

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS DO DISTRITO FEDERAL: A CONTRIBUIÇÃO DA VEGETAÇÃO INTRAURBANA

Bárbara Gomes Silva



LaSUS



SICAC

faunb

PPG
FAU
UNE

UnB

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

BÁRBARA GOMES SILVA

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS DO
DISTRITO FEDERAL: A CONTRIBUIÇÃO DA VEGETAÇÃO
INTRAURBANA

ORIENTADOR: PROF. DR. CAIO FREDERICO E SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO

BRASÍLIA/DF: MARÇO, 2020
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

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

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS DO
DISTRITO FEDERAL: A CONTRIBUIÇÃO DA VEGETAÇÃO
INTRAURBANA

BÁRBARA GOMES SILVA

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

APROVADA POR:

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

(Orientador)

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

(Examinadora Interna)

Prof^o Dr. Geovany Jessé Alexandre da Silva (UFPB)

(Examinador Externo)

Prof^o Dr. Rômulo José da Costa Ribeiro (FAU/UnB)

(Suplente)

BRASÍLIA/DF, 17 DE MARÇO DE 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, BÁRBARA GOMES SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS DO DISTRITO FEDERAL: A CONTRIBUIÇÃO DA VEGETAÇÃO INTRAURBANA. [Distrito Federal] 2020. xi, 102 p., 210 x 297 mm (PPG-FAU/UnB, Mestre, Arquitetura e Urbanismo, 2020). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.	
1. Zona Climática Local	2. Simulação computacional
3. Vegetação intraurbana	4. Microclima
5. Índice PET	
I. FAU/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, B. G. (2020). **Simulação Computacional De Zonas Climáticas Locais Do Distrito Federal: A Contribuição Da Vegetação Intraurbana**. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 102 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Bárbara Gomes Silva

TÍTULO: Simulação Computacional De Zonas Climáticas Locais Do Distrito Federal: A Contribuição Da Vegetação Intraurbana.

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

Bárbara Gomes Silva

Qd. 06 Cj. D Cs. 25 S/Sul

CEP: 72.415-304 Gama – DF - Brasil

E-mail: barbarag.arquitetura@gmail.com



*O campo é onde não estamos.
Ali, só ali, há sombras verdadeiras e verdadeiro arvoredo.*

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

A **Deus** e à **Nossa Senhora**, por guiarem meus passos pelo caminho apropriado.

Aos meus pais, **Eleida** e **Manoel**, e ao meu marido, **Fabrícius**, por acreditarem que sou capaz.

Ao Professor **Caio Frederico e Silva**, orientador e amigo, pelo acolhimento desde o primeiro contato.

Aos amigos do SICAC, em especial ao **Thiago Góes** e **Adriano Lopes**, que me acompanharam desde o início.

À banca examinadora, Professora **Marta Romero** e Professor **Geovany Silva**, pelas contribuições.

À **Teresa Santos**, pela parceria tão rica entre Brasil e Portugal.

Ao **Instituto de Geociências da Universidade de Brasília**, por disponibilizar a licença do *software* ArcGIS 16.6.1.

À **Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal do Brasil (FAP-DF)** pelo apoio financeiro.

À **equipe do ENVI-met**, por me concederem a licença *Student* do *Biomet* de forma espontânea.

RESUMO

A vegetação contribui para o aumento da sensação de conforto térmico na escala microclimática. Neste sentido, a presente pesquisa demonstra o impacto do aumento da vegetação na promoção do conforto térmico por meio de simulações microclimáticas. O objetivo é analisar a contribuição da vegetação intraurbana na Temperatura Fisiológica Equivalente (*Physiological Equivalent Temperature* - PET) de diferentes Zonas Climáticas Locais (ZCLs) de três Regiões Administrativas (RAs) do Distrito Federal (DF). Os procedimentos metodológicos estão divididos em cinco etapas: na primeira, determina-se como área de estudo as três RAs com maior Taxa Média Geométrica de Crescimento Anual do DF: Riacho Fundo II – RA XXI, Samambaia – RA XII e Águas Claras – RA XX. Na segunda, realiza-se a classificação das ZCLs com o auxílio do *software* ArcGIS 10.6.1 e de observação *in loco* a partir da geometria urbana e das características morfológicas das respectivas áreas. Na terceira etapa, modelam-se dois cenários para cada ZCL com auxílio do *software* ENVI-met 4.4.4, o cenário original e o cenário com acréscimo de vegetação. Posteriormente, na quarta etapa, simula-se o microclima urbano para três horários do dia (09 h, 15 h e 21 h) para o período climático caracterizado como quente-seco, que tem o mês de setembro como representante deste período e, por fim, na quinta etapa, geram-se gráficos referentes ao parâmetro PET com o auxílio do plug-in Leonardo. Os resultados mostram que o acréscimo de vegetação intraurbana promove a diminuição do grau de estresse fisiológico do pedestre em todos os cenários, o que fica evidente às 15 h. Mais especificamente, observa-se que a implantação da vegetação de forma linear ameniza o desconforto, registrando a redução de até 7° C PET, enquanto nos espaços onde as árvores são dispostas em grupos a amenização é mais suave, de apenas 2,3° C PET. Finalmente, esta pesquisa reforça e comprova o papel das árvores como um recurso para reduzir o calor extremo no contexto urbano, destacando a importância de compreender o clima local no suporte à implementação de estratégias de arborização urbana.

Palavras chaves: Zona Climática Local; Simulação Computacional; Vegetação Intraurbana; Microclima; Índice PET; ENVI-met.

ABSTRACT

The vegetation contributes to the increase in the sensation of thermal comfort on the microclimate scale. In this sense, this research demonstrates the impact of increased vegetation on promoting thermal comfort through microclimate simulations. The objective is to analyse the contribution of intra-urban vegetation to Physiological Equivalent Temperature of different local climatic zones in three administrative regions (RA) of the Federal District (DF) of Brazil. The methodological procedures have five stages: 1) Choosing the three RAs of the DF as areas of study: Riacho Fundo II - RA XXI, Samambaia - RA XII and Águas Claras - RA XX. 2) Classifying ZCLs with the aid of ArcGIS 10.6.1 software and on-site observation from urban geometry and the morphological characteristics of the respective areas. 3) Modeling two scenarios for each ZCL with the aid of the ENVI-met 4.4.4 software, the original scenario and the scenario with added vegetation. 4) Simulating the urban microclimate for different times of the day (09 h, 15 h e 21 h) for the hot-dry climatic period (September is the month that represents this period) and, finally, 5) Generating maps for the parameter PET with the Leonardo plug-in. Results show that the addition of vegetation decreases the physiological stress for pedestrians in some scenarios, especially at afternoon. More accurately, it is observed that the implantation of vegetation in a linear manner provides more significant easing of discomfort, registering a reduction of about 7° C. In contrast, in spaces where trees are arranged in groups, the easing is smoother, of only 2,3° C. Finally, it is concluded that intra-urban vegetation contributes on a local scale to the thermal comfort of the analyzed ZCLs, especially in the afternoon. Finally, this research reinforces the role of trees as a technology to reduce extreme heat in the urban context and it highlights the importance of understanding the climate to support the implementation of urban afforestation strategies.

Key words: Local Climate Zones; Computational Simulation; Urban Vegetation; Microclimate; Physiological Equivalent Temperature, ENVI-met.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 RA I e RA XVI. Fonte: Geoportal, 2019	3
Figura 2 RA XII, RA XX e RA XXI. Fonte: Geoportal, 2019.....	3
Figura 3 Localização de RAs no contexto do Distrito Federal.....	4
Figura 4 Climas Zonais do Brasil. Fonte: IBGE, 2002.	16
Figura 5 Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Fonte: ABNT, 2013.	17
Figura 6 Esquema demonstrando os benefícios da árvore para o microclima urbano. Fonte: a autora.	21
Figura 7 Modelos de árvores disponibilizadas no ENVI-met 4.4.4. Fonte: imagem extraída do ENVI-met.	21
Figura 8 Aspectos do microclima que podem ser analisados pelo <i>software</i> ENVI-met 4.4.4. Adaptado de ENVI-MET, 2020.....	23
Figura 9 Fluxo com as etapas realizadas no processo de simulação computacional do microclima.	23
Figura 10 Barra de tarefas do ENVI-met 4.4.4.....	23
Figura 11 Ambiente de modelagem “SPACES” do ENVI-met 4.4.4.	24
Figura 12 Barra de tarefas do ENVI-met 4.4.4.....	25
Figura 13 Barra de tarefas do ENVI-met 4.4.4.....	25
Figura 14 Barra de tarefas do ENVI-met 4.4.4.....	26
Figura 15 Fluxograma esquemático dos procedimentos metodológicos.....	29
Figura 16 Localização das RAs Riacho Fundo II, Samambaia e Águas Claras no contexto do Distrito Federal.	31
Figura 17 Diagrama dos cenários de modelagem microclimática de uma ZCL.	38
Figura 18 Tipologias de ocupação e cobertura do solo do Riacho Fundo II – RA XXI.	48
Figura 19 Tipologias de ocupação e cobertura do solo do Águas Claras – RA XX.	49
Figura 20 Tipologias de ocupação e cobertura do solo do Samambaia – RA XII.	50
Figura 21 Pontos de abrangência para análise de parâmetros morfológicos das RAs. ...	51
Figura 22 Mapeamento das Zonas Climáticas Locais.	57

Figura 23 Localização da ZCL 3 no contexto do Distrito Federal.	60
Figura 24 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 3 às 09 h do dia 29/09/2018.	61
Figura 25 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 3 às 15 h do dia 29/09/2018.	61
Figura 26 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 3 às 21 h do dia 29/09/2018.	62
Figura 27 Resultados de temperatura do ar para a ZCL 3 às 21h do dia 29/09/2018.	62
Figura 28 Localização da ZCL 6 ⁵ no contexto do Distrito Federal.	63
Figura 29 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 6 ⁵ às 09 h do dia 29/09/2018.	64
Figura 30 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 6 ⁵ às 15 h do dia 29/09/2018.	64
Figura 31 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 6 ⁵ às 21 h do dia 29/09/2018.	65
Figura 32 Localização da ZCL 4 ⁶ no contexto do Distrito Federal.	66
Figura 33 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 4 ⁶ às 09 h do dia 29/09/2018.	67
Figura 34 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 4 ⁶ às 15 h do dia 29/09/2018.	67
Figura 35 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 4 ⁶ às 21h do dia 29/09/2018.	68
Figura 36 Localização da ZCL 1 no contexto do Distrito Federal.	69
Figura 37 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 1 às 09 h do dia 29/09/2018.	69
Figura 38 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 1 às 15 h do dia 29/09/2018.	70
Figura 39 Resultados de temperatura do ar para a ZCL 1 às 19 h do dia 29/09/2018.	71
Figura 40 Localização da ZCL 5 no contexto do Distrito Federal.	72
Figura 41 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 5 às 09 h do dia 29/09/2018.	72

Figura 42 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 5 às 15h do dia 29/09/2018	73
Figura 43 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 5 às 21 h do dia 29/09/2018	73
Figura 44 Sombreamento em calçadas	82
Figura 45 Copas pequenas e menos densas em áreas com árvores agrupadas	82
Figura 46 Árvores dispostas em grupo com espaçamento	83
Figura 47 Área com vegetação possui temperatura menor que áreas impermeáveis.	83
Figura 48 Árvores dispostas de forma linear	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Estrutura da dissertação	8
Tabela 2 Resumo de trabalhos que relacionam vegetação intraurbana e zonas climáticas locais.....	14
Tabela 3 TMGCA, população total e densidade urbana. Fonte: CODEPLAN, 2017	30
Tabela 4 Parâmetros morfológicos para classificação de ZCLs. Adaptado de Stewart e Oke (2012).....	34
Tabela 5 Ferramenta para obtenção dos parâmetros morfológicos.	35
Tabela 6 Valores de PET para cada nível de percepção térmica e grau de estresse fisiológico	42
Tabela 7 Descrição das tipologias de ocupação e cobertura do solo do Riacho Fundo II – RA XXI.	45
Tabela 8 Descrição das tipologias de ocupação e cobertura do solo de Águas Claras – RA XX.	46
Tabela 9 Descrição das tipologias de ocupação e cobertura do solo de Samambaia – RA XII.....	47
Tabela 10 Valores dos parâmetros morfológicos por área de abrangência.	52
Tabela 11 Área das ZCLs para a RA XXI – Riacho Fundo II.....	57
Tabela 12 Área das ZCLs para a RA XX – Águas Claras.....	57
Tabela 13 Área das ZCLs para a RA XII – Samambaia.....	58
Tabela 14 Área total de cada ZCL.....	58
Tabela 15 Variação máxima de PET por ZCL e período do dia	75
Tabela 16 Resultados de temperatura do ar das ZCLs e do INMET para às 12h.....	76
Tabela 17 Resultados de temperatura do ar das ZCLs e do INMET para às 18 h.....	76
Tabela 18 Resultados de umidade relativa do ar das ZCLs e do INMET para às 12 h. .	77
Tabela 19 Resultados de umidade relativa do ar das ZCLs e do INMET para às 18 h. .	77
Tabela 20 Variação máxima de temperatura do ar de trabalhos com o uso do ENVI-met	78

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Temperatura máxima mensal no DF. Fonte: INMET, 2018, adaptado pela autora.	18
Gráfico 2 Temperatura mínima mensal no DF. Fonte: INMET, 2018, adaptado pela autora.	18
Gráfico 3 Umidade relativa do ar mensal no DF. Fonte: INMET, 2018, adaptado pela autora.	18
Gráfico 4 Intensidade dos ventos no DF. Fonte: INMET, 2018, adaptado pela autora.	19
Gráfico 5 Direção dos ventos no DF. Fonte: PROJETEEE, 2020.	19
Gráfico 6 Quantidade de árvores por cenário	41
Gráfico 7 Porcentagem de área edificada, impermeável e permeável por ZCL.....	56
Gráfico 8 Comparação entre os dados simulados e o dado da série histórica referentes à temperatura do ar (INMET).....	76
Gráfico 9 Comparação entre os dados simulados e o dado da série histórica referentes à umidade relativa do ar (INMET).....	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	PROBLEMÁTICA	5
1.2	OBJETIVOS	6
1.2.1	Objetivo geral	6
1.2.2	Objetivos específicos	6
1.3	JUSTIFICATIVA	6
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	8
2	A VEGETAÇÃO E O MICROCLIMA URBANO	9
2.1	ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS	10
2.1.1	Classificações das Zonas Climáticas Locais	10
2.1.2	Aplicação em trabalhos recentes	12
2.2	CONTEXTO CLIMÁTICO DO DISTRITO FEDERAL.....	15
2.2.1	Caracterização Climática.....	15
2.3	OS ASPECTOS FISIOLÓGICOS DA VEGETAÇÃO.....	20
2.4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MICROCLIMA URBANO	22
2.4.1	Modelagem	23
2.4.2	Simulação computacional.....	25
2.4.3	Extração e análise de dados	25
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	27
3.1	MÉTODO DE PESQUISA	28
3.2	DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
3.3	CARACTERIZAÇÃO DE ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS	32
	• Análise de uso e ocupação do solo e geometria urbana.....	32
	• Definição dos pontos de análise e da área de abrangência de cada tipologia..	34
	• Cálculo dos parâmetros de classificação das ZCLs	34
	• Caracterização das ZCLs	35
3.4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MICROCLIMA	36
	• Modelagem	36
	• Simulação computacional	41
	• Extração e análise dos dados	42
	• Validação dos dados	42

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Caracterização de Zonas Climáticas Locais	45
	• Análise de uso e ocupação do solo e geometria urbana.....	45
	• Definição dos pontos de análise e da área de abrangência de cada tipologia..	51
	• Cálculo dos parâmetros de classificação das ZCLs	51
	• Caracterização das ZCLs	52
4.2	Simulação computacional do microclima.....	59
	• Validação dos dados	75
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
	• Diretrizes para implantação de vegetação no projeto urbano	82
	• Limitações da pesquisa	84
	• Perspectivas para trabalhos futuros.....	84
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

As cidades sofrem alterações constantemente, uma vez que a população se torna cada vez mais urbana. A alteração do natural para o edificado é espontânea visto a necessidade humana por abrigo e socialização (SILVA e ROMERO, 2013). Essas alterações, por sua vez, contribuem para a redução de áreas permeáveis e vegetadas, o que intensifica o desconforto térmico no meio urbano.

A população global passou de 5 bilhões no ano 1987 para, aproximadamente, 7 bilhões em 2019. Deste total, 50% deverá habitar as cidades até 2050, segundo estimativa da Organização das Nações Unidas - ONU (2019). No Brasil, mais de 84% da população brasileira concentra-se nos centros urbanos (IBGE, 2010).

Como consequência do processo de urbanização, registra-se o aumento de emissão de gases do efeito estufa na atmosfera que afeta o clima de forma direta e indireta. Segundo o Sistema de Estimativa de Emissão de Gases do Efeitos Estufa – SEEG (2018), a mudança de uso da terra e florestas é responsável por quase 62% das emissões de gás carbônico – CO₂, sendo as alterações de uso do solo o maior causador dessas emissões. Um exemplo disso é a impermeabilização do solo que segundo van Hove *et al.* (2015) e

Feng, Gong e Zhi (2010), contribuem para o efeito das ilhas de calor urbanas, juntamente com as edificações e as escolhas de materiais de superfície. Segundo Stewart e Oke (2012), as principais causas deste fenômeno relacionam-se com as diferenças estruturais e de cobertura do solo das áreas urbanas e rurais, porém observam que, em grande parte das pesquisas, não são considerados os dados quantitativos de exposição local ou de cobertura do solo, o que enfraquece o estudo, visto que “a alteração mais evidente entre as variáveis meteorológicas é observada através das anomalias térmicas próximas à superfície” (CARDOSO, 2015).

O impacto dessas alterações nas cidades interfere negativamente no microclima e no conforto térmico do usuário, sendo cada vez mais relevante a busca de soluções que consigam mitigar os problemas climáticos urbanos, bem como tornar a cidade mais resiliente. A demanda de estudos relacionados ao microclima urbano vem crescendo e deve ter como objetivo, não apenas a investigação dos efeitos do aumento da população nas cidades, mas também, soluções para o planejamento urbano que proporcionem conforto térmico e amenizem os efeitos das alterações climáticas. Neste sentido, o Acordo de Paris objetiva manter o aumento da temperatura global em menos de 2° C (ONU, 2020), tornando-se necessários estudos que sugiram meios de alcançar os resultados esperados.

Para isso, torna-se necessária a compreensão do ambiente urbano, sobretudo, da configuração da sua paisagem e suas características climáticas, levando em consideração suas peculiaridades. Assim, Stewart e Oke (2012) propõem um sistema de classificação do clima e da paisagem urbana e rural em microescala, as Zonas Climáticas Locais (ZCL), que permitem visualizar e investigar, de forma mais eficiente, a realidade climática dessas áreas. Esta metodologia vem sendo constantemente utilizada para compreender a relação de diversos aspectos da cidade com o clima urbano, como o adensamento populacional, as ilhas de calor, o uso e ocupação do solo (CARDOSO, 2015; ZHAOA *et al.*, 2018; MONTEIRO, 2018; SOEIRA, 2019).

Dentre tantos aspectos que podem afetar o microclima urbano, a vegetação urbana se destaca, visto que são muitos os estudos que comprovam seus benefícios para o meio ambiente e a população (MORO, 1976; ABREU-HARBICH e LABAKI, 2010; LÓIS, LABAKI e SANTOS, 2011; LABAKI *et al.* 2011; SHINZATO e DUARTE, 2018 FERREIRA e DUARTE, 2019). Mais especificamente, Labaki *et al.* (2011) defende que

a vegetação proporciona benefícios relacionados ao conforto térmico no ambiente construído.

Segundo Silva (2009), em climas tropicais, como o caso do Brasil, a vegetação é fundamental para a manutenção do microclima quando utilizada de forma adequada. Além disso, ela capta grande quantidade de CO₂, auxiliando nas estratégias de mitigação das mudanças climáticas (RIBEIRO, BORGIO e MARANHO, 2013). Aliado a isto, Szeremeta e Zannin (2013) afirmam que as áreas verdes podem contribuir para a saúde e o bem-estar da população, pois estimulam a prática de exercícios.

No contexto do Distrito Federal (DF) pode-se observar que a vegetação urbana se faz bastante presente em algumas Regiões Administrativas (RAs), como na RA I - Plano Piloto e RA XVI - Lago Sul (

Figura 1), apesar de possuírem configurações distintas, porém é menos presente em outras RAs, como nas abordadas neste estudo, RA XII - Samambaia, RA XX - Águas Claras e RA XXI - Riacho Fundo II (Figura 2).



Figura 1 RA I e RA XVI. Fonte: Geoportal, 2019



Figura 2 RA XII, RA XX e RA XXI. Fonte: Geoportal, 2019

A Figura 3 mostra a distribuição dessas cinco RAs no Distrito Federal, sendo três delas as escolhidas como área de estudo, o que será explicado posteriormente.

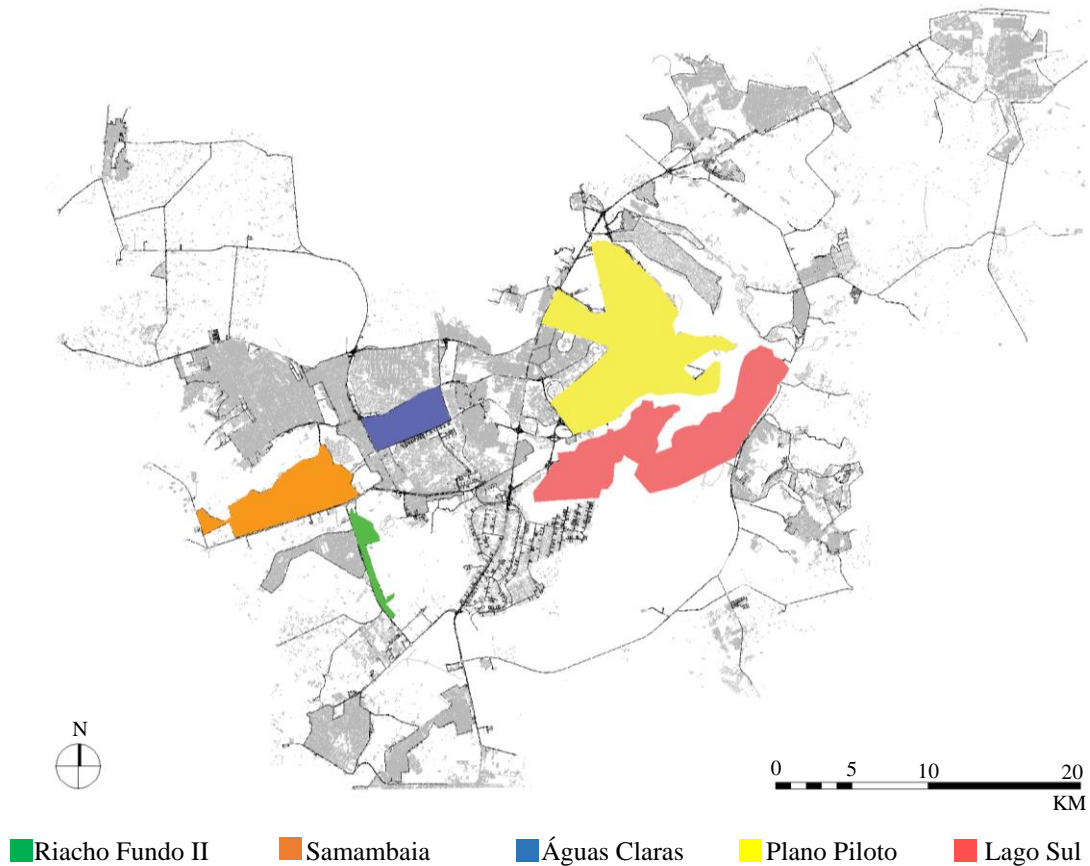


Figura 3 Localização de RAs no contexto do Distrito Federal.

Nesta perspectiva, entender a influência da vegetação nas diversas configurações urbanas se mostra importante, visto que é um aspecto determinante para o conforto urbano, além de uma estratégia de mitigação para alterações microclimáticas, assim, torna-se possível um planejamento urbano mais eficiente, que considere as diversas morfologias urbanas que constituem o DF.

Esta pesquisa analisa a contribuição da vegetação intraurbana na escala local para o conforto térmico de diferentes zonas climáticas locais do DF. Para isso, classificam-se as ZCLs de três RAs (RA XII - Samambaia, RA XX - Águas Claras e RA XXI - Riacho Fundo II). Num segundo momento, com o objetivo de limitar a pesquisa a áreas estritamente urbanas, excluem-se as ZCLs onde as áreas vegetadas não estão localizadas no contexto urbano ou que possuam a soma da área impermeável e construída menor que a área permeável. Então, são realizadas simulações computacionais para as ZCLs identificadas nas três RAs para que seja possível verificar o papel da vegetação em cada

ZCL, levando em consideração que uma mesma ZCL pode se repetir em outras RAs do DF.

1.1 PROBLEMÁTICA

O microclima urbano é constantemente modificado conforme o desenho urbano, as tipologias dos bairros e lotes, a disposição da vegetação intraurbana, dentre outros fatores locais. A falta de harmonia entre cidade e natureza, que ocorre quando há a substituição do natural por concreto e edificações, degenera o meio ambiente e gera problemas para a população (MORO, 1976). No Distrito Federal não é diferente, visto que as alterações na cidade, como o aumento das áreas impermeáveis e a retirada de vegetação, afetam negativamente o microclima.

Loboda e Angelis (2005) afirmam que muitas cidades brasileiras estão em processo de urbanização e a falta de planejamento reflete diretamente na paisagem urbana por desconsiderar, muitas vezes, os elementos naturais. Isso é um problema, já que a cobertura do solo, a vegetação e a topografia são os principais responsáveis pelas alterações referentes ao clima quando se discute a escala microclimática (ROMERO, 2011).

No âmbito do Distrito Federal, os primeiros estudos aplicados com o uso da simulação do microclima urbano ocorreram no Laboratório de Sustentabilidade Aplicada a Arquitetura e ao Urbanismo – LaSUS na Universidade de Brasília no ano de 2009, quando Castelo Branco (2009) analisa os microclimas de uma superquadra em Brasília, verificando as alterações de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos em pontos que apresentam diferenças na distribuição de vegetação; e Silva (2009) analisa o microclima de ruas na cidade de Teresina (PI), de clima tropical subúmido, mostrando que o acréscimo de vegetação nos canteiros centrais das vias aumenta consideravelmente o conforto térmico do pedestre, devendo manter um espaçamento entre as árvores para que se evite o fechamento das copas, o que acumularia o calor nas vias. Ambas as pesquisas indicadas acima utilizam o modelo de simulação ENVI-met.

Cruz, Freitas e Cantuária (2018) avaliam a melhoria no conforto térmico consequente da amenização da radiação solar em ruas e calçadas de Brasília com a presença de vegetação adulta, por meio de medições *in loco*. Contudo, não existem

estudos que mostrem o desempenho térmico da vegetação urbana nas diferentes tipologias de zonas climáticas locais do Distrito Federal, nem tampouco há esta classificação para esta unidade federativa.

A falta de informações climáticas locais que auxiliem em tomadas de decisões mais precisas e individualizadas no planejamento urbano e nos projetos de edificações, muitas vezes, levam o profissional de arquitetura e urbanismo ao equívoco quanto às decisões referentes ao conforto térmico.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a contribuição da vegetação intraurbana no Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) de Zonas Climáticas Locais de três regiões administrativas do Distrito Federal.

1.2.2 Objetivos específicos

- I. Contribuir com o arcabouço teórico do conceito de Zonas Climáticas Locais;
- II. Modelar e simular o microclima de Zonas Climáticas Locais presentes no Riacho Fundo II, Samambaia e Águas Claras – DF;
- III. Desenvolver um método de análise de vegetação intraurbana em Zonas Climáticas Locais;
- IV. Propor diretrizes para a implantação de vegetação no projeto urbano.

1.3 JUSTIFICATIVA

Entender o papel da vegetação na cidade é imprescindível visto que a discussão a respeito de estratégias de mitigação de efeitos do aquecimento global, bem como do desconforto térmico urbano torna-se cada vez maior. Neste sentido, Labaki *et al.* (2011) afirma que a vegetação proporciona efeitos benéficos ao ambiente construído e auxilia no conforto térmico de espaços abertos reduzindo a radiação incidente que atingiria o solo evitando o aquecimento de superfícies. Entretanto, nem sempre a implantação da vegetação

corresponde às demandas climáticas regionais, quanto à quantidade e qualidade nas áreas livres urbanas.

No contexto do Distrito Federal, esse debate possui grande valia, visto que o bioma Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro e possui uma das floras mais ricas do mundo, porém, é bastante vulnerável, possuindo taxas de desmatamento maiores que as da floresta amazônica (KLINK, 2005).

Deve-se questionar se a diminuição da flora nativa e o aumento de áreas impermeabilizadas aumentam o efeito dessa vulnerabilidade quando relacionada a sensações térmicas no meio urbano e se esta pode ser percebida em diferentes intensidades, variando conforme as diversas características morfológicas da área. Lóis *et al.* (2011) concluem que a vegetação em espaços livres urbanos melhora significativamente o conforto térmico no contexto climático de Campinas – SP, principalmente espécies arbóreas dispostas em grupos.

Há diversidade de configurações urbanas no Distrito Federal. Observa-se desde áreas mais compactas, até áreas mais dispersas, algumas mais verticalizadas e outras mais vegetadas. Neste sentido, a definição das zonas climáticas locais do DF poderá auxiliar em diversas questões que não se restringem apenas ao clima e à vegetação, mas também às decisões projetuais dos arquitetos e urbanistas, nas estratégias de mitigação e adaptação das cidades, além de possibilitar um planejamento urbano mais específico para determinada tipologia de ZCL.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação divide-se em cinco capítulos: 1) introdução, 2) a vegetação e o microclima urbano, 3) procedimentos metodológicos, 4) resultados e 5) considerações finais, como exposto na Tabela 1.

O capítulo 1 é introdutório e expõe as premissas da pesquisa, com tema, problemática, justificativa e objetivos. No capítulo 2 realiza-se uma revisão bibliográfica de literatura e, conseqüentemente, o desenvolvimento do referencial teórico sobre vegetação, zonas climáticas locais e clima urbano. O capítulo 3 apresenta o método, quanto à definição da área de estudo, a classificação das Zonas Climáticas Locais e a simulação computacional. Detalha-se o passo-a-passo dos procedimentos propostos, com explicações sobre as ferramentas, cenários, configurações, parâmetros avaliados e forma de tratamento dos dados. No capítulo 4 apresenta-se e discute-se os resultados obtidos. Por fim, no capítulo 5 são feitas as considerações finais a respeito do estudo.

Capítulo	Título	Conteúdo	Autores-chave/Ano
1	Introdução	<ul style="list-style-type: none"> • Problemática • Objetivos • Justificativa • Estrutura do trabalho 	<ul style="list-style-type: none"> • (FENG, GONG e ZHI, 2010) • (LABAKI, SANTOS, et al., 2011) • (SILVA, 2009) • (SILVA e ROMERO, 2013) • (STEWART e OKE, 2012) • (SZEREMETA e ZANNIN, 2013) • (VAN HOVE, JACOBS, et al., 2015)
2	A vegetação e o microclima urbano	<ul style="list-style-type: none"> • Os aspectos térmicos da vegetação • Zonas Climáticas Locais • Contexto climático do Distrito Federal • Simulação Computacional do Microclima Urbano 	<ul style="list-style-type: none"> • (AYOADE, 1994) • (CARDOSO, MARCUZZO e BARROS, 2014) • (CASTELO BRANCO, 2009) • (INMET, 2018) • (ROMERO, 2011) • (STEWART e OKE, 2012)
3	Procedimentos metodológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Delimitação da área de estudo • Caracterização das Zonas Climáticas Locais • Simulação computacional 	<ul style="list-style-type: none"> • (BRUSE e FLEER, 1998) • (CARDOSO, 2015)(HÖPPE, 1999) • (STEWART e OKE, 2012)
4	Resultados e discussão	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterização das Zonas Climáticas Locais • Simulação computacional do microclima urbano 	
5	Considerações finais	<ul style="list-style-type: none"> • Conclusões • Diretrizes para implantação de vegetação no projeto urbano • Limitações da pesquisa • Perspectivas para trabalhos futuros 	

Tabela 1 Estrutura da dissertação

2 A VEGETAÇÃO E O MICROCLIMA URBANO

Este capítulo aborda a conceituação da vegetação e do microclima urbano. Para uma melhor compreensão do seu conteúdo, divide-se o capítulo em três subtópicos: 2.1) zonas climáticas locais, 2.2) contexto climático do Distrito Federal, 2.3) os aspectos fisiológicos da vegetação e 2.4) simulação computacional do microclima urbano.

O primeiro consiste em conceituar as Zonas Climáticas Locais e apresentar o sistema de classificação da paisagem desenvolvida por Stewart e Oke (2012) que considera parâmetros e características urbanas e rurais para compreender de forma mais detalhada o comportamento do clima em uma escala local, ou escala microclimática, como é denominada, além de apresentar uma revisão sistemática a respeito da relação entre vegetação intraurbana e as Zonas Climáticas Locais, com foco em estudos que analisam o conforto térmico. A segunda parte discorre a respeito das diferentes escalas do clima no contexto do Distrito Federal. A terceira, apresenta a fisiologia da vegetação relacionando-a aos aspectos térmicos no meio urbano. Já a quarta, apresenta a simulação computacional utilizada em estudos de conforto térmico urbano.

2.1 ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS

As mudanças que ocorrem na cidade em consequência da urbanização alteram o clima de maneira significativa, o que interfere diretamente na vida dos habitantes, além de acarretar diversos problemas ambientais. Essas alterações e interferências foram discutidas em pesquisas a respeito do clima urbano e a mitigação de mudanças climáticas (MARTINS e FERREIRA, 2011).

Segundo Sathler (2014), é indispensável discutir a respeito das transformações sócio ecológicas que relacionam o contexto geográfico da cidade e as mudanças climáticas que ameaçam a sustentabilidade. Deve-se considerar as adversidades que essas ameaças podem causar à população, seja física ou psicológica, por meio da elevação da temperatura do ar, do comportamento dos ventos e do aumento do consumo de energia (SOUZA e KATZSCHNER, 2018).

