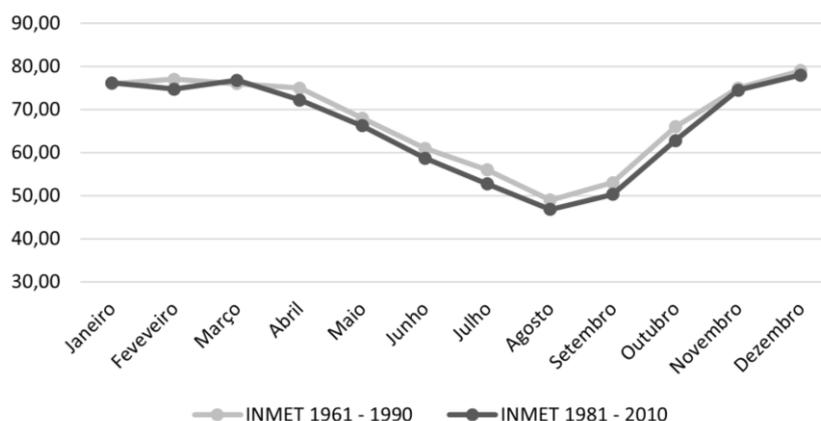
Fonte: Elaborado pela autora com dados do INMET.

Figura 36. Gráfico comparativo de temperatura máxima média.



Fonte: Elaborado pela autora com dados do INMET.

Figura 37. Gráfico comparativo das médias de umidade relativa do
Umidade Relativa (%)



Fonte: Elaborado pela autora com dados do INMET.

3.2.2. DADOS CLIMATOLÓGICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO PERÍODO DE ESTUDO

Para o ano de estudo, 2020, foram encontrados dados de cinco estações meteorológicas do INMET no DF: Brasília (Plano Piloto), Brazlândia, Águas Emendadas, Gama (Ponte Alta) e Paranoá. Com exceção da estação localizada no Plano Piloto, as demais estão em áreas rurais. A Tabela 1 apresenta uma síntese das principais variáveis climáticas em cada uma das estações.

O destaque é dado à Estação Águas Emendadas, situada no entorno da estação ecológica de mesmo nome, na RA Planaltina. Nesse ponto foram registrados o maior e o menor valor de temperatura do ar, às 14h (UTC -3) do dia 09 de setembro, e às 07h (UTC -3) do dia 14 de julho, respectivamente.

Tabela 1. Síntese das principais variáveis climáticas registradas nas Estações do INMET-DF para o ano de 2020. Para temperatura e umidade do ar, os valores são referentes aos registros horários máximos e mínimos.

ESTAÇÕES INMET - DF	TEMP. MÁX (°C)	TEMP. MIN (°C)	UMID. MÁX (%)	UMID. MIN (%)	VEL. VENTO MÉDIA ANUAL (M/S)	PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (MM)
BRASÍLIA	35,5	8,9	97	10	2,25	1576,6
BRAZLÂNDIA	35,2	11,4	96	10	2,26	2091,6
ÁGUAS EMENDADAS	37,7	6,4	96	10	1,89	1575,6
GAMA PONTE ALTA	36,2	6,9	95	10	2,18	1951,2
PARANOÁ COOP DF	36,3	9,2	100	15	2,27	2180,8

Fonte: Elaborado pela autora com dados do INMET.

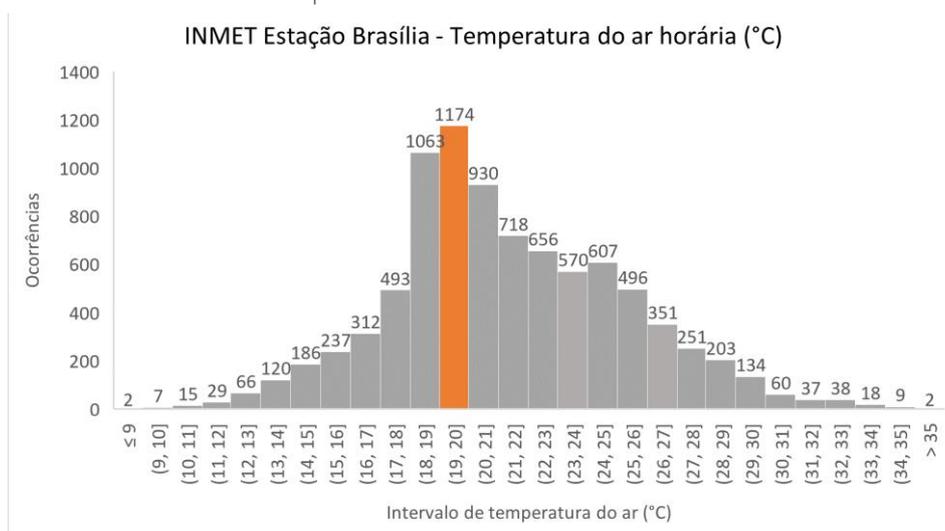
Os registros de elevadas temperaturas em Águas Emendadas, desde seu início em 2008, já renderam notícias nos jornais locais (CORREIO BRASILIENSE, s/d.), com explicações de especialistas sobre a influência da altitude, vegetação e vento no clima

local. Porém, para a sequência da caracterização climática, a fonte de dados principal será a Estação Brasília³², ativa desde 1961, localizada em área urbana.

Os registros horários de temperatura do ar foram tratados em um gráfico de distribuição de frequências na Figura 38. A distribuição foi definida com a largura do compartimento igual a 1, resultando em 28 agrupamentos a partir das observações dos valores mínimo e máximo da série de dados. Observa-se a maior frequência do intervalo de temperatura do ar entre 19 °C a 20 °C. Esses valores caracterizam o clima ameno do DF que, de acordo com a carta bioclimática da NBR 15220-333 (ABNT, 2005), possui a maioria das horas do ano na zona de conforto.

Esse intervalo de temperatura ocorre ao longo de todo ano, com sua frequência reduzida no mês de outubro, o que pode ser visualizado no gráfico de linhas da Figura 39. A distribuição dos dados segue o ritmo da última normal climatológica (Figura 36 e Figura 34) com os menores valores de temperatura do ar nos meses de maio, junho e julho, porém o mês de outubro registrou os maiores valores de temperatura, em vez do mês de setembro. Outra constatação é a amplitude térmica diária, que pode chegar em torno de 16 °C.

Figura 38. Histograma de temperatura do ar horária para o ano de 2020 com destaque para a classe de maior ocorrência.

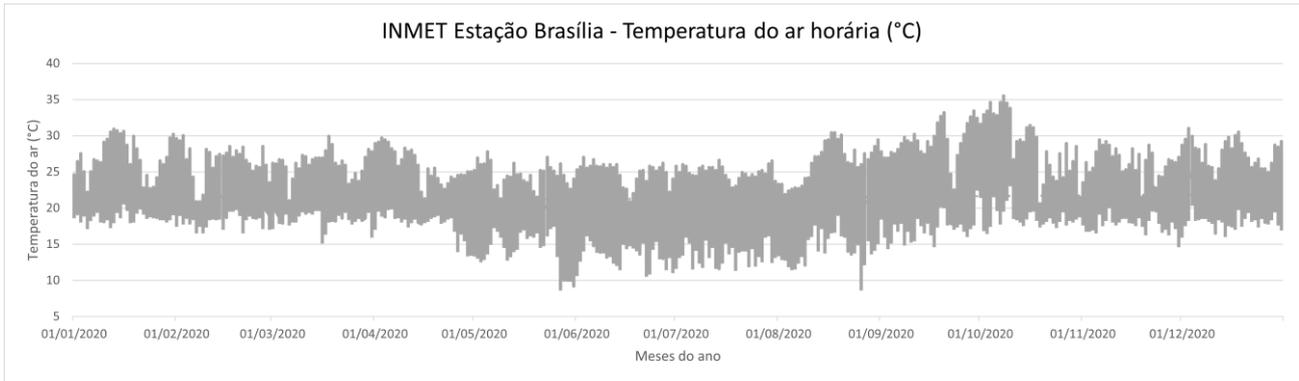


Fonte: Elaborado pela autora com dados do INMET.

³² Os dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar em estudo referem-se aos valores horários, não envolvendo as variáveis climáticas TEMPERATURA MÁXIMA NA HORA, TEMPERATURA MÍNIMA NA HORA, UMIDADE REL. MÁXIMA NA HORA ou UMIDADE REL. MÍNIMA NA HORA disponíveis no banco de dados do INMET de 2020.

³³ A NBR15220-3 estabelece o Zoneamento Bioclimático Brasileiro adotando-se uma carta bioclimática a partir da sugerida por Givoni em “Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines”. Energy and Building, 18 (1), 11-23, 1992.

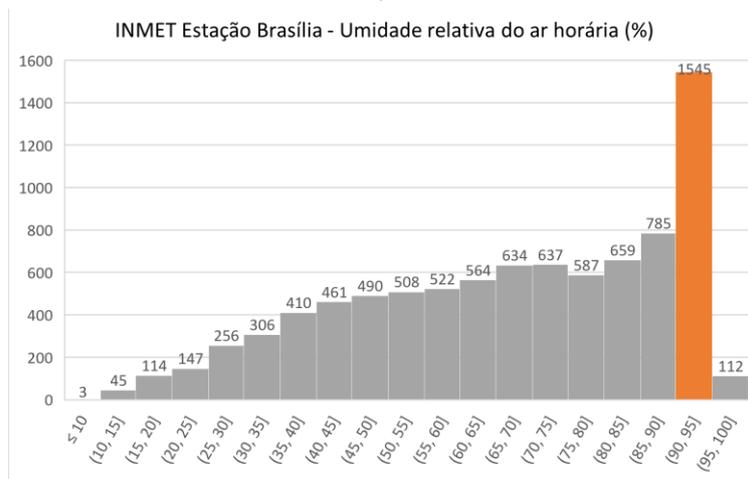
Figura 39. Gráfico de linhas dos dados de temperatura do ar registrados ao longo de 2020.



Fonte: Elaborado pela autora com dados do INMET.

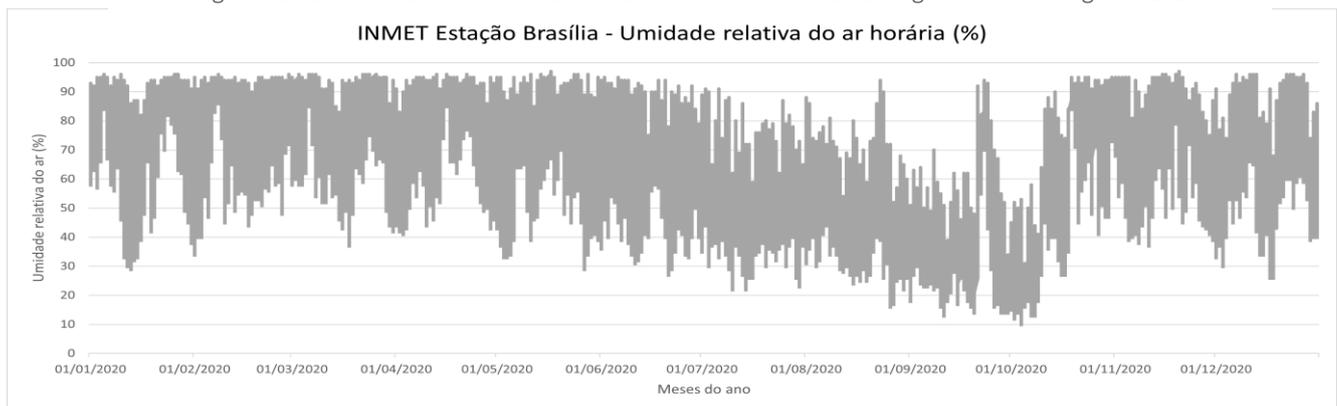
A série de dados de umidade relativa do ar foi descrita em um gráfico de distribuição de frequências na Figura 40, totalizado 8785 horas analisadas. A distribuição foi definida com largura do compartimento igual a 5 pontos, resultando em 19 agrupamentos a partir das observações dos valores mínimo e máximo da série de dados. Observa-se a maior frequência do intervalo de 90 – 95%. Os valores abaixo de 30% são mais frequentes na temporada quente-seca (Figura 41).

Figura 40. Histograma de umidade relativa do ar para o ano de 2020 com destaque para a faixa mais frequente.



Fonte: Elaborado pela autora com dados do INMET.

Figura 41. Gráfico de linhas dos dados de umidade relativa do ar registrados ao longo de 2020.



Fonte: Elaborado pela autora com dados do INMET.

A discussão sobre os níveis extremos de umidade no ar e sua relação com a saúde humana são geralmente atribuídos às recomendações da Organização Mundial da Saúde (WHO - sigla em inglês). Em uma publicação de 1988, a WHO atribuiu condições favoráveis para saúde na faixa de umidade relativa do ar entre 30 a 50%. Em níveis superiores a 65%, a incidência de doenças respiratórias e alergias podem aumentar. Já o nível de umidade abaixo de 20% podem induzir a secura, alergias ou coceira da pele e do sistema respiratório superior (WHO, 1988).

As recomendações da WHO se referem à qualidade do ar interno e contaminantes biológicos. Seguindo esse viés da saúde humana, em torno de 56% das horas da série de dados de 2020 apresentaram umidade relativa do ar acima de 65% e 18,98% das horas apresentaram valores entre 30 a 50%, condição mais favorável segundo a WHO (1988).

Já para a análise de degradação de fachadas de edificações no DF, Zanoni (2015) classificou como alto os valores de umidade relativa acima de 75% e pontuou que, na série de 2001 a 2013, em torno de 39% das horas analisadas atingiram esse posto. Para a série deste estudo, 41,98% das horas analisadas registraram valores acima de 75% de umidade relativa. Em ambos estudos, a faixa de frequência entre 90 a 95% é a mais alta.

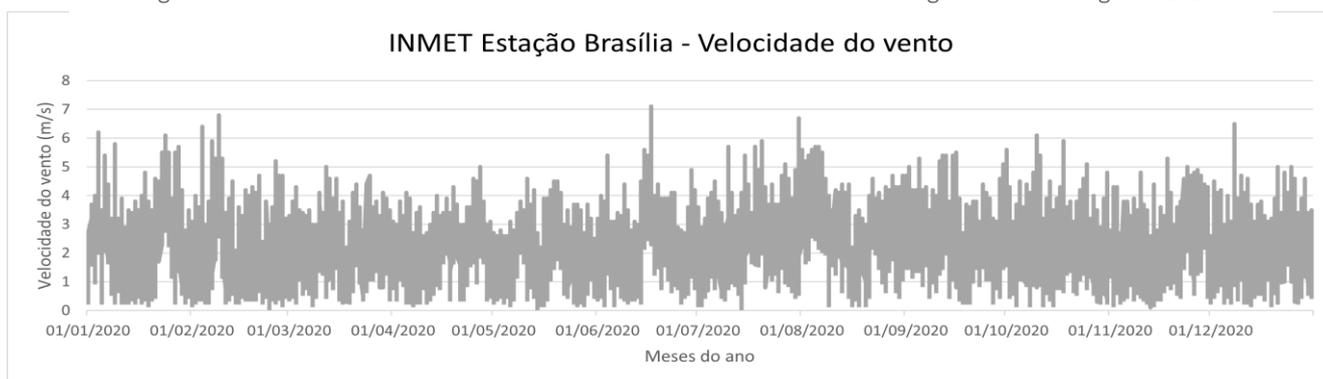
Para condição de alta taxa de umidade relativa, a velocidade do vento torna-se fundamental para favorecer o conforto térmico urbano. Porém, o vento é uma variável climática inconstante, influenciado por fatores da macroescala na formação dos ventos predominantes, enquanto que os fatores da mesoescala e da microescala influenciam os ventos locais (OKE et al., 2017).

A velocidade do vento aumenta exponencialmente com a altura devido à redução do atrito, conforme o fluxo de ar se distancia da superfície. Sendo assim, a velocidade do vento medida a 10 metros de altura (para fins meteorológicos como do INMET) será maior do que aquela medida a 2 metros de altura para fins de estudos na escala do pedestre.

Na série deste estudo, o valor máximo encontrado para a velocidade do vento foi de 7,1 m/s e a média anual foi de 2,25m/s e a direção predominante foi a Leste. O período de calmaria, importantes para a formação de ilha de calor urbana, foi classificado seguindo a escala Beaufort (INPE, s/d.), com velocidade de até 0,5 m/s, o que resulta em 3,67% dos registros. A distribuição de frequência da velocidade do vento e as ocorrências ao longo do ano podem ser visualizadas na Figura 42 e Figura 43.

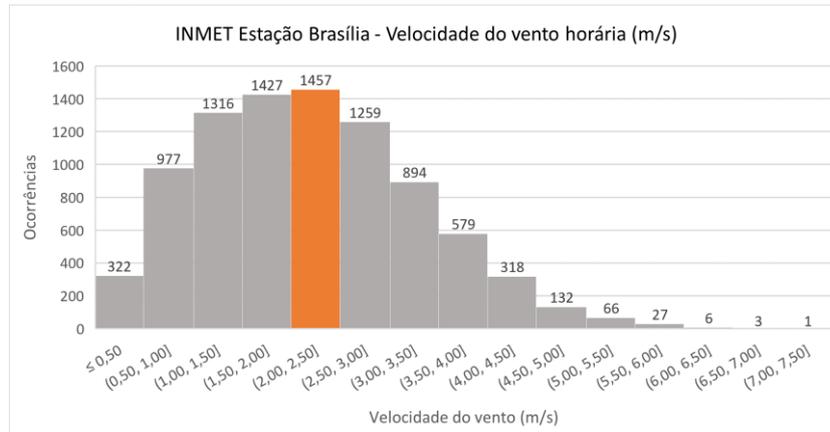
Demais estudos dentro do tema do clima urbano do DF são apresentados nos itens seguintes para complementar a sua caracterização e relacionar as variáveis climáticas com a urbanização.

Figura 42. Gráfico de linhas dos dados horários de velocidade do vento registrados ao longo de 2020.



Fonte: Elaborado pela autora com dados do INMET.

Figura 43. Histograma de velocidade do vento para o ano de 2020 com destaque para a faixa mais frequente.



Fonte: Elaborado pela autora com dados do INMET.

3.2.3. CAMPO TÉRMICO E ILHA DE CALOR URBANA

O clima urbano do DF foi investigado por pesquisadores de áreas como arquitetura e urbanismo, geografia, física ambiental, entre outras, utilizando principalmente métodos de simulação microclimática, transecto móvel e sensoriamento remoto (SR). A região administrativa de Sobradinho, por exemplo, foi local de estudo de um trabalho que combinou dados dos satélites Landsat e Ikonos para compreensão dos efeitos do fenômeno de ICU (BIAS; BAPTISTA; LOMBARDO, 2003). Os resultados mostraram variações de temperaturas de superfície intra-urbanas de até 9°C às 9:45h entre uma lagoa e o entorno com presença de grande área asfaltada, chamando atenção para o adensamento urbano e os materiais empregados na construção civil.

O estudo de Castelo Branco (2009) analisou os microclimas de uma superquadra da capital com foco na vegetação urbana, utilizando simulações microclimáticas. Medições em campo foram realizadas tomando como referência os meses de setembro de 2008 e janeiro de 2009 para caracterizar o período quente-seco e quente-úmido da cidade. Foram analisados três pontos com percentuais diferentes de vegetação e relação W/H e as análises apontaram a importância da vegetação e seu potencial de arrefecimento em relação à temperatura do ar entre os pontos estudados.

Baptista (2010) analisou a evolução da temperatura no Distrito Federal por meio de imagens termais com o sensor TM5 do Landsat nos anos de 1984 e 2001 e análise estatística. O pesquisador observou na comparação desses anos um aumento médio de 2°C da temperatura de superfície e salientou que a relação entre o aumento de temperatura e o crescimento urbano é verificada em diversas áreas do Distrito Federal.

A pesquisa de Silva (2016) se apoiou no monitoramento com transecto móvel para caracterização climática do Plano Piloto, sob o aspecto geográfico. Os resultados atestaram a ocorrência de diferentes respostas de umidade relativa do ar e temperatura do ar na cidade durante o período analisado, indicando microclimas heterogêneos.

Vianna (2018) estudou as relações entre os tipos de materiais de superfície, as temperaturas e a morfologia urbana no processo de formação das ilhas de calor com apoio de sensoriamento remoto. Verificou-se que as áreas mais aquecidas incluem regiões mais adensadas, áreas de solo exposto e coberturas de solo com vegetação rasteira seca em áreas pouco adensadas ou mesmo não ocupadas.

As correlações estatísticas entre materiais e temperaturas de superfície foram classificadas como fortes e ascendentes: no Plano Piloto foram em média de 0,94 em agosto e de 0,90 em fevereiro e nas áreas das Regiões Administrativas em média de 0,89 em agosto e de 0,80 em fevereiro (VIANNA, 2018). Já para as correlações entre temperaturas de superfície e morfologia por meio do fator W/H (largura/altura) em cânions urbanos, os resultados são: 0,94 em agosto e 0,65 em fevereiro (VIANNA, 2018).

Também em 2018, Werneck (2018) investigou áreas destinadas ao comércio local de Brasília com enfoque na mitigação de ICU de superfície, simulando cenários com emprego de materiais frios e vegetação. A simulação microclimática possibilitou uma análise quantitativa do impacto dessas ações na variação da temperatura do ar, temperatura de superfície e temperatura média radiante, destacando o efeito de estratégias combinadas de materiais frios e vegetação.

Em Monteiro (2020), apoiado por técnicas de SR, verificou-se a intensidade de 3,869 °C na ICU noturna de superfície no DF, valor médio para a temporada da seca (julho, agosto e setembro) entre os anos de 2000 a 2016. O estudo compara ICU entre metrópoles brasileiras, onde Curitiba e Brasília registraram as maiores intensidades de ICU, acima de 3 °C, seguidas por São Paulo, Rio de Janeiro e Vitória, com valores entre 2,5 °C e 3 °C (MONTEIRO, 2020).

Por ter um carácter de alta variabilidade, a intensidade da ICU pode apresentar diferentes valores de acordo com o método e resolução (temporal e espacial) de análise. O *Global Surface UHI Explorer*³⁴, um aplicativo de monitoramento de ICU para a plataforma *Google Earth Engine*, utiliza um algoritmo com resolução de 1x1 km que combina dados de temperatura de superfície dos sensores MODIS TERRA e AQUA (CHAKRABORTY e LEE, 2019).

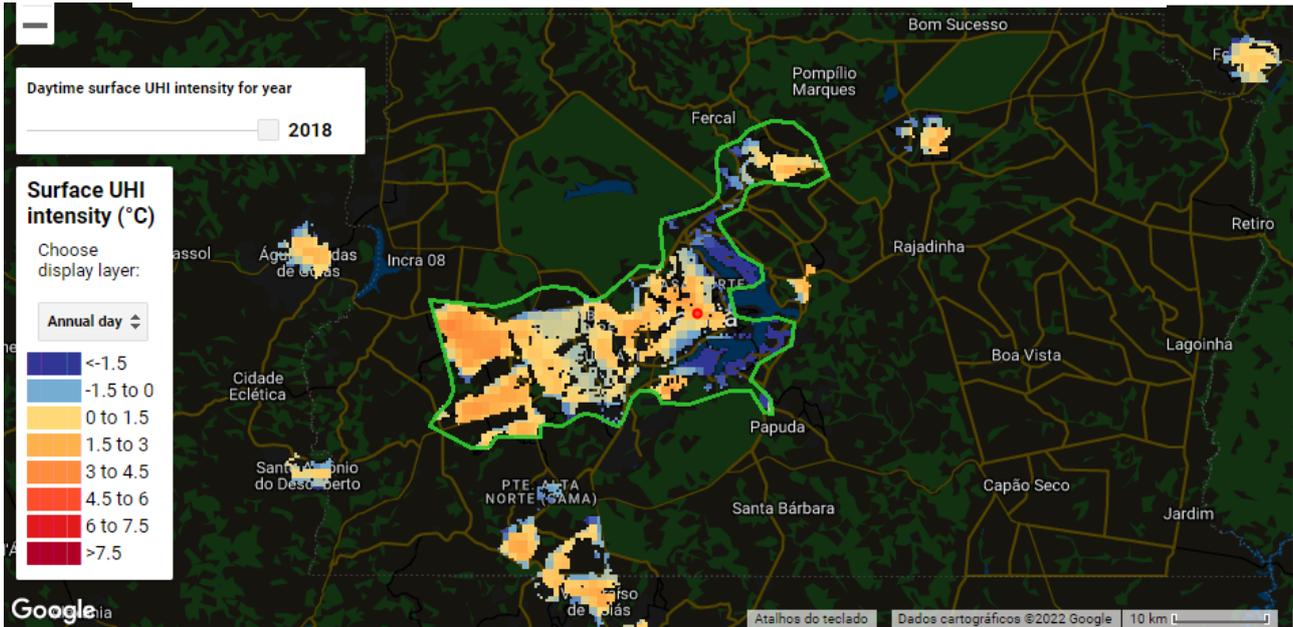
O *UHI Explorer* se baseia na delimitação de aglomerados urbanos por enfrentar dificuldade para delinear a área urbana das cidades. A série de dados disponível parte de 2003 até 2018. O aglomerado que melhor engloba o DF pode ser visto na Figura 44. As métricas para a série de 2003 a 2018 estão relacionadas abaixo e na Figura 45 e Figura 46, onde demonstrou-se maiores valores para ICU diurna (anual e verão) e noturna (inverno):

- ICU diurna anual: 0,86 °C
- ICU noturna anual: 0,67 °C
- ICU diurna verão: 1,37 °C
- ICU noturna verão: 0,56 °C
- ICU diurna inverno: 0,48 °C
- ICU noturna inverno: 0,75 °C

Os autores do aplicativo discutem o diferencial da vegetação no espaço urbano e rural, apontando seu protagonismo no controle da variabilidade da intensidade da ICU, tanto espacial quanto temporal, devido à influência da época da seca e da chuva no sombreamento e evapotranspiração (CHAKRABORTY e LEE, 2019). Valores altos de ICU noturno também estão relacionados com a habilidade de resfriamento da área urbana e do seu entorno, pois a intensidade da ICU resulta dessa diferença de temperatura (OKE et al., 2017; MASSON, 2018).

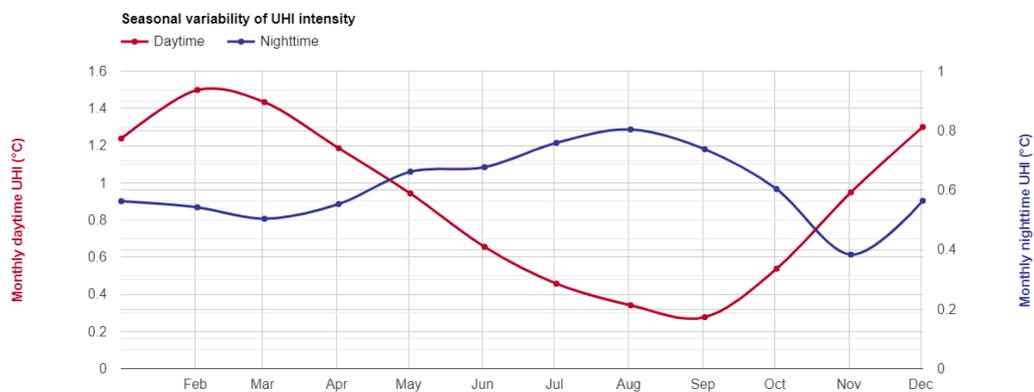
³⁴ Disponível em: <https://yceo.yale.edu/research/global-surface-uhi-explorer>

Figura 44. Intensidade da ICU diurna para o ano de 2018.



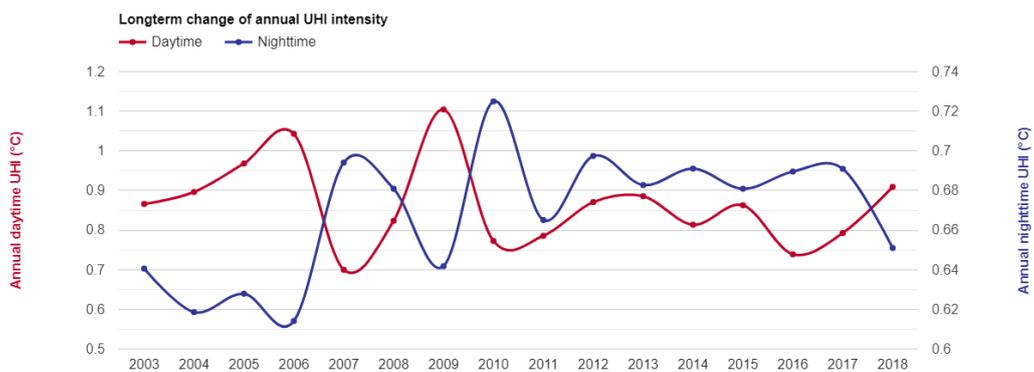
Fonte: Global Surface UHI Explorer, 2019.

Figura 45. Variabilidade sazonal da intensidade da ICU.



Fonte: Global Surface UHI Explorer, 2019.

Figura 46. Mudança anual da intensidade da ICU.



Fonte: Global Surface UHI Explorer, 2019.

Sendo assim, a ampliação dos estudos sobre o campo térmico da cidade é necessária, conforme atesta o Plano Plano de Adaptação aos Efeitos Adversos da

Mudança Global do Clima para Reduzir as Vulnerabilidades e Ampliar a Adaptação no Distrito Federal (SEMA-DF, 2021). Esse plano enfatiza a incorporação da dimensão climática nos instrumentos urbanísticos.

Diversos estudos governamentais investigaram a vulnerabilidade do DF frente à variabilidade climática e mudança global do clima, que serão discutidos adiante, e ressaltaram os impactos para os recursos hídricos (ZEE, 2012; SEMA-DF, 2016, 2021; ANA, 2017). A Agência Nacional de Águas (ANA, 2017) incluiu o DF no âmbito das cidades brasileiras com alta vulnerabilidade hídrica e que necessitam de novas soluções para a produção de água, o que afeta o consumo humano e a produção agropecuária.

Essa questão implica na forma como pensamos a contribuição da arquitetura e urbanismo para favorecer a qualidade de vida e sustentabilidade no ambiente urbano. A crescente impermeabilização do solo urbano e supressão da vegetação influenciam o ciclo hidrológico por meio da redução da infiltração da água no solo e aumento do escoamento superficial, além de favorecer os efeitos de ilha de calor urbana. O aquecimento urbano e a ICU, na escala local, podem ser exacerbados por eventos climáticos extremos, como a onda de calor, e pelas mudanças do clima, seja regional ou global (IPCC, 2021; KHAN et al, 2021).

3.2.4. EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As cidades têm sido alvo de preocupações ecológicas, ambientais, culturais, históricas e socioeconômicas por entender que a lógica atual do sistema econômico e do crescimento urbano vai contra as previsões futuras de escassez de recursos naturais, perda de biodiversidade e mudanças climáticas. Logo, a discussão do papel da urbanização na intensificação do aquecimento local foi ratificada na recente publicação do IPCC (2021).

Logo, percebe-se que o conhecimento não só da classificação climática da região, mas também a sua variabilidade e acompanhamento dos efeitos das ações antrópicas são primordiais para o direcionamento das decisões do planejamento urbano e regional. Assim, pontua-se nos tópicos seguintes uma breve discussão sobre eventos climáticos extremos e mudanças climáticas no DF.

Eventos climáticos extremos

Um dos eventos extremos mais conhecidos é a onda de calor. É um fenômeno regional que ocorre devido eventos de calor que duram três ou mais dias consecutivos, tipicamente atribuído a sistemas de alta pressão estagnados em grande escala, trazendo ar quente da troposfera e induzindo altas temperaturas em áreas urbanas (KHAN et al, 2021).

Já o aquecimento urbano é um evento na escala local. Porém, quando combinado com a onda de calor, tem impactos no consumo de energia, economia, meio ambiente e na saúde humana, podendo causar mortalidade e hospitalização (MASSON, 2018; SANTAMOURIS, 2020).

Geirinhas et al. (2017) confirmaram esse alarme em um estudo de caracterização climática e sinótica de ondas de calor em seis capitais brasileiras entre 1979 e 2014, incluindo Brasília. Nesse estudo destacaram que Brasília foi a cidade que apresentou ondas de calor mais longas, com duração de 20,5 dias/ano. É necessário maior acompanhamento desse fenômeno. Em especial para a adoção de medidas para adaptação

e mitigação dos possíveis danos à população e ao meio ambiente no DF (ROMERO et al, 2019).

Mudanças climáticas

O Painel Distrital de Mudanças Climáticas da SEMA-DF lançou em novembro de 2016 uma nota técnica dirigida aos formuladores de políticas públicas intitulada “Mudanças Climáticas no Distrito Federal e RIDE - Detecção e Projeções de Mudanças Climáticas para o Distrito Federal e Região de Desenvolvimento Integrado do Distrito Federal e Entorno (RIDE)”. O relatório menciona registros de ondas de calor que alarmaram os brasilienses quando os termômetros marcavam 40 °C em algumas partes do DF, além de alagamentos e inundações por eventos extremos de chuva.

As projeções da mudança do clima para o DF foram realizadas para os períodos de 2011 a 2040, de 2041 a 2070 e de 2071 a 2099, tomando o período entre os anos de 1961 a 1990, como clima de referência. As análises se basearam nos resultados de regionalização pelo Modelo regional Eta 20 km das condições de quatro modelos globais (BESM, CanESM2, HadGEM2-ES e MIROC5) e do Modelo Eta a 5 km das condições do modelo HadGEM2-ES.

