

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**O IMPACTO DA ARBORIZAÇÃO VIÁRIA NO
CONFORTO TÉRMICO EM DIFERENTES CENÁRIOS
DE COBERTURA ARBÓREA**

SIMONE BERIGO BÜTTNER DE OLIVEIRA

Profa. Dra. MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE
NOGUEIRA
Orientadora

Cuiabá, MT

Outubro 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**O IMPACTO DA ARBORIZAÇÃO VIÁRIA NO
CONFORTO TÉRMICO EM DIFERENTES CENÁRIOS
DE COBERTURA ARBÓREA**

SIMONE BERIGO BÜTTNER DE OLIVEIRA

*Tese apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Física
Ambiental da Universidade
Federal de Mato Grosso, como
parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutora
em Física Ambiental.*

**Profa. Dra. MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE
NOGUEIRA**
Orientadora

Cuiabá, MT

Outubro 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

D278r Oliveira, Simone Berigo Büttner de.

O impacto da arborização viária no conforto térmico em diferentes cenários de cobertura arbórea [recurso eletrônico] / simone de oliveira. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 168 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira Nogueira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2023.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Arborização viária; 2. Conforto térmico em espaços abertos; 3. Índice de cobertura arbórea; 4. Envi-met; 5. Morfologia urbana.. I. Nogueira, Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: O IMPACTO DA ARBORIZAÇÃO VIÁRIA NO CONFORTO TÉRMICO EM DIFERENTES CENÁRIOS DE COBERTURA ARBÓREA

AUTORA: DOUTORANDA SIMONE BERIGO BUTTNER DE OLIVEIRA

Tese defendida e aprovada em **06** de **OUTUBRO** de **2023**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Profa. Dra. MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE NOGUEIRA (Presidente Banca / **ORIENTADORA**)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso

2. Profa. Dra. FLÁVIA MARIA DE MOURA SANTOS (Examinadora Interna)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso

3. Prof. Dr. JOÃO BASSO MARQUES (Examinador Interno)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso

4. Prof. Dr. IVAN JULIO APOLÔNIO CALLEJAS (Examinador Externo)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso

5. Profa. Dra. DENISE HELENA SILVA DUARTE (Examinadora Externa)

INSTITUIÇÃO: Universidade de São Paulo

6. Prof. Dr. SERGIO ROBERTO DE PAULO (Examinador Interno)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso

CUIABÁ, 06/10/2023.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES, Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 09/10/2023, às 11:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOÃO BASSO MARQUES, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 09/10/2023, às 11:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIA MARIA DE MOURA SANTOS, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 09/10/2023, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **IVAN JULIO APOLONIO CALLEJAS, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 09/10/2023, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE NOGUEIRA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 09/10/2023, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **SERGIO ROBERTO DE PAULO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 09/10/2023, às 17:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Denise Helena Silva Duarte, Usuário Externo**, em 09/10/2023, às 22:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6213594** e o código CRC **DD04094A**.

DEDICATÓRIA

*Ao meu pai, Peter Büttner, minha maior inspiração em trilhar o universo do conhecimento acadêmico, que continua a me apoiar de onde estiver;
e à minha mãe, Luciene Büttner, por seu amor incondicional.*

AGRADECIMENTOS

- A Deus por me dar o privilégio da vida, por seu amor incondicional e sabedoria;
- Aos meus pais Peter (*in memoriam*) e Luciene, pela educação e incentivo em todas as etapas da minha trajetória acadêmica;
- Às minhas irmãs, Daniela e Marianne, por serem minhas melhores amigas;
- Ao meu marido Paulo Vitor, pelo apoio em tudo que me proponho a fazer, paciência e dedicação com a nossa família;
- Aos meus filhos, João Vitor e Ana Beatriz, meus bens mais preciosos, que me motivam a querer crescer e deixar um mundo melhor;
- À Prof.^a Dr.^a Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira, pela orientação, conselhos e ensinamentos;
- À Prof.^a Dr.^a Flavia Maria de Moura Santos, pelo apoio e prontidão em ajudar em todas as horas;
- À Prof.^a Dr.^a Denise Helena Silva Duarte, pelos ensinamentos desde a época do mestrado e pelas contribuições riquíssimas nesta pesquisa;
- Aos meus colegas do LATECA, Prof. Dr. Ivan Julio Apolonio Callejas, Luciane Cleonice Durante e Karyna de Andrade Carvalho Rosseti, pelo incentivo à pesquisa científica nesta área do conhecimento e pelo apoio sempre que precisei;
- Aos meus colegas do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFMT, pelo apoio e pela amizade;
- Aos Prof. Dr. José de Souza Nogueira (*in memoriam*), Dr. Marcelo Sacardi Biudes e Dr. Sérgio de Paulo, pela dedicação e empenho no programa de pós-graduação;
- A todos os Professores do programa de pós-graduação em Física Ambiental, por todo conhecimento compartilhado;
- Ao Wennder Martins, meu agradecimento especial pela paciência e dedicação com o uso do Envi-met e toda ajuda durante o doutorado;
- Aos colegas Ian Maxime Cordeiro Barros da Silva e Luiz Octávio Fabricio dos Santos, pela ajuda na análise estatística e disposição em ajudar;
- À Leide, por cuidar com dedicação e carinho do meu lar e da minha família enquanto me dedico ao trabalho e à pesquisa científica;

EPÍGRAFE

O conhecimento científico sem a solidez da teoria é como uma árvore de raízes superficiais que sucumbe às tempestades que enfrenta. Sem aplicação prática, porém, ele é como uma árvore seca que renega sua sombra em dias de sol escaldante. (Vinícius Montgomery de Miranda)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. PROBLEMÁTICA	1
1.2. JUSTIFICATIVA	3
1.3. OBJETIVO	6
1.3.1. OBJETIVO GERAL	6
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. URBANIZAÇÃO E CLIMA.....	7
2.2. ELEMENTOS DA SUPERFÍCIE URBANA E A INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO CLIMÁTICO	8
2.3. ESCALAS DO CLIMA URBANO.....	11
2.4. ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS (LCZ).....	12
2.4.1. Características microclimáticas das tipologias morfológicas (LCZs) de Cuiabá – MT.	18
2.5. A VEGETAÇÃO ARBÓREA E O MICROCLIMA URBANO	19
2.6. PESQUISAS ATUAIS SOBRE O IMPACTO DA ARBORIZAÇÃO NO MICROCLIMA	22
3. ÁREA DE ESTUDO	40
3.1. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS: CLIMA E RELEVO	40
3.2. O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO EM CUIABÁ	43
3.3. ÁREAS VERDES NO ESPAÇO URBANO DE CUIABÁ – MT	48
3.4. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO ESPAÇO URBANO	51
4. MATERIAL E MÉTODOS	55
4.1. DEFINIÇÃO DO LOCAL PARA A REALIZAÇÃO DA PESQUISA	57
4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO DE ACORDO COM AS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS (LCZS)	61
4.3. MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS	72

4.4.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	75
4.4.1.	Simulação para calibração.....	75
4.4.2.	Simulação dos cenários hipotéticos	85
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	110
5.1.	CALIBRAÇÃO DOS MODELOS TRIDIMENSIONAIS	110
5.2.	SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS	114
5.2.1.	Análise do impacto da arborização viária, comparando cenários com diferentes índices de cobertura arbórea. (T_{ar} ; UR; T_{rm} ; média T_{rm} ; ΔT_{rm} ; PET)	115
5.2.2.	Análise do índice de densidade arbórea.	135
5.2.3.	Análise do impacto da altura da árvore no efeito de resfriamento da arborização viária.....	138
5.2.4.	Análise do impacto do tipo de cobertura do solo no efeito de resfriamento da arborização viária.....	139
5.	CONCLUSÃO.....	143
6.	RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	147
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148
7.1.	REFERÊNCIAS CITADAS.....	148
7.2.	REFERÊNCIAS CONSULTADAS.....	160
7.3.	MÍDIA CONSULTADA.....	164
	APÊNDICE A – TABLA DE DADOS DOS RESULTADOS	165

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Representação da variação de temperatura do ar em área urbana).....	11
FIGURA 2 - Escalas Climáticas Urbanas.....	12
FIGURA 3 - Média da Temperatura do ar nas classes potenciais LCZs no Verão de 2012, 2016 e 2020 (esquerda) e Média da temperatura do ar para o verão de 2021 nas prováveis LCZs.	19
FIGURA 4 - Radiação solar direta, incidente sobre o meio construído	20
FIGURA 5 - Radiação solar incidente sobre o meio urbano transformada e calor	21
FIGURA 6 - Croqui esquemático das formas de agrupamento arbóreo	30
FIGURA 7 - Esquema de cálculo do Indicador IDVAT.....	31
FIGURA 8 - Mapa do Brasil (a), de Mato Grosso (b) e de Cuiabá (c), com destaque para a avenida selecionada para a área de estudo (d).....	41
FIGURA 9 - Altimetria e Declividade do terreno no perímetro urbano de Cuiabá.).....	43
FIGURA 10 - O núcleo de origem da Villa do Bom Jesus de Cuyabá, com vista do córrego da Prainha, Igreja Matriz, e Igreja do Rosário (de São Benedito). “Imagem sem título” [Vista de Cuiabá]. Original de propriedade da Casa da Ínsua, Portugal. [1771-1780], p. 393.	44
FIGURA 11 - “Beco do Candeeiro”. Ilustração de Moacyr de Feitas (1987), retratando a Cuiabá do sec. XVIII.	44
FIGURA 12 - O córrego da prainha canalizado no século XVIII.....	45
FIGURA 13 - Mapa de evolução da Ocupação Urbana	46
FIGURA 14 - Evolução da mancha urbana de Cuiabá ao longo do tempo	46
FIGURA 15 - Vista panorâmica da Cuiabá, imagem captada do Morro da Luz, em 04 momentos: A) 1790; B) início do século XX; C) 1995; D) 2010; a) Igreja matriz, Catedral Basílica do Senhor Bom Jesus de Cuiabá; b) Paróquia Nossa Senhora do Rosário e São Benedito	47
FIGURA 16 - Vista da Avenida Hist. Rubens de Mendonça em 2008, antes das obras de mobilidade realizadas em 2014 (canteiro central arborizado).....	Erro!
Indicador não definido.	
FIGURA 17 - Vista da Avenida Hist. Rubens de Mendonça em 2019, depois das obras de mobilidade realizadas em 2014 (canteiro central arborizado sem vegetação).....	Erro!
Indicador não definido.	
FIGURA 18 - Vista da Avenida Hist. Rubens de Mendonça em 2014, durante as obras de mobilidade.	50
FIGURA 19 - Vista da Avenida Hist. Rubens de Mendonça em 2015, logo após interrupção das obras.	50
FIGURA 20 - Imagem da proposta de implementação de parque linear na Avenida Hist. Rubens de Mendonça.....	50
FIGURA 21 - Imagem da proposta de implementação de parque linear na Avenida Hist. Rubens de Mendonça.....	50
FIGURA 22 - A área urbana de Cuiabá vista por imagem de satélite (Ls-8 30/07/2018 ~10h).....	52
FIGURA 23 - Identificação e destaque das principais vias de Cuiabá.	52
FIGURA 24 - Mapa de Cuiabá: Hierarquização Viária.....	53

FIGURA 25 - Mapa de Cuiabá: Zoneamento.	53
FIGURA 26 - Diferentes pontos de vista ao longo da avenida estudada, com diferentes morfologias urbanas (imagens de 2021).	59
FIGURA 27 - Da esquerda para a direita: Demarcação da área de estudo na área urbana de Cuiabá; marcação dos 27 pontos classificados em LCZ e seleção dos pontos para medição.	63
FIGURA 28 - Recortes da malha urbana, dos pontos pré-selecionados para caracterização de acordo com as LCZs.	65
FIGURA 29 - LCZs no interior do perímetro urbano de Cuiabá, 2019 (esquerda) e 2022 (direita), com distribuição percentual das LCZs no território urbano.	68
FIGURA 30 - (a) Mapa geral de Cuiabá com o recorte da área de estudo. (b) Mapa de localização dos pontos selecionados (Google Earth), com destaque dos recortes urbanos e modelagem tridimensional no Envi-met.	70
FIGURA 31 - Ponto 2: (a) Tipologia LCZ; (b) Mapa Hierarquização de Cuiabá; (c) Imagem da área de estudo delimitada; (d) Vista Aérea 3D do ponto analisado e entorno; (e) Eixo visual do ponto analisado e entorno; (f) Mapeamento da cobertura.	71
FIGURA 32 - Ponto 4: (a) Tipologia LCZ; (b) Mapa Hierarquização de Cuiabá; (c) Imagem da área de estudo delimitada; (d) Vista Aérea 3D do ponto analisado e entorno; (e) Eixo visual do ponto analisado e entorno; (f) Mapeamento da cobertura.	72
FIGURA 33 - Ilustração da montagem e fixação dos componentes da estação. Da esquerda para a direita, tem-se respectivamente: Estação montada e fixada no teto do veículo com ventosas e fitas de amarração; sensor de temperatura e umidade dentro do abrigo e Datalogger (Registrador de dados), abrigado em caixa e fixado sobre o veículo	74
FIGURA 34 - Trajeto percorrido com o transecto móvel, com marcação dos 08 (oito) pontos de medição e destaque para o P2 e P4, que foram selecionados para ser a área de estudo (Na seleção final foram renomeados de P1 e P2, respectivamente)	75
FIGURA 35 - Processo de modelagem do P1 (superior) e P2 (inferior). Imagem do Google Earth (esquerda); Modelo 2D (centro) e Modelo 3D (direita).	78
FIGURA 36 - Tela do ENVI-guide: módulo do ENVI-Met para inserção de dados climáticos e temporais, na opção de “Simple Forcing”.....	82
FIGURA 37 - (a) - Espécie Khaya em junho /2022; (b) mesma espécie em fevereiro/2023; (c) Outro espécime da Khaya em junho/2022; (d) mesmo espécime de (c) em fevereiro/2023	85
FIGURA 38 - Áreas levantadas para serem consideradas no cálculo de um índice para arborização viária, no P1 (superior) e no P2 (inferior).	87
FIGURA 39 - P1: Cenário 1 (sem vegetação).....	92
FIGURA 40 - P1: Cenário C2	93
FIGURA 41 - P1: Cenário C3	94
FIGURA 42 - P1: Cenário C4.....	95
FIGURA 43 - P2: Cenário 1 (sem vegetação).....	95
FIGURA 44 - P2: Cenário C2	96
FIGURA 45 - P2: Cenário C3	97
FIGURA 46 - P2: Cenário C4	98
FIGURA 47 - Variação dos cenários, em imagens 2D e 3D, para os pontos P1 e P2	99
FIGURA 48 - Área de modelagem do Albero / ENVI-met, ilustrando o espécime de 7m de altura e 5 m de diâmetro.....	101

FIGURA 49 - (a) Exemplo de geometrias de copas, arredondada e alongadas, (b) fatores de distribuição da DAF, em 10 camadas, obtido para copas arredondadas e (c) fatores de distribuição da DAF para copas alongadas.....	103
FIGURA 50 - Modelo geométrico para simulação paramétrica da análise do impacto do porte das árvores	107
FIGURA 51 - No P1: (a) Posição dos pontos de avaliação estabelecidos, em vista superior; (b) em corte transversal, e (c) em corte longitudinal.....	108
FIGURA 52 - No P2: (a) Posição dos pontos de avaliação estabelecidos, em vista superior; (b) em corte transversal, e (c) em corte longitudinal.....	109
FIGURA 53 - Gráfico com dados de Medição, simulação e da estação de referência.....	111
FIGURA 54 - Gráficos de Regressão Linear para dados de Temperatura do ar e Umidade relativa do ar, nos períodos avaliados.....	112
FIGURA 55 - Dados de Temperatura do ar do Ponto A, nos cenários (C1, C2, C3, C4), no P1 (superior) e no P2 (inferior)	115
FIGURA 56 - Mapas cromáticos de ΔT , às 14h, entre os cenários (C2) (esq.), (C3) (centro) e (C4) (dir.), em relação ao cenário de referência (C1), no P1 e no inverno.	117
FIGURA 57 - Mapas térmicos de ΔT , às 14h, entre os cenários (C2) (esq.), (C3) (centro) e (C4) (dir.), em relação ao cenário de referência (C1), no P2 e no inverno.	117
FIGURA 58 - Mapas térmicos de ΔT , às 14h, entre os cenários (C2) (esq.), (C3) (centro) e (C4) (dir.), em relação ao cenário de referência (C1), n P1 e no verão.	118
FIGURA 59 - Mapas térmicos de ΔT , às 14h, entre os cenários com (C2) (esq.), (C3) (centro) e (C4) (dir.), em relação ao cenário de referência (C1), no P2 e no verão.....	118
FIGURA 60 - Umidade relativa do ar (%), do Ponto A, nos cenários (C1, C2, C3, C4), no P1 (superior) e no P2 (inferior).....	120
FIGURA 61 - Temperatura radiante média (oC), do Ponto A, nos cenários (C1, C2, C3, C4), no P1 (superior) e no P2 (inferior).	121
FIGURA 62 - ΔT_{rm} às 14h (máxima T_{rm}) entre o Ponto A de cada cenário arborizado (C2; C3 e C4) e o cenário não arborizado (C1).....	123
FIGURA 63 - Comparação da T_{rm} entre cenário não vegetado e cenário vegetado, no P1 e no P2.	123
FIGURA 64 - Média das T_{rm} de cada cenário, no inverno.....	124
FIGURA 65 - Média das T_{rm} de cada cenário, no verão.....	124
FIGURA 66 - Mapas de PET dos cenários (C1, C2, C3 e C4), no P1 e no inverno.	129
FIGURA 67 - Mapas de PET dos cenários (C1, C2, C3 e C4), no P2 e no inverno.	130
FIGURA 68 - Mapas de PET dos cenários (C1, C2, C3 e C4), no P1 e no verão.	132
FIGURA 69 - Mapas de PET dos cenários (C1, C2, C3 e C4), no P2 e no verão.	133
FIGURA 70 - Dados de T_{rm} , de um ponto na sombra (esq.) e exposto à radiação solar (dir.), com as árvores de pequeno, médio e grande porte.	138
FIGURA 71 - No P1: (a) Posição dos pontos de avaliação estabelecidos, em vista superior; (b) em corte transversal, e (c) em corte longitudinal.....	140
FIGURA 72 - Dados de T_{rm} , dos Pontos A, B, C, D, E, do cenário arborizado (C4), comparados com o ponto B em cenário não arborizado, no P1.	140
FIGURA 73 - ΔT_{rm} , entre os Pontos A e B, e entre D e E, do cenário arborizado (C4), no P1.....	142
FIGURA 74 - ΔT_{rm} , entre os Pontos A, B, C, D, E, do cenário arborizado (C4), comparados com os mesmos pontos, do cenário não arborizado, no P1.	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipologias edificadas das Zonas Climáticas Locais (STEWART e OKE, 2012)	13
Tabela 2 - Cobertura do solo das Zonas Climáticas Locas de Stewart & Oke (2012), adaptado e traduzido por Paula (2021).....	14
Tabela 3 - Valores dos atributos urbanos estabelecidos para cada LCZ.....	15
Tabela 4 - Propriedades de cobertura do solo que mudam com padrões climáticos sinópticos, práticas agrícolas, e/ou ciclos sazonais.....	15
Tabela 5 - Tipos de concentrações arbóreas consideradas para o IDVAT e pessoas atribuídos para o cálculo do índice.....	32
Tabela 6 - Categorias de stress térmico do UTCI e do PET original e calibrado para o clima local	37
Tabela 7 - Classificação dos pontos analisados, comparando-os com classificações de estudos anteriores e a seleção final dos pontos de avaliação.	64
Tabela 8 - Revisão e Classificação dos pontos em LCZ a partir do novo levantamento dos parâmetros urbanísticos (2022).....	67
Tabela 9 - Propriedades térmicas dos materiais de vedação, no P1 e no P2.....	79
Tabela 10 - Dados de entrada na aba Metereology do Envi-met	81
Tabela 11 - Relação das espécies arbóreas inseridas no modelo real.	84
Tabela 12 - Propriedades térmicas das espécies arbóreas.	84
Tabela 13 - Áreas levantadas para serem consideradas no cálculo de um índice para arborização viária	Erro! Indicador não definido.
Tabela 14 - Dados do solo.....	100
Tabela 15 - IAF para as categorias de baixa, média e alta densidade de área foliar obtidos por meio da metodologia de fotografia hemisférica (com seleção de menor e maior porção da imagem) e ceptômetro.....	102
Tabela 16 - Propriedades fisiológicas das espécies.....	103
Tabela 17 - Localização dos pontos de avaliação e condições	108
Tabela 18 - Dados de Medição e de Simulação	110
Tabela 19 - Diferenças na temperatura e umidade relativa do ar, entre medição e simulação.....	111
Tabela 20 - Resultados obtidos nas análises estatísticas	112
Tabela 21 - Síntese da comparação das variáveis climáticas analisadas entre os cenários com distintos IDAAV	134
Tabela 22 - Comparação dos índices IDAAV e IDAAC, no P1	136
Tabela 23 - Comparação dos índices IDAAV e IDAAC, no P2.....	136
Tabela 24 - Comparação do IDAAC, entre P1 e P2.....	137
Tabela 25 - Impacto do índice no PET, adotando-se o IDAAC.....	137

Tabela 26 - Tabela matriz com todos os resultados de Temperatura do ar (°C); Temperatura radiante média (°C) e Umidade Relativa do Ar (%), para o P1 (LCZ 3), no período quente-úmido.	165
Tabela 27 - Tabela matriz com todos os resultados de Temperatura do ar (°C); Temperatura radiante média (°C) e Umidade Relativa do Ar (%), para o P2 (LCZ 4), no período quente-úmido.	166
Tabela 28 - Tabela matriz com todos os resultados de Temperatura do ar (°C); Temperatura radiante média (°C) e Umidade Relativa do Ar (%), para o P1 (LCZ 3), no período quente-seco.	167
Tabela 29 - Tabela matriz com todos os resultados de Temperatura do ar (°C); Temperatura radiante média (°C) e Umidade Relativa do Ar (%), para o P2 (LCZ 4), no período quente-seco.	168

RESUMO

DE OLIVEIRA, Simone B. B. **O impacto da arborização viária no conforto térmico em diferentes cenários de cobertura arbórea.** 2023, 168pg. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

As mudanças climáticas estão sendo cada vez mais evidenciadas pelo aumento da frequência de eventos climáticos extremos. Entre as consequências está o aumento das temperaturas e da intensidade das ondas de calor, fenômenos que são amplificados nas áreas urbanas devido às alterações que ocorrem na morfologia urbana durante o processo de urbanização. Fica evidente a necessidade de se criar planos de ações para a adaptação e mitigação ao aquecimento urbano em suas diversas escalas. Nesse contexto, a arborização viária se torna uma importante estratégia de mitigação, desde que seja planejada e implantada adequadamente para garantir os benefícios ao microclima e conforto térmico. Esta pesquisa tem o objetivo de avaliar o impacto da arborização urbana no conforto térmico, considerando o índice de cobertura arbórea como principal parâmetro de avaliação. Além disso, analisa e quantifica os efeitos de outros atributos que influenciam o impacto: a morfologia urbana, o porte dos espécimes arbóreos e o tipo de cobertura do solo. Tomando como base o contexto climático e urbano da cidade de Cuiabá, foram selecionados dois recortes da área urbana de Cuiabá, caracterizados como LCZ 3 (edifícios baixos em arranjo compacto) e LCZ 4 (edifícios altos em arranjo esparsos), segundo a classificação de Zonas Climáticas Locais (LCZ) de morfologia urbana. O método adotado foi a simulação computacional com o modelo Envi-met, para simular o impacto nas variáveis climáticas de cenários distintos. Assim, foram comparadas as variáveis climáticas Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); Temperatura radiante média - T_{rm} ($^{\circ}\text{C}$), Umidade relativa do ar (%) e o índice de conforto térmico, PET ($^{\circ}\text{C}$), de um cenário sem arborização ($^{\circ}\text{C}$) com outros cenários que variam o índice de cobertura arbórea. Os resultados demonstraram que arborização viária não impacta na Temperatura e Umidade do ar, porém tem impacto significativo na T_{rm} e no PET. Os maiores impactos ocorreram no verão, chegando a 30°C de redução da T_{rm} e 7°C do PET, no período mais quente do dia (14h), no cenário de maior cobertura arbórea. Contudo, observou-se que outros fatores influenciam o efeito de resfriamento, como a morfologia urbana; o porte das árvores; o arranjo e a cobertura do solo. A partir das relações estabelecidas entre a densidade arbórea na área de calçadas e o impacto no conforto térmico, propõe-se o índice de arborização viária (IAV), para contribuir nas tomadas de decisão do planejamento da infraestrutura verde em vias. Ao final, conclui-se que a arborização viária tem impacto na redução da T_{rm} e do PET, porém não é suficiente para se atingir o conforto térmico em situação de extremo calor. E ainda, que o índice de cobertura arbórea não é o único fator determinante no impacto da arborização viária no microclima, é preciso investigar o efeito de outros fatores, como o arranjo e a altura das espécies e adotar outras estratégias de mitigação para potencializar o efeito de atenuação da temperatura.