Diante disso, vê-se necessária a caracterização da paisagem mais detalhada e de forma local para melhor entendimento de alterações meteorológicas no contexto microclimático. Neste sentido, as Zonas Climáticas Locais são definidas como áreas que apresentam uniformidade quanto à cobertura do solo, estrutura urbana, materiais e atividades humanas que, em escala horizontal, abrangem centenas de metros a vários quilômetros.

Segundo Stewart e Oke (2012), o nome é apropriado pois as classificações são locais quanto à escala, climáticas quanto à natureza e zonais quanto às representações. Ainda afirmam que grande parte dos pesquisadores confiam apenas nos qualificadores urbanos e rurais para descrever paisagens locais, enquanto as ZCLs propõem uma classificação que vai além, baseando-se no clima urbano e rural que pode ser aplicada em estudos de clima local de forma universal e fácil.

2.1.1 Classificações das Zonas Climáticas Locais

A classificação de paisagem proposta por Stewart e Oke (2012) é uma evolução de diversos estudos que propunham classificar, de maneira mais detalhada, tipologias urbanas e rurais, e o clima urbano (CHANDLER, 1965; AUER, 1978; ELLEFSEN, 1991;

WILMERS, 1991; SCHERER *et al.*, 1999). Segundo Oke (2012) essas classificações possuíam limitações, visto que nem todas utilizavam um conjunto de propriedades para definição das classe, além de se restringirem ao urbano e a cenários econômicos pouco abrangentes, voltados à cidades modernas e desenvolvidas.

A proposta de classificação das ZCLs utiliza uma nomenclatura simples e lógica, além de possuir, a princípio, uma classificação de classes genéricas que são desmembradas em subclasses, promovendo a simplificação dos cenários que devem possuir um diâmetro entre 400 e 1000 metros, com o intuito de ser aplicável em diferentes contextos urbanos e rurais. Primeiramente, identificam-se as tipologias, definidas como trechos de terra em escala local com características físicas e/ou culturais, diferenciadas pelas características da 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 as ondas de radiação (STEWART e OKE, 2012). Neste sentido, são definidas 17 Zonas Climáticas Locais – ZCLs (tradução de Local Climate Zones – LCZs) classificadas de forma qualitativa com base em características de cobertura da superfície, estrutura, material e atividade humana.

Entende-se que nem todas as tipologias urbanas se enquadram apenas em uma classificação de Zona Climática Local, nestes casos criam-se subclasses que unem duas ou mais ZCLs. Para maior compreensão das ZCLs classificadas são utilizados parâmetros morfológicos para cada ZCL. Stewart e Oke (2012) afirmam que esses parâmetros dificilmente coincidirão com a tabela. Utiliza-se a maior quantidade de parâmetros coincidentes para definição da subclassificação das ZCLs.

Assim, utiliza-se como critério primário de classificação as características de cobertura do solo e da tipologia das edificações e, em seguida, são classificadas as subclasses considerando os valores que mais se aproximam dos parâmetros morfológicos. Não se utiliza a caracterização da vegetação, como quantidade e sazonalidade das espécies, como parâmetro de classificação.

2.1.2 Aplicação em trabalhos recentes

A metodologia de classificação das Zonas Climáticas Locais está sendo utilizada em diversos estudos de clima urbano (CARDOSO, 2015; MONTEIRO, 2018; ZHAOA *et al.*, 2018; SOEIRA, 2019), mostrando-se eficiente quando pretende-se selecionar áreas para medições *in-loco*, realizar zoneamentos a partir de imagens de satélites e definir características para modelagens climáticas, além de colaborar com estudos climáticos para planejamento urbano adequado relacionado à mitigação dos efeitos do adensamento populacional e dos problemas climáticos (RICHARD *et al.*, 2018; FERREIRA e DUARTE, 2018). Também vem sendo aplicada em estudos que analisam a paisagem urbana, conforto térmico e clima local, por meio da investigação do comportamento térmico das diferentes zonas, não sendo exclusivamente relacionadas às ilhas de calor urbana (ZHAOA, JENSENA, *et al.*, 2018).

Monteiro (2018) relaciona os parâmetros morfológicos das Zonas Climáticas Locais com dados de temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de Campinas - SP, verificando o diferente comportamento climático das zonas identificadas por ela. Soeira (2019) estima e compara a correlação entre o fator de visão do céu e a variação da temperatura do ar, também em Campinas - SP, percebendo que a ação gerada pelo fator de visão do céu no aumento das temperaturas, variava de acordo com a morfologia e a cobertura da superfície. Cardoso (2015) observa que essas variações no comportamento das zonas acarretam em intensidades de ilhas de calor urbanas distintas e que quanto mais próximas as características físicas das zonas, menor é a intensidade de variação das ilhas de calor.

Quanto a questões de permeabilidade do solo, Masiero e Souza (2015) apontam que os valores mais altos de amplitude térmica nas Zonas Climáticas Locais demonstram que a taxa de impermeabilização elevada e características de áreas mais adensadas na cidade prejudicam a ventilação natural. As áreas com maior porcentagem de permeabilidade do solo e menor área construída são também, as que apresentam condições de conforto térmico mais satisfatórias (FERNANDES e MASIERO, 2018).

Para complementar a metodologia de classificação das Zonas Climáticas Locais, alguns estudos incorporam ferramentas de geoprocessamento¹ no processo (GONÇALVES *et al.*, 2013; FERREIRA e DUARTE, 2018) o que facilita a manipulação e a análise dos dados. Nesse sentido, o *World Urban Database* (WUDAPT) é um banco de dados criado com o objetivo de coletar os dados sobre a forma e função das cidades por todo o mundo e reuni-los em uma plataforma de georreferenciamento on-line e gratuito, a Geopedia, possibilitando o compartilhamento de informações das Zonas Climáticas Locais em qualquer localidade. No Brasil, apenas cinco cidades possuem dados cadastrados na plataforma: Guarulhos – SP, São Paulo – SP, Rio de Janeiro – RJ, Aracaju – SE e Vitória – ES (Geopedia - WUDAPT, 2019).

Estudos que investiguem o papel da vegetação intraurbana nas ZCLs ainda são escassos. Por meio de uma revisão sistemática foi possível verificar o estado da arte a respeito do tema. Para isso, utiliza-se a *string* de busca "*urban vegetation*" AND "*thermal comfort*" AND "*local climate zone*" AND "*LCZ*" no portal do *Google Scholar*, pois dessa forma é possível localizar os termos quando estes aparecem, também, nos demais sites de periódicos on-line. Utiliza-se como critérios de inclusão os trabalhos publicados nos últimos dez anos (2009 a 2019) que apresentem os termos da *string* em qualquer parte do texto publicado.

Foram identificadas setenta publicações que cumprem os critérios de inclusão citados acima, porém apenas sete publicações correspondem a estudos que verificam o papel da vegetação intraurbana no conforto térmico em escala de ZCL (Tabela 2) e foram publicados entre 2015 e 2017.

Apenas um estudo refere-se a uma cidade brasileira, Campinas – SP, e foi publicado no ano de 2017. Este estudo descreve meios de mitigar a temperatura do ar no contexto urbano na escala de ZCL e verifica que o aumento da vegetação reduz a temperatura do ar e a temperatura radiante em todas as áreas analisadas.

Nos demais trabalhos, as áreas de estudo localizam-se nos Estados Unidos, Argentina, Sérvia, Alemanha, Ilhas Maltesas, Reino Unido e China, e possuem

¹ Processamento de dados referenciados geograficamente, desde a coleta até a geração e a exibição das informações por meio de mapas convencionais, relatórios, arquivos digitais e gráficos, entre outros (SILVA, 2006).

características climáticas referentes ao microclima, bastante distintas do contexto brasileiro.

Em todos os estudos é possível verificar os benefícios da vegetação intraurbana no conforto térmico da área, sendo que em todos os casos há a diminuição de calor urbano. Quanto à relação dessa diminuição de temperatura, os motivos são diversos, como o aumento da área vegetada e da diminuição do fator H/W, a localização das árvores e o formato das copas, a densidade da folhagem, a variação da geometria urbana e das condições meteorológicas e a tipologia da vegetação, incluindo a vegetação em escala de lote.

TÍTULO	AUTORES E ANO	ÁREA DE ESTUDO	OBJETIVO	RESULTADOS OBTIDOS
Social dimensions of urban heat island mitigation using community gardens	(GOLDMAN, 2017)	Filadélfia, EUA	Analisar os efeitos da composição do jardim urbano no conforto térmico de um bairro.	Redução das temperaturas urbanas e aumento do conforto térmico devido à presença de cobertura de árvores.
The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: the cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina	(ALCHAPAR, PEZZUTO, <i>et al.</i> , 2017)	Campinas, Brasil e Mendoza, Argentina	Descrever diferentes maneiras de reduzir a temperatura do ar urbano e seus resultados em duas cidades: Campinas, Brasil e Mendoza, Argentina.	Redução das temperaturas do ar e temperaturas radiantes médias. Diminuição da temperatura urbana com o aumento da vegetação quando a relação de aspecto H/W é menor.
Influence of changing trees locations on thermal comfort on street parking lot and footways	(MILOŠEVIĆ, BAJŠANSKI e SAVIĆ, 2017)	Novi Sad, Sérvia	Desenvolver um procedimento para alterar os locais das árvores, a fim de melhorar o conforto térmico externo em estacionamentos de rua e nos passeios associados em escala de ZCL.	Localização e forma das copas das árvores melhoram o conforto térmico ao ar livre.
Temporal variations in microclimate cooling induced by urban trees in Mainz, Germany	(LINDÉN, FONTI e ESPER, 2016)	Mainz, Alemanha	Monitorar o resfriamento induzido pela transpiração de árvores ao longo de dois verões em cinco ambientes urbanos caracterizados por níveis variáveis de verde e geometria urbana.	Mitigação do excesso de calor urbano. A geometria urbana, a hora do dia e as condições meteorológicas predominantes modulam esse efeito.
The urban heat island effect in Malta and the adequacy of green roofs in its mitigation	(SCICLUNA, 2016)	Ilhas Maltesas	Compreender o fenômeno de Ilhas de Calor Urbanas nas ZCLs e verificar o potencial dos telhados verdes em sua mitigação.	Temperaturas mais baixas. Os telhados verdes ajudariam na mitigação do efeito de ilhas de calor urbana.
Green infrastructure as an adaptation approach to tackling urban overheating in the Glasgow Clyde Valley Region, UK	(EMMANUEL e LOCONSOLE, 2015)	Glasgow, Reino Unido	Avaliar a eficácia de infraestruturas verdes no superaquecimento em aglomerações urbanas de clima frio na escala de ZCL.	O aumento de 20% de cobertura verde poderia eliminar de um terço a metade do efeito de ilha de calor. As reduções locais na temperatura da superfície são de até 2 ° C.
Cooling performance of residential greenery in localised urban climates: a case study in Shanghai, China	(YANG, LAU e QIAN, 2015)	Shanghai, China	Propor uma estrutura de pesquisa inspirada na ideia de ZCL para investigar o desempenho de resfriamento de vegetação residencial em microclimas urbanos.	O sombreamento da copa das árvores e a densidade geral da folhagem foram capazes de explicar, em parte, a variação na mitigação da temperatura do ar. A vegetação residencial deve ser integrada à rede verde local para otimizar seu desempenho de resfriamento.

Tabela 2 Resumo de trabalhos que relacionam vegetação intraurbana e zonas climáticas locais.

2.2 CONTEXTO CLIMÁTICO DO DISTRITO FEDERAL

Pode-se dizer que o clima de uma região é composto por um conjunto de condições atmosféricas que, de alguma forma, influenciam o meio, e pode ser dividido em macroclima, mesoclima e microclima (AYOADE, 1994).

Segundo Rego (2015), a escala climática nos proporciona diferentes percepções dos fenômenos atmosféricos. Enquanto numa escala mesoclimática percebe-se a interferência de massas de ar no clima, na escala microclimática percebe-se a interferência do homem no mesmo, principalmente em discussões a respeito do conforto térmico. O macroclima engloba a escala de hemisférios e continentes, o mesoclima é regional e compreende florestas e cidades como um todo, enquanto o microclima diz respeito à escala local, como quadras, ruas e parques, por exemplo.

O microclima é afetado, prioritariamente, pelo entorno imediato (CASTELO BRANCO, 2009). Mas além disso, fatores locais podem interferir nos valores de temperatura e umidade relativa em curtas distâncias, como área permeável e impermeável, altura dos edifícios, tipos de materiais que revestem as superfícies, quantidade e tipo de vegetação.

Segundo Romero (2011), o meio urbano não apresenta apenas uma configuração, mas sim uma combinação de configurações. Essas configurações formam um mosaico de microclimas que se distribuem pela cidade. No Distrito Federal isso se repete, visto que é formado por trinta Regiões Administrativas, onde em cada uma delas é possível identificar variedades de microclimas, quando consideramos as características morfológicas. Apesar das características mesoclimáticas serem as mesmas, as diversas estruturas que compõem o meio urbano alteram o clima local.

2.2.1 Caracterização Climática

O Distrito Federal possui área igual a 5801,9 km², localiza-se na região central do Brasil (Latitude: 15,78° a Sul; Longitude: 47,92° a Oeste) e apresenta altitudes que variam próximas a 1.000 m (CARDOSO, MARCUZZO e BARROS, 2014).

De acordo com a classificação de Köppen-Geiger apud Silva (2013) os climas do Distrito Federal são três: AW, Cwa e Cwb, clima tropical com inverno seco, clima temperado úmido com inverno seco e verão quente, e clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado, respectivamente. Embora perceba-se a subdivisão do DF em 3 mesozonas climáticas, outras metodologias não consideram o DF como um território com diferenças mesoclimáticas. Pode-se citar o mapa climático do IBGE e o Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ABNT, 2013).

O mapa de climas zonais do Brasil (IBGE, 2002) mostra que o DF se enquadra no Clima Tropical Brasil Central (Figura 4) com quatro a cinco meses secos e possui dois períodos nítidos: quente-úmido, de outubro a abril; e quente-seco, de maio a setembro (FERREIRA, 1965). Este mapa classifica as zonas de forma genérica.



Figura 4 Climas Zonais do Brasil. Fonte: IBGE, 2002.

A Norma de Desempenho Térmico de Edificações – NBR 15575 (ABNT, 2013) faz a divisão do Brasil em oito zonas bioclimáticas (Figura 5) por sua homogeneidade referente ao clima e propõe recomendações técnico-construtivas para que seja possível adequar as construções ao contexto climático da região. O Distrito Federal está localizado na zona bioclimática 4.

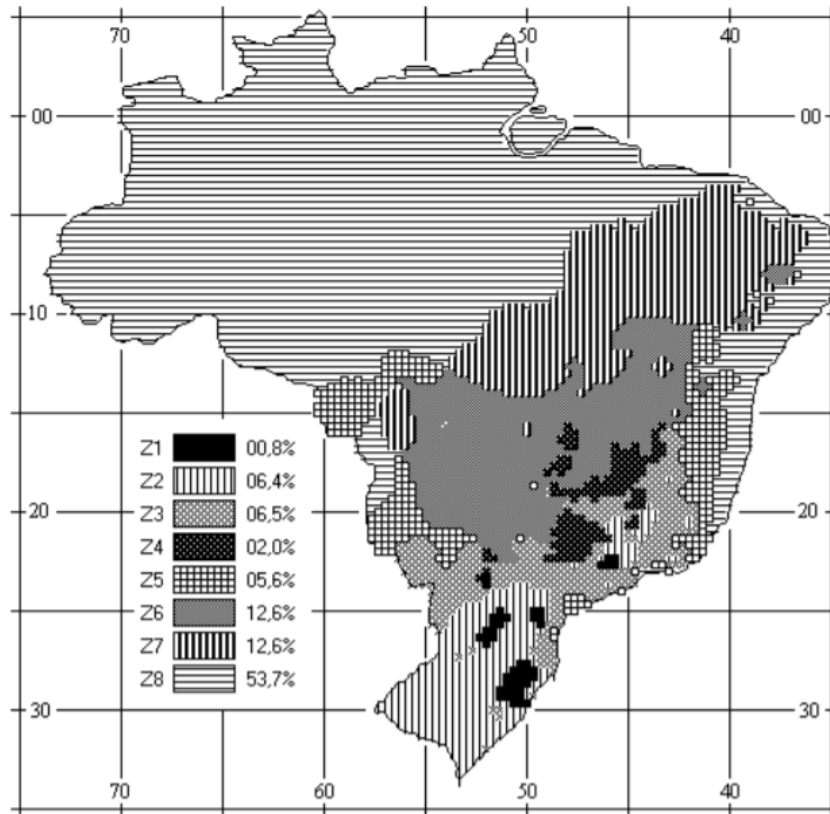


Figura 5 Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Fonte: ABNT, 2013.

A caracterização climática do DF toma Brasília como a cidade que representa suas características, o que pode ser descrito por meio dos gráficos das normais climatológicas, que são as “médias de dados climatológicos calculadas para períodos consecutivos de 30 anos” (OMM, 1989), para o período de 1981 a 2010 (INMET, 2018). Os dados apresentados a seguir são: temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar, intensidade do vento e direção resultante do vento.

O Gráfico 1 apresenta as temperaturas máximas mensais. Observa-se que a menor temperatura ocorre em junho (25°C) e a maior, em setembro ($28,4^{\circ}\text{C}$). Já as temperaturas mínimas mensais (Gráfico 2) não apresentam grandes alterações entre outubro e março, e começam a cair em abril, até o mês mais frio do ano: julho, com $13,7^{\circ}\text{C}$; quando voltam a subir. O período de abril a setembro, em que ocorrem as quedas de temperaturas mínimas, coincide com o período quente-seco determinado por Ferreira (1965).

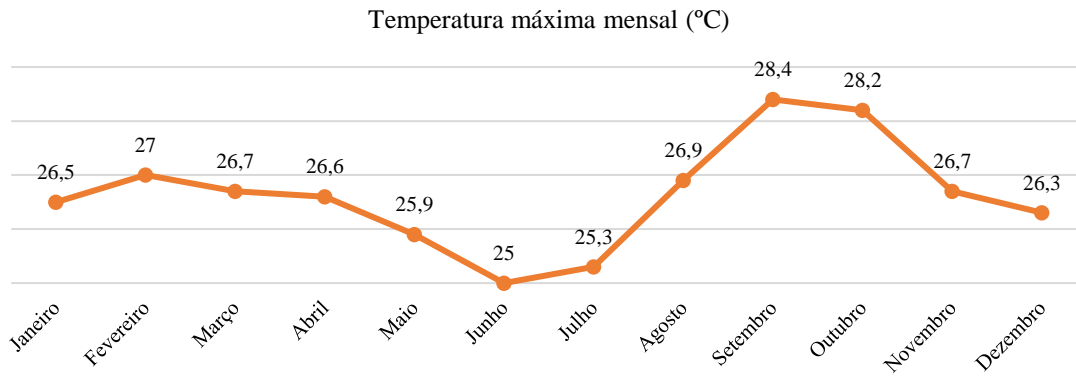


Gráfico 1 Temperatura máxima mensal no DF. Fonte: INMET, 2018, adaptado pela autora.

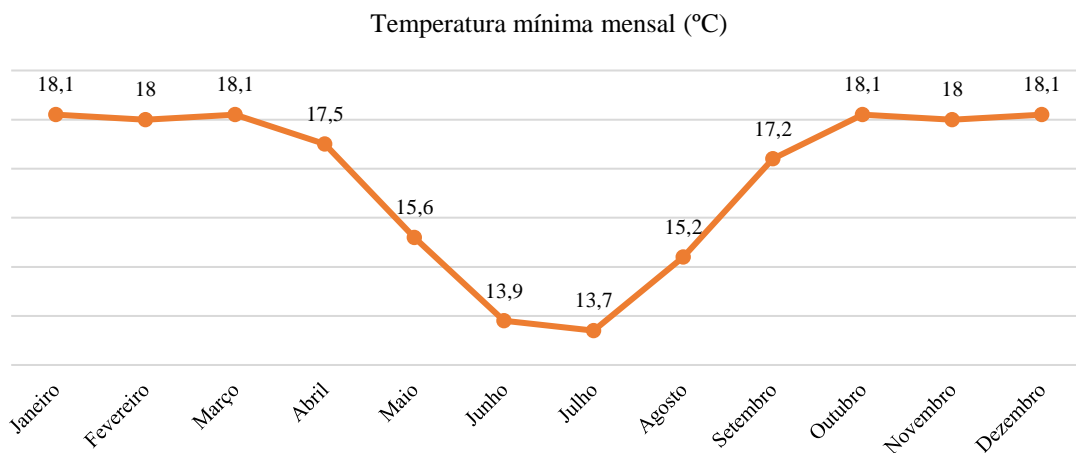


Gráfico 2 Temperatura mínima mensal no DF. Fonte: INMET, 2018, adaptado pela autora.

Quanto à umidade relativa média, observa-se mínima de 46,8% em agosto e máxima de 78% em dezembro (Gráfico 3). Os meses que apresentam menores porcentagens de umidade relativa do ar coincidem com o período quente-seco, enquanto as maiores porcentagens são percebidas no período quente-úmido, segundo classificação de Ferreira (1985).

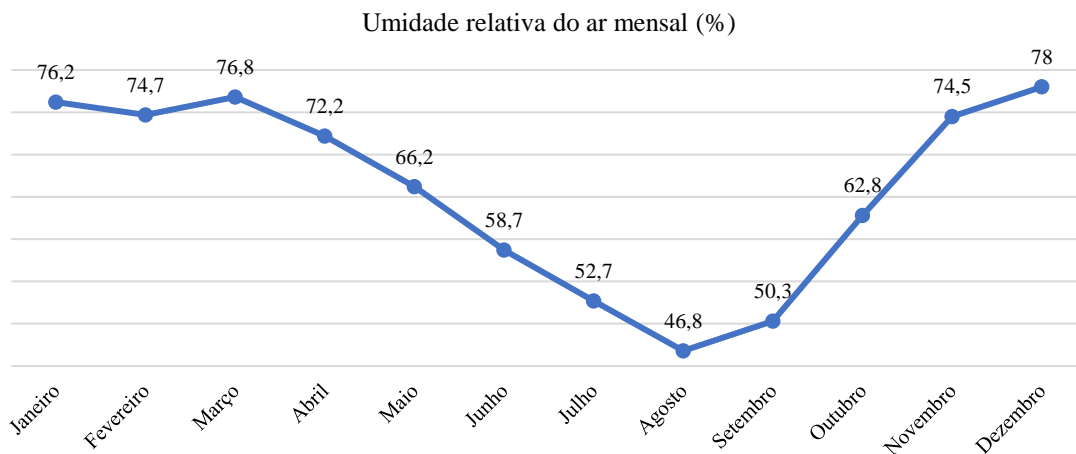


Gráfico 3 Umidade relativa do ar mensal no DF. Fonte: INMET, 2018, adaptado pela autora.

Observa-se que a intensidade dos ventos no DF (Gráfico 4) varia de 2,9 m/s a 3,4 m/s, sendo que o menor valor é percebido em maio. Há predominância de ventos vindos da direção leste (Gráfico 5), o que influencia na direção das chuvas, que acompanham esse sentido.

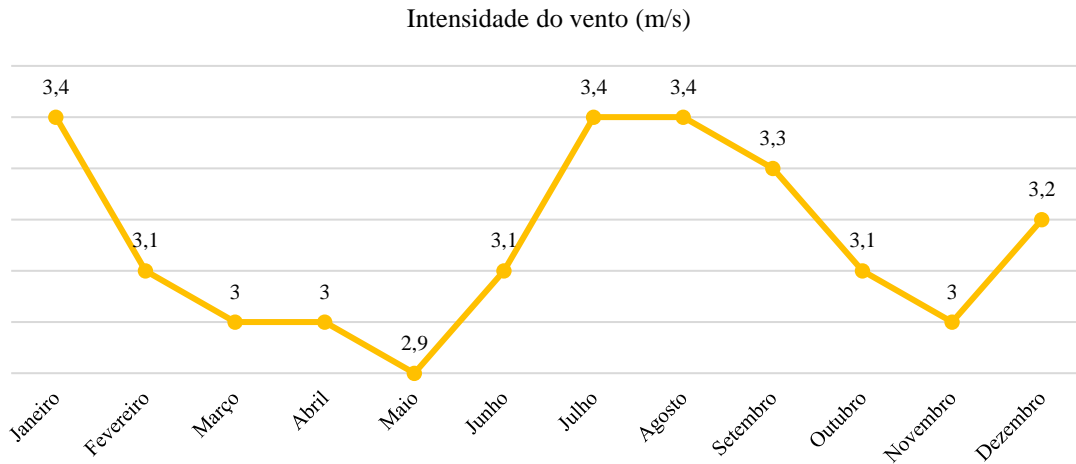
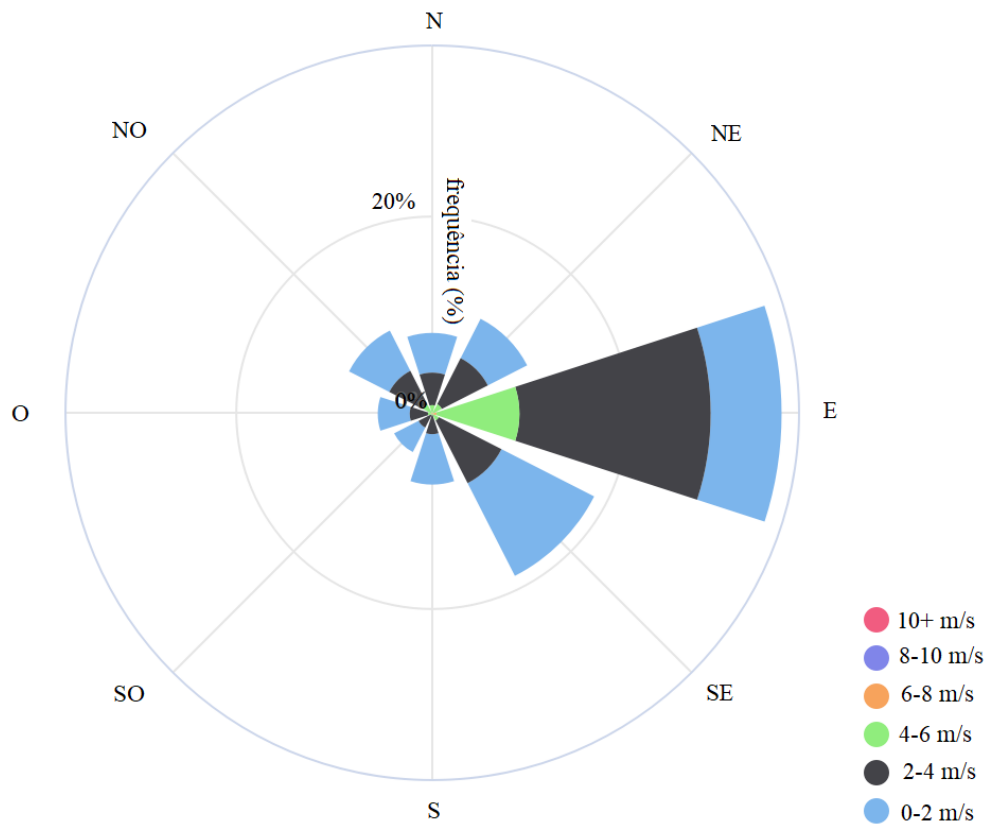


Gráfico 4 Intensidade dos ventos no DF. Fonte: INMET, 2018, adaptado pela autora.



2.3 OS ASPECTOS FISIOLÓGICOS DA VEGETAÇÃO

A vegetação impacta fortemente o microclima. Neste trabalho, a vegetação será compreendida como espécies arbóreas, visto que não haverá acréscimo de áreas gramadas nos cenários analisados, sendo que a vegetação será acrescida em espaços verdes já existentes.

A vegetação é fator determinante para a manutenção do microclima urbano. Quando disposta de forma ambientalmente consciente, desempenha função promotora de conforto térmico, melhora a qualidade do ar, além de tornar a cidade mais agradável visualmente. A localização das árvores, por exemplo, bem como as características das copas, são aspectos importantes para o conforto térmico em espaços abertos (MILOŠEVIĆ, BAJŠANSKI e SAVIĆ, 2017).

As superfícies compostas por gramíneas, apesar de apresentarem temperaturas mais baixas que superfícies impermeáveis, contribuem pouco para a amenização da temperatura do ar em escala microclimática, enquanto a sombra das árvores mostra-se mais eficaz neste sentido (ZORZI e GRIGOLETTI, 2016). Árvores podem cortar a incidência da luz em mais de 90%, diminuindo a temperatura e a luz direta sobre o pedestre (BUCKERIDGE, 2015). Além disso, a evapotranspiração realizada pelas folhas diminui os picos de temperatura durante o dia (WILMERS, 1991). Neste sentido, o benefício das árvores para o conforto térmico está relacionado majoritariamente à distribuição das folhas e ao índice de área foliar, enquanto a altura do tronco aparenta ser um fator menos importante (MORAKINYO e LAM, 2016).

A vegetação colabora também para o aumento da umidade do ar e ocorre de três formas: transpiração fisiológica das plantas, evaporação física direta das chuvas e clorovaporização de vapor de água no decorrer da assimilação clorofílica de CO₂ que ocorre por meio da ação dos raios solares (LLANDERT, 1982). Segundo Romero *et al.* (2019), “a instalação de equipamentos urbanos tende a suprimir áreas extensas de vegetação e a substituição de áreas fotossinteticamente ativas por áreas inativas”, prejudicando a absorção de CO₂ e, conseqüentemente, afetando a umidade do ar.

Nesse sentido, plantar árvores nos espaços públicos pode ser útil para combater as mudanças climáticas em microescala (ABREU-HARBICH, LABAKI e MATZARAKIS,

2015). O planejamento urbano que considere a implantação de vegetação nos espaços livres de forma adequada é imprescindível para garantir o conforto térmico do usuário.

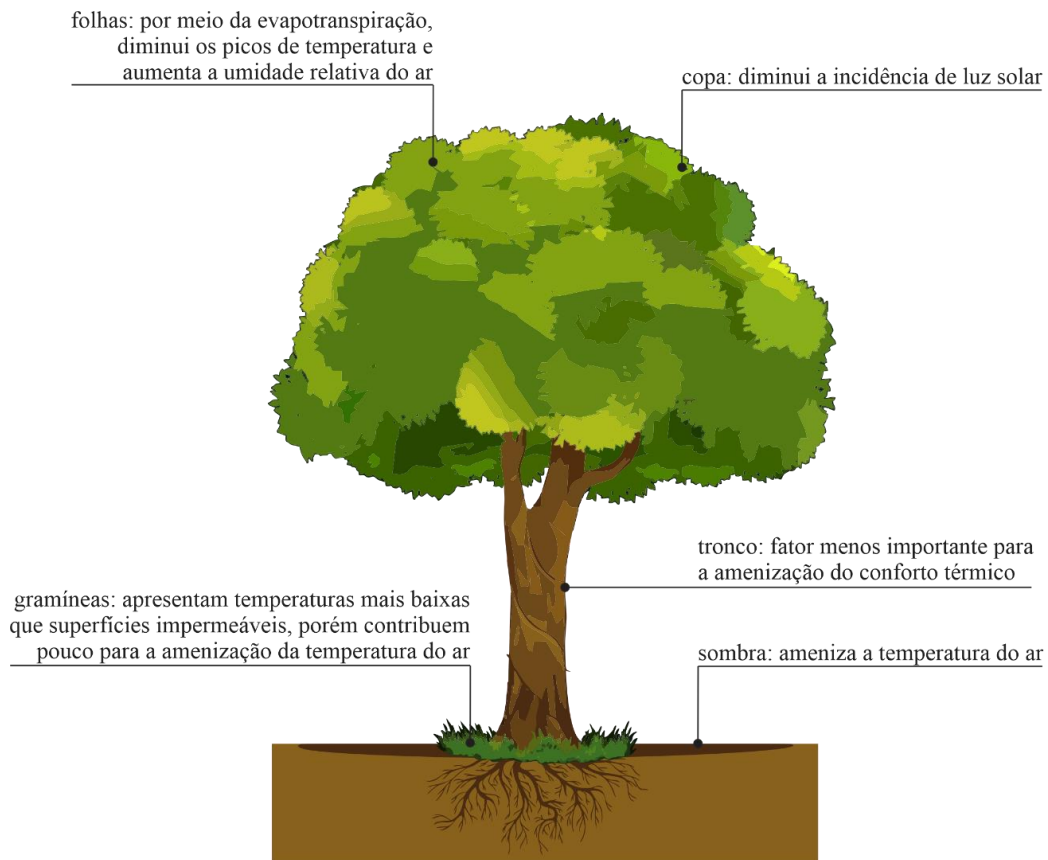


Figura 6 Esquema demonstrando os benefícios da árvore para o microclima urbano. Fonte: a autora.

O *software* ENVI-met, apresentado no item 2.4 e utilizado em uma das etapas metodológicas desta pesquisa, é um dos únicos programas que utiliza os aspectos fisiológicos da vegetação na simulação computacional do microclima. O programa calcula a temperatura das folhas individualmente para cada grid modelado, levando em consideração a taxa fotossintética, a disponibilidade de água no solo e a taxa de evapotranspiração local (ENVI_MET, 2020). As árvores podem ser definidas de acordo com as características das folhas e formato da copa (Figura 7).

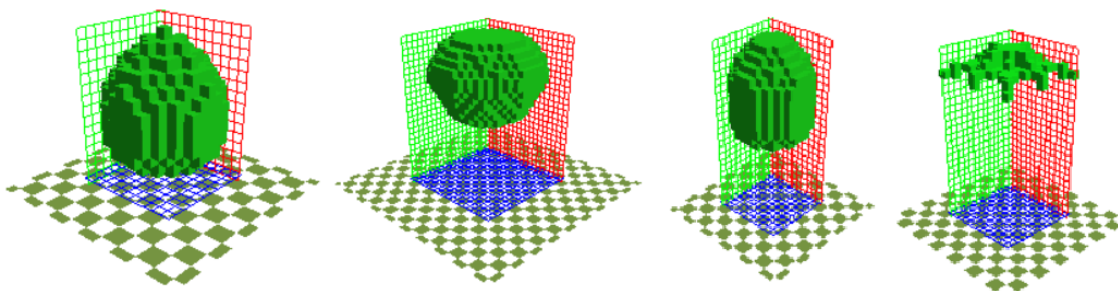


Figura 7 Modelos de árvores disponibilizadas no ENVI-met 4.4.4. Fonte: imagem extraída do ENVI-met.