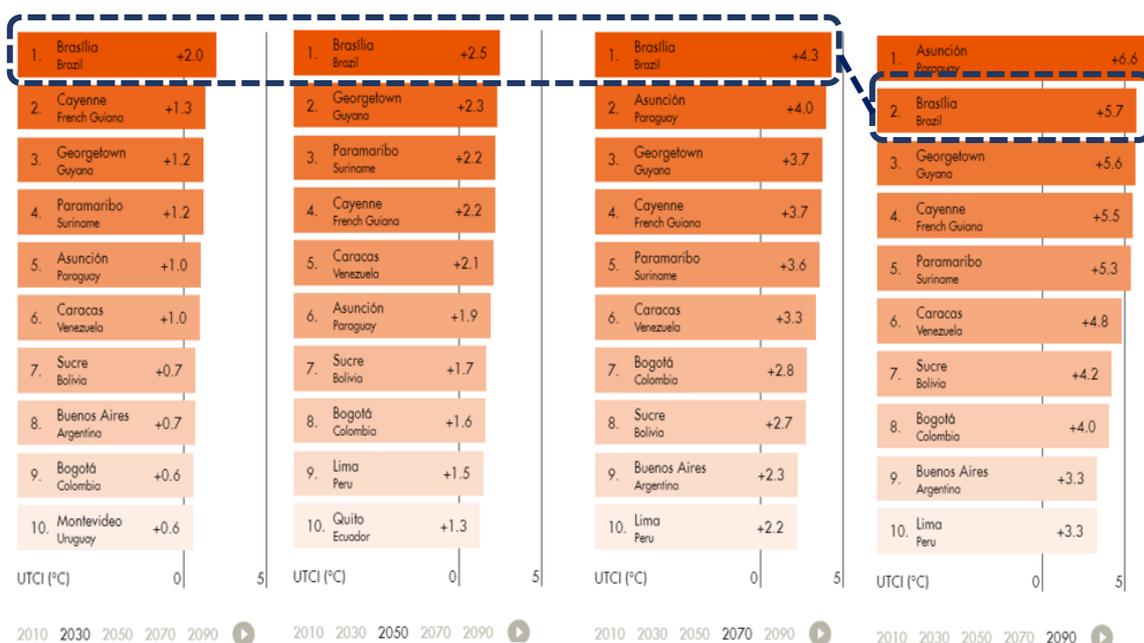
Foram considerados nas análises dois níveis de emissão dos gases de efeito estufa, níveis moderado e alto (*business as usual*): RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente. Esse relatório também trouxe uma análise retroativa de uma série de 50 anos. Em suma, os resultados principais indicam (SEMA-DF, 2016):

- Número de dias com umidade relativa do ar abaixo de 30% aumentou de 24 dias/ano, no início da série, para mais de 50 dias/ano, no final da série de 50 anos;
- Acréscimo de 1,85 °C na temperatura mínima média;
- Acréscimo de 2,10 °C na temperatura máxima média;
- Tendência de redução da amplitude térmica em todos os cenários de projeção;
- No período de 2011-2040, o aumento de temperatura do ar (2m) projetado varia desde 1°C a cerca de 3°C. No final do século XXI, a elevação da temperatura do ar deve variar deste 2°C a cerca de 6°C.

É sabido que as pessoas possuem uma capacidade de adaptação ao clima, e essa varia de acordo com fatores como a localização geográfica. Para monitoramento do estresse térmico ao qual os habitantes das cidades estão sujeitos, é comum a utilização de índices de conforto térmico urbano. Nesse sentido, o portal Lobelia Earth acompanha como capitais e populações sofrerão com o estresse térmico, tendo 2010 como ano base de referência e projeções que vão até 2090. O índice utilizado para a ranqueamento é o UTCI - Índice Climático Universal, que considera não apenas a temperatura do ar, mas também a umidade, vento e radiação, todos os fatores que afetam o conforto humano.

Para calcular os valores futuros do UTCI, o portal utilizou projeções climáticas CMIP5 do modelo ACCESS1-0, sob o cenário socioeconômico RCP8.5. As posições do ranqueamento são calculadas observando diferentes meses do ano e horas do dia em que o índice UTCI pode atingir valores máximos ou mínimos. Dentre as capitais sul-americanas, Brasília lidera entre o período de 2030 a 2070 como a capital com maior incremento na escala de estresse térmico (Figura 47). No ranqueamento de maiores índices de estresse térmico dessas capitais, Brasília ocupa o sexto posto.

Figura 47. Ranqueamento das projeções das maiores alterações do UCI, referente ao mês de julho.



Fonte: Lobelia Earth, 2021.

3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram analisados dois tópicos fundamentais para a tese: morfologia urbana e contexto climático do DF. Como a cidade originou-se de um projeto urbanístico moderno, buscou-se os antecedentes da história do modernismo que pudessem indicar como se pensava a forma urbana e quais as preocupações do planejamento urbano da época. Então percebe-se um impacto da forma urbana modernista do Plano Piloto tem sinergia com a climatologia, especificamente no desenho dos espaços abertos, que facilitam a ventilação e insolação, ao contrário das cidades tradicionais.

Não que Lucio Costa mencionasse esses aspectos no seu relatório do Plano Piloto, mas a saúde foi uma preocupação recorrente nos discursos dos arquitetos modernistas. Fato ressaltado por Gropius, corroborando com as intenções da carta de Atenas: “as pré-condições indispensáveis para o vingar sadio do homem são, afora nutrição e aquecimento suficientes, luz, ar e liberdade de movimento” (GROPIUS, 1974, p. 160).

Nas observações da Missão Cruls para o local da nova cidade houve uma preocupação com o clima e recursos naturais. O que se questiona é como, ao longo dos 60 anos da capital, essa preocupação pode ser transferida para o projeto arquitetônico e urbanístico. Não se usava o termo sustentabilidade, resiliência urbana ou climática na época do projeto de Brasília, mas é comum encontrar entre os autores consultados a preocupação com o crescimento das cidades e do futuro urbano em relação ao bem estar da população que crescia rapidamente.

A preocupação de Lucio Costa com a forma e função da cidade, trazidas de vários modelos conceituais, era notória e, na sua visão, Brasília deveria permanecer uma cidade político-administrativa, não interessando sua transformação em uma grande metrópole. As novas unidades de vizinhança deveriam ser um diferencial entre Brasília

e as demais cidades brasileiras. O que merece atenção no estudo da sua resposta térmica comparando com outros tipos mórficos que surgiram posteriormente na expansão do DF e que mais se assemelham às demais cidades brasileiras.

Mas, com o rápido crescimento, grilagem, entre outros processos onde a ocupação das terras ocorre antes do seu planejamento, Brasília agora possui 33 regiões administrativas. Essas consistem em um mosaico de diferentes tipologias, densidades e infraestrutura, ocupando áreas predominantemente de baixa declividade e que, em conjunto, resultam em uma forma urbana dispersa. Tal fato leva a uma discussão sobre seu delineamento no espaço físico para o próximo capítulo, importante para separar a área urbana das áreas rural e natural.

Essa última, utilizada como um dos elementos estruturadores do desenho de Lucio Costa, ganha ainda mais relevância frente aos atuais desafios para reestruturação de ecossistemas, biodiversidade, adaptação e mitigação às mudanças do clima. Trabalhos acadêmicos corroboram com o entendimento dos impactos negativos do avanço das intervenções antrópicas no território do DF para o risco de perda do Cerrado e para os benefícios da implantação de uma trama verde e azul interligando infraestruturas verdes e azuis, em diversas escalas.

Fechando com o contexto climático, apreendeu-se a necessidade de analisar as respostas térmicas das LCZ não apenas com as médias anuais dos índices espectrais, mas também de acordo com as médias das temporadas seca e úmida. O regime pluviométrico afeta a umidade relativa do ar e a atividade fotosintética da vegetação, importante para o índice de vegetação EVI a ser utilizado. Por mais que DF seja conhecido por baixas taxas de umidade relativa do ar, ao longo do ano as faixas com valores acima de 65% de umidade relativa são as mais frequentes.

Diante do que foi visto, Brasília se originou de um desenho urbano disposto à equalizar as quatro funções designadas à uma cidade moderna: moradia, circulação, trabalho e lazer. Depois de 60 anos de expansão, enfrenta problemas já bastante documentados desde o século passado, como muitas cidades no mundo, onde a urbanização está dissociada de preocupações climáticas. Assim, essa revisão de literatura sobre o DF fecha a primeira parte da tese recolhendo informações para serem integradas às análises sobre morfologia e aquecimento urbano a serem apresentadas na segunda parte.

REFERÊNCIAS

- Arquivo Público do Distrito Federal. História do Lago Paranoá. Disponível em: <https://www.arquivopublico.df.gov.br/lago-paranoa/>
- Banham, R. The architecture of the well-tempered environment. London: The Architectural Press/Chicago: The University of Chicago Press, 1969.
- Barber, D. A. Le Corbusier, the brise-soleil, and the socio-climatic project of modern architecture, 1929-1963. *Thresholds*, no. 40, 2012, p. 21–32. Disponível em: www.jstor.org/stable/43884894.
- Barber, D. A. Modern architecture and climate: design before air conditioning. Princeton: Princeton University Press, 2020.
- Bertran, P. História técnica: O Distrito Federal. In: Couto, Ronaldo, et. al. (org.). Brasília: uma economia forte num meio frágil. Brasília: Cadernos Codeplan, 1992.

- Brasil. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei Nº 12.651 de 25 de maio de 2012. Brasília, 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm
- Carpintero, A. C. C. Brasília: Prática e Teoria Urbanística no Brasil, 1956 – 1998. (Tese de Doutorado). FAU-USP, São Paulo, 1998.
- Chakraborty, T., Lee, X. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 74, 269-280, 2019.
- Chelotti, G. e Sano, E. Sessenta anos de ocupação urbana da capital do Brasil: padrões, vetores e impactos na paisagem. Texto para Discussão - n.º 73/janeiro-2021 – Codeplan.
- Chiri, G. e Giovagnorio, I. Gaetano Vinaccia's (1881–1971) Theoretical Work on the Relationship between Microclimate and Urban Design. *Sustainability*, MDPI, Open Access Journal, vol. 7, 2015, p. 1-26.
- CODEPLAN – COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL. Nota Técnica: Região Metropolitana Do Distrito Federal - Subsídios Técnicos Para A Sua Criação. Brasília: CODEPLAN, 2019.
- Denzer, A. Modern Architecture and Theories of Solar Orientation. *SOLAR 2014: 43rd ASES National Solar Conference*. ASES Proceedings, 2014, p. 412 – 419.
- Distrito Federal. Decreto Nº 10.829 de 14 de outubro de 1987. Brasília, 1987.
- Distrito Federal. Lei Complementar Nº 961 de 26 de dezembro de 2019. Brasília, 2019. http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/7d2ebc105ad04d3aa8c83989ab6b389a/Lei_Complementar_961_26_12_2019.html
- Doxiadis, C. A. On Linear Cities. *The Town Planning Review*, vol. 38, no. 1, 1967, p. 35–42. Disponível em: www.jstor.org/stable/40079669. Acesso em: 12 Aug. 2021.
- Geiger, R. *The Climate Near the Ground*. Tradução da 2. ed. Das Klima der Bodennahen Luftschicht. Cambridge: Harvard University Press, 1950.
- Goodwin, P., 1943. *Brazil Builds – Architecture New and Old 1652 – 1942*. New York: Museum of Modern Art, MoMa.
- Graeff, E. A. *O Edifício*. Cadernos Brasileiros de Arquitetura. São Paulo: Projeto, 1978.
- Gropius, W. *Bauhaus: Nova arquitetura*. 2. ed. São Paulo: Perspectiva, 1974.
- Hebbert, M. e Mackillop, F. Urban climatology and knowledge circulation failure. *Int J Urban Reg Res*, 37: p. 1542-1558, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1468-2427.12046>
- Holanda, F. Brasília: da Carta de Atenas à Cidade dos Muros. *Anais do V DOCOMOMO*. São Carlos, 2003.
- Holanda, F. Brasília – cidade moderna, cidade eterna. Brasília: FAU UnB, 2010.
- Howard, E. *Garden cities of to-morrow*. London: Swan Sonnenschein & Co., Ltd. Paternoster Square, 1902.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Regiões de Influência das Cidades: 2018. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.
- IBRAM – INSTITUTO BRASÍLIA AMBIENTAL. Projeto MAPEAR : os parques do Distrito Federal. Gerência de Monitoramento da Qualidade Ambiental e Gestão dos Recursos Hídricos. Brasília, DF : IBRAM, 2012.
- IBRAM – INSTITUTO BRASÍLIA AMBIENTAL. Guia de Parques do Distrito Federal / Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. Brasília, DF: IBRAM, 2013.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MassonDelmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Jatobá, S. Densidades urbanas nas Regiões Administrativas do Distrito Federal. Texto para Discussão TD - n.º 22 (2017). Brasília: Companhia de Planejamento do Distrito Federal, 2017.

- Disponível em: http://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/TD_22_Densidades_Urbanas_nas_Regi%C3%B5es_Administrativas_DF.pdf
- Kohlsdorf, M. E. As Imagens de Brasília. In: Paviani, A (org.). Brasília, Ideologia e Realidade: o espaço urbano em questão. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 2ª ed., 2010.
- _____. Brasília, Mosaico Morfológico. Anais do IV Seminário sobre História da Cidade e do Urbanismo. Rio de Janeiro: PROURB / Faculdade de Arquitetura e Urbanismo-UFRJ, 1996, pp. 680-687. Disponível em: <http://xvishcu.arq.ufba.br/anais-iv-shcu/>
- Kratzer, A. The climate of cities (Das Stadtklima). Traduzido por American Meteorological Society. Boston, MA, 1962. Republicado digitalmente pela International Association for Urban Climate. Disponível em: <http://www.urban-climate.org/resources/classic-texts/>
- Le Corbusier. A Carta de Atenas (versão de Le Corbusier: tradução de Rebecca Sherer). São Paulo: HUCITEC EDUSP, 1993.
- Le Corbusier. The City of Tomorrow. 3. ed. London: The Architectural Press, 1971.
- Lucio Costa – A vision of the future – part 2. Roteiro: Altamir Tojal. Produção: Luciana Motta. 1991. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=zV36nZWxsNQ>. Acesso em: 18 de janeiro de 2021.
- Masson, V. Impacts of Global Changes in Cities. In Dellasala, D., Goldstein, M. In: Encyclopedia of the Anthropocene. Oxford (UK): Elsevier, 2018.
- Monteiro, Felipe Ferreira. Ilha de calor urbana e sua influência na microfísica de nuvens em metrópoles brasileiras. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-graduação em Ciências Climáticas. Natal, 2020.
- Mumford, E. Designing the modern city: urbanism since 1850. New Haven: Yale University Press, 2018.
- Mumford, E. (ed). The Writings of Josep Lluís Sert. New Haven: Yale University Press, Cambridge, MA e Harvard Graduate School of Design, 2015.
- Nascimento, D.; Oliveira, I.; Luiz, G. Panorama dos sistemas de classificação climática e as diferentes tipologias climáticas referentes ao estado de Goiás e ao Distrito Federal/Brasil. *Élisée - Revista de Geografia da UEG*, v. 5, n. 2, p. 59-86, 2017.
- Nucci, J. C. Qualidade ambiental e adensamento urbano: um estudo de Ecologia e Planejamento da Paisagem aplicado ao distrito de Santa Cecília (MSP). São Paulo: Humanitas / FFLCH-USP, 2008. Disponível em: <https://tgpusp.files.wordpress.com/2018/05/qualidade-ambiental-e-adensamento-urbano-nucci-2008.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2020.
- Oke, T.R.; Mills, G.; Cristen, A. e Voogt, J. Urban Climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- Panerai, P. Análise Urbana. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2014.
- Paviani, A. (org). Brasília, ideologia e realidade: espaço urbano em questão. 2ª ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2010.
- Ribeiro, J. F.; Walter, B. M. T. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (Ed.). Cerrado: ecologia e flora. v. 2. Brasília: EMBRAPA-CERRADOS, 2008. 876 p.
- Sampaio, A. H. L. (outras) Cartas de Atenas: com textos originais. Salvador: Quarteto Editora/PPG AU, Faculdade de Arquitetura da UFBA, 2001.
- Santamouris, M., 2020. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy Build.* 207, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>.
- SEDUH – SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO URBANO E HABITAÇÃO. Observatório Territorial. Cobertura arbórea-arbustiva urbana. Disponível em: <http://www.observatorioterritorial.seduh.df.gov.br/cobertura-arborea-arbustiva-urbana/>. Acesso em: 13 de ago. 2021.

- Sert, J. L. Can our cities survive? An ABC of urban problems, their analysis, their solutions. London: Oxford University Press, 1944.
- Stewart, I. Why should urban heat island researchers study history? Urban Climate, vol. 30, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100484>.
- WHO. World Health Organization. Indoor air quality: biological contaminants. Report on a WHO meeting. Rautavaara, 29 August -2 September, 1988. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/260557/9789289011228-eng.pdf?sequence=3> . Último acesso em 23 de janeiro de 2022.
- Zanoni, Vanda Alice Garcia. Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília. 2015. xviii, 293 f., il. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo)—Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

Páginas da internet:

- <https://www.architectural-review.com/essays/building-brazil-from-the-cariocas-to-the-paulistas-to-the-now>
- https://assets.moma.org/documents/moma_catalogue_2304_300061982.pdf?_ga=2.135367793.154145242.1616713877-536716913.1616713877
- https://utci.lobelia.earth/ranking?v=top_utcimax&z=south_america
- https://www.sema.df.gov.br/wp-conteudo/uploads/2021/02/Texto-Consulta-Publica-2021-Plano-de-Adaptacao-Distrito-Federal_publicado.pdf
- <https://www.correiobrasiliense.com.br/cidades-df/2020/10/4881384-os-extremos-de-aguas-emendadas.html>
- <https://www.ipea.gov.br/ipeageo/malhas.html>
- <https://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/beaufort.html>
- <https://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml#b>

Parte 2

4.

CLASSIFICAÇÃO DA PAISAGEM URBANA

MAPEANDO AS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS DO DISTRITO FEDERAL

INTRODUÇÃO

Os efeitos urbanos sobre o clima local demandam o conhecimento da morfologia da cidade. De acordo com a literatura revista no Capítulo 2 sobre clima urbano, as comparações entre a área urbana e a rural, ou natural, foram a base para os estudos tradicionais de climatologia urbana. Percebe-se facilmente essas diferenças nas superfícies que definem essas áreas, assim como no seu uso e ocupação.

Na cidade, por exemplo, temos a geração de calor proveniente dos veículos, indústrias e dos edifícios que são lançados na atmosfera urbana e modificam os ciclos de temperatura, umidade e regime de ventos. Tais modificações não acontecem com o mesmo impacto na área rural.

Portanto, parte-se do referencial de que a simples distinção entre o urbano e o rural/natural não é suficiente para descrever o campo térmico urbano. Na procura pelo entendimento das diferenças intra-urbanas, este Capítulo tem como objetivo a aplicação do sistema de classificação de zonas climáticas locais (será utilizada a sigla em inglês: LCZs) para a área urbana do Distrito Federal.

Os procedimentos metodológicos contaram com o protocolo de mapeamento digital do WUDAPT – nível 0. O projeto completo do WUDAPT conta com três níveis, desde o nível da cidade, com o mapeamento de LCZs, passando pelo detalhamento da escala da vizinhança com informações como temperatura média radiante e CO₂, chegando até o nível do edifício (CHING et al., 2018). Os níveis 1 e 2 ainda estão em desenvolvimento.

O protocolo WUDAPT para o mapeamento de LCZs é baseado em imagens satelitais e, desde 2021 conta com a ferramenta de classificação supervisionada chamada *LCZ Generator*. A rotina de classificação supervisionada utiliza os atributos espectrais de cada pixel das imagens satelitais na busca por regiões com morfologia homogênea.

Assim, o sistema de classificação de LCZs nos apresenta uma integração de características de superfícies, cobertura do solo, arranjos físicos e metabolismo em unidades padronizadas da paisagem urbana. Esse mapeamento permite uma nova interpretação do espaço intra-urbano com um viés climático.

4.1. ESTABELECIMENTO DE UM SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DA PAISAGEM URBANA DO DF

As características da forma urbana, como a presença de vegetação e água, bem como o arranjo dos edifícios, por exemplo, impactam no clima localmente, além de influenciar processos de retroalimentação climática, ecológicos, qualidade do ar e o bem-estar humano nas cidades (LARONDELLI et al., 2014). Tal complexidade nos leva à questões sobre a caracterização da forma e do clima urbano em suas diferentes escalas espaciais e climáticas, nas quais pode-se partir da descrição de um lote, de um bairro e até uma conurbação ou região metropolitana (HIDALGO et al., 2019).

Como abordado no Capítulo 2, nos estudos de clima urbano é comum a utilização de três diferentes escalas espaciais: mesoescala até a microescala, passando pela escala local. A escala local é a escala definida para este trabalho de classificação da paisagem urbana. Deve-se ao fato de que o clima é mais sensível à interação das formas urbanas, cobertura do solo, uso do solo e presença de vegetação, e onde experimenta-se diferentes microclimas (MASSON et al., 2020).

A escala local tem se mostrado bastante estratégica para os tomadores de decisões, conforme pontuam Hidalgo, Lemonsu e Masson (2019). O mesmo é discutido por Barron et al (2019), argumentando que, do ponto de vista de clima e saúde, intervenções nessa escala são mais tangíveis e conectadas com as pessoas.

No entanto, é necessária uma descrição adequada da sua constituição, além da disponibilidade de dados urbanos com escala compatível para seu mapeamento. O que se encontra disponível na maior parte das municipalidades são os mapas de uso e ocupação do solo, em escalas que podem chegar a 1:100.000.

Nesse sentido, Masson et al (2020) destaca um avanço na utilização de métodos de classificação que buscam padrões homogêneos para auxiliar no planejamento e na pesquisa de clima urbano. A padronização facilita a comparação dos resultados dos estudo climáticos, seja para análise da variabilidade intraurbana, ou comparações entre zonas de uma região metropolitana, por exemplo.

Stewart e Oke (2012) levantaram essa preocupação e desenvolveram a classificação LCZs, de caráter genérico baseada na cobertura do solo, altura dos edifícios, densidade construída, entre outros parâmetros. A hipótese dos autores é que bairros com morfologias semelhantes têm uma resposta térmica semelhante aos efeitos locais da ICU.

Essa hipótese foi verificada por experimentos com estações meteorológicas e transectos com veículos instrumentados (STEWART, OKE e KRAYENHOFF, 2014). Com a popularização das imagens de satélites, outra aplicação para a classificação de LCZs se volta para a comparação da temperatura de superfície, entre outros índices espectrais como o NDVI e EVI, intra e entre LCZs. As LCZs foram abordadas no Capítulo 2 desta tese. Retoma-se seu conteúdo neste ponto para detalhar os principais parâmetros que guiaram este trabalho de classificação.

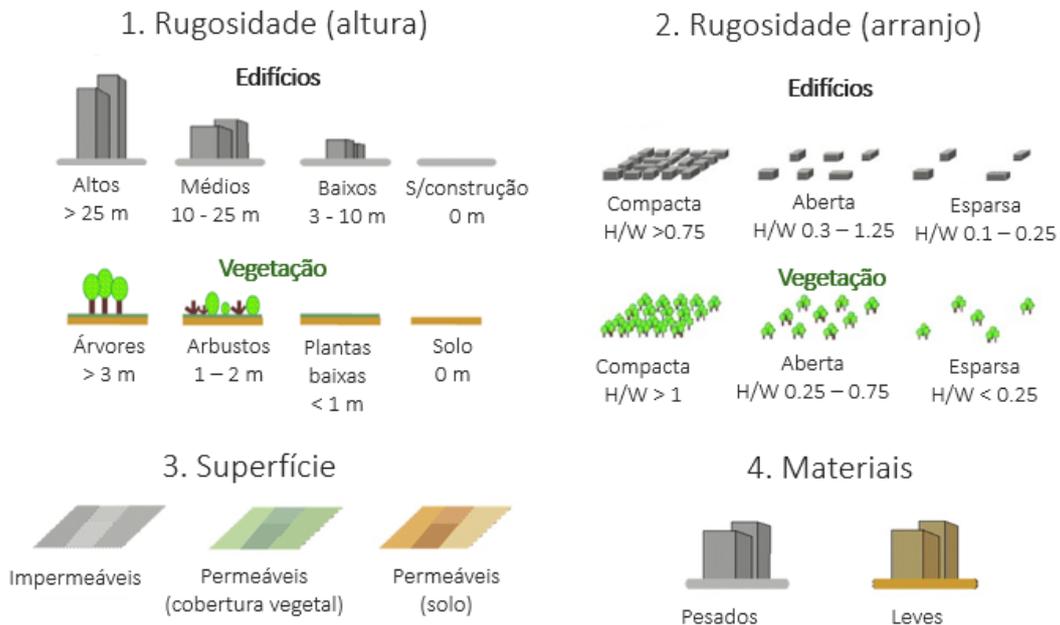
O SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO LCZ

Os autores da classificação LCZ argumentam que a base do sistema surgiu de uma divisão lógica e universal da paisagem urbana, onde: “as classes são locais na escala,

climáticas em sua natureza e zonais na representação” (STEWART e OKE, 2012, p.1884, tradução livre).

Assim, sua estrutura é clara e dividida entre altura dos edifícios (alto, médio, baixo), arranjo físico (densa, aberta, esparsa), presença de arborização, permeabilidade do solo e materiais de construção (Figura 48). As classes são baseadas em uma escala espacial horizontal de centenas de metros à vários quilômetros, desde que mantidas as características homogêneas das edificações e cobertura e uso do solo.

Figura 48: Estrutura das classes do sistema LCZ. Nota-se H/W para a relação altura/largura (*height/width*) do arranjo dos elementos.



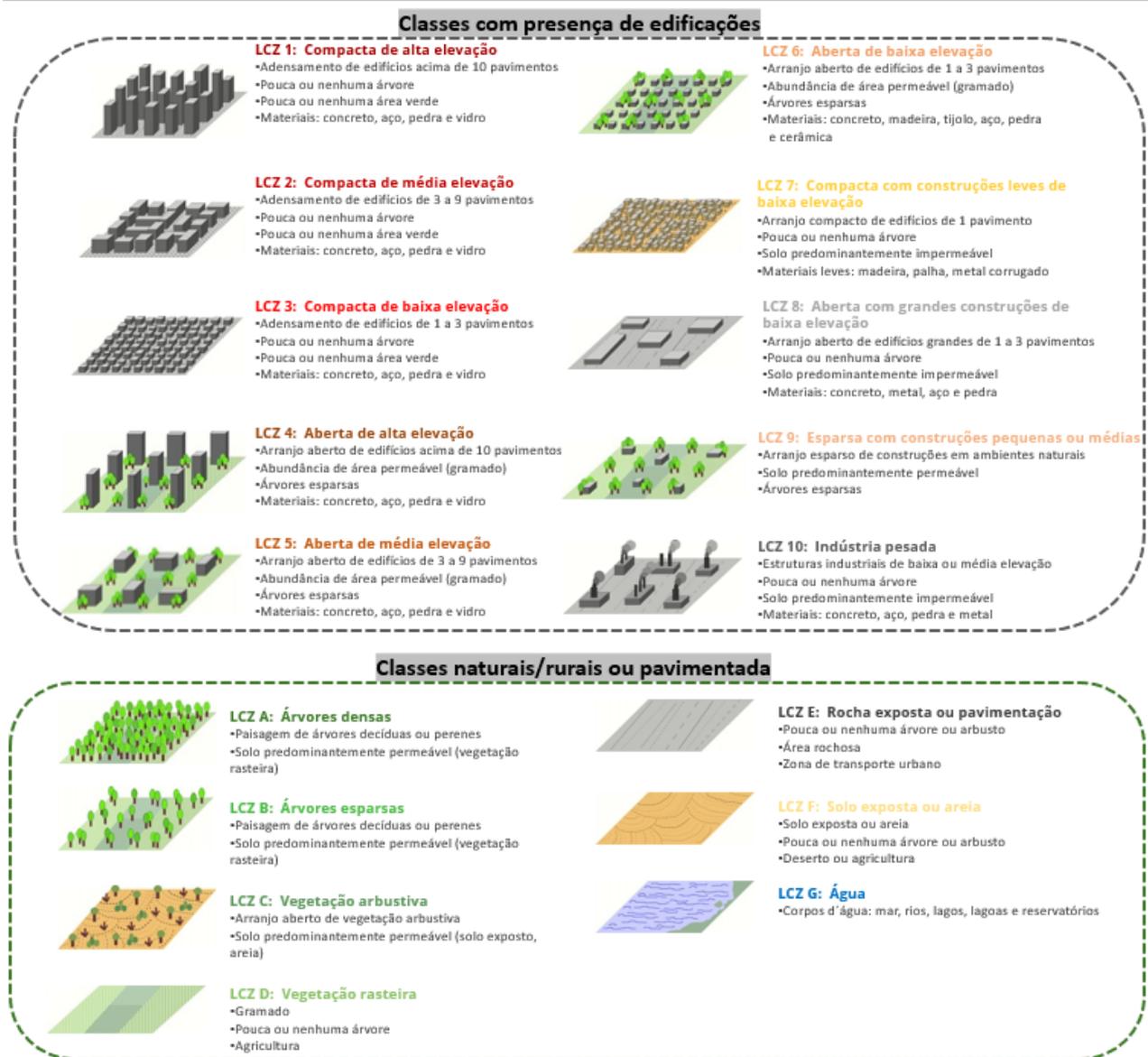
Fonte: Wudapt, 2022 (tradução livre).

Os padrões derivados das possíveis combinações constituem as 17 classes principais (Figura 49). As tipologias são identificadas a partir das características físicas diferenciadas em termos de superfície: permeáveis ou impermeáveis, que interferem no albedo, na umidade e no aquecimento e resfriamento do solo; e pelas estruturas das superfícies: altura e espaçamentos dos edifícios e da vegetação, que modificam o fluxo do ar, o transporte do calor atmosférico e nas ondas de radiação (STWEART e OKE, 2012).

Os criadores da classificação estabeleceram um processo de três passos para a utilização do sistema: coleta de dados dos locais de amostra, definição de uma zona para medições do campo térmico e a seleção da zona climática local que melhor se encaixa nas observações. O sistema proporciona uma linguagem visual simples que permite que arquitetos e urbanistas e engenheiros rapidamente se apropriem das características das superfícies urbanas, naturais e suas estruturas verticais.

Após a identificação do tipo de arranjo físico e altura das edificações, procede-se para as demais propriedades (Tabela 2). As características seguintes a serem observadas são as referentes à cobertura do solo como fração de área permeável, impermeável e projeção das edificações. Se a classe não for identificada a partir desses valores, deve-se apontar uma classe mais aproximada e detalhar as diferenças.

Figura 49: Definição das classes do sistema



Fonte: Adaptado de Stewart e Oke, 2012, p. 1885 (tradução livre).

A Tabela 2 apresenta os valores de referência que auxiliam a identificação das zonas climáticas locais, incluindo:

- Fator de visão do céu (adimensional);
- Relação altura/largura - Height/Width – dos cânions urbanos (LCZ 1 – 7), entre edifícios (LCZ 8 – 10) e entre árvores (LCZ A – F) (adimensional);
- Razão da área de projeção dos edifícios pela área total da amostra (%);
- Razão da área impermeável pela área total da amostra (%);
- Razão da área permeável (%);
- Altura média dos edifícios (LCZ 1 - 10) ou das árvores e plantas (LCZ A – F) (metros);
- Rugosidade do terreno de acordo com a classificação de Davenport et al, (2000) (ver Tabela 2, Capítulo 2).

Tabela 2: Valores de referência para geometria e cobertura das superfícies das LCZs.

LCZ classes	Fator de visão do céu	Relação H/W	Razão da projeção dos edifícios	Razão da área impermeável	Razão da área permeável	Altura média dos elementos	Rugosidade do terreno
1	0,2 - 0,4	> 2	40 - 60	40 - 60	< 10	> 25	8
2	0,3 - 0,6	0,75 - 2	40 - 70	30 - 50	< 20	10 - 25	6 - 7
3	0,2 - 0,6	0,75 - 1,5	40 - 70	20 - 50	< 30	3 - 10	6
4	0,5 - 0,7	0,75 - 1,25	20 - 40	30 - 40	30 - 40	> 25	7 - 8
5	0,5 - 0,8	0,3 - 0,75	20 - 40	30 - 50	20 - 40	10 - 25	5 - 6
6	0,6 - 0,9	0,3 - 0,75	20 - 40	20 - 50	30 - 60	3 - 10	5 - 6
7	0,2 - 0,5	1 - 2	60 - 90	< 20	< 30	2 - 4	4 - 5
8	> 0,7	0,1 - 0,3	30 - 50	40 - 50	< 20	3 - 10	5
9	> 0,8	0,1 - 0,25	10 - 20	< 20	60 - 80	3 - 10	5 - 6
10	0,6 - 0,9	0,2 - 0,5	20 - 30	20 - 40	40 - 50	5 - 15	5 - 6
A	< 0,4	> 1	< 10	< 10	> 90	3 - 30	8
B	0,5 - 0,8	0,25 - 0,75	< 10	< 10	> 90	3 - 15	5 - 6
C	0,7 - 0,9	0,25 - 1,0	< 10	< 10	> 90	< 2	4 - 5
D	> 0,9	< 0,1	< 10	< 10	> 90	< 1	3 - 4
E	> 0,9	< 0,1	< 10	> 90	< 10	< 0,25	1 - 2
F	> 0,9	< 0,1	< 10	< 10	> 90	< 0,25	1 - 2
G	> 0,9	< 0,1	< 10	< 10	> 90	-	1

Nota: as razões estão em porcentagem, a altura dos elementos em metros e as demais propriedades são adimensionais.

Fonte: Adaptado de Stewart e Oke, 2012, p. 1886 (tradução livre).

LIMITAÇÕES E ADAPTAÇÕES

Por se tratar de um sistema genérico, é esperado que suas tipologias não atendam à particularidades de áreas urbanas, rurais e naturais de todo o globo. Os próprios autores apontam a visão reducionista em relação a paisagem e, como todo sistema que se propõe a uma classificação universal, a interpretação e descrição de seus componentes podem ser limitadas (STWEART e OKE, 2012). Sendo assim, o sistema LCZ não substitui um mapa climático urbano.

De certo todo sistema de classificação vem acompanhado de uma finalidade, delimitado por uma escala e, dificilmente um sistema único irá atender às todas demandas do planejamento urbano. Logo, o sistema de LCZ aplicado ao DF não descreverá a vegetação das áreas naturais da mesma forma que Ribeiro e Walter (1998) descreveram as fitofisionomias do cerrado.

Outro aspecto é a homogeneidade interna às LCZ, que pode variar entre cidades, tipos de desenho urbano, planejamento e até mesmo se um setor urbano está em fase de consolidação, tipicamente nas bordas da cidade, ou totalmente consolidado. Da mesma forma, áreas podem ser revegetadas e voltar à uma condição natural, ou até mesmo implantações de infraestrutura verde e azul em uma escala que podem representar uma mudança da cobertura do solo.

Mais uma vez o fator escala e agora a temporalidade da classificação são elementos importantes para sua utilização. Ou seja, áreas em crescimento ou em transformação do seu uso e ocupação do solo pressionam uma constante atualização do mapeamento.