Palavras-chave: arborização viária; conforto térmico em espaços abertos; índice de cobertura arbórea; Envi-met; morfologia urbana.

ABSTRACT

DE OLIVEIRA, Simone B. B. **The impact of street tree planting on thermal comfort in different tree cover scenarios.** 2023, 168pg. Thesis (PhD in Environmental Physics) - Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

Climate change is being highlighted by the increased frequency of extreme weather events. Among the consequences is the increase in temperatures and the intensity of heat waves, phenomena that are amplified in urban areas due to the changes that occur in urban morphology during the urbanization process. There is a clear need to create action plans for adapting to and mitigating urban warming at different scales. In this context, street tree planting becomes an important mitigation strategy, as long as that it is planned and implemented properly to guarantee the benefits to the microclimate and thermal comfort. Therefore, this research aims to evaluate the impact of street tree planting on thermal comfort, considering the tree cover index as the main evaluation parameter. In addition, analyzes and quantifies the effects of other influencing attributes: urban morphology, the size of tree specimens and the type of ground cover. Based on the climatic and urban context of the city of Cuiabá, two sections of the urban area were selected, characterized as LCZ 3 (low-rise buildings in a compact arrangement) and LCZ 4 (tall buildings in a sparse arrangement), according to the classification of Local Climate Zones (LCZ) of urban morphology. The method adopted was computer simulation using the Envi-met three-dimensional model to simulate the impact of different scenarios that vary the tree cover index. In this way, the climate variables Air temperature ($^{\circ}\text{C}$); Average radiant temperature - T_{rm} ($^{\circ}\text{C}$), Relative humidity (%) and comfort index, PET ($^{\circ}\text{C}$) was compared for a scenario without afforestation with other scenarios that vary the tree cover index. The results showed that street tree planting has no impact on air temperature and humidity, but does have a significant impact on temperature and on PET. The greatest impact occurred in the summer, reaching a 30°C reduction in T_{rm} and a 7°C in PET, during the hottest period of the day (2pm), in the scenario with maximum tree cover. However, it was observed that other factors influence the effect, such as the urban morphology; the size of the trees, the arrangement, and the ground cover. Based on the relationships established between tree density in the sidewalk area and the impact on thermal comfort, the street tree index (IAV) is proposed to contribute to decision-making in the planning of green infrastructure on urban streets. At last, it can be concluded that street tree planting has an impact on reducing the temperature and the sensation of heat, but it is not enough to achieve thermal comfort in extreme heat conditions. It is also important to investigate the effect of the arrangement and height of species and to adopt other mitigation strategies to enhance the effect of temperature attenuation.

Keywords: street tree planting; thermal comfort in open spaces; tree cover index; Envi-met; urban morphology

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

As mudanças climáticas estão sendo cada vez mais evidenciadas pelo aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, que colocam em risco a segurança, a saúde e a qualidade de vida das pessoas. O aquecimento global é um dos fenômenos das mudanças climáticas, que se confirma com dados recentes. A análise do último boletim mensal do Serviço de Monitoramento das Alterações Climáticas do Copernicus (C3S) confirmou que a temperatura global do ar à superfície, em julho de 2023, foi a mais elevada já registrada para qualquer mês no banco de dados ERA5, que remonta a 1940. Segundo o boletim, o mês foi cerca de 1,5 °C mais quente do que a média de 1850-1900 (COPERNICUS, 2023). As causas apontadas são as atividades humanas, principalmente por meio das emissões de gases de efeito estufa, que segundo o último relatório (*AR6 - Synthesis Report*, 2023) divulgado pelo IPCC (*The Intergovernmental Panel on Climate Change*), continuam aumentando, decorrentes do uso insustentável da energia, alterações do uso do solo, estilos de vida e padrões de consumo e produção em todas as regiões do mundo. (IPCC, 2023)

As cidades desempenham uma importante função na mitigação e adaptação ao aquecimento global e principalmente ao aquecimento urbano. Elas não são a causa do fenômeno, porém potencializam seus efeitos pois são grandes emissoras dos gases do efeito estufa decorrentes das atividades antropogênicas. Outro motivo se refere à grande concentração de materiais impermeáveis e absorvedores de radiação infravermelha, que acabam retendo mais calor em relação às áreas rurais, sendo por isso mais vulneráveis às ondas de calor (STONE, 2012).

Ao mesmo tempo, a população mundial nas cidades continua crescendo, com previsão para 2050 de 68% da população mundial residindo em áreas urbanas (UN, 2018). No Brasil, a previsão para o mesmo ano é de 90% (IBGE, 2010), induzindo como consequência a expansão dos limites territoriais e um processo acelerado de urbanização, na maioria das vezes desacompanhado de um planejamento capaz de controlar as mudanças bruscas do ambiente natural. O crescimento populacional e territorial urbano implica em mais consumo de energia, mais emissão de gases poluentes e em diversas consequências preocupantes, pois agravam uma série de

riscos tais como o estresse térmico de calor, intensificação do fenômeno de ilhas de calor urbana, seca, tempestades, precipitação extrema, inundações, deslizamentos de terra, escassez de água, poluição do ar e aumento do nível do mar (IPCC,2021; 2022).

As alterações do ambiente natural provocam mudanças no clima urbano, que é caracterizado pela interação entre a cobertura do solo (edificado, pavimentado, vegetado, solo exposto, água), a morfologia urbana (dimensões dos edifícios, espaço entre eles, largura das vias), e a atmosfera. Portanto, estes são os principais fatores que impactam no microclima urbano, pois são responsáveis pela alteração das trocas térmicas convectivas, radiativas e evaporativas, impactando no balanço energético da interface entre superfície, vegetação e atmosfera, principalmente na camada mais próxima da superfície, a Camada Limite Superficial (CLS) (OKE et al., 2017).

A supressão da vegetação, para dar lugar às construções e serviços de infraestrutura da cidade, tem impacto negativo no equilíbrio térmico urbano, prejudicando o conforto térmico nos espaços abertos, a qualidade de vida e a atividade econômica e cultural da população. Por isso, a manutenção dessas ou ainda a inclusão de novas áreas vegetadas desempenha um importante papel no microclima, caracterizando-se como uma das principais estratégias de mitigação e adaptação ao aquecimento urbano. O IPCC (2021) reforça a importância de se concentrar esforços para se mitigar as causas do aquecimento global, principalmente na redução da emissão de gases de efeito estufa, e se criar estratégias de adaptação às mudanças climáticas em suas diversas escalas. Na escala do microclima urbano, diversas estratégias mitigadoras podem contribuir, como a forma compacta de ocupação territorial, o zoneamento de uso misto do solo, planejamento da mobilidade urbana e a implementação de infraestrutura verde, que é apontada como uma ação promissora e efetiva para a adaptação ao aquecimento urbano.

Diversos estudos demonstram que a vegetação influencia no controle climático, apesar disso a maioria dos municípios brasileiros não possui um planejamento de arborização das vias e espaços públicos, e quando possuem, não costumam ser baseados em dados técnico-científicos sobre a influência da arborização no microclima, e a sua relação com diversos fatores, como a distribuição espacial das espécies na malha urbana e dados quantitativos referentes à área de

cobertura arbórea, por exemplo. A ausência de parâmetros quantitativos e índices sobre a arborização urbana, correlacionados aos fatores espaciais urbanos (morfologia urbana, cobertura do solo, densidade construtiva etc.) e ao impacto no microclima e no conforto térmico, são grandes obstáculos para a gestão urbana, pois arborizar uma cidade exige um planejamento criterioso para otimizar os benefícios e evitar prejuízos para o conforto térmico e para a administração pública.

A cidade de Cuiabá-MT, localizada na região centro-oeste do Brasil, é caracterizada por um rigor climático de extremo calor, que têm se agravado nos últimos anos na escala microclimática, principalmente devido à diminuição brusca da vegetação arbórea na área urbana durante o processo de urbanização, que não foi planejado e tampouco controlado. Apesar das condições climáticas desfavoráveis ao uso de espaços externos devido ao constante desconforto térmico por calor, que afeta direta e negativamente a qualidade de vida da população, o município não possui um plano de arborização. A prefeitura disponibiliza um decreto que dispõe sobre a arborização pública (PREFEITURA MUNICIPAL DE CUIABÁ, 2012), contudo, sem nenhuma relação com os aspectos do microclima, como por exemplo, orientações sobre a quantidade de árvores necessária que possa contribuir para diminuir o calor excessivo em determinada área urbana. São poucos os estudos que respondem a estas questões, algo altamente desejável em tempos de alterações climáticas. Neste sentido, é fundamental desenvolver pesquisas para entender as questões referentes à influência da cobertura arbórea na atenuação das temperaturas nas áreas urbanas, uma vez que estas informações podem ser utilizadas como ferramenta de avaliação do conforto térmico em propostas de arborização, antes de serem implantadas, auxiliando profissionais e gestores públicos no planejamento e readequação das cidades diante dos problemas ambientais, a fim de proporcionar maior qualidade de vida para a população.

1.2. JUSTIFICATIVA

A Prefeitura Municipal de Cuiabá, por meio do decreto No 5.144 de 15 de fevereiro de 2012, dispõe sobre a arborização pública na área urbana e sedes de distrito do município de Cuiabá, preconiza que se projete a arborização urbana e priorize o plantio em áreas com “ilhas de calor” e enfatiza a necessidade de definição de normas emergenciais que tratem da implantação da arborização pública em

Cuiabá. O panorama apresentado pelo IPCC na contextualização desta pesquisa evidencia a necessidade de se criar estratégias de mitigação e adaptação ao aquecimento urbano. No entanto, poucas são as ações implementadas neste sentido, até o momento.

Apesar de várias pesquisas que comprovam o benefício da arborização urbana como uma forma de mitigação do calor urbano e dos efeitos de ilhas de calor, a maioria é voltada para praças, parques ou massas vegetadas em geral, comparando-se áreas vegetadas com áreas não vegetadas para a avaliação dos impactos decorrentes do processo de urbanização no microclima. É inegável a contribuição desses estudos que permitem uma compreensão dos fenômenos climáticos e a sua relação com a morfologia urbana, no entanto, estudos específicos para arborização viária ainda são incipientes no Brasil e na região de estudo, especialmente aqueles com abordagens específicas voltadas para a quantificação de índices de cobertura arbórea na área das vias, seja a partir de medições ou por meio de simulação computacional baseada em cenários hipotéticos com diferentes arranjos arbóreos, como é a proposta desta pesquisa.

O sistema viário das cidades grandes ou médias consiste em importante rede de infraestrutura urbana, responsável pela mobilidade das pessoas, seja por meio de transporte público, veículos automotores, motos, bicicletas e pedestres. As atividades urbanas (moradia, comércio, trabalho e lazer) dependem do funcionamento das vias urbanas, de maneira que sejam compatíveis com os fluxos e a infraestrutura de serviços urbanos essenciais, e garantam o conforto e a segurança dos transeuntes. As vias urbanas correspondem a uma parcela significativa da malha urbana, e por serem usualmente pavimentadas, tendem a se aquecer mais em relação às áreas dos lotes, para quais a legislação urbana garante uma taxa mínima de permeabilidade e de cobertura paisagística e arbórea. O aquecimento pode ser agravado nas vias devido à absorção das múltiplas reflexões recebidas dos edifícios adjacentes, dependendo da geometria construtiva (relação entre altura e distância eles) e dos materiais das superfícies. Ao mesmo tempo, por constituírem uma rede distribuída em toda a cidade, considerar a possibilidade de implantação de vegetação arbórea em suas áreas se torna uma estratégia eficaz do ponto de vista do microclima, garantindo uma distribuição equilibrada de massa arbórea na área urbana. No entanto, há de se

considerar o desafio em conciliar a distribuição dos espécimes arbóreos com a rede elétrica, com as sinalizações de trânsito, mobiliário urbano e ainda garantir a mobilidade segura dos pedestres e motoristas, sem falar nos custos advindos da manutenção com podas e irrigação. Além disso, inserir espécies arbóreas no meio urbano exige um conhecimento específico sobre diferentes áreas de conhecimento que abrangem a sua adequada implantação e manutenção, pois as condições ambientais na cidade são muito diferentes do habitat natural das árvores, podendo comprometer a sua vitalidade e o desempenho de suas funções para o conforto humano. Portanto, a implementação de arborização em vias apresenta desafios diferentes daqueles encontrados em praças e parques urbanos. Por isso, é fundamental buscar soluções de arborização viária que resolvam estas questões e principalmente atendam à principal função que é minimizar o desconforto térmico por calor nas vias urbanas, principalmente em regiões de clima quente. Nesse sentido, diversos estudos demonstram que é possível melhorar o conforto térmico de áreas urbanas, mesmo com alta densidade construtiva, desde que acompanhada de massas arbóreas e de que estas sejam inseridas adequadamente no meio urbano (NICODEMO E PRIMAVESI, 2009; ERELL, 2017; WANG et al., 2019; DANDOU et al., 2021; CORTES et al., 2022).

Diante do exposto e constatando a ausência de parâmetros científicos na elaboração de normas voltadas para a implementação da arborização viária, especialmente para a região de estudo, fica evidente a relevância de se investigar e quantificar o impacto da arborização viária no conforto térmico, e a sua relação com a área de cobertura arbórea, com vistas a contribuir para a criação de ferramentas voltadas para a regulação de índices específicos para a arborização viária na legislação urbana.

Assim, esta pesquisa aborda a arborização viária e a sua relação com o microclima e o conforto térmico humano, com enfoque no impacto do índice de cobertura arbórea. Entre as questões que se pretende investigar a acerca do tema, estão: O quanto a arborização viária é capaz de atenuar a temperatura e melhorar a sensação de conforto térmico no nível do pedestre? O impacto no conforto térmico ocorre da mesma maneira em diferentes morfologias urbanas? O impacto no conforto térmico é proporcional ao incremento do índice de cobertura arbórea? Quais outros

fatores interferem no efeito de resfriamento da arborização viária e devem ser incorporados nos planos de infraestrutura verde das vias urbanas?

1.3.OBJETIVO

1.3.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o impacto da arborização viária no conforto térmico do pedestre, em diferentes cenários de cobertura arbórea, visando contribuir para as tomadas de decisões no planejamento da infraestrutura verde urbana.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o impacto da arborização viária no conforto térmico e microclima local, comparando-se cenários hipotéticos com índices de cobertura arbórea distintos;
- Investigar o impacto da morfologia urbana no efeito de resfriamento proporcionado pela arborização viária;
- Investigar o impacto do porte das árvores (altura e diâmetro do dossel) no efeito de resfriamento proporcionado pela arborização viária;
- Investigar o impacto da cobertura do solo no efeito de resfriamento proporcionado pela arborização viária;
- Propor um índice de densidade arbórea para servir de parâmetro na avaliação do impacto da arborização viária, do ponto de vista do conforto térmico humano.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. URBANIZAÇÃO E CLIMA

Há décadas a comunidade científica vêm apontando evidências sobre as consequências do processo de urbanização e o aumento significativo da população em áreas urbanas, como: aumento no consumo de energia e demais insumos, alterações na cobertura do solo e da topografia, provocadas por movimentos de terra em grande escala e por pavimentação, aterro, escavação e compressão da superfície; aumento da contaminação do ar, do solo e da água; mudanças significativas nas populações vegetais e animais, alteração do clima tipicamente urbano, que pode trazer diversos e sérios problemas de doenças e de falta de qualidade de vida para a população urbana, além de impactos ambientais negativos que podem resultar em sérios prejuízos econômicos. Portanto, o maior impacto do homem sobre o clima acontece nas áreas urbanas, de modo que o clima urbano se torna distinto por suas características específicas comparando-as com as áreas rurais e, por isto, os estudos de climatologia urbana são fundamentais para o planejamento e a preservação da qualidade físico-ambiental urbana. A principal consequência desse processo para o clima é decorrente da modificação nas características das superfícies urbanas.

Oke (1982, 2012) listou cinco causas principais do efeito de ilhas de calor urbano, cada uma delas relacionada com a alteração de um atributo urbano que impacta no balanço de energia e radiação da superfície urbana, a saber: 1. Maior absorção da radiação solar devido às múltiplas reflexões entre superfícies dos edifícios (pisos, fachadas e coberturas) e não apenas devido ao aumento do albedo dos materiais construtivos; 2. Maior retenção da radiação infravermelha (calor) no *canyon urbano*, ou seja, no espaço conformado pela via e edifícios adjacentes, devido à diminuição do fator de visão do céu, que ocorre com a compactação construtiva (alturas maiores e distanciamentos menores entre os edifícios); 3. Maior absorção solar por superfícies pavimentadas e redução das perdas convectivas devido à diminuição do fluxo de ar entre os edifícios, além do albedo menor destes materiais impermeáveis; 4. Aumento de calor sensível (calor) e redução das trocas térmicas úmidas que ocorrem com a evaporação de plantas e solos úmidos, devido à

substituição de áreas vegetadas por áreas pavimentadas, de maior absorção térmica; 5. Aumento na emissão de calor sensível e latente devido à queima de combustíveis fósseis destinados aos veículos, processos industriais e sistemas de resfriamento / aquecimento de ambientes internos (residenciais e comerciais). Ou seja, as atividades antropogênicas, apesar de menos representativas no balanço energético da superfície urbana, contribuem para o aquecimento urbano.

Diante do exposto, é notório que o aumento das temperaturas nas áreas urbanas, que é uma das consequências das mudanças climáticas, principalmente o aquecimento global, é um fenômeno real. Portanto, faz-se necessário que se fomentem ações de mitigação e adaptação às consequências desse fenômeno, como a inserção da análise de dados relacionados às questões ambientais em paralelo ao uso e ocupação do solo, no que tange ao modo de planejamento e gestão urbana. (NEVES E LABAKI, 2022). Fica evidente a correlação entre os atributos físicos urbanos e a qualidade ambiental dos espaços abertos e a necessidade de se conhecer e considerar nos planos diretores e demais instrumentais legais de controle dos processos de urbanização, os agentes impactantes no microclima e as estratégias possíveis de mitigação destes efeitos.