2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MICROCLIMA URBANO

A simulação computacional do meio urbano consiste em uma simplificação de cenários reais que pretende representar as características dos elementos que constituem o espaço, porém, é importante ressaltar que “o mundo real mostra-se tão complexo que é impossível reproduzir todas as suas características, as suas relações funcionais e todo o conjunto de interdependências” (ANJOS, 2008).

Segundo Werneck (2018), a simulação pode ser utilizada como método quando há a necessidade de compreender o microclima e avaliar estratégias que auxiliem na mitigação de impactos causados pela alteração do meio urbano. Assim, pode-se citar algumas ferramentas utilizadas para avaliar o conforto térmico tanto na escala do edifício (DESIGNBUILDER, MEMI, IES), quanto na escala urbana (RAYMAN, SHADOW, UMI, ENVI-met). Assume-se que esta pesquisa estuda a camada intraurbana simulando as interações edifício-meio urbano. Neste sentido, adota-se o *software* ENVI-met 4.4.4 para simulações referentes ao conforto térmico urbano visto que este é o único programa que considera a fisiologia da vegetação para simular dados de conforto térmico urbano.

O programa foi desenvolvido por Bruse e Fler (1998) e baseia-se nas leis da termodinâmica e dinâmica dos fluidos para simular as interações entre o edifício, a superfície e a vegetação, a partir da modelagem tridimensional do cenário e das características climáticas da área de estudo. Assim, o *software* permite a análise dos impactos de intervenções urbanas em microescala, a partir da especificação de materiais de solo, características da construção e da presença vegetação. Para isso, para obtenção de resultados referentes aos aspectos do microclima (Figura 8), consideram-se os parâmetros:

- temperatura do ar;
- umidade relativa do ar;
- direção e velocidade dos ventos;
- horas de sol e sombra;
- fisiologia da vegetação.

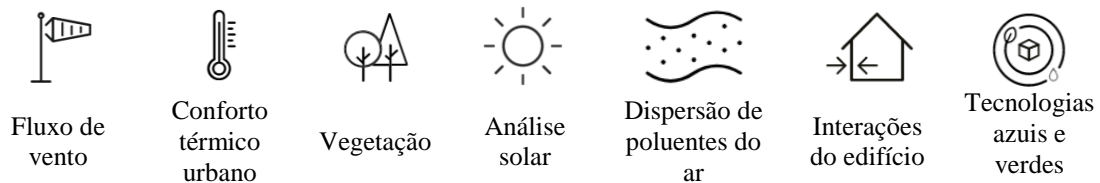


Figura 8 Aspectos do microclima que podem ser analisados pelo *software* ENVI-met 4.4.4. Adaptado de ENVI-MET, 2020.

A simulação computacional no ENVI-met 4.4.4. segue quatro etapas principais apresentadas na Figura 9 e detalhadas a seguir.

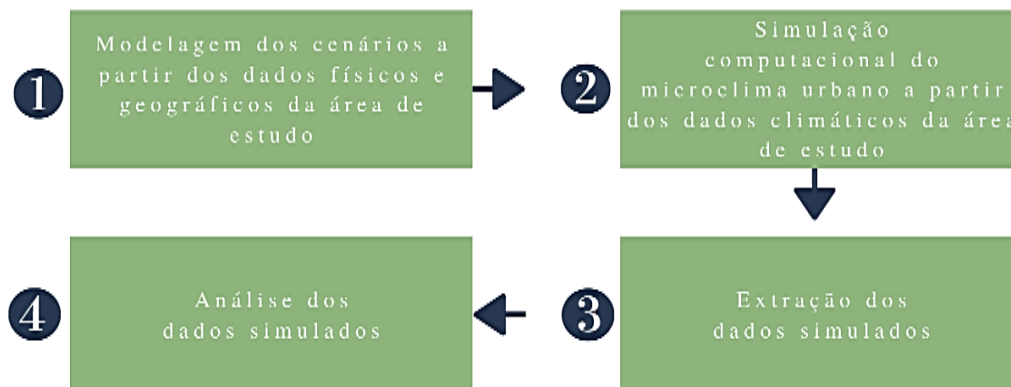


Figura 9 Fluxo com as etapas realizadas no processo de simulação computacional do microclima.

2.4.1 Modelagem

A malha de modelagem é a área de em que o cenário será modelado, possui três dimensões (x, y e z) e é acessada pelo ícone “SPACES”, localizada na aba “ENVI-met V4” (Figura 10). Na versão gratuita do ENVI-met o tamanho máximo da malha é igual a 50(x) x 50(y) x 40(z) grids, enquanto as versões pagas permitem malhas mais extensas o que, conseqüentemente, permite a modelagem de cenários maiores e mais detalhados.

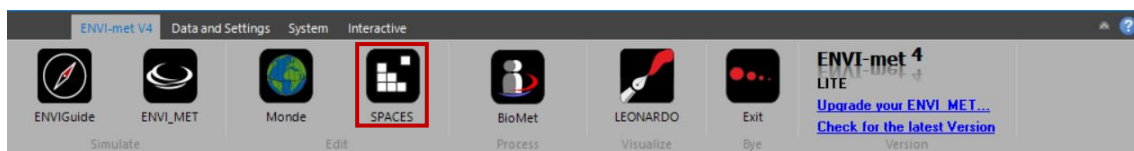


Figura 10 Barra de tarefas do ENVI-met 4.4.4.

Após iniciar o “SPACES”, é necessário inserir os dados geográficos da área, são eles:

- cidade e país;
- latitude e longitude;

- fuso horário;
- altitude em relação ao nível do mar;
- grau de rotação do norte (apenas quando a o pesquisador optar por rotacionar a imagem de satélite para realizar a modelagem de forma mais ortogonal).

A inserção dos dados é realizada no ícone “*Edit Settings/Create New Area*” na aba “*Model Settings*” dentro do próprio *SPACES* (Erro! Fonte de referência não encontrada.).

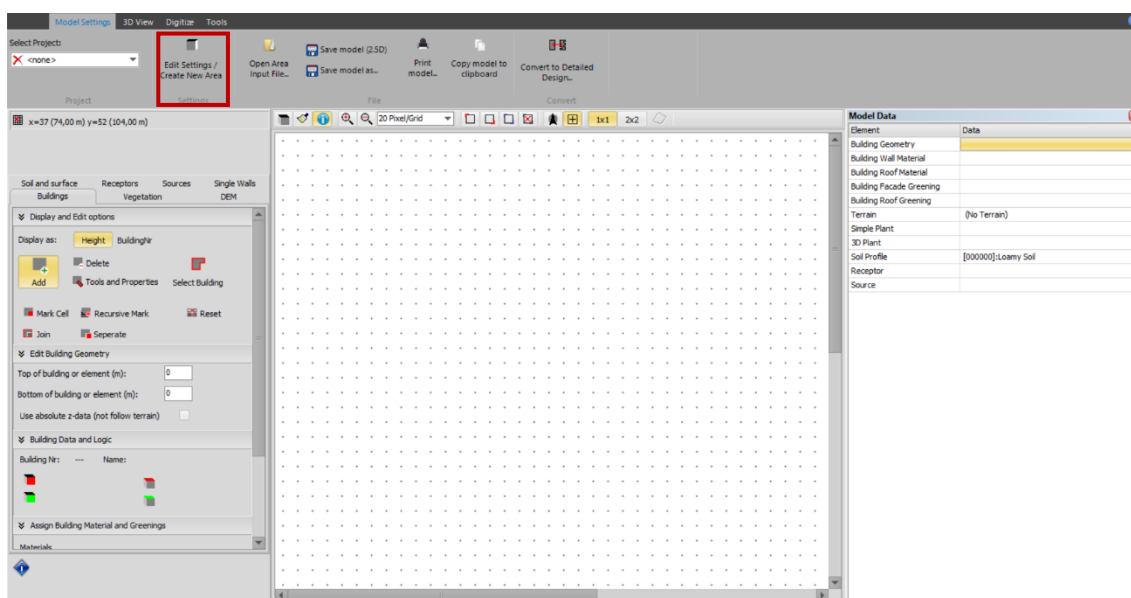


Figura 11 Ambiente de modelagem “SPACES” do ENVI-met 4.4.4.

Ainda nas configurações geográfica, é possível observar a opção “*nesting*”, área que envolve a modelagem com o objetivo de proporcionar condições estáveis de contorno (ENVI-met, 2017). O valor de “*nesting*” deve ser igual ou maior à altura do maior edifício identificado na área de estudo.

A modelagem é realizada a partir de uma imagem de satélite da área de estudo. É preciso definir a altura dos edifícios, bem como o material da fachada e da cobertura, tipo de solo, materiais de cobertura do solo e vegetação, até que toda a malha de modelagem esteja preenchida. Para isso, o *software* disponibiliza um banco de dados com materiais e vegetação pré-definidos, além de oferecer a possibilidade de criação de novos elementos.

2.4.2 Simulação computacional

Para que se dê início à simulação computacional do microclima é necessário a inserção dos dados climáticos da área de estudo, assim cria-se um arquivo climático. Esta configuração é realizada no ícone “ENVI*Guide*” na aba “ENVI-met V4” (Figura 12).

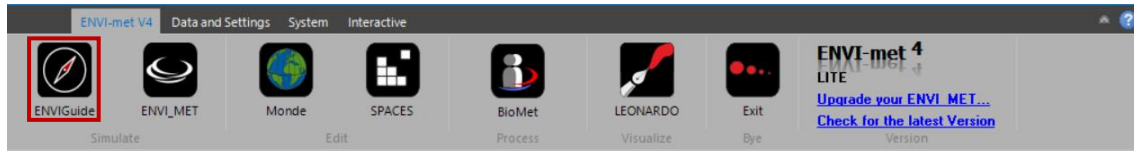


Figura 12 Barra de tarefas do ENVI-met 4.4.4.

Existem dois métodos para inserção de dados climáticos: *Simple Forcing* e *Full Forcing*. No método *Simple Forcing* é necessária a coleta, pelo próprio pesquisador, de cada dado climático da cidade onde localiza-se a área de estudo, sendo: velocidade e direção do vento, temperatura do ar e umidade relativa do ar mínimas e máximas para o dia simulado; dessa forma, o *software* forçará o comportamento dos parâmetros climáticos durante um dia inteiro. Já no método *Full Forcing* é possível utilizar um arquivo climático já configurado, por exemplo, em formato “EPW” (*Energy Plus Weather*), para a cidade onde localiza-se a área de estudo, sendo que esta opção diminui as chances de erro, visto que não há a necessidade de que o próprio pesquisador insira os dados individualmente.

Após a configuração do arquivo climático realiza-se a simulação computacional por meio do ícone “ENVI_MET” localizado na aba “ENVI-met V4” (Figura 13).

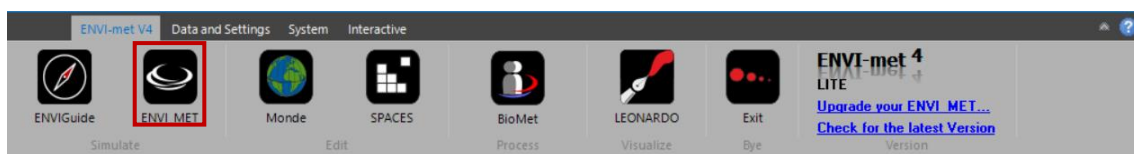


Figura 13 Barra de tarefas do ENVI-met 4.4.4.

2.4.3 Extração e análise de dados

O ENVI-met 4.4.4. permite a extração de dados referentes a diversos dados climáticos, como temperatura do ar, umidade relativa do ar, temperatura radiante, velocidade dos ventos, além de índices de conforto térmico, como o Voto Médio Estimado ou PMV, a Temperatura Fisiológica Equivalente, do inglês *Physiological Equivalent Temperature - PET*, o *Universal Thermal Climate index (UTCI)* e o *SET Value*.

Para extração de dados climáticos utiliza-se o ícone LEONARDO localizado na aba “ENVI-met V4”, enquanto para a extração de índice de conforto térmico utiliza-se o ícone BioMet (Figura 14).

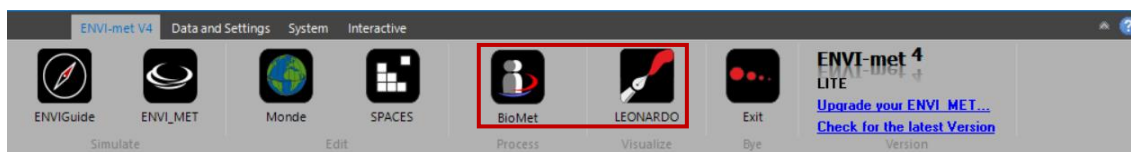


Figura 14 Barra de tarefas do ENVI-met 4.4.4.

A análise dos dados é realizada a partir dos gráficos de manchas gerados pelo LEONARDO e BioMet correspondentes ao parâmetro escolhidos. A leitura desses dados é intuitiva e dinâmica, visto que é possível a configuração de legendas de cores que melhor representará o dado extraído.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo é dedicado aos procedimentos metodológicos e descreve as etapas da pesquisa, além de apresentar os recursos utilizados no trabalho e divide-se da seguinte forma: definição da área de estudo – que apresenta as áreas a serem utilizadas nesta pesquisa e a justificativa de escolha; caracterização de zonas climáticas locais – que descreve a aplicação do método de classificação de ZCLs; e simulação computacional – apresentando detalhes do método e do software utilizado, além da extração dos resultados.

3.1 MÉTODO DE PESQUISA

Este estudo possui natureza quali-quantitativa e realiza-se por meio de multimétodos², sendo eles: levantamento *in loco*, geoprocessamento para espacialização dos dados obtidos e simulação computacional do microclima urbano. Mesmo majoritariamente quantitativa, a pesquisa tem características qualitativas nas etapas preliminares, como o embasamento teórico, desenvolvimento do tema e problemática, e pretende contribuir para as decisões referentes à qualidade ambiental da vida urbana no contexto climático do Distrito Federal.

Parte-se do levantamento bibliográfico para compreensão do tema e definição da vegetação urbana como objeto de estudo e de sua relação com as zonas climáticas locais. Posteriormente, adere-se à revisão sistemática de literatura para averiguar as lacunas de conhecimento no campo teórico do objeto de estudo e, assim, definir os objetivos e auxiliar no desenvolvimento do método e dos procedimentos de coleta e tratamento de dados.

Para a pesquisa em si, inicia-se a delimitação das áreas de estudo considerando critérios específicos, como o aumento populacional das Regiões Administrativas do Distrito Federal, quando são definidas três regiões como objetos de estudo. Em seguida, são feitos os levantamentos *in loco* e a observação de imagens de satélite para classificação das zonas climáticas locais das regiões definidas. Após a classificação preliminar das zonas, define-se o perímetro que será analisado, dentro do raio mínimo e máximo proposto por Stewart e Oke (2012). Os parâmetros morfológicos dessas áreas são colhidos e analisados e, se necessário, são criadas subclasses de zonas.

A partir das Zonas Climáticas Locais classificadas, excluem-se deste estudo as zonas que não se localizam no contexto urbano, que não possuam características urbanas e/ou que tenham área permeável maior que a área impermeável e construída, visto que a premissa da pesquisa é entender o papel da vegetação intraurbana nas zonas climáticas locais.

Em seguida, inicia-se a modelagem e a simulação computacional dos cenários, sendo que a quantidade de cenários dependerá da quantidade de ZCLs classificadas nas

² Artigo submetido ao GISTAM título: Local Climate Zones (LCZ) using Multimethod Analysis: Case of Federal District of Brazil.

três Regiões Administrativas. Uma ZCL poderá ocorrer mais de uma vez na mesma RA ou em uma RA distinta, sendo que será modelada a área que melhor representar a ZCL.

Por fim, a simulação computacional microclimática será realizada por meio do software ENVI-met 4.4.4 e em seguida faz-se a extração de dados avaliando a contribuição efetiva da vegetação no conforto térmico urbano por meio do índice *Physiological Equivalent Temperature (PET)* que significa, em português, Temperatura Fisiológica Equivalente (HÖPPE, 1999) e finalmente parte-se para a discussão dos resultados obtidos.

O fluxograma esquemático dos procedimentos metodológicos é apresentado a seguir (Figura 15 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

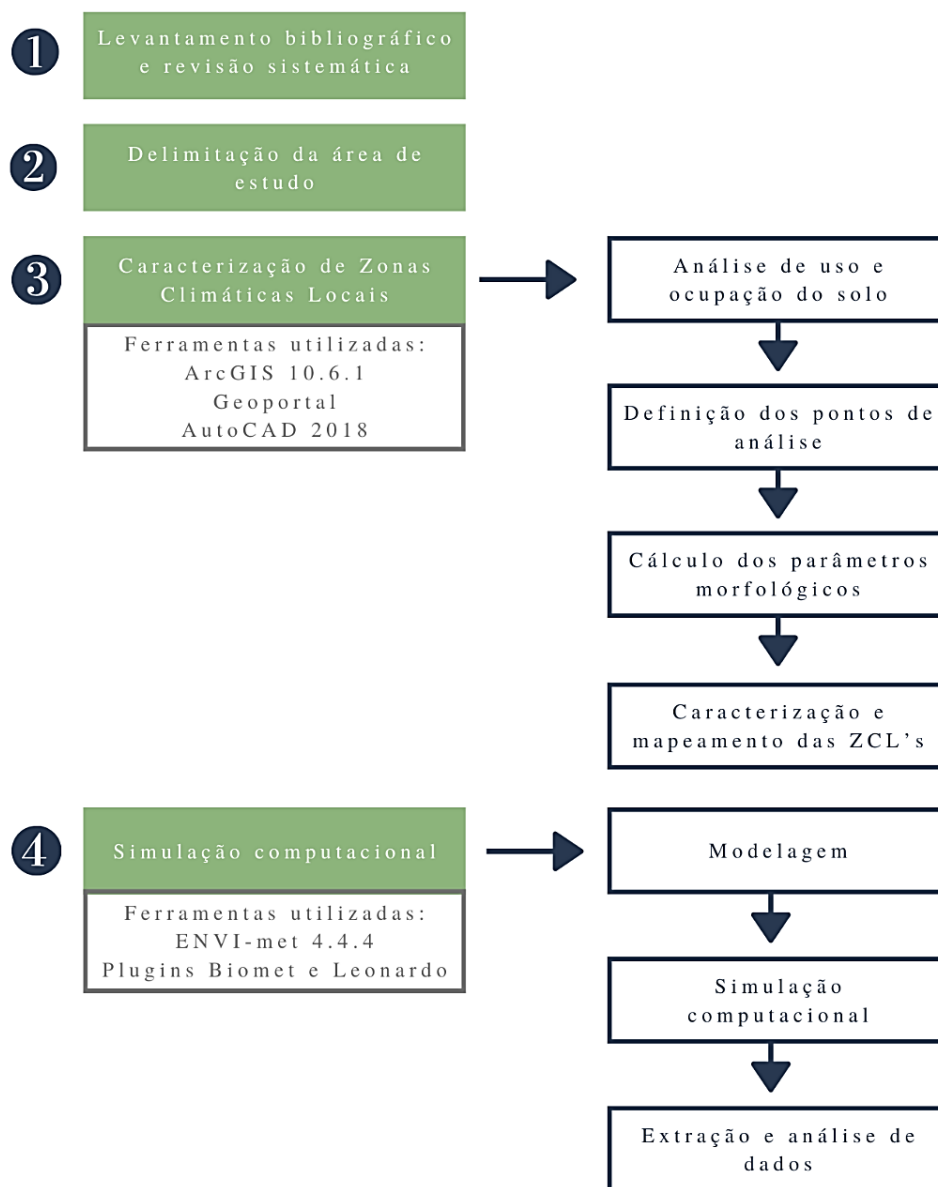


Figura 15 Fluxograma esquemático dos procedimentos metodológicos

3.2 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Assume-se que a população brasileira é predominantemente urbana, que a tendência da urbanização se fortalece a cada ano e isso também se reproduz no contexto do Distrito Federal. Assim, deve-se considerar o efeito negativo no conforto térmico das cidades, principalmente quando há falta de planejamento urbano aliada à urbanização e à impermeabilização do solo, pois o crescimento das áreas impermeáveis e construídas resultam em aumentos de temperatura (ROCHA, SOUZA e CASTILHO, 2011).

Neste sentido, cidades com maior Taxa Média Geométrica de Crescimento Anual (TMGCA) são mais suscetíveis a problemas relacionados ao microclima e a falta de vegetação intraurbana, já que a vegetação é apontada como um dos elementos primordiais para mitigação de alterações climáticas ocasionadas pela urbanização (LABAKI, SANTOS, *et al.*, 2011).

Para este estudo, selecionam-se as três Regiões Administrativas do Distrito Federal com a maior TMGCA, que indica o ritmo de crescimento populacional, segundo a pesquisa de Densidades Urbanas nas Regiões Administrativas do Distrito Federal (CODEPLAN, 2017) conforme Tabela 3, são elas: Riacho Fundo II, Águas Claras e Samambaia.

Região Administrativa		TMGCA (%)	População total	Densidade urbana (hab./ha)
Riacho Fundo II	RA XXI	14,53	51.709	83,59
Águas Claras	RA XX	7,81	138.562	71,53
Samambaia	RA XII	6,39	258.457	103,31

Tabela 3 TMGCA, população total e densidade urbana. Fonte: CODEPLAN, 2017

A escolha da TMGCA como critério de seleção justifica-se pela perspectiva de aumento populacional nessas RAs, enquanto as RAs que apresentavam maior densidade urbana, que são o Varjão, a Candangolândia e a Ceilândia, respectivamente, possuem TMGCA negativa ou baixa, o que significa que a população residente está deixando as RAs (Varjão e Candangolândia) e que o crescimento está diminuindo no caso da Ceilândia.

Dentre as três RAs abordadas neste estudo, a mais recente é o Riacho Fundo II que foi criada pelo Programa de Assentamento do Governo do Distrito Federal em 1990,

enquanto Águas Claras e Samambaia foram previstas em 1977 e 1978, respectivamente. O início de sua ocupação se deu apenas em 1995, dez anos após os primeiros moradores ocuparem Samambaia e onze anos após a criação de Águas Claras, nesta época, ainda considerada bairro de Taguatinga – RAIII.

Em 1989 foi oficialmente criada a Região Administrativa de Samambaia – RA XII. Em 2003, cria-se o Riacho Fundo II – RA XXI e Águas Claras é legalmente desmembrada de Taguatinga, tornando-se a RA XX.

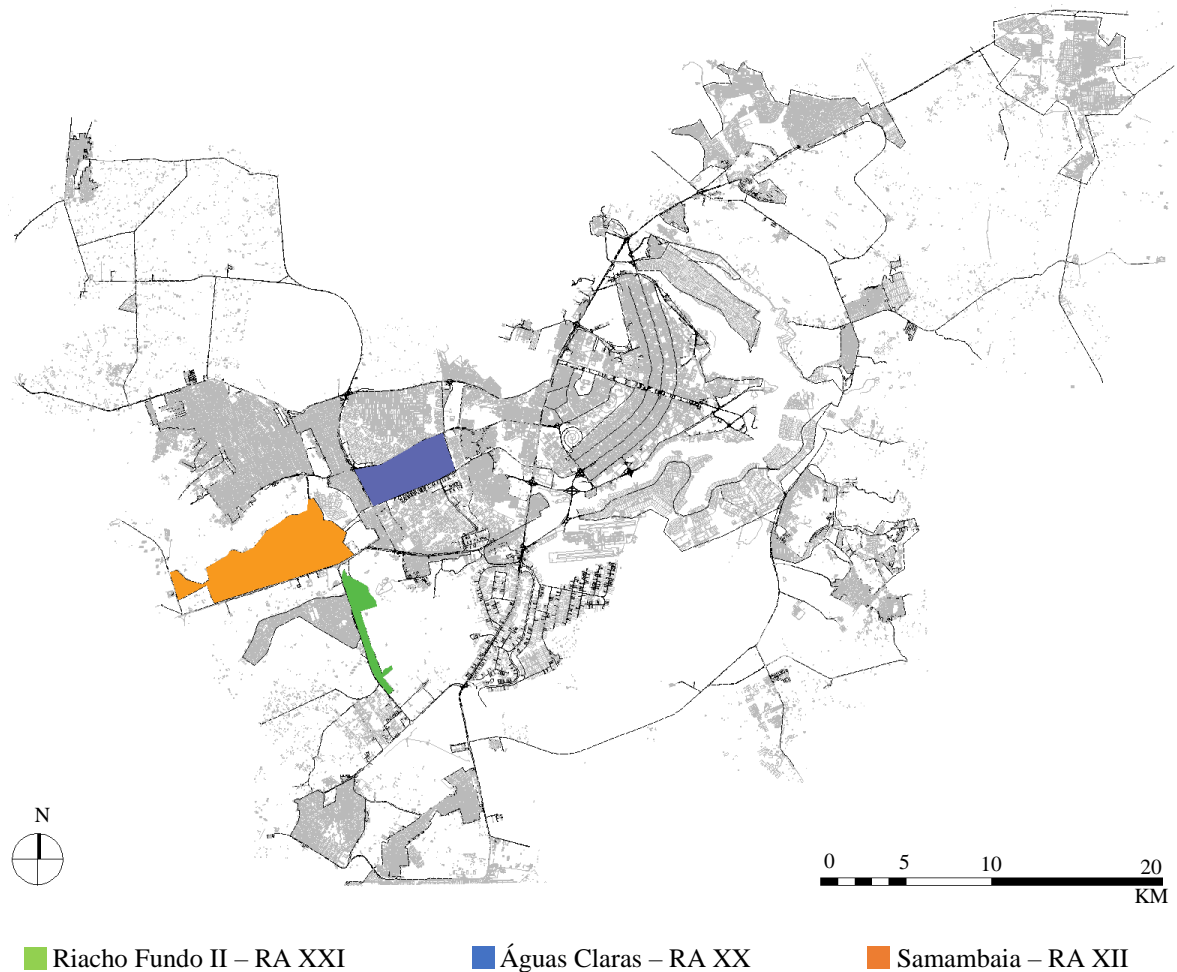


Figura 16 Localização das RAs Riacho Fundo II, Samambaia e Águas Claras no contexto do Distrito Federal.



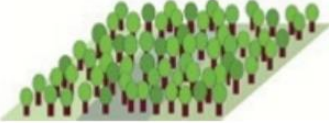
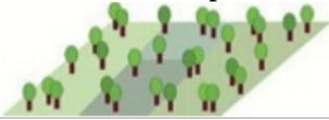
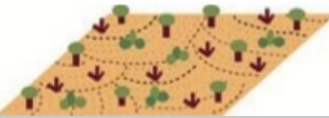



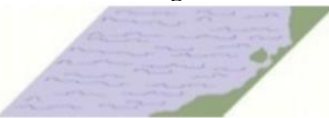
3.3 CARACTERIZAÇÃO DE ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS

A caracterização das Zonas Climáticas Locais das Regiões Administrativas definidas na etapa anterior é feita por meio da metodologia elaborada por Monteiro (2018) seguindo as etapas listadas a seguir.

- **Análise de uso e ocupação do solo e geometria urbana**

Primeiramente, é feita a análise das tipologias de uso e ocupação do solo e da geometria urbana das áreas de estudo definidas no item 3.2, segundo Stewart e Oke (2012) conforme Quadro 1. Esta análise é feita com o auxílio do Geoportal, do *World Imagery*, disponibilizado pelo *software* ArcGIS 10.6.1, e por observações *in loco* das características urbanas.

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

<p>9. Edifícios dispersos</p> 	<p>Arranjo disperso de edifícios pequenos ou médios em um ambiente natural. Abundância de cobertura de terra permeável (plantas baixas, árvores dispersas).</p>
<p>10. Indústria</p> 	<p>Estruturas industriais baixas e médias (torres, tanques, pilhas). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo na maior parte pavimentada ou compactada. Materiais de construção em metal, aço e concreto.</p>
<p>Tipologias de cobertura de solo</p>	<p>Definição</p>
<p>A. Árvores densas</p> 	<p>Paisagem fortemente arborizada de árvores caducas e/ou perenes. Cobertura do solo principalmente permeável (plantas baixas). A função da zona é floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.</p>
<p>B. Árvores dispersas</p> 	<p>Paisagem levemente arborizada de árvores caducas e/ou perenes. Cobertura do solo principalmente permeável (plantas baixas). A função da zona é floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.</p>
<p>C. Arbustos</p> 	<p>Arranjo aberto de arbustos e árvores curtas. Cobertura do solo principalmente permeável (solo nu ou areia). A função da zona é um cerrado natural ou agricultura.</p>
<p>D. Gramíneas / forrações</p> 	<p>Paisagem com grama ou plantas herbáceas. Poucas ou nenhuma árvore. A função da zona é pastagem natural, agricultura ou parque urbano.</p>
<p>E. Rocha ou pavimentação</p> 	<p>Paisagem rochosa ou com cobertura pavimentada. Poucas ou nenhuma árvore ou plantas. A função da zona é o deserto natural (rocha) ou o transporte urbano.</p>
<p>F. Solo exposto ou areia</p> 	<p>Paisagem com características de solo nu ou cobertura de areia. Poucas ou nenhuma árvore ou plantas. Função de zona é deserto natural ou agricultura.</p>
<p>G. Água</p> 	<p>Grandes corpos d'água abertos, como mares e lagos, ou pequenos corpos, como rios, reservatórios e lagoas.</p>
<p>Propriedades variáveis de cobertura do solo Propriedades que mudam significativamente com padrões climáticos sinóticos, práticas agrícolas e/ou ciclos sazonais.</p>	<p>Definição</p>
<p>b. árvores sem folhas</p>	<p>Árvores decíduas sem folhas (por exemplo, inverno). Maior fator de visão do céu. Albedo reduzido.</p>
<p>s. neve</p>	<p>Cobertura de neve > 10 cm de profundidade. Baixa admissão. Albedo alto.</p>
<p>d. solo seco</p>	<p>Solo seco. Baixa admissão. Relação de Bowen alta. Albedo alto.</p>
<p>w. solo úmido</p>	<p>Solo alagado. Alta admissão. Relação de Bowen baixa. Albedo reduzido.</p>

Quadro 1 Definições das zonas climáticas locais. Adaptado de Stewart e Oke (2012).

- **Definição dos pontos de análise e da área de abrangência de cada tipologia**

Define-se um ponto de análise para cada tipologia, devendo este ser o que melhor representa as características descritas. Então, é determinada a área de abrangência a partir desse ponto, onde será realizado o cálculo dos parâmetros utilizados para a classificação das ZCLs, que deve ter entre 400 e 1000 metros de diâmetro total.

- **Cálculo dos parâmetros de classificação das ZCLs**

De acordo com a área de abrangência definida, calculam-se os parâmetros de classificação das ZCLs conforme Tabela 4, que apresenta os valores dos parâmetros morfológicos para cada ZCL.

LCZ	FVC	H/W	% Edif.	% Imp.	% Perm.	Alt. Rug.	Cls. Rug.
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	<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

LCZ: Zonas Climáticas Locais
 FVC: Fator de Visão do Céu
 H/W: Relação H/W
 % Edif.: Fração de Porcentagem Edificada
 % Imp.: Fração de Porcentagem Impermeável
 % Perm.: Fração de Porcentagem Permeável
 Alt. Rug.: Altura da Rugosidade
 Cls. Rug.: Classe de Rugosidade do Terreno

Tabela 4 Parâmetros morfológicos para classificação de ZCLs. Adaptado de Stewart e Oke (2012).

Nesta pesquisa são utilizados como parâmetros a relação H/W, a porcentagem de área edificada, área impermeável e permeável, além da altura dos elementos de rugosidade, visto que estes parâmetros se mostraram suficientes para a classificação e subclassificação das zonas neste caso, não se fazendo necessária a verificação da classe de rugosidade do terreno, nem do fator de visão do céu.

Para obtenção dos dados utiliza-se as seguintes ferramentas:

Parâmetro	Ferramenta
Relação H/W	Observação <i>in loco</i> ; mapa do Geoportal; AutoCAD.
% Área edificada	Mapa do Geoportal; AutoCAD.
% Área impermeável	Mapa do Geoportal; AutoCAD.
% Área permeável	Mapa do Geoportal; AutoCAD.
Altura da rugosidade	Observação <i>in loco</i> ; mapa do Geoportal.

Tabela 5 Ferramenta para obtenção dos parâmetros morfológicos.

Os valores obtidos são comparados com a Tabela 4, porém, vale lembrar que os autores informam que nem sempre esses valores serão todos correspondentes às zonas, devendo ser feita a subclassificação quando necessário, considerando as análises de uso e ocupação do solo e da geometria urbana, além dos valores dos parâmetros encontrados.

- **Caracterização das ZCLs**

A partir das tipologias identificadas e do cálculo de seus parâmetros, definem-se as Zonas Climáticas Locais e suas subclassificações compostas por duas ou mais zonas. A maior quantidade de parâmetros coincidentes define a zona que mais se destaca na subclassificação. Em seguida, é feito o mapeamento dessas zonas, utilizando a legenda padrão proposta pelo WUDAPT (2019).