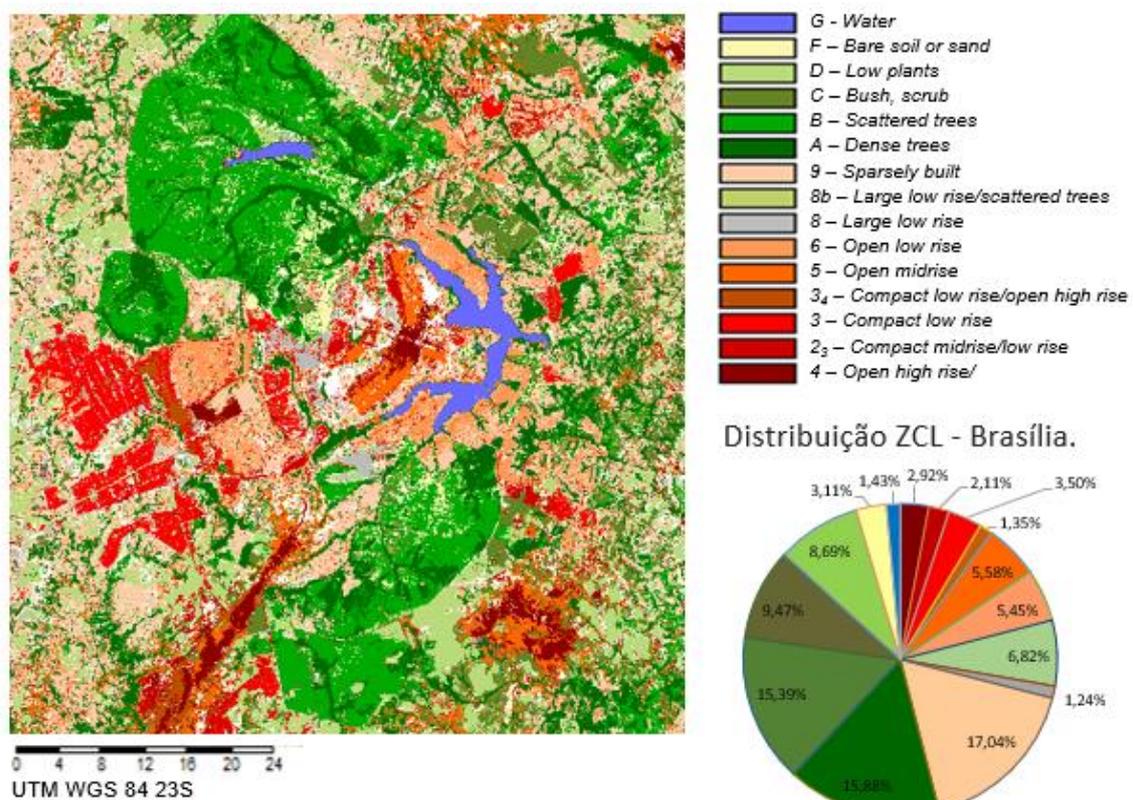
Nesse sentido, as classes principais podem não ser totalmente verificadas em algumas cidades e adaptações devem ser processadas. Uma alternativa é a criação de subclasses por meio da combinação de duas classes principais. Porém, os criadores da metodologia LCZ não recomendam a criação de muitas subclasses que podem aumentar a complexidade do processo sem benefícios. Principalmente em relação ao campo térmico, que pode não ser muito diferente das classes principais.

A adaptação mais recente e que impulsionou a aplicação das LCZs foi a utilização de classificadores automáticos e programas SIG (Sistema de Informações Geográficas). Inicialmente o sistema de Stewart e Oke foi pensado para uma classificação manual. Essa adaptação será discutida adiante pois este trabalho apoia-se na utilização de um classificador para as LCZ.

TRABALHOS ANTERIORES

No exame de qualificação desta tese já havia-se definido a utilização das LCZs, assim como foi apresentado o resultado preliminar do mapeamento para o DF. O método se baseava no protocolo de mapeamento digital do WUDAPT com utilização de imagens multiespectrais do satélite Landsat 8, e de um classificador de LCZ implementado para o programa SAGA Gis 7.6.4 (*System for Automated Geoscientific Analyses*). Na sua validação com o uso da matriz de confusão, o método obteve acurácia total de 68% (Figura 50).

Figura 50: Classificação preliminar gerada no classificador LCZ do Saga Gis.



Em 2020, em contato com o Prof. Benjamin Bechtel da Universidade de Ruhr, em Bochum-Alemanha, nos foi apresentada a versão *beta* de teste de um programa cujo classificador automatiza o processo de classificação e validação dos resultados, o *LCZ*

Generator, desenvolvido na referida universidade³⁵. O método também se apoia em imagens satelitais da coleção Landsat e acrescentaram a coleção Sentinel. Várias cidades, principalmente da Europa, estavam sendo testadas pelos pesquisadores. Assim, utilizamos a área urbana do DF para participar dos testes.

Os resultados das validações foram melhorando para um valor de 73% de acurácia utilizando-se apenas as classes principais do sistema LCZ. O programa passou por atualizações e a versão 1.0 foi lançada em meados de 2021, integrando também a lista de ferramentas digitais do WUDAPT. Dessa forma, migrou-se de classificador para o desenvolvimento do método de trabalho, já na versão 1.2, detalhado a seguir.

4.2. MÉTODO PARA CLASSIFICAÇÃO DE LCZ

O procedimento para criar um mapa com a classificação de LCZ demanda um conjunto de áreas de treinamento rotuladas, imagens satelitais e um algoritmo de classificação de imagens. O mapeamento pode ser realizado para diferentes períodos, a depender da evolução urbana. Duas condições devem ser atendidas: 1) as áreas de treinamento devem ser representativas do período considerado, e 2) uma imagem satelital deve estar disponível para esse período (Bechtel et al., 2015).

O algoritmo de classificação de imagens é responsável pelo processo de extração de informações em imagens para reconhecer padrões homogêneos. Sua utilização em sensoriamento remoto destina-se ao mapeamento de áreas da superfície terrestre que correspondem aos temas de interesse (DPI/INPE, 2018). Por exemplo, pode ser usado para um mapeamento de uso e ocupação do solo.

A informação espectral de uma cena pode ser representada por pixels com coordenadas espaciais x , y e uma espectral L , que representa a radiância do alvo em todas as bandas espectrais. Logo, para uma imagem de K bandas, existem K níveis de cinza associados a cada pixel, sendo um para cada banda espectral (MENESES E SANO, 2012). O conjunto de características espectrais de um pixel é denominado pelo termo atributos espectrais (DPI/INPE, 2018).

A imagem classificada representa um mapa digital temático onde somente as classes que são espectralmente distinguíveis na imagem estarão presentes. Os valores de pixels que identificam uma classe específica de alvo ou objeto real da natureza, denomina-se de padrões (MENESES E SANO, 2012, p.192).

Os classificadores podem ser divididos pelo tipo *pixel a pixel* e classificadores por regiões. Os classificadores *pixel a pixel* utilizam os atributos espectrais de cada pixel na busca por regiões homogêneas. Os classificadores por regiões utilizam os atributos espectrais de cada pixel e a relação espacial de vizinhança entre pixels como áreas homogêneas espectrais e espaciais da imagem.

O tipo de classificação que demanda o conhecimento prévio de alguns aspectos da área é chamado de classificação supervisionada. As áreas são identificadas pelo seu padrão, a partir do qual os pixels serão comparados e classificados. Esse processo equivale à criação de áreas de treinamento para o reconhecimento da assinatura espectral de cada uma das classes propostas (MENESES E SANO, 2012).

Como já mencionado, o classificador utilizado foi o *LCZ Generator* desenvolvido por Demuzere, Kittner e Bechtel (2021), disponível em uma aplicação *web*. Ele

³⁵ Grupo de Climatologia Urbana, Departamento de Geografia, Universidade Ruhr, Bochum, Alemanha.

proporciona uma classificação automática do tipo supervisionada por pixel a pixel. O algoritmo utiliza o método de aprendizado de máquina *random forest*, baseado em um conjunto de árvores de decisão para realizar classificações e regressões (LIMA e AMORIM, 2020).

Demuzere, Kittner e Bechtel (2021) descrevem a utilização do *LCZ Generator* em três etapas, contando que o conjunto de áreas de treinamento para seu classificador já tenha sido criado. Então, primeiramente, as informações pessoais e as áreas de treinamento são enviadas por meio do aplicativo da *web*. Se a submissão for bem sucedida, a classificação LCZ e controle de qualidade são disparados no *back-end*. Na terceira etapa os resultados são enviados ao usuário via *e-mail*.

Nesta tese, o fluxograma do método de trabalho incorpora essas etapas e adicionalmente tem-se mais duas etapas. Uma primeira etapa para criação de áreas de treinamento e última etapa de pós-classificação, conforme esquematização da Figura 51. A última etapa destina-se à realização de operações espaciais, cálculos estatísticos e reclassificações de LCZs. As etapas são discutidas com mais detalhes nas seções a seguir.



CRIAÇÃO DE ÁREAS DE TREINAMENTO

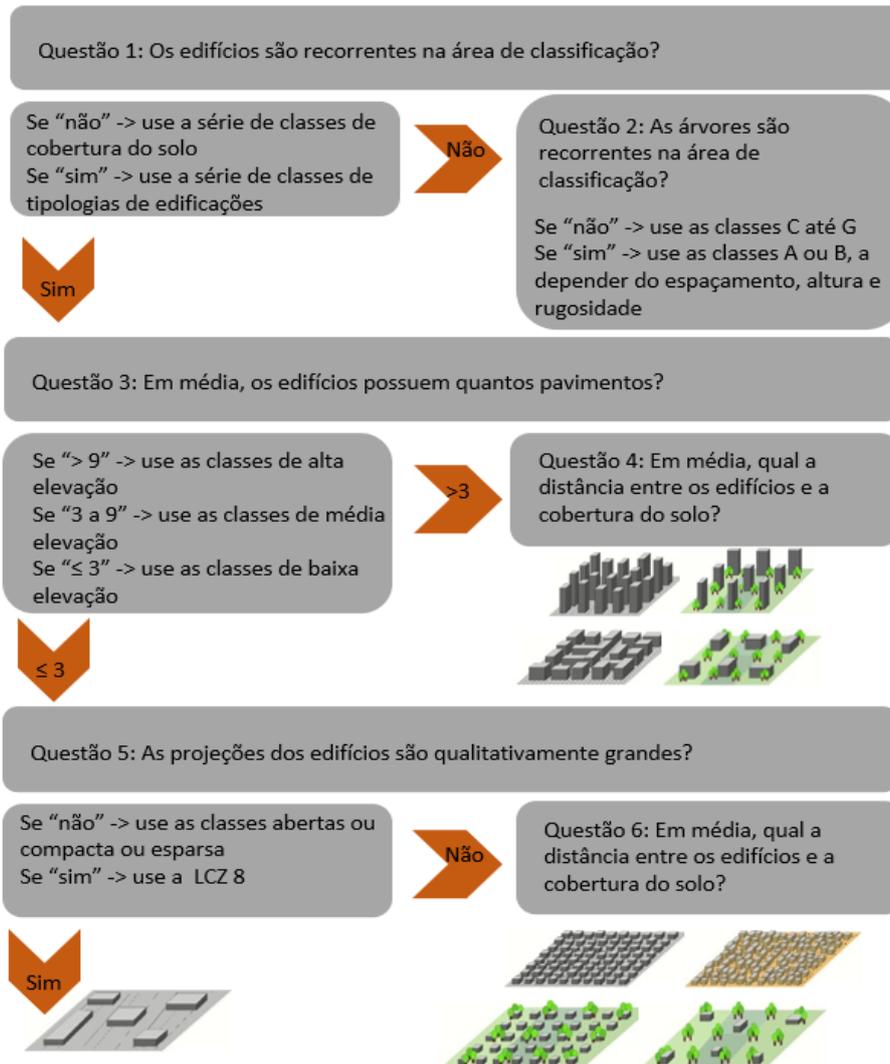
Um passo fundamental para a acurácia do mapeamento de LCZs é a delimitação das áreas de treinamento, identificadas a partir da análise das tipologias apresentadas na Figura 2 e dos parâmetros morfológicos da Tabela 1. No contexto do mapeamento automático, contou-se com um modelo padronizado de rótulos das classes principais do sistema LCZ, disponibilizado pelo WUDAPT, para a delimitação das áreas de treinamento no ambiente digital do *Google Earth Pro*. Também seguiu-se o protocolo de digitalização de áreas de treinamento do WUDAPT.

Contudo, estudos apontam que classificações errôneas podem ocorrer por conta da subjetividade ao discriminar as classes e da dificuldade de obtenção dos parâmetros morfológicos (DORIGAN, 2019; VERDONCK et al., 2019). Também pontua-se que nem todos os parâmetros podem ser observados diretamente em campo ou remotamente no ambiente digital como o *Google Earth*. Para contornar essas dificuldades, dois trabalhos foram importantes para a identificação visual das classes e sua subsequente delimitação no *Google Earth Pro*.

O primeiro foi o guia de campo de Stewart (2018), produzido após observações de erros comuns na identificação de classes, destacadamente sobre os arranjos dos elementos urbanos e a cobertura do solo. O guia traz uma sequência de etapas de

identificação direcionadas às áreas mais problemáticas, a partir do qual adaptou-se um fluxograma para este trabalho (Figura 52). Os primeiros passos são de natureza preparatória, abordando qualitativamente as noções de escala e dos elementos da paisagem. As etapas posteriores são orientadas a atender aos julgamentos sobre a classe LCZ à qual a área pertence em escala local.

Figura 52: Fluxograma para discriminação de classes.



Fonte: Adaptado de Stewart, 2018, p.5.

O segundo trabalho foi o do projeto HUMINEX (*HUMAN INFLUENCE EXPERIMENT*), introduzido para investigar a variabilidade e qualidade das áreas de treinamentos produzidas por diferentes pesquisadores usando a metodologia do WUDAPT (VERDONCK et al., 2019). As análises demonstraram que as áreas de superfície dos treinamentos estão relacionadas à ocorrência de zonas representativas para uma classe. Quando as zonas são sub-representadas, é possível encontrar apenas pequenas áreas de treinamento. Entretanto, existe a probabilidade que um classificador automático não a identifique corretamente devido à quantidade limitada de informações sobre ela.

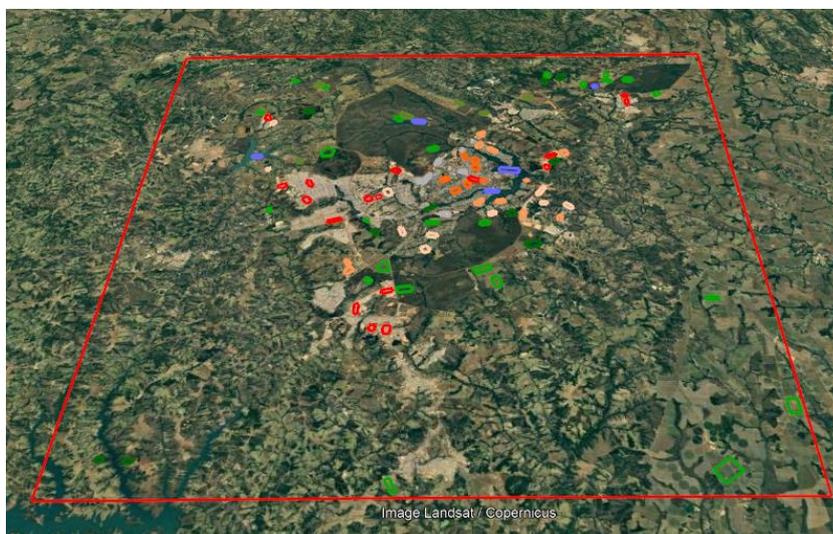
Dessa forma, o mapa final da LCZ conterá as zonas sub-representadas, mas a precisão será baixa, de acordo com Verdonck et al. (2019). Os autores ainda complementam que, como os mapas LCZ fornecem informações sobre o clima local, é

importante que um clima local possa ser estabelecido nas zonas e, portanto, elas devem ter um determinado tamanho, recomendando que o menor lado do polígono de delimitação seja maior que 200 metros e sua área maior que 1 km². Quando as zonas são menores e incorporadas em outras zonas, geralmente é melhor remover a amostra do conjunto de áreas de treinamento.

Em síntese, a discriminação das classes contou com três passos. O primeiro, de identificação visual das classes baseado no fluxograma da Figura 52. Posteriormente a verificação dos parâmetros morfológicos em áreas amostrais de 200x200 metros: altura dos edifícios, rugosidade, relação H/W, projeção do edifícios e área permeável. O fator de visão do céu não foi explorado neste trabalho. Para esse passo foram utilizados o *Google Street View* e os arquivos vetoriais “edificações” e “vegetação” disponíveis no Geoportal do GDF. Na sequência, as áreas de treinamento foram digitalizadas no *Google Earth Pro* seguindo o protocolo do WUDAPT.

Por fim, foi desenhada uma região de interesse (tradução livre de *region of interest* – ROI). A ROI é definido como um polígono que cobre a extensão dos polígonos das áreas de treinamento (Figura 53). Para manter a eficiência computacional, o tamanho máximo de ROI permitido no *LCZ Generator* é de 2,5° x 2,5°, aproximadamente 277,85 x 277,85 Km (DEMUZERE, KITNER e BECHTEL, 2021).

Figura 53: Digitalização das áreas de treinamento. O polígono vermelho é o



SUBMISSÃO DOS DADOS DE ENTRADA

A submissão dos dados de entrada é realizada por meio de um formulário na página virtual do *LCZ Generator* (<https://lcz-generator.rub.de/>). O formulário contém dados pessoais do autor, como nome e *e-mail*, e informações da área a ser classificada, como o arquivo das áreas de treinamento, cidade/país/continente, data de referência e observações que o autor queira registrar sobre o trabalho. Nesta etapa uma série de verificações foram criadas pelos desenvolvedores.

Primeiro, o arquivo com as áreas de treinamento deve ter a extensão “.kml” (*Keyhole Markup Language*) ou sua versão compactada, na extensão “.kmz”. Outra verificação é se o arquivo das áreas de treinamento segue o padrão do WUDAPT para a correta rotulação das classes. Nesta etapa cada polígono é fornecido com um identificador, que é necessário para realizar o teste de acurácia automatizado. Por fim,

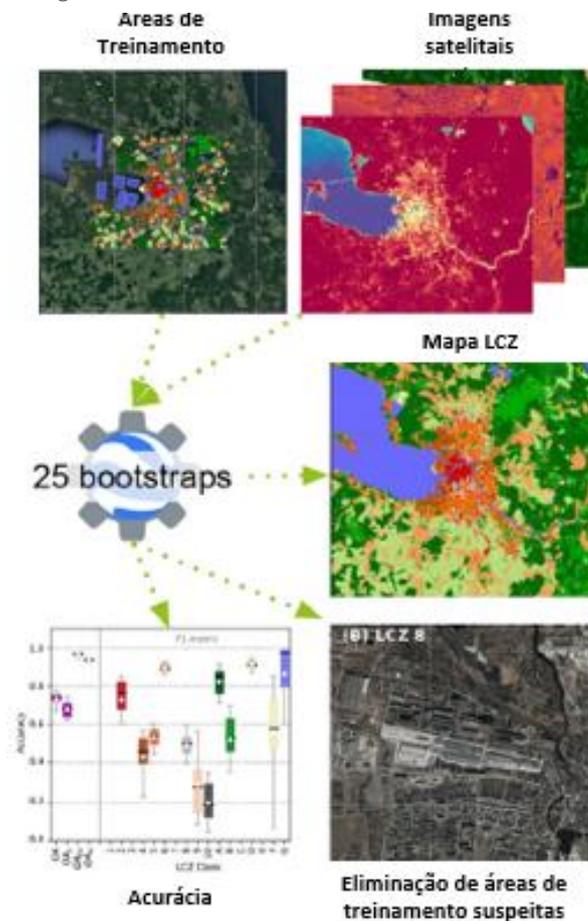
também o tamanho da ROI também é verificado. Se todos as verificações forem aprovadas, uma mensagem é retornada indicando que as informações foram corretamente enviadas e o processamento é iniciado.

PROCESSAMENTO DA CLASSIFICAÇÃO: GERAÇÃO DO MAPA DE LCZ

Nesta etapa acontece o processamento da classificação e do teste de acurácia em um ambiente computacional inacessível para os usuários, pois o processamento é baseado em nuvem. Para tal, o *Google Earth Engine* – GEE – (GORELICK et al, 2017) foi empregado tanto pelo poder computacional, como também pelo acesso ao conjunto de imagens satelitais do Landsat e do Sentinel e algoritmos predefinidos (DEMUZERE, KITTNER e BECHTEL, 2021). Assim, as imagens são usadas em combinação com as áreas de treinamento, formando os dados de entrada para o classificador de LCZs.

Os desenvolvedores descrevem que um total de 33 recursos de entrada estão disponíveis globalmente, em uma resolução espacial de 100 m, e são armazenados no recurso online WUDAPT no GEE. Consistem em 16 recursos derivados do Landsat 8; 5 recursos do Sentinel-1; 8 recursos do Sentinel-2 e 4 recursos adicionais que refletem o terreno e altura do dossel de árvores (DEMUZERE, KITTNER e BECHTEL, 2021). A Figura 54 sintetiza os dados de entrada e saída do processamento.

Figura 54: Dados de entrada e saída do *LCZ Generator*.



Fonte: Adaptado de Demuzere, Kittner e Bechtel, 2021.

O principal dado de saída consiste no mapeamento digital de LCZs na resolução espacial de 100 x 100 metros. Além disso também são enviados um arquivo vetorial com os polígonos provenientes das áreas de treinamento considerados suspeitos por não enquadrarem nas regras de submissão, estatística básica da área de treinamento como quantidade e áreas dos polígonos e o teste de acurácia.

O processamento executa uma validação cruzada automatizada usando *bootstraps*. O *bootstraps* é um método estatístico não paramétrico de reamostragem. Em cada *bootstrap*, 70% dos polígonos das áreas de treinamento são usados para treinar e 30% para testar. Os polígonos são selecionados por amostragem aleatória, mantendo a distribuição de frequência por classe LCZ original. Este procedimento é então repetido por 25 vezes para obter-se o resultado de melhor qualidade.

ANÁLISE DO TESTE DE ACURÁCIA

Os dados processados pelo *LCZ Generator* são recebidos nesta etapa em arquivos conforme Tabela 3. Em posse dos resultados, avalia-se o mapa de LCZ e os valores da acurácia de acordo com a porcentagem de pixels classificados corretamente. Os valores são divididos em: acurácia geral (OA); acurácia geral para classes urbanas (OAu); acurácia geral para classes urbanas *versus* naturais (OAbu) e acurácia ponderada (OAw).

A acurácia ponderada é obtida pela aplicação de pesos à matriz de confusão devido à (dis)similaridade entre os tipos de LCZ. Um exemplo dado por Demuzere, Kittner e Bechtel (2021) é que a LCZ 4 é mais semelhante aos outros tipos urbanos abertos (LCZs 5 e 6), deixando esses pares com pesos maiores. Assim, a penalização entre classes diferentes é maior que entre classes semelhantes.

Entre os arquivos do resultado há uma figura com representação dos boxplots possibilitando a visualização dos intervalos de todas as métricas de acurácia, inclusive por classe LCZ. Dessa forma, pode-se avaliar as classes com melhor e pior classificação e decidir se o processo precisa ser melhorado ou se o resultado é aceitável, de acordo com a Figura 51.

Dentre os aprendizados do HUMINEX, Verdonck et al. (2019) destacam a importância da familiarização com o conceito das classes LCZs e com a cidade a ser classificada. Essa preparação deve ser realizada antes de iniciar a criação das áreas de treinamento para melhorar a qualidade do mapeamento. Esses autores também sugeriram que o processo seja refeito por no mínimo duas vezes para comparar os resultados.

Tabela 3: Conteúdo principal dos resultados disponibilizados pelo *LCZ Generator*.

Conteúdo	Formato
Página da internet com resumo dos resultados	.html
Mapeamento de LCZs – resolução 100 x 100 metros (banda sem filtro e banda com filtro do tipo gaussiano – ver item 4.2.5)	.tif
Áreas de treinamento submetidas	.kml
Estatística básica das áreas de treinamento	.csv
Controle de qualidade dos polígonos das áreas de treinamento	.shp
Matriz de confusão	.csv
Figura da frequência das áreas de treinamento por classe	.png
Figura do mapa de LCZs (versão com filtro)	.jpg
Figura dos <i>boxplots</i> de acurácias	.jpg

PÓS-CLASSIFICAÇÃO: DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E RECLASSIFICAÇÃO

Para a etapa final utilizou-se o programa gratuito QGis (versão Bucaresti) para realizar operações espaciais, cálculos estatísticos e reclassificações de LCZs. As operações espaciais envolvem a transformação do arquivo do mapeamento de LCZs de *raster* para um arquivo vetorial e o recorte da área urbana a ser estudada. Para este trabalho, estabeleceu-se uma poligonal de interesse para recortar o mapeamento de LCZs, que será novamente utilizada para o recorte das imagens de satélites para análise dos índices espectrais no Capítulo 5.

A delimitação da área urbana é uma questão complexa, uma vez que as atividades humanas extrapolam o perímetro urbano, e também pela falta de critérios claros para definição de área metropolitana, urbana e rural (OJIMA, 2007; IBGE, 2017). Para estudos de clima urbano, especialmente a ICU, essa definição é crítica e alguns autores sugerem métodos para determinar áreas do entorno da cidade com a criação de uma área de amortecimento (ZHOU et al., 2019). Entretanto, recomendações sobre essa relação ainda carecem de validação e os estudos ainda são pontuais.

Tendo em vista que a finalidade da análise foca na variabilidade dos índices espectrais dos arranjos internos do espaço urbano, logo tomou-se como referência o macrozoneamento do DF, disposto no PDOT (2009). Antes de avançar ao macrozoneamento, pontua-se a questão do espaço urbano, com base na discussão semântica de Villaça (1998).

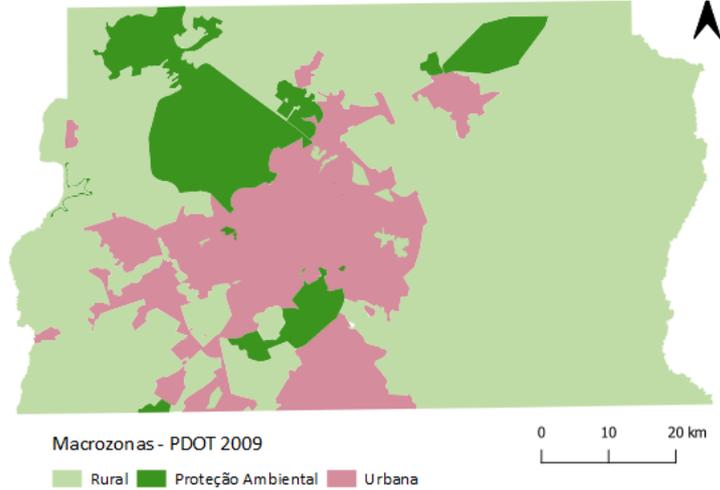
O espaço urbano tratado neste trabalho é o que o autor aponta por espaço intra-urbano, termo em oposição ao componente urbano do espaço regional. Villaça (1998) enxerga que é uma redundância, e essa torna-se mais evidente se fosse comum o uso do termo espaço intra-regional. Esse esclarecimento é colocado diante da dinâmica metropolitana entre Brasília e os municípios próximos para o estabelecimento do Espaço Metropolitano de Brasília - EMB (CODEPLAN, 2014) – e da RIDE – Região Integrada de Desenvolvimento de Distrito Federal e Entorno (Lei Complementar nº 94/1998), envolvendo municipalidades não necessariamente contíguas.

Partindo dessa diferenciação, delimita-se o campo de observação deste estudo na escala intra-urbana do DF, onde se observa o conjunto de padrões heterogêneos que também se repetem em outras cidades do EMB e RIDE. Entretanto, propõe-se restringir a análise para os limites do DF, onde já se tem um macrozoneamento, que é um elemento normativo do Plano Diretor que expressa a destinação do solo e suas diretrizes gerais de uso e ocupação.

O macrozoneamento do DF está dividido entre área urbana, rural e de proteção ambiental, visualizadas na Figura 56. Além do mais, a Macrozona Urbana se divide em: I – Zona Urbana do Conjunto Tombado; II – Zona Urbana de Uso Controlado I; III – Zona Urbana de Uso Controlado II; IV – Zona Urbana Consolidada; V – Zona Urbana de Expansão e Qualificação; e VI – Zona de Contenção Urbana (Anexo 1).

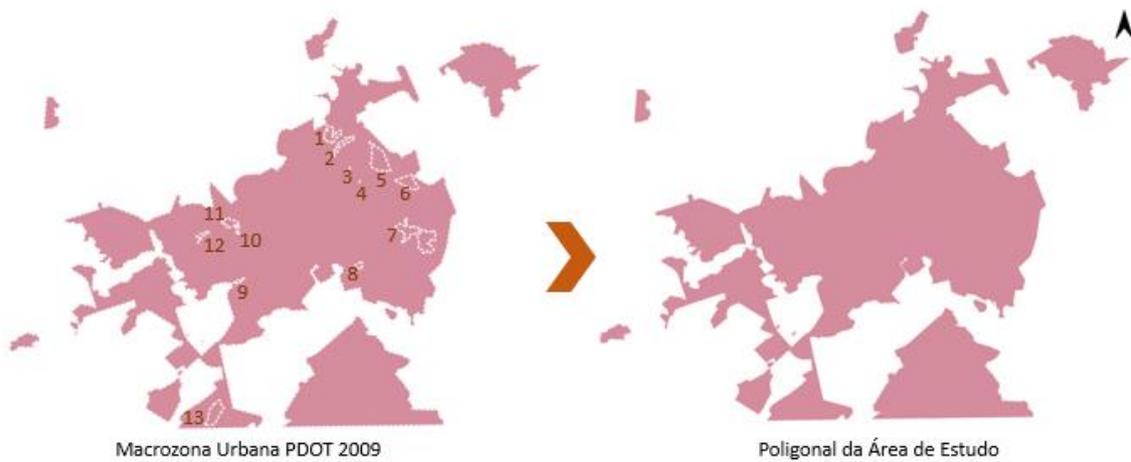
Para o estabelecimento de uma poligonal de estudo, observou-se a sobreposição de áreas remanescentes rurais e de proteção ambiental com a zona urbana. Nesta tese propõe-se tratar esses remanescentes envolvidos pela área urbana como parte da poligonal da área de estudo. Essas áreas são passíveis de classificação no sistema LCZs e, sob o viés do clima urbano, não importa o tipo de macrozona, e sim a escala local e a contiguidade das áreas. Prossegue-se o trabalho com uma poligonal modificada a partir da Macrozona Urbana do DF, incluindo as áreas remanescentes, conforme Figura 55 e Tabela 4.

Figura 56: Macrozonas definidas pelo PDOT vigente do DF.



Fonte: Elaboração própria com dados espaciais disponibilizados pela SEDUH-DF no Geoportal-DF.

Figura 55: Identificação de áreas remanescentes acrescentadas na delimitação da área de estudo.



Fonte: Elaboração própria com dados espaciais disponibilizados pela SEDUH-DF no Geoportal-DF.

Tabela 4: Detalhamento das áreas remanescentes incorporadas na poligonal área de estudo.

Área Remanescente	Macrozona PDOT (2009)	Área (Km ²)
1	Rural	2,59
2	Rural	1,57
3	Proteção Integral	0,012
4	Proteção Integral	0,08
5	Rural	5,76
6	Rural	2,99
7	Rural	8,63
8	Proteção Integral	0,53
9	Rural	0,38
10	Proteção Integral	0,40
11	Proteção Integral	1,55
12	Rural	0,66
13	Rural	4,13
Total da área remanescente:		29,28
Total da área de estudo:		1190,05

O Plano Diretor estabeleceu também critérios para regularização dos parcelamentos com características urbanas implantados originalmente em zona rural, definindo a categoria de Parcelamentos Urbanos Isolados (ZEE, 2017). Outras discussões tangem o grau de consolidação desses parcelamentos, assim como das agrovilas em processo de urbanização. Essas áreas não serão exploradas neste trabalho.

Em processamento digital de imagens, na etapa de pós-classificação, geralmente aplica-se em uma imagem classificada um procedimento para eliminar pontos isolados que foram classificados diferentemente de sua vizinhança (DPI/INPE, 2022). Logo, gera-se uma imagem com aparência menos ruidosa. O *LCZ Generator* oferece a opção do filtro gaussiano com objetivo de suavizar a imagem utilizando a função gaussiana para a obtenção de uma máscara a ser definida digitalmente (MENESES E SANO, 2012).

Assim, avaliou-se o mapa LCZ gerado com e sem filtro para identificação de áreas com classificação incorreta e prossegue-se para sua reclassificação. A correção proposta realizou-se por meio de uma edição manual. Primeiramente o arquivo do mapa LCZ com extensão “.tif” foi convertido para um arquivo vetorial no programa Qgis com a ferramenta polinizar. Uma tabela de atributos foi gerada com a designação da classe de cada polígono, que pode estar agregado formando regiões ou em pixel isolado.

A edição do tipo de classe é realizada alterando o campo da classe na tabela de atributos, baseado na comparação entre a imagem classificada com uma imagem de alta definição. Foi utilizada uma imagem do Geoportal-DF³⁶ do ano de 2021 com resolução de 50 cm e imagem do *Google Satélite* por meio do *plugin Quick Map Service (QMS)*, ambas visualizadas no ambiente do Qgis.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este item apresenta e discute os resultados obtidos com a aplicação *web LCZ Generator*, que utiliza o sistema de classificação da paisagem urbana desenvolvido por Stewart e Oke (2012). O *LCZ Generator* usa a licença CC BY-SA 4.04 para todos os envios e o melhor resultado fica publicado na sua base de dados para consulta. Os termos de serviço foram aceitos no ato da submissão e as diretrizes sobre como reconhecer os materiais produzidos pelos autores das áreas treinamento são incorporados junto aos resultados.

Foram realizadas 20 tentativas de classificação automática alterando as áreas de treinamento em cada uma das tentativas. O resultado de acurácia geral variou entre 70% a 78%. Os subitens seguintes foram construídos com base no melhor resultado de acurácia geral do mapeamento, a partir do qual foi realizada uma edição manual para corrigir os erros de classificação.

4.3.1. Áreas de treinamento

O conjunto de áreas de treinamento produzido para o mapeamento resultou em 98 polígonos, totalizando 119,85 Km² de área. Esse valor equivale à 10,07% da área total de estudo. Atendendo ao protocolo WUDAPT, foram identificadas 11 tipos de ZCL, sendo

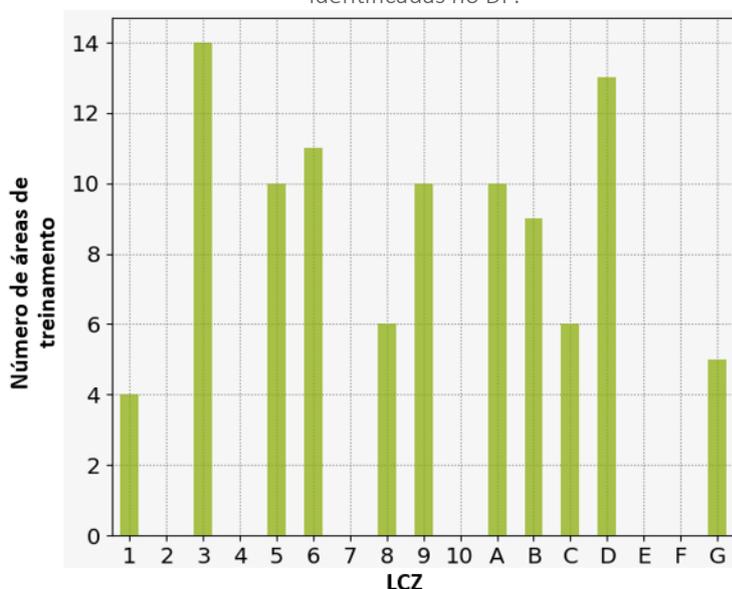
³⁶ Imagem acessada no QGis via geoserviço WMS (*Web Mapping Service*). SRC: EPSG:31983 - SIRGAS 2000 / UTM zone 23S. Disponível em: https://www.geoservicos1.segeth.df.gov.br/arcgis/services/Imagens/2021_50CM/ImageServer/WMSServer?request=GetLegendGraphic%26version=1.3.0%26format=image/png%26layer=2021_50CM

6 tipos de classes urbanas e 5 tipos de classes natural/rural. A Figura 57 apresenta um gráfico de frequência das classes identificadas no DF.