2.2. ELEMENTOS DA SUPERFÍCIE URBANA E A INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO CLIMÁTICO

A superfície urbana é heterogênea, variando em faixa de escalas espaciais, ou seja, as formas pelas quais os elementos da superfície urbana interagem com as camadas atmosféricas adjacentes varia em função de vários fatores que interagem de maneira complexa (BRITTER; HANNA, 2003). A complexidade da superfície urbana pode ser observada quando destacamos os elementos presentes nesta superfície, como, por exemplo, as construções individuais, formada por paredes e telhado, cada um com diferenças no tempo e no ângulo de exposição à radiação, diferentes materiais e comportamentos térmicos, posições diferenciadas em relação à incidência dos ventos, além dos diferentes afastamentos, alturas e dimensões dos edifícios em relação aos demais que compõem seu entorno (ARNFIELD, 1984, 2000, APELT; PATERSON, 1989, VERSEGHY e MUNRO, 1989a, 1989b). Destacam-se ainda as superfícies horizontais ao nível do solo, com jardins gramados

e superfícies pavimentadas (OKE, 1979), e ainda algumas árvores com características aerodinâmicas e barreiras de sombreamento variadas (OKE, 1989; GRIMMOND et al., 1996). Estes diferentes elementos de superfície interagem mutuamente com a atmosfera adjacente em pequena escala, gerando características variadas destas superfícies, principalmente na temperatura superficial. Estas unidades morfológicas fundamentais podem ser agregadas hierarquicamente. As paredes dos edifícios e os elementos situados entre eles, por exemplo, definem o *Cânion Urbano* (CU) (*Urban Canion - UC*). Os CUs e as coberturas dos edifícios adjacentes definem blocos da cidade, que, por sua vez, arranjados, formam bairros, zonas de tipos de uso do solo e, em última instância, toda a cidade. Em cada escala, as unidades possuirão balanços energéticos distintos que, em geral, representam mais do que a média ponderada dos orçamentos dos elementos individuais. Além disso, cada unidade interage com as adjacentes, da mesma categoria de escala, por advecção. (ROSSETI, 2013)

Resultados de diferentes pesquisas demonstram a relação entre a composição da superfície urbana e a temperatura de superfície, sendo a intensidade desta diretamente proporcional à quantidade de superfícies refletoras e absorvedores de calor presentes na morfologia urbana, e inversamente proporcional à presença de vegetação, especialmente a vegetação arbórea, que intercepta parte da radiação solar incidente. As áreas urbanas caracterizadas por um arranjo compacto de edifícios de baixa altura e sem presença de vegetação, ou áreas grandes pavimentadas ou com grandes extensões de solo exposto, costumam apresentar maiores temperaturas superficiais, enquanto a presença de vegetação arbórea contribui significativamente para os atenuar os valores da temperatura superficial. (FERREIRA, DINIZ e ASSIS, 2021). Estes resultados corroboram a constatação de Ferreira (2019), que verificou temperaturas superficiais diurnas e noturnas mais elevadas nas áreas mais urbanizadas, em comparação com áreas menos urbanizadas, ocupadas de forma esparsa ou dotadas de cobertura vegetal, com diferenças maiores entre as morfologias no período diurno. No entanto, as áreas verticalizadas compactas, com poucos espaços livres e pouca cobertura vegetal, apresentam temperatura superficial noturna superior às outras morfologias urbanas, caracterizando a presença de ilhas de calor urbano. (FERREIRA, 2019)

Portanto, o balanço de energia na área urbana é modificado devido às alterações promovidas pela substituição das superfícies naturais, como solo nu e vegetação por superfícies artificiais, como pavimentações e edificações, que armazenam parte da energia incidente, aquecendo os ambientes urbanos. As propriedades térmicas e radiativas dos materiais construtivos que compõem as superfícies urbanas, por apresentarem maior potencial de absorção à radiação de ondas curtas e maior emissão da radiação de ondas longas, devido ao albedo e à emissividade dos diferentes materiais que compõem as superfícies urbanas (OKE, 1995), provocam o maior aquecimento em relação ao ambiente natural. Assim, a maior parcela da radiação de ondas curtas absorvidas durante o período diurno é liberada em forma de calor sensível no período noturno, sendo este um dos principais fatores para caracterização das alterações térmicas em centros urbanos, as ilhas de calor urbano (ICU), observadas no período noturno, conforme inúmeras pesquisas já demonstraram. (OKE et al, 2017; MIRANDA, 2018)

A evapotranspiração é o fenômeno que causa o maior impacto no balanço de energia das áreas urbanas, em comparação às áreas rurais do entorno com maior cobertura vegetal, resultando em maiores fluxos de calor sensível disponível ao aquecimento do tecido urbano (MOREIRA et al, 2016). Ainda, há de se considerar que a evapotranspiração é um dos principais componentes do ciclo hidrológico no meio urbano e que os efeitos advindos da urbanização apresentam relação direta com os padrões de cobertura do solo urbano, associados aos fatores do clima local, como por exemplo, o regime pluviométrico regional (GRIMMOND e OKE, 1999), por isso a importância de se preservar as áreas verdes ou reestabelecer as áreas desmatadas.

Stewart & Oke (2012), baseando-se no conhecimento quanto às trocas térmicas entre a superfície urbana e a camada de ar mais adjacente, propuseram uma metodologia de classificação da área urbana (item 2.4.), reforçando a importância de se diferenciar as diferentes morfologias urbanas em pesquisas de climatologia urbana, alegando que a alteração do balanço energético, apesar de evidente, não ocorre de maneira igual nas diferentes configurações espaciais da área urbana. Vários trabalhos (MORAKINYO ET AL, 2017; CHATZIDIMITRIOU, A. & SIMOS Y., 2017; VENHARI, 2019; LEMOS, BARBOSA e LIMA, 2023) abordam as relações entre a geometria urbana, o tipo de cobertura do solo e o microclima urbano, com o

desafio em comum de buscar soluções efetivas para a mitigação dos efeitos de desconforto do aquecimento urbano.

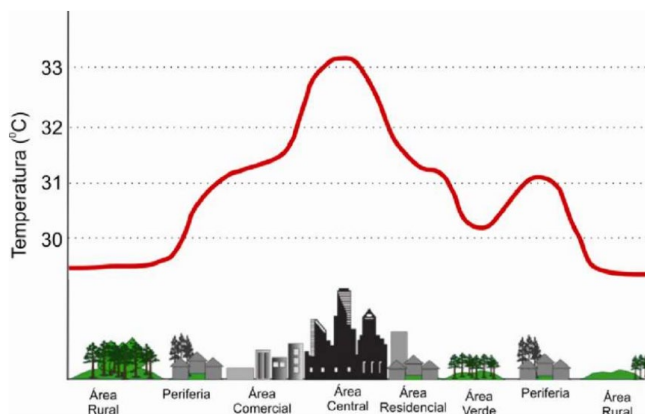


FIGURA 1 - Representação da variação de temperatura do ar em área urbana
FONTE: Oke et al., (2017)

2.3. ESCALAS DO CLIMA URBANO

Oke (2006) definiu diferentes escalas climáticas urbanas (extensão horizontal) e limites da camada atmosférica influenciados por cada escala (extensão vertical), de acordo com as diferentes interações entre a cidade e as camadas atmosféricas adjacentes, em: a) Mesoescala - escala que incorpora a influência integrada da cidade no clima urbano. Abrange dezenas de quilômetros de extensão, dependendo da dimensão da cidade estudada. b) Escala Local - escala que inclui os efeitos climáticos decorrentes da forma da paisagem, tal como as características topográficas do relevo, mas exclui os efeitos microclimáticos de cobertura de solo, tamanho e disposição dos edifícios etc. Abrange de um a vários quilômetros. c) Microescala - escala típica do microclima urbano, está relacionada com as dimensões individuais dos elementos urbanos (edifício, árvores, estradas, ruas, pátios, jardins etc.). Varia de um metro a centenas de metros, conforme ilustra a figura 2.

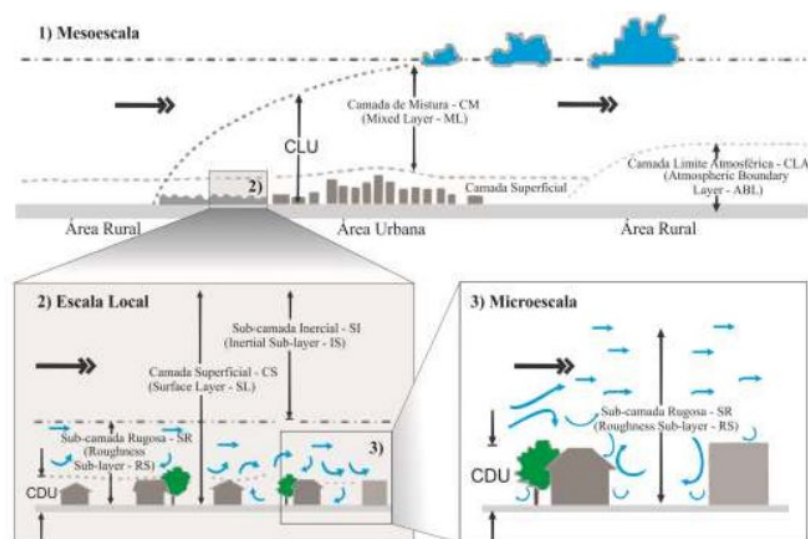


FIGURA 2 - Escalas Climáticas Urbanas

FONTE: Oke et al., (2017)

Esta pesquisa, assim como a maioria dos estudos que relacionam os processos de urbanização com as alterações climáticas, se limitam à análise em escala microclimática, que é onde o pedestre transita e se tem a percepção de conforto ou desconforto por calor.

2.4. ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS (LCZ)

Visando padronizar os estudos mundiais sobre ilhas de calor e demais fenômenos do aquecimento urbano, Stewart & Oke (2012) propuseram um sistema de classificação de áreas baseado em Zonas Climáticas Locais (LCZ)¹, principalmente devido à dificuldade encontrada em se classificar áreas urbanas e rurais em diferentes regiões do mundo, pois o termo “urbano” e o “rural”, era empregado na literatura para denominar áreas com características de ocupação espacial e demográfico totalmente diferentes. Então, os autores definiram formalmente as LCZs como regiões de cobertura do solo, geometria urbana, material e atividade humana uniforme, que abrangem centenas de metros a vários quilômetros em escala horizontal.

Conceitualmente, as zonas climáticas locais são padrões espaciais de elementos de superfície urbana, capazes de provocar efeitos no clima urbano. Cada

¹ Termo em inglês: “Local climate zone” - (LCZ). Portanto, será adotado neste trabalho a sigla original em inglês.

LCZ tem um regime de temperatura característico, que persiste durante todo o ano e está associado com os ambientes homogêneos ou ecossistemas das cidades, como por exemplo, parques, núcleos comerciais, biomas naturais e outras tipologias espaciais urbanas.

A denominação de “zonas” representa a distribuição espacial; “*locais*” devido à escala de análise, e “*climáticas*” pela natureza de suas propriedades físicas e radiativas adotadas como critério.

O sistema compreende a classificação de 17 (dezessete) Zonas Climáticas Locais, sendo 10 (dez) definidas por tipologias e adensamento das construções, considerando-se a altura e arranjo das edificações (Tabela 1), e 7 (sete) por tipos de cobertura do solo (Tabela 2). As propriedades físicas de todas as zonas são mensuráveis e inespecíficas quanto ao lugar ou tempo, conforme (Tabela 3) (STEWART & OKE, 2012).

TABELA 1 - Tipologias edificadas das Zonas Climáticas Locais (STEWART e OKE, 2012)

Tipologia Construtiva	Definição
LCZ 1. Alto-compacto 	Edifícios altos em arranjo compacto. Áreas densamente construídas, com edifícios com mais de 10 pavimentos. Cobertura do solo principalmente pavimentada. Materiais de construção em concreto, aço, pedra e vidro.
LCZ 2. Médio-compacto 	Edifícios de altura média em arranjo compacto (3 a 9 andares). Áreas densamente construídas. Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura do solo principalmente pavimentada. Materiais de construção de pedra, tijolo, azulejo e concreto.
LCZ 3. Baixo-compacto 	Edifícios baixos em arranjo compacto (1 a 3 andares). Áreas densamente construídas. Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo principalmente pavimentada. Materiais de construção de pedra, tijolo, azulejo e concreto.
LCZ 4. Alto-aberto 	Edifícios altos em arranjo aberto. Áreas de menor adensamento com edifícios com mais de 10 pavimentos. Abundância de cobertura permeável do solo (vegetação herbácea, arbustiva ou árvores espalhadas). Materiais de construção em concreto, aço, pedra e vidro.
LCZ 5. Médio-aberto 	Edifícios de altura média em arranjo aberto (3 a 9 andares). Áreas de menor adensamento. Abundância de cobertura permeável do solo (vegetação herbácea, arbustiva ou árvores espalhadas). Materiais de construção em concreto, aço, pedra e vidro.
LCZ 6. Baixo-aberto 	Edifícios baixos em arranjo aberto (1 a 3 andares). Áreas de menor adensamento. Abundância de cobertura permeável do solo (vegetação herbácea, arbustiva ou árvores espalhadas). Materiais de construção em madeira, tijolo, pedra, azulejo e concreto.

TABELA 1 (cont) - Tipologias edificadas das Zonas Climática Locais (STEWART e OKE, 2012)

Tipologia Construtiva	Definição
LCZ 7. Baixo-precário 	Edifícios baixos e leves, com pouca inércia térmica. Áreas densamente construídas, com edifícios de 1 (um) pavimento. Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo predominantemente compacta. Construção leve materiais (por exemplo, madeira, palha, metal corrugado).
LCZ 8. Baixo-grande 	Grandes construções de baixa altura em arranjo aberto (1 a 3 andares). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo principalmente pavimentada. Aço, concreto, metal e pedra materiais de construção.
LCZ 9. Ocupação esparsa 	Disposição esparsa de edifícios de baixo e médio porte em um ambiente com configuração natural. Abundância de terras permeáveis cobertura (vegetação herbácea, arbustiva ou árvores espalhadas).
LCZ 10. Indústria Pesada 	Estruturas industriais baixas e médias (torres, tanques, pilhas). Poucas ou ausência de árvores. Cobertura do solo principalmente pavimentada ou impermeável. Metal, aço e materiais de construção de concreto.
LCZ A. Vegetação Arbórea densa 	Áreas densamente cobertas por vegetação arbórea decidua e/ ou perene. Cobertura do solo predomeninantemente permeável, com vegetação herbácea. A função de zona se caracteriza como floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.

FONTE: Stewart & Oke (2012), adaptado e traduzido por Paula (2021)

TABELA 2 - Cobertura do solo das Zonas Climáticas Locas de Stewart & Oke (2012), adaptado e traduzido por Paula (2021)

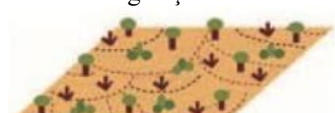
Tipologia Construtiva	Definição
LCZ B. Vegetação Arbórea esparsa 	Áreas cobertas por vegetação esparsa decidua e/ ou perene. Cobertura do solo predomeninantemente permeável, com vegetação herbácea. A função de zona se caracteriza como floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.
LCZ C. Vegetação arbustiva 	Áreas cobertas por vegetação esparsa arbustiva e vegetação arbórea de pequeno porte. Cobertura do solo predomeninantemente permeável (solo exposto ou areia). A função de zona se caracteriza comomato natural ou agricultura.
LCZ D. Vegetação herbácea 	Áreas cobertas por vegetação herbácea. Poucas ou nenhuma árvore. A função de zona se caracteriza como pastagem natural, agricultura ou parque urbano
LCZ E. Rocha ou pavimento 	Áreas cobertas por rochas ou pavimentos impermeáveis. Poucas ou nenhuma árvore ou planta. A função de zona se caracteriza como deserto natural (rocha) ou vias urbanas.

TABELA 2 (cont) - Cobertura do solo das Zonas Climática Locais de Stewart & Oke (2012), adaptado e traduzido por Paula (2021)

LCZ F. Solo Exposto	Áreas cobertas por solo exposto ou areia. Poucas ou nenhuma árvore ou planta. A função de zona se caracteriza como deserto natural ou agricultura.
LCZ G. Água	Corpos d'água: mares, lagos, rios, reservatórios e lagoas.

FONTE: Stewart & Oke (2012), adaptado e traduzido por Paula (2021)

TABELA 3 - Valores dos atributos urbanos estabelecidos para cada LCZ

LCZ	FVC (a)	Razão do canyon urbano (b)	Razão superfície edificada (c)	Razão da área impermeável (d)	Razão da área permeável (e)	Altura dos elementos de rugosidade (f)	Classe de rugosidade do terreno (g)
LCZ 1	0.2-0.4	>2	40-60	40-60	<10	>25	8
LCZ 2	0.3-0.6	0.75-2	40-70	30-50	<20	10-25	6-7
LCZ 3	0.2-0.6	0.75-1.5	40-70	20-50	<30	3-10	6
LCZ 4	0.5-0.7	0.75-1.25	20-40	30-40	30-40	>25	7-8
LCZ 5	0.5-0.8	0.3-0.75	20-40	30-50	20-40	10-25	5-6
LCZ 6	0.6-0.9	0.3-0.75	20-40	20-50	30-60	3-10	5-6
LCZ 7	0.2-0.5	1-2	60-90	<20	<30	2-4	4-5
LCZ 8	>0.7	0.1-0.3	30-50	40-50	<20	3-10	5
LCZ 9	>0.8	0.1-0.25	10-20	<20	60-80	3-10	5-6
LCZ 10	0.6-0.9	0.2-0.5	20-30	20-40	40-50	5-15	5-6
LCZ A	<0.4	>1	<10	<10	>90	3-30	8
LCZ B	0.5-0.8	0.25-0.75	<10	<10	>90	3-15	5-6
LCZ C	0.7-0.9	0.25-1.0	<10	<10	>90	<2	4-5
LCZ D	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	<1	3-4
LCZ E	>0.9	<0.1	<10	>90	<10	<0.25	1-2
LCZ F	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	<0.25	1-2
LCZ G	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	-	1

FONTE: Stewart & Oke (2012), adaptado e Traduzido por Paula (2021)

TABELA 4 - Propriedades de cobertura do solo que mudam com padrões climáticos sinópticos, práticas agrícolas, e/ou ciclos sazonais

Árvores nuas	Árvores decíduas sem folhas (por exemplo, no inverno); Aumento do fator de visão do céu; Reduzido albedo.
Cobertura de neve	Cobertura de neve maior que 10 cm de profundidade; Baixa admitância; Albedo alto.
Solo seco	Baixa admitância; Grande Razão de bowen; Aumento do albedo
Solo úmido	Alta admitância; Redução do albedo.

FONTE: adaptado de Stewart & Oke (2012)

As variações de temperatura entre as LCZs podem ser agrupadas entre: pequena ($\leq 2^{\circ}\text{C}$), média (entre 2 e 5°C) ou grande ($> 5^{\circ}\text{C}$), em função das diferenças na morfologia e no material de superfície das LCZs. (STEWART & OKE, 2012). As diferentes morfologias urbanas por apresentarem geometrias e revestimentos distintos, influenciam de maneira particular no clima, portanto a escala de análise dos fenômenos urbanos é importante para a delimitação dessas influências, no que se refere a dados climáticos, com vista ao planejamento das cidades. (OKE et al, 2017)

A comunidade científica, em especial nas pesquisas sobre climatologia urbana voltadas ao planejamento urbano, tem utilizado o sistema de classificação em Zonas Climáticas Locais, demonstrando as vantagens em adotá-las por abordar as características climáticas de cada zona de interesse e por permitir um mapeamento rápido e a comparação entre contextos urbanos semelhantes, o que têm contribuído para o avanço nos estudos desta área de conhecimento. Contudo, ainda se percebe grandes divergências ou dúvidas quanto à metodologia de levantamento das informações territoriais. Buscando comparar diferentes métodos de aplicação para avaliá-los e constatar os melhores resultados, Lehnert, M. et al (2021) analisaram 91 (noventa e um) trabalhos que adotaram a classificação pelo método de LCZ em áreas urbanas da Europa e os resultados mostram que o conceito de LCZs tem sido cada vez mais empregado, sendo consolidado na comunidade acadêmica europeia de pesquisas sobre o clima urbano com bom desempenho. Atualmente há centenas de mapeamentos urbanos de LCZ de áreas urbanas distribuídos em todos os continentes, a partir de diferentes processos metodológicos de delimitação, como medições de campo, observações de imagens satélites e processamento de parâmetros urbanísticos de fontes diversas para fins de estudos climáticos. Os autores perceberam que o método a ser escolhido depende do material que se tem disponível para a localidade estudada, sendo na maioria das vezes desejável adotar mais de um método, de modo que um complemente o outro, visando um maior detalhamento dos dados e, conseqüentemente, uma maior precisão dos resultados. As imagens satélites são grandes ferramentas, porém o levantamento de campo mais detalhado é necessário para complementar os dados obtidos nas imagens, dependendo também do objetivo da classificação e da abrangência da área de estudo.

Quanto ao estado da arte sobre o método LCZ no Brasil, alguns trabalhos se destacaram neste contexto. Cardoso & Amorim (2017), fizeram a comparação entre áreas com características morfológicas urbanas e de cobertura do solo distintas na cidade de Presidente Prudente/SP e encontraram diferenças significativas de temperatura do ar (em média 4 °C), enquanto áreas semelhantes não excediam 2°C de diferença. Outras pesquisas obtiveram resultados satisfatórios, como a de Ferreira & Duarte (2022) que demonstraram o potencial do método de mapeamento, aplicado a duas pesquisas urbanas com objetivos e escalas distintas na Região Metropolitana de São Paulo e a de Fernandes & Masiero (2020), que relacionaram LCZs da cidade de São Carlos – SP com o conforto térmico, demonstrando que as melhores condições de conforto se encontram nas zonas climáticas abertas e com maior quantidade de vegetação, em detrimento aos espaços com alta taxa de impermeabilidade e construída. Já Megda e Masiero (2021), aplicaram metodologia de estudo com o uso de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) em LCZs para identificar as ocorrências das Ilhas de Calor Urbano (ICUs) em áreas com configurações morfológicas distintas e em diferentes alturas, em Franca - São Paulo.

Diversas outras cidades foram mapeadas pela plataforma *LCZ Generator*, disponível no portal World Urban Database and Access Portal Tool (*WUDAPT*) (WUDAPT, 2023; Ching et al, 2018), uma ferramenta gratuita de banco de dados urbanos criada para facilitar estudos de clima urbano e demais aplicações do planejamento urbano. A plataforma tem sido largamente utilizada em pesquisas de diversas áreas de conhecimento, como por exemplo a climatologia, geografia, arquitetura e urbanismo, com divulgação e aplicação em crescimento considerável no Brasil, nos últimos três anos. No entanto, destaca-se que nem todos os mapeamentos disponíveis na plataforma foram validados por estudos científicos.

Para Cuiabá (MT), foram encontradas duas classificações a partir do método LCZ, que serão informadas no tópico de Material e Métodos (seção 4.3) com maiores detalhes dos métodos adotados, evidenciando as vantagens e desvantagens para cada tipo de aplicação e finalidade, levando em consideração os apontamentos de diversos estudos analisados na revisão bibliográfica da literatura científica encontrada, em especial do levantamento e compilação realizado por Lehnert, M. et al (2021), em

nível internacional e de Ferreira (2019), em nível local. Por fim, será apresentado o processo adotado nesta pesquisa e a classificação resultante.

2.4.1. Características microclimáticas das tipologias morfológicas (LCZs) de Cuiabá – MT.

Algumas constatações dos estudos anteriores sobre o microclima das LCZs identificadas na área urbana de Cuiabá – MT contribuem para a caracterização e compreensão do impacto da morfologia urbana (geometria construtiva e cobertura do solo), nas mudanças microclimáticas ocorridas nos últimos anos.

Assim, verificou-se que as zonas verticalizadas em disposição esparsa (edifícios altos com arranjo aberto), tipicamente da LCZ 4, apresentam temperaturas diurnas mais amenas, inferiores às das LCZ 2 e 3, devido ao sombreamento causado pelos edifícios, porém temperaturas noturnas elevadas devido à redução do fator de visão de céu, prejudicando o resfriamento noturno por emissão da radiação de ondas longas. (FERRERA & UGEDA, 2020). Também foi constatado que as áreas com maior quantidade de áreas pavimentadas apresentam máxima temperatura do ar, enquanto as com maior quantidade de vegetação (em relação às demais) apresentam menores valores de temperatura do ar e maiores valores de umidade relativa do ar. (PAULA et al., 2019). Portanto, as alterações da cobertura do solo urbano e da geometria construtiva (relação altura e distância dos edifícios), afetaram as variáveis microclimáticas (temperatura do ar e umidade relativa do ar) e aumentaram a incidência e magnitude de ilha de calor urbana, principalmente nas áreas mais construídas, de arranjo compacto, ou seja, com edificações próximas e poucas áreas de solo permeável e/ou vegetado. Em uma simulação de cenários futuros de ilhas de calor, Paula et al (2019) constatou que as tipologias da LCZ 2 (edifícios de média altura em arranjo compacto) e LCZ 4 (edifícios altos em arranjo aberto) favorecem a intensificação da ilha de calor urbana (na região central da cidade / centro histórico e nas áreas do entorno imediato), principalmente no período quente-seco. Já a LCZ 8, definida por grandes edificações com área predominantemente pavimentada, continua com ilha de calor urbano em todas as estações (não atenua e não intensifica). Em contrapartida, as regiões que são caracterizadas como LCZ A

configuram oásis por expressarem as temperaturas mais amenas em todas as estações nos anos de estudo.