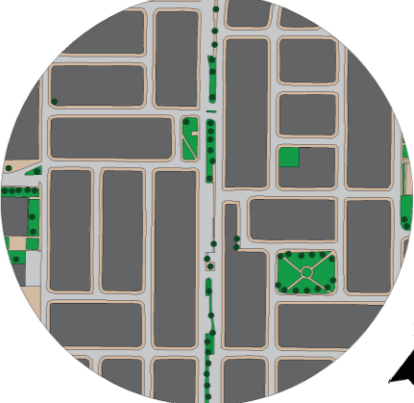
3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MICROCLIMA

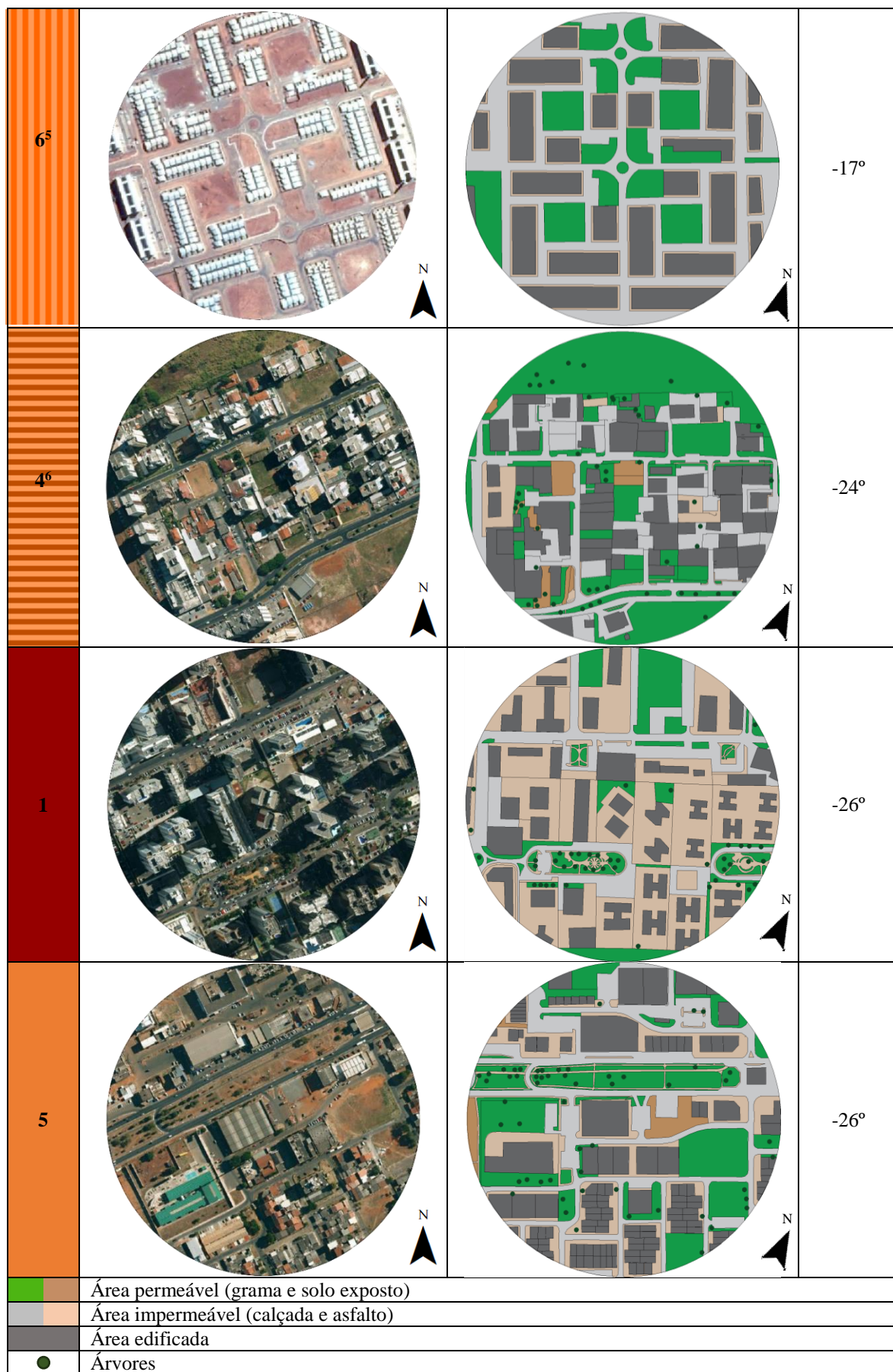
No âmbito do software, é modelada a área de 160.000 m², resultante de um quadrilátero de 400 metros de lado para cada ZCL, configurando o cenário. Após a simulação computacional, faz-se a extração dos mapas com os resultados para 09 h, 15 h e 21 h para o período climático quente-seco do Distrito Federal, com o auxílio dos *plugins* Biomet e LEONARDO.

- **Modelagem**

A modelagem é realizada após a classificação das ZCLs. Consideram-se as dimensões das edificações, os materiais de cobertura do solo, a quantidade de vegetação, bem como sua distribuição no espaço e faz-se a simplificação do cenário. Em seguida, posiciona-se a área de estudo da forma mais ortogonal possível, o que facilita a modelagem no *software*, que é realizada em uma malha quadriculada de 100 x 100 grids, onde cada grid corresponde a quatro metros.

Para correção do norte geográfico, é necessário inserir o valor do grau de rotação do Norte no ENVI-met.

ZCL	Imagem satélite do cenário original	Cenário original simplificado	Grau de rotação do Norte
3			-18°



Quadro 2 Grau de rotação do Norte das ZCLs

A partir do cenário original simplificado modelam-se as ZCLs, sendo dois cenários por zona. Os cenários são diferenciados pela quantidade de vegetação, considerando as características da geometria urbana e dos materiais de cobertura do solo (Figura 17).

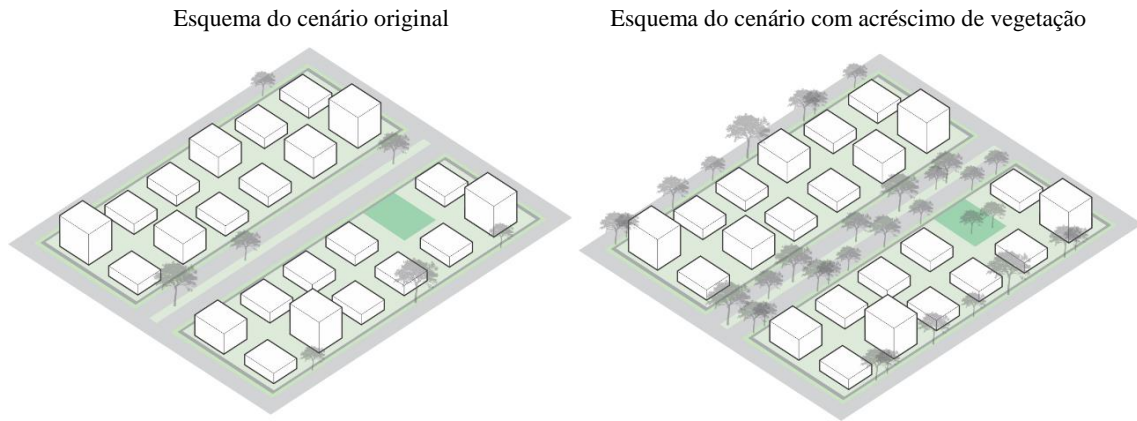


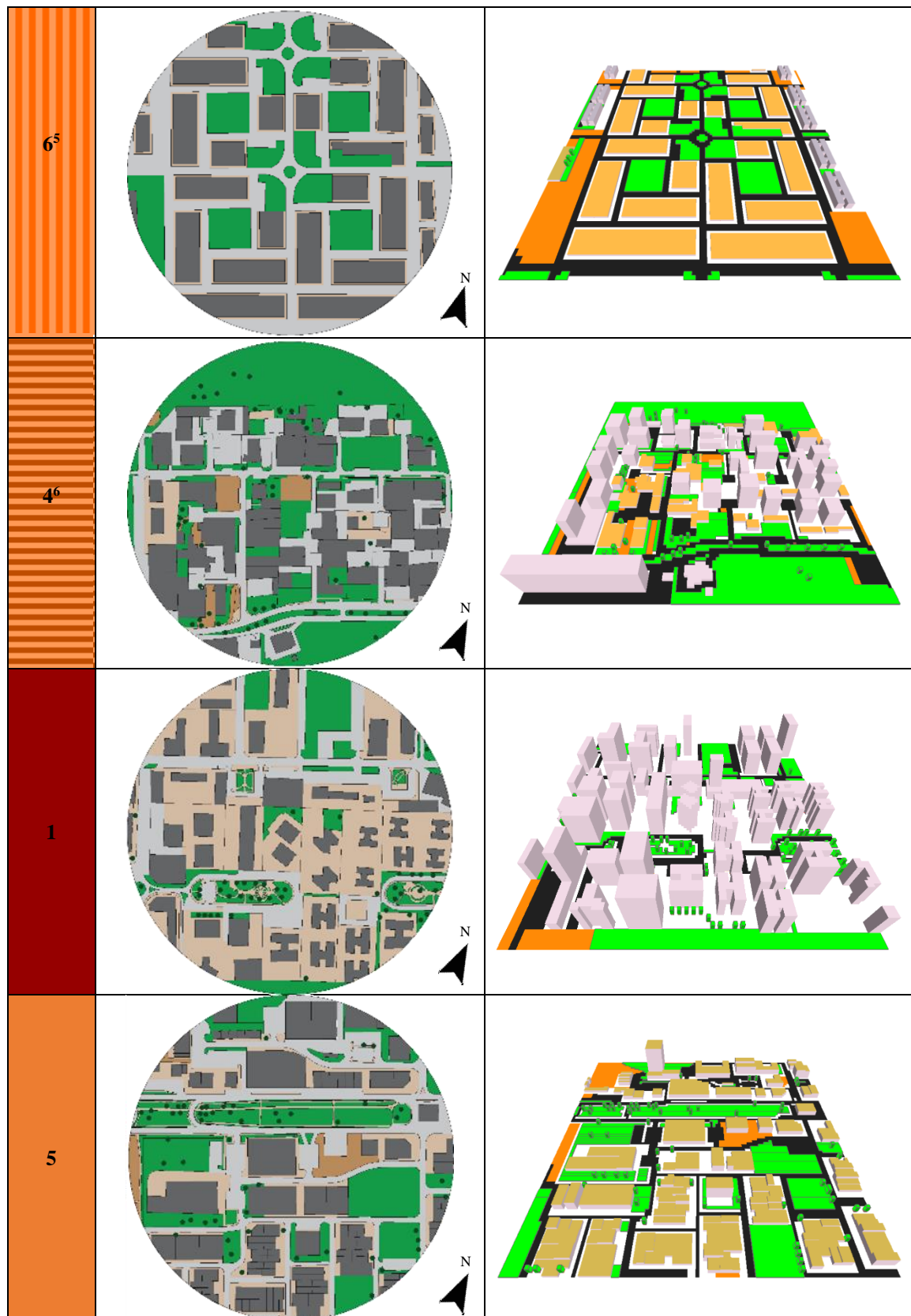
Figura 17 Diagrama dos cenários de modelagem microclimática de uma ZCL.

Nos cenários com acréscimo de vegetação serão utilizados os critérios apresentados por Lóis, Labaki e Santos (2011) e Silva (2009), assim, a vegetação é disposta em grupos e implantada nos canteiros centrais e áreas livres, além de possuir distanciamento entre as copas.

As áreas de estudo localizam-se no Distrito Federal, portanto, utiliza-se a latitude e longitude de Brasília, $-15,78^\circ$ e $-47,93^\circ$, respectivamente, e localização acima do nível do mar de 1.172 metros.

O Quadro 3 apresenta a modelagem do cenário original de cada ZCL.

ZCL	Cenário original	Modelagem do cenário original
3		

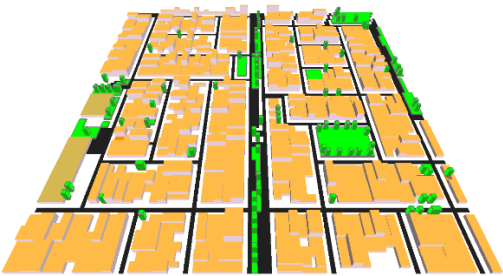
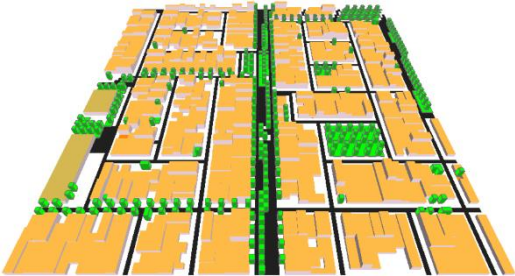
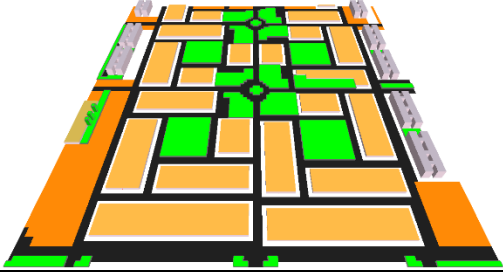
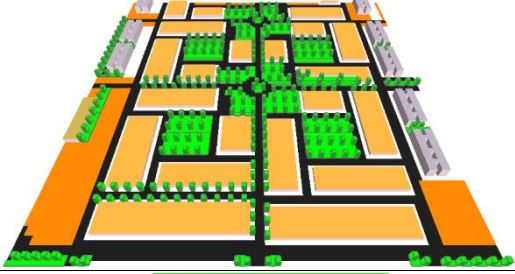

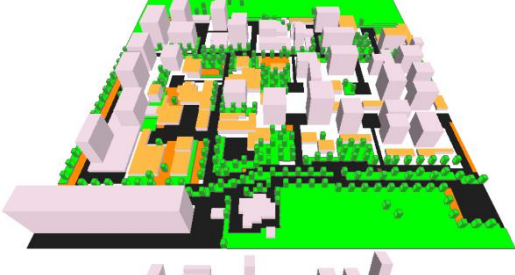
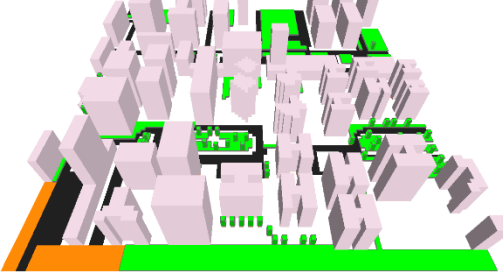
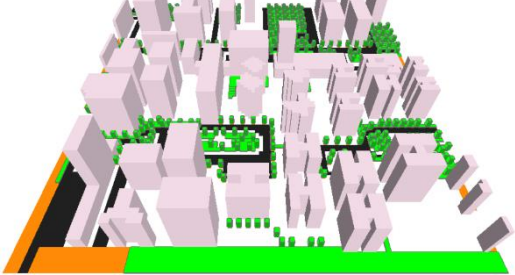


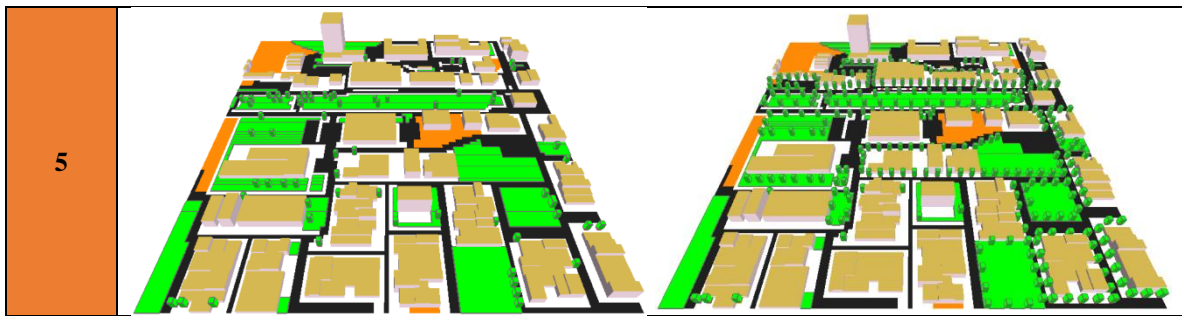
Quadro 3 Cenário original e modelagem

Os materiais utilizados na modelagem devem se aproximar das características reais dos materiais encontrados na área, sendo que neste estudo define-se: grama (*grass*), asfalto (*asphalt*), pavimento de concreto cinza (*concrete pavement gray*) para calçadas e solo argiloso (*loamy soil*) para solo exposto e abaixo de edificações.

Além disso, definem-se os materiais de parede e cobertura das edificações. Utiliza-se parede de concreto (*concrete wall*) e telhado de material cerâmico (*roofing: terracota*) para residências unifamiliares, considerando que as coberturas existentes são em sua maioria de telhado colonial, além de laje de concreto (*concret slab*) para edifícios residências.

O Quadro 4 mostra a modelagem dos cenários com acréscimo de vegetação.

ZCL	Modelagem do cenário original	Modelagem do cenário com acréscimo de vegetação
3		
6 ⁵		
4 ⁶		
1		



Quadro 4 Representação da modelagem do cenário original e com acréscimo de vegetação

Há o acréscimo de vegetação no canteiro central das vias principais, onde há maior fluxo de veículos e pessoas, e nos espaços livres, como praças, além das calçadas. O Gráfico 6 mostra o acréscimo de vegetação intraurbana total para os dois cenários de cada ZCL. O aumento representado é de 185% para a ZCL3, 1082% para ZCL 6⁵, 225% para a ZCL 46, 191% para a ZCL 1 e 225% para a ZCL 5.

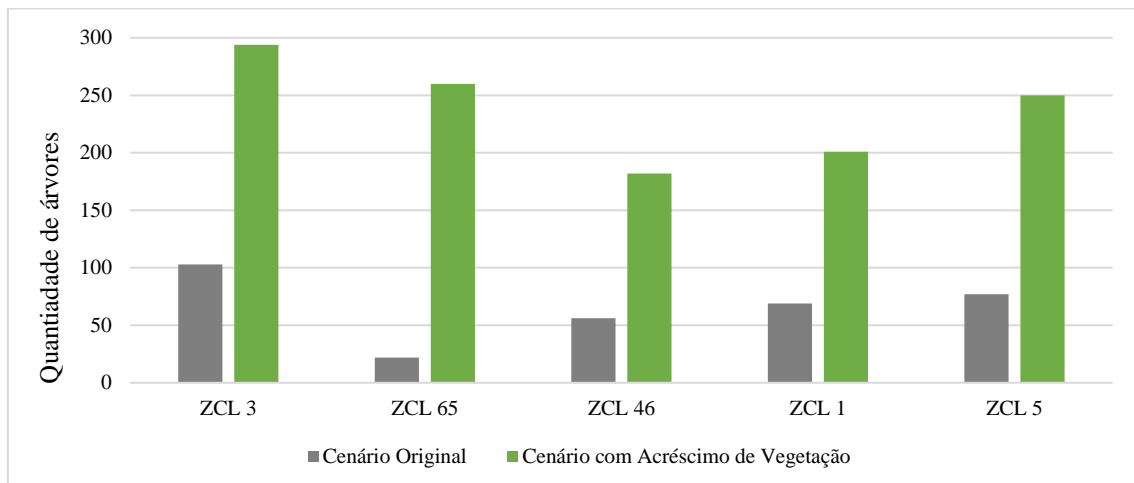


Gráfico 6 Quantidade de árvores por cenário

- **Simulação computacional**

Os dados climáticos para simulação são configurados a partir de um arquivo climático de formato EPW (*Energy Plus Weather*) obtido no portal do *EnergyPlus* para a Região Administrativa de Brasília e se desenvolvem conforme método de simulação computacional no ENVI-met desenvolvido por Silva, Adário e Silva (2019), que utiliza o método *Full Forcing*, que força o comportamento do vento, temperatura, umidade e cobertura de nuvens em intervalos de 30 minutos para o período de até 1 ano. Assim, cria-se o arquivo para o ENVI-met em formato *FOX* nomeado como “*Brasília_Período-Quente-Seco.fox*”.

- **Extração e análise dos dados**

Os dados das simulações computacionais são extraídos por meio dos *plugins* Biomet e LEONARDO para o dia 29 de setembro de 2018, o mais quente do ano, nos horários de 09 h, 15 h e 21 h, estes indicados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para registro de dados meteorológicas, e são apresentados em forma de gráficos de manchas. Dessa forma, é possível verificar as variações climáticas entre os cenários de acordo com a tipologia e características das Zonas Climáticas locais.

Para a análise dos dados de conforto, utiliza-se o parâmetro de conforto térmico *Physiological Equivalent Temperature (PET)* ou Temperatura Fisiológica Equivalente quando traduzido para português, desenvolvido por Höpfe (1999), que considera a fisiologia do corpo humano em condições de estabilidade e as variáveis climáticas da área de estudo para avaliar o balanço térmico do corpo conforme Tabela 6, e poderão ser complementados com a análise de temperatura e umidade relativa do ar.

O *software* ENVI-met 4.4.4 utiliza como padrão para extração de dados de PET, um ser humano com as características definidas pela ISO 7730/2005: homem com 35 anos de idade, 75 kg, altura de 1,75m e taxa metabólica igual a 86,21 W/m².

PET (° C)	Percepção térmica	Grau de estresse fisiológico
< 4	Frio extremo	Estresse por frio extremo
4-8	Muito frio	Estresse por frio elevado
8.1-13	Frio	Estresse por frio
13.1-18	Levemente frio	Estresse por frio moderado
18.1-23	Confortável	Sem estresse térmico
23.1-29	Levemente calor	Estresse por calor moderado
29.1-35	Calor	Estresse por calor
35.1-41	Muito calor	Estresse por calor elevado
>41	Calor extremo	Estresse por calor extremo

Tabela 6 Valores de PET para cada nível de percepção térmica e grau de estresse fisiológico

- **Validação dos dados**

A validação dos dados ocorre quando se faz a análise crítica dos resultados para verificação da margem de erro. Neste sentido, por falta de um sistema de validação do *software* ENVI-met, é feita a comparação dos dados simulados referentes à temperatura e umidade relativa do ar extraídos programa e os dados históricos registrados pela estação

do INMET para o dia simulado neste estudo, às 12 h e 18 h³, visto que são estes os horários disponibilizados pelo instituto.

³ O INMET fornece também dados referentes à 00 h, porém esta pesquisa realiza a análise da contribuição da vegetação nas ZCLs durante o dia. Assim, opta-se por não realizar a validação para a madrugada, visto que o horário não é relevante neste sentido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo expõe os resultados desta pesquisa e promove uma breve discussão dos resultados. Apresenta-se a caracterização e o mapeamento das ZCLs a partir das análises de uso e ocupação do solo e do cálculo dos parâmetros morfológicos dos pontos de abrangência, sendo possível compreender a distribuição das ZCLs no contexto das RAs. Além disso, apresentam-se os dados extraídos da simulação computacional do microclima urbano para cada ZCL, estes sintetizados em forma de gráficos e tabelas para melhor entendimento dos benefícios do aumento da vegetação intraurbana.

Divide-se o capítulo em dois itens: o primeiro expõe o mapeamento das Zonas Climáticas Locais das três RAs abordadas neste estudo: Samambaia, Riacho Fundo II e Águas Claras; e o segundo apresenta a análise dos resultados da simulação microclimática por ZCL, além de apresentar o processo de validação dos resultados obtidos.

4.1 Caracterização de Zonas Climáticas Locais

A caracterização inicia-se com a análise de uso e ocupação do solo e da geometria urbana das áreas até o mapeamento das ZCLs. Identificam-se doze zonas, porém a simulação computacional do microclima é realizada apenas com as cinco que apresentam critérios previamente definidos: possuam características urbanas e/ou apresentam área permeável menor que a soma da área impermeável e construída.

- **Análise de uso e ocupação do solo e geometria urbana**

Na RA XXI – Riacho Fundo II, identificam-se sete tipologias (Tabela 7), sendo que a 01, 02 e 07 são tipologias urbanas; as áreas 04, 05 e 06 são predominantemente áreas vegetadas; e 03 é uma área predominantemente rural com poucas construções.

Tipologia	Descrição
01	Quadras compostas por condomínios de edifícios residenciais de 4 pavimentos com distribuição espacial e volumétrica homogênea. Alta permeabilidade do solo. Pouca vegetação arbórea, porém, muita vegetação rasteira. Vias asfaltadas. Presença de espaços livres.
02	Quadras residenciais homogêneas e compactadas. Lotes estreitos e, em sua maioria, ocupados. Tipologia de casas unifamiliares. Baixa permeabilidade do solo. Pouca ou nenhuma vegetação. Vias asfaltadas com, aproximadamente, 10 metros de largura. Poucos espaços livres públicos.
03	Muita vegetação e alta permeabilidade do solo. Poucas construções, sendo, predominantemente, residenciais. Vias estreitas e não asfaltadas.
04	Vegetação predominantemente arbórea e densa. Construções esparsas. Pouca ou nenhuma via de veículos, sendo que, em caso de existência, esta não é asfaltada. Alta permeabilidade do solo.
05	Vegetação arbórea e arbustiva dispersa. Grandes áreas gramadas. Pouca ou nenhuma presença de construções. Pouca ou nenhuma via de veículos, sendo que, em caso de existência, esta não é asfaltada. Alta permeabilidade do solo.
06	Vegetação rasteira. Pouca ou nenhuma presença de construções. Pouca ou nenhuma via de veículos, sendo que, em caso de existência, esta não é asfaltada. Alta permeabilidade do solo. Áreas destinadas à agricultura.
07	Quadras compostas por edifícios residenciais homogêneos de 4 pavimentos e habitações unifamiliares, próximos entre si. Média permeabilidade do solo. Pouca ou nenhuma vegetação arbórea. Presença de vegetação rasteira. Vias asfaltadas. Alguns espaços livres públicos existentes.

Tabela 7 Descrição das tipologias de ocupação e cobertura do solo do Riacho Fundo II – RA XXI.

Na RA XX – Águas Claras, foram identificadas nove tipologias (Tabela 8). A tipologia 01 e 07 observadas na RA XXI não ocorrem nesta, porém outras quatro são percebidas: 08, 09, 10 e 11. Dessas, a 10 apresenta apenas cobertura de solo, enquanto 08, 09 e 11 são áreas urbanas constituídas por construções e áreas permeáveis e impermeáveis.

Tipologia	Descrição
02	Quadras residenciais homogêneas e compactadas. Lotes estreitos e, em sua maioria, ocupados. Tipologia de casas unifamiliares. Baixa permeabilidade do solo. Pouca ou nenhuma vegetação. Vias asfaltadas com, aproximadamente, 10 metros de largura. Poucos espaços livres públicos.
03	Muita vegetação e alta permeabilidade do solo. Poucas construções, sendo, predominantemente, residenciais. Vias estreitas e não asfaltadas.
04	Vegetação predominantemente arbórea e densa. Pouca ou nenhuma presença de construções. Pouca ou nenhuma via de veículos, sendo que, em caso de existência, esta não é asfaltada. Alta permeabilidade do solo.
05	Vegetação arbórea e arbustiva dispersa. Grandes áreas gramadas. Pouca ou nenhuma presença de construções. Pouca ou nenhuma via de veículos, sendo que, em caso de existência, esta não é asfaltada. Alta permeabilidade do solo.
06	Vegetação rasteira. Pouca ou nenhuma presença de construções. Pouca ou nenhuma via de veículos, sendo que, em caso de existência, esta não é asfaltada. Alta permeabilidade do solo. Áreas destinadas à agricultura.
08	Quadras compostas principalmente por edifícios residenciais de 7 a 15 pavimentos. Presença de residências unifamiliares de até 3 pavimentos. Vias pavimentadas para veículos. Pouca permeabilidade do solo. Pouca presença de árvores.
09	Quadras compostas por edifícios residenciais com mais de 13 pavimentos dispostos próximos um do outro. Vias pavimentadas para veículos. Pouca permeabilidade do solo. Pouca presença de árvores.
10	Pavimentação. Nenhuma árvore. Área destinada ao metrô.
11	Edifícios institucionais e galpões baixos. Poucas árvores e pouca área permeável. Áreas de estacionamento e vias pavimentadas.

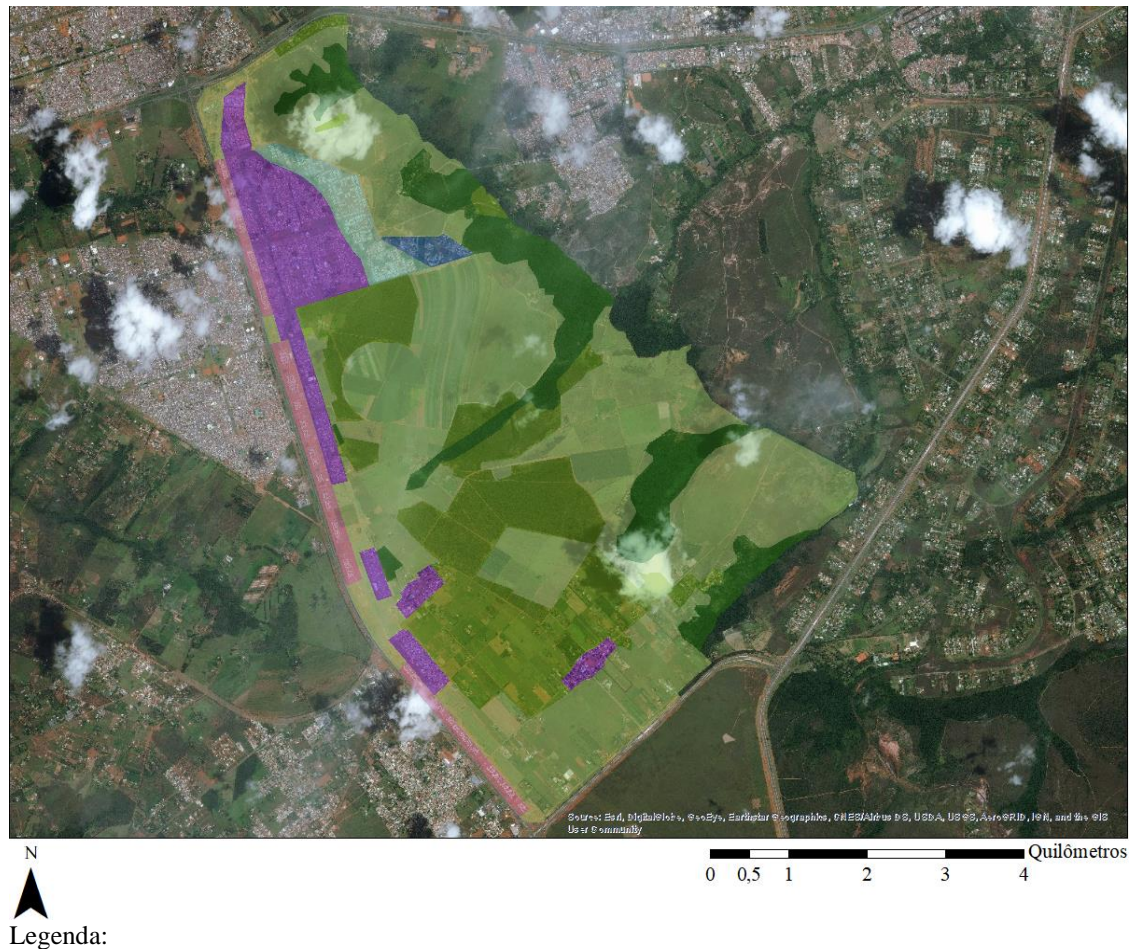
Tabela 8 Descrição das tipologias de ocupação e cobertura do solo de Águas Claras – RA XX.

Na RA XII – Samambaia, identificam-se sete tipologias (Tabela 9). Ocorrem duas novas, 11 e 12, as duas são urbanas.

Tipologia	Descrição
02	Quadras residenciais homogêneas e compactadas. Lotes estreitos e, em sua maioria, ocupados. Tipologia de casas unifamiliares. Baixa permeabilidade do solo. Pouca ou nenhuma vegetação. Vias asfaltadas com, aproximadamente, 10 metros de largura. Poucos espaços livres públicos.
03	Muita vegetação e alta permeabilidade do solo. Poucas construções, sendo, predominantemente, residenciais. Vias estreitas e não asfaltadas.
04	Vegetação predominantemente arbórea e densa. Pouca ou nenhuma presença de construções. Pouca ou nenhuma via de veículos, sendo que, em caso de existência, esta não é asfaltada. Alta permeabilidade do solo.
05	Vegetação arbórea e arbustiva dispersa. Grandes áreas gramadas. Pouca ou nenhuma presença de construções. Pouca ou nenhuma via de veículos, sendo que, em caso de existência, esta não é asfaltada. Alta permeabilidade do solo.
06	Vegetação rasteira. Pouca ou nenhuma presença de construções. Pouca ou nenhuma via de veículos, sendo que, em caso de existência, esta não é asfaltada. Alta permeabilidade do solo. Áreas destinadas à agricultura.
11	Edifícios institucionais e galpões baixos. Poucas árvores e pouca área permeável. Áreas de estacionamento e vias pavimentadas.
12	Quadra com edifícios comerciais com cerca de 3 pavimentos e alguns edifícios institucionais baixos. Grande área permeável, pouca vegetação e vias pavimentadas.

Tabela 9 Descrição das tipologias de ocupação e cobertura do solo de Samambaia – RA XII.

Realiza-se a espacialização das tipologias em cada RA com o auxílio do *software* ArcGIS 10.6.1, para que seja possível a melhor visualização das informações descritas nas tabelas anteriores.



Legenda:



Figura 18 Tipologias de ocupação e cobertura do solo do Riacho Fundo II – RA XXI.

É possível observar que as áreas de vegetação (identificadas pelos tons de verde) são predominantes na RA XXI (Figura 18). Essa tipologia corresponde às áreas rurais e de mata. Segundo Franco (2000), é comum observar áreas urbanas cercadas por cinturões verdes, porém esses cinturões não conseguem suprir por completo as necessidades de toda a cidade, sendo esta a principal colaboração ambiental da vegetação no contexto urbano. No caso da RA XXI, as tipologias identificadas como urbanas possuem pouca área permeável e pouca vegetação, o que comprometeria o viés ambiental.