Atenta-se para a sub-representação de classes em razão do critério sobre o tamanho da área de treinamento (> 1Km²). Assim, não significa que as classes não treinadas não existam, apenas não puderam ser identificadas neste momento da classificação. Já classes como LCZ 3, LCZ 6 e LCZ D foram mais facilmente identificadas, obtendo-se maior número de áreas de treinamento, ao contrário da LCZ1.

Situações como essas foram avaliadas por Verdonck et al. (2019), apontando a menor frequência de uma classe na cidade à medida que essa possui menor número de áreas de treinamento, tendendo a diminuir o valor de acurácia. O mesmo raciocínio pode ser aplicado na situação oposta. A Tabela 5 mostra o quantitativo de área de treinamento para cada classe, notando-se que a LCZ 1 possui também o menor valor em área (km²), seguido pela LCZ 8. Os maiores valores de área acompanham a LCZ D e LCZ3.

Figura 57: Gráfico de distribuição de frequência de áreas de treinamento identificadas no DF.



Fonte: Gráfico gerado pelo *LCZ Generator* com referência Werneck, 2022.

Tabela 5: Quantitativo das áreas de treinamento.

Classe da área de treinamento	Área (Km ²)
LCZ 1 – compacta de alta elevação	3,64
LCZ 3 – compacta de baixa elevação	15,64
LCZ 5 – aberta de média elevação	10,34
LCZ 6 – aberta de baixa elevação	10,62
LCZ 8 – aberta com grandes edifícios de baixa elevação	5,42
LCZ 9 – esparsa de baixa elevação	10,19
LCZ A – árvores densas	11,35
LCZ B – árvores esparsas	13,30
LCZ C – vegetação arbustiva	9,26
LCZ D – vegetação rasteira	22,22
LCZ G – água	7,87
Total:	119,85

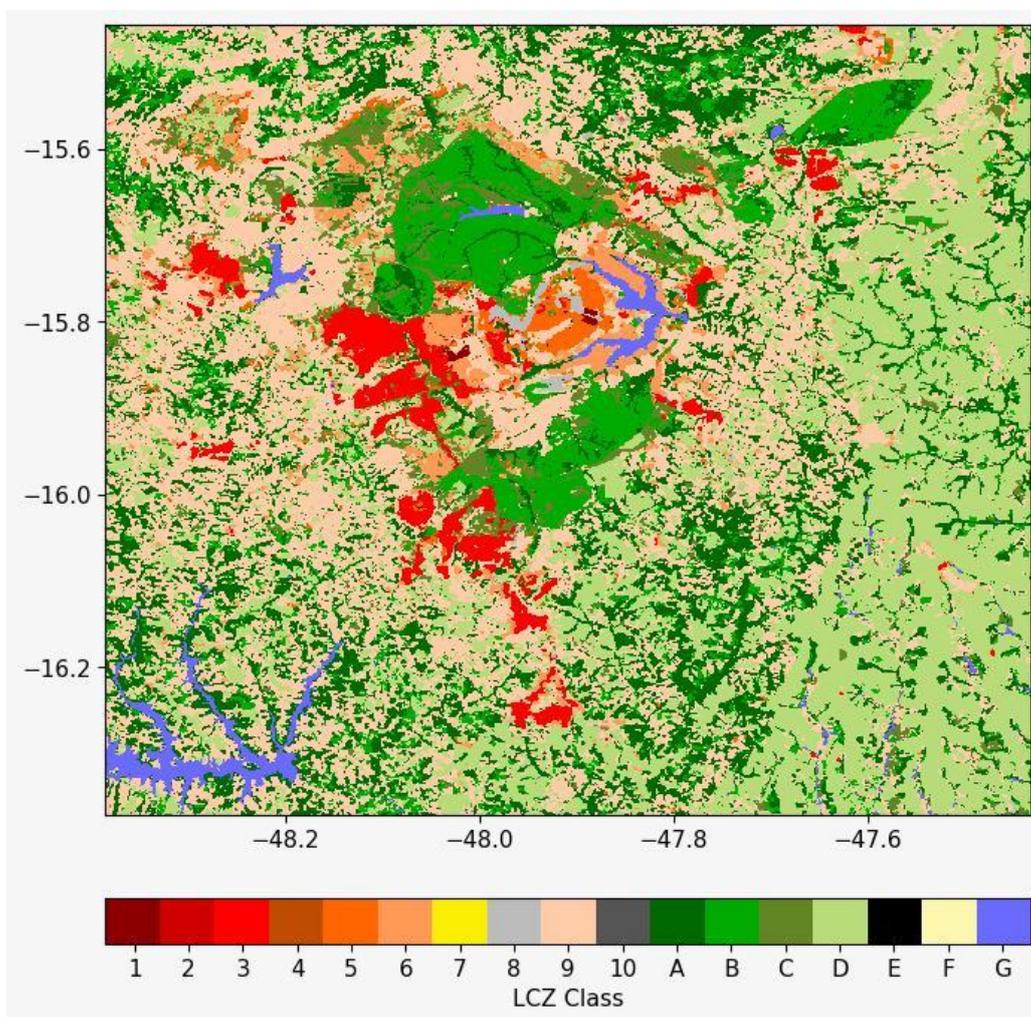
4.3.2. Mapa LCZ e acurácia

A distribuição espacial das LCZs sobre a ROI e o gráfico de acurácia, ambos produzidos pelo *LCZ Generator*, podem ser vistos na Figura 58 e Figura 59. Como mencionado, a acurácia geral foi de 78% (OA), a acurácia das classes com ocupação urbana (OAU) foi de 74% e a acurácia geral para classes urbanas *versus* naturais (OABu) foi de 95%. Já a acurácia ponderada (OAw) foi de 94%.

Na verificação por classe urbana, a LCZ 1 obteve o pior desempenho e a LCZ 3 o melhor, confirmando o esperado a partir da análise das áreas de treinamento. Ou seja, uma classe com pequenas áreas de treinamento tende a fornecer uma quantidade limitada de informações sobre ela, existindo a probabilidade que um classificador automático não a identifique corretamente (VERDONCK et al., 2019).

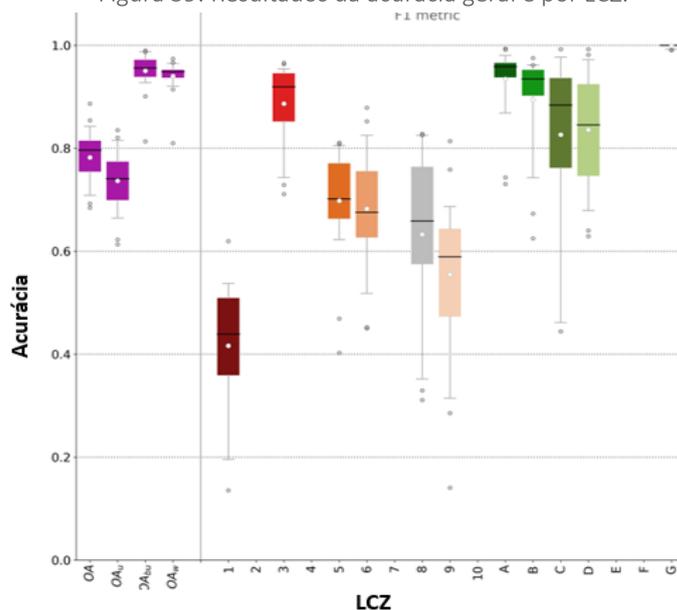
Especificamente sobre classes com edifícios em altura, como a LCZ 1, Wang et al. (2017) encontraram problema semelhante quando conduziu a classificação para Hong Kong, com o método do WUDAPT e o classificador do SAGA-GIS. Os autores relacionaram essa baixa acurácia à precária informação sobre a altura das edificações nas imagens do Landsat 8.

Figura 58: Distribuição espacial das LCZ sobre a ROI.



Fonte: Gerado pelo *LCZ Generator* com referência Werneck, 2022.

Figura 59: Resultados da acurácia geral e por LCZ.



Fonte: Gráfico produzido pelo *LCZ Generator* com referência Werneck, 2022.

Tendo em vista que a área de estudo foi delimitada a partir da macrozona urbana do DF, a imagem do mapeamento foi recortada conforme Figura 60. Com esse recorte, observou-se que a LCZ 9 e LCZ 3 são os tipos de ocupação urbana mais frequentes no DF e a LCZ 1 o menos frequente. Destaca-se assim o tipo de ocupação de baixa elevação como uma característica predominante no DF. Os tipos de área natural LCZ A e LCZ D são os mais frequentes dentro da macrozona urbana. A visão geral da distribuição de LCZs em porcentagens pode ser vista na Figura 61.

Figura 60: Distribuição espacial das LCZs sobre a área de estudo.

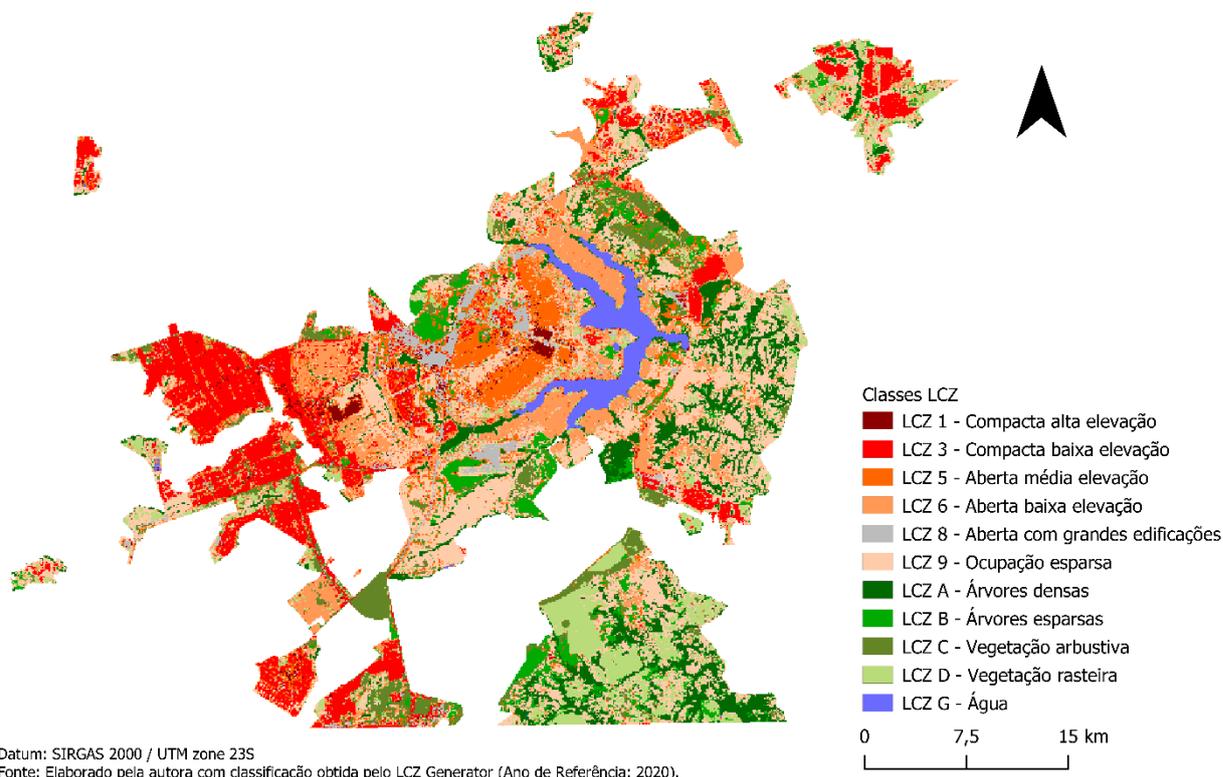
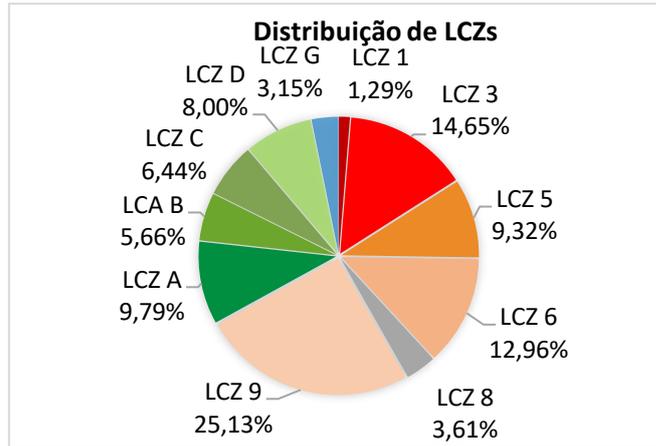


Figura 61: Porcentagem da distribuição de LCZs na área de estudo.



4.3.3. Reclassificação

Na comparação visual entre as classes LCZ e as imagens do Geoportal-DF e *Google Satellite* observou-se as áreas de correspondência e de confusão entre as classes. Entre os tipos urbanos, a LCZ 5, LCZ 1 e LCZ 9, proporcionalmente, evidenciaram os principais erros de classificação. A LCZ 1, por representar uma pequena fração do tecido urbano, apresentou erros rapidamente corrigidos. Entre as classes naturais/rurais, a LCZ D, LCZ B e LCZ A apresentaram os principais erros de classificação. A LCZ G apresentou a melhor correspondência com as imagens de alta resolução.

Observou-se *pixels* incorretamente classificados principalmente nas bordas da área urbana, nas transições entre classes e na borda do Lago Paranoá. Áreas homogêneas formadas pelo agrupamento de *pixels* tiveram seus vértices editados conforme necessidade de correção. As confusões mais frequentes na classificação foram esquematizadas por classes similares e dissimilares, vistas na Figura 62 e Figura 63.

Figura 62: Comparações de erros de classificação por classes similares.

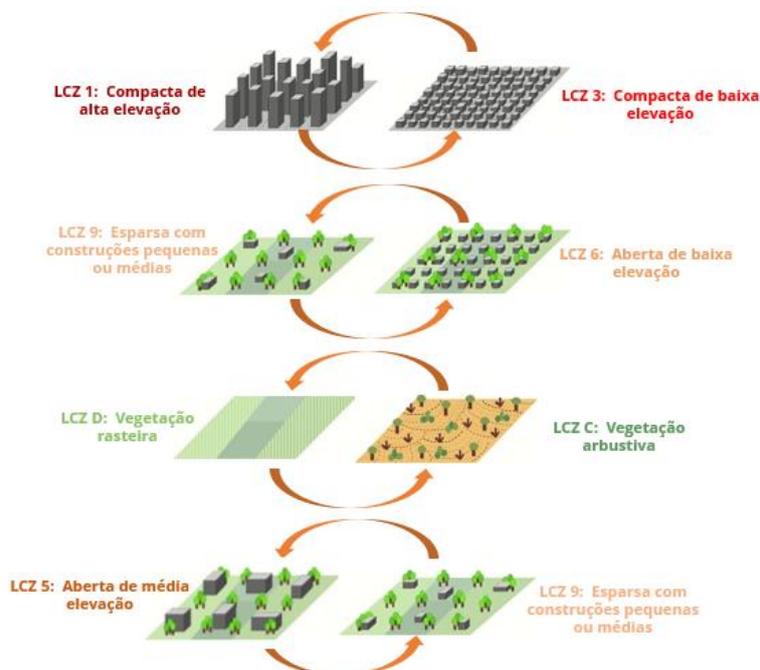
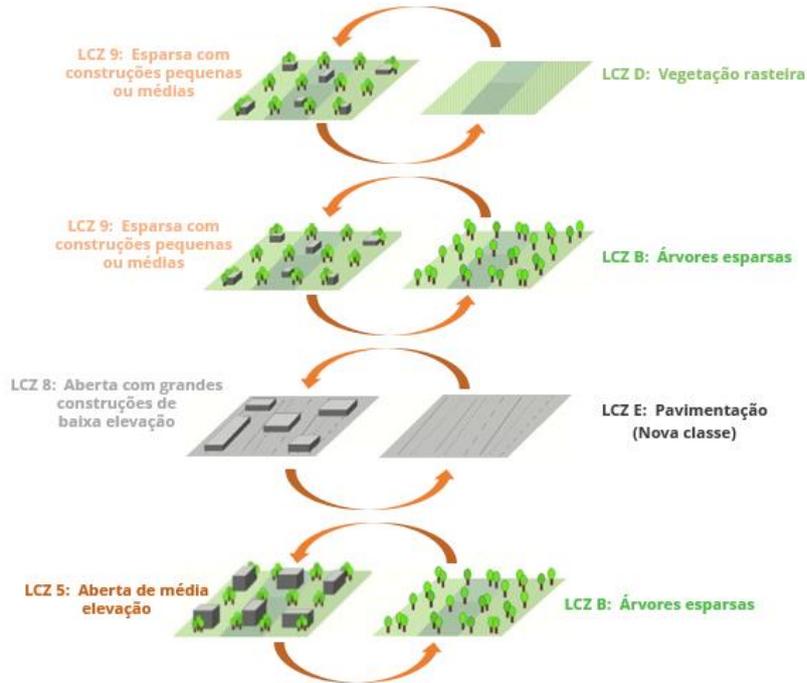
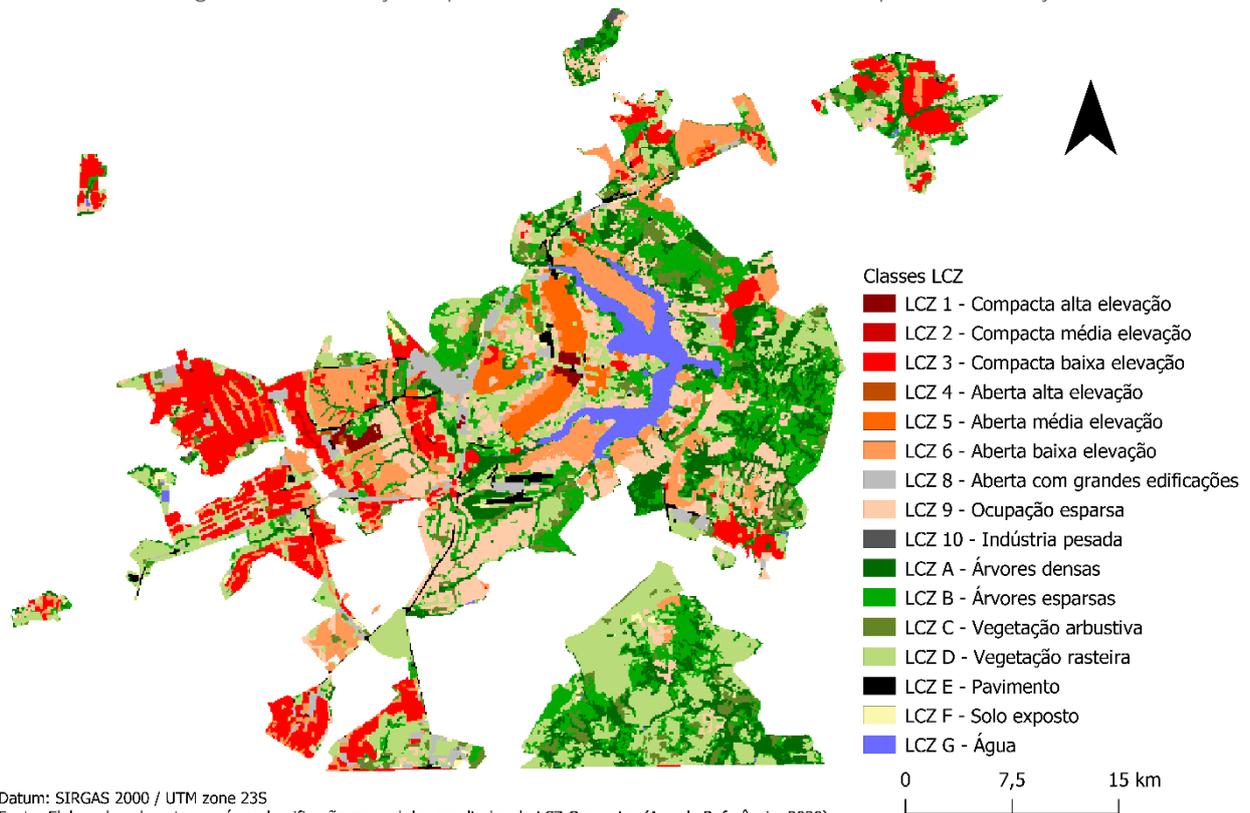


Figura 63: Comparações de erros de classificação por classes dissimilares.



No processo de edição manual, novas classes foram identificadas e rotuladas, uma vez que estavam sub-representadas ou desconsideradas durante o delineamento das áreas de treinamento. Assim, mesmo ocupando pequenas áreas, foram adicionadas ao mapeamento as classes: LCZ 2, LCZ 4, LCZ 10, LCZ E e LCZ F. Após reclassificação, a distribuição espacial das LCZs pode ser observada na Figura 64.

Figura 64: Distribuição espacial das LCZs sobre a área de estudo após reclassificação.

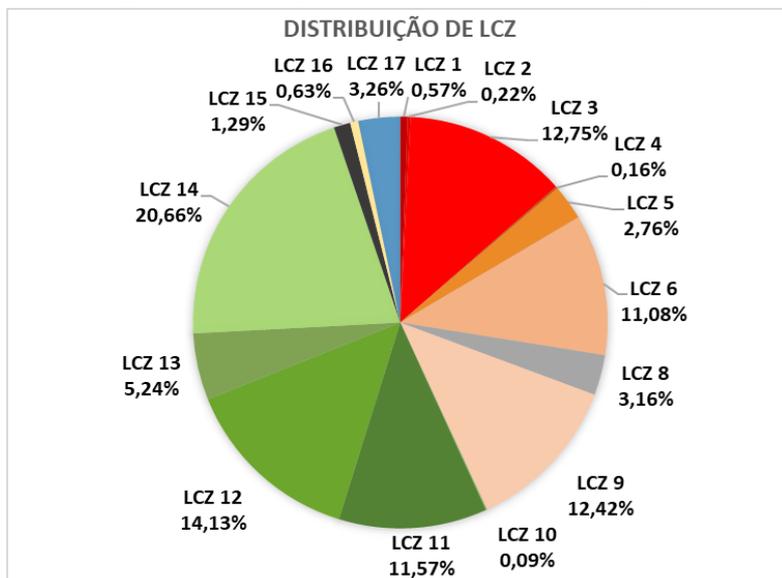


Datum: SIRGAS 2000 / UTM zone 23S

Fonte: Elaborado pela autora após reclassificação manual dos resultados do LCZ Generator (Ano de Referência: 2020).

Com as edições finalizadas, observou-se que a LCZ 3, LCZ 9 e LCZ 6 são os tipos de ocupação urbana mais frequentes no DF, respectivamente. Já a LCZ 10, LCZ 4 e LCZ 2 são as menos frequentes. Logo, confirma-se o destaque para o tipo de ocupação de baixa elevação como uma característica predominante no DF. Os tipos de área natural/rural LCZ D, LCZ B e LCZ A são os mais frequentes dentro da macrozona urbana. A visão geral da distribuição de LCZs em porcentagens pode ser vista na Figura 65.

Figura 65: Porcentagem da distribuição de LCZs na área de estudo após reclassificação.



SÍNTESE DAS CLASSES LCZ DA ÁREA URBANA DO DF

Um total de 16 classes, dentre as 17 classes principais, foram identificadas na área de estudo. Mesmo classes com pequenas dimensões, porém acima de 1 Km², foram consideradas pela importância do monitoramento, não apenas do campo térmico, mas também da dinâmica de expansão urbana.

O quantitativo de áreas está disponível na Tabela 6, demonstrando a maior presença de classes do tipo natural/rural/pavimento. A seleção das classes buscou atender às características das LCZs que melhor se encaixa nas observações. Informações resumidas de cada classe são descritas adiante.

Tabela 6:Quantitativo de área de LCZs.

Classes de ocupação urbana	Área (Km ²)	Classes naturais/rurais/pav.	Área (Km ²)
LCZ 1 – compacta de alta elevação	6,77	LCZ A – árvores densas	138,03
LCZ 2 – compacta de média elevação	2,60	LCZ B – árvores esparsas	168,56
LCZ 3 – compacta de baixa elevação	152,13	LCZ C – vegetação arbustiva	62,53
LCZ 4 – aberta de alta elevação	1,88	LCZ D – vegetação rasteira	246,53
LCZ 5 – aberta de média elevação	32,98	LCZ E – pavimento	15,41
LCZ 6 – aberta de baixa elevação	132,21	LCZ F – solo exposto	7,49
LCZ 8 – aberta com grandes edifícios	37,62	LCZ G – água	38,9
LCZ 9 – esparsa de baixa elevação	148,43	-	-
LCZ 10 – indústria	1,10	-	-
Total	515,72	Total	677,45

LCZ 1 – compacta de alta elevação

Classe com predominância de edifícios em altura e cobertura do solo impermeabilizada. Mapeada em áreas do setor gregário do Plano Piloto e na RA Águas Claras (Figura 66). Diferentemente do sinal espectral, na identificação visual, essa classe se confunde com a LCZ 4 pela dificuldade de percepção dos limiares dos afastamentos e do fator de visão do céu. Um importante diferenciador foi o tipo de cobertura do solo.

Figura 66: LCZ 1 - (a) Setor Hoteleiro Norte; (b) Setor Autarquias Norte e (c) Setor Hoteleiro Norte.

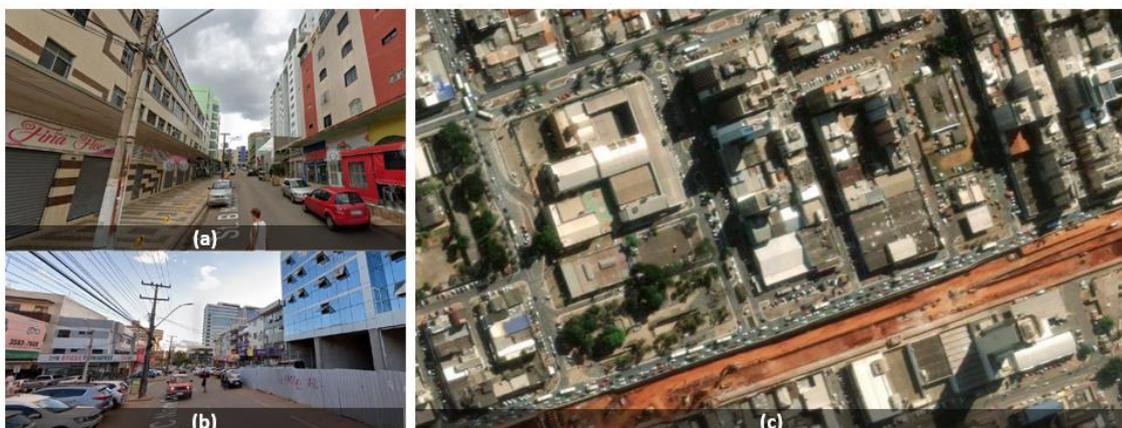


Fonte: (a) e (b) - acervo da autora e (c) – Geoportal-DF.

LCZ 2 – compacta de média elevação

Ocupação adensada de uso misto (residencial, comercial e institucional) e cobertura do solo predominantemente impermeabilizada. Os edifícios possuem variações de altura, em média entre 3 a 10 pavimentos, ora com altura uniforme ora diferenciada (Figura 67). Classe observada em Taguatinga de forma linear, dividindo áreas residenciais. Também foi encontrada no Guará II, Setor Bancário Sul e pequenas áreas de Ceilândia.

Figura 67: LCZ 2 – (a) Taguatinga; (b) Ceilândia e (c) Taguatinga



Fonte: Google Maps.

LCZ 3 – compacta de baixa elevação

A padrão urbano mais abundante no DF é de construções adensadas de uso predominante residencial, edifícios de até 3 pavimentos e cobertura do solo majoritariamente impermeabilizada e pouca presença de vegetação. Encontrada em

áreas periféricas, ocupações em processo de regularização fundiária e vetores de crescimento urbano como Ceilândia. Grandes polígonos de área homogênea foram formados, sugerindo uma paisagem monótona (Figura 68).

Figura 68: LCZ 3 – RA Itapuã



Fonte: (a) e (b) - acervo da autora e (c) – Geoportal-DF.

LCZ 4 – aberta de alta elevação

Classe com predominância de edifícios em altura, presença de árvores esparsas e vegetação rasteira. Foi mapeada em áreas residenciais como na RA Águas Claras (Figura 69) e áreas em processo de consolidação em Samambaia e Setor de Autarquias Norte, onde lotes vazios entre os edifícios funcionam como áreas permeáveis.

Figura 69: LCZ 4 – RA Águas Claras



Fonte: Google Maps.

LCZ 5 – aberta de média elevação

Classe característica do período modernista encontrada nas unidades de vizinhança da Asa Sul, Asa Norte, Sudoeste e Noroeste no Plano Piloto (Figura 70). Também foi observada em áreas residenciais do Lago Norte e áreas institucionais. Nesses casos, os lotes dão lugar às projeções dos edifícios e a área pública possui abundância de área permeável. A Asa Sul e a Asa Norte destacam-se com a presença de gramados e arborização de grande porte, chegando a formar arranjos adensados de árvores, o que pode ter gerado confusões de classificação com a LCZ A e LCZ B. Já o

Noroeste, setor em consolidação, encontra-se no limiar oposto, com árvores esparsas, frequente uso de palmeiras e solo exposto ainda em função das obras.

Figura 70: LCZ 5: (a) Asa Sul; (b) Asa Norte; (c) Esplanada dos Ministérios e (d) Asa Norte.



Fonte: (a), (b) e (c) - acervo da autora e (d) – Geoportal-DF.

LCZ 6 – aberta de baixa elevação

O terceiro tipo urbano mais frequente no DF é uma classe caracterizada por uso misto e residenciais de médio e alto padrão como Lago Sul, Lago Norte, Jardim Botânico, entre outras, apresentando edificações isoladas e afastamentos regulares (Figura 71) . No DF, as áreas verdes geralmente são mais abundantes em áreas privadas, como os jardins e os quintais dos lotes. Essa classe é também destaque em condomínios fechados, sendo os mais recentes menos arborizados.

Figura 71: LCZ 6 – Lago Norte.



Fonte: Google Maps.

LCZ 8 – aberta com grandes edificações

A LCZ 8 é definida pela presença de arranjo aberto de grandes edificações de baixa elevação, cobertura do solo predominantemente impermeável e pouca vegetação. Foi identificada no Setor de Indústria e Abastecimento (SIA) e também em áreas comerciais como *shopping centres*, supermercados e edifícios escolares esparsados por grandes estacionamentos com pavimentação asfáltica (Figura 72). Alguns tipos de lotes geralmente não possuem afastamentos laterais e as construções tornam-se geminadas produzindo o efeito de grandes edificações. Isso foi observado em Taguatinga, Ceilândia, Sobradinho, entre outras localidades periféricas.

Figura 72: LCZ 8 – (a) Taguatinga; (b) e (c) SIA.



Fonte: Google Maps.

LCZ 9 – ocupação esparsa com edificações pequenas ou médias

O segundo tipo urbano mais frequente no DF é definido por um arranjo esparsado de edifícios de tamanhos variados e de baixa elevação. Stewart (2011) pontua como uma classe periurbana de transição urbana-rural/natural com função residencial ou rural, com abundância de superfície permeável. No DF, essa classe foi observada também no Plano Piloto em áreas como o Campus Darcy Ribeiro da UnB, Setor de Embaixadas e nas margens do Lago Paranoá, provavelmente em função da incorporação de áreas naturais no plano de Lucio Costa. Assim como a LCZ 6, essa classe é comum em condomínios fechados no Parkway, Jardim Botânico, entre outros.

Figura 73: LCZ 9 – (a) UnB/Campus Darcy Ribeiro; (b) e (c) Parkway.



Fonte: Google Maps.

LCZ 10 – indústria pesada

A LCZ 10 é definida por arranjo esparsado de edifícios e estruturas industriais como torres e tanques, de baixa ou média elevação, escassês de vegetação e superfícies predominantemente impermeáveis. Essas áreas emitem grande quantidade de poluentes atmosféricos e calor antropogênico resultantes de processos mecânicos e químicos (STEWART, 2011). Foi a menor classe identificada no DF, basicamente indústria cimentícia e de fertilizantes localizadas na Fercal.

Figura 74: LCZ 10 – Indústrias cimentícias.



Fonte: Geoportal-DF.

LCZ A – arborização densa

Classe definida por arranjo denso de árvores que, ao nível dos olhos observa-se alta obstrução do céu. Pode ser característica de remanescentes florestais, áreas de proteção, floresta urbana, área de cultivo de árvores, cinturões verdes e parques urbanos. Presente na Zona Urbana de Uso Controlado, Zona Urbana de Expansão e Qualificação e na Zona de Contenção Urbana.

LCZ B – arborização esparsa

Classe definida por arranjo esparsado de árvores. Pode ser característica de remanescentes florestais, áreas de proteção, floresta urbana, área de cultivo de árvores, cinturões verdes, parques urbanos e cemitérios arborizados. É a segunda classe natural mais frequente e está presente na área urbana de forma irregular e inexistente em áreas mais adensadas.

LCZ C – vegetação arbustiva

Arranjo aberto de vegetação arbustiva de altura média de 2 metros e o recobrimento do solo pode apresentar areia ou solo exposto. Foi identificada em áreas verdes com vegetação do cerrado, áreas recreativas e área de agricultura.

LCZ D – vegetação rasteira

Classe definida por cobertura do solo com plantas herbáceas de até 1 metro de altura, grama, com presença ou não de árvores esparsas. É a classe natural mais frequente no DF e foi identificada em áreas verdes, áreas recreativas e áreas de agricultura.

LCZ E – pavimento

A LCZ E é definida por áreas com superfícies predominantemente impermeáveis, com poucas ou nenhuma arborização e edificação. No DF, essa classe atende áreas aeroportuárias, intersecções de sistema viário e subestações de energia.

LCZ F – solo exposto

A LCZ F é definida por superfícies de solo exposto ou areia, com pouca ou nenhuma presença de plantas. É característica de áreas de aterro sanitário, trechos em obras e mineração. É a menor área de classe natural/rural identificada no DF.