As relações entre a morfologia urbana e a temperatura do ar, encontradas nesta pesquisa, corroboram as constatações de Ferreira & Duarte (2022), para a região metropolitana de São Paulo. A Figura 3 apresenta a evolução das temperaturas médias nos anos 2011, 2016 e 2019 (esquerda) e a projeção feita para 2021 (direita), para cada zona climática local (LCZ), a partir da simulação dos cenários futuros de ilhas de calor, por meio de redes neurais artificiais do tipo LSMT (PAULA, 2021).

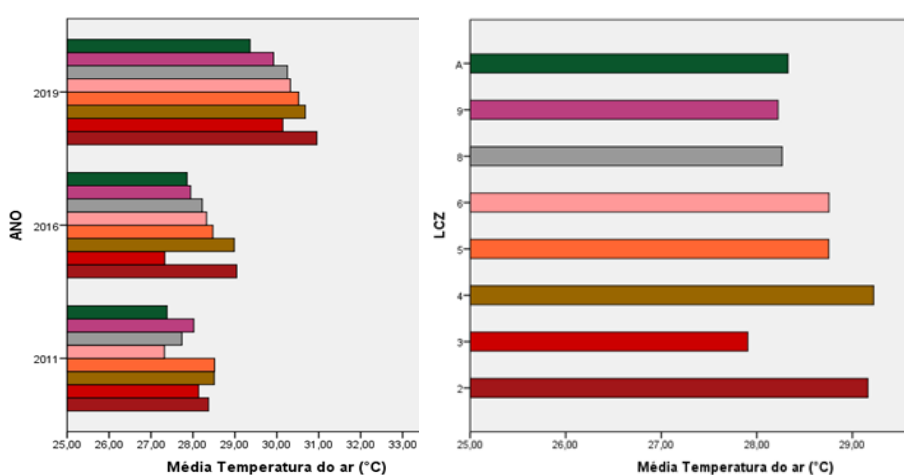


FIGURA 3 - Média da Temperatura do ar nas classes potenciais LCZs no Verão de 2012, 2016 e 2020 (esquerda) e Média da temperatura do ar para o verão de 2021 nas prováveis LCZs.

FONTE: Paula (2021)

2.5. A VEGETAÇÃO ARBÓREA E O MICROCLIMA URBANO

As áreas verdes estão presentes no território urbano de diversas maneiras, destacando-se os parques públicos, geralmente caracterizados por uma massa arbórea mais densa e a composição de tipologias de vegetação variadas; as praças públicas, onde se têm vegetação rasteira, arbustos e árvores de diversas estaturas, e os quintais e terrenos desocupados, sendo que estes estão diminuindo consideravelmente nas cidades que passam por expansão do território urbano; as áreas de preservação, próximo a nascentes ou condições geográficas especiais e, por último, a arborização viária composta por elementos arbóreos na caixa viária do sistema viário urbano, ou seja, nos canteiros centrais ou nas calçadas de vias de trânsito de pedestres ou veículos. Em Cuiabá – MT, o decreto municipal nº 5.144, de 15 de fevereiro de 2012, que dispõe sobre a arborização pública na área urbana e sedes de distrito, considera como arborização pública toda vegetação localizada em vias e logradouros

públicos, com finalidade ornamental, amenizadora climática, purificadora do ar, atenuadora da poluição sonora, deposição de poeira atmosférica e atrativa para a fauna local. Nesta pesquisa, a arborização pública de vias refere-se apenas às espécies arbóreas dotadas de dossel capaz de provocar sombras, não incluindo outros tipos de vegetação, como as rasteiras, arbustivas e arbóreas sem dossel.

A literatura deixa evidente que o uso da vegetação arbórea é um recurso eficiente para mitigar o calor urbano. Seu efeito no microclima ocorre por dois mecanismos: evapotranspiração e sombreamento, o que resulta em diversos benefícios para a qualidade ambiental, destacando-se a redução da temperatura radiante e superficial de dia, da temperatura do ar (a noite); elevação da umidade relativa do entorno imediato; modificação na direção e velocidade do ar; redução da poluição do ar e do ruído urbano e interceptação da água de chuva (RAHMAN e ENNOS, 2016). A radiação solar que incide sobre a vegetação é em sua maior parte absorvida pelas folhas (figura 4), que possuem um alto coeficiente de absorção para a radiação solar (em torno de 0,8), reduzindo o reflexo e protegendo os pedestres da radiação solar direta. Esta absorção pode ser potencializada dependendo da espessura e extensão de sua copa (ROMERO, 2001). Por isso, o sombreamento de árvores promove uma maior diminuição das temperaturas que uma mesma área sombreada por elementos de proteção não vegetados (SHASHUA-BAR, PEARLMUTTER e ERELL, 2009; MICHELON, 2021).

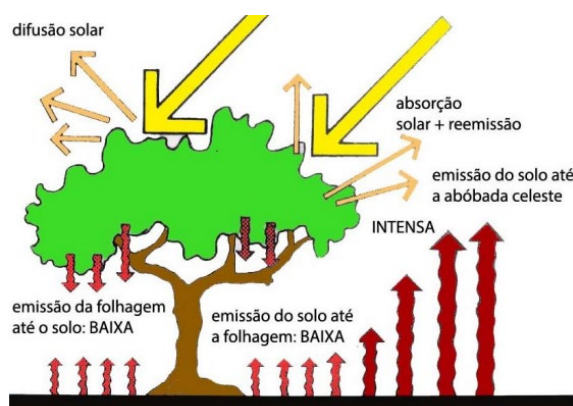


FIGURA 4 - Radiação solar direta, incidente sobre o meio construído
FONTE: Adaptado de Izard e Guyot, 1980, p. 48

O efeito do sombreamento arbóreo também é influenciado pelas características do material da superfície, tais como, densidade, albedo, emissividade e difusividade térmica, conforme ilustrado na Figura 5 (ERELL, 2017).

Considerando todos os tipos de vegetação, a substituição da mesma proporção de área de grama e arbustos por árvores, provoca impacto positivo, embora pequeno, no conforto térmico, velocidade do vento e poluição do ar, e aumenta o espaço de lazer para ocupantes. (RUI et al., 2018)

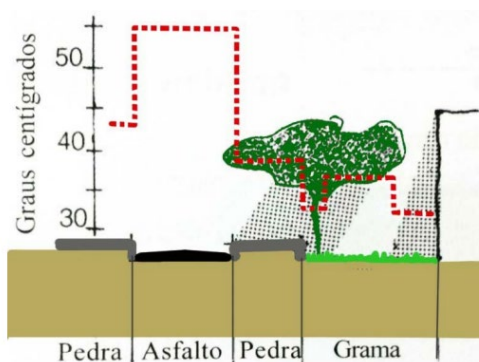


FIGURA 5 - Radiação solar incidente sobre o meio urbano transformada em calor

FONTE: Adaptado de Romero, 2001, p. 48

Assim, as árvores urbanas contribuem para a melhoria da qualidade de vida nas cidades, especialmente sob o ponto de vista do microclima. Além de todos os benefícios neste aspecto, promovem melhorias no bem-estar psicológico e físico (NICODEMO E PRIMAVESI, 2009), na socialização, sem falar nas questões de segurança, conforme afirmam Kuo e Sullivan, (2001, 2016), que relacionaram a presença de vegetação à sensação de segurança, apontando a relação entre áreas mais vegetadas com a menor ocorrência de crimes.

O planejamento da arborização urbana deve ser adequado para as condições climáticas e microclimas das diferentes tipologias morfológicas existentes na cidade e, inclusive deve considerar as mudanças climáticas previstas para o futuro. A avaliação das diferentes espécies arbóreas comumente encontradas e as possíveis estratégias de arborização são informações importantes para o planejamento urbano e a manutenção do microclima urbano, e por isso carecem de estudos mais específicos para a orientação da especificação adequada.

A influência da vegetação nos microclimas do ambiente urbano dependerá de diversos fatores, muitos deles ainda sendo investigados quanto pela comunidade acadêmica, quanto ao impacto de cada fator, em busca de estratégias eficientes na mitigação do calor urbano e da qualidade ambiental em geral. Mas, sem dúvida, a partir da revisão da literatura no tema, a especificação adequada das espécies utilizadas é um fator decisivo, pois estas apresentam características diferentes de

obstrução da radiação pela copa. Um dos atributos mais determinantes é o Índice de Área Foliar (IAF), que expressa a relação da metade do total da área fotossinteticamente ativa das folhas de um indivíduo vegetal pela sua área de projeção no solo (CHEN e BLACK, 1992). O IAF influencia diretamente na interceptação e absorção da luz na copa, assim como nas trocas de calor, consumo de CO₂ e taxas de evaporação com a atmosfera, sendo por isso, um parâmetro-chave para se determinar uma série de processos ecológicos e fisiológicos como a fotossíntese e a evapotranspiração. Os valores de IAF estão diretamente relacionados às variações biofísicas das espécies, como arquitetura do dossel, forma e distribuição das folhas, estágio de desenvolvimento, tipologia fenológica das espécies, variação sazonal da disponibilidade hídrica, assim como as práticas de controle e manutenção da vegetação em áreas urbanas. Portanto, o IAF pode ser apreendido como indicador da eficiência do sombreamento arbóreo, pois quanto maior o valor de IAF maior será a interceptação e a absorção da radiação solar, ou seja, maior a eficiência do sombreamento sobre a superfície urbana. (COELHO FILHO, 2012)

Outro índice que expressa a densidade foliar da vegetação é o LAD (*Leaf Area Density*/Densidade de área foliar), um parâmetro definido como a área foliar unilateral total (m²) por unidade de volume da forma geométrica da copa. (m³), em cada camada horizontal da copa da árvore, cuja somatória resulta no valor do IAF, quando é conhecido. O DAF depende de diferentes microcomponentes como densidade dos galhos, comprimento da copa, número de folhas pela dimensão da copa e obstrução da radiação solar pelo dossel.

2.6. PESQUISAS ATUAIS SOBRE O IMPACTO DA ARBORIZAÇÃO NO MICROCLIMA

Na compilação das pesquisas encontradas na revisão bibliográfica, pôde-se observar diferentes enfoques dados para o estudo da infraestrutura verde urbana, do ponto de vista do microclima e do conforto ambiental. Uma parcela das pesquisas aborda de um modo mais genérico o impacto da vegetação no microclima, como o de Graham et al (2020), que analisaram os efeitos de melhorias da vegetação para a resiliência às ondas de calor, para qual adotaram dois modelos, de mesoescala (modelo de Pesquisa e Previsão meteorológica WRF) e microescala (Envi-met), para

prever processos meteorológicos na atmosfera urbana e no clima local da Grande Toronto/ Canadá. As simulações foram comparadas com as medições realizadas em campo e mostraram que os modelos de mesoescala e microescala são capazes de prever os processos meteorológicos que acontecem dentro do dossel urbano e do clima local. Na sequência, a partir de dois cenários de mitigação, um classificado como verde moderado (MGS) e outro como verde intensivo (IGS), avaliou-se a contribuição dos diferentes incrementos de área vegetada nos modelos de meso e microescala. As simulações de mesoescala mostraram que, com o aumento do dossel de vegetação, há redução da temperatura máxima diária e aumento de 10 a 12% da umidade relativa. Já as simulações de microescala evidenciaram que o aumento do dossel das árvores esfriaria a temperatura do ar em 0,5 °C a 1,4 °C localmente.

Erlwein, Zölch e Pauleit (2021) compararam diferentes níveis de densidades arbóreas e de edificações em cenários hipotéticos classificados como realistas, com menor densidade arbórea, e otimistas, com maior densidade arbórea, e alcançaram resultados positivos no índice que mede a percepção térmica de conforto do ser humano, o Physiological Equivalent Temperature (PET). O estudo apontou uma redução na percepção térmica em dias quentes, entre 7,6 e 9°C para o cenário de menor densidade arbórea, e 8,6 a 10°C para o de maior densidade arbórea. Os autores afirmam que a relação dos impactos dos telhados verdes e fachadas verdes para os resultados de resfriamento do PET são insignificantes, sendo limitado à proximidade das fachadas dos edifícios.

Stark, Duarte e Pauleit (2023), analisaram cinco praças em Munique, na Alemanha, para discernir como o conforto térmico humano é afetado pelo traçado e composição da vegetação, durante o ano, tendo em vista o tamanho, tipo de pavimento e número de árvores das áreas de estudo selecionadas. Os resultados sugeriram que a morfologia urbana tem um alto impacto no conforto térmico das praças urbanas, mostrando que é necessário considerar diversos arranjos vegetais combinados com características da morfologia urbana para otimizar o conforto térmico humano.

Alguns estudos reforçam que as árvores são uma excelente estratégia para controlar o conforto térmico ao ar livre e mitigar os efeitos das ilhas de calor urbana, no entanto, é necessário tomar cuidado com a permeabilidade do dossel em áreas de

circulação de pedestres para evitar que obstruam o fluxo de vento, podendo causar maior umidade e estagnação do ar e reduzir as perdas por convecção, o que resulta em mais desconforto térmico para o homem (PRIYA e SENTHIL, 2021; ZHANG et al., 2018). Sendo assim, não basta distribuir espécies arbóreas aleatoriamente na cidade, uma vez que o desempenho vai depender de vários fatores, como tamanho ideal, especificação das espécies arbóreas para o tipo de clima em questão, da densidade foliar, das dimensões da caixa viária e do cânion urbano, além de outras características biofísicas da espécie arbórea, como altura, cobertura do solo, forma e permeabilidade da copa, que podem influenciar o ambiente térmico (SHINZATO e DUARTE, 2018, 2019; ABREU-HARBICH, 2015; NOURI et al, 2018).

Diversas outras pesquisas, abrangendo diferentes objetivos, investigaram os aspectos que devem ser considerados na escolha das espécies arbóreas e do arranjo entre elas em vias urbanas, como por exemplo, Miranda, (2018), que analisou a influência de diferentes arranjos arbóreos para áreas de estacionamentos, e Abreu-Harbich, Labaki e Matzarakis, (2015), que avaliaram o efeito de diferentes arranjos e espécies arbóreas no conforto térmico humano para climas tropicais. Segundo a mesma linha de pesquisa, Nouri et al, (2018), analisaram o impacto da espécie *Tipuana tipu* em diferentes cânions urbanos, enquanto Rui et al., (2018) investigaram, o impacto do arranjo e da densidade arbórea no microclima e conforto térmico humano, relacionando aspectos do índice de cobertura arbórea e da composição entre espécies arbóreas, arbustivas e rasteiras, a partir da simulação de cenários hipotéticos. Os resultados demonstraram que o aumento das áreas verdes, com distribuição proporcional de diferentes tipos de vegetação, pode aumentar a capacidade de resfriamento local e melhorar o conforto térmico geral, diminuindo a temperatura média em até cerca de 0,5 °C e o voto médio estimado (PMV) em até cerca de 20%, em comparação ao cenário não vegetado. Com objetivo semelhante, Zhang et al., (2018) buscaram uma relação entre a altura total das árvores e a distância entre elas, denominada de “Aspect Ratio of Trees” (ART), para descrever a distribuição das árvores. A comparação de três arranjos de árvores revelou que arranjos arbóreos com ART menor que dois, devem ser uma prioridade para mitigar ambientes quentes devido à grandes efeitos na redução do PET no verão. Contudo, é importante destacar que o estudo se deu em clima de inverno frio e verão quente,

diferente do clima estudado nesta pesquisa, por isso apenas serviu de base para definições preliminares a serem testadas nos cenários propostos para esta tese. Já, Shinzato e Duarte, (2019), quantificaram por meio de simulações computacionais, o efeito microclimático da vegetação com diferentes características do dossel arbóreo e do IAF, concluindo que os valores da temperatura radiante média são os mais impactados sob o dossel da vegetação arbórea, influenciando diretamente o conforto térmico. Os resultados demonstraram também que o sombreamento provocado pelas copas influencia diretamente as temperaturas superficiais logo abaixo do dossel, que por sua vez também vão afetar a temperatura radiante média. Na área de estudo, verificou-se que no sombreamento pelas copas houve uma variação da temperatura superficial abaixo do dossel das árvores de copas elípticas entre 39 °C (para IAF 1 m²/m²) e 49 °C (para IAF 5 m²/m²), atingindo cerca 0,5 °C a mais nestas variações, quando as copas eram esféricas (SHINZATO e DUARTE, 2018).

Corroborando estes estudos, Wang et al (2019) reforçam que, para minimizar os impactos da rápida urbanização e das consequentes mudanças climáticas, é fundamental pensar em uma regulação microclimática mais efetiva por árvores urbanas, e afirmam que maximizar suas funções de resfriamento, umidificação e sombreamento requer uma compreensão exata dos mecanismos subjacentes afetados pelas condições climáticas e pelas características da floresta urbana, tais como o porte das árvores e diferenças composicionais. Entre as conclusões desta pesquisa, destaca -se: 1) As regiões mais urbanizadas apresentaram menor resfriamento microclimático do dossel e interceptação de radiação; 2) O tamanho da árvore, a composição e as condições climáticas determinam a maior parte da variação da regulação do microclima; 3) Conservar árvores grandes e uma manutenção cuidadosa pode maximizar a regulação. 4) Espacialmente, o impacto no resfriamento do ar é mais expressivo nas áreas adjacentes horizontalmente às árvores (1,7 °C a 4,0 °C) que verticalmente (-1,71 °C a 0,33 °C) e que no resfriamento do solo (0,28 °C a 2,17 °C); 5). O efeito umidificador variou de -0,34% a 7,30%, e a radiação total interceptada variou de 11,07 kLux a 45,95 kLux. Estes resultados revelam que a maximização da regulação microclimática por florestas urbanas no nordeste da China poderia possivelmente ser alcançada através de arborização orientada a funções específicas e um aumento da conservação de grandes árvores existentes. Informações

mais precisas como estas podem favorecer a decisão política da administração local sobre a infraestrutura verde urbana.

Diante do exposto, fica evidente a complexidade que envolve a relação entre a vegetação e o microclima e os fatores que impactam no conforto térmico humano, reforçando ainda mais a necessidade de se realizar pesquisas que contribuam para a implementação de estratégias cujos impactos sejam testados e comprovados cientificamente, e comunicados de maneira integrada aos processos de tomadas de decisões da gestão urbana.

As principais conclusões extraídas desses estudos, quanto às variáveis da arborização que impactam no conforto térmico: altura total, diâmetro e tipo de dossel, IAF e o distanciamento entre os espécimes arbóreos, foram sintetizadas:

- a) Arranjo esparso deve prevalecer sobre arranjo denso. Ou seja, arranjos mais uniformes em todo espaço, ainda que espalhados, tiveram respostas melhores que concentrações de massas apenas entre blocos (ZHANG et al., 2018);
- b) Árvores com copas mais largas permitem uma maior capacidade de mitigar o estresse ao calor do que as árvores de copa menores, devido ao aumento da área de sombra (ZHANG et al., 2018);
- c) Árvores altas com um grande IAF e diâmetro do dossel devem ser uma prioridade para melhorar o conforto dos ambientes externos (SUN et al, 2017; ZHANG et al., 2018);
- d) Árvores com IAF maior têm mais impactos nos efeitos de resfriamento do ar (SHINZATO; DUARTE, 2018).

Percebe-se que a arborização viária apresenta desafios intrínsecos da complexidade urbana, por impactar diretamente no funcionamento dos fluxos de pedestres e veículos, diferentemente do florestamento de parques e praças. Por isso a importância das investigações para se descobrir soluções adequadas de arborização urbana capaz de melhorar o conforto térmico em espaços abertos. Apesar das contribuições dos estudos, estes foram realizados em outros locais com climas diferentes do local de estudo. Por isso, as variáveis que envolvem as especificações de um plano de arborização, como porte das espécies, distribuição espacial e densidade foliar, precisam ser testados para o clima e características morfológicas

construtivas locais, com a finalidade de se implementar as estratégias com confiabilidade quanto às melhorias almejadas no conforto térmico.

2.7. PLANEJAMENTO DA ARBORIZAÇÃO URBANA

Apesar dos benefícios conhecidos para o meio ambiente, o manejo inadequado das espécies e as incompatibilidades ocorridas entre a arborização e os equipamentos urbanos geram dificuldades para a população e para a gestão pública. A infraestrutura verde de uma cidade é um serviço que consome energia e recursos, além disso, podem agravar a poluição através do uso de agrotóxicos, por isso contribuem para diminuição das árvores nas cidades. Diante da necessidade percebida em se implantar um projeto de arborização que atenda a diversos requisitos multifatoriais urbanos, envolvendo questões de manutenção, segurança e mobilidade nos espaços públicos urbanos, muitos municípios elaboram um documento em forma cartilhas sobre a arborização urbana em suas regiões de atuação, contendo nestas, informações relevantes para o planejamento dos municípios, como espécies adequadas, espaçamento entre árvores, dimensionamento dos espaços destinados aos plantios entre outros dados relacionadas ao tema. Todos esses atributos da arborização viária devem ser observados no momento de planejamento da arborização das áreas e vias públicas. Por isso é fundamental que os planejadores tenham o conhecimento do comportamento de cada espécie que será utilizada no projeto de arborização dos espaços públicos, uma vez que, essa vegetação deverá contribuir para a mitigação dos efeitos causados pela urbanização e consequentemente, aumentando o conforto ambiental e qualidade de vida da população. Embora muitos municípios disponham de plano de arborização, o que se observa é a falta de informação voltada para a mitigação do calor urbano, restringindo-se ainda às questões biológicas das espécies e funcionais no sentido de compatibilizar a arborização com os equipamentos urbanos. Desse modo, percebe-se a ausência de índices e parâmetros que orientem em termos quantitativos a proporção de área arbórea necessária para se atingir níveis de conforto térmico, em relação a uma determinada área de implantação.