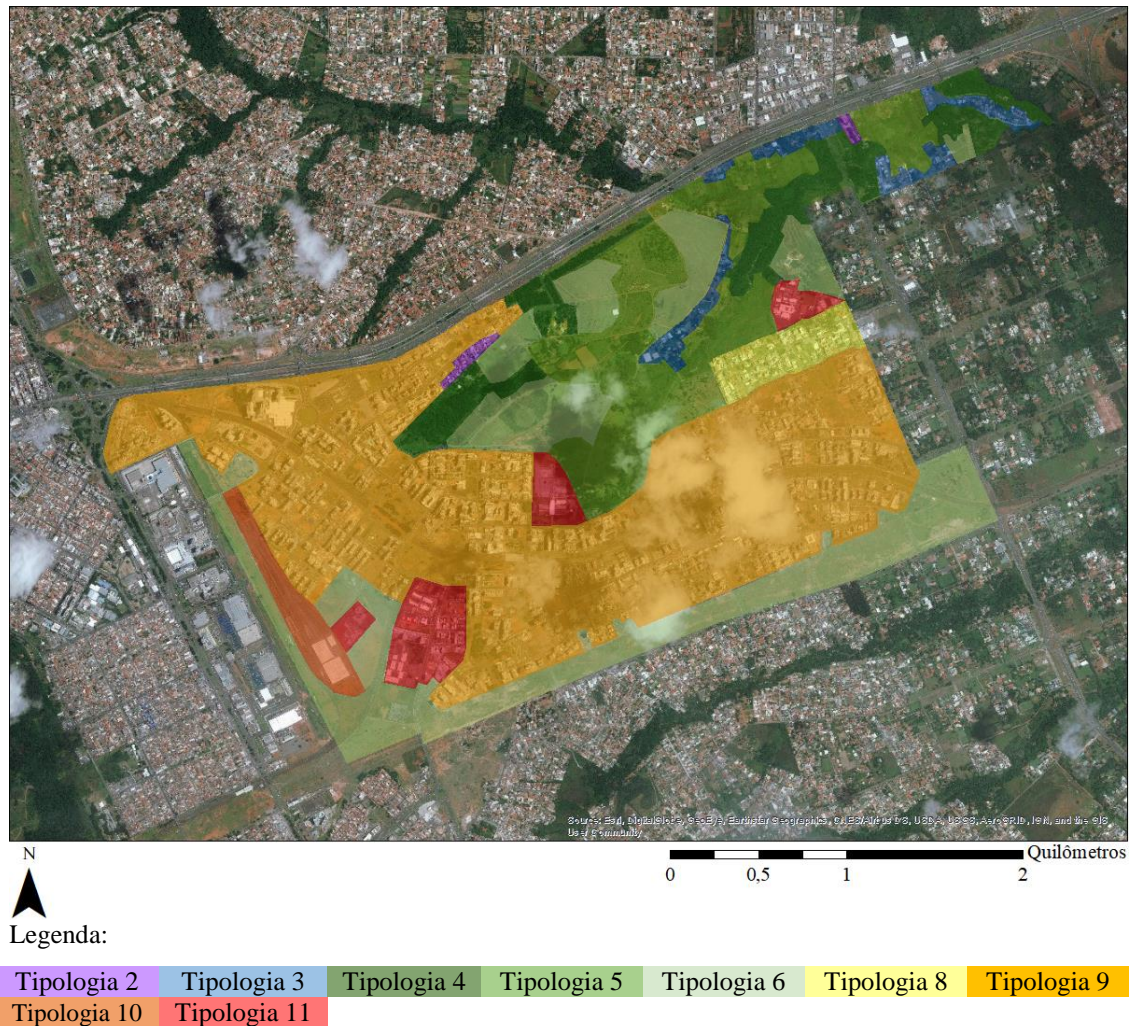
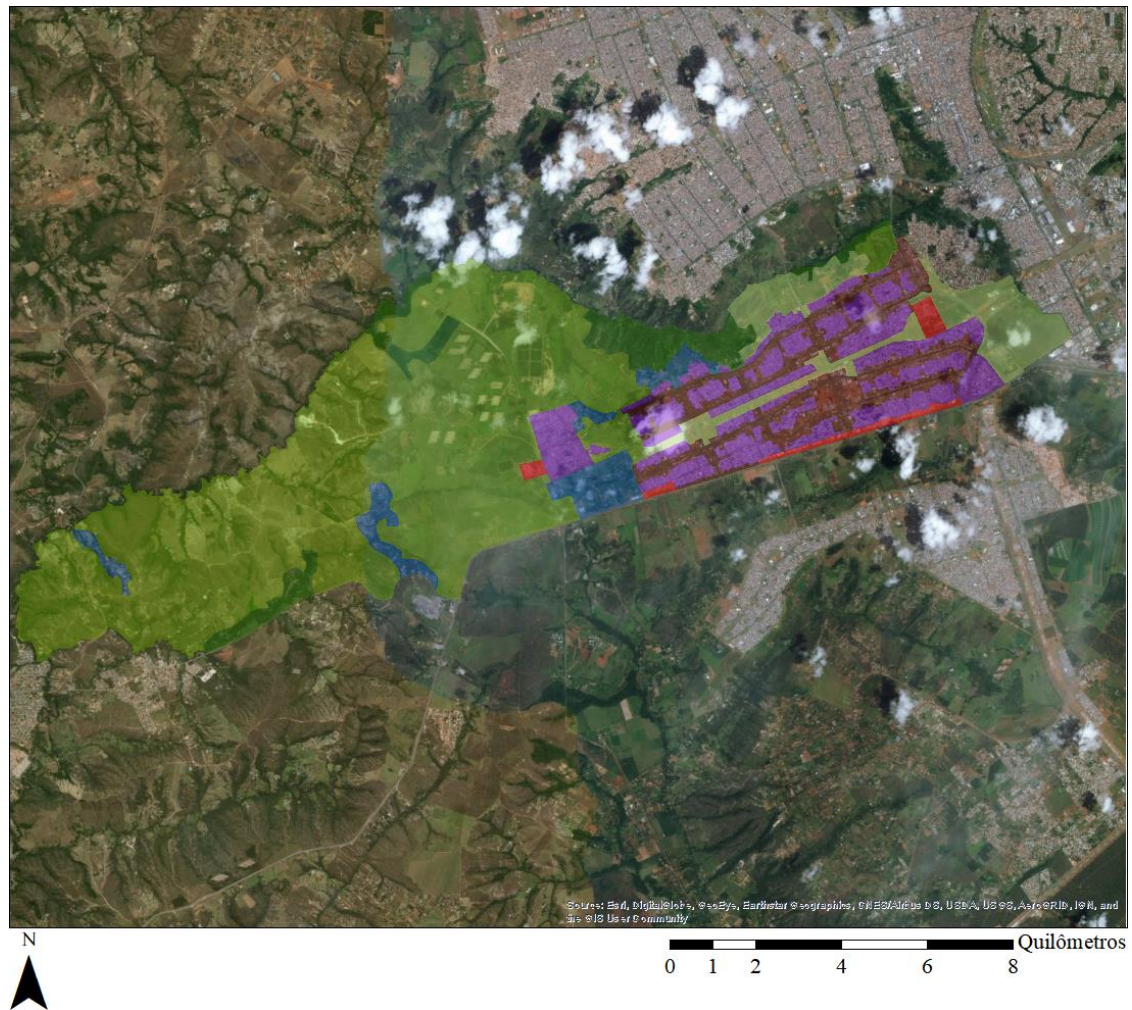


Figura 19 Tipologias de ocupação e cobertura do solo do Águas Claras – RA XX.

A RA XX possui a menor quantidade de cinturão verde quando comparada com as demais RAs, isso ocorre por conta da proximidade desta RA com RAs vizinhas, limitando o espaço que seria ocupado pela vegetação compondo o cinturão (Figura 19).

A tipologia que abrange maior parte do terreno é caracterizada por altos edifícios e baixa permeabilidade do solo. Essa área é propícia para ocorrência de ilhas de calor, visto que a impermeabilização do solo e a altura dos edifícios contribuem para isso (VAN HOVE, JACOBS, *et al.*, 2015; FENG, GONG e ZHI, 2010).



Legenda:

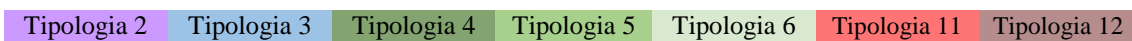


Figura 20 Tipologias de ocupação e cobertura do solo do Samambaia – RA XII.

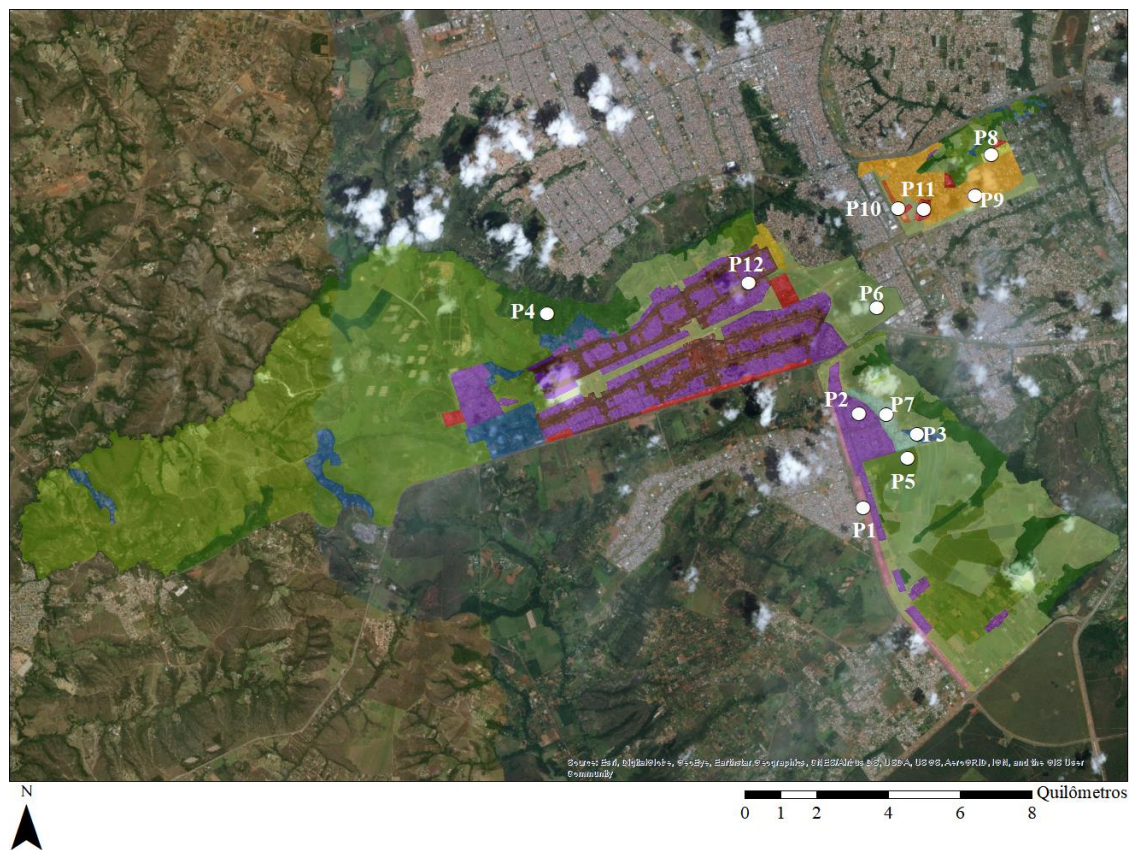
A RA XII possui a maior área referente às tipologias verdes, sendo que a maior parte se encontra no limite oeste do Distrito Federal (Figura 20). As tipologias 2 e 12 são observadas ocupando grande parte da RA.

Na tipologia 2, composta por residências unifamiliares, pouca permeabilidade e vegetação quase inexistente principalmente nas vias públicas, a presença de vegetação adulta nas calçadas poderia contribuir para a amenização da radiação solar (CRUZ, FREITAS e CANTUÁRIA, 2018). Já a tipologia 12, possui área permeável significativa, porém não há grande presença de vegetação arbórea, assim, a contribuição desses espaços para a amenização da temperatura pode se mostrar mais baixa em escala microclimática, sendo a sombra da árvore mais eficaz neste sentido (ZORZI e GRIGOLETTI, 2016).

- **Definição dos pontos de análise e da área de abrangência de cada tipologia**

A Figura 21 apresenta o ponto que melhor representa cada tipologia identificada anteriormente. Este ponto é denominado “área de abrangência” e, nesta pesquisa, consiste em uma área com 400 metros de diâmetro.

A RA XXI possui cinco pontos de abrangência, enquanto a RA XX possui quatro e RA XII três.



Legenda:

Tipologia 1	Tipologia 2	Tipologia 3	Tipologia 4	Tipologia 5	Tipologia 6	Tipologia 7
Tipologia 8	Tipologia 9	Tipologia 10	Tipologia 11	Tipologia 12	○ Pontos de abrangência	

Figura 21 Pontos de abrangência para análise de parâmetros morfológicos das RAs.

- **Cálculo dos parâmetros de classificação das ZCLs**

Os valores calculados para cada tipologia identificada são apresentados na Tabela 10. Os cálculos dos parâmetros são detalhados no Apêndice I deste trabalho.

As tipologias 4, 5 e 6 não apresentam valores de relação H/W, porcentagem de área edificada e impermeável, visto que são áreas de agricultura ou mata fechada. Nestas

áreas a permeabilidade do solo é percebida em todo o terreno, diferindo-se apenas na altura da rugosidade.

Tipologia e Ponto de abrangência	H/W	%Edif.	%Imp.	%Perm.	Alt. Rug.
1/P1	1,2	5,23	24,12	70,65	9,47
2/P2	0,4	63,95	26,66	9,39	6,85
3/P3	0,57	13,02	2,7	84,28	5
4/P4	-	0	0	100	10
5/P5	-	0	0	100	3
6/P6	-	0	0	100	1
7/P7	0,15	43,74	35,78	20,48	3,20
8/P8	1,4	58,74	10,22	31,04	16,5
9/P9	3,25	23,25	63,19	13,59	74,52
10/P10	1,3	19,95	47,91	32,14	13
11/P11	0,1	14,17	32,10	53,73	28,66
12/P12	0,53	37,46	34,76	27,78	11,59

H/W: relação H/W
 % Edif.: fração de porcentagem edificada
 % Imp.: fração de porcentagem impermeável
 % Perm.: fração de porcentagem permeável
 Alt. Rug.: altura da rugosidade







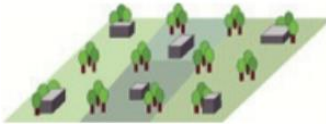

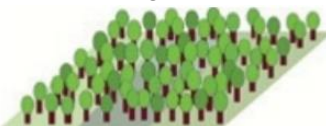
Tabela 10 Valores dos parâmetros morfológicos por área de abrangência.


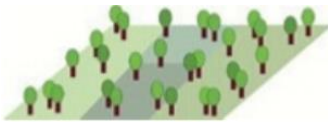
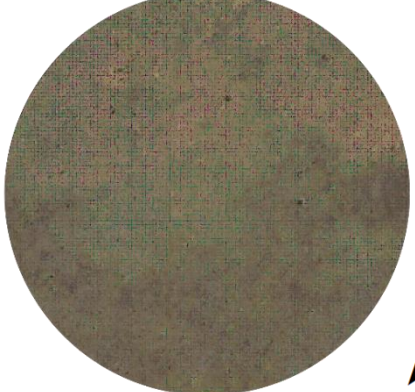

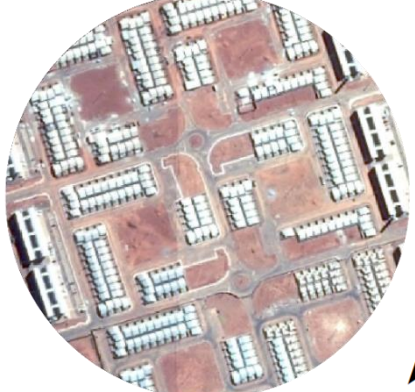
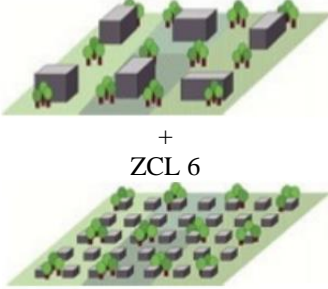

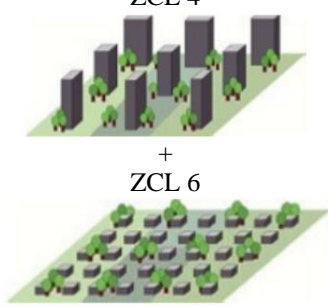
- **Caracterização das ZCLs**










O mapeamento das ZCLs tem o objetivo de apresentar as diferentes tipologias urbanas presentes em uma região para que seja possível realizar a análise em microescala e tomar decisões mais precisas de acordo com a peculiaridade de cada zona.

A partir das doze tipologias identificadas e do cálculo de seus parâmetros, definem-se oito zonas climáticas locais e quatro subclassificações compostas por duas zonas cada, conforme Quadro 5.

Três ZCLs apresentam apenas características de cobertura do solo (A, B e D) e correspondem às tipologias 4, 5 e 6, enquanto as outras nove ZCLs apresentam, também, áreas edificadas (D⁵, 3, 9, 6⁵, 4⁶, 1, 8, 5⁸ e 5).

Tipologia e Ponto de abrangência	Imagem da área Ø 400 m	Classificação da ZCL	
		Imagem	Nome
I P1		<p>ZCL D</p>  <p>+ ZCL 5</p> 	ZCL D ⁵
II P2		<p>ZCL 3</p> 	ZCL 3
III P3		<p>ZCL 9</p> 	ZCL 9
IV P4		<p>ZCL A</p> 	ZCL A

<p>V P5</p>		<p>ZCL B</p> 	<p>ZCL B</p>
<p>VI P6</p>		<p>ZCL D</p> 	<p>ZCL D</p>
<p>VII P7</p>		<p>ZCL 5 + ZCL 6</p> 	<p>ZCL 6⁵</p>
<p>VIII P8</p>		<p>ZCL 4 + ZCL 6</p> 	<p>ZCL 4⁶</p>

<p>IX P9</p>		<p>ZCL 1</p> 	<p>ZCL 1</p>
<p>X P10</p>		<p>ZCL 8</p> 	<p>ZCL 8</p>
<p>XI P11</p>		<p>ZCL 5</p>  <p>+</p> <p>ZCL 8</p> 	<p>ZCL 5⁸</p>
<p>XII P12</p>		<p>ZCL 5</p> 	<p>ZCL 5</p>

Quadro 5 Classificação das Zonas Climáticas Locais.

Para a análise do papel da vegetação intraurbana nas ZCLs foram descartadas as zonas que não possuem características urbanas e/ou que apresentam área permeável maior do que a soma da área impermeável e construída: D⁵, 9, A, B, D, 8, e 5⁸. Assim, o objeto de estudo desta pesquisa engloba as seguintes ZCLs: 3, 6⁵, 4⁶, 1 e 5.

O Gráfico 7 mostra a porcentagem de área permeável, impermeável e edificada de cada ZCL classificada. As ZCLs D⁵, 9, A, B, D e 5⁸ possuem grande área permeável, além disso, as zonas 9, A, B e D são exclusivamente rurais. A zona 8, apesar de possuir apenas 32,14 % de área permeável, não se encontra inserida na área urbana, estando localizada no limite da RA XX.

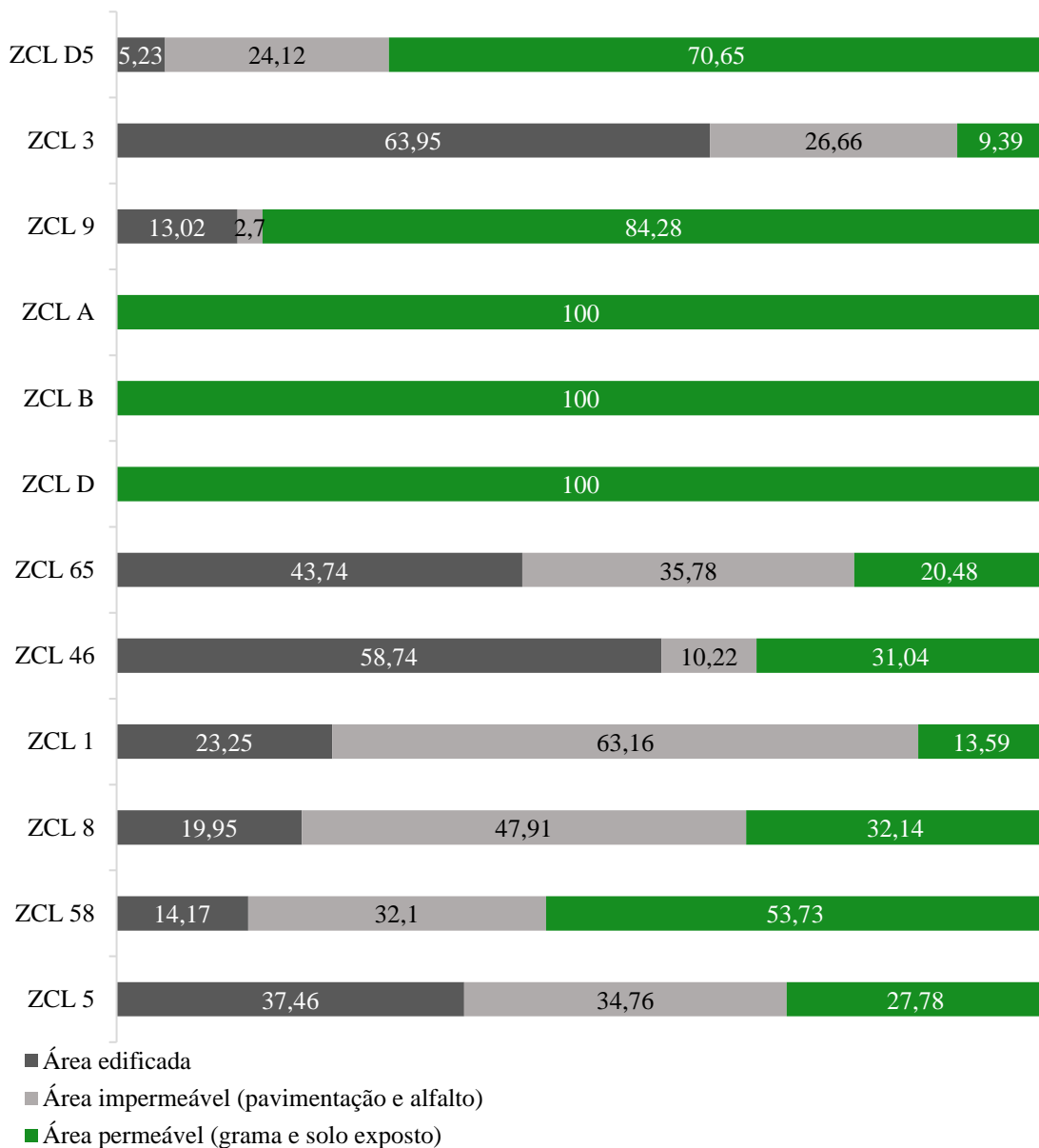


Gráfico 7 Porcentagem de área edificada, impermeável e permeável por ZCL

As doze ZCLs identificadas nas três RAs são apresentadas na Figura 22 conforme legenda padrão proposta pelo WUDAPT (2019).

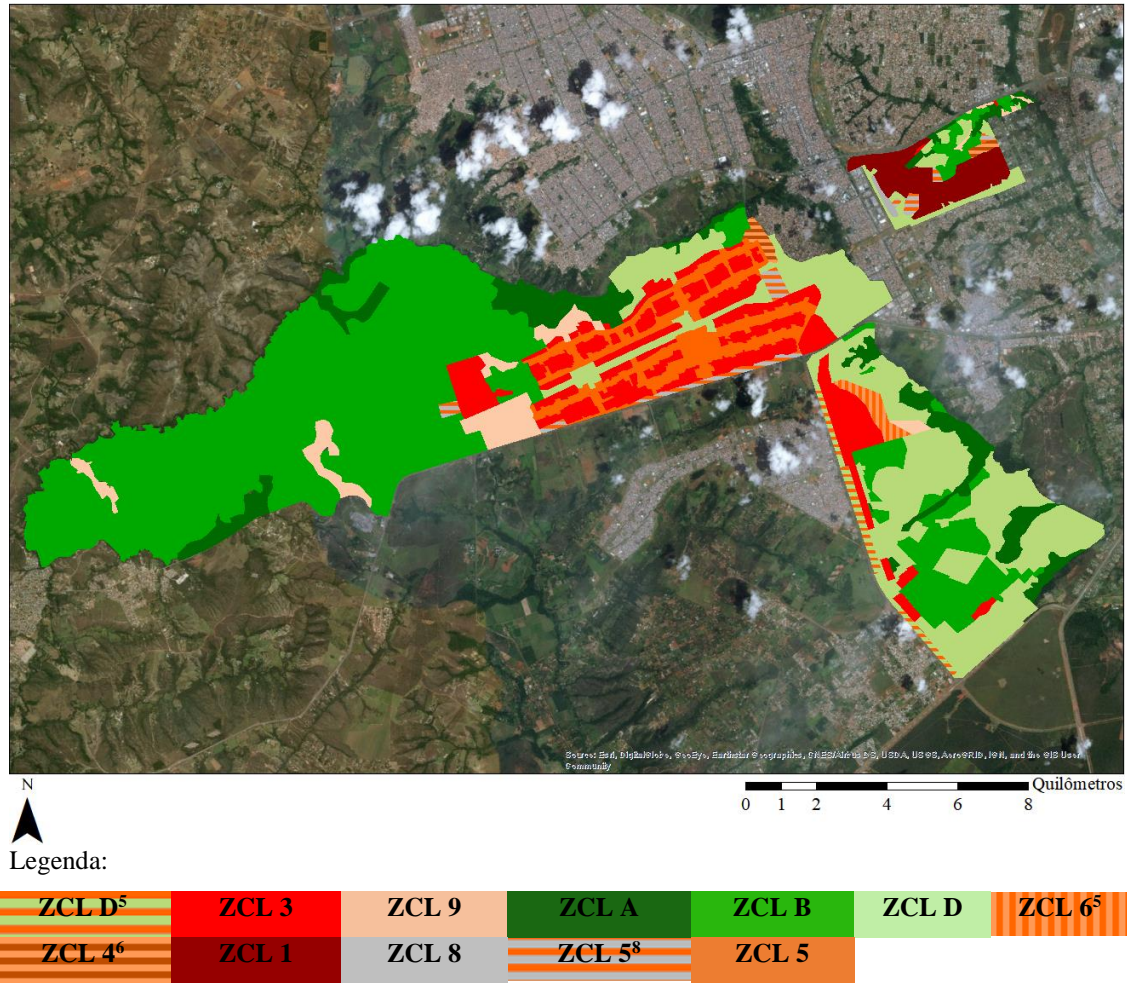


Figura 22 Mapeamento das Zonas Climáticas Locais.

As ZCLs referentes aos tipos de cobertura (A, B e D) se repetem nas três RAs e correspondem às áreas rurais, como matas e gramados com ou sem presença de arbustos. Percebe-se a presença de um cinturão verde nas RAs, sendo a RA XII – Samambaia, a que possui maior quantidade de área com essas características, e a RA XX, menor área.

ZCL	D ⁵	3	9	A	B	D	6 ⁵
Área (km ²)	1,29	3,4	0,25	4,21	8,04	19,27	0,94

Tabela 11 Área das ZCLs para a RA XXI – Riacho Fundo II

ZCL	3	9	A	B	D	4 ⁶	1	8	5 ⁸
Área (km ²)	0,03	0,23	0,65	1,2	1,88	0,22	4,06	0,19	0,38

Tabela 12 Área das ZCLs para a RA XX – Águas Claras

ZCL	3	9	A	B	D	5 ⁸	5
Área (km ²)	12,32	4,72	6,11	57,58	8,62	1,5	8,5

Tabela 13 Área das ZCLs para a RA XII – Samambaia

A ZCL D⁵ é a única subclassificação que apresenta tipologia de cobertura do solo e de construção. Nesta ZCL há predominância de áreas gramadas, inclusive nos espaços livres entre os edifícios, e ocorre apenas na RA XXI - Riacho Fundo II.

Das ZCLs referentes aos tipos de construção, a ZCL 3 ocupa maior área correspondendo a 15,75 km². Observa-se a predominância de quadras com residências unifamiliares de até três andares nas RAs XII – Samambaia, com 12,32 km², e RA XXI - Riacho Fundo II, com 3,4 km². Nessas áreas, a quantidade de vegetação intraurbana é pequena e a cobertura do solo é, em grande parte, pavimentada. Na RA XX – Águas Claras tipologia ocorre em uma área muito pequena, visto que é composta principalmente pela ZCL 1 com 4,06 km² e, nas três RAs analisadas neste estudo, é apenas nela que esta zona é identificada, possuindo como características principais a presença de edifícios altos e adensados, poucas árvores e cobertura do solo, em sua maioria, pavimentada.

A ZCL 5 é identificada apenas na RA XII – Samambaia, com 8,5 km², possuindo edifícios de até 9 andares e grande área permeável. Já a ZCL 9, apesar de aparecer nas outras RAs, está localizada, em sua maior parte, também na RA XII – Samambaia, correspondendo a áreas de chácaras.

A Tabela 14 apresenta a área total de cada ZCL identificada.

ZCL	D ⁵	3	9	A	B	D	6 ⁵	4 ⁶	1	8	5 ⁸	5
Área (km ²)	1,29	15,75	5,2	10,97	66,82	29,77	0,94	0,81	4,06	0,19	1,88	8,5

Tabela 14 Área total de cada ZCL

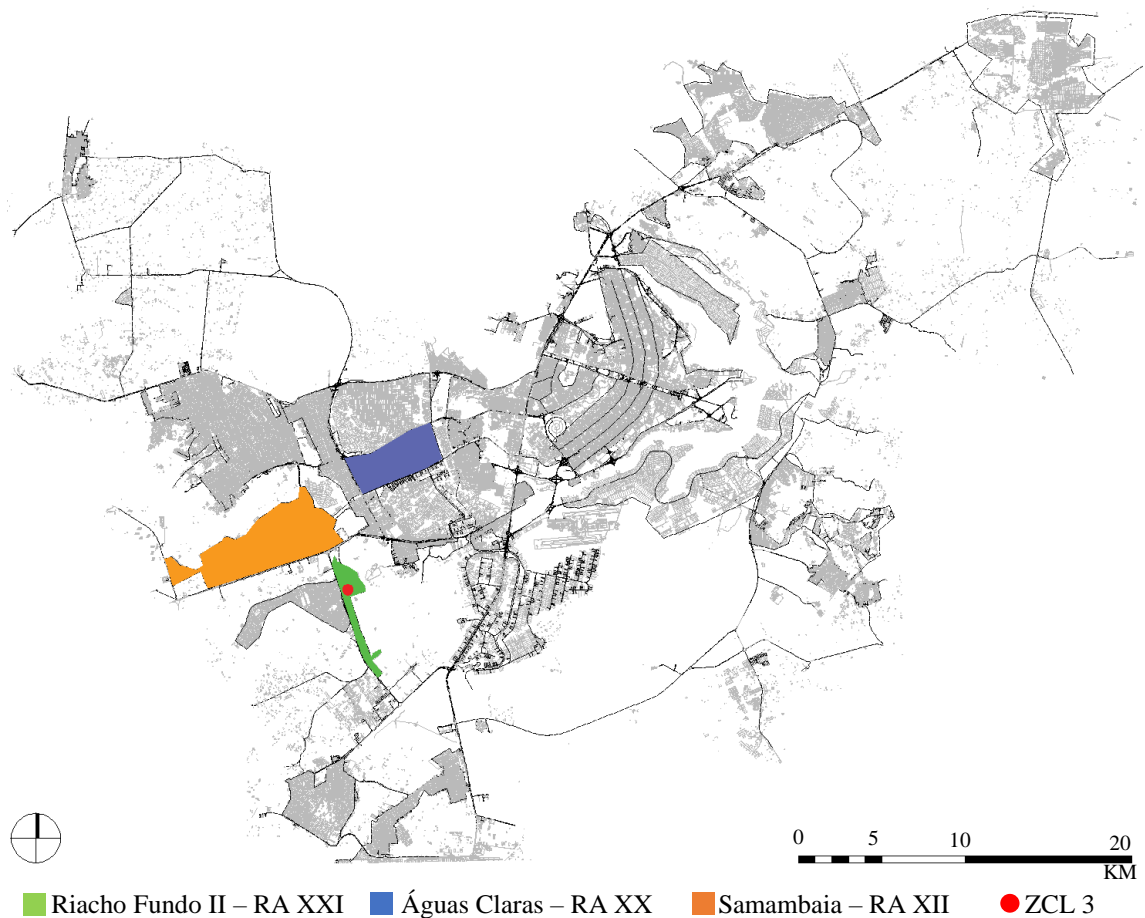
4.2 Simulação computacional do microclima

Este tópico dedica-se a apresentar os resultados propriamente ditos das simulações realizadas via ENVI-met. Elas foram realizadas no dia mais quente do ano de 2018 para o período quente seco do Distrito Federal, correspondendo a 29 de setembro.

Os gráficos foram gerados para três horários que seguem a recomendação da Organização Mundial de Meteorologia (OMM) para estudos de clima urbano: 09 h, 15 h e 21 h, representando os turnos manhã, tarde e noite, respectivamente.

A análise de conforto térmico desta pesquisa teve como base a Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) de Höppe (1999) e é apresentada em forma de gráfico de manchas distribuídas espacialmente no nível do pedestre.

- ZCL 3



■ Riacho Fundo II – RA XXI ■ Águas Claras – RA XX ■ Samambaia – RA XII ● ZCL 3

Figura 23 Localização da ZCL 3 no contexto do Distrito Federal.

Às 09 h, observa-se que o cenário original apresenta áreas de “leve calor” localizadas na via principal, nas calçadas entre os conjuntos residenciais e em áreas livres (Figura 24). Já no cenário com acréscimo de vegetação, há a amenização da Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) em 2° C, o que é suficiente para proporcionar uma melhora quanto à percepção térmica do usuário que vai de “levemente calor” para “confortável” em alguns pontos, principalmente na via principal, onde a vegetação foi implantada de forma linear.

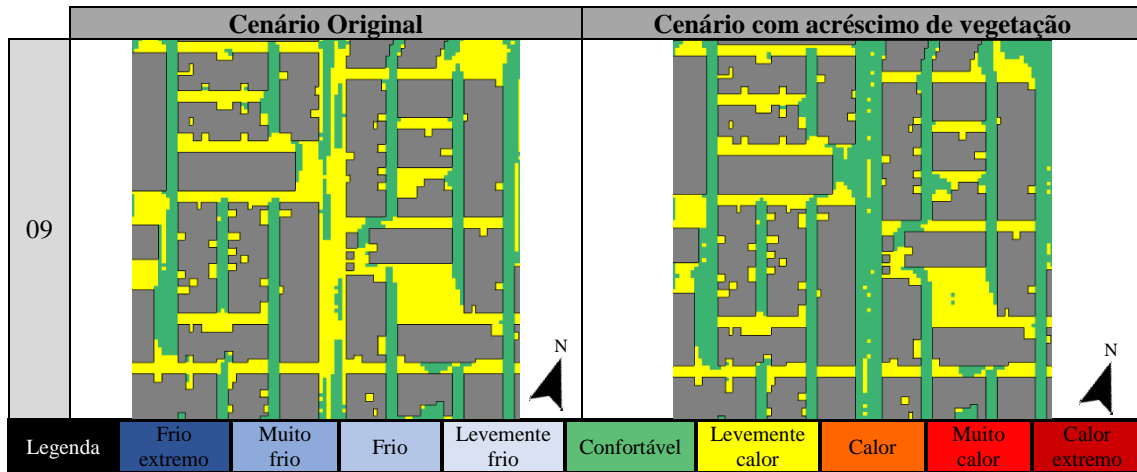


Figura 24 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 3 às 09 h do dia 29/09/2018

Para às 15 h, percebe-se apenas áreas com “muito calor” ou “calor extremo” tanto no cenário original quanto com acréscimo de vegetação, porém a vegetação melhora o conforto térmico no entorno imediato das árvores em até $3,78^{\circ}\text{C}$ de PET, incluindo na praça entre as residências e nas calçadas (Figura 25). O valor aproxima-se do que Silva (2009) obtém para a cidade de Teresina - PI, em espaços com presença de vegetação em canteiros centrais de vias, de $3,11^{\circ}\text{C}$.