LCZ G - água

A maior representatividade dessa classe ocorre no Lago Paranoá. Também identificou-se a Lagoa do Jaburú no Plano Piloto e pequenos reservatórios na área periférica.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo discutiu a importância do conhecimento da morfologia urbana e descreveu a aplicação do sistema de classificação de zonas climáticas locais para a área urbana do Distrito Federal. Diferentemente das classificações da morfologia urbana já empregadas no Distrito Federal (vide Capítulo 3), as LCZ representam o tecido urbano na escala local e sob o ponto de vista climático. Portanto, confirma-se como um sistema de classificação da paisagem urbana pertinente para este estudo.

Soma-se a isso a disseminação da metodologia entre arquitetos e urbanistas, iniciada em 2015 por influência do WUDAPT, atuando diretamente nas conferências *Passive Low Energy Architecture* (PLEA) desde 2017, contribuindo com informações e ferramentas digitais para sua aplicação. Em 2018, a conferência internacional de climatologia urbana da IAUC (*International Association for urban Climate*) também proporcionou sessões temáticas sobre o tema.

Os procedimentos metodológicos contaram com o protocolo de mapeamento digital do WUDAPT baseado em imagens satelitais e com a ferramenta de classificação supervisionada chamada *LCZ Generator*. A imagem classificada automaticamente obteve 78% de acurácia geral e as áreas com classificações errôneas puderam ser reclassificadas em uma edição manual. A questão da acurácia para esse tipo de classificação supervisionada não parece bem delimitada na literatura. Wang et al (2018) apontaram que autores idealizam uma meta de 85% de acurácia geral para um mapeamento temático. Entretanto, os resultados reportados no portal WUDAPT variam desde 60% até 90%. Nota-se ainda que a acurácia das classes naturais/cobertura do solo são mais elevadas que as classes urbanas.

No total, 16 classes, dentre as 17 classes principais, foram identificadas na área de estudo. Os programas e as imagens utilizadas foram disponibilizadas gratuitamente nos respectivos portais dos seus desenvolvedores, proporcionando um método de mapeamento de baixo custo.

O recorte da área urbana de estudo foi limitado ao DF e partiu da poligonal da sua Macrozona Urbana. Entretanto, o método pode ser aplicado nas áreas conurbadas com o Estado de Goiás e em todo EMB ou RIDE, podendo-se aproveitar o conjunto de áreas de treinamento deste trabalho e expandí-lo.

Como parte dos procedimentos de trabalho da tese, o resultado deste capítulo consolida a espacialização das regiões intra-urbanas homogêneas do DF. Essa base será utilizada no estudo das relações morfológicas com os índices espectrais e nas análises estatísticas subsequentes.

REFERÊNCIAS

- Ching, J., Mills, G., Bechtel, B., See, L., Feddema, J., Wang, X., Ren, C., Brousse, O., Martilli, A., Neophytou, M., Mouzourides, P., Stewart, I., Hanna, A., Ng, E., Foley, M., Alexander, P., Aliaga, D., Niyogi, D., Shreevastava, A., Bhalachandran, P., Masson, V., Hidalgo, J., Fung, J., Andrade, M., Baklanov, A., Dai, W., Milcinski, G., Demuzere, M., Brunsell, N., Pesaresi, M., Miao, S., Mu, Q., Chen, F., Theeuwes, N. WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 99, 2018, p. 1907–1924. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0236.1>
- Governo do Distrito Federal. CODEPLAN. Companhia de Planejamento do Distrito Federal. Nota Técnica nº 1/2014. Delimitação do Espaço Metropolitano de Brasília (Área Metropolitana de Brasília). Brasília: CODEPLAN, 2014. Disponível em: <https://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/Delimita%C3%A7%C3%A3o-do-Espa%C3%A7o-Metropolitano-de-Bras%C3%ADlia-AMB.pdf>
- Governo do Distrito Federal. ZEE – Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Federal. Pré-Zoneamento. Brasília, 2017. Disponível em: https://www.zee.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/05/ZEEDF_CT03_Pre-Zoneamento_03E-Estrategias-de-Ordenamento.pdf
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017.
- Bechtel, B.; Alexander, P.; Böhner, J.; Ching, J.; Conrad, O.; Feddema, J.; Mills, G.; See, L. Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4 (1), p. 199-219, 2015. DOI:10.3390/ijgi4010199.
- Davenport, A.G.; Grimmond, C. S. B.; Oke, T. R. e Wieringa, J. Estimating the roughness of cities and sheltered country. *12th Applied Climatology*, American Meteorological Society, p. 96-99, 2000. Disponível online em: https://www.researchgate.net/publication/224001525_Estimating_the_roughness_of_cities_and_sheltered_country
- Demuzere, M., Mihara, T., Redivo, C. P., Feddema, J., & Setton, E. Multi-temporal LCZ maps for Canadian functional urban areas. No prelo, 2020. <https://doi.org/10.31219/osf.io/h5tm6>
- Demuzere, M., Kittner, J. e Bechtel, B. LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Front. Environ. Sci.* 9:637455, 2021.
- Ferreira, L. S.; Prata-Shimomura, A.; Ferreira, A.; Duarte, D. H. Mapping Local Climate Zones for São Paulo Metropolitan Region: a comparison between the local climate zone map and two other maps. In: *Passive and Low Energy Architecture (PLEA) Proceedings...Edinburgh*, p.1725-1732, 2017.
- França, A. M. S.; Sano, E. E. Mapeamento de áreas de campo limpo úmido no Distrito Federal a partir de fusão de imagens multiespectrais. *Sociedade e Natureza (Online)*, Uberlândia, v. 23, n. 2, p. 197-209, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-45132011000200004>. Acesso em 01 de Agosto de 2019.
- Hidalgo, J.; Lemonsu, A.; Masson, V. Between progress and obstacles in urban climate interdisciplinary studies and knowledge transfer to society. *Ann. NY. Acad. Sci.*, 2019, p. 5-18.
- Hidalgo, J.; Dumas, G.; Masson, V.; Petit, G.; Bechtel, B.; Bocher, E.; Foley, M.; Schoetter, R.; Mills, G. Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations. *Urban Climate*, Elsevier, 2019, 27, p.64-89.
- IBGE. Classificação e caracterização dos espaços rurais e urbanos do Brasil : uma primeira aproximação (Estudos e pesquisas. Informação geográfica, ISSN 1517-1450 ; n. 11). IBGE, Coordenação de Geografia – Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 84p.

- Landis, J. R.; Koch, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.
- Lima, M. e Amorim, F. Random Forest. LAMFO - Laboratório de Aprendizado de Máquina em Finanças e Organizações da FACE/UnB, 2020. Disponível em: <https://lamfo-unb.github.io/2020/07/08/Random-Forest/#:~:text=Random%20Forest%20%C3%A9%20um%20m%C3%A9todo,aleat%C3%B3rios%20independentes%20e%20identicamente%20distribu%C3%ADdos>.
- Maigua, P. Ciudad y cambio microclimático. Tese de Doutorado pelo Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 2020.
- Stewart, I. D. Developing a field guide to identify local climate zones in cities. In: International Conference On Urban Climate, 10.; Symposium On The Urban Environment, 14., 2018, New York. Anais [...]. New York: [s. n.], 2018. p. 1-6.
- Stewart, I.D.; Oke, T.R. Local Climate Zones For Urban Temperature Studies. *American Meteorological Society*, v.93, p. 1879-1900, 2012.
- Stewart, I.D.; Oke, T.R. e Krayenhoff, S. Evaluation of the local climate zone scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 34: 1062-1080, 2014.
- Vandamme, S.; Demuzere, M.; Verdonck, M.-L.; Zhang, Z.; Van Coillie, F. Revealing Kunming's (China) Historical Urban Planning Policies Through Local Climate Zones. *Remote Sensing*, volume 11, 1731, 2019.
- Verdonck, Marie-leen, Demuzere, Matthias, Bechtel, Benjamin, Beck, Christoph, Brousse, Oscar, Droste, Arjan, Fenner, Daniel, Leconte, Francois, & Van Coillie, Frieke. The Human Influence Experiment (Part 2): Guidelines for Improved Mapping of Local Climate Zones Using a Supervised Classification. *Urban Science*, 3(1), 2019. <https://doi.org/10.3390/urbansci3010027>
- Villaça, F. Espaço Intra-Urbano no Brasil. São Paulo: Studio Nobel, 1998. 373p.
- Wang, C.; Middel, A.; Myint, S. W.; Kaplan, S.; Brazel, A. J.; Lukasczyk, J. Assessing local climate zones in arid cities: The case of Phoenix, Arizona and Las Vegas, Nevada. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 141, pp. 59–71, 2018. doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.04.009.
- Werneck, Daniela. WUDAPT Level 0 training data for Brasília (Brazil, Federative Republic of), submitted to the LCZ Generator, 2022. Disponível em: https://lcz-generator.rub.de/factsheets/dbf1d796824a289167c56b62d387d978ab789f74/dbf1d796824a289167c56b62d387d978ab789f74_factsheet.html
- Zhou, D.; Xiao, J.; Bonafoni, S.; Berger, C.; Deilami, K.; Zhou, Y.; Froking, S.; Yao, R.; Qiao, Z.; Sobrino, J.A. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sensing*. 11, 48, p. 1 – 36, 2019.

5.

CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DAS LCZ

EXPLORANDO A VARIABILIDADE DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

INTRODUÇÃO

No capítulo anterior, as imagens satelitais foram utilizadas na detecção da extensão e da morfologia da cidade. Além disso, as imagens satelitais proporcionam diversos indicadores que podem ser integrados ao estudo dos efeitos no clima urbano (PINHEIRO, 2021). Apesar do objetivo principal do método LCZs de Stewart e Oke (2012) tenha sido focado em estudos de ilhas de calor atmosférica, seu emprego aliado à detecção remota de temperatura de superfície (T_s) tem sido enfatizado desde a iniciativa do WUDAPT.

Neste Capítulo discute-se a conexão entre o campo térmico da cidade integrado à divisão da área urbana em LCZs. A fim de avaliar a distribuição intra-urbana da T_s , utilizou-se imagens satelitais que incorporam infravermelho termal e técnicas de processamento digital de imagens para gerar mapas temáticos. Outros índices espectrais foram incorporados para o entendimento das suas relações com a T_s , a saber: índice de vegetação melhorada (EVI) e índice de umidade por diferença normalizada (NDMI).

O primeiro tópico deste capítulo apresenta uma complementação teórica sobre a integração das LCZs com as características espectrais das imagens de satélite, e processamento digital de imagens. Posteriormente apresenta-se o método para a extração das informações espectrais. Para finalizar, os resultados são apresentados em mapas temáticos e estatística descritiva, além das discussões sobre os indicadores obtidos e as diferenças nas suas distribuições no espaço intra-urbano.

5.1. INTEGRAÇÃO DE LCZs COM ESTUDOS DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

Partindo do propósito original das LCZs sobre a descrição da paisagem urbana e natural/rural para estudos de temperatura do ar, diversos autores enfatizam também seu papel no estudo da T_s (OCHOLA et al, 2020; BARTESAGHI KOC et al, 2018; ZHAO, 2018; CAI et al, 2018). Bartesagui Koc et al (2018) investigaram a T_s como um descritor para diferenciar as classes urbanas e naturais e enfatizam que os parâmetros das

superfícies urbanas que definem as classes possuem influência na temperatura do ar no nível do pedestre, como o tipo de cobertura do solo.

Entretanto, os mesmos autores colocam alguns desafios na integração de LCZs com os dados de sensorialmento remoto (SR) termal, principalmente sobre a qualidade dos dados, sua periodicidade e as mudanças temporais da vegetação. Além disso, a Ts é afetada por fatores físicos como o sombreamento proporcionado pela geometria urbana, bem como por fatores dinâmicos como as atividades humanas (ZHAO, 2018).

Diferentemente das limitações das medições pontuais de variáveis climáticas realizadas em campo, a detecção remota de Ts possui uma cobertura espacial completa da cidade, o que se alinha à extensão espacial do mapeamento de LCZs (KHOSHNOODMOTLAGH et al., 2021). A integração com o SR pode ampliar o olhar do planejamento e desenho urbano para as diferenças intra-urbanas e levantar questões sobre ações de mitigação do calor de uma zona que podem ser transferíveis para outra zona, além de apoiar estudos de ICU (OCHOLA et al., 2020).

Soma-se a isso o estabelecimento da Ts como uma variável climática essencial pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, s.d.), que contribui para a caracterização do clima da Terra. O mapa de temperatura da superfície da terra está entre os produtos de um grupo de variáveis vinculadas relacionadas à categoria do solo e pode ser usado também como um indicador de mudança climática (WMO, s.d.).

Outros índices espectrais integram as análises de LCZs com o ambiente térmico urbano. Dentre eles é recorrente o estudo de índices de vegetação estimados por SR, o que pode ser observado nos trabalhos de Ferreira (2019), Maigua (2020) e Ferreira (2020). Os principais trabalhos que influenciaram a construção dos métodos estão elencados na Tabela 7.

Tabela 7. Síntese dos principais trabalhos analisados com relação entre LCZ e índices espectrais.

Autor	Índices espectrais	Sensor	Período de análise	Análise estatística	Região de interesse
Ferreira, 2020	Ts, FVC, NDMI, albedo	Landsat 8	2014 - 2015	Correlação Spearman, AEDE, análise de cluster	São José dos Campos - SP
Maigua, 2020	Ts	Landsat 8	2019	Correlação Pearson	Quito - Equador
Ochola et al, 2020	Ts	Landsat 8	2013 - 2018	Boxplot	Nairobi - Kenya
Zhao et al, 2020	Ts, NDVI	Landsat 8	Verão/inverno 2015	Boxplot, Anova, Tukey-HSD	Dalas, San Antonio e Austin - EUA
Ferreira, 2019	Ts, EVI, NDVI	MODIS	2002 a 2017	Boxplot, análise de tendência	Região Metropolitana SP
Cai et al, 2018	Ts	Landsat 8 e Aster	2015	Média	Pearl River Delta - China
Wang et al, 2018	Ts	Landsat 8 e Aster	2015 (diurno) 2016 (noturno)	Valores máximo, mínimo e desvio padrão	Phoenix e Las Vegas - EUA
Bartesaghi Koc et al, 2018	Ts	Hypex VNIR1600	4/8/12 (diurno) 6/8/12(not.)	Boxplot, Anova	Sydney - Austrália
Prata-Shimomura e Ferreira, 2018	Ts	MODIS	2016	Média e desvio padrão	Macrometrópole Paulistana
Zhao, 2018	Ts	Landsat 8	Verão 2015	Boxplot, Anova, Tukey-HSD	San Antonio - EUA
Galetic et al, 2016	Ts	Landsat 8 e Aster	Vários	Boxplot, Anova, Tukey-HSD	Praga e Berna – Rep. Tcheca

5.1.1. Seleção de índices espectrais

Conforme visto no Capítulo 2, a T_s refere-se à quantidade de radiação emitida pela superfície da terrestre, também chamada de temperatura radiométrica, que é diferente da temperatura medida pelo fluxo de calor (WENG et al. 2019). Dessa forma, o SR da região do infravermelho termal oferece uma oportunidade para estimar essa informação que é amplamente utilizada em estudos de mudanças climáticas, ciclo hidrológico, vegetação, clima urbano, entre outros (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al. 2014).

Para além do estudo da T_s , buscou-se outros índices que vão ao encontro da visão da classificação da morfologia urbana com viés climático. Atenta-se assim para o entendimento da área urbana composta por uma mistura de elementos como edifícios, árvores, parques, lago, entre outros. Esses elementos podem estar próximos e influenciando mutuamente suas funções, dentre elas a regulação climática.

Tendo em vista a preocupação com a supressão da vegetação acarretada pela expansão urbana, principalmente arbórea, e o impacto associado aos processos de resfriamento da área urbana, a seleção de um índice de vegetação é pertinente para este estudo. Tradicionalmente o NDVI é usado como indicador da presença de vegetação e para estimar a sua relação com a T_s . Aqui optou-se pelo EVI, conceituado no Capítulo 2, por ser um índice que minimiza os efeitos de solos e da atmosfera e que é mais sensível às variações na estrutura do dossel (HUETE et al, 1997).

Também foi selecionado o índice NDMI, a partir do trabalho de Li et al (2017), Tan et al (2020) e Ferreira et al (2021). Os autores incluíram nas suas investigações o índice NDMI como um indicador da presença de umidade na vegetação, um fator que também influencia o balanço de energia. Tendo em vista as duas estações climáticas do DF, esse fator pode ser relacionado à saúde da vegetação e às áreas permeáveis. Quando a chuva é abundante, a manutenção da vegetação urbana requer pouca ou nenhuma irrigação. No entanto, na estação seca, o mesmo não se observa.

5.1.2. Processamento digital de imagens em nuvem

As técnicas voltadas para a manipulação de dados adquiridos por sensores recebem o nome de processamento digital de imagens (DPI/INPE, s.d.). Assim, além das imagens, o processamento digital de imagens necessita de algoritmos para execução de operações matemáticas dos dados, visando as suas transformações em imagens para uma determinada aplicação (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Um grande avanço pode ser observado com o processamento em nuvem que vem se consolidando na última década. A plataforma de computação na nuvem gratuita Google Earth Engine (GEE) oferece recursos de computação de alto desempenho, algoritmos de processamento e acesso a um catálogo de dados geoespaciais como a série Landsat, Sentinel-1, Sentinel-2, MODIS, entre outros (GORELICK et al, 2017).

No Brasil, um exemplo emblemático do uso da plataforma GEE é o projeto MapBiomass - Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. É uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa que utiliza processamento em nuvem e classificadores de imagens desenvolvidos e operados a partir do GEE para gerar uma série histórica de mapas de uso e cobertura do solo (MAPBIOMASS, 2021).

Outras vantagens do GEE referem-se à dispensa de armazenar imagens de satélites em um computador pessoal e a possibilidade de criar algoritmos ou customizar qualquer algoritmo com código aberto (MOURA et al., 2020). Ainda reforça-se a

independência de programas de processamento digital de imagens comerciais pagos e a popularização dos recursos, incluindo aplicações dos conhecimentos gerados para o planejamento urbano como estudos climáticos, de hidrologia e de expansão urbana (MIDDEL et al, 2022).

Para a criação de algoritmos, é comum a utilização da linguagem de programação Python e JavaScript, sendo esse último utilizado no editor de código da plataforma do GEE. Neste trabalho optou-se pela linguagem de programação Python, criada por Guido van Rossum em 1991. É mantido pela Python Software Foundation, uma organização sem fins lucrativos.

Trata-se de uma linguagem interpretada e orientada a objetos, o que significa que o código dos scripts desenvolvidos na linguagem não são convertidos para linguagem de máquina para serem executados em um processo conhecido como compilação (Python Software Foundation, 2022). Ao invés disso, os algoritmos passam por um programa interpretador que realiza os cálculos e ações especificados na máquina onde está instalado.

O Python vem ganhando popularidade por possuir uma sintaxe simples, o que facilita o desenvolvimento de um código eficiente e de fácil compreensão. Além disso, por possuir inúmeras bibliotecas disponíveis, o Python também é muito versátil, sendo capaz de lidar com vários tipos de tarefas (Python Software Foundation, 2022). Dentre as possibilidades está a capacidade de processar imagens de satélite, como as disponibilizadas na plataforma do GEE (GORELICK et al, 2017).

5.2. MÉTODOS

O método contempla procedimentos para estimar as características espectrais por meio de SR, utilizando imagens satelitais da coleção Landsat 8. Posteriormente buscou-se a integração entre os resultados processados e as classes de LCZs identificadas na área de estudo descrita no Capítulo 4. Os processamentos e análises são para o ano de 2020 e foram divididos de acordo com as estações climáticas do DF: quente-seca e quente-úmida.

Os dados utilizados e o processamento aplicado neste estudo são baseados na computação em nuvem no ambiente do GEE. Foi utilizado o *Earth Engine Python API (Application Programming Interface)*, que é uma interface de programação instalada em um computador pessoal para interagir com o GEE, sem a necessidade de utilizar o seu navegador.

Conforme recomendação do GEE, utilizou-se a API via Conda, que é um sistema de gerenciamento de pacotes de código aberto criado para programas desenvolvidos em *Python*. O Conda é fornecido pela distribuição Anaconda e sua versão Miniconda, que é uma plataforma de programação para ciência de dados³⁷. Neste trabalho utilizou-se o Conda a partir do Miniconda.

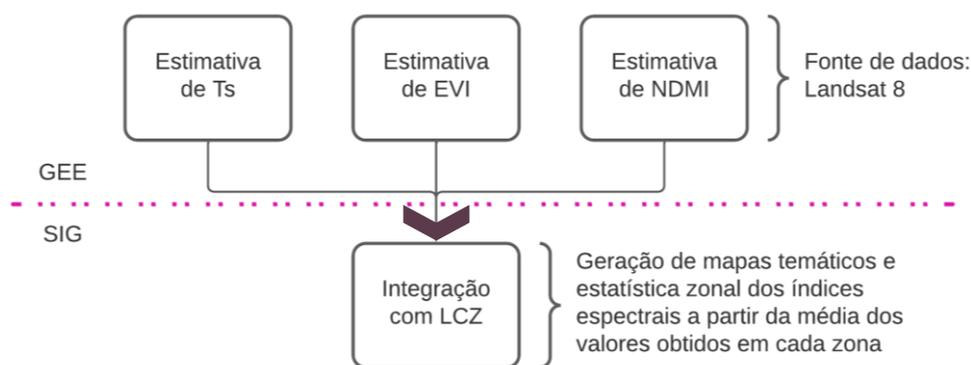
Para a integração dos dados, foi utilizado um programa de sistema de informação geográfica (SIG), o QGIS na versão Bucaresti (3.12), que permite visualização de dados, produção de estatística zonal e mapas temáticos. Para análise descritiva dos dados foi utilizado o programa R (4.1.2), acessado pela interface RStudio (versão 2022.02.0+443

³⁷ Disponível em: <https://anaconda.org/conda-forge/earthengine-api>. O roteiro de instalação recomendado pelo GEE está disponível em: https://developers.google.com/earth-engine/guides/python_install-conda

"Prairie Trillium"). O MS Excel foi empregado para armazenamento dos dados em planilhas. As versões dos programas utilizados, exceto o MS Excel, são gratuitas.

Para a análise exploratória de dados espaciais foi utilizado o programa Geoda, produzido pela Universidade de Chicago³⁸. O programa é gratuito e foca na análise de dados espaciais exploratórios, como estatísticas de autocorrelação espacial. A Figura 75 reúne a visão geral do fluxo de trabalho que será detalhado nos itens seguintes.

Figura 75. Visão geral do método de trabalho.



5.2.1. Estimativa da temperatura de superfície

Existem diferentes algoritmos propostos para estimar a Ts e corrigir os efeitos atmosféricos das imagens da missão Landsat. Neste trabalho foi utilizado o algoritmo do tipo canal único (SC - tradução livre de *single channel*), desenvolvido por Jiménez-Muñoz et al (2014) e implementado em linguagem de programação Python por Nill et al (2019). Essa implementação permite o desenvolvimento de estudos com séries temporais maiores, que incluam dados de satélites anteriores ao Landsat 8, que possuem apenas uma banda termal.

Com as imagens do Landsat 8 temos a possibilidade de trabalhar com duas bandas termais e assim utilizar outro tipo de algoritmo, como o *split-window* (SW). O algoritmo SW possui melhor desempenho em condições variadas relacionadas ao conteúdo de vapor de água da atmosfera (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al, 2014). A utilização das imagens do satélite Landsat 8 TIRS neste trabalho se restringiu à banda termal 10, indicada para alvos emersos e suficiente para determinação da Ts por meio do algoritmo SC.

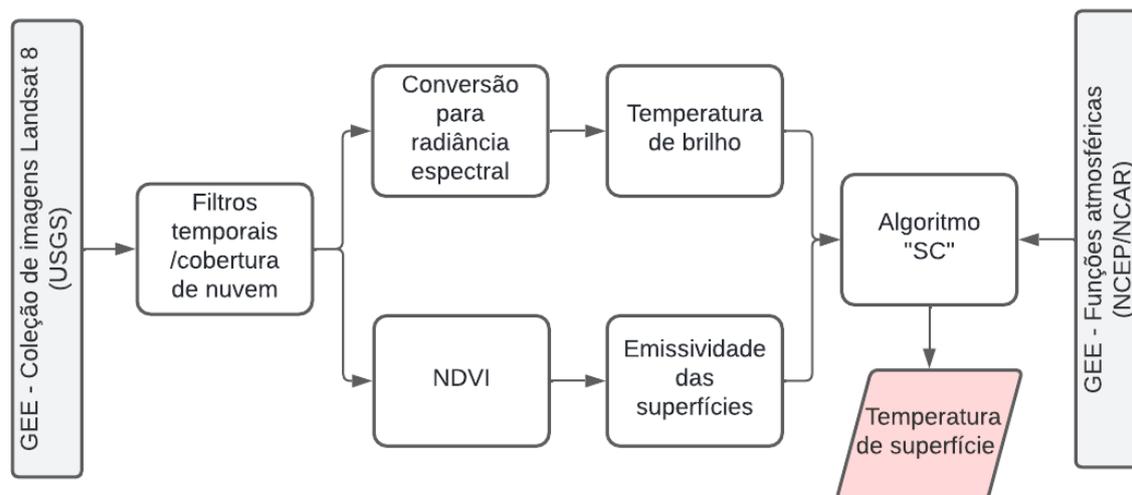
De acordo com Jiménez-Muñoz et al (2014), o algoritmo do tipo SC produz melhor estimativa da Ts quando o teor de vapor de água da atmosfera (w) no horário de aquisição da imagem é baixo, de até $3,0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$. No código de Nill et al (2019), o teor de vapor de água foi recuperado dentro da plataforma do GEE, com base em dados de reanálise do Centros Nacionais de Previsão Ambiental (NCEP) e o Centro Nacional de Pesquisa (NCAR).

A Figura 76 apresenta o fluxo de processos para a estimativa da Ts. Os parâmetros iniciais para o processamento devem ser fornecidos pelo usuário. Suas descrições e os dados de entrada utilizados para o processamento estão sumarizados na Tabela 8. O código livre de Nill et al (2019) está disponível no GitHub

³⁸ Disponível em: <http://spatial.uchicago.edu>

(<https://github.com/leonsnill/lst>) e o código comentado com as edições para esta tese está no repositório <https://github.com/danielawerneck/LST> .

Figura 76. Etapas de processamento realizadas pelo código aberto programado para estimar a temperatura de superfície.



Fonte: Elaborado pela autora baseada nos processos do código de Nill et al, 2019.

Tabela 8. Principais requisitos fornecido pelo usuário para o processamento da Ts com o algoritmo SC.

Parâmetro	Descrição	Dado de entrada
Ano/mês de início e fim	Definição do período de busca de imagens	2020-01/2020-04 (úmida) e 2020-07/2020-2020-09 (seca)
Região de interesse	Lista de coordenadas da área de estudo	-48.26, -15.41, -47.46, -16.05
Cobertura de nuvens	Porcentagem máxima de cobertura de nuvens da imagem	20%
Referência espacial	Código EPSG	EPSG 31983
Resolução espacial	Resolução do <i>pixel</i> de saída da imagem processada em metros	100x100 m
NDVI_v e NDVI_s	Valores máximo/mínimo de NDVI para vegetação (v) e solo (s)	0,65 (v) e 0,15 (s)
Epsilon_v, epsilon_s e epsilon_w	Valores de emissividade para vegetação (v), solo (s) e água (w)	0,985 (v), 0,97 (s) e 0,99 (w)

Ainda sobre o teor de vapor de água (w), tanto o métodos SC quanto o SW precisam dessa informação para estimar a Ts. Käfer et al (2020) acrescentam que normalmente é inviável a obtenção desse parâmetro in situ e adotaram o método descrito por Wang et al. (2015) para estimar essa informação. Aqui também adotou-se esse método para averiguar o valor de (w) antes de prosseguir com a utilização das imagens do Landsat8 TIRS no algoritmo SC.

Wang et al. (2015) utilizam dados de umidade relativa do ar (H) e de temperatura do ar (T_a) de uma estação meteorológica, registrados no horário específico de passagem do satélite. Para tal, foi tomada como referência a Estação Meteorológica do INMET (A001) localizada no Plano Piloto. Assim, o teor de vapor de água é estimado pela Equação 3.

Equação 3

$$w = w(0)/Rw(0)$$

Onde:

w = teor de vapor de água na atmosfera ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$);

$w(0)$ = teor de vapor de água ao nível do solo dado pela Equação 4;

$Rw(0)$ = é a razão entre o teor de vapor de água na primeira camada e o teor total.

Equação 4

$$w(0) = H * E * A/1000$$

Onde:

H = umidade relativa do ar (%) registrada na estação meteorológica;

E = é a razão de mistura de saturação (g/kg) de vapor de água e ar para uma temperatura específica do ar;

A = é a densidade do ar (g/m^3) para uma temperatura específica do ar.

O valor de $Rw(0)$ varia para diferentes atmosferas. Tanto o trabalho de Käfer et al (2020) e Wang et al (2015) utilizaram os valores descritos por Qin et al (2001), onde $Rw(0)$ é igual a 0,6834 para a atmosfera tropical, valor assumido neste trabalho. A Tabela 9 sintetiza as informações das imagens do Landsat 8 utilizadas após os filtros temporais e de cobertura de nuvem. As demais etapas de processamento são descritas a seguir.

Tabela 9. Informações das imagens utilizadas.

Estação climática	Imagem	Data	Cobertura de nuvem	Temp. do ar	Umidade do ar	Teor vapor de água
Quente-úmida	LC08_221071_20200411	11-04-2020	17,78 %	24,10 °C	59 %	2,04 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
	LC08_221071_20200427	27-04-2020	2,3 %	19,90 °C	70 %	1,85 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
Quente-seca	LC08_221071_20200716	16-07-2020	0 %	19,75 °C	46 %	1,21 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
	LC08_221071_20200801	01-08-2020	7,44 %	18,00 °C	69 %	1,64 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
	LC08_221071_20200817	17-08-2020	0,63 %	24,55 °C	40 %	1,41 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
	LC08_221071_20200902	02-09-2020	0,02 %	20,70 °C	48 %	1,27 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$

Nota: Horário de passagem do Landsat 8 é de aproximadamente 13:00 h (UTC) ou 10:00 h (horário de Brasília). Os registros de temperatura do ar e umidade relativa do ar utilizados no cálculo do teor de vapor de água referem-se ao mesmo horário da passagem do satélite.

Conversão de radiância espectral

O sensor infravermelho do Landsat 8 TIRS mede a intensidade do fluxo radiante proveniente da superfície terrestre. Essa radiância é denominada radiância aparente por incluir influência da atmosfera e de objetos vizinhos, sendo convertida em números digitais no próprio sensor, escalonados em diferentes amplitudes (SANTOS et al., 2014).

Para o tratamento da imagem infravermelha termal, os números digitais da banda 10 deverão ser convertidos para radiância espectral do topo da atmosfera (L_{Toa}). A equação é disponibilizada pelo USGS (2016) e as constantes e fatores multiplicativo e de redimensionamento estão sumarizadas no arquivo metadado da imagem.

Equação 5

$$L_{Toa} = ML * DN + AL$$

Onde:

L_{Toa} = Radiância espectral no topo da atmosfera ($W / (m^2 * sr * \mu m)$);

ML = Fator multiplicativo de redimensionamento da banda 10 = 0.00033420;

DN = número digital = imagem banda 10;

AL = Fator de redimensionamento aditivo específico da banda 10 = 0,10000.

Temperatura de brilho

A temperatura de brilho do sensor assume que a Terra é um corpo negro (emissividade igual a 1) e inclui efeitos atmosféricos como absorção e outras emissões (SANTOS et al, 2014). A temperatura de brilho é também chamada de temperatura radiante, pode ser estimada pela Equação 6.

Equação 6

$$T_b = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{Toa}} + 1\right)}$$

Onde:

T_b = Temperatura radiante em Kelvin (K);

$K2$ = Constante termal 2 da banda 10 = 1321.08 (K);

$K1$ = Constante termal 1 da banda 10 = 774.89 (K);

L_{Toa} = Radiância espectral em $W / (m^2 * sr * \mu m)$ – calculada na etapa anterior.

Emissividade da superfície

A emissividade das superfícies (ϵ) foi estimada a partir de um método simplificado baseado na imagem de NDVI (SNDVI – *Simplified Normalized Difference Vegetation Index Threshold*), descrito por Sobrino et al (2008). Para que este método seja implementado, o código resgata os valores representando os limites de emissividade da cobertura vegetal (NDVI_v) e do solo (NDVI_s) informados pelo usuário.

Neste método, a emissividade inferida a cada pixel é obtida a partir do NDVI de cada pixel. Os pixels com água ou NDVI < 0, o valor inferido de $\epsilon_w = 0,99$. Para pixels com predominância de vegetação ou NDVI > 0,5, $\epsilon_v = 0,984$. Para pixels com predominância de solo exposto ou sem vegetação ou NDVI entre 0 e 0,2, $\epsilon_s = 0,964$. Já para os pixels heterogêneos, a emissividade é calculada de acordo com a Equação 7, utilizando a métrica da fração de cobertura vegetal (FCV) (Equação 8).

Equação 7

$$\epsilon = \epsilon_s + (\epsilon_v - \epsilon_s) * FVC$$

Equação 8

$$FVC = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2$$

Temperatura de superfície (T_s)

A temperatura de superfície foi estimada a partir da Equação 9, que considera a emissividade da superfície e as funções atmosféricas. Para tal, L_{Toa} é a radiância espectral (μm) e ϵ é a emissividade da superfície. Já ψ_1 , ψ_2 e ψ_3 são as funções atmosféricas. Finalmente γ (Equação 10) e δ (Equação 11) são parâmetros baseados na lei de Planck.

Equação 9

$$T_s = \gamma [1/\epsilon * (\psi_1 L_{Toa} + \psi_2) + \psi_3] + \delta$$

Equação 10

$$\gamma = T_b^2 / b_y * L_{Toa}$$

Onde:

T_b = Temperatura de brilho em Kelvin (K) de acordo com a Equação 6;

b_y = é uma constante específica do sensor TIRS igual a 1324 K;

L_{Toa} = Radiância espectral no topo da atmosfera ($\text{W} / (\text{m}^2 * \text{sr} * \mu\text{m})$) - 5.

Equação 11

$$\delta = T_b - \left(\frac{T_b^2}{b_y} \right)$$

Onde:

T_b = Temperatura de brilho em Kelvin (K) de acordo com a Equação 6;

b_y = é uma constante específica do sensor TIRS igual a 1324 K.

As funções atmosféricas descrevem o estado da atmosfera em relação à transmissividade e os valores são aproximados em relação ao teor de vapor de água, método detalhado no trabalho de Jiménez-Muñoz et al (2014). Os coeficientes usados pelos desenvolvedores do código estão em Nill et al (2019).

Após o processamento das imagens foi necessário adequar as suas projeções, originalmente disponibilizadas no Sistema Geodésico Mundial (WGS 84). No ambiente no QGIS, as imagens foram reprojetaadas para o Sistema de Referência Geocêntrico das Américas (SIRGAS2000), adotado no Brasil em 25 de Fevereiro 2015 (IBGE, 2017). Após a reprojeção, partiu-se para a geração de mapas temáticos.