Em Cuiabá, o Decreto Municipal Nº5.144, de 15 de fevereiro de 2012, dispõe sobre a arborização pública na área urbana e sedes de distrito do município, considerando a necessidade de estabelecimento de normas que visem a redução de

conflitos entre a arborização urbana, com vistas à segurança e a acessibilidade da população, o funcionamento das redes de infraestrutura instaladas e circulação de veículos das vias públicas da área urbana. No entanto, assim como na maioria das diretrizes voltadas para a arborização pública do Brasil, não há citação ou referência alguma a respeito de indicadores numéricos para a qualificação ambiental de espaços arborizados, relacionados com outros elementos construtivos e equipamentos urbanos como, vias, calçadas, pátios e edifícios.

Embora, as diretrizes do decreto tenham influenciado e embasado algumas decisões importantes do método desta pesquisa, principalmente nas especificações dos atributos das espécies arbóreas e características do arranjo, não foi um requisito obrigatório atendê-lo, já que não é objetivo deste trabalho propor um projeto de arborização, tampouco especificar determinadas espécies. O objetivo é investigar os atributos da arborização que impactam no conforto térmico dos espaços viários, para contribuir, inclusive, na revisão de normas existentes e elaboração de novas normas e diretrizes, pautadas em achados científicos.

O decreto recomenda várias espécies para arborização viária, que são especificadas em função das dimensões das calçadas e a existência de rede de energia elétrica, porém não serão apresentadas por não fazer parte do escopo desta pesquisa. Algumas estão especificadas no capítulo de materiais e métodos, como exemplificação de espécies recomendadas, cujas propriedades serviram de referência na definição de algumas propriedades e do arranjo dos cenários analisados. Em caso de elaboração de planos de manejo da arborização viária, as recomendações do decreto devem ser consultadas e utilizadas em conjunto com os resultados desta pesquisa, pois consideram conhecimentos de áreas diferentes, igualmente importantes.

2.8. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO COMO FERRAMENTA PARA O PLANEJAMENTO URBANO

Diante do panorama atual exposto até aqui, fica evidente a necessidade de se criar ferramentas para o planejamento urbano, principalmente a possibilidade de exploração de meios de análise do espaço urbano, por meio de instrumentos que promovam dinamicidade, qualidade para visualização de cenários e manipulação

paramétrica de dados. Neste sentido, percebe-se o incremento na abordagem paramétrica aplicada ao planejamento urbano, juntamente com ferramentas computacionais de visualização espacial que permitem correlacionar dados dos espaços urbanos e/ou serviços urbanos. O avanço deste tipo de ferramenta contribui, pois permite simular diversas possibilidades de modificações do espaço urbano, principalmente se utilizado em conjunto com a tecnologia da informação, a partir da qual profissionais variados ou qualquer cidadão tenha acesso a estas informações, visualizando espacialmente as possibilidades de intervenção no espaço urbano e as melhorias decorrentes a partir destas. Assim, muitas ferramentas têm sido criadas e disponibilizadas para a população com o objetivo de informar diferentes aspectos do espaço urbano.

Contudo, a base para este tipo de sistema de informação precisa ser alimentada a partir de dados técnico-científicos. Neste contexto, os índices têm relevância acadêmica de grande abrangência, podendo contribuir também no âmbito legislativo, como um ferramentas que auxilie no processo de tomadas de decisões para análise de expansão urbana, com enfoque em variáveis de uso e ocupação do solo e vegetação urbana.

A premissa básica para a definição dos indicadores é de que forneçam dados acerca da distribuição da massa arbórea e sua relação proporcional com massa edificada. Peixoto et al., (1999) define como “densidade” a relação que um elemento arbóreo tem com relação ao outro, e a “disposição dos indivíduos” identifica como as árvores estão adensadas, em uma visão geral do conjunto, como na Figura 6. A maneira como elas estão dispostas na malha urbana pode influenciar em vários fatores, como por exemplo, no microclima urbano. O termo “densidade vegetada” estabelece-se como a massa vegetada presente em uma porção de área urbana delimitada, considerando a área ocupada e a forma de agrupamento dos elementos arbóreos. (NEVES e LABAKI, 2022)



FIGURA 6 - Croqui esquemático das formas de agrupamento arbóreo
FONTE: Peixoto de at., (1995)

Tendo em vista o levantamento bibliográfico realizado neste estudo, foram encontrados diversos índices que relacionam a densidade arbórea com a densidade construtiva ou com uma determinada área de estudo. Ainda não há uma definição clara de um método de cálculo para um índice de densidade arbórea. Observa-se na comunidade acadêmica, que cada estudo estabelece uma metodologia, dependendo do objetivo e do parâmetro a ser avaliado, considerando que essa ainda é uma área de estudo em expansão. Nota-se a ausência, ou ínfima citação, de um conjunto padrão de índices de quantificação e análise de áreas verdes urbanas, o que pode gerar dúvidas e equívocos em análises comparativas ou na aplicabilidade de estratégias por ações da gestão urbana. Silva Filho et al., (2005) propuseram o índice de Floresta Urbana (IFU) para classificar áreas de acordo com a quantidade de cobertura arbórea por meio da utilização de imagem de alta resolução multiespectral. Depois, Dobbert (2015) propôs um ajuste ao IFU, para considerar a distribuição da vegetação inserido no meio urbano, e não apenas a quantidade de área de cobertura arbórea, possibilitando assim qualificar de forma mais eficaz a arborização existente nas cidades e as novas áreas a serem arborizadas. (OLIVA, 2016)

Alguns índices adotados em pesquisas recentes, extraídos principalmente das contribuições de Neves e Labaki (2022) e Ferreira et al., (2023), foram analisados com o intuito de se definir um índice que melhor atenda à metodologia e aos objetivos desta pesquisa, apesar de exigir adaptações para a situação específica da área de estudo em questão. A seguir serão apresentados os principais.

a) IDVAT - Indicador de Densidade Vegetada por Área Total

Estabelece uma relação proporcional e ponderada dos adensamentos vegetados presentes na área, de acordo com sua escala de influência na mitigação dos microclimas urbanos. O intuito primordial deste indicador é apresentar a proporção existente de densidade vegetada dentro de uma região urbana delimitada. Indica-se não somente contabilizar a quantidade de cobertura vegetal presente, como também, propor ponderá-las de acordo com o tipo arbóreo predominante em cada uma, podendo ser de porte pequeno (vegetação rasteira ou arbustiva baixa); de porte médio (vegetação arbustiva alta; Árvores com até 5 a 6 metros de altura aproximadamente) e de porte grande (Árvores maiores que 7 metros de altura), conforme detalhado na imagem 7, Equação 1 e Tabela 5. Sendo assim, a proporção torna-se mais justa mediante a premissa da significância, que adensamentos arbóreos de grande porte são os mais importantes para promover sombreamento e amenização das temperaturas (ABREU e LABAKI, 2010; LABAKI et al., 2011; SILVA et al., 2015).

As Áreas Verdes (AV's) a serem consideradas são as que tenham expressividade de cobertura vegetal, cujas tipologias podem ser encontradas em domínios públicos (praças, bosques, parque, APA's - Áreas de Preservação Ambiental, cinturões verdes, bosques, quintais, canteiros, tetos e paredes vegetadas; e privadas (praças, bosques, quintais, tetos e paredes vegetadas). (NEVES e LABAKI, 2022)

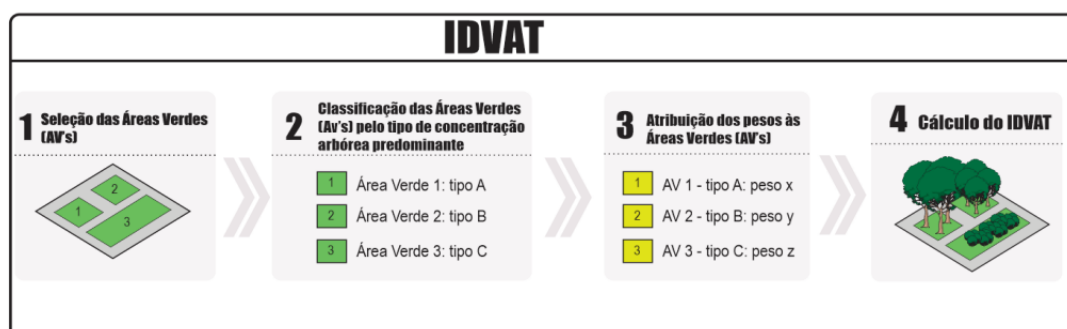


FIGURA 7 - Esquema de cálculo do Indicador IDVAT.

FONTE: Neves e Labaki (2022)

$$IDVAT = \frac{(\sum AV's \text{ tipo A} \times p_x) + (\sum AV's \text{ tipo B} \times p_y) + (\sum AV's \text{ tipo C} \times p_z)}{\text{Área Total do Recorte Urbano}} \quad (1)$$

Onde:

AV = Área Verde

p = peso atribuído ao tipo de predominância arbórea, conforme demonstra a Tabela 1.

TABELA 5 - Tipos de concentrações arbóreas consideradas para o IDVAT e pessoas atribuídos para o cálculo do índice.

TIPO	TIPOS DE CONCENTRAÇÃO O ARBÓREA	PORTE	TIPOS ÁRBOREOS E ALTURA ESTIMADA	TIPOLOGIA DA COPA	PESO ATRIBUIDO
C		PEQUENO	Rasteira; Arbustiva baixa	Não gera sombreamento	0.1
B		MEDIO	Arbustiva alta; Árvores de aprox. 5 a 6 metros de altura	Não gera sombreamento o suficiente para o pedestre	0.3
A		GRANDE	Árvores maiores que 7 metros de altura (aprox.)	Gera sombreamento o suficiente para o pedestre	0.6.

FONTE: Neves e Labaki (2022). Adaptado pela autora, 2023

b) IDVAC - Indicador de Densidade Vegetada por Área construída

Este índice tem por base o modelo empírico formulado por Duarte (2000), no qual a autora estabeleceu um índice considerando dados de densidade construída em proporção à quantidade de cobertura vegetal e corpos d'água. Permite apontar quantitativamente a proporção existente entre o adensamento construtivo e o vegetado de um dado recorte urbano, e é um complemento do índice anterior. Portanto, depende do IDVAT, pois o relaciona com o parâmetro FSI, que é o quociente da área construída e da área de recorte urbano delimitada para o estudo (Equação 2). A área construída considera a área total construída dentro do recorte urbano estabelecido, ou seja, multiplica a área de ocupação do edifício na superfície pelo número de pavimentos das edificações, conforme explicitado nas Equações 2 e 3. (NEVES e LABAKI, 2022)

$$FSI = \frac{\sum \text{Área Construída Total}}{\text{Área Total do Recorte Urbano}} \quad (2)$$

$$IDVDC = \frac{IDVAT}{FSI} \quad (3)$$

Os dois índices mencionados podem ser calculados a partir de dados obtidos in loco ou a partir de mapas e outros tipos de fontes. Atualmente, é mais usual a

obtenção de dados da superfície terrestre a partir do sensoriamento remoto, que foi possível a partir do avanço nesta área do conhecimento, principalmente após 1991, quando a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) investiu no desenvolvimento de satélites e outras ferramentas para o estudo intensivo do planeta. O principal objetivo, entre outros, era oferecer suporte para o monitoramento da agricultura e das florestas, disponibilizando imagens de sensores orbitais capazes de permitir inferências sobre a dinâmica espaço-temporal da superfície da Terra (RISSO et al, 2009; NASA, 2008). Com este avanço na tecnologia de sensoriamento remoto, as imagens também passaram a servir de suporte para o monitoramento das superfícies urbanizadas, servindo de ferramenta para os estudos na área do planejamento urbano e da climatologia urbana.

Os próximos índices apresentados, são obtidos a partir de imagens satélites.

c) NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI (*Landsat Normalized Difference Vegetation Index*), disponível também no MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), é usado para quantificar o verde da vegetação e é útil na compreensão da densidade da vegetação e na avaliação de mudanças na saúde das plantas. O NDVI quantifica a vegetação medindo a diferença entre o infravermelho próximo, que a vegetação reflete fortemente, e a luz vermelha, que a vegetação absorve. Se os valores são negativos, é provável que seja água e se for próximo a um, há uma grande possibilidade de que sejam folhas verdes densas. A vegetação saudável (clorofila) reflete mais infravermelho próximo (NIR) e luz verde em comparação com outros comprimentos de onda. Mas absorve mais luz vermelha e azul. (USGS, 2023; GISGEOGRAPHY, 2023). Este índice tem sido utilizado nas avaliações da superfície urbana, como estratégias de monitoramento da superfícies urbana, como, por exemplo, desmatamentos e a expansão do território urbanizado, servindo também como parâmetro de análise nos estudos do microclima urbano que relacionam os índices de vegetação.

d) EVI - Enhanced Vegetation Index

Com o lançamento do primeiro sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) em 1991, Huete et al. (1997) propuseram um novo

Índice de Vegetação (IV), denominado *Enhanced Vegetation Index* (EVI). A disponibilização rápida e ininterrupta das imagens MODIS permite análises regulares da vegetação em nível global, incluindo a avaliação de aspectos fenológicos da vegetação e a detecção de mudanças de uso e cobertura do solo (HUETE et al., 2002). A estreita correlação entre a dinâmica espaço-temporal da vegetação e os IVs, corrobora o potencial deles no monitoramento da cobertura vegetal sobre extensas áreas. (RISSO et al., 2009)

A inovação na área da tecnologia da informação nas últimas décadas detém um papel fundamental, haja vista que ocorreu em paralelo ao processo de crescimento das cidades em expansão populacional e/ou territorial. Diante da necessidade de um planejamento urbano mais eficiente, no que tange à análise dos cenários para tomadas de decisões, o *City Information Modeling* (CIM) apresenta-se como parte da proposta de ferramentas voltadas para estudos urbanos que facilitam a manipulação paramétrica de quesitos urbanos sob uma abordagem multi-cenários. Em termos simples, o CIM é o *Building Information Modeling* (BIM) do urbanismo, e pode ser considerado como “uma abordagem computacional que mensura indicadores e visualiza em cenários as decisões de planejamento – incluindo a adoção de parâmetros urbanísticos – ao longo do processo”. (AMORIM, 2015)

Há poucos anos havia poucos dados disponíveis sobre a superfície terrestre, o que era um obstáculo para as tomadas de decisões no que tange a gestão urbana. Porém, atualmente, com o avanço da tecnologia dos diversos métodos de levantamentos, o maior desafio está na organização e utilização dos dados, que são promissores para a criação de infraestruturas de dados espaciais que possam fornecer entradas de dados para as mais diversas ferramentas de análise e gestão territorial.

Atendendo a esta demanda, algumas ferramentas computacionais têm sido testadas com êxito no que diz respeito à inovação no modo de análise urbana, como por exemplo a “MUtopia”, uma plataforma de gerenciamento de informações da web, que gerencia dados urbanos, tanto espacialmente quanto quantitativamente, a partir de um modelo geoespacial, rastreando fluxos em termos de energia, resíduos, água, transportes, demonstrando os impactos sociais, ambientais e econômicos. Em princípio foi desenvolvido com estes aspectos, depois foi incorporado o “módulo verde”, que informa sobre o impacto da vegetação no contexto urbano, de forma

abrangente (ONG, 2017). Outro exemplo é o *CityZoom* (TURKIENICZ et al., 2008) e, em especial, o *CityMetrics* (LIMA, 2017), cuja premissa é apresentar a possibilidade de investigar variáveis urbanísticas, com o enfoque sobre os parâmetros de: caminhabilidade; acesso a serviços (comércio, institucional, transporte); uso misto das edificações (uso comercial e residencial integrados, e não setorizados); uso dos indicadores *Spacematrix* para mensuração da densidade (edificada e de rede viária). Oh et. al., (2020) com o objetivo de entender a magnitude e as características da ilha de calor urbano (ICU) em Seul, desenvolveram dois modelos de aprendizado profundo, um modelo de ICU temporal e de ICU espacial, utilizando dados relacionados a elementos meteorológicos (temperatura do ar) e albedo de superfície para treinar e testar os modelos. Além disso, desenvolveram e propuseram uma nova métrica, ICU-hora, que quantifica o número total de horas que o ICU existe em uma determinada área. Os resultados demonstraram que os métodos utilizados são uma ferramenta útil, que pode ser utilizada para analisar e prever com precisão o comportamento da ICU em áreas urbanas.

Assim, ferramentas como estas podem dar ênfase nos dados paramétricos de áreas construídas e vegetadas, para auxiliar a tomada de decisão de pesquisadores e planejadores na análise de problemas urbanos. Como exemplo têm-se no Brasil o Indicadores para o Verde Urbano – IVU (LABAKI, 2022), que permite analisar, mensurar e apontar quanti-qualitativamente o adensamento construtivo correlacionado com o adensamento vegetado presentes em determinadas áreas de interesse. A grande vantagem é possibilitar a análise de situações atuais e futuras, assim como a combinação dos dados de entrada para fornecer cenários precisos em tempo hábil. Os Índices de Vegetação (VIs) são adimensionais. Valores elevados dos VIs indicam áreas cobertas por proporções substanciais de vegetação saudável (Campbell, 2008).

2.9. O CONFORTO TÉRMICO EM AMBIENTES EXTERNOS

O conforto térmico é a condição da mente que expressa a satisfação com o ambiente térmico, considerando as grandes variações individuais, fisiológicas e psicológicas, de pessoa para pessoa, quanto às condições ambientais necessárias para

satisfazer a todos em um espaço, portanto, há uma grande subjetividade envolvida no que diz respeito à avaliação da percepção térmica. (ASHRAE 55, 2022)

O nível de conforto térmico humano ao ar livre é uma variável importante para se qualificar o microclima urbano, estão diretamente relacionados. Os primeiros estudos sobre o conforto humano iniciaram no século XX, com a proposição de índices que expressam a sensação de conforto. Assim, os índices de conforto térmico integram aspectos relacionados às trocas de calor entre corpo e ambiente de forma a simplificar a interpretação da condição térmica.

Entre os índices mais utilizados em pesquisas científicas estão o ITS (Índice de Estresse Térmico) (GIVONI, 1963), o PMV (*Predicted Mean Vote*) (FANGER, 1970), usado amplamente para o cálculo de conforto humano interno, e o índice PET (*Physiological Equivalent Temperature*) e o UTCI (Índice Universal de Clima Térmico).

No entanto, os índices foram criados para avaliação de conforto térmico em ambientes internos. Posteriormente, Pearlmutter (2007), adaptou o ITS (Índice de Estresse Térmico), que representa a razão entre a taxa de suor secretado por uma pessoa necessária para manter o equilíbrio térmico e a eficiência de resfriamento do corpo, de acordo com a velocidade do vento, umidade relativa e características do vestuário, para ambientes externos. Além disso, as faixas de temperaturas consideradas para classificar as sensações de conforto foram baseadas na população europeia, acostumada ao clima europeu, mas que estão atualmente desatualizadas, indicando a necessidade de adaptar as categorias de sensações térmicas para as áreas de estudo, pois há diferença na percepção térmica entre populações, pois o clima e os hábitos se diferem, por isso as necessidades de adaptações térmicas também são diferentes (CELLEJAS et al., 2020).

Atualmente, o PET é um dos mais recomendados para avaliar níveis de sensações térmicas. É definido como a temperatura equivalente à temperatura do ar na qual, em uma situação típica interna, o balanço térmico do corpo humano é mantido, com temperaturas do centro do corpo e da pele iguais às da situação em questão. (HOPPE, 1999; 2000).

A Tabela 6 compara a faixa interpretativa de sensação térmica consideradas nos índices UTCI, PET, proposto originalmente por de Matzarakis and Mayer (1996), e PET calibrado, conforme Callejas et al (2020).

TABELA 6 - Categorias de stress térmico do UTCI e do PET original e calibrado para o clima local

Pet Original ⁽¹⁾	PET calibrado	Faixa de valores UTCI	Sensação Térmica
Para clima local ⁽²⁾			
Acima de 41	-	Acima de 46 °C	Calor extremo
35 a 41 °C	> 43.6 °C	38 - 46 °C	Calor
29 – 35 °C	37.1 - 43.6 °C	32 - 38 °C	Calor Moderado
23 - 29 °C	30.6 - 37.1 °C	26 - 32 °C	Calor leve
18 - 23 °C	24.1 - 30.6 °C	9 - 26 °C	conforto
13 - 18 °C	< 24.1 °C	0 - -9 °C	Frio leve
8 - 13 °C	-	-9 - -13 °C	Frio moderado
4 - 8 °C	-		Frio
< 4 °C	-		Frio extremo
Abaixo de -40 °C			

FONTE: Adaptado pela autora de Matzarakis and Mayer (1996) ⁽¹⁾ e Callejas et al (2020) ⁽²⁾

Nos ambientes externos, a análise dos efeitos da combinação de vários elementos climáticos pode ser mais complexa que em condições internas, devido às interações peculiares entre os elementos climáticos em locais e estações específicas (GIVONI et al., 2003). Segundo Johansson et al. (2014) O conforto térmico ao ar livre, em oposição ao conforto interno, é um campo de pesquisa relativamente novo, que vêm crescendo desde os anos 2000, em busca de métodos de avaliação e índices de conforto que expressem a sensação de conforto, considerando toda a sua complexidade e subjetividade. A variável climática mais determinante para a avaliação da sensação térmica é a Temperatura Radiante Média (Trm), pois afeta o balanço térmico do corpo humano e influencia diretamente o índice PET. (MATZARAKIS, RUTZ E MAYER, 2006; RAHUL, MUKHERJEE E SOOD, 2020 e JAVADI, 2021)

Em se tratando de conforto térmico em ambientes urbanos, sabe-se que as plantas provocam respostas psicológicas positivas nas pessoas, independente da cultura, classe social e etnia. Há muitos anos, diversos estudos apoiam a tese da importância da vegetação para a qualidade do ambiente urbano, refletindo no

conforto térmico e o bem-estar humano, em diversos âmbitos, tanto da melhoria da saúde física quanto de habilidades cognitivas (DOBBERT, 2015; KULKA, 2014; BAPTISTA, 2014).

2.10. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional permite a avaliação térmica de cenários hipotéticos, sem a qual seria impossível avaliar cenários futuros ou avaliar propostas de intervenções nos espaços arquitetônicos e urbanos. Por isso, é de grande importância nas pesquisas científicas de climatologia urbana, ao contribuir com investigações de cenários futuros e avaliar os impactos que as ações humanas causam no microclima urbano, como adensamento construtivo, desmatamentos, alteração das superfícies, assim como também avaliar os efeitos positivos das estratégias de mitigação do aquecimento urbano. Salientando a natureza dinâmica dos processos urbanos, cujas mudanças são constantes, seria inviável o aprofundamento em análises termodinâmicas sem o uso da simulação computacional, pois pesquisas nesta área se limitariam a avaliar áreas existentes ou a calcular as variáveis climáticas por meio de equações matemáticas de grande complexidade.