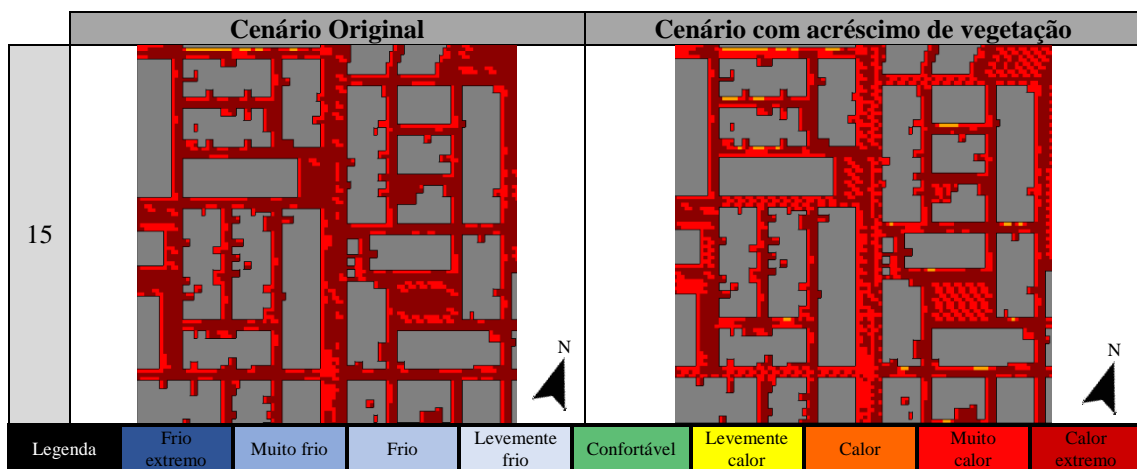


Figura 25 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 3 às 15 h do dia 29/09/2018

Às 21 h não há alteração quanto à percepção térmica, sendo que os dois cenários apresentam “leve calor”, o que não significa que não houve alguma melhora, visto que a Temperatura Fisiológica Equivalente a “levemente calor” encontra-se entre $23,1^{\circ}\text{C}$ e 29°C (Figura 26).

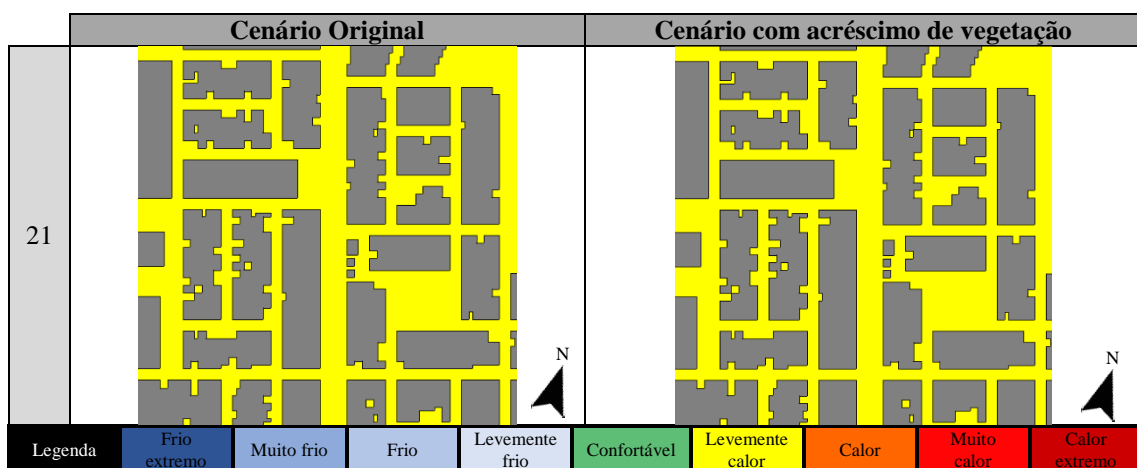


Figura 26 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 3 às 21 h do dia 29/09/2018

Assim, analisa-se a temperatura do ar e observa-se que houve a amenização do calor em algumas áreas com o aumento da vegetação arbórea, principalmente na via central, com diferenças em torno de 1° C (Figura 27).

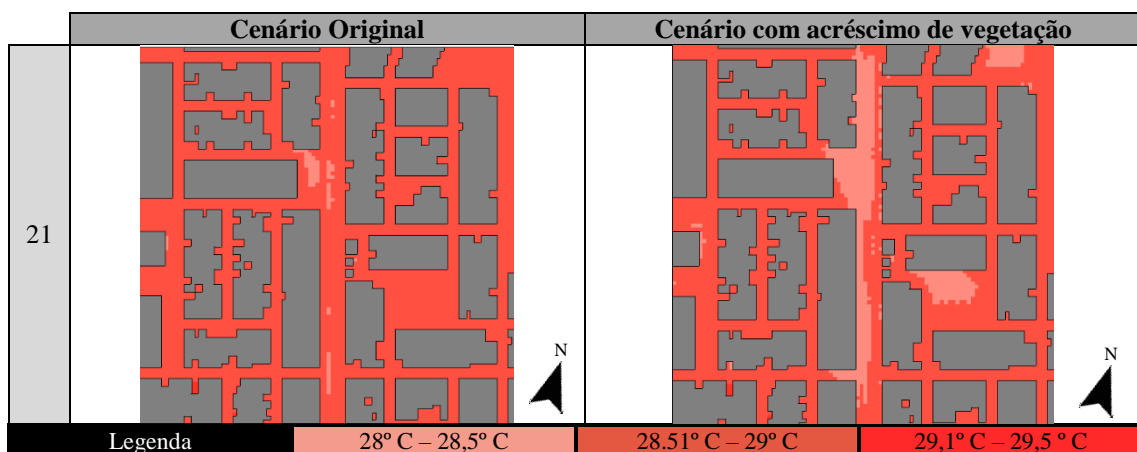


Figura 27 Resultados de temperatura do ar para a ZCL 3 às 21h do dia 29/09/2018

A ZCL 3, com característica residencial de baixa permeabilidade do solo, apresentou em seu cenário original Temperatura Fisiológica Equivalente máxima de 48,2° C e mínimo de 21° C. O acréscimo de vegetação significou uma amenização de até 3,78° C, diminuindo o grau de estresse fisiológico do pedestre.

- ZCL 6⁵

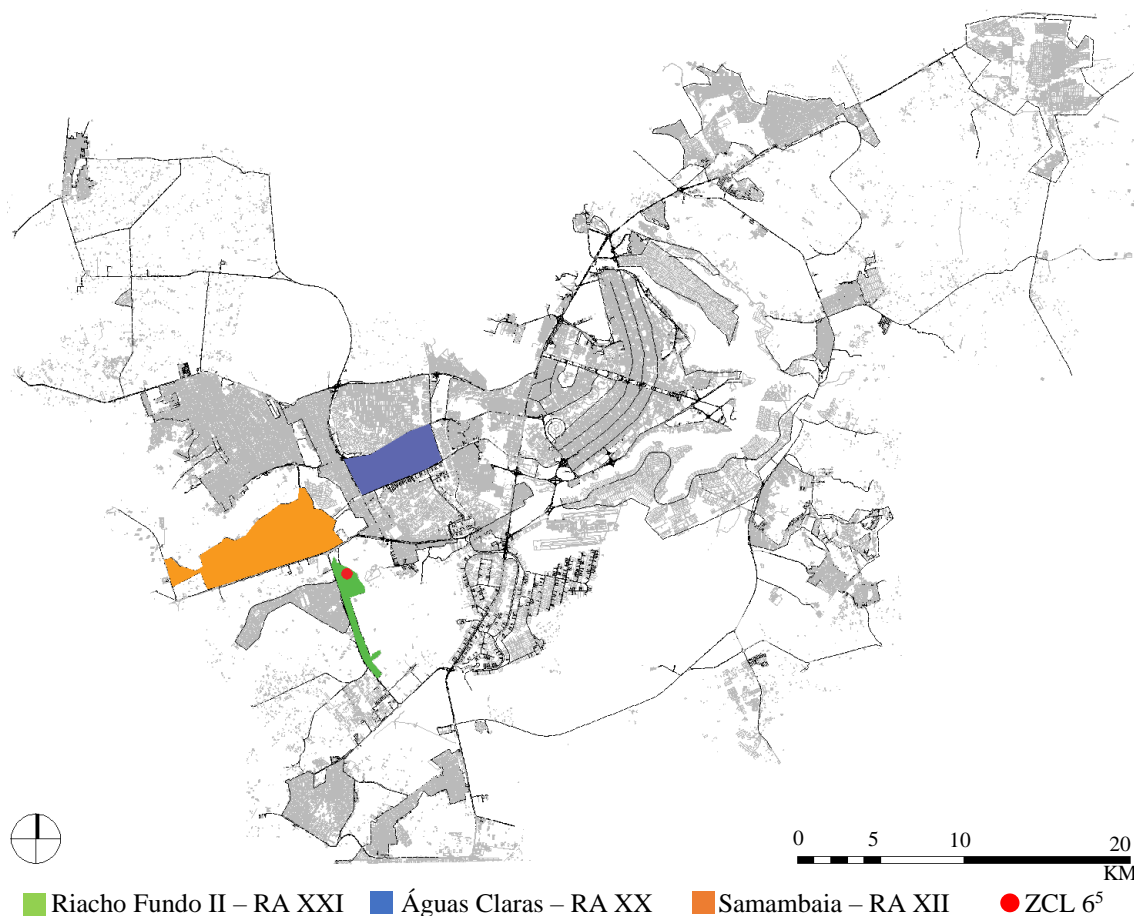


Figura 28 Localização da ZCL 6⁵ no contexto do Distrito Federal.

Às 09 h os dois cenários simulados permanecem, em sua maioria, em conforto térmico, porém o cenário com acréscimo de vegetação aponta alguns espaços com “leve calor”, principalmente onde houve a implantação de árvores (Figura 29).

Neste horário, há o aumento do PET em até 1,06° C nas áreas com acréscimo de vegetação. Isso pode ter ocorrido, pois a vegetação arbórea, que no cenário original é inexistente e foi acrescida de forma agrupada, cria uma barreira física que dificulta a passagem da ventilação em alguns pontos e a dissipação do calor retido abaixo da copa.

As vias mais largas, localizadas nas extremidades da zona, continuam apresentando percepção térmica “confortável”.

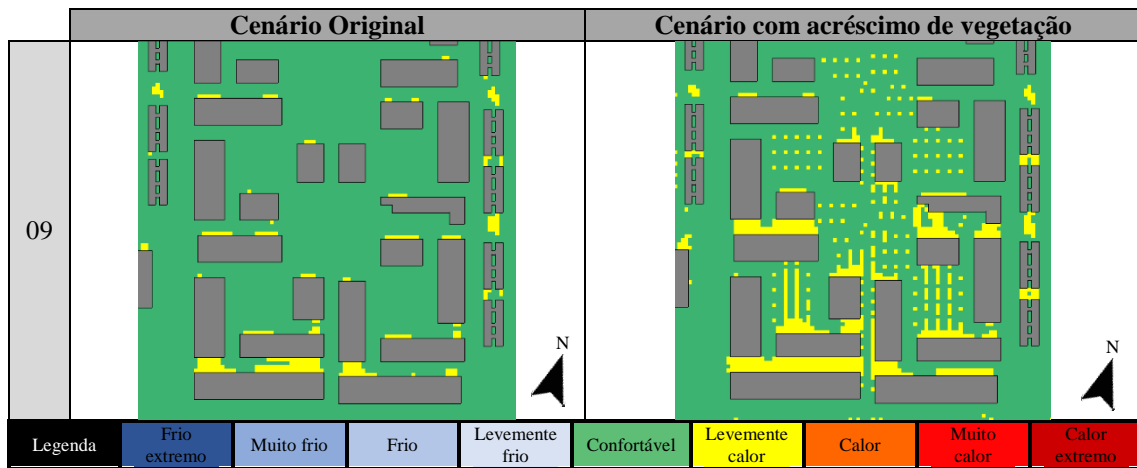


Figura 29 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 6⁵ às 09 h do dia 29/09/2018

Às 15 h, observa-se grande melhora na percepção térmica para o cenário com acréscimo de vegetação (Figura 30). A área, que apresentava resultados de “calor extremo” em toda sua extensão, passa a apontar valores correspondentes a “muito calor”, o que significa a amenização da percepção térmica do usuário e diminuição de até 2,27 ° C, valor que se aproxima ao resultado percebido por Castelo Branco (2009) para às 15 h em Brasília, igual a 2,7° C em áreas sombreadas por vegetação.

Essa amenização é observada ao longo das vias, enquanto nas praças entre os conjuntos observa-se amenização principalmente no entorno imediato da árvore.

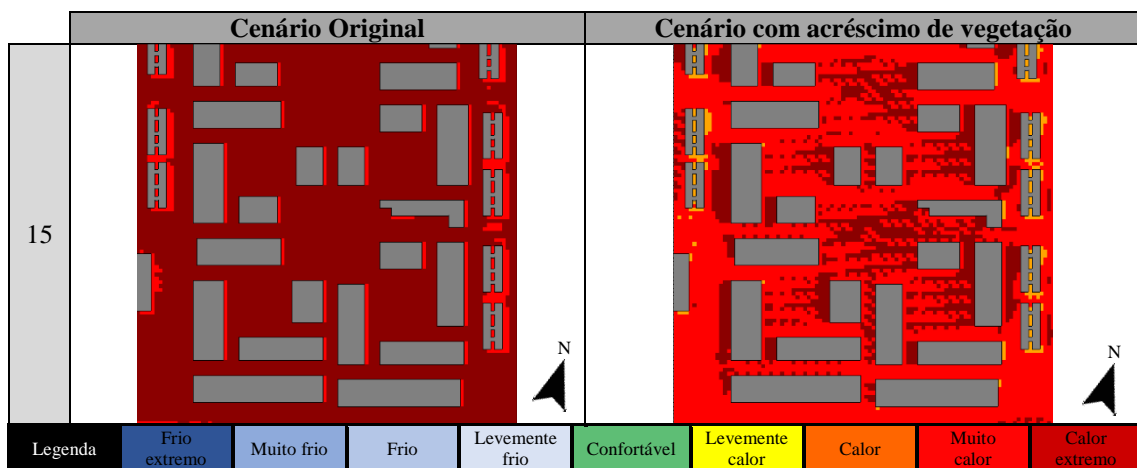


Figura 30 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 6⁵ às 15 h do dia 29/09/2018

Os resultados obtidos às 21 h são similares aos percebidos às 09 h. Nestes horários, o conforto térmico é predominante, porém alguns espaços continuam apresentando leve calor (Figura 31), sendo menor a variação do PET de um cenário para outro, chegando a

apenas 0,4° C. Ainda assim, Shinzato e Duarte (2018) afirmam que mesmo uma redução pequena na temperatura do ar contribui para a melhoria das condições de conforto quando combinada com redução de temperatura radiante, por exemplo, com ocorre na ZCL 65, onde há redução da temperatura radiante nas vias de cerca 1,6° C.

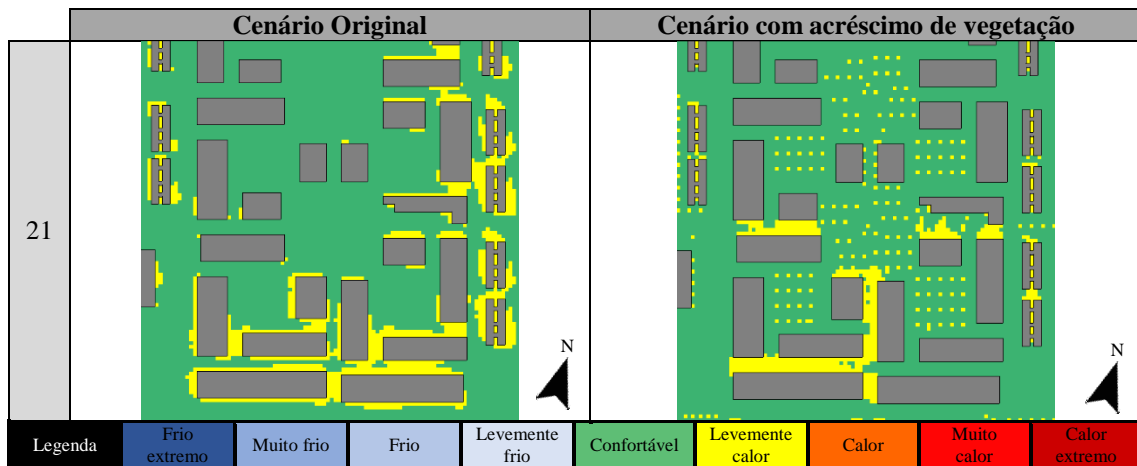


Figura 31 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 6⁵ às 21 h do dia 29/09/2018

Na ZCL 6⁵, com característica residencial com permeabilidade média e vegetação arbórea escassa, o cenário original apresentou PET máximo de 49,4° C e mínimo de 20,6° C. O acréscimo de vegetação proporcionou diminuição de até 2,27° C, porém apresentou aumento do PET nos horários de 09 h e 21 h de 1,06° C e 0,4° C, respectivamente, principalmente em espaços onde a vegetação foi disposta em grupos, conforme sugerido por Lóis, Labaki e Santos (2011).

- ZCL 4⁶

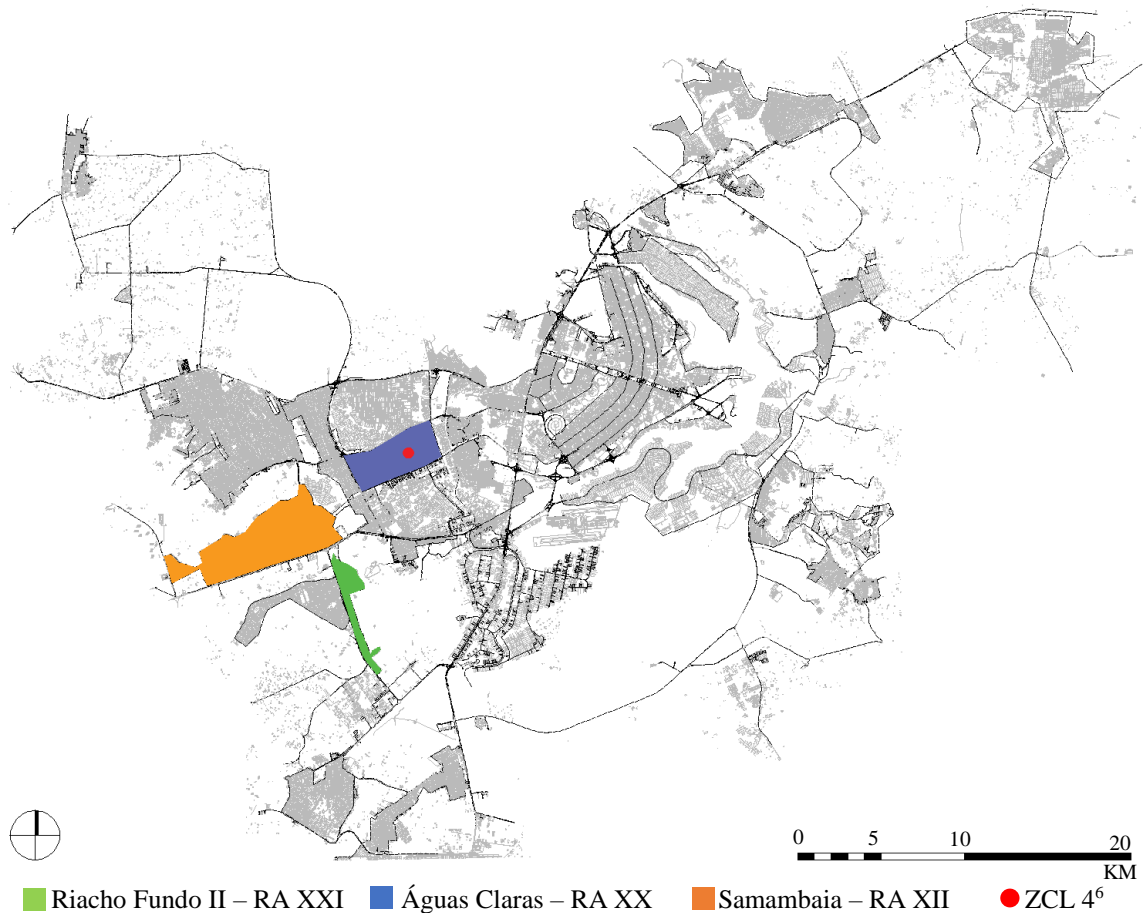


Figura 32 Localização da ZCL 4⁶ no contexto do Distrito Federal.

Às 09 h, o acréscimo de vegetação não gera muita alteração quanto à percepção térmica do usuário no gráfico de manchas (Figura 33), pois o intervalo que compreende a percepção térmica equivalente a “conforto” vai de 18,1° C a 23° C. Porém a diminuição do PET para este cenário em comparação com o cenário original chega a 1,56° C e não ultrapassa este intervalo. Maciel (2014) encontra valores próximos para a estação quente-seca na cidade de Cuiabá – MT com o acréscimo de vegetação em áreas livres, correspondendo a 1,32° C de melhora pela manhã.

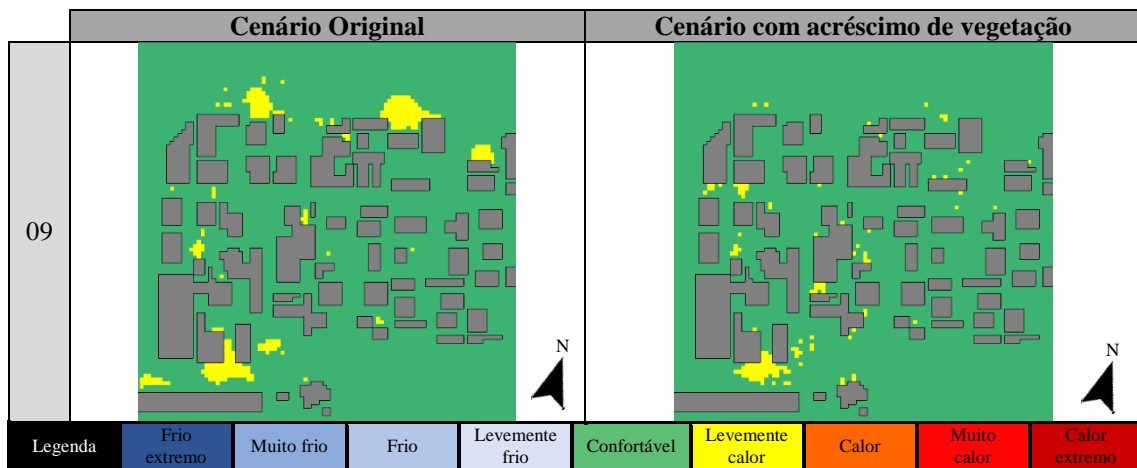


Figura 33 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 4⁶ às 09 h do dia 29/09/2018

Às 15 h, há a amenização da percepção térmica no cenário com acréscimo de vegetação, diminuindo as áreas de “calor extremo” (Figura 34). Esse resultado corresponde às áreas onde houve implantação de árvores e os valores de PET variam em até 5° C, com maiores diferenças sendo percebidas na via principal e entre os conjuntos edificados, onde a vegetação foi implantada de forma linear ao longo das calçadas. Neste horário, os valores são maiores do que os encontrados por Maciel (2014) de apenas 1,96° C.

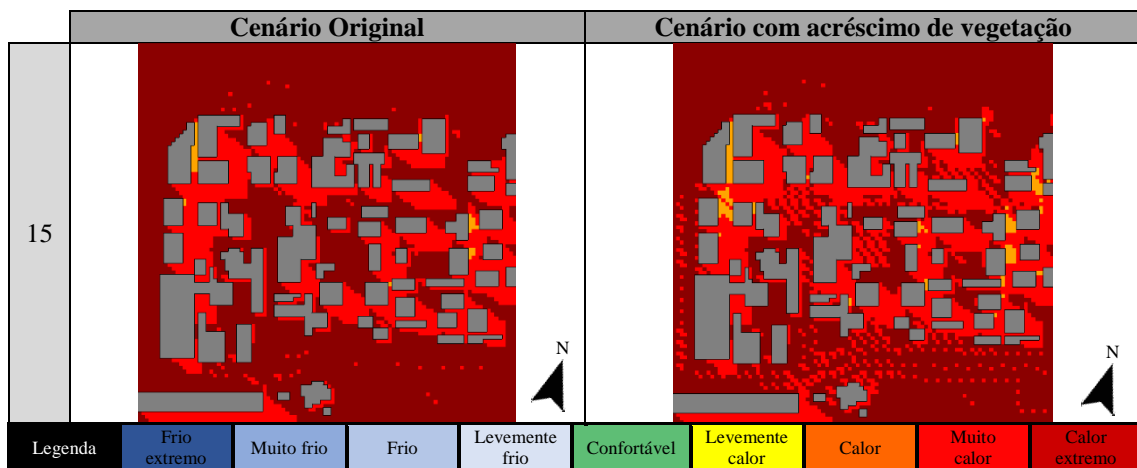


Figura 34 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 4⁶ às 15 h do dia 29/09/2018

Às 21 h, a zona encontra-se “confortável” (Figura 35). A variação do PET é pequena, não ultrapassando 0,2° C em áreas com acréscimo de vegetação.

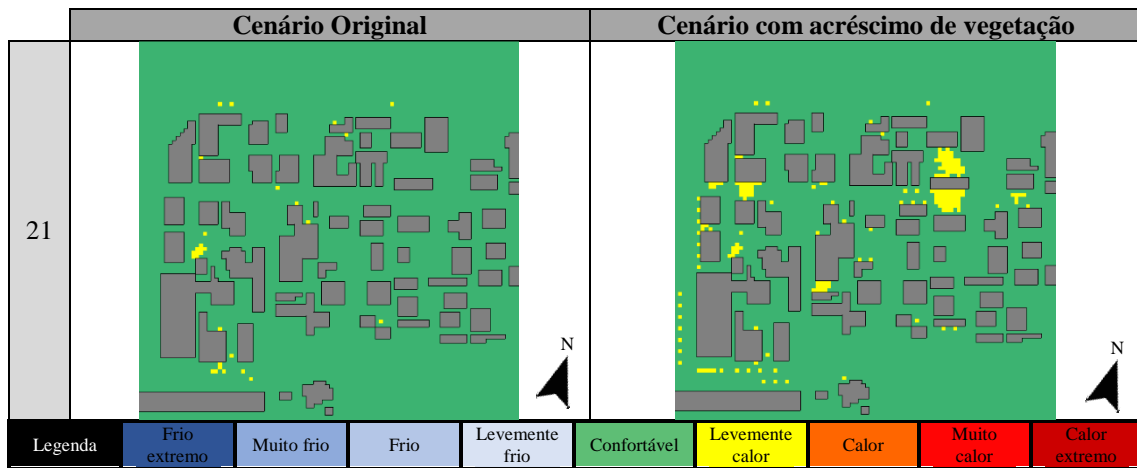


Figura 35 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 4⁶ às 21h do dia 29/09/2018

Na ZCL 4⁶, composta por edifícios em altura e residências unifamiliares e permeabilidade baixa, o cenário original apresentou PET máximo de 49,2° C e mínimo de 32,81° C. O acréscimo de vegetação proporcionou diminuição de até 5° C no período da tarde, manteve-se inalterado quanto à percepção térmica do pedestre às 09 h e 21 h, mas apresentou diminuição de PET de 1,56° C e 0,2° C, respectivamente.

- ZCL 1

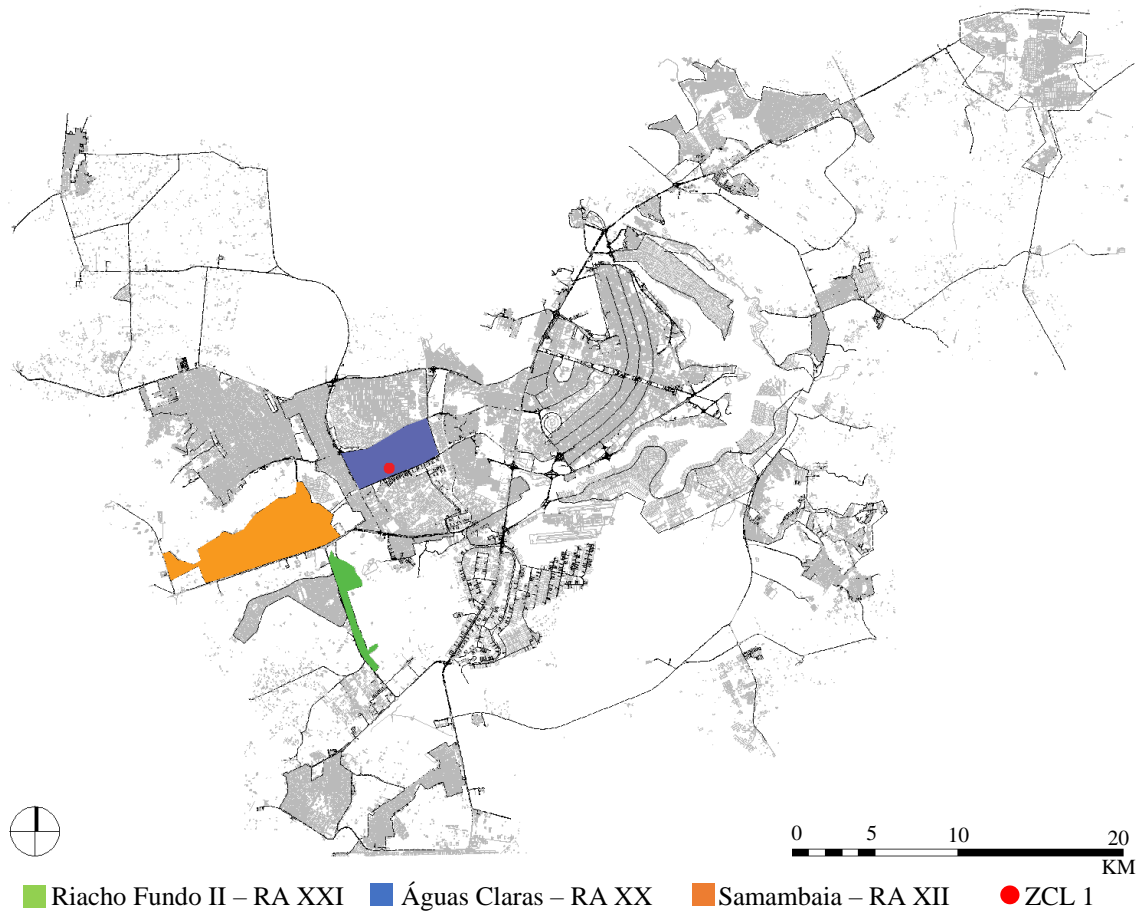


Figura 36 Localização da ZCL 1 no contexto do Distrito Federal.

Às 09 h não houve grande alteração quanto ao conforto térmico na zona, assim como na zona 4⁶. Os espaços com acréscimo de vegetação mantiveram-se, em sua maioria, confortáveis (Figura 37) com pequenas variações de PET de aproximadamente 0,8° C.

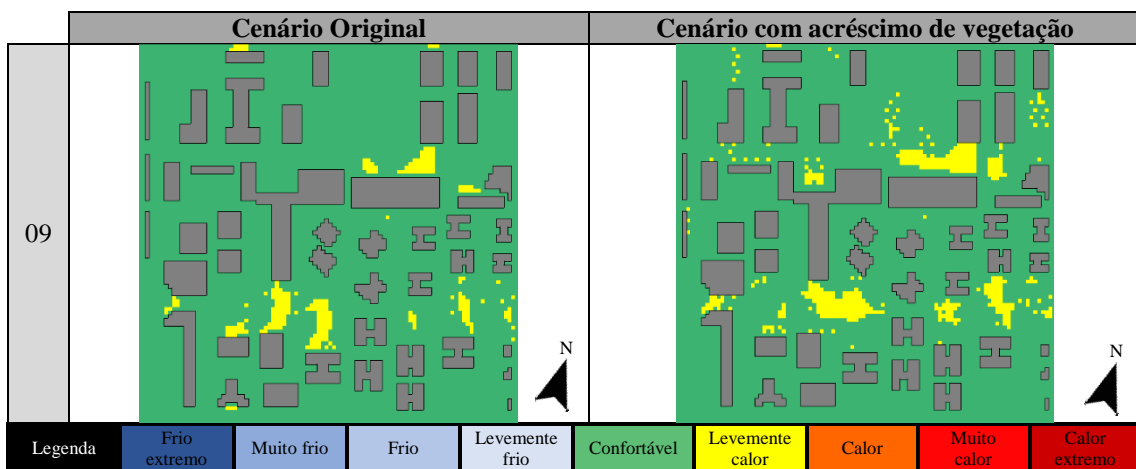


Figura 37 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 1 às 09 h do dia 29/09/2018

Às 15 h a presença de vegetação melhorou a percepção térmica do pedestre, passando de “muito calor” para “calor” em todas as áreas onde houve o acréscimo de vegetação de forma linear, conforme Silva (2009).

Nas áreas onde as árvores estão dispostas em grupos, a percepção térmica também se torna mais amena, porém passando de “calor extremo” para “muito calor”. Nestas áreas, observa-se “calor” apenas no entorno imediato à árvore (Figura 38).

A variação dos valores de PET para esta zona chega a, aproximadamente, 7° C nas vias e 2,3° C entre os edifícios.