5.2.2. Adaptação de código aberto para estimativa do EVI e NDMI

A partir do código aberto implementado por Nill et al (2019), foram inseridas mais duas fórmulas para estimar o EVI e o NDMI. As bandas utilizadas são referentes ao Landsat 8 e as fórmulas e os coeficientes necessários foram obtidos na documentação *Landsat Surface Reflectance-derived Spectral Indices* (USGS, s.d.). O algoritmo adaptado está comentado com as explicações sobre as equações adicionadas e foi disponibilizado no Anexo I.

EVI – Índice de vegetação melhorado

A estimativa do EVI é realizada a partir das bandas que correspondem aos intervalos do azul, vermelho e do infravermelho próximo (NIR). Além disso há um fator de escala “G” (igual a 2,5), coeficientes de correção atmosférica “C1” (igual a 6) e “C2” (igual a 7,5) e o fator de ajuste da interferência do solo “L” (igual a 1). Logo, para as imagens do satélite Landsat 8, a fórmula do índice está descrita na Equação 12.

Equação 12

$$\text{EVI} = 2,5 * ((\text{Banda 5} - \text{Banda 4}) / (\text{Banda 5} + 6 * \text{Banda 4} - 7,5 * \text{Banda 2} + 1))$$

Onde:

Banda 2 = azul;

Banda 4 = vermelho;

Banda 5 = infravermelho próximo.

NDMI – Índice de umidade por diferença normalizado

A estimativa do NDMI é realizada a partir das bandas do infravermelho próximo e infravermelho de onda curta. Para as imagens do satélite Landsat 8, as bandas 5 e 6 correspondem aos intervalos necessários. O índice é adimensional e os resultados variam de -1 a +1. Os valores altos indicam maior teor de umidade da vegetação e valores baixos denotam o oposto. A fórmula está descrita na Equação 13.

Equação 13

$$\text{NDMI} = (\text{Banda 5} - \text{Banda 6}) / (\text{Banda 5} + \text{Banda 6})$$

Onde:

Banda 5 = infravermelho próximo;

Banda 6 = infravermelho de onda curta.

5.2.3. Integração de dados espectrais com LCZs e análise estatística

Após o mapeamento dos índices espectrais obtidos, integrou-se os dados processados a partir das delimitações das ZCLs da macrozona urbana do DF. Foram obtidos 19.752 polígonos de LCZs, gerados de acordo com o método de classificação do LCZ Generator (Capítulo 4), e tão logo consolidados em um arquivo do tipo *shapefile* (shp) no QGis.

O preenchimento da tabela de atributos deste arquivo de classificação temática foi realizado por meio da estatística zonal do QGis, atribuindo o valor médio dos *pixels* dentro da área de cada polígono de LCZ. Dessa forma, a temperatura da superfície (Ts), bem como os demais índices espectrais, definem-se como a média dos valores dos *pixels* dentro de cada polígono.

Para análise estatística desses dados, baseou-se no pressuposto que o delineamento das LCZs resultaria em diferentes valores de temperatura de superfície média entre as classes. Antes de aplicar alguma técnica de análise de variância da Ts, testes de normalidade foram realizados para verificar se os dados são paramétricos ou não paramétricos. Sendo assim, as etapas para análises estatísticas dos resultados são:

1. Análise da distribuição dos dados;

2. Análise de variância da Ts;
3. Análise de correlação;
4. Análise exploratória de dados espaciais.

Análise da distribuição dos dados

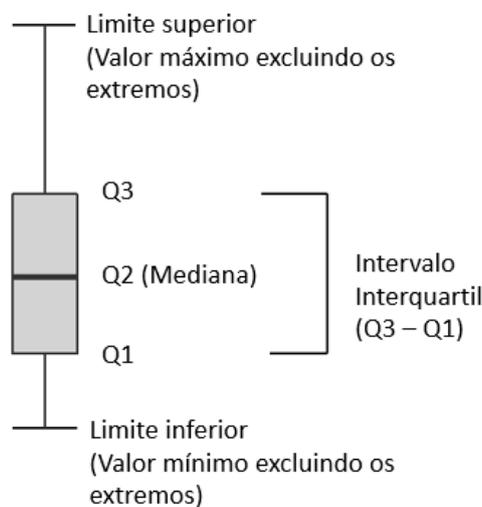
Nesta etapa optou-se pelo uso do gráfico boxplot, ou gráfico de caixa. É um tipo de gráfico que, de maneira padronizada, mostra a distribuição de dados e pode ser usado para comparar grupos (DOS ANJOS, 2014). Além disso, é frequentemente utilizado em pesquisa científica para análise descritiva dos dados representado-os de forma gráfica, a fim de permitir uma visão global e rápida da série estudada.

O boxplot tradicional exibe medidas de tendência central não-paramétrica (mediana), de dispersão (quartis), forma de distribuição ou simetria da amostra (valores mínimo e máximo) e valores extremos (*outliers*). Assim, é construído com base em um resumo de cinco números: valor mínimo, primeiro quartil (Q1), mediana, terceiro quartil (Q3) e valor máximo.

Os valores máximo e mínimo são, respectivamente, o maior e o menor valor encontrado dentro da série. A mediana é a medida de posição central dos dados e, por definição, divide o tamanho da amostra pela metade. Os quartis são divididos em três conjuntos contendo cada um 25% dos dados. O primeiro quartil situa-se entre o valor mínimo e a mediana. O segundo quartil é a mediana, o que define a posição central da série de dados. O terceiro quartil está situado entre a mediana e o valor máximo.

O intervalo interquartil (Q3 - Q1) define a diferença entre Q3 e Q1. No gráfico é representado pela dimensão da caixa. O limite inferior é o valor mínimo do conjunto de dados, até uma vez e meia o intervalo interquartil, excluindo os *outliers*. Já o limite superior é o valor máximo do conjunto de dados, até uma vez e meia o intervalo interquartil, excluindo os *outliers*. A Figura 77 traz a representação gráfica do *boxplot*. O que estiver fora dos limites será considerado valores outliers, ou seja, são valores distantes que compõem a série de dados.

Figura 77. Representação de um gráfico *boxplot*.



• *Outlier*

Fonte: Adaptado de De Cicco, 2018. Tradução da autora.

Análise de variância da temperatura de superfície

Com vistas a realizar o procedimento de análise da variância (ANOVA), aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965) para verificar um dos pressupostos centrais da ANOVA: a aderência dos dados à distribuição normal. Nesse caso, o teste pode ser feito com as seguintes hipóteses:

- Hipótese nula (H0): distribuição dos dados = normal ($p\text{-valor} > 0,05$);
- Hipótese alternativa (H1): distribuição dos dados \neq normal ($p\text{-valor} \leq 0,05$).

Ao realizar o teste, percebeu-se que os resultados indicaram a rejeição da hipótese nula. Ou seja, o conjunto de dados, em sua maioria, não apresenta uma distribuição normal. Em termos quantitativos, 90,6% dos dados da estação seca não apresentam distribuição normal. Para os dados da estação chuvosa, o percentual cai para 75%. No Anexo II encontram-se os resultados tabulados e os histogramas. As funções e pacotes utilizados no programa R para a análise estão no Anexo III.

Visto que os dados não tendem à uma distribuição normal, partiu-se para a aplicação de testes não-paramétricos de análise de variância, correspondente à ANOVA, como o teste de Kruskal-Wallis (KRUSKAL e WALLIS, 1952). Esse teste é utilizado para comparar 3 ou mais grupos independentes. Em análises não paramétricas, ao invés de analisar a variância por meio da comparação entre médias, é realizada a comparação entre medianas.

Dessa forma, essa técnica foi usada com a finalidade de comparar as medianas das LCZs para todas as variáveis (LST, EVI e NDMI). Em linhas gerais, caso o p-valor apresente valores maiores que 0,05 aceita-se a hipótese nula, isso significa que as medianas são consideradas iguais e que as classes de LCZs comparadas não possuem diferença estatística. As hipóteses são:

- Hipótese nula (H0): mediana classe A = mediana classe B ($p > 0,05$);
- Hipótese alternativa (H1): mediana classe A \neq mediana classe B ($p \leq 0,05$).

Análise de correlação

Uma vez entendido que os dados não seguem uma distribuição normal, buscou-se uma medida de correlação não-paramétrica. Foi utilizado o coeficiente de correlação de postos de Spearman, denominado pela letra ρ (rho), que é indicado para avaliar correlação entre duas variáveis quantitativas. Essa correlação avalia a relação monotônica entre duas variáveis. Isso significa que as variáveis tendem a mudar juntas mas não necessariamente a uma taxa constante.

A Ts foi estabelecida com variável dependente e o EVI e NDMI como variáveis explicativas. Os resultados podem variar de -1 a + 1, desde uma correlação significativa negativa (inversa) até uma correlação positiva (direta), sendo os extremos uma relação exata. O valor zero significa que a relação é aleatória ou inexistente. Quanto maior o valor do coeficiente, mais forte é a relação entre as variáveis.

Análise exploratória de dados espaciais

A análise exploratória de dados espaciais é um método estatístico que busca identificar padrões e interdependência entre variáveis de um conjunto de dados. Com essa técnica avaliou-se a dependência espacial da distribuição da Ts na área urbana do DF, considerando as estações climáticas. Para tal, o índice global de Moran (I) e o índice local de associação espacial (LISA) foram utilizados. Esses índices avaliam a dependência espacial de um atributo em um polígono, nesse caso o atributo é a Ts e os polígonos são as LCZs, e os valores do mesmo atributo nos polígonos vizinhos (ANSELIN, 2020).

O indicador global fornece um valor único como medida de associação espacial para todo conjunto de dados, caracterizando a região de estudo como um todo. Porém, devido ao grande número de grids dentro da região de estudo, parte-se da hipótese que ocorram diferentes regimes de dependência espacial relacionados às diferentes localizações da distribuição da Ts. Assim, faz-se uso do indicador local, que proporciona uma decomposição do índice global e examina padrões de forma mais detalhada, permitindo a formação de agrupamentos (ANSELIN, 2020).

Os índices foram estabelecidos considerando os valores dos vizinhos mais próximos, calculados por uma matriz de pesos (W , referente a *weight*). O critério para determinar a proximidade espacial foi o de contiguidade do tipo “rainha” (tradução livre de *Queen*), de primeira ordem, o que significa que os polígonos compartilham um lado comum. Por se tratar de uma amostra não paramétrica, um teste de permutação foi aplicado para verificar se os resultados não ocorrem por acaso. Esses procedimentos foram executados no programa Geoda (versão 1.18) por meio da opção *Univariate Moran's I* para análise global e *Univariate Local Moran's I* para análise local.

A interpretação dos resultados parte da rejeição ou não da hipótese nula testada, que é a da aleatoriedade espacial (ALMEIDA, 2012). Posteriormente observa-se o sinal do resultado do índice: positivo ou negativo. Se positivo, revela uma similaridade entre o atributo e sua localização. Almeida (2012) aponta que esse é o padrão de distribuição dos valores da variável testada quando há um “efeito de contágio ou efeito de transbordamento de um fenômeno em estudo” (ALMEIDA, 2021, p. 106). Quando negativo, indica uma dissimilaridade entre o valor do atributo e sua localização.

A visualização do resultado do índice global é feita por um diagrama de espalhamento, construído com base nos valores normalizados da variável estudada. O índice local é também apresentado com mapas temáticos indicando a significância estatística e o *LISA Map*, que é o mapa com os agrupamentos formados pela autocorrelação espacial.

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a apresentação dos resultados os índices espectrais, foram elaborados mapas temáticos a partir das imagens obtidas com as médias da Ts, EVI e NDMI para as estações

seca e chuvosa do ano de 2020. O recorte estabelecido foi da macrozona urbana do DF adaptada para esta tese, conforme Capítulo 4. Os resultados da integração das informações, compiladas de acordo com os polígonos gerados pela classificação de LCZs, são apresentados para cada índice em forma de gráfico *boxplot*.

5.3.1. Variabilidade dos índices espectrais na Macrozona Urbana do DF

Temperatura de superfície (Ts)

De forma geral, a temperatura de superfície apresentou uma variação entre 21 °C a 36 °C na estação chuvosa (Figura 78) e entre 22 °C a 41 °C na estação seca (Figura 80). Pela distribuição da Ts, observa-se que as manchas urbanas residenciais periféricas são potencialmente mais quente que as áreas em processo de consolidação, o Plano Piloto e nas áreas no entorno do Lago Paranoá. Conforme esperado, o Lago Paranoá é um destaque com temperatura mais amena em ambas estações.

Nas áreas de cultivo e em áreas predominantemente vegetadas também ocorrem variações termais importantes, atingindo Ts que ultrapassa 37 °C na estação seca, o que também pode estar relacionado com a ocorrência de queimadas. As áreas altamente impermeabilizadas como o Aeroporto Internacional de Brasília, RA Itapoã, RA Paranoá e RA Guará também se destacam pela ocorrência de Ts elevada.

No Plano Piloto é possível identificar um contraste entre a Asa Sul/Asa Norte e o Eixo Monumental, com variação de temperatura de superfície da ordem de 6 °C. A Asa Sul e Asa Norte, que superquadras com predominância de arborização de médio e alto porte, também se destacam com relação às demais áreas residenciais da periferia.

Outro exemplo é a RA Itapoã (Figura 79), apresentando temperaturas acima de 35°C nas áreas edificadas, sendo que sua localização, entre duas áreas verdes, e que nos permite observar uma variação térmica de aproximadamente 10 °C em relação ao seu entorno. Logo nota-se que a área urbana não apresenta Ts homogênea. Essa questão pode ser observada no espaço e no tempo, considerando aqui as estações climáticas, o que reforça o estudo dos tipos de forma urbana e suas contribuições sobre o ambiente térmico resultante.

Figura 78. Temperatura de superfície diurna (13:00 UTC) estimada para a estação chuvosa.

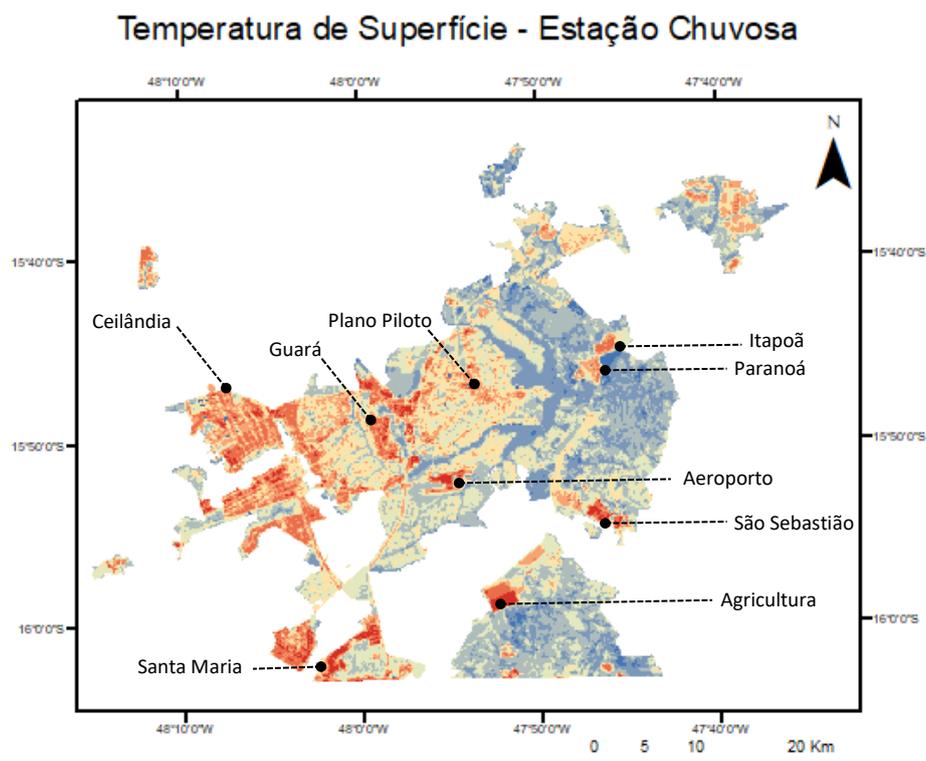


Figura 80. Temperatura de superfície diurna (13:00 UTC) estimada para a estação seca.

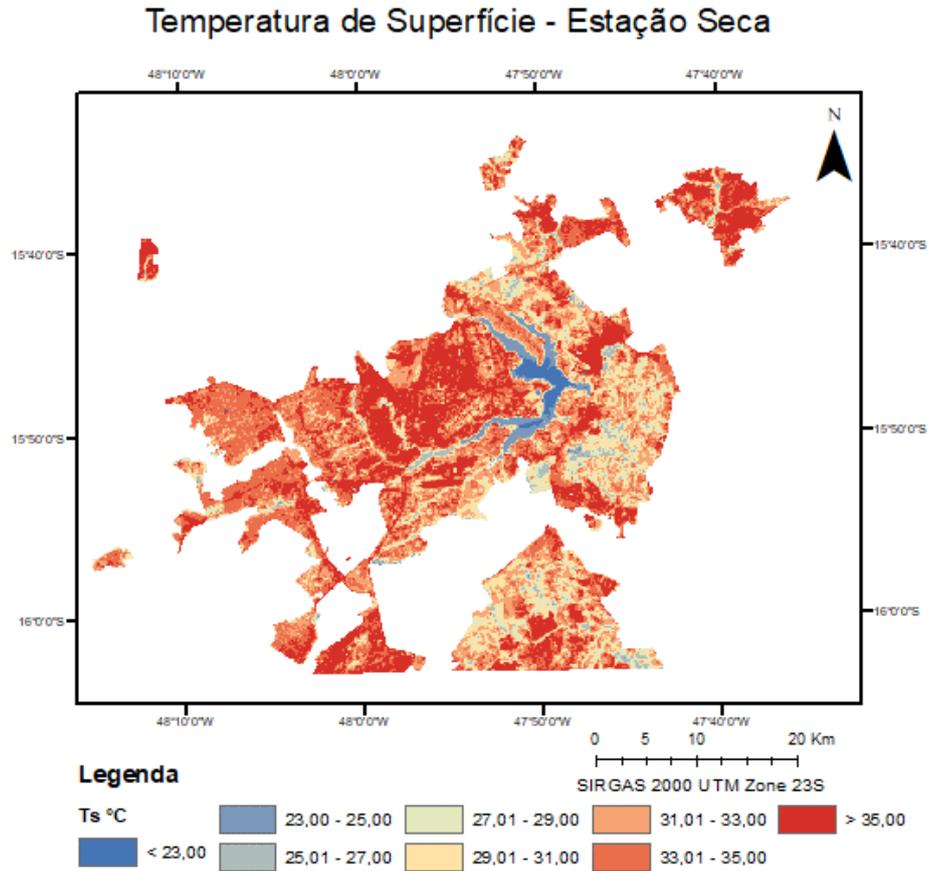
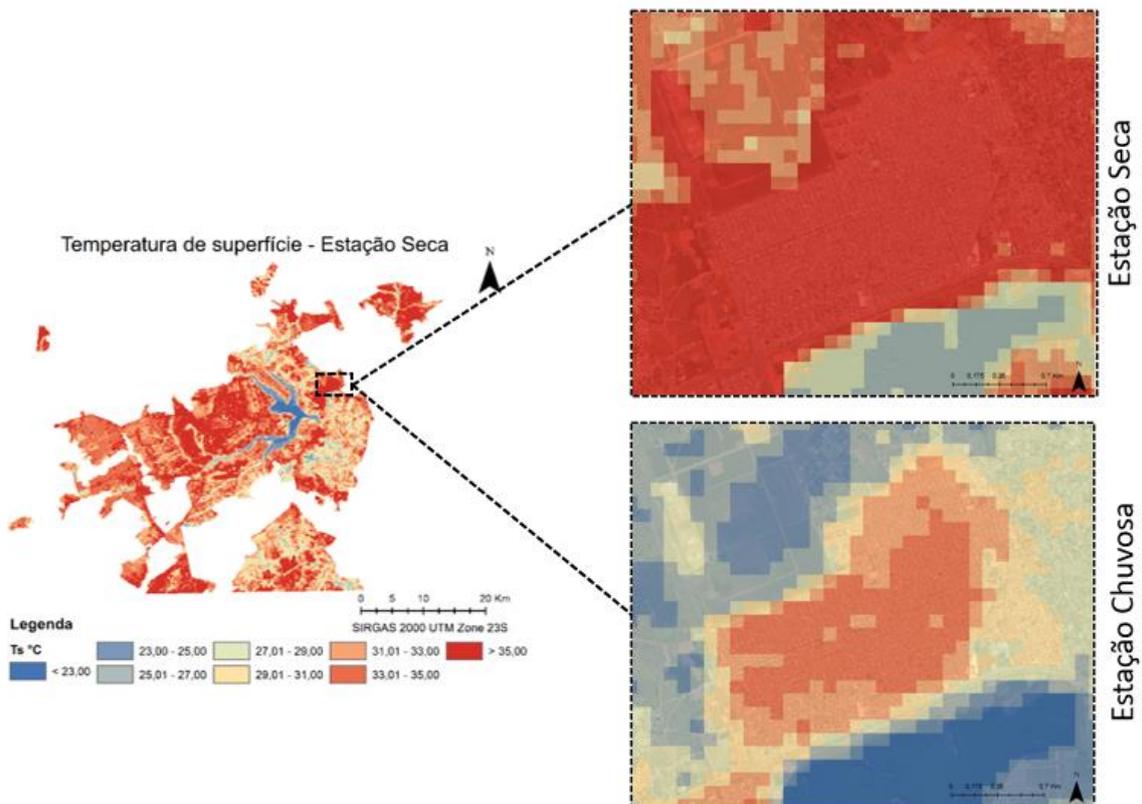


Figura 79. Exemplo de variação de Ts na RA Itapoã (LCZ 3).



EVI – Índice de vegetação melhorado

O EVI apresentou valor máximo de 0,87 na estação chuvosa (Figura 81) e de 0,55 na estação seca (Figura 82), o que indica áreas com predominância de vegetação densa e sadia. Os valores menores, negativos ou próximos a 0 indicam pixels com pouca ou nenhuma vegetação. Valores moderados entre 0,2 a 0,5 estão associados à vegetação esparsa, arbustiva e gramíneas. Em se tratando da macrozona urbana do DF, valores mais baixos na escala relacionam-se com pixels com predominância de área edificada ou solo exposto. No caso de corpos de água, o EVI apresenta valores negativos.

Volta-se à questão da heterogeneidade do espaço urbano, observando-se a distribuição de manchas verdes naturais e seminaturais (incluindo florestas urbanas, parques, áreas verdes e de cultivo), e que afetam a Ts.

Em particular, a heterogeneidade também observada na densidade da vegetação arbórea, que pode afetar a Ts de várias maneiras, como: sombreamento, alteração das propriedades térmicas (albedo e emissividade), modificação do movimento do ar e trocas de calor (BARBIERATO et al, 2019; WANG et al, 2021). Relacionando com a distribuição da Ts, as áreas edificadas nas periferias potencialmente mais quentes apresentam os valores mais baixos de EVI.

Figura 81. Variabilidade do EVI na estação chuvosa de 2020.

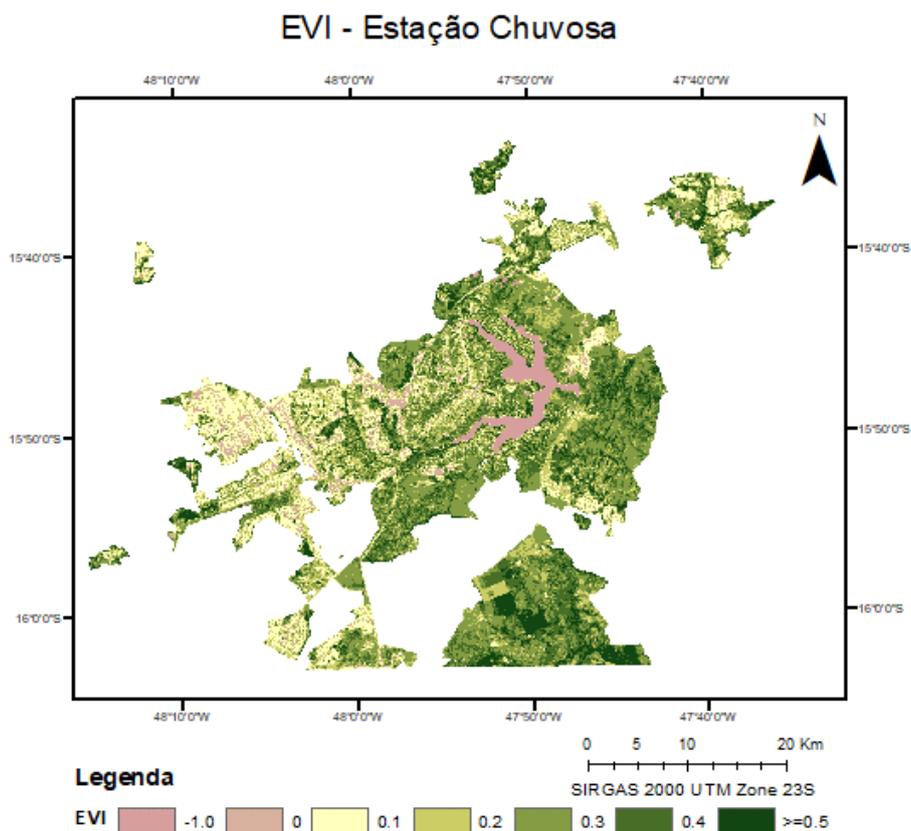
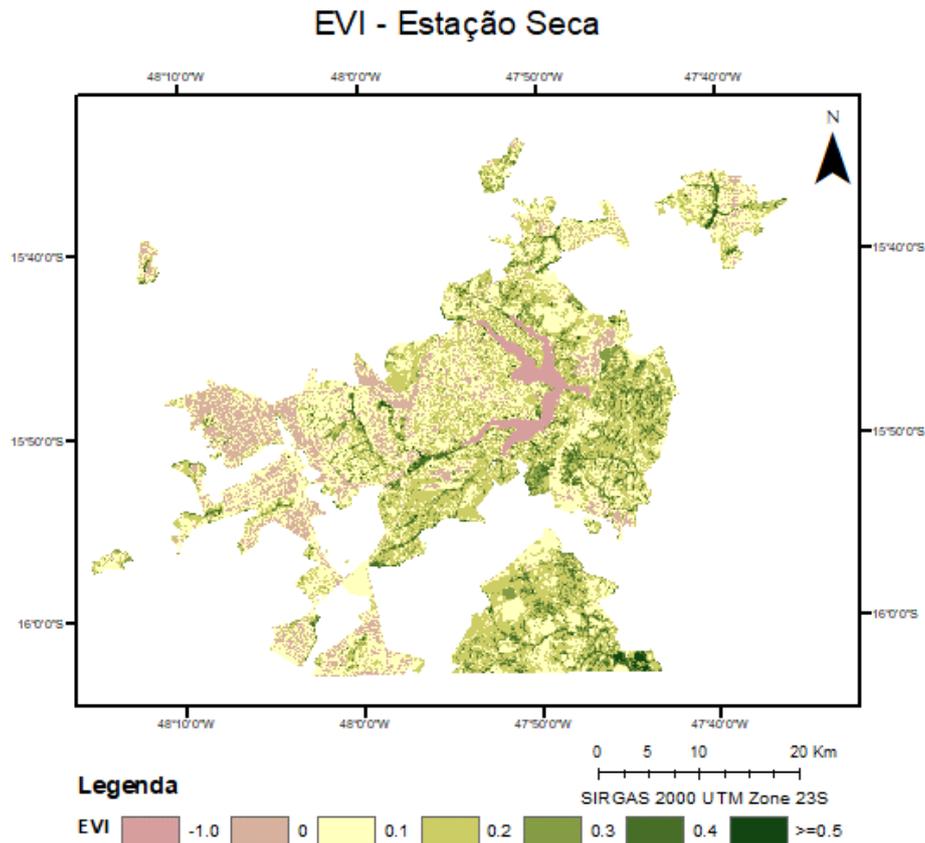


Figura 82. Variabilidade do EVI na estação seca de 2020.



NDMI – Índice de umidade por diferença normalizado

O NDMI apresentou valor máximo de 0,74 na estação chuvosa (Figura 84) e de 0,59 na estação seca (Figura 83), o que indica áreas com maior teor de umidade da vegetação. O estresse hídrico seria indicado pelos valores negativos e próximos de zero. Em se tratando de área urbana, refere-se também à pixels com predominância de área edificada ou solo exposto. Logo, observa-se a redução do teor de umidade da vegetação em áreas densamente construídas.

Em áreas com predominância de vegetação, esse índice também é usado para o entendimento de áreas propensas ao fogo, condição que se agrava na seca. Nas investigações sobre a relação do NDMI com a Ts, Qian e Cui (2008) sugerem o NDMI como uma métrica complementar ao índice de vegetação. Assim como Tan et al (2020) e Ferreira (2020), os pesquisadores apontaram uma correlação significativa e negativa com a Ts. Em uma pesquisa para a província de Henan – China, Tan et al (2020) ainda concluíram que, quando o NDMI foi menor que 0,2, a mudança de Ts não foi evidente.

Figura 84. Variabilidade do NDMI na estação chuvosa de 2020.

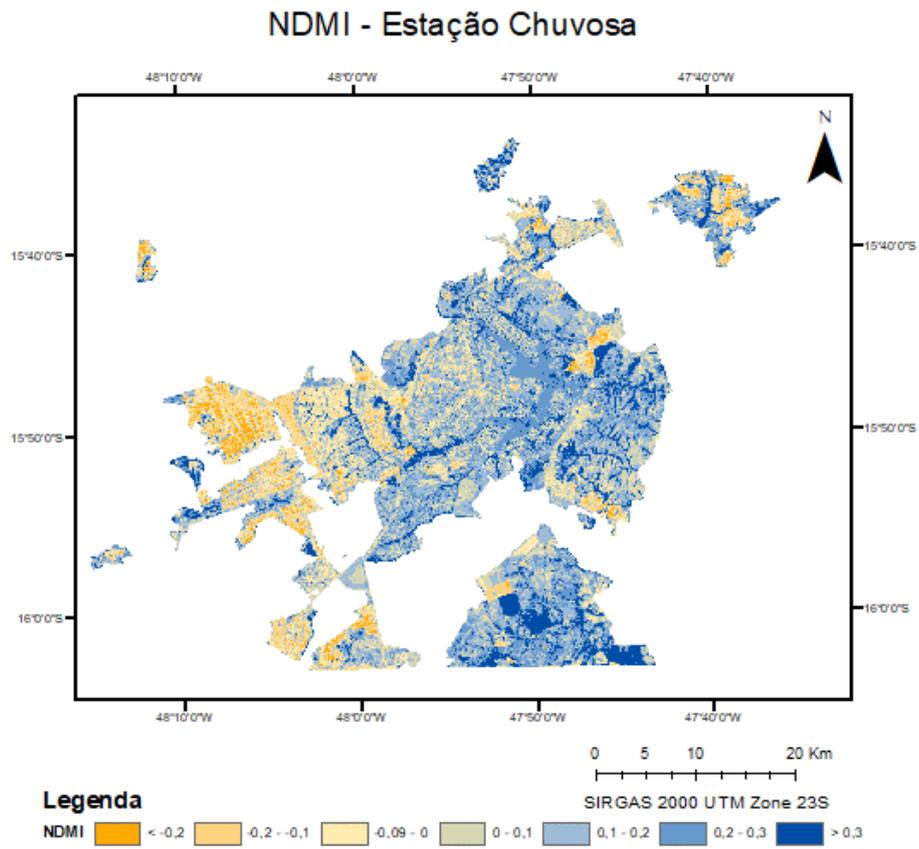
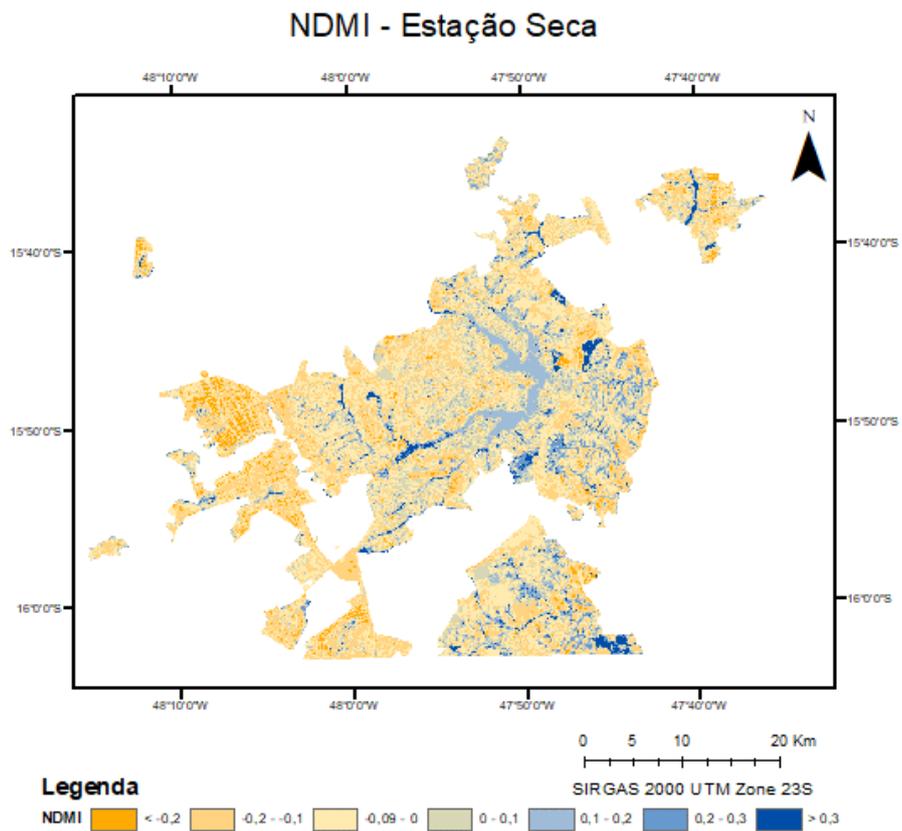


Figura 83. Variabilidade do NDMI na estação seca de 2020.



5.3.2. Análise estatística dos índices espectrais integrados às LCZ

Os resultados foram organizados de acordo com as etapas descritas para as análises estatísticas da integração das LCZs com os valores obtidos para os índices espectrais propostos.

Distribuição dos dados com gráficos de caixas

A Figura 85 e Figura 86 resumam os valores máximo, mínimo, mediana, média e o intervalo interquartil da Ts para cada LCZ de acordo com as estações climáticas. Examinando as diferenças, as classes com morfologia urbana (LCZ 1 até LCZ 10) apresentam médias e medianas com valores superiores em relação às classes de cobertura do solo (LCZ 11 até LCZ 17). A classe pavimentação (LCZ 15) e solo exposto (LCZ 16) são as exceções.