Entre alguns softwares utilizados para a simulação termodinâmica de ambientes urbanos, destaca-se o Envi-met (BRUSE; FLEER, 1998; ENVI-MET - DECODE URBAN NATURE WITH ENVI-MET SOFTWARE, 2021), um programa que permite gerar um modelo microclimático tridimensional e capaz de simular as interações entre superfície, vegetação e atmosfera, baseado nas leis fundamentais de dinâmica dos fluidos e termodinâmica. É composto por módulos interativos, pelos quais é possível especificar tipos de superfície e materiais de construção, bem como vegetação, para analisar cientificamente os impactos das estratégias de projeto na área de estudo e ajudar a mitigar fatores como o estresse térmico urbano.

Em relação à vegetação, esse modelo determina a temperatura média nas folhas por meio do cálculo do balanço térmico que considera a condição climática e fisiológica da planta. O cálculo do fluxo de radiação inclui sombreamento, absorção e reemissão da radiação por outras partes da planta. Portanto, o Envi-met não considera apenas o efeito de sombreamento das árvores, mas também o processo

fisiológico da evapotranspiração. Por isso, é fundamental um correto ajuste nos dados de entrada do modelo de solo, como as características do tipo do solo (teor de água na saturação, na capacidade de campo, no ponto de murcha e condutividade hidráulica), os dados de temperatura do solo e umidade nas diferentes camadas, fundamentais para o modelo reproduzir o comportamento das plantas (SHINZATO & DUARTE, 2018).

O modelo é usado para análise ambiental e planejamento urbano em diversas tipologias climáticas do globo terrestre e para especificidades no contexto da climatologia urbana. Os processos fisiológicos da vegetação podem ser avaliados com uma alta resolução espacial, pois a vegetação pode ser representada de uma maneira muito detalhada, permitindo múltiplas comparações de cenários que de outra forma seriam impossíveis no mundo real. O potencial do software foi validado e seus cálculos verificados em muitas publicações científicas e estudos independentes (ENVI-MET, 2022; WANLU et al., 2022; ELRAOUF et al.; 2022; CORTES et al., 2022). Liu et al (2021) analisaram 79 (setenta e nove) estudos recentes e relevantes que adotaram o Envi-met (v. 4 e superior) para avaliação do desempenho térmico de infraestrutura verde (vegetação) e azul (corpos d'água), investigando as 3 (três) partes essenciais de avaliação que é a modelagem, validação e simulação de cenários, reforçando a eficácia e adequação desta ferramenta para os estudos do microclima urbano. No entanto, algumas limitações do software, ainda não foram solucionadas, como, por exemplo o cálculo da influência do calor antropogênico e dos fluxos radiativos, que ainda não tem a mesma precisão que a realidade.

Os dados de entrada são de extrema importância para o cálculo correto do modelo, devendo ser o mais semelhante possível da situação real. Consistem em todos os aspectos que influenciam no microclima: a forma das edificações, os materiais dos sistemas construtivos de vedação vertical e horizontal, os tipos de cobertura do solo e as propriedades da vegetação. Os dados de saída são as variáveis climáticas locais (temperatura, umidade e velocidade do ar, temperatura média radiante, entre outros).

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS: CLIMA E RELEVO

A área de estudo está inserida na cidade de Cuiabá (MT), localizada na fronteira do Pantanal com o Cerrado, no estado de Mato Grosso, latitude: 15° 35' 45" S, Longitude: 56° 05' 48" O e Altitude: 193 m (Figura 8). As condições térmicas do clima de Mato Grosso são comandadas em função de sua posição continental, extensão latitudinal, relevo, e da atuação de sistemas de circulação atmosférica sobre o Estado (MAITELLI, 1994), resultando em duas estações sazonais bem definidas no decorrer do ano: a estação chuvosa (quente e úmida) ocorre na primavera/verão (7 a 8 meses), entre outubro e abril, e a estação seca (quente-seca) ocorre no outono/inverno (4 a 5 meses), entre maio e setembro. (MONTEIRO, 1951; MACHADO et al., 2015). O perfil climático, segundo a classificação de Köppen Geiger, é o tropical continental semiúmido do tipo Aw. Já, de acordo com a classificação de Tarifa (2011), Cuiabá se insere na Subunidade Intrarregional Megatérmica Úmida dos Baixos Planaltos e Depressões ('IIID3'), dentro da Unidade Climática Regional Tropical Continental Alternadamente Úmida e Seca. As principais características são: condição de elevado aquecimento do solo, e consequentemente, fortíssimos aquecimentos da camada de ar próxima da superfície, que se justifica devido à baixa altitude, quase sempre planas ou com o relevo suave de colinas amplas, responsável também pela diminuição considerável nos totais de chuva. Por esta razão, estas realidades climáticas foram denominadas de megatérmicas. De forma geral, a temperatura média anual é superior a 25,0°C. (TARIFA, 2011).

Um estudo do clima do Centro-oeste brasileiro aponta os seguintes fatores geográficos da região que são determinantes: sua localização dentro da zona tropical; suas diferenças de altitude; sua continentalidade; vegetação com tendência a ser xerófila (acesso restrito a água); e diferentes contrastes fisiográficos aliados a traços naturais e humanos da paisagem (MONTEIRO, 1951). A precipitação média anual de longo prazo (30 anos) é de 1420 mm, com média de 89% da precipitação ocorrendo na estação chuvosa. (VOURLITIS e DA ROCHA, 2010; SOUZA et al., 2013)

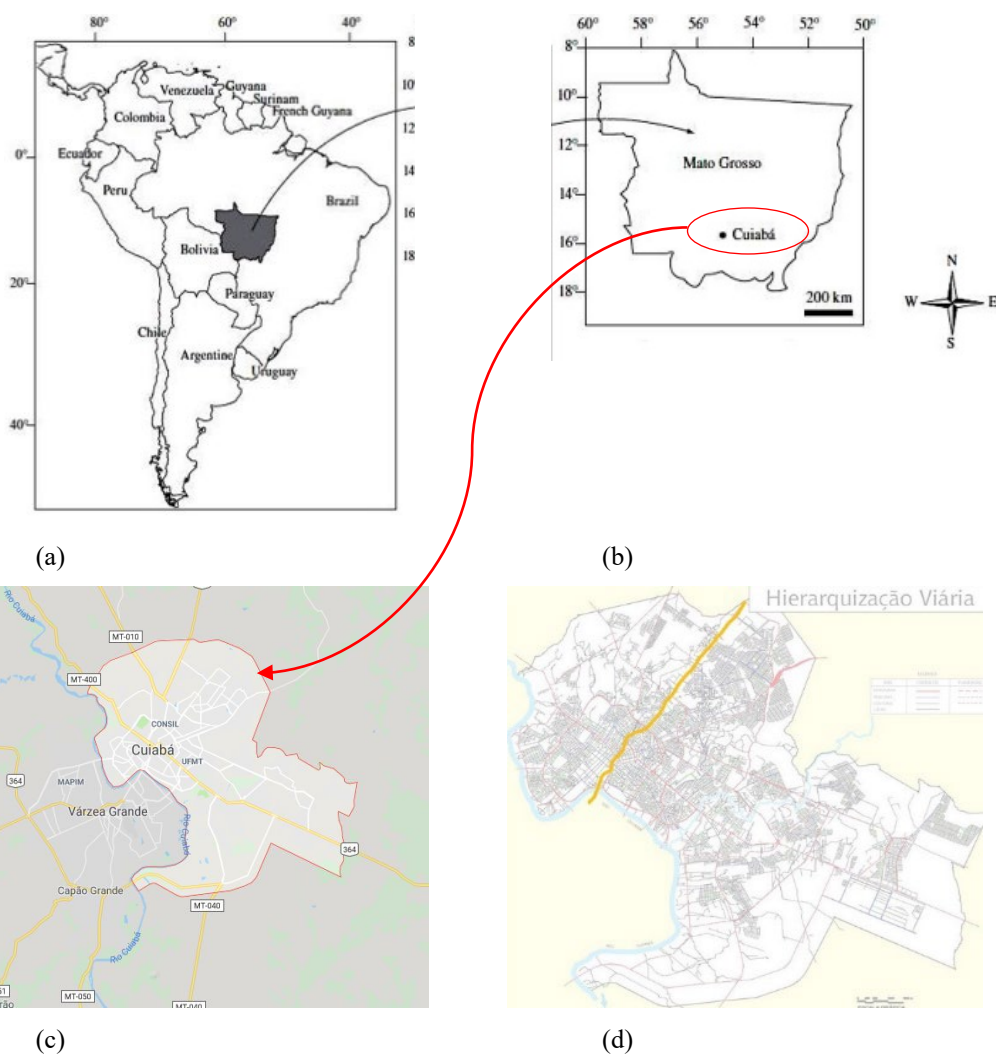


FIGURA 8 - Mapa do Brasil (a), de Mato Grosso (b) e de Cuiabá (c), com destaque para a avenida selecionada para a área de estudo (d)
FONTE: (a) e (b) Elaboração: SILVA e SANTO-FILHO, 2010; encontracuiaabá, (s.d.) e (d) Prefeitura Municipal de Cuiabá, 2011. Organização da autora, 2022.

Utilizando como referência os dados meteorológicos de 1961 a 2011, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os seguintes valores médios anuais de radiação diária global, temperatura do ar média, mínima e máxima e umidade relativa do ar foram registrados: $15,6 \text{ MJ m}^2 \text{ y}^{-1}$, $27,9^\circ\text{C}$, $23,0^\circ\text{C}$, $30,0^\circ\text{C}$ e $71,6\%$, respectivamente. A temperatura máxima e a velocidade do vento não tiveram padrão sazonal. Quanto às variações da temperatura, as maiores médias ocorrem nos meses do período chuvoso, atingindo $27,9^\circ\text{C}$, em relação à média de $25,5^\circ\text{C}$ nos meses do período seco. Contudo, neste período podem ocorrer as “friagens”, devido à entrada dos ventos frios da massa polar, provocando queda abrupta na temperatura com curta duração de tempo e irregularidade anual de ocorrência. Contudo, há de se

considerar que nos últimos anos foram registradas temperaturas acima da média, confirmando o fenômeno de aquecimento urbano observado como uma das consequências das mudanças climáticas globais. Dados do INMET (2023) demonstram que Cuiabá ficou 1,5°C mais quente nas últimas décadas, registrando recentemente o mês de agosto mais quente dos últimos 62 anos (BABY & AGUIAR, 2023). Em relação ao regime dos ventos, em consequência das baixas altitudes em Cuiabá, associada às barreiras impostas pelos chapadões em seu entorno, a ventilação é consequentemente reduzida com ventos fracos a moderado na maior parte do ano, com média anual de 1,7m/s (MACHADO et al., 2015).

Cuiabá apresenta algumas condições geográficas desfavoráveis, por estar localizada em área de depressão, e por isso há pouca velocidade do ar (maior frequência de ventos fracos a moderados) e elevadas temperaturas do ar, responsáveis pelo rigor climático da cidade e grande desconforto térmico. (CALLEJAS, KRÜGER & BORGES, 2022).

Em relação a altimetria, no perímetro urbano de Cuiabá a altitude do relevo tem variação de amplitude de pouco mais de 100 metros (em torno de 140 a 260 metros), sendo que as áreas em que predominam os extremos encontram-se numa proporção bastante reduzida do total da área do perímetro, menos de 10%, se somadas, predominando variações inferiores a 100 metros de altitude, com média de 200m de altitude (entre 160 e 240m). A Figura 09 ilustra a variação altimétrica e declividade, do terreno no perímetro urbano de Cuiabá.

Assim, o sítio de Cuiabá não pode ser considerado plano, mas também não possui um relevo muito acidentado, apresentando, contudo, uma grande variedade topográfica urbana, em diferentes dimensões e locais do perímetro urbano. As diversas configurações de formas do relevo são caracterizadas pela diversidade de misturas entre as formas da topografia e a ocupação humana, sendo que as manchas de áreas com maiores declives são de uma angulosidade considerada baixa, menor que 20°, com mais de 90% da superfície do sítio em que se assenta o perímetro urbano com uma declividade de terreno inferior a 5°, na escala do produto analisado, conforme se pode observar no mapeamento da Figura 08 (FERREIRA, 2019).

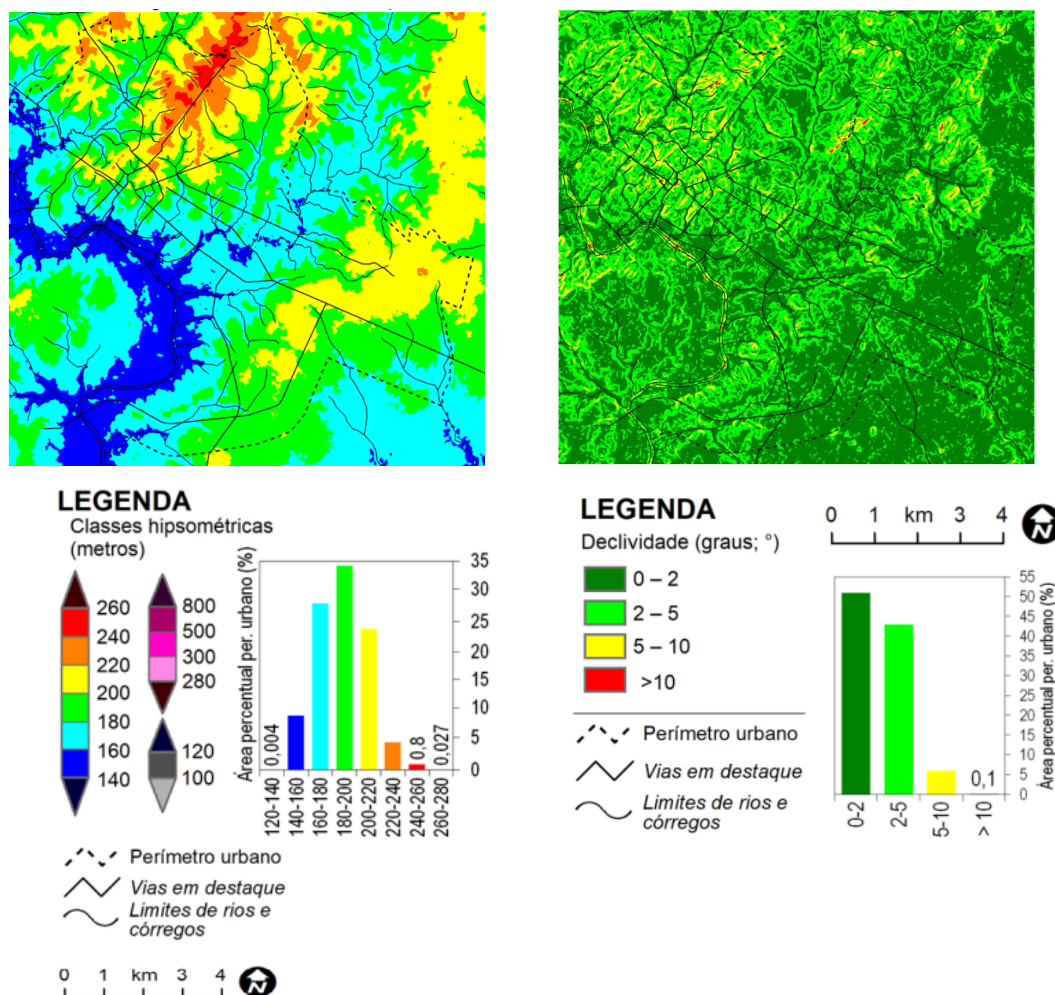


FIGURA 9 - Altimetria e Declividade do terreno no perímetro urbano de Cuiabá.

FONTE: Ferreira (2019). Dados: DSR/INPE (2008).

Na escala microclimática, o clima urbano da cidade vem sendo estudado desde a década de 1990 (MAITELLI et al., 1991; MAITELLI, 1994). Durante este período, é notória a grande transformação ocorrida na morfologia da malha urbana, tanto horizontalmente, na expansão da sua mancha urbana, quanto verticalmente, no crescimento vertical dos edifícios da cidade, ou na complexidade dos arranjos espaciais que passaram a se organizar no espaço urbano. Esta pesquisa tem entre os objetivos a contribuição no avanço das pesquisas sobre o microclima da cidade.

3.2. O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO EM CUIABÁ

Cuiabá é uma cidade colonial, fundada no século XVIII durante o ciclo da mineração. O núcleo de povoamento se iniciou no vale do córrego da Prainha, nas proximidades do morro da luz (Figura 10), da Igreja do Rosário (também conhecida

como Igreja de São Benedito) e da Catedral Metropolitana de Cuiabá. Nas imediações desses pontos nodais e nos caminhos que levavam de um a outro, o povoado foi se adensando. As vias surgiram de maneira sinuosa, acompanhando o relevo, não havia nenhum princípio de alinhamento ou ordenação para reger a definição das ruas (COX, 2015). É nesta região que a cidade mais se adensou em sua evolução, desde o início, pelas campanhas de criação de campos de mineração na região, e até os dias de hoje, aproveitando as vertentes mais planas de uma geologia mais resistente, para a expansão das áreas edificadas da cidade.

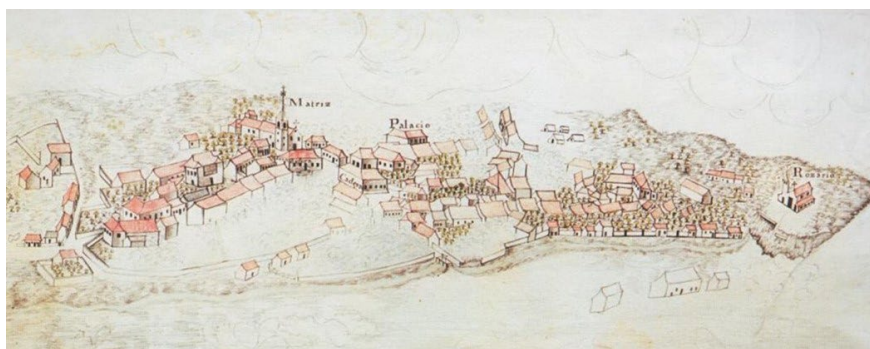


FIGURA 10 - O núcleo de origem da Villa do Bom Jesus de Cuyabá, com vista do córrego da Prainha, Igreja Matriz, e Igreja do Rosário (de São Benedito). “Imagem sem título” [Vista de Cuiabá]. Original de propriedade da Casa da Ínsua, Portugal. [1771-1780], p. 393.

FONTE: Reis (2000)

Os registros deixam claro que havia uma abundância de árvores em Cuiabá, porém elas ficavam nos extensos quintais de fundo, não era comum a arborização das calçadas, já que o casario se limitava diretamente com a rua, não havendo, portanto, espaço para a implantação de árvores nas vias públicas (Figura 11).



FIGURA 11 - “Beco do Candeeiro”. Ilustração de Moacyr de Feitas (1987), retratando a Cuiabá do sec. XVIII.

FONTE: Cuiabá (2006). p. 48

No século XVIII, as margens do córrego da Prainha foram cimentadas, perdendo o seu aspecto caudaloso, tornando-se um fio d'água contido em uma vala no meio da avenida. Já entre as décadas de 1960 e 1970, o córrego foi canalizado e coberto em praticamente toda sua extensão, com concreto e asfalto, que acabaram por esconder de uma vez por todas o antigo córrego no centro da capital, conforme ilustrado na Figura 12. (REDE CUIABANA, 2018)



FIGURA 12 - O córrego da prainha canalizado no século XVIII.
FONTE: Rede Cuiabana (2018)

O crescimento e desenvolvimento de Cuiabá foi dificultado devido ao isolamento do resto do país, em razão da inexistência de estradas, mantendo Cuiabá estagnada até a década de 30. Apenas em meados de 1940 que novo ciclo de desenvolvimento começou com o estímulo à “marcha para o oeste”, pelo então presidente Getúlio Vargas; com a mudança da capital do país para Brasília, pelo então presidente Juscelino Kubitschek; com as políticas públicas de incentivo ao povoamento do Brasil Central e da Amazônia e com a pavimentação das rodovias BR-163 e BR-364, ambas ligando Cuiabá aos grandes centros do país e com a implantação da Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, no final da década de 60 / início da década de 70. A partir de então, Cuiabá passa a vivenciar uma explosão demográfica. Em cinquenta anos, a população da Capital do Estado cresceu significativamente: enquanto o censo de 1960 registrou 57.860 habitantes, o de 2010, 551.098, e último, de 2022, 650.912 habitantes (IBGE, 2022). A Figura 13 ilustra a evolução do crescimento populacional da cidade de Cuiabá.

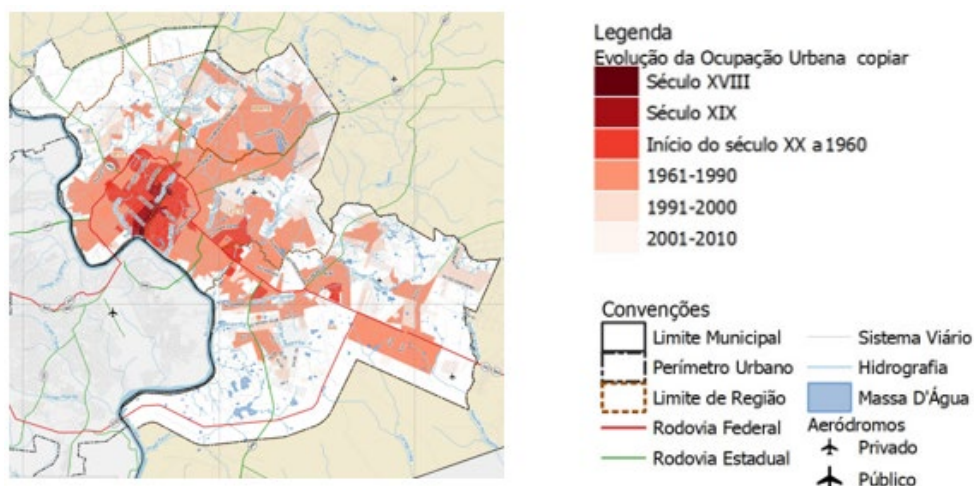


FIGURA 13- Mapa de evolução da Ocupação Urbana
FONTE: Prefeitura De Cuiabá/Plano Diretor/Mapas Diagnósticos, 2021

Com a explosão demográfica, a cidade se expandiu aceleradamente, conforme a evolução da mancha de ocupação territorial urbana ilustrada na Figura 14.