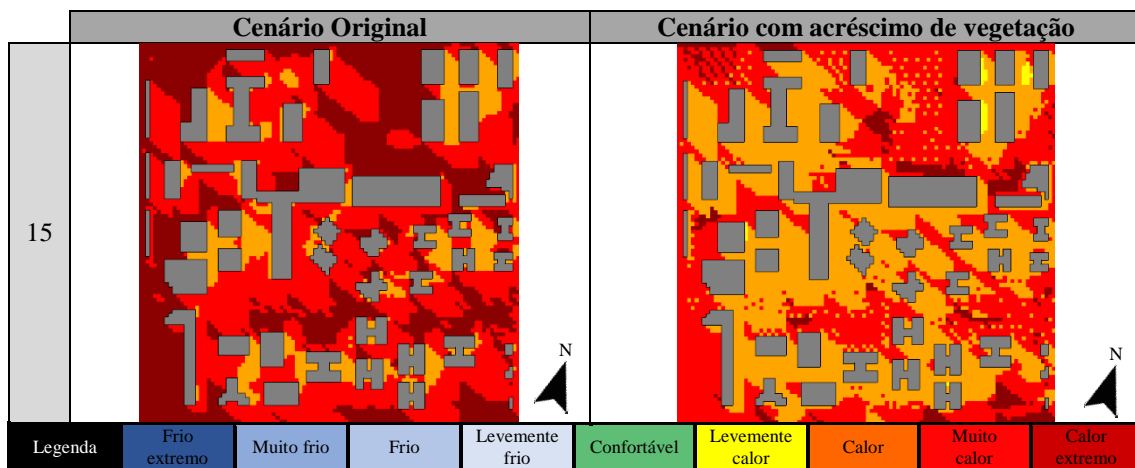


Figura 38 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 1 às 15 h do dia 29/09/2018

Às 19 h⁴ o cenário com acréscimo de vegetação apresenta melhora quanto à percepção térmica. É possível observar que a maior parte dos espaços se encontra em conforto, enquanto no cenário original há predominância de “levemente calor” (Figura 39). Neste horário, o acréscimo de vegetação contribui para a diminuição do PET em 1,97° C.

A homogeneização da sensação térmica neste cenário pode ser justificada pela amplitude dos valores de PET, tanto de “confortável” (18,1° C a 23° C) quanto de “levemente calor” (23,1° C a 29° C).

⁴ Por limitação do software, os resultados das 21 h não puderam ser extraídos. Assim, é feita a análise do horário mais próximo simulado, correspondendo às 19 h.

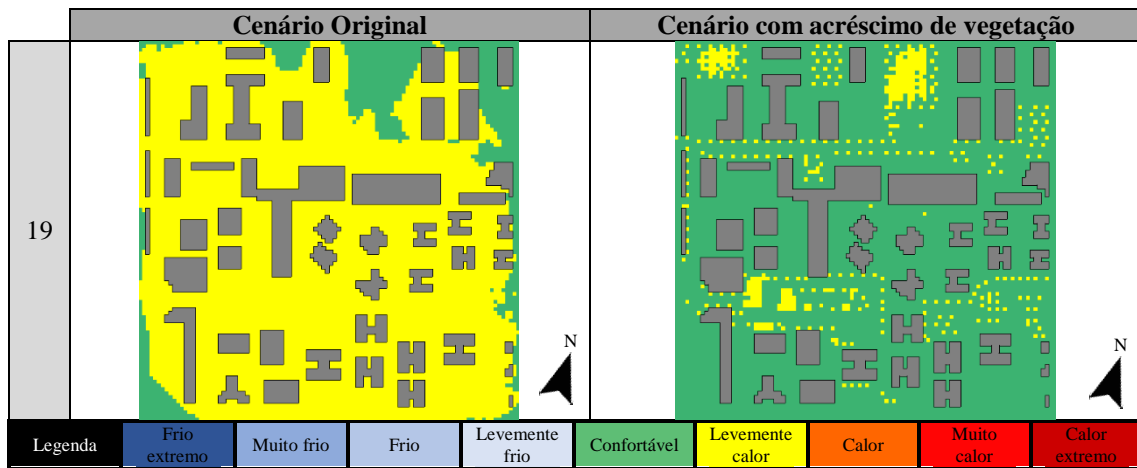


Figura 39 Resultados de temperatura do ar para a ZCL 1 às 19 h do dia 29/09/2018

Na ZCL 1, composta por edifícios em altura e permeabilidade baixa, o cenário original apresentou PET máximo de 48° C e mínimo de 19,8° C. O acréscimo de vegetação proporcionou diminuição de PET de 2,3° C a 7° C no período da tarde e manteve-se inalterado quanto à percepção térmica do pedestre às 09 h e 19 h, assim como a ZCL 4⁶.

• ZCL 5

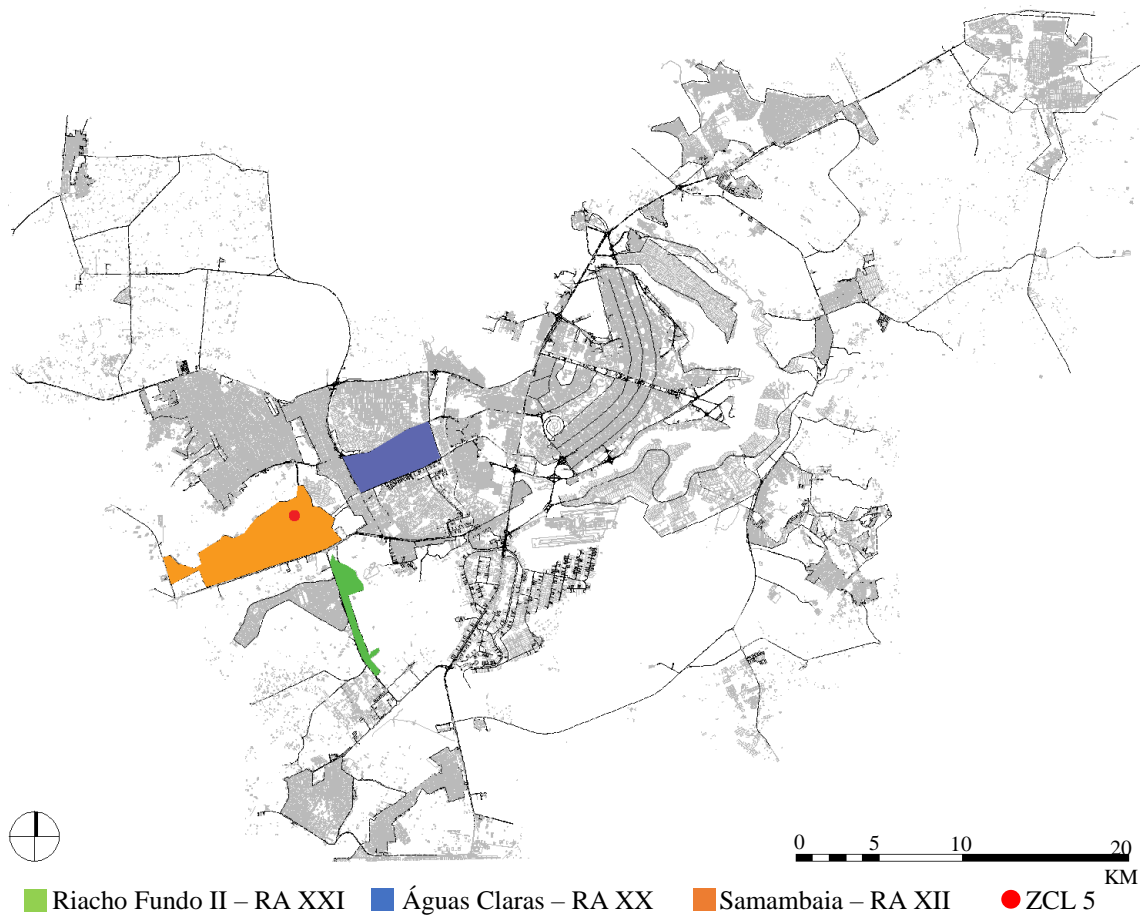


Figura 40 Localização da ZCL 5 no contexto do Distrito Federal.

As áreas de conforto térmico às 09 h aumentam no cenário com acréscimo de vegetação. Nas calçadas da via principal, em alguns pontos a percepção térmica passa de “leve calor” para “confortável” (Figura 41). Essa variação é de cerca de 0,4° C.

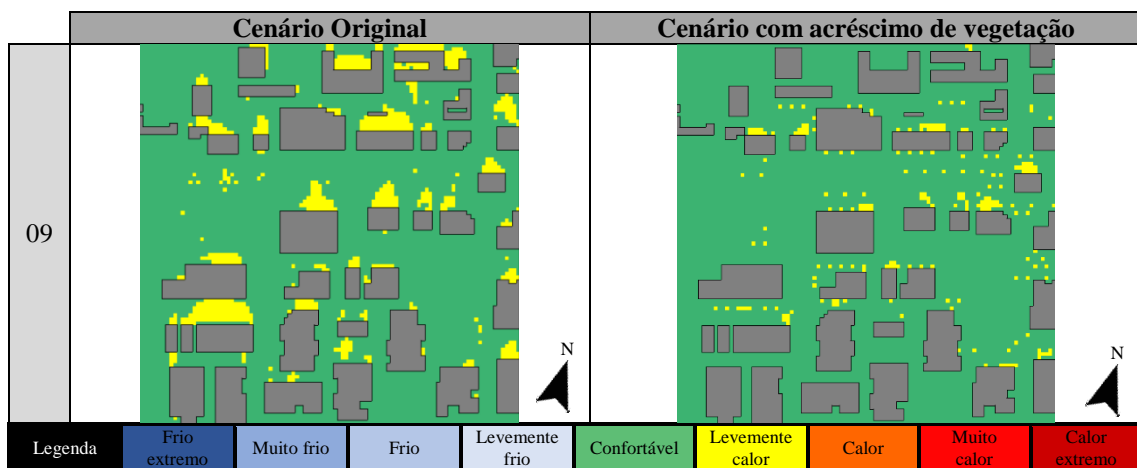


Figura 41 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 5 às 09 h do dia 29/09/2018

Em alguns pontos às 15 h a presença das copas das árvores criam uma área de retenção do calor radiante que provoca leve piora da sensação de conforto, aumentando as áreas de “calor extremo”, embora mais disperso (Figura 42), concentrando-se próximas as árvores, apesar de ter diminuído 0,6° C no entorno imediato da vegetação o PET.

O horário das 15 h é considerado crítico para o conforto térmico, e os materiais urbanos como concreto, asfalto e demais áreas impermeáveis já contribuem significativamente para a homogeneização da sensação de desconforto.

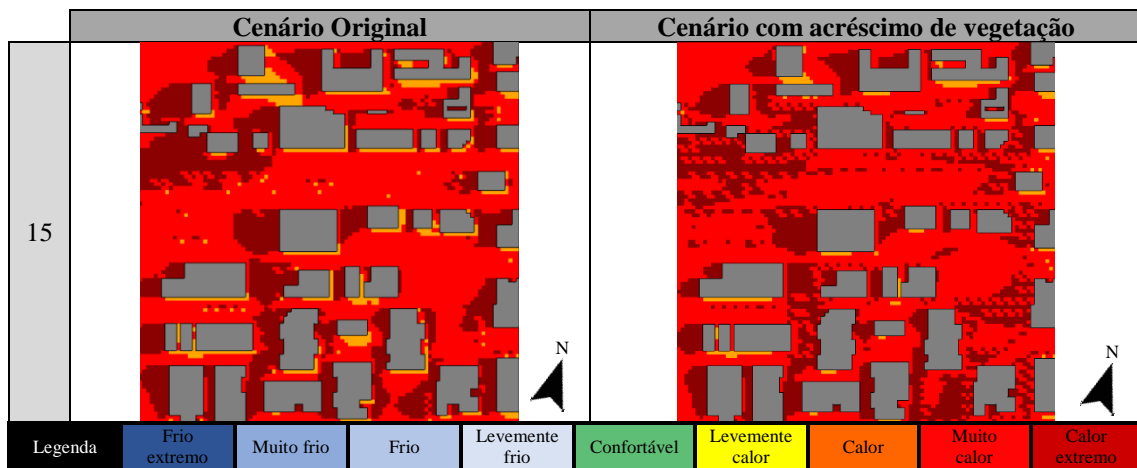


Figura 42 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 5 às 15h do dia 29/09/2018

Para a ZCL 5, o horário de maior amenização de percepção térmica acontece às 21h com o PET diminuindo até 3° C no cenário com acréscimo de vegetação. Neste cenário, observa-se conforto térmico em toda a área analisada, enquanto o cenário original apresenta áreas “leve calor” (Figura 43).

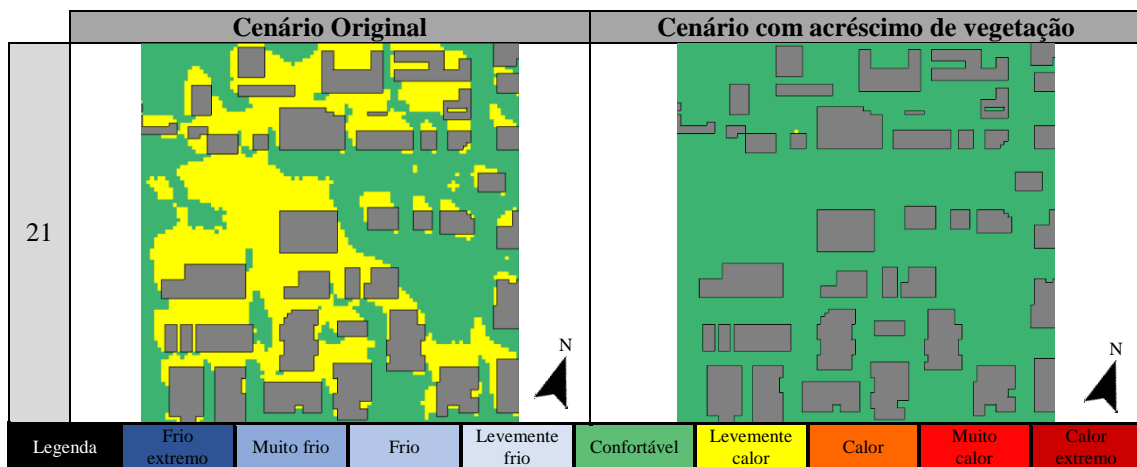


Figura 43 Resultados de Temperatura Fisiológica Equivalente para a ZCL 5 às 21 h do dia 29/09/2018

A ZCL 5, composta por residências e prédios comerciais baixos, difere-se das demais pois é a única zona onde os valores de PET não apresentaram melhora durante a tarde, porém a noite houve a diminuição. O cenário original apresentou PET máximo de 48° C e mínimo de 32,15° C. O acréscimo de vegetação proporcionou diminuição de PET de até 3° C no período da noite, apresentando pequena melhora de 0,4° C pela manhã e piora de 0,6° C durante a tarde.

A Tabela 15 apresenta a variação máxima do valor de PET para cada ZCL. Os valores em vermelho correspondem ao aumento no valor do PET, ou seja, uma piora quanto à percepção de conforto térmico do pedestre, enquanto o verde representa áreas com amenização térmica.

Às 09 h, três zonas apresentaram melhora quanto às amenizações de PET, enquanto duas demonstraram aumento com o acréscimo de árvores. Das cinco ZCLs analisadas, apenas uma apresenta aumento de PET no período da tarde, sendo que nas outras quatro há melhora nas sensações de conforto. As variações térmicas são maiores neste horário, chegando a 7° C na ZCL 1. Às 21 h, a ZCL 6⁵ foi a única a apresentar ganho de PET.

Áreas de estudo	Variação máxima (° C)		
	09 h	15 h	21 h
ZCL 3	- 2	- 3,78	- 1
ZCL 6 ⁵	+ 1,06	- 2,27	+ 0,4
ZCL 4 ⁶	- 1,56	- 5	- 0,2
ZCL 1	+ 0,8	- 7	- 1,97
ZCL 5	- 0,4	+ 0,6	- 3

Legenda: ■ Piora na percepção de conforto térmico ■ Melhora na percepção de conforto térmico

Tabela 15 Variação máxima de PET por ZCL e período do dia

A decisão por acrescentar, mesmo que hipoteticamente, vegetação nos espaços públicos, como calçadas, canteiros centrais e praças, onde acontece a circulação de pedestres e o convívio social, mostrou o potencial de todas as RAs de receberem mais áreas vegetadas, o que representa um ganho da captura do carbono (MUNEROLI, 2009) e manutenção da qualidade do ar da cidade de Brasília.

- **Validação dos dados**

Vale destacar que o *software* ENVI-met representa o único modelo capaz de analisar as relações solo, planta e atmosfera. Tal complexidade repercute na dificuldade de validar os dados obtidos pelo processo de simulação. Para contornar tal situação, os dados de temperatura do ar obtidos nas simulações computacionais foram submetidos à análise comparativa tendo como referência os dados horários das séries históricas disponibilizados pelo INMET para às 12 h e 18 h do dia 29 de setembro de 2018.

Na Tabela 16, observa-se que a diferença de temperatura do ar às 12h é maior na ZCL 3, chegando a um ΔT (Tsimulação – Thistórica) igual a 3,76 °C. Já a ZCL 5,

apresenta maior aproximação, correspondendo a ΔT (Tsimulação – Thistórica) igual a 1,93 °C.

	Simulações computacionais	INMET	ΔT
ZCL 3	29,96° C	26,2 ° C	3,79° C
ZCL 6 ⁵	29,85° C		3,65° C
ZCL 4 ⁶	29,06° C		2,86° C
ZCL 1	29,25° C		3,05° C
ZCL 5	28,13° C		1,93° C

Tabela 16 Resultados de temperatura do ar das ZCLs e do INMET para às 12h.

Para às 18 h, a maior diferença percebida para o valor de ΔT (Tsimulação – Thistórica) ocorre na ZCL 5, com 3,06° C, enquanto a menor diferença de resultados é observada na ZCL 3, com 1,13° C.

	Simulações computacionais	INMET	ΔT
ZCL 3	31,97° C	33,1° C	1,13° C
ZCL 6 ⁵	31,77° C		1,33° C
ZCL 4 ⁶	30,84° C		2,26° C
ZCL 1	31,07° C		2,03° C
ZCL 5	30,04° C		3,06° C

Tabela 17 Resultados de temperatura do ar das ZCLs e do INMET para às 18 h.

O Gráfico 8 mostra que existe um padrão no comportamento da temperatura dos dados históricos e simulados, em que há o aumento da temperatura de 12 h para às 18 h.

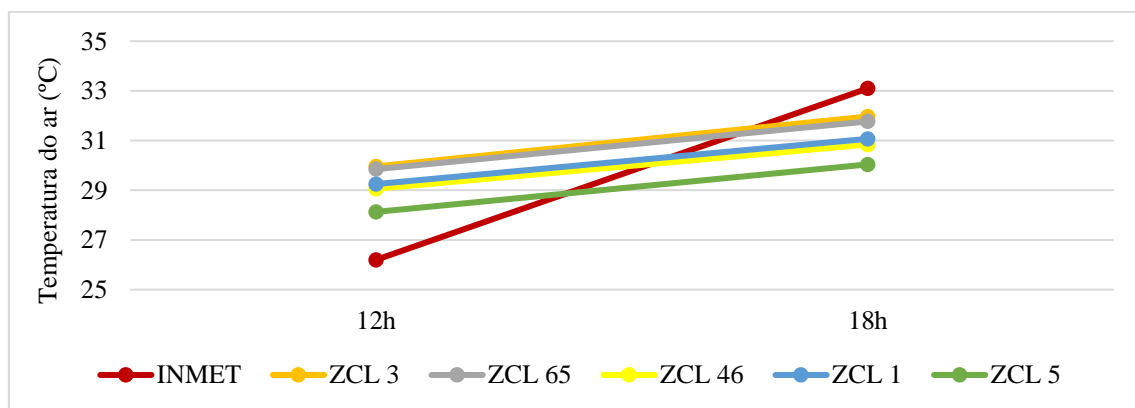


Gráfico 8 Comparação entre os dados simulados e o dado da série histórica referentes à temperatura do ar (INMET)

Na Tabela 18, observa-se que a diferença de umidade relativa do ar às 12h é maior na ZCL 5, chegando a um ΔU (Usimulação – Uhistórica) igual a 3,25 %. Já a ZCL 1, apresenta maior aproximação, correspondendo a ΔU (Usimulação – Uhistórica) igual a

0,12 %. Esta diferença muito baixa denota que os valores de umidade relativa do ar simulados são bastante equivalentes aos valores registrados, validando o parâmetro de umidade relativa do ar.

	Simulações computacionais	INMET	ΔU
ZCL 3	46,36 %	48 %	1,64 %
ZCL 6 ⁵	46,17 %		1,83 %
ZCL 4 ⁶	48,43 %		0,43 %
ZCL 1	47,88 %		0,12 %
ZCL 5	51,25 %		3,25 %

Tabela 18 Resultados de umidade relativa do ar das ZCLs e do INMET para às 12 h.

Às 18 h, a ZCL 5 continua apresentando a maior diferença quanto ao o valor de ΔU (Usimulação – Uhistórica) com 19,06 %, assim como a ZCL 3, com menor diferença observada igual a 14,84 %.

	Simulações computacionais	INMET	ΔU
ZCL 3	35,84 %	21 %	14,84 %
ZCL 6 ⁵	36,18 %		15,18 %
ZCL 4 ⁶	38,23 %		17,23 %
ZCL 1	37,74 %		16,74 %
ZCL 5	40,06 %		19,06 %

Tabela 19 Resultados de umidade relativa do ar das ZCLs e do INMET para às 18 h.

O Gráfico 9 mostra o comportamento da umidade relativa do ar para os dados históricos e simulados. Observa-se maior diferença de valores entre os dados para às 18 h, enquanto às 12 h, os dados simulados aproximam-se das medições do INMET.

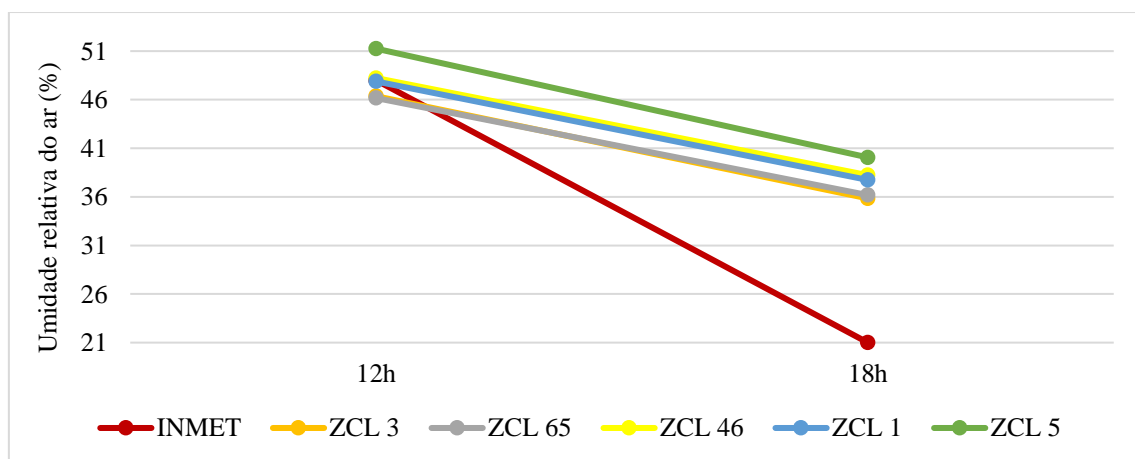


Gráfico 9 Comparação entre os dados simulados e o dado da série histórica referentes à umidade relativa do ar (INMET)

O parâmetro temperatura do ar mostra-se mais confiável para fins de validação de dados nesta pesquisa, apresentando margem de erro máxima de 3,79° C. Os valores são coerentes com os encontrados na validação feita por Werneck (2018) que faz a calibração por meio de medições *in loco*, além da comparação com os dados do INMET.

Os dados de umidade relativa do ar às 12 h são coerentes com os fornecidos pelo INMET, com ΔU máximo de 1,64%, porém às 18 h os dados tornam-se incoerentes. Isso pode ser justificado devido o software forçar o comportamento provável das condições climáticas durante o dia, considerando que a umidade relativa do ar diminui gradualmente até a noite, quando torna a aumentar. Porém no dia 29 de setembro de 2018, o INMET registrou queda brusca da umidade relativa do ar de 12 h às 18 h. Ainda assim, o software acompanha o padrão dos dados reais, mesmo que apresente dados com maior diferença de valores.

A Tabela 20 mostra trabalhos que fazem uma análise similar à realizada nesta pesquisa com o uso do *software* ENVI-met. Maciel (2014) verifica como o acréscimo de vegetação nas calçadas interfere na temperatura do ar no campus da Universidade Federal do Mato Grosso – UFMT; Silva (2009) acrescenta vegetação nas vias e canteiros centrais na cidade de Teresina – PI; Silva, Ferrari e Markiewicz (SILVA, FERRARI e MARKIEWICZ, 2016) analisam as diferenças de temperatura do ar entre áreas arborizadas e não arborizadas; e Shinzato e Duarte (2018) verificam o efeito do acréscimo da vegetação com diferentes características no contexto climático de São Paulo – SP.

Autores/área de estudo	Variação máxima (° C)		
	Manhã	Tarde	Noite
(MACIEL, 2014)	- 0,19	- 1,18	- 0,53
Cuiabá - MT			
(SILVA, 2009)	- 2,49	- 3,11	- 1,68
Teresina - PI			
(SILVA, FERRARI e MARKIEWICZ, 2016)	-0,1	-3,19	
Brasília - DF			
(SHINZATO e DUARTE, 2018)		- 1,5	
São Paulo - SP			

Tabela 20 Variação máxima de temperatura do ar de trabalhos com o uso do ENVI-met

Nos quatro estudos a vegetação ocasiona a diminuição da temperatura, sendo que no período da tarde observam-se os maiores valores de amenização térmica, o que condiz com a análise realizada nesta pesquisa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou como a simulação computacional microclimática pode mensurar a contribuição do aumento da vegetação intraurbana para a promoção do conforto térmico do pedestre em Zonas Climáticas Locais do Distrito Federal, tendo como área de análise

as três Regiões Administrativas com maior Taxa Média Geométrica de Crescimento Anual, representando o contexto metropolitano de Brasília.

O uso do *software* ENVI-met e a escolha do índice de conforto térmico PET (já disponível no programa – versão 4.4.4) mostrou-se eficaz para as análises realizadas nesta pesquisa permitindo a compreensão da contribuição do acréscimo de vegetação nas zonas.

Percebe-se que o acréscimo de vegetação intraurbana proporcionou a melhora do conforto térmico em quatro ZCLs (3, 6⁵, 4⁶ e 1) no período da tarde, trazendo o estresse térmico de “calor extremo” para “muito calor”. Pela manhã, três ZCLs (3, 4⁶ e 5) apresentam melhora quanto à sensação de desconforto, enquanto as outras duas mantiveram-se em “conforto” tanto no cenário original quanto com acréscimo de vegetação, porém apresentaram valores de PET maiores. No período da noite, quatro ZCLs (3, 4⁶, 1 e 5) apresentaram melhora quanto ao conforto, enquanto uma apresentou aumento de PET, porém de apenas 0,2° C, mantendo-se confortável.

A RA XII – Samambaia e RA XXI – Riacho Fundo II possuem, em grande parte, residências unifamiliares e pouca permeabilidade do solo, enquanto na RA XX – Águas Claras, há predominância de edifícios residenciais com mais de 13 pavimentos, que promovem o sombreamento por meio das projeções das torres residenciais. A ZCL 5, localizada na RA XII – Samambaia apresentou menor ganho quanto à redução do PET quando acrescida vegetação urbana nos espaços públicos, com 0,6° C durante a tarde. Já a ZCL 1, localizada na RA XX – Águas Claras, apresentou a maior amenização quanto ao conforto térmico, com 7° C para o mesmo período.

Nos estudos de caso desta dissertação, observa-se que as árvores dispostas em grupos, em comparação a disposição mais linear, proporcionam uma melhora menor quanto ao desconforto térmico do pedestre. A solução de implantação da vegetação em formato mais linear, sobretudo nas calçadas e nos canteiros centrais, proporciona ao usuário um ambiente mais agradável quanto ao conforto térmico. Este fato mostra-se mais relevante quanto à amenização do desconforto do que a quantidade total de árvores acrescida, sendo que a ZCL com maior quantidade de árvores não é a que apresentou melhor desempenho térmico. As maiores variações de PET ocorreram no entorno imediato da árvore (cerca de 4 metros).

Os cenários com a implantação de vegetação mostram-se uma opção coerente para a redução de temperaturas no meio urbano e, conseqüentemente, amenização das alterações climáticas, sendo uma possível estratégia para o cumprimento do Acordo de Paris (ONU, 2020) que propõe manter o aumento da temperatura média global em menos de 2° C.

O método utilizado consistiu na delimitação da área de estudo, na caracterização de Zonas Climáticas Locais e na simulação computacional microclimática urbana, configurando uma abordagem multimétodo⁵.

Realiza-se a análise de uso e ocupação do solo, que identifica a geometria urbana de cada região, e do cálculo dos parâmetros morfológicos para cada tipologia encontrada. Assim, caracterizam-se doze Zonas Climáticas Locais, sendo que cinco delas são definidas como objetos deste estudo por apresentarem tipologia urbana, pouca área permeável e vegetação escassa: 3, 6⁵, 4⁶, 1 e 5.

Utilizou-se o *software* ENVI-met 4.4.4 para modelagem e simulação do cenário original e com acréscimo de vegetação no dia mais quente do ano de 2018, que ocorre no período quente-seco do Distrito Federal. O *software* mostrou-se adequado em estudos de microclima, uma vez que simula as interações que ocorrem no meio urbano. Essa versão também permite a definição dos materiais da construção, bem como de cobertura, mesmo que de forma simplificada. Além disso, o método *Full Forcing* permite a inserção de um arquivo climático EPW já pronto, diminuindo as chances de falha no momento em que os dados climáticos seriam inseridos pelo usuário, como acontece no método *Simple Forcing*.

Quanto à confiabilidade dos dados, inseriu-se o tópico de validação dos dados como um método comparativo dos valores simulados e coletados pelo INMET. Neste sentido, observa-se que o *software* segue, com muita aproximação, o padrão de variação de temperatura do ar e umidade relativa dos conforme os dados da estação meteorológica.

⁵ Artigo submetido ao GISTAM título: Local Climate Zones (LCZ) using Multimethod Analysis: Case of Federal District of Brazil.

- **Diretrizes para implantação de vegetação no projeto urbano**

Por fim, são apresentadas algumas diretrizes gerais referentes à implantação de vegetação intraurbana, como uma forma de ilustrar as possíveis intervenções urbanas.

Em primeiro lugar, deve-se priorizar o acréscimo de espécies arbóreas com copas que proporcionem maior sombreamento nas calçadas, visto que a amenização do desconforto térmico foi percebida, principalmente, no entorno imediato da árvore, consequente da sombra gerada pela árvore que reduz a temperatura radiante das calçadas (Figura 44).



Figura 44 Sombreamento em calçadas

Para implantação de árvores agrupadas, é preferível a utilização de espécies com copas menos densas, ou uso de espécies intercaladas, ou com copas de tamanhos diferentes (alternando maiores e menores, ou mais baixas e mais altas) para que a ventilação não seja prejudicada. É necessário que, ainda assim, o sombreamento seja priorizado, principalmente onde há circulação de pedestres, como no perímetro de praças (Figura 45). Alerta-se que se deve manter um distanciamento razoável para que a proximidade das copas não crie uma barreira física que dificulte a dissipação do calor (Figura 46).

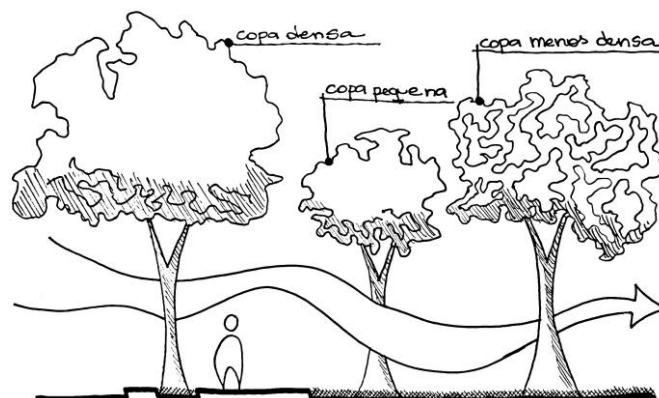


Figura 45 Copas pequenas e menos densas em áreas com árvores agrupadas

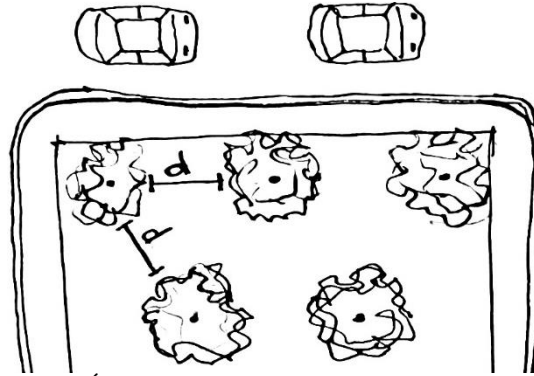


Figura 46 Árvores dispostas em grupo com espaçamento

Recomenda-se a substituição de áreas impermeáveis por áreas com inserção de materiais mais permeáveis passíveis de receber vegetação. Quando não for possível, recomenda-se a implantação de áreas com vegetação rasteira é indicada, pois estas apresentam menores temperaturas se comparadas com superfícies com pavimentações impermeáveis (Figura 47), ainda que a vegetação arbórea proporcione melhora mais perceptível. O acréscimo de espécies arbóreas mostra-se ainda mais eficaz nesse sentido e devem ser implantadas de forma linear ao longo das calçadas, tornando possível a passagem da ventilação, evitando que o calor fique retido, como pode ocorrer nos locais em que a vegetação se encontra agrupada (Figura 48).



Figura 47 Área com vegetação possui temperatura menor que áreas impermeáveis.