Figura 85. Gráfico de caixa da Ts (°C) de cada LCZ na estação chuvosa.

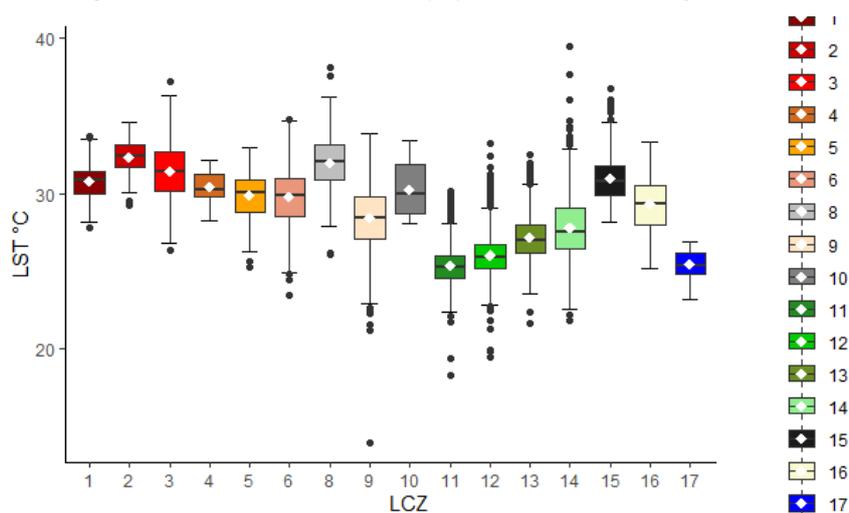
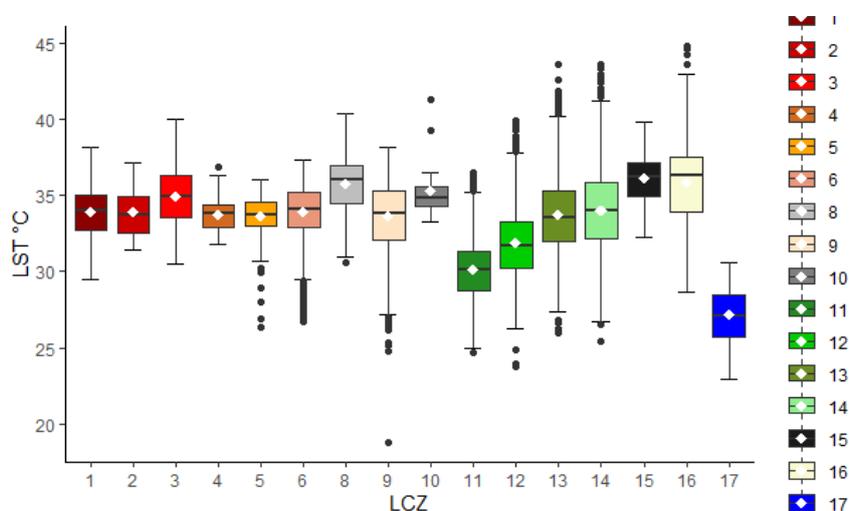


Figura 86. Gráfico de caixa da Ts (°C) de cada LCZ na estação seca.



Na estação chuvosa, as maiores médias foram encontradas na classe compacta de média elevação (LCZ 2), classe aberta com grandes edificações (LCZ 8) e classe compacta de baixa elevação (LCZ 3). Já estação seca, as maiores médias foram encontradas na classe pavimentação (LCZ 15), solo exposto (LCZ 16) e aberta com grandes edificações

(LCZ 8). Ainda se destacam nas classes urbanas a do tipo industrial (LCZ 10) e classe compacta de baixa elevação (LCZ 3).

A classe que representa corpos d'água (LCZ 17), seguida pela classe de vegetação densa (LCZ 11) e de vegetação esparsa (LCS 12) exibem menores valores de Ts. Dentre as classes urbanas, a estação chuvosa apresenta maior diferenciação entre as médias e medianas: a classe de arranjo esparsa de baixa elevação (LCZ 9), aberta de baixa elevação (LCZ 6) e aberta de média elevação (LCZ 5) exibem menores valores de Ts. Na estação seca, os valores das médias e medianas dessas zonas se aproximam e se alinham no gráfico com a classe aberta de alta elevação (LCZ 4).

Os resultados dos índices EVI (Figura 87 e Figura 88) e NDMI (Figura 89 e Figura 90) demonstram adequados com a descrição da vegetação que caracteriza cada classe na teoria de Stewart e Oke (2012). Os maiores índices de EVI foram obtidos para as classes de cobertura do solo arborizadas (LCZ 11 e LCZ 12). O mesmo foi obtido para o NDMI, nos postos seguintes à LCZ 17 (corpos d' água), como esperado.

Dentre as classes urbanas que apresentam os maiores valores para o EVI e NDMI estão a LCZ 9 (esparsa de baixa elevação), a LCZ 5 (aberta de média elevação) e LCZ 6 (aberta de baixa elevação). São classes cuja cobertura do solo é descrita por abundância de área permeável e arborização esparsa. As classes compacta de alta elevação (LCZ 1) e aberta de alta elevação (LCZ 4) apresentaram valores muito próximos para todos os índices espectrais. São classes menos frequentes no DF e esses resultados sugerem mais investigações quanto ao seu delineamento.

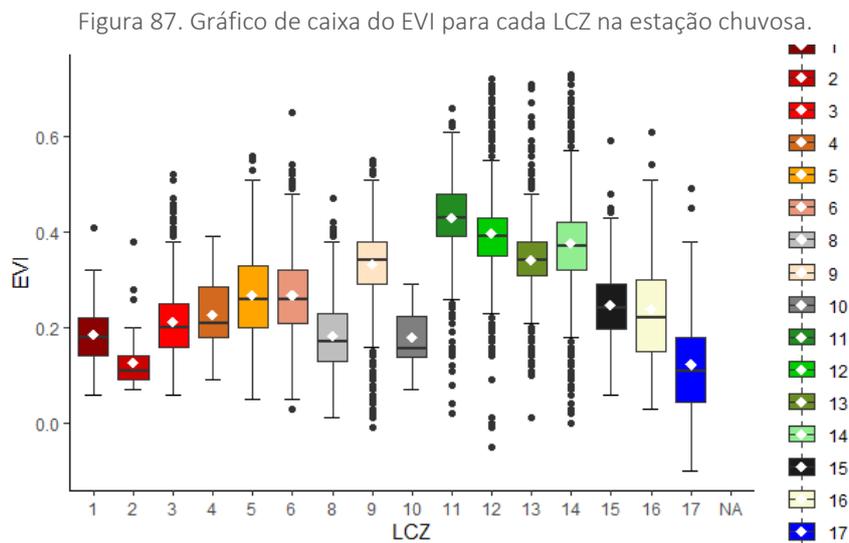


Figura 89. Gráfico de caixa do NDMI para cada LCZ na estação chuvosa.

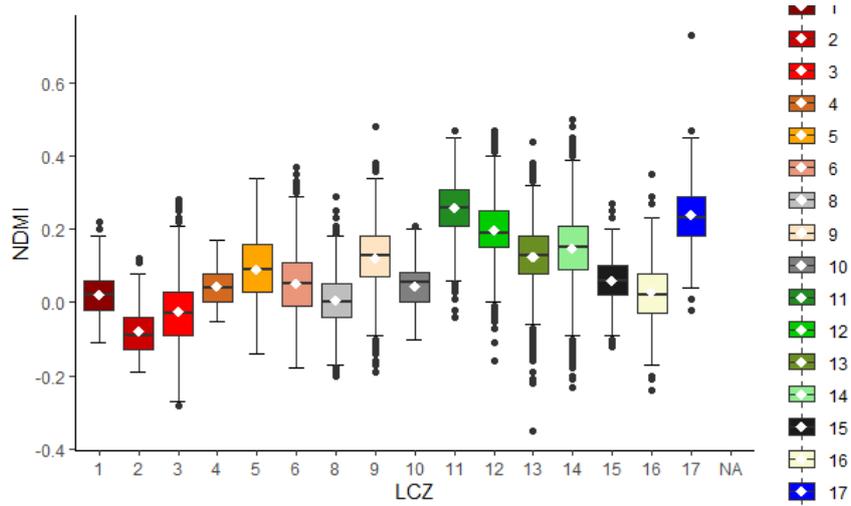


Figura 88. Gráfico de caixa do EVI para cada LCZ na estação seca.

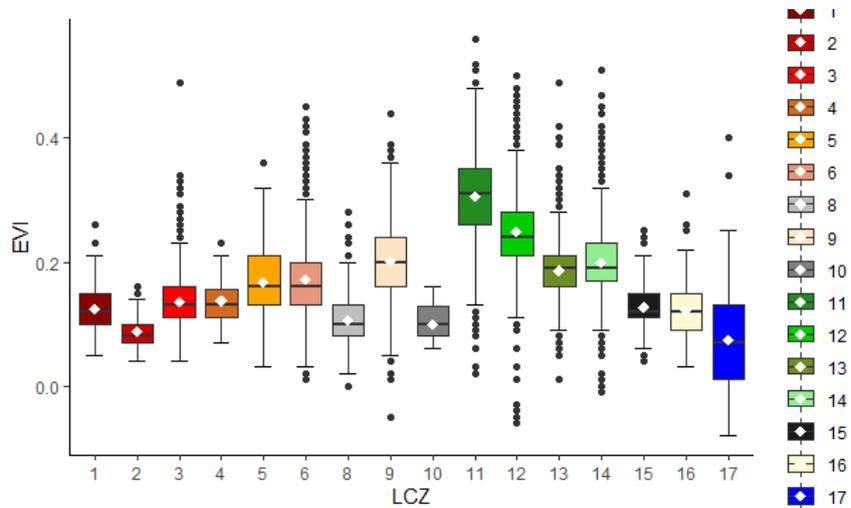
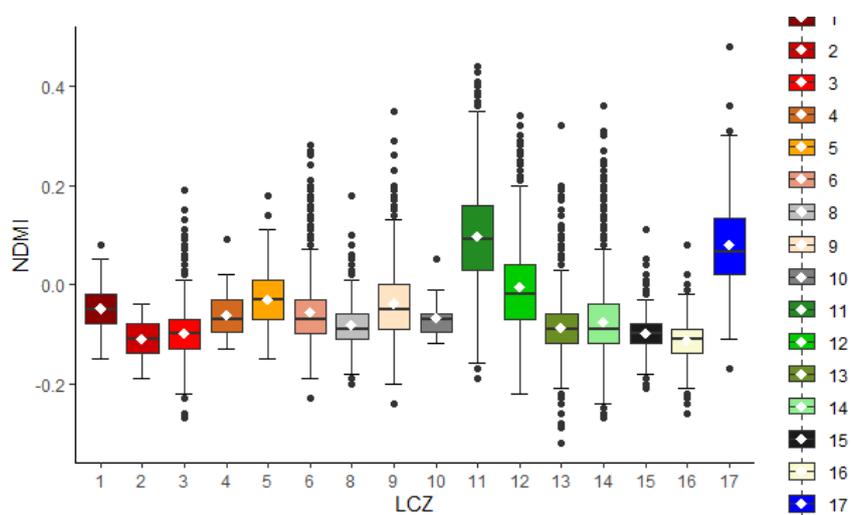


Figura 90. Gráfico de caixa do NDMI para cada LCZ na estação seca.



Análise de variância da temperatura de superfície

Em termos quantitativos, aproximadamente 58% dos dados da estação seca apresentam medianas iguais, levando em consideração todas as variáveis. Para os dados da estação chuvosa, o percentual cai para 55%. Todos os resultados do teste foram tabulados e convertidos para o formato do MS Excel (Anexo 1).

O teste *post-hoc* de Dunn verificou as mudanças significativas entre as medianas das LCZs, em uma comparação entre pares. Neste caso, o resultado do p-valor, ajustado pelo método de Bonferroni, informou que aproximadamente 65% dos dados da estação seca apresentaram mudanças significativas em termos de suas medianas, sugerindo que essas classes apresentam diferentes respostas para a Ts, no período e horário analisado.

Para os dados da estação chuvosa, o percentual sobe para 71%. A Figura 91 mostra a matriz de comparação das medianas da Ts entre pares de LCZ. As classe urbana de arranjo esparsa de baixa elevação (LCZ 9), seguida da LCZ 6 e LCZ 5 são bem diferenciadas na estação chuvosa. A LCZ 8 e LCZ 3 já apresentam maior diferenciação na estação seca. Entre as classes de cobertura do solo, a LCZ 11, LCZ 12 e LCZ 17 são bem diferenciadas na estação seca e a LCZ 13 e LCZ 14 são bem diferenciadas na estação chuvosa.

Figura 91. Matriz de comparação de medianas de Ts entre pares de LCZ, com gradação de cores para o p-valor < 0,05 (quanto menor o p-valor, maior é a intensidade da cor).

		Comparações entre LCZs na estação chuvosa															
		LCZ 1	LCZ 2	LCZ 3	LCZ 4	LCZ 5	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 9	LCZ 10	LCZ 11	LCZ 12	LCZ 13	LCZ 14	LCZ 15	LCZ 16	LCZ 17
Comparações entre LCZs na estação seca	LCZ 1	1															
	LCZ 2		2														
	LCZ 3			3													
	LCZ 4				4												
	LCZ 5					5											
	LCZ 6						6										
	LCZ 8							8									
	LCZ 9								9								
	LCZ 10									10							
	LCZ 11										11						
	LCZ 12											12					
	LCZ 13												13				
	LCZ 14													14			
	LCZ 15														15		
	LCZ 16															16	
	LCZ 17																17

Análises de correlação de Spearman

A interpretação dos resultados da correlação de Spearman de acordo com o valor de ρ , sinal do resultado e observando o gráfico de dispersão (Figura 92 e Figura 93). Tem a correlação positiva quando $\rho > 0$, o que foi encontrado entre EVI e NDMI. Nesse caso, à medida que o valor de NDMI cresce também cresce o valor de EVI. A correlação é negativa quando $\rho < 0$, o que foi encontrado entre Ts e EVI, e Ts e NDMI. Nesse caso, à medida que o valor de EVI cresce, o valor de Ts decresce. O mesmo entre NDMI e Ts.

Quanto maior o valor de ρ (positivo ou negativo), mais forte é a associação. No caso extremo, se $\rho = 1$ ou $\rho = -1$, todos os pontos no gráfico de dispersão formariam numa linha reta. Os valores das correlações foram mais altos na estação chuvosa e correlações mais fortes foram entre NDMI e EVI (positiva), seguida de NDMI e Ts (negativa). Uma correlação negativa moderada foi observada entre EVI e Ts. Na estação

seca, uma correlação forte positiva foi encontrada entre NDMI e EVI. Correlações moderadas negativas foram computadas entre EVI e Ts, e entre NDMI e Ts.

Figura 92. Matriz de correlação de Spearman e gráficos de dispersão para estação chuvosa.

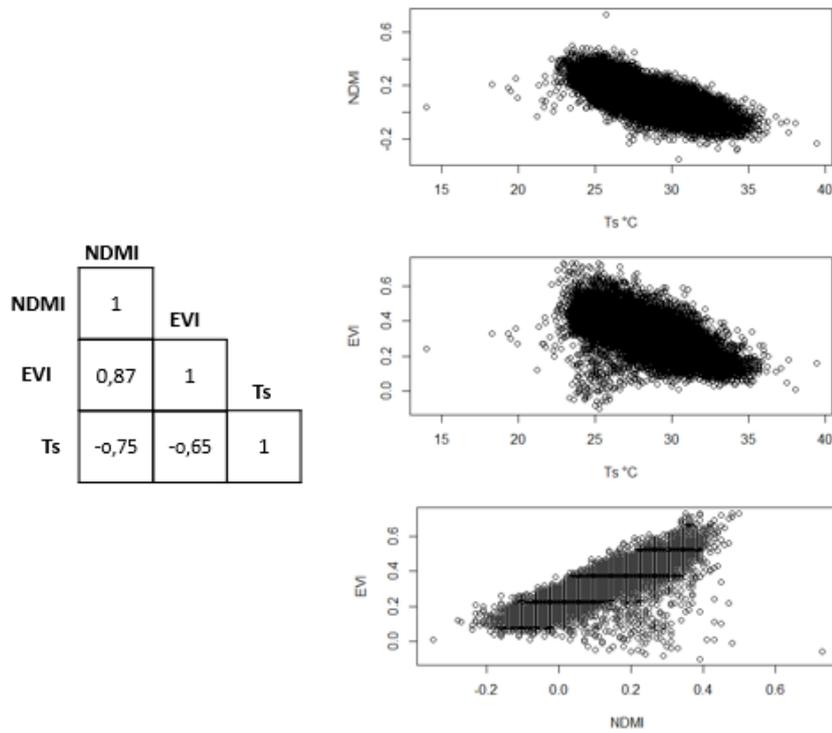
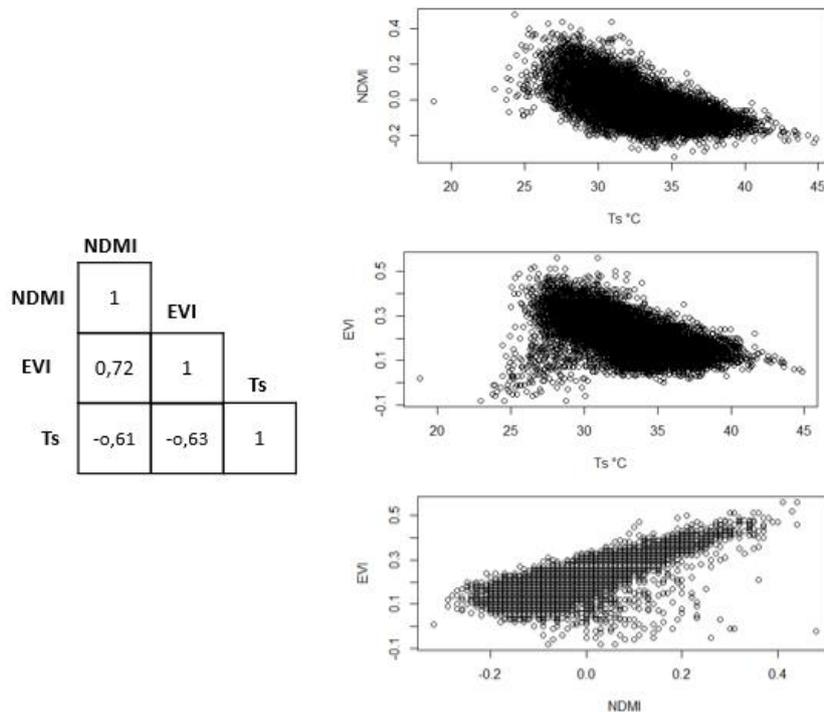


Figura 93. Matriz de correlação de Spearman e gráficos de dispersão para estação seca.



Os resultados da análise de autocorrelação indicam presença de dependência espacial da Ts, com índice global de Moran na faixa de 0,75 nas duas estações climáticas. Esses resultados podem ser observados na Figura 94 e Figura 95, que trazem o diagrama de espalhamento de Moran, o mapa de agrupamentos de (*LISAmop*) e o mapa de significância.

O mapa de agrupamento da Ts permitiu identificar as áreas onde altos valores de Ts estão associados a altos valores de Ts na vizinhança (alto-alto ou *high-high*). De forma análoga, foram agrupadas áreas onde baixos valores de Ts estão associados a baixos valores de Ts na vizinhança (baixo-baixo ou *low-low*). Esses casos revelam uma similaridade entre o atributo Ts e sua localização, e o seu padrão de distribuição

Existem áreas que são consideradas *outliers* espaciais, onde baixos valores de Ts estão associadas a altos valores de Ts na vizinhança (baixo-alto ou *low-high*). Pela lógica, áreas onde altos valores de Ts estão associadas a baixos valores de Ts na vizinhança (baixo-alto ou *high-low*).

O mapa de agrupamentos demonstra os padrões espaciais de áreas potencialmente mais aquecidas com relação à média geral (High High), o que coincide com as áreas que apresentam a maioria das LCZs urbanas. Em oposição, tem-se as áreas com padrões espaciais com Ts mais amenas (Low Low), onde são mais frequentes as classes de cobertura do solo (LCZ 11, 12, 13, 14 e 17) além de LCZ 6 e LCZ 9. Mesmo com os efeitos da variação sazonal, essas áreas conservaram a mesma dinâmica como pontos de promoção de Ts mais amenas.

Figura 94. Análise exploratória de autocorrelação espacial da Ts – estação chuvosa.

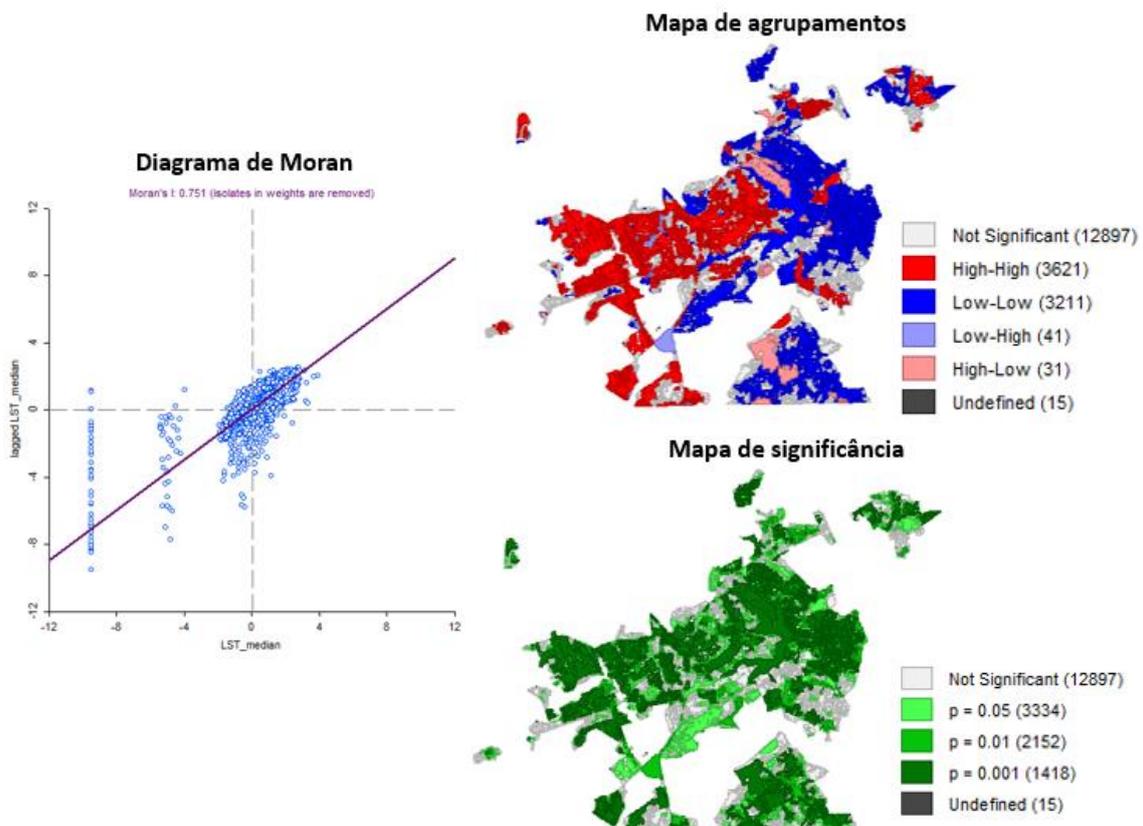
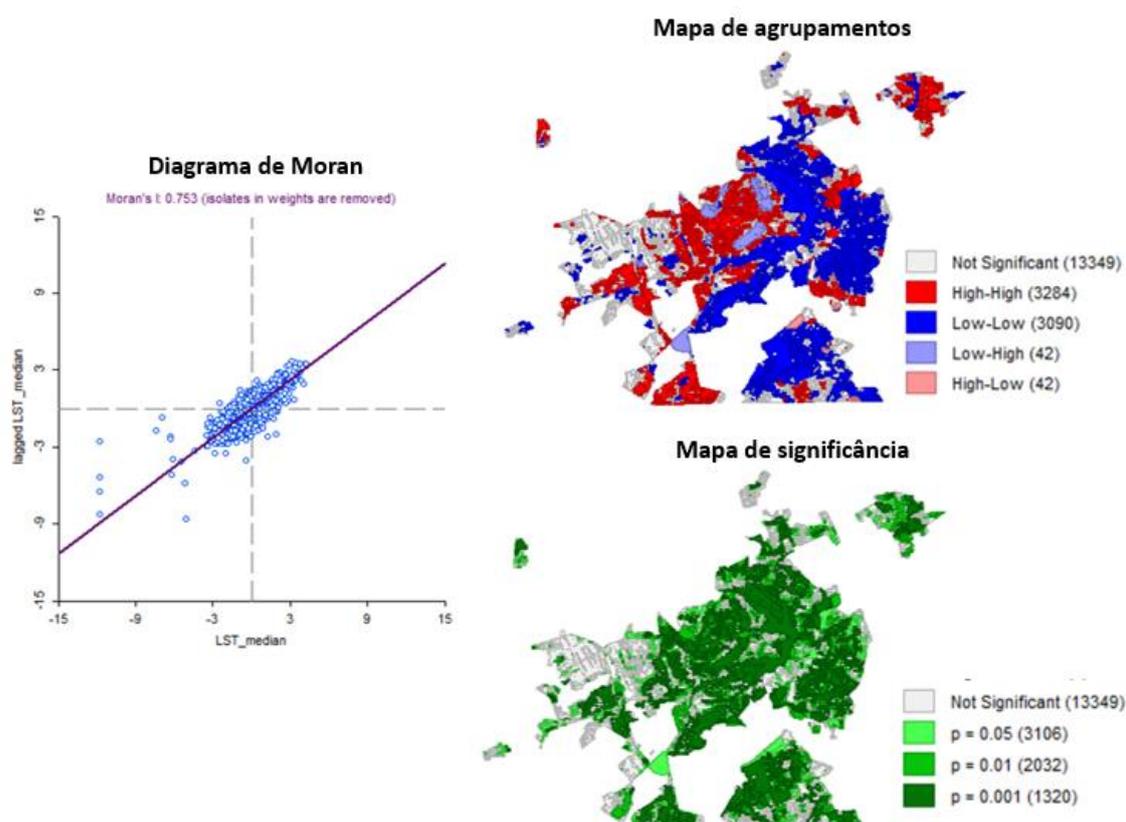


Figura 95. Análise exploratória de autocorrelação espacial da Ts – estação seca.



5.3.3. Discussões gerais sobre os índices espectrais estimados

Em uma análise visual conjunta dos mapas temáticos e gráficos dos três índices obtidos, observa-se as características das áreas construídas *versus* naturais dentro da macrozona urbana: Ts mais elevada com respostas espacialmente variadas, principalmente onde há menor presença de vegetação sadia e menor teor de umidade na vegetação. As características são heterogêneas, mais evidentes na estação chuvosa, sugerindo diferentes padrões urbanos na escala local.

A paisagem das pobres periferias urbanas oferece pouco ou nenhum elemento natural de sombreamento. Um exemplo é a RA Itapoã, que surgiu no final da década de 1990 pela ocupação irregular de terras. A elevada taxa de ocupação do solo dificulta a implantação de infraestrutura verde. A região praticamente não possui árvores e superfícies vegetadas, com predomínio de superfícies impermeabilizadas.

Outros contrastes nos mapas temáticos também são encontrados entre o Plano Piloto, a cidade-parque concebida por Lucio Costa, e o eixo mais importante de expansão urbana do DF, o eixo sudoeste. Esse eixo engloba as RAs de Ceilândia, Taguatinga, Samambaia, Recanto das Emas, entre outras. São RAs que apresentam elevadas taxas de densidades populacionais (JATOBA, 2017). Nos mapas temáticos, observa-se que essas regiões, independente da estação climática, possuem valores mais baixos dos índices EVI e NDMI, e valores mais elevados de Ts.

Como Pinheiro (2021) descreveu, os produtos de SR, além de auxiliar a traçar a evolução espaço-temporal da área urbana, também proporcionam indicadores

biofísicos para uma análise síncrona do crescimento urbano e a sua condição ecológica. Assim, no DF, as características espectrais das imagens de satélite indicam que a cidade evoluiu, em termos de padrões urbanos, desconectada da ideia de cidade-parque do seu núcleo originário projetado (Figura 97).

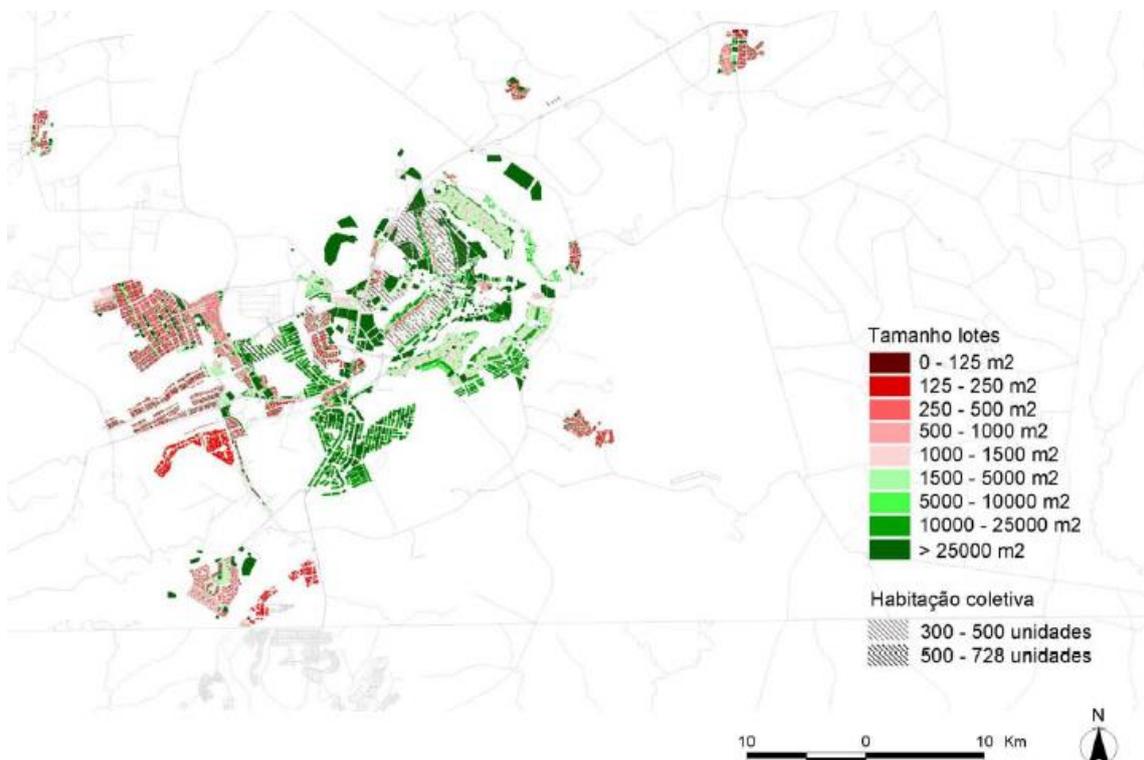
Figura 97. Exemplo de presença/ausência de vegetação e o efeito do sombreamento em duas áreas residenciais do DF: Asa Sul do Plano Piloto – LCZ 5 (A) e na RA Itapuã – LCZ 3 (B).



Fonte: Google Street View. Consulta online em 12 de março de 2022.

Podemos ainda trazer para a discussão o tamanho dos lotes, dada a relevância da possibilidade de implementar áreas permeáveis dentro do lotes, promovendo a continuidade das áreas verdes. A Figura 96, do PDOT (2009), mostra a variabilidade do tamanho dos lotes no DF. Nas áreas periféricas de arranjo compacto (predominantemente de LCZ 3), observa-se a redução do tamanho dos lotes.

Figura 96. Tamanho dos lotes da área urbana do DF.



Fonte: PDOT, 2009, p. 66.

A supressão de vegetação relacionada à expansão urbana é algo conhecido e já foi tema de diversos trabalhos no DF (CAMARGO, 2015; ROMERO et al, 2019; CHELOTTI e SANO, 2021). As ações de (anti)planejamento centradas em converter área permeável

em impermeável, estão na contra-mão dos já conhecidos serviços ecossistêmicos que a vegetação urbana pode oferecer, principalmente a arbórea.

Pode-se citar serviços ecossistêmicos como biodiversidade, sequestro de carbono, saúde e bem-estar, redução do consumo energético, coesão social, entre outros mais (MEA, 2005). No DF, Amaral, Bezerra e Baptista (2022) já demonstraram as potencialidades das áreas verdes com função de sumidouro de carbono em um mapeamento ao longo da paisagem distrital. Soma-se à lista, particularmente, os benefícios no que se refere aos efeitos positivos no sistema climático que contribuem para mitigação de altas temperaturas e dos efeitos da ICU.

5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo discutiu os resultados da distribuição da Ts na Macrozona Urbana do DF, dividida em LCZs. Também foi utilizado o índice de vegetação EVI e de umidade NDMI para complementar a análise da variabilidade da Ts e sua contribuição para a diferenciação de comportamento térmico das LCZ.

Os índices espectrais foram obtidos a partir de imagens do satélite Landsat 8 utilizando a plataforma GEE via API para Python. Para tal foi usado um algoritmo do tipo *single channel* para a estimativa da Ts para as estações climáticas seca e chuvosa. Mapas de EVI e NDMI foram gerados a partir de imagens de banda 4, banda 5 e banda 6 do sensor OLI do Landsat 8. As respectivas fórmulas também foram implementadas em linguagem de programação Python.

A integração final dos índices espectrais com as LCZ foi realizada por meio da estatística zonal. As demais análises estatísticas basearam-se na investigação de que o delineamento das LCZ resultaria em diferentes valores de temperatura de superfície média entre as classes. Por fim foi verificado a formação de agrupamentos de áreas com resposta semelhante de Ts, por meio do estudo da autocorrelação espacial.

A tendência de maiores valores de temperatura de superfície observada nas classes urbanas podem ser associadas às características morfológicas da LCZ 2, LCZ 3 e LCZ 8, tais como alta taxa de ocupação do solo por edificações, arborização esparsa ou ausente e superfícies predominantemente impermeabilizadas. Essas condições foram indetectadas principalmente nas áreas periféricas do Plano Piloto, no principal eixo de expansão do DF: o eixo sudoeste. Também observa-se mesmas condições no eixo Nordeste, como na RA Paranoá, RA Itapuã e RA Planaltina. E no eixo leste na RA São Sebastião.

Embora as relações estatísticas entre a Ts e a morfologia urbana definida pelas LCZ mostram tendências de zonas produtoras de temperaturas elevadas, revelar as relações causais apenas com dados diurnos do Landsat 8 ainda é uma inferência prematura. Assim como a temperatura do ar, a Ts também é determinada por efeitos combinados e dinâmicos que demandam dados mais abundantes com temporalidade e escalas adequadas para o estudo das LCZ. Um exemplo é a análise das LCZ 1 e LCZ 4, que possuem edifícios em altura e não apresentaram diferenciação entre as medianas, mas que o comportamento noturno precisa ser estudado.