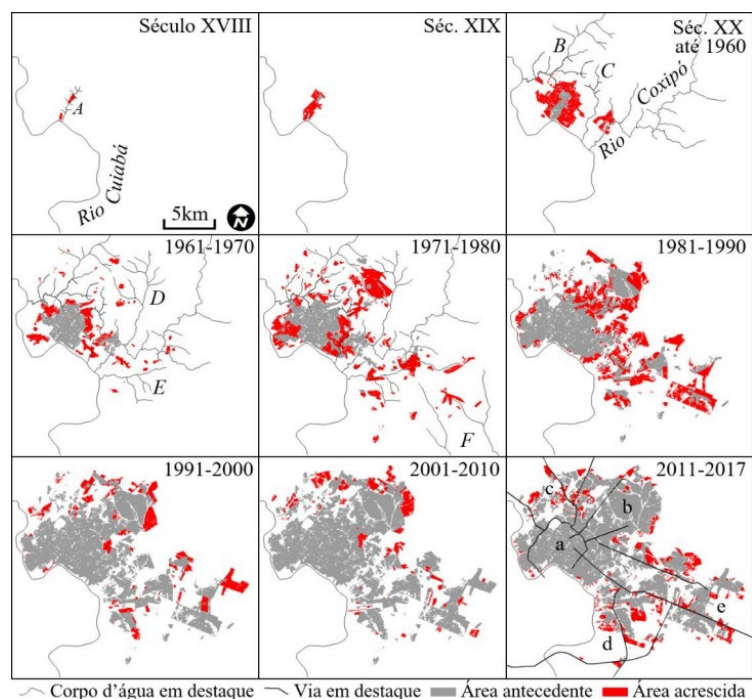


FIGURA 14 - Evolução da mancha urbana de Cuiabá ao longo do tempo
FONTE: Azevedo (2010); Cuiabá (2012); USGS (2016)

Embora algumas ações para tentar orientar a expansão urbana de maneira ordenada, como a elaboração de legislação municipal para controle do uso e ocupação do solo, o plano diretor da cidade só foi aprovado em 1992, quando a

cidade já havia expandido consideravelmente. As vias estreitas não comportavam mais o fluxo crescente de veículos e assim, novas avenidas surgiram, empurrando o crescimento urbano para duas direções: o primeiro polo de crescimento se deu nas adjacências da Avenida Fernando Correa da Costa, que liga o Centro Histórico da cidade à UFMT, na década de 70, enquanto o segundo, com a construção do Centro Político Administrativo, na década de 80, constituindo um novo percurso de expansão urbana por meio da Avenida Historiador Rubens de Mendonça, que teve um grande desenvolvimento imobiliário, abrigando desde núcleos habitacionais de interesse social até condomínios verticais de alto luxo, residenciais ou comerciais.

Após um período de acelerada expansão territorial na década de 70, na década seguinte, Cuiabá passou pelo processo de verticalização, mudando bruscamente a sua paisagem urbana, mudança que consequentemente também levou a uma diminuição significativa de massa arbórea e substituição de espécies nativas por espécies exóticas, conforme constatou Gonçalves (2010). Apesar de não haver árvores nas vias das cidades coloniais, estas estavam presentes no espaço urbanos, nos quintais, nas praças, nos parques, o que não se manteve até os dias atuais. A Figura 15 ilustra a evolução da paisagem urbana de 1914 a 2002.



FIGURA 15 - Vista panorâmica da Cuiabá, imagem captada do Morro da Luz, em 04 momentos: A) 1790; B) início do século XX; C) 1995; D) 2010; a) Igreja matriz, Catedral Basílica do Senhor Bom Jesus de Cuiabá; b) Paróquia Nossa Senhora do Rosário e São Benedito

FONTE: A e B: REIS (2000); C: Duarte (2000), p. 130; D: Fotografia: Flávio André de Souza.

3.3. ÁREAS VERDES NO ESPAÇO URBANO DE CUIABÁ – MT

Cuiabá é considerada tradicionalmente por seus cidadãos como “cidade verde” pela abundância de vegetação dentro da cidade. Contudo, esta afirmação já não condiz mais com a realidade observada na cidade. Com o processo de urbanização houve redução significativa das áreas verdes, o que é preocupante do ponto de vista do aquecimento urbano, já que também é considerada uma das cidades mais quentes do país. Observa-se que a maioria das vias não é dotada de arborização eficiente quanto ao sombreamento e, quando há, é comum a presença de espécies que não produzem sombras, como palmeiras, por exemplo, ou espécies nativas que não se adaptam às calçadas, rede elétrica e equipamentos urbanos.

O censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) apontou que apenas 39,6% das moradias da cidade são faceadas por vias arborizadas. Esse percentual coloca Cuiabá em 20º lugar, entre as capitais brasileiras, no ranking da arborização urbana, ocupando, no Centro-Oeste, a última posição. Estes indicadores demonstram o descaso com a arborização viária por parte da gestão pública e evidencia a necessidade de uma ação conjunta entre sociedade e administração pública para mudar este quadro, principalmente diante das evidências científicas sobre as mudanças climáticas e de como a estratégia da arborização tem um papel relevante na mitigação deste processo de aquecimento em zonas urbanas. Embora este levantamento não ser atual, e de não haver um censo mais recente para esta informação, acredita-se que a situação tenha piorado. Apesar dos incentivos e de uma maior conscientização nos últimos anos em decorrência dos problemas ambientais amplamente divulgados na mídia internacional, ainda que se perceba uma maior preocupação em se repor e compensar o desmatamento para atender aos interesses do mercado imobiliário, estes não são equivalentes e proporcionais às retiradas.

Além do desmatamento ocorrido no processo de urbanização e modificação do uso do solo urbano, conforme se observa nas Figuras 16 e 17, não se pode deixar de mencionar o “genocídio de árvores” ocorrido em 2012-2014 durante as obras públicas de mobilidade urbana para atender à copa do mundo de 2014, em que

Cuiabá foi uma das capitais sedes. Trata-se das obras inacabadas de implantação do veículo leve sobre trilhos (VLT)², em que todo o percurso projetado, inclusive toda a extensão das avenidas Tenente Coronel Duarte (Av. Prainha) e Historiador Rubens de Mendonça, sofreu uma brusca retirada de suas árvores (figuras 18 e 19). Em contrapartida, o Governo do Estado de Mato Grosso, por meio da Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística (SINFRA), apresentou, em setembro de 2021, um projeto de implantação do *Bus Rapid Transit (BRT)*, acompanhado de parque linear com ciclovia e recomposição da arborização urbana (no mesmo percurso antes previsto para o VLT)³.

O projeto busca atender à relevante demanda de infraestrutura urbana almejada pela comunidade cuiabana e até o momento de conclusão desta pesquisa, se encontra em fase de anteprojeto, sem previsão para o desenvolvimento do projeto executivo (informação obtida por canal informal)⁴. Não há material divulgado quanto à existência de simulações térmicas microclimáticas para a proposta, demonstrando não ter este objetivo. As Figuras 20 e 21 ilustram as propostas de intervenção do projeto e estão disponíveis no site da prefeitura para divulgação.



FIGURA 16 - Vista da Avenida Hist. Rubens de Mendonça em 2008, antes das obras de mobilidade realizadas em 2014 (canteiro central arborizado).
FONTE: Panorâmio photos (2008)



FIGURA 17 - Vista da Avenida Hist. Rubens de Mendonça em 2019, depois das obras de mobilidade realizadas em 2014 (canteiro central arborizado sem vegetação).
FONTE: TVCA/Reprodução (2019)

² Entre outras matérias que tratam do assunto, têm-se os artigos disponíveis em: <https://www1.folha.uol.com.br/esporte/2021/06/previsto-para-mundial-de-2014-vlt-de-cuiaba-chega-inacabado-a-copa-america-de-2021.shtml>; e Caso do VLT de Cuiabá, que pode virar BRT, vai parar em tribunal eleitoral - Revista Ferroviária (revistaferroviaria.com.br). Acesso em: 17 de fevereiro de 2022.

³ Projeto apresentado pelo Governo do Estado de Mato Grosso, por meio da Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística (Sinfra), no dia 16 de setembro de 2021, em audiência pública. Disponível em: <http://www.sinfra.mt.gov.br/documentos1>. Acesso em: 23/02/2022

⁴ Informação informal, obtida por e-mail do engenheiro de trânsito Rafael Detoni Moraes, que participou do processo de contratação do projeto do BRT, atualmente secretário-adjunto de gestão e planejamento metropolitano na Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística (Sinfra).



FIGURA 18 - Vista da Avenida Hist. Rubens de Mendonça em 2014, durante as obras de mobilidade.

FONTE: TVCA/Reprodução (2014)

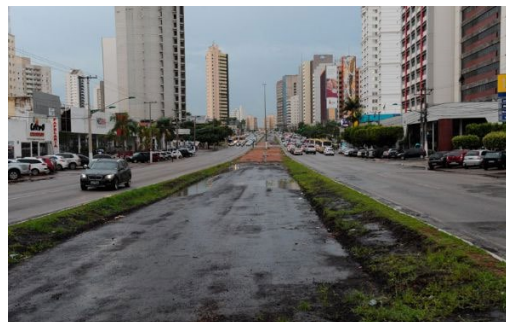


FIGURA 19 - Vista da Avenida Hist. Rubens de Mendonça em 2015, logo após interrupção das obras.

FONTE: Olhar Direto (2015)



FIGURA 20 - Imagem da proposta de implementação de parque linear na Avenida Hist. Rubens de Mendonça.

FONTE: SINFRA (2021)



FIGURA 21 - Imagem da proposta de implementação de parque linear na Avenida Hist. Rubens de Mendonça.

FONTE: SINFRA (2021)

Para contextualizar a “cidade verde”, como é conhecida Cuiabá pela abundância de árvores e massas vegetativas que a caracterizava antes do processo de urbanização, ainda que esta pesquisa trate especificamente de arborização viária, achou-se pertinente listar os parques urbanos existentes, cujas áreas verdes têm grande contribuição para a manutenção do bioma e mitigação dos efeitos de aquecimento urbano, principalmente em regiões de rigor climático, como é o caso de Cuiabá. Assim, historicamente, até a década de 1990, a população dispunha apenas do Parque Municipal Morro da Luz (Parque Antônio Pires de Campo) na parte alta do centro histórico, criado em 1925 e revitalizado em 2009, mas que atualmente é usado por usuários de drogas e a prática da prostituição. Hoje, a cidade dispõe de vários parques de diversos portes, alguns deles com muitas espécies arbóreas nativas, outros, porém dispõe de pouco sombreamento arbóreo. Em 1951 foi criado o Horto Florestal (Parque Tote Garcia), localizado às margens do Rio Coxipó; na década de

1980 o Parque Federal da UFMT e Zoológico Estadual, às margens do Córrego do Barbado e dentro da Cidade Universitária e na década de 2000, foram criados o Parque Mãe Bonifácia, localizado na Avenida Miguel Sutil, e o Parque Estadual Massairo Okamura, localizado na Avenida Historiador Rubens de Mendonça. Depois, em 2007, veio o Parque Tia Nair, no bairro Jardim Itália e, na sequência, o Parque Urbano Vila Militar (Parque General Plínio Pitaluga), localizado na região dos bairros Santa Isabel e Santa Amália; o Parque Municipal da Saúde (Parque Zé Bolo Flor) destinado aos moradores do Grande Coxipó; o Parque das Águas (em 2016) e o Parque da Família (em 2019), ambos localizados nas proximidades da Avenida Rubens de Mendonça.

3.4. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO ESPAÇO URBANO

O município de Cuiabá possui uma área total de aproximadamente 3.200 quilômetros quadrados (km²), e o seu perímetro urbano sede atual, definido pela Lei municipal nº 4.719, de dezembro de 2004, cobre uma área de aproximadamente (~) 254 km² (~8% da área total do município). (CUIABÁ, 2012)

O centro histórico de Cuiabá, onde surgiu o primeiro núcleo urbano da cidade, localiza-se próximo do Parque Municipal Antônio Pires de Campos, o Morro da Luz, no limite Sudeste do bairro Centro Norte. A área do perímetro urbano, sua mancha urbana atual, mais algumas áreas de solo exposto de campos de obras e áreas degradadas de manejo rural, cobrem pouco mais de 120 km² de área, dentro do perímetro, cerca da metade de sua área total. Na Figura 22 é possível observar a aparência atual da malha urbana de Cuiabá e seu entorno próximo, dentro do perímetro urbano, que se localiza completamente no recorte da figura, mesmo que não delimitado. Trata-se de uma imagem de satélite do tipo Landsat-8, composição colorida cor natural (bandas 432; RGB), com fusão pancromática (banda 8), de 30 de julho de 2018 (~09:45h). É possível observar as áreas mais edificadas (manchas mais claras) e a hierarquia viária, que são eixos principais de comércio de Cuiabá, de edificações de altura média ou alta, e alta densidade (FERREIRA, 2019). A Figura 23 ilustra as principais vias que compõe o sistema viário da cidade.



FIGURA 22 - A área urbana de Cuiabá vista por imagem de satélite (Ls-8 30/07/2018 ~10h).
FONTE: Ferreira (2019); USGS (2016)

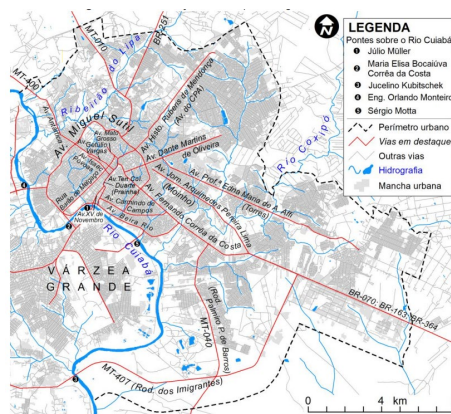


FIGURA 23 - Identificação e destaque das principais vias de Cuiabá.
FONTE: Ferreira (2019)

Quanto à densidade demográfica, há concentrações populacionais tanto em bairros periféricos como nas áreas centrais, o que representa proporcionalmente um maior número de domicílios por área. Estas condições influenciam diretamente a organização do espaço nos diferentes bairros e localidades da cidade, com suas distintas características de urbanização, como o adensamento edificado, e a existência ou não de vegetação local intraurbana. As regiões mais adensadas em termos de densidade demográfica e construtiva são o centro da cidade e o bairro Morada da Serra (adjacente à avenida Rubens de Mendonça), e seus respectivos entornos próximos, com aproximadamente 58% da população e dos domicílios de toda área urbana de Cuiabá. Estas áreas se caracterizam por uma contínua cobertura construída e pavimentada, e com áreas vegetadas intraurbanas de pouca expressão espacial, em comparação aos bairros menos adensados e periféricos. Em geral, as áreas mais adensadas são de relativa verticalização edificada, tanto em apartamentos de mais de dez andares, como em blocos de condomínios de cinco ou seis. Acima destas tipologias, predominam bairros residenciais com edificações do tipo casa térrea, que se espalham por toda a área urbana de Cuiabá, em várias direções (FERREIRA, 2019)

A maior presença de área vegetada em grande dimensão desta região do centro de Cuiabá manifesta-se no Parque Mãe Bonifácia, a Norte, num quase losango em verde escuro, e em menor dimensão em seu centro, observa-se o Parque do Morro da Luz. Também se destaca a região do Centro Político Administrativo (CPA), o bairro Morada da Serra, e os demais bairros de seu entorno (a nordeste do

centro), com apenas algumas descontinuidades edificadas, provocadas pela presença de áreas vegetadas. As áreas com uma rugosidade mais lisa, em tons avermelhados e amarelados, em menores dimensões, na periferia das áreas edificadas, sinalizam áreas com baixa ou nenhuma densidade de edificações, de predomínio de solo exposto. Representam áreas de construção, onde o maquinário compacta o solo, ou áreas de baixa consolidação edificada (ZCL 7). (FERREIRA, 2019)

Por meio de imagens de satélite semelhantes (como a da Figura 22) de datas diferentes (2017 e 2018), Ferreira (2019) analisou a organização do espaço urbano de Cuiabá, reconhecendo os elementos da superfície urbana, com suas diferentes propriedades e formas estruturantes, e traçando os limites entre a mancha urbana e o entorno rural modificado, na identificação de seus espaços notáveis, bairros, conjuntos habitacionais ou parques urbanos e na definição de ZCLs. A pesquisa é uma importante contribuição para a caracterização da área de estudo desta pesquisa e compreensão do processo metabólico de ocupação territorial da malha urbana de Cuiabá, que vai além do contexto físico, já que este é o produto da produção social. O metabolismo é tanto físico, que pode ser traduzido em características da atmosfera modificada, do clima urbano, emissão de energia, matéria gasosa e líquida, ou da própria transformação do espaço físico da cidade, o surgimento de novas construções, desmatamento, quanto social, no que diz respeito à movimentação cotidiana na cidade, o fluxo de pessoas e veículos. (FERREIRA, 2019)



FIGURA 24 - Mapa de Cuiabá: Hierarquização Viária.

FONTE: Prefeitura de Cuiabá, 2011



FIGURA 25 - Mapa de Cuiabá: Zoneamento.

FONTE: Prefeitura de Cuiabá, 2011

Quanto à legislação urbana, o plano diretor da cidade foi aprovado em 1992 e revisado em 2007. Decorridos 16 anos, a cidade passou por mudanças significativas

e apresenta novas demandas e desafios, por isso é necessário fazer um diagnóstico da cidade na atualidade, em relação às questões físicas, ambientais, econômicas e sociais, para avaliar o sistema atual de planejamento e propor novas políticas, diretrizes e planos de ação.

A lei municipal de uso e ocupação do solo, que estabelece normas e diretrizes gerais e específicas sobre o zoneamento, uso, ocupação e urbanização do solo, é de 2011, com lei complementar aprovada em 2015 (PREFEITURA DE CUIABÁ, 2023). Quanto ao plano de arborização urbana para cidade, o site informa ⁵que está em fase de desenvolvimento no atual momento e não se obteve maiores informações a respeito. Acredita-se que os resultados desta tese possam colaborar com o desenvolvimento deste instrumento e de outros planos de ações para regulamentar a implementação da arborização urbana, especialmente em vias.

⁵ Prefeitura de Cuiabá (cuiaba.mt.gov.br). Disponível em: <http://www.cuiaba.mt.gov.br>. Acesso em maio de 2023.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais (instrumentos) utilizados e métodos (procedimentos) adotados para atingir o objetivo proposto, que é avaliar o impacto da cobertura arbórea viária no conforto do pedestre, em diferentes cenários de cobertura arbórea e em duas morfologias urbanas da cidade de Cuiabá - MT.

Há três principais métodos para análise do microclima urbano: o sensoriamento remoto, o qual é feito por meio de satélites; medições em campo, através de equipamentos que podem ser acompanhados de questionários; e simulação computacional. Esta pesquisa adotou a simulação computacional como principal ferramenta metodológica de avaliação, por meio da modelagem e simulação de diferentes cenários hipotéticos, cujas variações foram baseadas em parâmetros pré-estabelecidos. Desse modo foi possível analisar aspectos da arborização viária e a influência do índice de cobertura arbórea, da cobertura do solo, do porte das árvores e da morfologia urbana no conforto térmico.

Os procedimentos metodológicos foram divididos em duas fases: investigativa e experimental, cujas etapas foram organizadas da seguinte maneira:

- a) Pesquisa de referencial teórico e metodológico;
- b) Escolha do local para a realização da pesquisa;
- c) Caracterização e classificação de cada tipologia morfológica urbana selecionada de acordo com zonas climáticas locais (LCZs);
- d) Medições: Levantamento das variáveis ambientais nas diferentes LCZs pesquisadas por meio de realização de transecto móvel no inverno e no verão para avaliação da temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) nos pontos pré-selecionados;
- e) Pesquisa sobre as principais características biofísicas de espécies arbóreas e recomendações gerais para arborização urbana na cidade de Cuiabá, como altura, diâmetro do dossel e distância entre elas;
- f) Identificação e seleção de índices de vegetação urbana adotados em pesquisas recentes, para orientar a definição dos arranjos arbóreos nos cenários hipotéticos;
- g) Modelagem computacional do cenário atual e hipotéticos, com a implantação de arborização viária; definição do modelo geométrico, dos

parâmetros de avaliação e dos atributos espaciais para a variação dos cenários;

- h) Identificação e levantamento de dados de entrada do modelo tridimensional das porções urbanas pesquisadas (dados climáticos, propriedades dos materiais de cobertura do solo e dos sistemas construtivos, altura das edificações, bem como das características biofísicas das espécies arbóreas existentes no interior da área pesquisada);
- i) Definição dos dados de saída da simulação computacional, que consiste nas variáveis climáticas estabelecidas para serem parâmetros de comparação na análise;
- j) Modelagem e simulação computacional com o programa Envi-met em duas etapas: simulação para calibração do software (cenário real) e simulações dos cenários hipotéticos (com diferentes índices de cobertura arbórea e outras variáveis, como o arranjo e a cobertura do solo);
- k) Sistematização e análise das variáveis microclimática de interesse dentro das áreas pesquisadas, pré-estabelecidas neste capítulo;
- l) Apresentação dos resultados, conclusões e sugestões para próximos trabalhos.

A fase investigativa, que se estende até a etapa “f”, consiste nas ações preliminares e preparatórias e delimitações que antecederam a etapa experimental, incluindo a pesquisa de referencial teórico, o levantamento de dados primários, que são aqueles obtidos em pesquisa de campo, e dados secundários, disponibilizados por terceiros, tais como banco de dados existentes, imagens georreferenciadas, ferramentas e métodos adotados em pesquisas anteriores, entre outros. Todas as informações coletas nesta fase deram suporte para a definição da metodologia e das delimitações estabelecidas. Já a fase experimental, que se estende da etapa “g” até “l”, consiste na aplicação do conjunto de ações estabelecidas para concretizar a pesquisa experimental, visando responder aos objetivos traçados para a pesquisa. No caso, se referem às medições e simulações computacionais para avaliar as variáveis climáticas obtidas no cenário real e nos cenários hipotéticos, de cada tipologia

morfológica urbana estabelecida, considerando as diferentes variações de cobertura arbórea definidas no estudo.

Quanto à abordagem do problema, esta pesquisa se enquadra como uma pesquisa “aplicada”, pois é dirigida à solução de problemas específicos para a aplicação prática. Já quanto ao tipo de análise, é considerada como “quantitativa”, pois é realizada partir de parâmetros numéricos para interpretar os fenômenos envolvidos (SILVA e MENEZES, 2001).

Em relação à escala climática, no que se refere ao alcance horizontal do espaço urbano, a pesquisa se refere ao microclima, que é considerada a escala típica de influência dos espaços intraurbanos, praças, sistema viário, calçadas, pátios e o entorno dos volumes edificados (KATZSCHNER, 2009), na qual as condições microclimáticas desses espaços podem ser definidas a partir de cada superfície e elementos constituintes do entorno (OKE, 1997, 2012, 2017). Já no que se refere ao alcance vertical, o estudo se restringe à camada urbana entre o solo e o nível médio das coberturas dos volumes edificados, que representa as interações entre a atmosfera e os elementos urbanos dentro da camada limite superficial (CLS) (OKE, 1997).