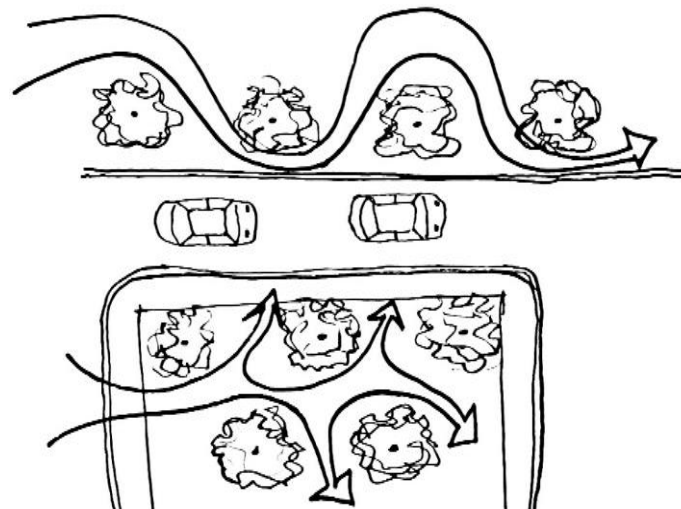


Figura 48 Árvores dispostas de forma linear

- **Limitações da pesquisa**

Algumas limitações desta pesquisa estão associadas à utilização da ferramenta computacional ENVI-met. Primeiramente, a versão gratuita (*basic*) não cumpre as funções necessárias para realização desta pesquisa, pois há limitação no tamanho da malha de modelagem ao máximo de 50 x 50 grids, sendo mais indicado para áreas com até 200 metros de extensão. Assim, tornou-se necessária a aquisição da versão paga (*student*).

Outra limitação se deve ao fato de que o programa leva um longo tempo para realizar as simulações, sendo que neste estudo, para cada uma hora simulada, o *software* levou em torno de cinco horas reais, com exceção da simulação da ZCL 1, levando cerca de dez horas reais para simular uma hora. No total, foram mais de 1.400 horas de simulação propriamente dita.

Os intervalos referentes ao PET variam de 4 a 6 °C entre as sensações de conforto, sendo uma limitação para o entendimento das amenizações térmicas, visto que a temperatura do ar pode reduzir em áreas com vegetação, mas continuar no mesmo intervalo de percepção térmica determinado pelo PET. Assim, mostra-se necessária a complementação da análise com a utilização de dados de temperatura do ar, temperatura radiante e velocidade dos ventos para a compreensão dos benefícios proporcionados pelo acréscimo de vegetação.

Para a validação dos dados, utiliza-se os dados horários das médias históricas de 12 h e 18 h fornecidos pelo INMET. Visto que a pesquisa faz a análise de 3 em 3 horas, conforme indicado pela OMM, utilizando os dados referentes às 09 h, 15 h e 21 h, houve a necessidade de extrair os dados para 12 h e 18 h possibilitando a comparação, já que o INMET não fornece os dados históricos para os horários analisados.

- **Perspectivas para trabalhos futuros**

Esta pesquisa contribui com o arcabouço teórico do conceito de ZCLs e caracteriza as zonas de três RAs do DF. Neste sentido, são apresentadas neste tópico algumas temáticas para estudos futuros.

Sugere-se a caracterização das ZCLs de todas as Regiões Administrativas do Distrito Federal, para que seja possível aplicar o método apresentado neste estudo nas demais localidades. Dessa forma, é possível planejar a implantação de vegetação intraurbana nas RAs de acordo com as necessidades de cada zona.

Recomenda-se a adaptação do índice PET para o contexto climático do Distrito Federal torna-se necessária para análises mais precisas quanto ao conforto térmico do pedestre.

Recomenda-se estudos que busquem compreender o fenômeno de Ilhas de Calor Urbanas buscando soluções que mitiguem este efeito.

Recomenda-se a ampliação da simulação para o período quente-úmido, para maior compreensão da contribuição da vegetação intraurbana durante todo o ano.

Sugere-se a aplicação da simulação para cenários com a implantação de telhados verdes, para compreensão dos benefícios desta solução bioclimática no contexto das ZCLs do DF.

Tendo em vista que o *software* ENVI-met permite a modelagem de espécies arbóreas a partir da inserção de dados como o tipo de folha, fixação de CO₂, albedo, transmitância, profundidade e diâmetro das raízes e altura da árvore. Sugere-se a modelagem e simulação de ZCLs com a implantação de espécies nativas do cerrado para compreensão da influência no conforto térmico no contexto climático do DF.

Recomenda-se a criação de cartilhas para detalhar diretrizes e políticas públicas para a arborização urbana, bem como recomendações de implantação da vegetação nos espaços públicos urbanos, utilizando o exemplo do Distrito Federal.

Por fim, ainda são necessários estudos que conciliem essas demandas e incentivem a implantação e a manutenção das áreas de vegetação de acordo com a necessidade real da cidade e de seus habitantes, além de um planejamento urbano que harmonize cidade e natureza, buscando sempre o conforto térmico, bem-estar e incorporando o ganho ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 15.575. Edificações habitacionais - desempenho**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2013.
- ABREU-HARBICH, L. V.; LABAKI, L. C. Conforto térmico propiciado por algumas espécies arbóreas: avaliação do raio de influência através de diferentes índices de conforto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 103-117, dezembro 2010.
- ABREU-HARBICH, L. V.; LABAKI, L. C.; MATZARAKIS, A. Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. **Landscape and Urban Planning**, v. 138, p. 99-109, junho 2015.
- ALCHAPAR, N. et al. The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: the cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, p. 35-50, 2017.
- ANJOS, R. S. A. D. **Dinâmica Territorial**: cartografia, monitoramento e modelagem. Brasília: Mapas Editora & Consultoria, 2008.
- AUER, A. H. Correlation of Land Use and Cover with Meteorological Anomalies. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 17, n. 5, p. 636-643, maio 1978.
- AYOADE, J. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. 10. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.
- BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating Surface Plant-Air Interactions Inside Urban Environments with a Three Dimensional Numerical Model. **Environmental Software and Modeling**, v. 13, n. 3, p. 373-384, outubro 1998.
- BUCKERIDGE, M. Árvores urbanas em São Paulo: planejamento, economia e água. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 29, n. 84, p. 85-101, agosto 2015.
- CARDOSO, M. R.; MARCUZZO, F. F.; BARROS, J. R. Classificação climática de köppen-geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v. 8, n. 16, p. 40-55, março 2014.
- CARDOSO, R. S. **Classificação De Potenciais Unidades Climáticas Em Presidente Prudente - SP. Dissertação (Mestrado em Geografia)**. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista. São Paulo, p. 137. 2015.
- CASTELO BRANCO, L. M. B. **Microclimas urbanos no Plano Piloto de Brasília: o caso da Superquadra 108 Sul. (Dissertação de mestrado)**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, p. 139. 2009.
- CHANDLER, T. J. **The Climate of London**. Hutchinson: [s.n.], 1965.
- CODEPLAN. Densidade Urbanas nas Regiões Administrativas do Distrito Federal. **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>. Acesso em: 21 maio 2018.

CRUZ, D.; FREITAS, I.; CANTUÁRIA, G. **O impacto das ilhas de calor na escala gregária de Brasília com ênfase na vegetação urbana**. Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília. Brasília, p. 23. 2018.

ELLEFSEN, R. Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities. **Energy and Buildings**, v. 16, p. 1025-1049, 1991.

EMMANUEL, R.; LOCONSOLE, A. Green infrastructure as an adaptation approach to tackling urban overheating in the Glasgow Clyde Valley Region, UK. **Landscape and Urban Planning**, v. 138, p. 71-86, 2015.

ENVI_MET. Trees & Vegetation. **ENVI-met**, 2020. Disponível em: <<https://www.envi-met.com/trees-and-vegetation/>>. Acesso em: 26 fevereiro 2020.

FENG, G. L.; GONG, Z. Q.; ZHI, R. Latest Advances of Climate Change Detecting Technologies (in Chinese). **Acta Meteorologica Sinica**, v. 4, p. 1-16, fevereiro 2010.

FERNANDES, M.; MASIERO, E. **Influência da morfologia urbana sobre a sensação de conforto térmico humano em um recorte urbano da cidade de São Carlos-SP**. Atas do 8º Congresso Luso-Brasileiro Para O Planeamento Urbano, Regional, Integrado E Sustentável. Coimbra: [s.n.]. 2018. p. 964-965.

FERREIRA, L. S.; DUARTE, D. H. **Exploring the potential of WUDAPT Local Climate Zone Maps to Detect Vegetation Loss**. PLEA 2018. Hong Kong: [s.n.]. 2018. p. 953-954.

FERREIRA, L. S.; DUARTE, D. H. Exploring the relationship between urban form, land surface temperature and vegetation indices in a subtropical megacity. **Urban Climate**, v. 27, p. 105-123, março 2019.

FERREIRA, P. C. **Alguns Dados sobre o Clima para a Edificação em Brasília. (Dissertação de Mestrado)**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, p. 103. 1965.

FRANCO, M. A. R. **Planejamento Ambiental para a cidade sustentável**. Annablume & Furb & FAPESP. São Paulo. 2000.

FREDERICO E, C. S. **Caminhos bioclimáticos : desempenho ambiental de vias públicas na cidade de Terezina - PI. Dissertação de mestrado**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, p. 140. 2009.

GEOPEdia - WUDAPT. **Geopedia**, 2019. Disponível em: <https://geopedia.world/#T4_x-4278027.599064743_y-2061353.7787946323_s6_b2345>. Acesso em: 12 março 2019.

GOLDMAN, W. **Social dimensions of urban heat island mitigation using community gardens. (Dissertação de mestrado)**. Department of Geography, University of Delaware. Delaware, p. 155. 2017.

GONÇALVES, A. et al. **Mapeamento climático urbano, aplicações à cidade de Bragança**. Atas da 10ª Conferência Nacional do Ambiente e XII Congresso Nacional do Ambiente. Aveiro: [s.n.]. 2013. p. 995-996.

HÖPPE, P. The Physiological Equivalent Temperature: a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **International Journal of Biometeorology**, Lisse, v. 43, p. 71-75, 1999.

IBGE. Mapa de Clima do Brasil. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2002. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15817-clima.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 06 agosto 2019.

IBGE. População residente por situação de domicílio. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2010. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1378#resultado>>. Acesso em: 11 março 2019.

INMET. Normais Climatológicas do Brasil. **Instituto Nacional de Meteorologia**, 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 18 junho 2019.

KLINK, C. M. R. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 148-155, julho 2005.

LABAKI, L. C. et al. Vegetação e Conforto Térmico Em Espaços Urbanos Abertos. **Fórum Patrimônio**, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, p. 23-42, 2011.

LINDÉN, J.; FONTI, P.; ESPER, J. Temporal variations in microclimate cooling induced by urban trees in Mainz, Germany. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 20, p. 198-209, 2016.

LLANDERT, L. R. A. **Zonas verdes y espacios libres en la ciudad**. Instituto de Estudios de Administración Local. Madrid, p. 538. 1982.

LOBODA, C. R.; ANGELIS, B. L. D. Áreas verdes públicas urbanas: conceitos, usos e funções. **Ambiência**, Guarapuava, v. 1, n. 1, p. 125-139, junho 2005.

LÓIS, E. et al. Efeitos de diferentes estruturas de vegetação ciliar sobre as variáveis de microclima e a sensação de conforto térmico. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 117-136, junho 2011.

LOIS, E.; LABAKI, L. C. Conforto Térmico em Espaços Externos: uma revisão. **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, São Pedro, 2001.

MACIEL, C. R. Condições Microclimáticas de Espaços Abertos: Simulação de Estratégias por Meio do Software ENVI-met. **Programa de Pós-graduação em Física Ambiental. Universidade Federal de Mato Grosso. Tese de Doutorado**, Cuiabá, 2014. 106.

MARTINS, R. D.; FERREIRA, L. C. Uma revisão crítica sobre cidades e mudança climática: vinho velho em garrafa nova ou um novo paradigma de ação para a governança local?. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 45, n. 3, p. 611-641, junho 2011.

MASIERO, E.; SOUZA, L. **Ocupação do solo e microclimas em São José do Rio Preto, SP.** XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. Campinas: [s.n.]. 2015. p. 9.

MILOŠEVIĆ, D.; BAJŠANSKI, I.; SAVIĆ, S. Influence of changing trees locations on thermal comfort on street parking lot and footways. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 27, p. 113-124, ABRIL 2017.

MONTEIRO, V. S. **Zonas Climáticas Locais e a relação com a morfologia urbana. Estudo de caso: Campinas - SP. (Dissertação de mestrado).** Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana - Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas, p. 164. 2018.

MORAKINYO, T. E.; LAM, Y. F. Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort. **Building and Environment**, v. 103, p. 262-275, julho 2016.

MORO, D. Á. A. As Áreas Verdes e Seu Papel na Ecologia Urbana e no Clima Urbano. **Separata da Revista UNIMAR**, Maringá, v. 1, p. 15-20, 1976.

MUNEROLI, C. C. **Arborização urbana : espécies arbóreas nativas e a captura do carbono atmosférico. Dissertação de mestrado.** Universidade de Passo Fundo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Passo Fundo, p. 137. 2009.

OMM. **Calculation of monthly and annual 30-year standard normals.** ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. Geneva. 1989.

ONU. Acordo de Paris Sobre o Clima. **Portal das Nações Unidas Brasil**, 2020. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acordodeparis/>>. Acesso em: 02 março 2020.

PORTAL DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. A ONU e a população mundial. **Nações Unidas no Brasil**, 2019. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/populacao-mundial/>>. Acesso em: 11 março 2019.

PROJETEEE. Dados Climáticos: Gráfico Rosa dos Ventos. **Projeteee**, 2020. Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br/dados-climaticos/?cidade=DF+-+Bras%C3%ADlia&id_cidade=bra_df_brasilia-kubitschek.intl.ap.833780_try.1962>. Acesso em: 08 abril 2020.

REGO, T. L. **Chuvas e inundações em Goiânia: dinâmica atmosférica e áreas de risco. (Dissertação de mestrado).** Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p. 101. 2015.

RIBEIRO, J.; BORGIO, M.; MARANHÃO, L. Áreas protegidas de Curitiba (pr, brasil) como sumidouros de CO2. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 2, p. 181-190, junho 2013.

RICHARD, Y. et al. How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. **Urban Climate**, v. 26, p. 258-274, dezembro 2018.

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

- ROMERO, M. A. B. **Arquitetura do Lugar: uma visão bioclimática da sustentabilidade em Brasília**. São Paulo: Nova Técnica, 2011.
- ROMERO, M. A. B. Correlação entre o microclima urbano e a configuração do espaço residencial de Brasília. **Fórum Patrimônio**, v. 4, n. 1, p. 9-22, 2011.
- ROMERO, M. A. B. et al. **Mudanças Climáticas e Ilhas de Calor Urbanas**. Brasília: ETB, v. 1, 2019.
- SANTOS, P. T. et al. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre, 2013.
- SATHLER, D. Repercussões Locais Das Mudanças Climáticas Globais: Urbanização, Governança E Participação Comunitária. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 15, n. 51, p. 01-19, setembro 2014.
- SCHERER, D.; FEHRENBACH, H.-D.; BEHA, E. P. Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban climate processes. **Atmospheric Environment**, v. 33, p. 4185–4193, outubro 1999.
- SCICLUNA, J. **The urban heat island effect in Malta and the adequacy of green roofs in its mitigation. (Dissertação de mestrado)**. Universidade de Malta. Malta, p. 467. 2016.
- SEEG. Emissões totais. **SEEG Brasil**, 2018. Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission#>. Acesso em: 11 março 2019.
- SHINZATO, P.; DUARTE, D. H. S. Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 197-215, junho 2018.
- SILVA, B. G.; ADÁRIO, J.; SILVA, C. F. E. **Aplicação do Arquivo Climático na Análise do Microclima Urbano da Cidade de Juiz de Fora – Minas Gerais**. 2º Seminário de Pesquisa em Ambiente Construído. Juiz de Fora: [s.n.]. 2019. p. 5.
- SILVA, C. F. **Caminhos Bioclimáticos: Desempenho Ambiental de Vias. (Dissertação de mestrado)**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, p. 155. 2009.
- SILVA, C. F. E. **O CONFORTO TÉRMICO DE CAVIDADES URBANAS: CONTEXTO CLIMÁTICO DO DISTRITO FEDERAL**. Universidade de Brasília. Brasília. 2013.
- SILVA, C. F. E.; FERRARI, I.; MARKIEWICZ, J. The Urban Sectorization of Lúcio Costa's Modernism and the Emergency of Heat Islands in the Capital of Brazil. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 64-71, 2016.
- SILVA, G. J. A. D.; ROMERO, M. A. B. Cidades sustentáveis: uma nova condição urbana a partir de estudos aplicados a Cuiabá, capital do estado de Mato Grosso, Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 253-266, setembro 2013.

SILVA, M. **Sistemas de Informações Geográficas: elementos para o desenvolvimento de bibliotecas digitais geográficas distribuídas. Mestrado em Ciência da Informação.** Universidade Estadual Paulista. Marília. 2006.

SOEIRA, M. R. C. **A relação entre o fator de visão do céu e a temperatura do ar em diferentes zonas climáticas locais. (Dissertação de mestrado).** Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana - Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas, p. 116. 2019.

SOUZA, V. S.; KATZSCHNER, L. **Mapa climático urbano da cidade de João Pessoa - PB.** Atas do 8º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável. Coimbra: [s.n.]. 2018. p. 1622-1627.

STANDARDIZATION, I. -I. O. F. **ISO 7730/2005 - Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.** [S.l.], p. 52. 2005.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones For Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Vancouver, p. 1879-1900, dezembro 2012.

SZEREMETA, B.; ZANNIN, P. H. T. A importância dos parques urbanos e áreas verdes na promoção da qualidade de vida em cidades. **Ra'e Ga - O espaço geográfico em análise**, Curitiba, v. 29, p. 177-193, dezembro 2013.

VAN HOVE, L. W. A. et al. Temporal And Spatial Variability Of Urban Heat Island And Thermal Comfort Within The Rotterdam Agglomeration. **Building and Environment**, v. 83, p. 91-103, janeiro 2015.

WERNECK, D. R. **Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas: estudo de caso em áreas comerciais em Brasília-DF.** Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, p. 118. 2018.

WILMERS, F. Effects of vegetation on urban climate and buildings. **Energy and Buildings**, v. 15, p. 507-514, 1991.

YANG, F.; LAU, S.; QIAN, F. Cooling performance of residential greenery in localised urban climates: a case study in Shanghai China. **International Journal of Environmental Technology and Management**, v. 18, n. 6, p. 478-503, 2015.

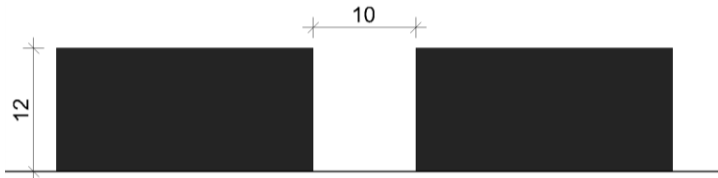
ZHAOA, C. et al. Application of airborne remote sensing data on mapping local climate zones: Cases of three metropolitan areas of Texas, U.S. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 74, p. 175-193, novembro 2018.

ZORZI, L. M.; GRIGOLETTI, G. C. Contribuições da arborização para o conforto ambiental e a eficiência energética urbana. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 5, n. 2, p. 75-84, dezembro 2016.

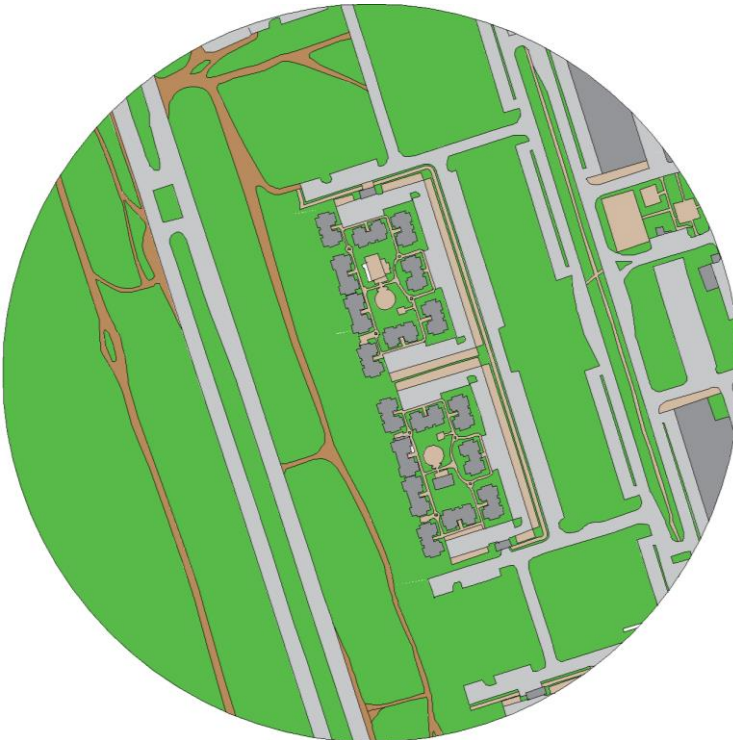
APÊNDICE I – Cálculo dos parâmetros morfológicos

Tipologia 1:

a. Relação H/W: $\frac{12}{10} = 1,2$



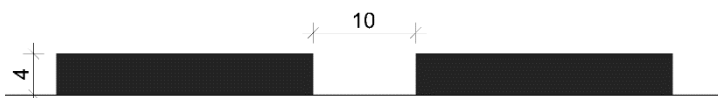
b. Porcentagem edificada, impermeável e permeável:



	Área permeável	88.775,62 m ²	70,65%
	Área impermeável	30.314,80 m ²	24,12%
	Área edificada	6.573,28 m ²	5,23%
	Área total	125.663,70 m²	100%

Tipologia 2:

a. Relação H/W: $\frac{4}{10} = 0,4$



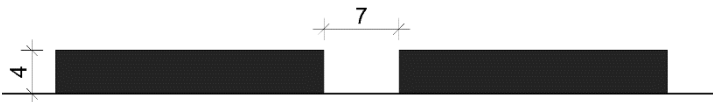
b. Porcentagem edificada, impermeável e permeável:



	Área permeável	11.804,72 m ²	9,39%
	Área impermeável	33.503,69 m ²	26,66%
	Área edificada	80.355,29 m ²	63,95%
	Área total	125.663,70 m²	100%

Tipologia 3:

a. Relação H/W: $\frac{4}{7} = 0,57$



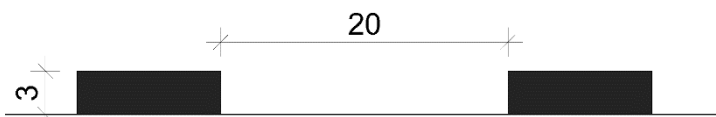
b. Porcentagem edificada, impermeável e permeável:



Área permeável	105.905,99 m ²	84,28%
Área impermeável	3.393,98 m ²	2,70%
Área edificada	16.363,73 m ²	13,02%
Área total	125.663,70 m²	100%




Tipologia 7:

a. Relação H/W: $\frac{3}{20} = 0,15$



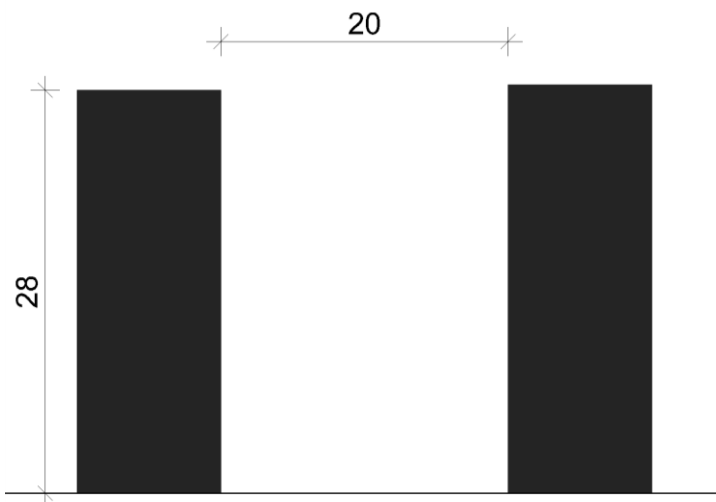
b. Porcentagem edificada, impermeável e permeável:



	Área permeável	25.722,38 m ²	20,48%
	Área impermeável	44.974,18 m ²	35,78%
	Área edificada	54.967,14 m ²	43,74%
	Área total	125.663,70 m²	100%




Tipologia 8:

a. Relação H/W: $\frac{28}{20} = 1,4$



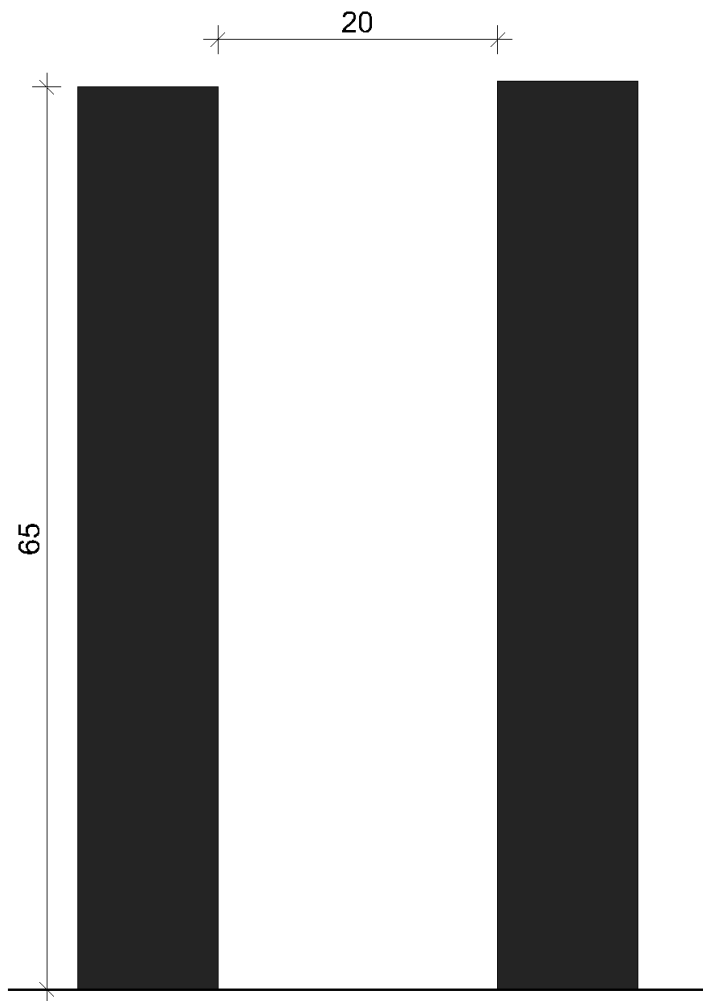
b. Porcentagem edificada, impermeável e permeável:



	Área permeável	38.986,48 m ²	31,04%
	Área impermeável	12.854,45 m ²	10,22%
	Área edificada	73.822,77 m ²	58,74%
	Área total	125.663,70 m²	100%




Tipologia 9:

- a. Relação H/W: $\frac{65}{20} = 3,25$



b. Porcentagem edificada, impermeável e permeável:



	Área permeável	17.081,21 m ²	13,59%
	Área impermeável	79.364,11 m ²	63,16%
	Área edificada	29.218,38 m ²	23,25%
	Área total	125.663,70 m²	100%




Tipologia 10:

a. Relação H/W: $\frac{13}{10} = 1,3$



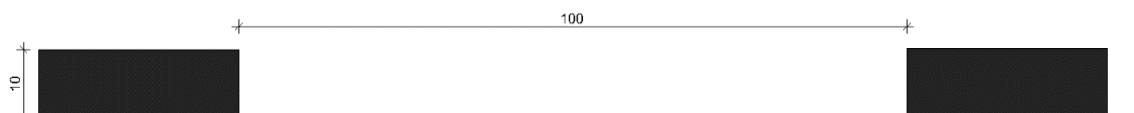
b. Porcentagem edificada, impermeável e permeável:



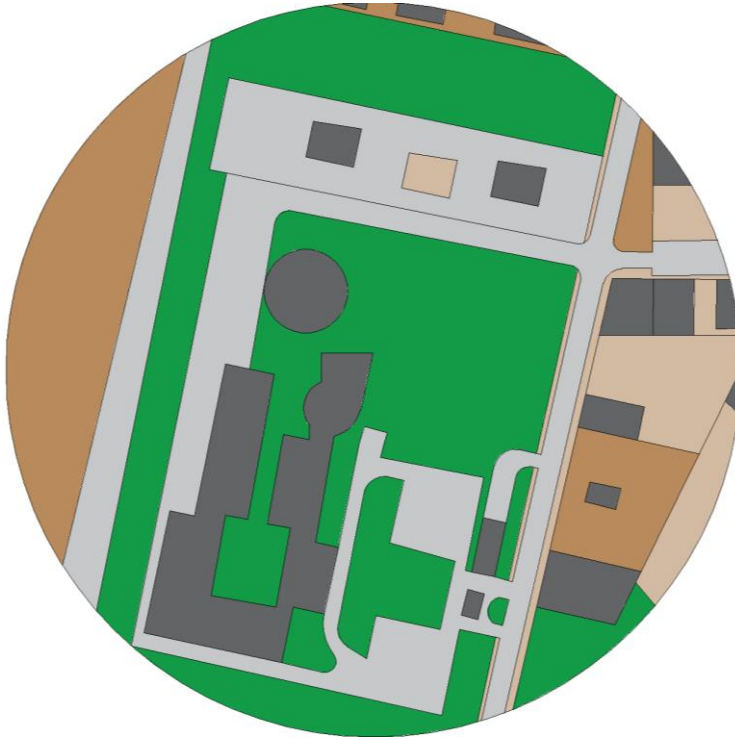
	Área permeável	40.373,20 m ²	32,14%
	Área impermeável	60.216,18 m ²	47,91%
	Área edificada	25.074,32 m ²	19,95%
	Área total	125.663,70 m²	100%

Tipologia 11:

a. Relação H/W: $\frac{10}{100} = 0,1$



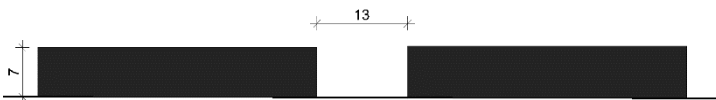
b. Porcentagem edificada, impermeável e permeável:



	Área permeável	67.504,57 m ²	53,73%
	Área impermeável	40.341,52 m ²	32,10%
	Área edificada	17.817,61 m ²	14,17%
	Área total	125.663,70 m²	100%




Tipologia 12:

a. Relação H/W: $\frac{7}{13} = 0,53$

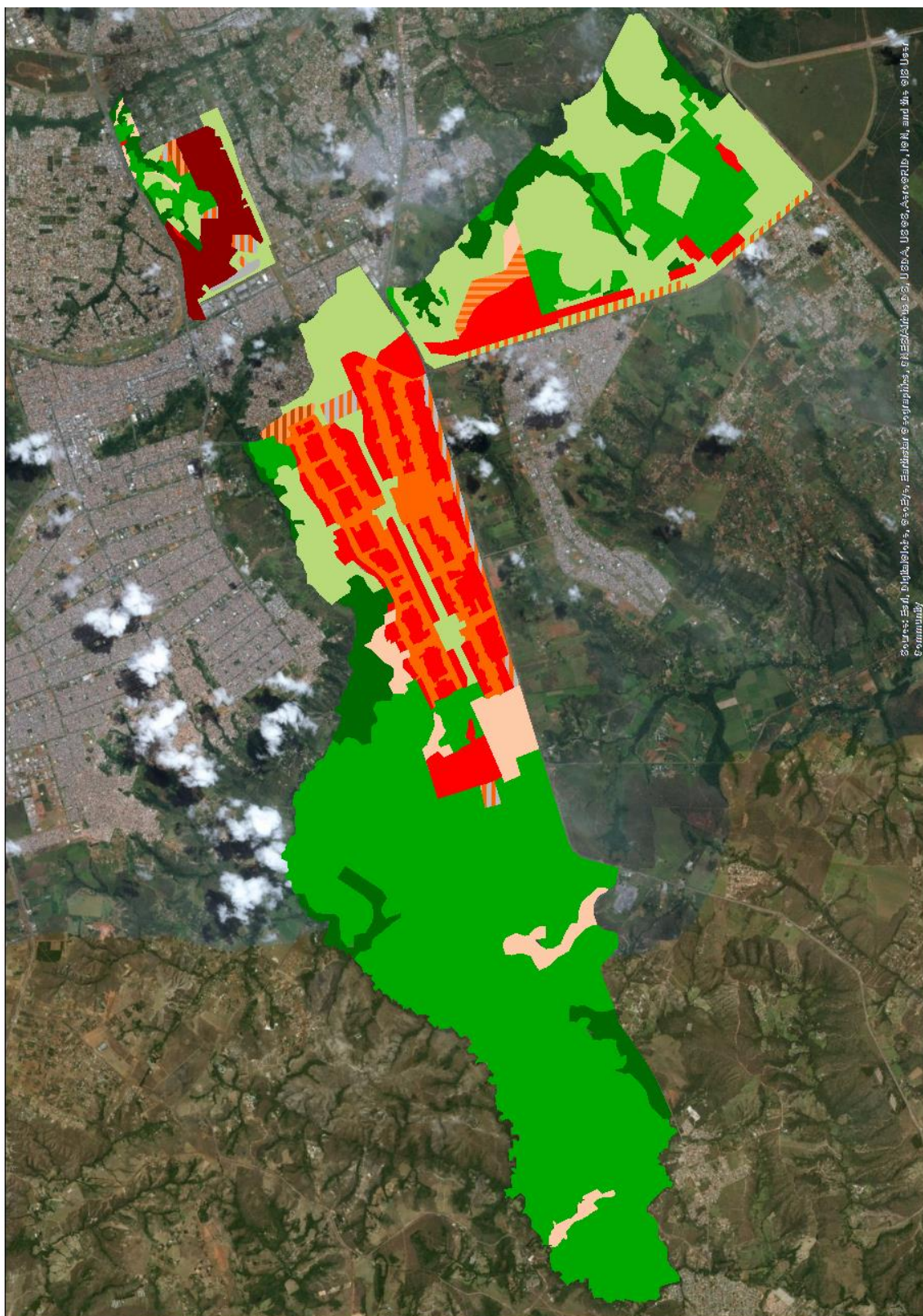


b. Porcentagem edificada, impermeável e permeável:



	Área permeável	34.899,95 m ²	27,78%
	Área impermeável	43.686,89 m ²	34,76%
	Área edificada	47.073,86 m ²	37,46%
	Área total	125.663,70 m²	100%

APÊNDICE II – Mapa de Zonas Climáticas Locais



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community



Legenda:

ZCL D ⁵	ZCL 3	ZCL 9	ZCL A	ZCL B	ZCL D	ZCL 6 ⁵
ZCL 4 ⁶	ZCL 1	ZCL 8	ZCL 5 ⁸	ZCL 5		