Dessa forma, uma investigação com dados de satélite gratuitos abre frentes para diversos de estudos para uma abordagem cada vez mais embasada do clima urbano, incluindo as necessárias investigações da temperatura do ar e demais variáveis para

avaliação do conforto térmico. Ou seja, velocidade do vento, temperatura radiante média e umidade relativa do ar.

São medições mais complexas e que envolvem custos de equipamentos e pessoas para a realização dos registros. A contribuição da sistematização das LCZ pode guiar as decisões dos locais para medições. Para o trabalho do arquiteto e urbanista e do planejador urbano, as lições dos padrões históricos de desenvolvimento urbano e seu reflexo no campo térmico precisam ser apreendidos.

REFERÊNCIAS

- Almeida, E. Econometria espacial aplicada. Piracicaba: Alínea, 2012.
- Amaral, R.; Bezerra, M. C. L.; Baptista, G. M. M. Planejando a Infraestrutura Verde regional a partir dos processos ecológicos. In: Geodesign no Brasil: abordagens para o planejamento ambiental urbano. São Carlos: Pedro & João Editores, 2022.
- Anselin, Luc. Local spatial autocorrelation. University of Chicago, Center for Spatial Data Science. 2020. https://geodacenter.github.io/workbook/6a_local_auto/lab6a.html#fn1
- Barbierato, Elena; Bernetti, Iacopo; Capecchi, Irene; Saragosa, Claudio. Quantifying the impact of trees on land surface temperature: a downscaling algorithm at city-scale. *European Journal of Remote Sensing*, 52:sup4, 74-83, 2019. DOI: 10.1080/22797254.2019.1646104
- Bartesaghi Koc, C.; Osmond, P.; Peters, A.; Irger, M. Understanding Land Surface Temperature Differences of Local Climate Zones Based on Airborne Remote Sensing Data. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 11, no. 8, pp. 2724-2730, 2018.
- Cai, M.; Ren, C.; Xu, Y. Lau, K. K.; Wang, R. Investigating the relationship between local climate zone and land surface temperature using an improved WUDAPT methodology - A case study of Yangtze River Delta, China. *Urban Climate*, Volume 24, 2018, p. 485-502.
- Ferreira, F. L. e S. Estimativas de temperatura superficial por satélite e análise climática em município de grande porte no Brasil. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.
- Ferreira, L. S. Vegetação, temperatura de superfície e morfologia urbana: um retrato da região metropolitana de São Paulo. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- França, A. M. S.; Sano, E. E. Mapeamento de áreas de campo limpo úmido no Distrito Federal a partir de fusão de imagens multiespectrais. *Sociedade e Natureza (Online)*, Uberlândia, v. 23, n. 2, p. 197-209, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-45132011000200004>. Acesso em 01 de Agosto de 2019.
- Geletič, J., Lehnert, M.; Dobrovolný, P. Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities.” *Remote Sensing* 8 (10): 788, 2016. doi:10.3390/rs8100788.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017.
- Jatobá, S. Densidades urbanas nas Regiões Administrativas do Distrito Federal. Texto para Discussão TD - n. 22 (2017). Brasília: Companhia de Planejamento do Distrito Federal, 2017. Disponível em: http://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/TD_22_Densidades_Urbanas_nas_Regi%C3%B5es_Administrativas_DF.pdf
- Jiménez-Muñoz, J.C.; Sobrino, J.A.; Skokovic, D.; Mattar, C.; Cristobal, J. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*. v. 11, p. 1840–1843, 2014.

- Käfer, P. S.; Rolim, S. B. A.; Diaz, L. R.; Rocha, N. S.; Iglesias, M. L.; Rex, F. E. Comparative analysis of split-window and single-channel algorithms for land surface temperature retrieval of a pseudo-invariant target. *Bulletin of Geodetic Sciences*. 26(2): e2020008, 2020.
- Li, B.; Wang, H.; Qin, M.; Zhang, P. Comparative study on the correlations between NDVI, NDMI and LST. *Progress in Geography*, 2017, 36(5): 585-596.
- Maigua, P. Ciudad y cambio microclimático. Tese de Doutorado pelo Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, 2020.
- MAPBIOMAS. Coleções Mapbiomas, 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR>. Acesso em: 29 dez. 2021.
- MEA. Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press: Washington, DC, 2005.
- Middel, A.; Nazarian, N.; Demuzere, M. e Bechtel, B. Urban Climate Informatics: An Emerging Research Field. *Front. Environ. Sci.* 10:867434, 2022. DOI: 10.3389/fenvs.2022.867434
- Ochola, E, M.; Fakhrazadehshirazi, E.; Adimo, O. A.; Mukundi, B. J.; Wesonga, M. J.; Sodoudi, S. Inter-local climate zone differentiation of land surface temperatures for Management of Urban Heat in Nairobi City, Kenya. *Urban Climate*, v.31, p.1-14, 2020.
- Nil, L., Ullmann, T., Kneisel, C., Sobiech-Wolf, J. & Baumhauer, R. Assessing Spatiotemporal Variations of Landsat Land Surface Temperature and Multispectral Indices in the Arctic Mackenzie Delta Region between 1985 and 2018. *Remote Sensing*. 2019.
- Prata-Shimomura, A., Ferreira, A. LCZ in metropolitan regions: surface temperature in urban and rural areas. *Proceedings of 34th PLEA International Conference, Hong Kong, China: Smart and Healthy within the 2-degree limit*. V. II, p. 796-801, 2018.
- Pinheiro, C. de A. Detecção remota: possibilidades para uma abordagem dinâmica e integrada do ecossistema urbano. *Revista de Morfologia Urbana*, v. 9, n. 1, 2021. DOI: 10.47235/rmu.v9i1.155.
- Python Software Foundation. Documentação geral. Disponível em <https://docs.python.org/pt-br/dev/faq/general.html>. Último acesso em: janeiro de 2022.
- Qin, Z.; Karnieli, A.; Berliner, P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *Int. J. Remote Sens.* 22, p. 3719–3746, 2001.
- Santos, A. R. et al. Sensoriamento Remoto no ArcGIS 10.2.2 Passo a Passo: Processamento de Imagens Orbitais – Volume 1. Alegre: CAUFES, 2014. 107 p.
- Stewart, I.D.; Oke, T.R. Local Climate Zones For Urban Temperature Studies. *American Meteorological Society*, v.93, p. 1879-1900, 2012.
- Tan, J., Yu, D., Li, Q. et al. Spatial relationship between land-use/land-cover change and land surface temperature in the Dongting Lake area, China. *Nature Sci Rep*, 10, 9245, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66168-6>
- USGS. Landsat Missions. Landsat Surface Reflectance-derived Spectral Indices. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-surface-reflectance-derived-spectral-indices>
- Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185, 46-56, 2016.
- Wang, C.; Middel, A.; Myint, S. W.; Kaplan, S.; Brazel, A. J.; Lukasczyk, J. Assessing local climate zones in arid cities: The case of Phoenix, Arizona and Las Vegas, Nevada. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 141, pp. 59–71, 2018. doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.04.009.
- Wang, F.; Qin, Z.; Song, C.; Tu, L.; Karnieli, A.; Zhao, S. An Improved Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data. *Remote Sensing*. v. 7, n. 4, p. 4268-4289, 2015.

- Wang, X.; Dallimer, M.; Scott, CE.; Shi W, Gao J. Tree species richness and diversity predicts the magnitude of urban heat island mitigation effects of greenspaces. *Sci Total Environ.* 2021 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145211.
- WMO. World Meteorological Organization. Essential Climate Variables. Disponible em: <https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables#:~:text=An%20ECV%20is%20a%20physical,characterization%20of%20Earth'%20s%20climate.>
- Zhou, D.; Xiao, J.; Bonafoni, S.; Berger, C.; Deilami, K.; Zhou, Y.; Froking, S.; Yao, R.; Qiao, Z.; Sobrino, J.A. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sensing.* 11, 48, p. 1 – 36, 2019.
- Zhao, C. Linking the Local Climate Zones and Land Surface Temperature to Investigate the Surface Urban Heat Island, a Case Study of San Antonio, Texas, US. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences* 4: 277–283, 2018.
- Zhao, C.; Jensen, J. L. R.; Weng, Q.; Currit, N.; Weaver, R. Use of Local Climate Zones to investigate surface urban heat islands in Texas, *GIScience & Remote Sensing*, 57:8, 1083-1101, 2020. DOI: 10.1080/15481603.2020.1843869

6.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A expansão urbana e seus impactos climáticos tem sido foco de estudo de diversas áreas, compartilhando conhecimentos, dados climáticos, métodos de trabalho, formando redes de pesquisa e de divulgação científica. Logo, a climatologia urbana se tornou um campo de estudo interdisciplinar, com escopos de trabalhos em várias escalas e esforços para a transformação dos conhecimentos em políticas públicas.

Este trabalho originou-se no campo da arquitetura e urbanismo, onde também se discute a problemática sobre a homogeneidade na tratativa do tecido urbano, que nos leva a uma dificuldade no reconhecimento e representação da morfologia da cidade para estudos de clima urbano. Stewart e Oke levantaram essa preocupação e propuseram um sistema de classificação para padronizar as tipologias urbanas e de cobertura do solo chamado de zonas climáticas locais, orientado à análises dos impactos térmicos nas paisagens urbanas, considerando seus aspectos heterogêneos. Posteriormente a iniciativa do WUDAPT foi lançada para promover o mapeamento de LCZ para qualquer cidade.

Com isso, pesquisadores tem procurado verificar as diferentes respostas térmicas entre as LCZ e as variações térmicas dentro de cada LCZ. Assim, os métodos de trabalho agregam campanhas experimentais utilizando estações meteorológicas, transectos e sensoriamento remoto. Partindo desses aspectos, o objetivo principal desta pesquisa foi relacionar a estrutura espacial das LCZ da macrozona urbana com a variabilidade da temperatura de superfície, índices de vegetação e umidade no contexto climático do Distrito Federal.

Foram utilizados os dados de temperatura de superfície, índice de vegetação EVI e índice de umidade NDMI, derivados do satélite Landsat 8 para investigar as variações diurnas do ambiente térmico urbano e os impactos das paisagens urbanas no Distrito Federal. Os dados foram processados no GEE. Para o sistema de classificação LCZ, o mapeamento foi realizado por meio da ferramenta LCZ Generator. Os principais achados sobre a variabilidade da T_s diurna podem ser resumidos em:

- a) o efeito da sazonalidade (estações seca e chuvosa) foi identificado nos resultados, o que pode ser resultante da quantidade de energia eletromagnética disponível para trocas térmicas com o ambiente, e que atinge maiores amplitudes durante a estação seca;

- b) durante o dia, as paisagens urbanas com arranjo compacto de edifícios (LCZ 1, LCZ 2 e LCZ 3) tendem a aquecer-se mais rapidamente do que os edifícios abertos (LCZ 4, LCZ 5, LCZ 6 e LCZ 9), com exceção da LCZ 8;
- c) dentre as classes com arranjo compacto, as LCZ com edifícios de altura média e baixa (LCZ 2 e LCZ 3) apresentaram Ts mais alta do que a classe com edifícios altos (LCZ 1);
- d) dentre as classes com arranjo aberto, a LCZ 8 apresentou, em média, Ts mais elevada;
- e) A classe que representa corpos d'água (LCZ 17), seguida pela classe de vegetação densa (LCZ 11) e de vegetação esparsa (LCS 12) exibem menores valores de Ts.

Sobre os métodos de trabalho, foi notória a otimização do tempo de processamento e armazenamento de dados no computador pessoal com o uso do GEE. Ele foi utilizado para o acesso ao catálogo de imagens do Landsat 8 e para o processamento digital de imagens com uma API programada em Python.

A ferramenta LCZ Generator também otimizou o tempo quando comparado com o protocolo anterior do WUDAPT, baseado no SIG SAGA GIS. Como essa ferramenta também utiliza o GEE, as imagens satelitais não precisam ser baixadas para o computador pessoal, o que mais uma vez poupa espaço para armazenamento de dados.

A imagem classificada automaticamente obteve uma acurácia geral de 78% e as áreas com classificações errôneas puderam ser reclassificadas em uma edição manual. Os programas e as imagens utilizadas foram disponibilizadas gratuitamente nos respectivos portais dos seus desenvolvedores, proporcionando um método de mapeamento de baixo custo e que não é restrito para a academia.

O recorte da área urbana para o estudo foi limitado ao DF e partiu da poligonal da sua Macrozona Urbana. Entretanto, o método pode ser aplicado nas áreas conurbadas para além da fronteira do DF, podendo-se aproveitar o conjunto de áreas de treinamento deste trabalho e expandí-lo.

As análises estatísticas foram relevantes para a verificação da hipótese e pergunta de pesquisa: uma abordagem espacializada, baseada nas LCZ, permite identificar diferentes respostas térmicas do tecido urbano do DF para indicar recomendações para projetos arquitetônicos, urbanísticos e paisagísticos. Assim, questionou-se: as classes das LCZ possuem assinatura espectral típica em termos de Ts?

Após avaliação entre pares de LCZ, os resultados informaram que 65% dos dados da estação seca apresentaram mudanças significativas das medianas da Ts, sugerindo que essas classes apresentam respostas típicas para a Ts. Para os dados da estação chuvosa, o percentual sobe para 71%. As classe urbana de arranjo esparsa de baixa elevação (LCZ 9), seguida da LCZ 6 e LCZ 5 são bem diferenciadas na estação chuvosa. A LCZ 8 e LCZ 3 já apresentam maior diferenciação na estação seca. Entre as classes de cobertura do solo, a LCZ 11, LCZ 12 e LCZ 17 são diferenciadas na estação seca e a LCZ 13 e LCZ 14 são diferenciadas na estação chuvosa. A LCZ 1 e LCZ 4, compostas por arranjos de edifícios em altura (compacto x aberto), não apresentaram diferenciação na avaliação diurna. Dados noturnos seriam necessários para avaliar a contribuição do arranjo e sombreamento na habilidade de dispersar o calor à noite.

Para explorar as relações da Ts com os índices EVI e NDMI, foram realizadas análises de correlação de Spearman. Os valores das correlações foram mais altos na estação chuvosa e correlações mais fortes foram entre NDMI e EVI (positiva), seguida

de NDMI e Ts (negativa). Uma correlação negativa moderada foi observada entre EVI e Ts. Na estação seca, uma correlação forte positiva foi encontrada entre NDMI e EVI. Correlações moderadas negativas foram computadas entre EVI e Ts, e entre NDMI e Ts.

Ou seja, de forma complementar os índices EVI e NDMI podem auxiliar no planejamento de estratégias que visam reduzir a Ts. Com base nesses achados e com o apresentado no Capítulo 1, as estratégias combinadas para minimizar o armazenamento de calor na área urbana podem incluir: (1) preservação de corpos hídricos na área urbana; (2) criação, preservação e/ou revitalização de parques urbanos e superfícies vegetadas priorizando densidade de área foliar, sombreamento e espécies apropriadas para o clima; (3) incentivo à políticas para aumentar a contribuição das áreas verdes dentro dos lotes para promover a conexão de espaços verdes na escala local e (4) priorização do uso de materiais de construção que favoreçam a permeabilidade do solo e troca de calor em vez de retenção de calor, como o uso de pavimentos permeáveis.

Na última análise estatística, a AEDE, observou-se regiões com dependência espacial, rejeitando a hipótese nula de aleatoriedade na distribuição da Ts. Ressalta-se a complementação de estudos, a serem abordados no item 6.2, pois as diferentes respostas entre as LCZ, isoladamente, não são suficientes para uma indicação da necessidade (ou não) de mitigação de calor. Com isso quer-se argumentar que são necessárias considerações socioeconômicas.

Por exemplo, a referência para mitigar o aquecimento urbano é em termos de conforto térmico humano nos espaços públicos ou redução de consumo de energia das edificações? Essa questão é relevante no contexto do DF, onde temos cidades dormitório e setores com atividades especializadas, como o setor de abastecimento. Também a desigualdade social deve fazer parte dessa análise, pois tanto aspectos de saúde quanto de moradia podem agravar-se durante episódios de ondas de calor.

No geral, os resultados demonstraram que a classificação de LCZ pode ser usada como ferramenta para auxiliar a monitorar e promover uma hierarquia de áreas a serem priorizadas na implementação de estratégias de mitigação de altas temperaturas, quando necessárias. A simplificação da quantidade de classes e a fácil apreensão das simbologias que representam as tipologias das formas urbanas ainda colaboram com a transferência do conhecimento acadêmico para a prática.

Para fechar as conclusões, é importante resgatar as lições passadas, brevemente abordadas no Capítulo 3 sobre os antecedentes do Plano Piloto e das intenções projetuais de Lucio Costa. Os problemas urbanos apontados nos estudos climáticos atuais são, na maioria, os mesmos debatidos no IV C.I.A.M de 1933, que influenciaram o desenho urbano do Plano Piloto.

Pode-se frisar o acréscimo das preocupações com a emergência climática, população urbana maior que a rural, pandemia, quarentenas, transição energética, entre outros aspectos, que nos fazem pensar em novos ideais de recreação, saúde, habitação, transporte, enfim, de cidade. A pergunta que intitulou o livro de Joseph Sert em 1942, “Can our cities survive?”, parece novamente essencial no questionamento da qualificação dos padrões urbanos.

6.1. LIMITAÇÕES DA ABORDAGEM METODOLÓGICA

Embora esta pesquisa tenha aberto oportunidades para a discussão sobre a Ts relacionada à distribuição espacial das LCZ na macrozona urbana do DF, algumas

questões a limitam e requerem estudos adicionais. Primeiramente, a variabilidade da T_s também resulta da seleção de imagens de satélite, pois os sensores disponíveis não atendem integralmente as necessidades das pesquisas em áreas urbanas na questão da resolução espaço-temporal.

Sensores com alta resolução temporal, como o MODIS, possui alta resolução temporal (1 a 2 dias), entretanto a resolução espacial para a banda termal é de 1 Km. Nesse sentido, foi mantida a utilização de imagens do Landsat 8 (resolução espacial de 100 m) para o estudo do ambiente térmico urbano na escala local. No entanto, sem dados noturnos e por um período de revisita de 16 dias, mostrando sempre um horário específico do dia.

Ressalta-se também o estabelecimento de critérios para a poligonal da área de interesse para o mapeamento intra-urbano de LCZ. Especialmente em casos de conurbações interestaduais como no DF, permanecendo lacunas com relação à delimitação física de áreas urbanas e rurais, além da disponibilização de dados espaciais oficiais. Finalmente, por mais que diversos trabalhos apontam uma forte correlação entre T_s e temperatura do ar, a caracterização das LCZ com dados espectrais não substitui as aferições das variáveis que impactam o conforto térmico humano e o consumo de energia.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados apresentados, sugere-se complementar as análises com informações espectrais para o período noturno. Para outros possíveis desdobramentos da pesquisa, sugere-se a análise das diferenças de temperatura do ar entre zonas com diferentes estruturas urbanas. Um caminho é a comparação de duas ou mais LCZs com diferentes densidades construídas, arranjos de edificações e vegetação (ex.: LCZ 1 e LCZ 3). Para além do levantamento de temperatura do ar, estudos com foco no estresse térmico humano devem ser incentivados incorporando umidade do ar, velocidade do vento e temperatura radiante média.

Melhorias na compreensão de diferentes padrões morfológicos incorporados na LCZ podem ser úteis para fins de planejamento urbano, contribuindo no estabelecimento de quais padrões urbanos devem ser adotados para futuros empreendimentos. E também quais estratégias de mitigação de calor urbano são mais adequadas para cada tipo de LCZ. Logo, perguntas de pesquisa que podem ser feitas incluem:

- Como diferentes LCZ respondem em termos de temperatura e outras variáveis relevantes para o estresse térmico, ao longo do dia e estações climáticas?
- Como os cenários de adensamento em áreas de expansão urbana do DF podem impactar o clima local, baseados no enquadramento da forma urbana dentre as classes de LCZ?
- Quais estratégias de mitigação de calor urbano são mais eficazes em diferentes LCZ do DF?
- Partindo do seu viés climático, como as LCZ podem ser utilizadas na avaliação de serviços ecossistêmicos em área urbana, previstos pelo ZEE, como regulação climática e sequestro de carbono?

Os métodos de trabalho para tais questionamentos podem ser abordadas usando SR, levantamento de dados de campanhas de campo passadas, com o planejamento de novos experimentos com medições pontuais (estações meteorológicas fixas) e transectos, ou ainda por meio de simulações numéricas. Essas questões evocam ainda a necessidade de levantamento de parâmetros urbanísticos em escala compatível com essas análises para toda área urbana, como quantitativos de área impermeável, projeção de edificações, altura, fator de visão do céu, entre outros.

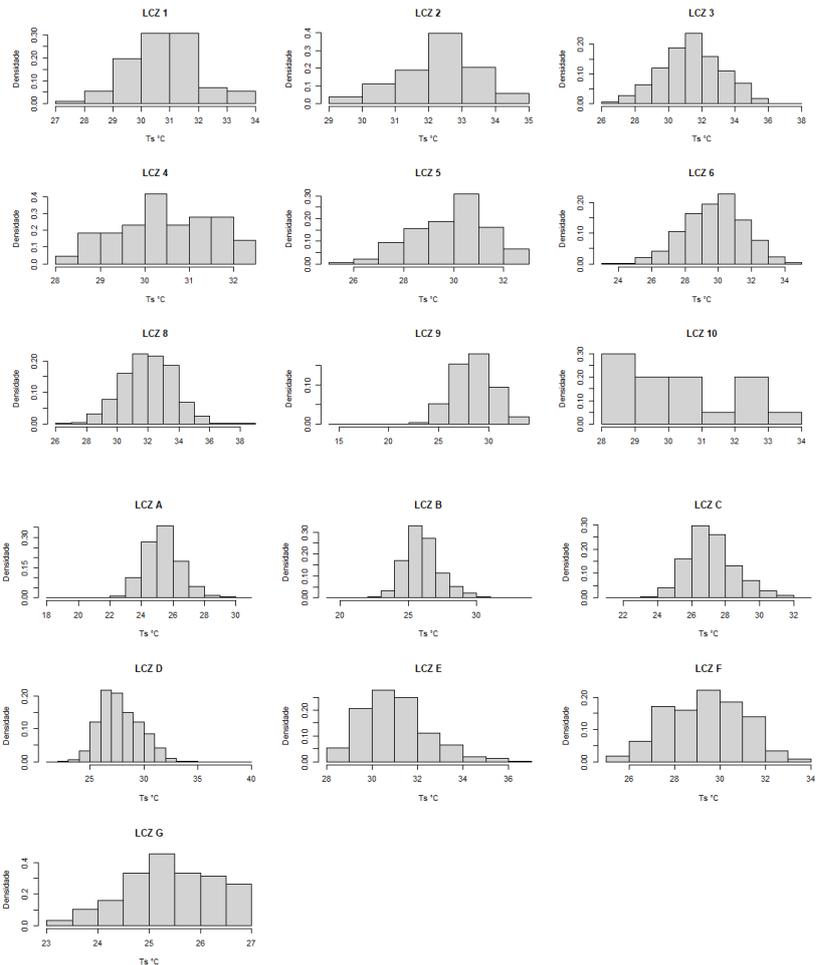
Os resultados esperados englobam a melhor compreensão dos diferentes padrões da forma urbana e o clima local, proporcionando comparações entre estudos a partir de um método padronizado de classificação da morfologia urbana. Esses resultados podem contribuir para a constituição de uma base de dados mais robusta para avaliação dos impactos das estratégias de mitigação do calor urbano, quando necessárias, e que também devem associar fatores socio-econômicos.

ANEXO II

Neste Anexo encontram-se os resultados do teste de Shapiro – Wilk para verificar um dos pressupostos centrais da ANOVA: a aderência dos dados à distribuição normal. Ao realizar o teste, percebeu-se que, para grande parte das variáveis analisadas, o teste indica a rejeição da hipótese nula (p -valor $< 0,05$). Ou seja, o conjunto de dados, em sua maioria, não apresenta uma distribuição normal.

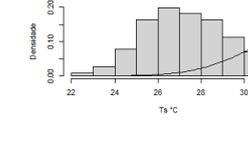
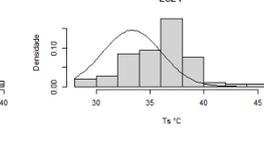
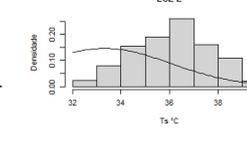
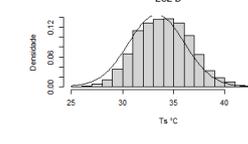
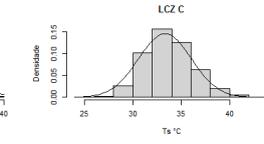
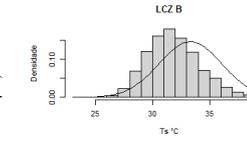
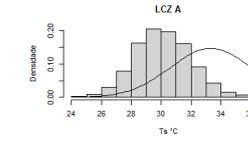
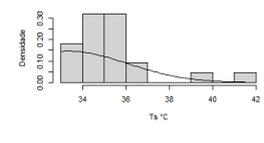
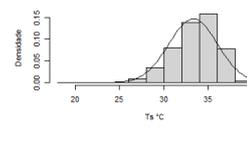
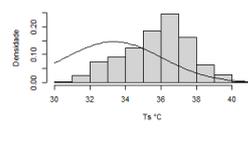
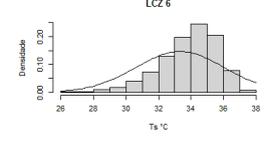
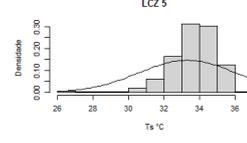
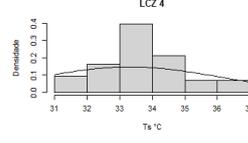
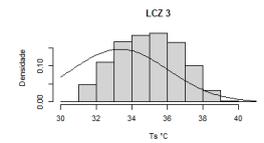
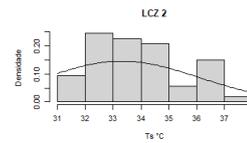
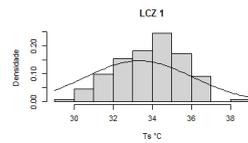
Estação chuvosa

Variável	statistic	p.value	LCZ
Temperatura de superfície	0,986998	0,361967	1
	0,971568	0,235698	2
	0,997614	0,054448	3
	0,967947	0,268199	4
	0,984622	0,00119	5
	0,996337	5,34E-05	6
	0,996846	0,129567	8
	0,99053	9,42E-12	9
	0,906211	0,054	10
	0,980325	3,62E-15	11
	0,972182	4,57E-26	12
	0,985592	1,24E-12	13
	0,982247	3,93E-23	14
	0,968548	7,52E-08	15
	0,990151	0,106365	16
	0,979287	0,074333	17
	EVI	0,962981	0,003598
0,768599		9,6E-08	2
0,957472		6,28E-19	3
0,975129		0,467276	4
0,985801		0,002186	5
0,987086		6,87E-13	6
0,976323		6,43E-10	8
0,980942		8,86E-18	9
0,950883		0,38069	10
0,970023		4,47E-19	11
0,965113		7,6E-29	12
0,962057		1,54E-21	13
0,985254		4,34E-21	14
0,984745		0,000211	15
0,967766		3,19E-05	16
0,975096		0,031726	17
NDMI		0,979274	0,081721
	0,950216	0,027496	2
	0,985121	3,16E-10	3
	0,958628	0,123494	4
	0,995836	0,517936	5
	0,990157	8,06E-11	6
	0,992922	0,000937	8
	0,995292	4,27E-07	9
	0,941277	0,253459	10
	0,986923	7,68E-12	11
	0,995874	1,53E-08	12
	0,986076	2,3E-12	13
	0,996172	2,83E-09	14
	0,995062	0,201484	15
	0,988963	0,065474	16
	0,95877	0,00143	17



Estação Seca

Variável	statistic	p.value	LCZ
Temperatura de superfície	0,987857	0,420449	1
	0,949254	0,025005	2
	0,991694	1,08E-06	3
	0,964685	0,20521	4
	0,921751	3,19E-12	5
	0,965254	3,78E-22	6
	0,986106	8,44E-07	8
	0,979436	1,5E-18	9
	0,770186	0,000177	10
	0,997277	0,002799	11
	0,990937	1,63E-14	12
	0,992028	1,84E-08	13
	0,997307	4,46E-07	14
	0,990075	0,006001	15
	0,9775	0,000779	16
	0,983674	0,172022	17
	EVI	0,958243	0,001556
0,929691		0,003934	2
0,921615		2,01E-25	3
0,938287		0,022594	4
0,988116		0,00769	5
0,951321		6,24E-26	6
0,971615		3,09E-11	8
0,994939		1,56E-07	9
0,933676		0,146346	10
0,993741		5,30E-07	11
0,975423		1,23E-24	12
0,973673		6,97E-18	13
0,964414		1,01E-31	14
0,978666		7,21E-06	15
0,95167		3,95E-07	16
0,966866		0,005718	17
NDMI		0,982404	0,151903
	0,970576	0,213728	2
	0,952919	5,51E-20	3
	0,938342	0,022695	4
	0,989382	0,015477	5
	0,909613	1,06E-33	6
	0,962535	2,61E-13	8
	0,968442	5,12E-23	9
	0,903654	0,035197	10
	0,993615	4,1E-07	11
	0,966979	3,48E-28	12
	0,958232	1,42E-22	13
	0,943828	4,07E-38	14
	0,96492	1,66E-08	15
	0,973436	0,000193	16
	0,95568	0,000737	17



ANEXO III

Abaixo apresenta-se o script com pacotes e funções utilizadas no programa de estatística R.

```
##### Carregando o banco de dados #####  
# Passo 1: selecionar o diretório de trabalho (working directory)  
## Session > Set Working Directory > Choose Directory  
# Passo 2: carregar o banco de dados  
dados <- read.csv2('Cap5_seca_medias.csv', stringsAsFactors = T)  
##### Carregando pacotes #####  
if(!require(pacman)) install.packages("pacman")  
library(pacman)  
pacman::p_load(dplyr, psych, ggplot2, car, rstatix, lmtest, ggpmisc, corrplot)  
##### Visualizando o banco de dados #####  
View(dados) # abre o banco de dados em uma aba separada  
glimpse(dados) # mostra o nome das variáveis  
##### Medidas para variáveis quantitativas #####  
# Função summary - fornece média, mediana, quartis e valores mínimo e máximo  
summary(dados$LST_mean)  
summary(dados$EVI_mean)  
summary(dados$NDMI_mean)  
# Funções describe e describe.by  
describe(dados$LST_mean)  
describeBy(dados$LST_mean, group = dados$LCZ) # descreve variável por grupo  
# Gráfico de dispersão  
plot(dados$LST_mean, dados$EVI_mean,  
      ylab = "EVI", xlab = "Ts °C")  
plot(dados$LST_mean, dados$NDMI_mean,  
      ylab = "NDMI", xlab = "Ts °C")  
plot(dados$NDMI_mean, dados$EVI_mean,  
      ylab = "EVI", xlab = "NDMI")
```

```

# Análise descritiva dos dados para interquartil
dados %>% group_by(LCZ) %>%
  get_summary_stats(LST_mean, type = "median_iqr")
# Análise da distribuição – histograma com curva normal
# Classes urbanas #
par(mfrow=c(3,3)) #quantidade de gráficos na mesma linha
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "1"],
  freq = F,
  ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ 1")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "2"],
  freq = F,
  ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ 2")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "3"],
  freq = F,
  ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ 3")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "4"],
  freq = F,
  ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ 4")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "5"],
  freq = F,
  ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ 5")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "6"],
  freq = F,
  ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ 6")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "8"],

```

```

freq = F,
ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ 8")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "9"],
freq = F,
ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ 9")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "10"],
freq = F,
ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ 10")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)

# Classes naturais/rurais #
par(mfrow=c(3,3)) #quantidade de gráficos na mesma linha
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "11"],
freq = F,
ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ A")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "12"],
freq = F,
ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ B")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "13"],
freq = F,
ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ C")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "14"],
freq = F,
ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ D")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "15"],

```

```

freq = F,
ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ E")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "16"],
freq = F,
ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ F")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)
hist(dados$LST_mean[dados$LCZ == "17"],
freq = F,
ylab = "Densidade", xlab = "Ts °C", main="LCZ G")
curve(dnorm(x, mean = mean(dados$LST_mean), sd = sd(dados$LST_mean)), add = T)

# Verificação dos pressupostos para a análise de correlação: distribuição normal dos dados
## Normalidade (Shapiro-Wilk):
shapiro.test(dados$LST_mean)
shapiro.test(dados$EVI_mean)
shapiro.test(dados$NDMI_mean)

## Correlação de Postos de Spearman (coeficiente = rho) para dados não paramétricos:
cor.test(dados$LST_mean, dados$NDMI_mean, method = "spearman")

# Matrizes de correlação
## Criando a matriz:
matriz <- cor(dados[4:6], method = "spearman")
View(matriz)

## Arredondando para duas casas decimais:
matriz <- round(cor(dados[4:6], method = "spearman"),2)
View(matriz)

# Gráfico boxplot colorido por classes

```

```

library(tidyverse)

library(ggplot2)

## Definindo cores:

cores <- c("red4", "red3", "red1", "chocolate", "orange", "darksalmon", "gray",
"bisque", "gray50", "forestgreen", "green3", "olivedrab", "lightgreen", "gray10",
"lightgoldenrodyellow", "blue")

# exemplos: "red", "blue", "#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07" pode ser o código da cor
encontrado na tabela disponível do link: https://rstudio-pubs-
static.s3.amazonaws.com/3486\_79191ad32cf74955b4502b8530aad627.html

#tem que ser do tamanho do tanto de categorias e do tamanho do labels

dados$LST_mean <- as.numeric(sub(",", ".", dados$LST_mean, fixed = TRUE))

dados$LCZ <- as.factor(dados$LCZ) #ordenar os boxplots, rev reverte a ordem

ggplot(data = dados, mapping = aes(y = LST_mean, x= LCZ, fill=LCZ)) +

  geom_errorbar(stat = "boxplot", width = 0.4) +

#plota a barra de erro Tuckey coef 1,5

  geom_boxplot()+

  stat_summary(fun = mean, geom = "point", shape = 18, size = 2.5, color = "white") +

#apresentação do valor da média no boxplot

  stat_summary(fun = mean, geom = "text", col = "gray25",

    vjust = 0.7, aes(label = paste("M", round(..y.., digits = 1)))) + #plota a média no boxplot

  scale_fill_manual(values = cores, #cores do gráfico

    #labels=c("1", "2", "3", "4", "5", "6", "8", "9", "10", "11", "12", "13", "14", "15", "16",
"17"), # pode retirar com #na frente da linha e fica igual no banco de dados

    name="LCZ")+ #título da legenda

  theme_classic()+ #fundo branco

  xlab("LCZ") + # nome do eixo x e y

  ylab("LST °C")

```



UnB