A seguir serão apresentadas as etapas percorridas para alcançar os objetivos propostos, após a pesquisa bibliográfica.

4.1. DEFINIÇÃO DO LOCAL PARA A REALIZAÇÃO DA PESQUISA

A área de estudo delimitada para esta pesquisa é uma porção da área urbana ao longo do percurso sinuoso de duas avenidas estruturais importantes de Cuiabá, que se interligam: a avenida Tenente Coronel Duarte, conhecida como Prainha, e a avenida Historiador Rubens de Mendonça, conhecida como avenida do CPA. A escolha destas avenidas se deu pelos seguintes motivos:

- O primeiro, por ser uma avenida que atravessa a cidade, no sentido SW-NE, apresentando diferentes morfologias urbanas, cujos fatores espaciais, especificamente a geometria urbana formada pelo cânion urbano (relação entre a altura dos edifícios e a largura entre eles) e a quantidade de área verde presente, são determinantes para a avaliação do microclima. Considerando que estas avenidas conduziram e que impulsionam de forma expressiva o desenvolvimento/crescimento da cidade e ainda que a maioria dos bairros mais adensados localizam-se a suas

margens, apresentam regiões de grande interesse de investigação quanto às mudanças microclimáticas, principalmente o centro histórico e o seu entorno (região central do território urbano e polo comercial da cidade), onde há maior compactação construtiva, com pouca presença de vegetação e de espaços livres. Também existe a importância cultural e física no processo histórico de urbanização da cidade, em razão da importância do patrimônio histórico e cultural dessa região, sendo este um fator decisivo para a escolha desse local para a pesquisa. É um território marcado por alterações bruscas no meio ambiente natural que impactam o microclima urbano, como a substituição da cobertura do solo permeável por materiais impermeáveis, aumento de superfícies construídas absorvedoras e refletoras, aumento do fluxo de veículos (emissores de fontes poluentes e calor antropogênico) e da densidade construtiva, que modifica a geometria urbana e reduz as áreas verdes. Portanto, trata-se de uma área que se encontra sobre efeito da dinâmica antrópica, com valor simbólico e cultural para cidade, em razão de ter sido o estabelecimento inicial da cidade. É nessa região que se concentra grande parte das atividades econômicas que se desenvolvem na cidade, consequentemente que induzi grande fluxo de pedestres e veículos: a região hoje possui prédios tombados, calçadas de comércio, bares, áreas de serviços públicos e residências. Não é por acaso que estudos anteriores voltados para climatologia urbana já selecionaram esta área da cidade, principalmente com enfoque voltado para as anomalias térmicas. Por isso, considerou-se pertinente dar continuidade às investigações iniciadas nesta área, como as pesquisas de Santos (2012) e Paula (2016 e 2021), que constataram a presença de ilhas de calor urbana por decorrência das modificações antrópicas ali induzidas.

- O segundo motivo se refere ao fato de serem avenidas com pouca arborização, havendo trechos desprovidos de espécies arbóreas, mesmo com canteiros centrais espaçosos, justificando a demanda de investigações acerca de soluções possíveis e eficientes voltadas para melhoria da ambiência e de conforto térmico.

Em princípio, realizou-se um levantamento inicial de todo o percurso das duas avenidas, em uma extensão de 6215 metros, abrangendo diferentes morfologias, para depois definir pontos específicos de coleta de dados e posterior avaliação de

cenários hipotéticos com diferentes arranjos de arborização viária. A Figura 26 ilustra diferentes pontos da avenida com diferentes morfologias urbanas.



FIGURA 26 - Diferentes pontos de vista ao longo da avenida estudada, com diferentes morfologias urbanas (imagens de 2021)

FONTE: Elaboração: autora.

Como o estudo tem o foco na arborização viária, diferente de parques e praças urbanas, o estudo toma como referência a caixa viária, que, conforme definição da legislação urbana municipal, a Lei de Uso, Ocupação e Urbanização do Solo - LUOUS (lei complementar nº 231 e 232 de 2011⁶), é composta por passeio público (calçadas), destinadas ao trânsito de pedestres; leito carroçável, destinado ao trânsito de veículos e canteiro central, quando existente. Contudo, as áreas adjacentes

⁶ PREFEITURA MUNICIPAL DE CUIABÁ. Disponível em <https://www.cuiaba.mt.gov.br/leis-decretos-e-publicacoes>. Acesso em: 26 de agosto de 2023.

às vias, formadas pelos bairros e vias transversais, influenciam o balanço energético, impactando no microclima das avenidas, razão pela qual optou-se por incluí-las estendendo os limites da caixa viária em aproximadamente 100m de cada lado, a partir do eixo da via.

Em razão da abrangência destas avenidas na cidade e com intuito de delimitar a extensividade da pesquisa, selecionou-se dois recortes com dimensões de 200m x 200m para as avaliações propostas, denominados de (P1) e (P2), representando duas tipologias morfológicas distintas dentro da cidade: uma composta por edifícios baixos, arranjo compacto, com pouca área permeável e vegetada entre os lote (P1) e a outra por edifícios altos (entre edifícios baixos), arranjo aberto e uma quantidade maior de áreas permeáveis e vegetadas em relação ao ponto anterior (P2). O processo e as razões que levaram à seleção destes pontos serão detalhados na sequência desta seção.

A escolha em adotar duas tipologias morfológicas tem o objetivo de avaliar o impacto da geometria urbana e cobertura do solo nos diferentes cenários propostos de arborização. A importância em se comparar o impacto do resfriamento proporcionado pela vegetação arbórea em diferentes geometrias construtivas está no fato de que as áreas com edificações altas já são sombreadas pelos edifícios, podendo não sofrer impactos perceptíveis de resfriamento com a implantação de espécimes arbóreos, ou até sofrer piora no desconforto térmico, pois este tipo de cânion urbano tem o fator de visão de céu reduzido e, consequentemente, o resfriamento noturno prejudicado. No entanto, estes fenômenos precisam ser verificados a partir de métodos científicos que permitem obter as respostas em busca de estratégias eficientes na mitigação do calor urbano. Não é objetivo desta pesquisa aprofundar o estudo das LCZs, mas sim conduzir uma análise do impacto do índice de cobertura arbórea para o conforto térmico e a sua relação com a morfologia urbana, comparando-se dois tipos de morfologias urbanas. Na sequência serão apresentados mais detalhes sobre o processo de seleção e análise dos pontos de estudo e os critérios adotados para a definição das tipologias morfológicas escolhidas para este estudo.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO DE ACORDO COM AS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS (LCZs)

Para caracterizar os dois recortes selecionados da malha urbana (P1 e P2), adotou-se o método de classificação *Local Climate Zone* (LCZ), proposto por Stewart e Oke (2012), conforme apresentado no item de revisão bibliográfica. Após a revisão da literatura sobre o tema, concluiu-se que o método é adequado, e amplamente usado pela comunidade científica que estudam o clima urbano, especialmente aquelas voltadas ao planejamento urbano. A vantagem de utilizá-lo se dá em razão de o método abordar as características climáticas das zonas de interesse e por permitir um mapeamento rápido, além de permitir comparação entre contextos urbanos semelhantes, o que têm contribuído para o avanço nos estudos desta área de conhecimento. Ferreira et al. (2023) reforçam a adequação do método a pesquisas com diferentes enfoques e escalas de análise, auxiliando pesquisadores e gestores urbanos que desejem conhecer e monitorar as características morfológicas, incorporando-as efetivamente aos instrumentos de tomada de decisão e de gestão.

O primeiro passo foi definir qual seria a fonte de dados, já que hoje é possível realizar o levantamento das áreas pesquisadas por imagens satélites, sistema SIG ou ainda levantamento de campo. Lehnert, M. et al., (2021) apontam a prevalência crescente acessibilidade da abordagem baseada em sensoriamento remoto, principalmente a partir de 2018, em detrimento aos métodos precisos baseados em SIG na delimitação de LCZs. Neste contexto, a plataforma WUDAPT - World Urban Database and Access Portal Tool (WUDAPT, 2023; CHING et al, 2018), que gera LCZ's a partir de imagens satélites de alta resolução, têm sido a principal ferramenta utilizada nas pesquisas recentes em todo mundo. Contudo, para escalas reduzidas, podem gerar certo grau de inconsistência no delineamento das LCZ (LEHRNERT, 2021). Baseado nesta informação e considerando a finalidade da pesquisa e as particularidades locais, optou-se por um método mais preciso e pontual das porções recortadas da área urbanizada pesquisada, e não por um mapeamento geral do território, característico dos estudos específicos sobre as formas de ocupação territorial. Até o momento foram encontradas duas classificações para a cidade de Cuiabá - MT: Ferreira e Ugeda (2019) e Paula (2021) e ainda o mapeamento realizado pelo WUDAPT (WUDAPT, 2023), disponível na plataforma on-line para

várias cidades, inclusive para Cuiabá. No entanto, após uma breve análise das classificações publicadas, considerou-se pertinente fazer um novo levantamento, específico para a área delimitada neste estudo, e usar as referências anteriores para comparação e validação. A justificativa principal é que o mapeamento de Ferreira (2019) feito a partir de diversas imagens de satélites, uma composição de bandas RGB e pancromática Landsat-8 de 08/05/2017; o produto do índice de NDVI, estimado com a mesma imagem Landsat-8 anterior; e imagens de alta resolução do Google Earth, georreferenciado, não dispõem de material técnico suficiente para detalhar alguns parâmetros matemáticos estabelecidos na tabela de Stewart & Oke (2012), não permitindo desta forma classificar as LCZs de interesse, em relação, por exemplo, a razão de aspecto de cânion 'H/W' e o cálculo do fator de visão do céu. A classificação apresentada pelos autores é uma simplificação que se adequa para as diferentes análises geográficas da organização do espaço urbano, porém a escala adotada não fornece a precisão necessária nesta pesquisa, que é uma escala menor, para estudo do microclima local. Já Paula (2021) realizou um levantamento mais detalhado e pontual, para o ano de 2019, focando nesta mesma região central, porém nem todos os pontos analisados coincidiram com a classificação identificada no levantamento desta pesquisa, para o ano de 2022, apesar dos métodos serem semelhantes e de o tecido urbano ter sofrido poucas alterações no intervalo de tempo entre as datas de pesquisa.

No primeiro momento foi realizado um levantamento geral ao longo de toda a extensão das avenidas Rubens de Mendonça e Prainha, porém não de maneira contínua e sim em pontos pré-definidos do percurso. Foram definidos 27 (vinte e sete) pontos iniciais que resultaram nas LCZs apresentadas na Tabela 5. A partir destes, selecionou-se 8 (oito) pontos para realizar medições, cada um representando uma LCZ (considerando apenas as classes edificadas, LCZ 1 a 10, das quais nem todas estão presentes), limitando-se à área mais central e consolidada e excluindo os pontos mais afastados e menos urbanizados, que se encontram próximos ao limite urbano.

Por último, foram selecionados 2 (dois) pontos representativos para servir de base para este estudo, buscando duas tipologias morfológicas com características distintas e opostas, uma sendo com arranjo compacto e com edificações baixas (LCZ

3) e a outra com um arranjo aberto e edificações altas, acima de 9 pavimentos (LCZ 4). A Figura 27 ilustra o processo de definição da área de estudo, desde a primeira delimitação, passando pela análise das tipologias morfológicas em todo percurso, até a definição final dos pontos finais adotados.

LEGENDA REGIÕES:

- 1 – Região do Porto
- 2 – Centro Histórico
- 3 – Região central de tráfego intenso e uso misto
- 4 – Centro Político Administrativo
- 5 – Bairro CPA

LEGENDA LCZ:

- LCZ 2
- LCZ 3
- LCZ 4
- LCZ 5
- LCZ 6
- LCZ 8
- LCZ 9



FIGURA 27 - Da esquerda para a direita: Demarcação da área de estudo na área urbana de Cuiabá; marcação dos 27 pontos classificados em LCZ e seleção dos pontos para medição.

FONTE: (esq.) Ferreira (2019); (centro e direita) Google Earth Pró (2022). Elaboração: autora

Na Tabela 7, as colunas apresentam as LCZs identificadas nos 27 pontos, comparando-as com as LCZs das classificações referenciadas, e na sequência a seleção dos pontos para a área de estudo. As linhas destacadas na cor cinza se referem aos pontos em que a classificação coincidiu nos três levantamentos citados, além de atender aos outros critérios mencionados acima, sendo por isso selecionadas, entre outros motivos. Para ficar claro, na primeira seleção os pontos foram numerados de 01 (um) a 08 (oito). No entanto, na seleção final, na qual, dos 08 (oito), apenas 02 (dois) permaneceram, foi dada uma nova nomenclatura para seguir uma sequência lógica. Sendo assim, os pontos que constam na coluna “Primeira seleção” da tabela 7 (de P1 a P8), se referem ao primeiro levantamento. Destes, o P2 e o P4 foram selecionados para o estudo, passando a ser denominados de P1 e P2, respectivamente, na seleção final de pontos para o estudo.

TABELA 7 - Classificação dos pontos analisados, comparando-os com classificações de estudos anteriores e a seleção final dos pontos de avaliação.

PONTOS INICIAIS	LCZ (AUTORA) 2022	LCZ (PAULA, 2021)	LCZ (FERREIRA, 2019)	LCZ PRIMEIRA SELEÇÃO	ELEÇÃO FINAL
1	6 _E	8 _E			
2	8 ₃	8 _E			
3	8 ₃	8 ₃			
4	8 ₃	8 ₂	2	P1 - 8 ₃	
5	3 ₈	8 ₂			
6	2 ₃	2			
7	3 _A	4			
8	3	3	3	P2 - 3	P1
9	2	2	3	P3 - 2	
10	2	2 _E			
11	4 ₃	4 _E			
12	4 ₂	4 ₂			
13	4 ₂	2 _E			
14	4	4	4	P4 - 4	P2
15	6 ₄	5			
16	6 _D	5 _F			
17	5	5 _F	4 ₅	P5 - 5 _A	
18	5 _E	8 ₅			
19	5 _A	9 _A	5	P6 - 5 _A	
20	6 _A	A ₉			
21	9 _A	A ₉			
22	A	A	A/B/D	P7 - A	
23	9 ₆	9 _A	B/D	P8 - 9 _A	
24	6	8 _B			
25	A	A ₉			
26	6 _B	8 _A			
27	6 _B	8			

FONTE: Elaboração da autora

O procedimento metodológico adotado para a classificação das LCZ's se deu a partir da qualificação e quantificação dos atributos físicos e espaciais dos espaços

urbanos, a partir de imagens satélites disponibilizadas pelo Google Earth⁷ e observações *in loco*, que permitiram reconhecer os padrões homogêneos de cobertura do solo. O mapeamento de cobertura do solo foi feito a partir de imagem obtida do Google Earth, inserindo-a no software CAD (*Computer Aided Design* – Desenho Assistido por computador), e posterior redefinição da escala, tendo-se como referência dimensões conhecidas. Após a imagem ser escalada, recortou-se a área estabelecida para a caracterização, adotando-se um diâmetro de 400 metros, em volta dos pontos pré-estabelecidos, mesma área de abrangência adotada por Paula (2021). A Figura 28 ilustra os recortes da área de levantamento dos 8 (oito) pontos pré-selecionados.

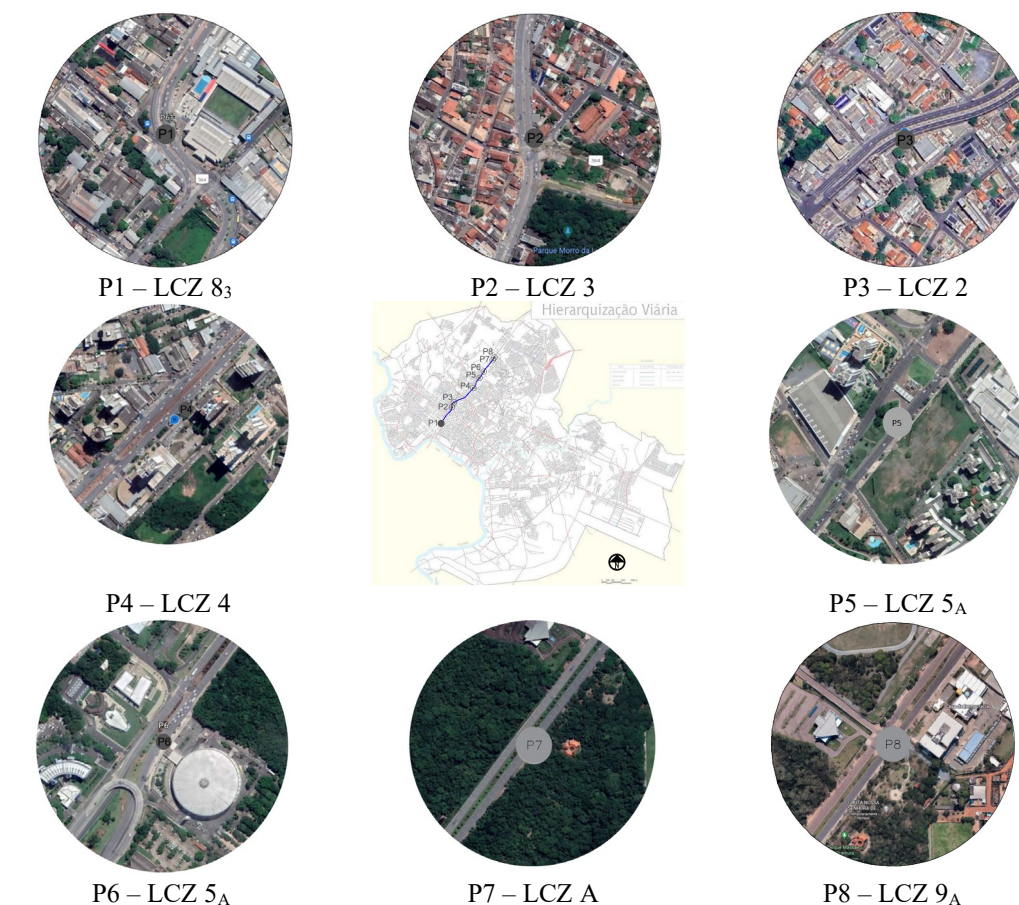


FIGURA 28 - Recortes da malha urbana, dos pontos pré-selecionados para caracterização de acordo com as LCZs

FONTE: Elaboração da autora

⁷ Aplicativo disponível gratuitamente nas versões para WEB e para download no PC. Disponível em: <https://www.google.com.br/earth/index.html>. Acesso em: junho de 2022.

As imagens ilustram claramente os padrões de ocupação do solo, sendo possível identificar as áreas homogêneas, quantificar as respectivas áreas e enquadrá-las de acordo com os índices urbanísticos característicos de cada LCZ, estabelecidos pelo método de Stewart & Oke (2012): a- Razão entre a quantidade de hemisfério do céu visível do nível do solo e a de um hemisfério desobstruído (fator de visão do céu); b –Cânion urbano; c- Razão da área plana edificada em relação à área plana total do terreno (%); d - Razão da área plana impermeável (pavimentada, rocha) em relação à área plana total do terreno (%); e - Razão da área plana permeável (solo descoberto, vegetação, água) em relação à área total do terreno (%); f - Média geométrica de alturas de edifícios (LCZs 1-10) e alturas de árvores / plantas (LCZs A-F) (m); g- Classificação de Davenport et al. (2000) de rugosidade efetiva do terreno (z_0) para paisagens urbanas e rurais.

O levantamento resultou nos dados de área permeável, impermeável, edificada e média da altura dos edifícios, para cada ponto, conforme a Tabela 8. O cânion urbano (razão entre a altura dos edifícios e o afastamento frontal entre eles) foi levantado, porém há uma grande variação ao longo da avenida Rubens de Mendonça e avenida Prainha, devido à característica já mencionada da ocupação territorial do espaço urbano da cidade, em que não há um padrão uniforme. Assim, em trechos pequenos de aproximadamente 200m é possível encontrar edifícios altos e de altura mediana mesclados com edificações térreas e sobrados, resultando em cânions variados. Portanto, não foi um índice que serviu de parâmetro para a classificação das LCZ, pois a maioria deles não se enquadrou na faixa de valores da Tabela 3. No P1, por exemplo, o cânion urbano é de 0,15, enquanto o valor estabelecido é entre 0,75 e 1,5. Já no P2, foram calculados 3 (três) variações de cânions: 0,1; 0,4 e 0,91, dos quais apenas o último se insere na faixa estabelecida entre 0,75 e 1,25, pois entre os edifícios altos há galpões que descaracterizam o padrão típico de cânion urbano da LCZ 4. Ainda assim, os outros parâmetros permitem classificar as zonas climáticas. Segundo os próprios autores, é esperado que alguns dos índices possam se divergir do padrão.

TABELA 8 - Revisão e Classificação dos pontos em LCZ a partir do novo levantamento dos parâmetros urbanísticos (2022)

PONTOS INICIAIS	PONTOS FINAIS	LCZ	ÁREA PERMEÁVEL	ÁREA IMPERMEÁVEL	ÁREA EDIFICADA	MÉDIA ALTURA EDIFÍCIOS
P1		8 ₃	10%	33%	57%	4 - 5 m
P2	P1	3	25%	35%	40%	3 - 4 m
P3		2	24%	35%	41%	7 - 8 m
P4	P2	4	33%	33%	33%	22 - 25 m
P5		5	33%	40%	27%	18 - 20 m
P6		5 _A	43%	43%	14%	8 - 9 m
P7		A	87,9%	12%	0,1%	-
P8		9 ₆	60%	31%	9%	3 - 4m

FONTE: Elaboração da autora

O principal critério adotado para a escolha dos pontos selecionados para área de estudo foi a predominância atual das tipologias morfológicas mais representativas na cidade. Assim, o mapeamento de Ferreira (2019), acompanhado do gráfico de distribuição percentual das LCZ (para classes edificadas), ilustrado na Figura 29, apresenta uma proporção de 50,4% de todo território urbano ocupado pela LCZ 3 (vermelho claro do mapa), seguido da LCZ 7 (cor amarelo no mapa), com 19%, e depois da LCZ 2 (cor vermelho escuro do mapa), com 8% de ocupação. Considerando que a LCZ 7 não tem representatividade na região de estudo e a LCZ 2 apresenta-se de maneira mesclada com a LCZ 3 (conforme levantamento feito), optou-se por escolher um dos pontos na LCZ 3. Já para o outro ponto, o critério foi a tendência atual do crescimento e ocupação territorial desta porção da cidade, a verticalização, definindo-se, portanto, um ponto na LCZ 4 para ser a segunda tipologia morfológica para a análise desta pesquisa.

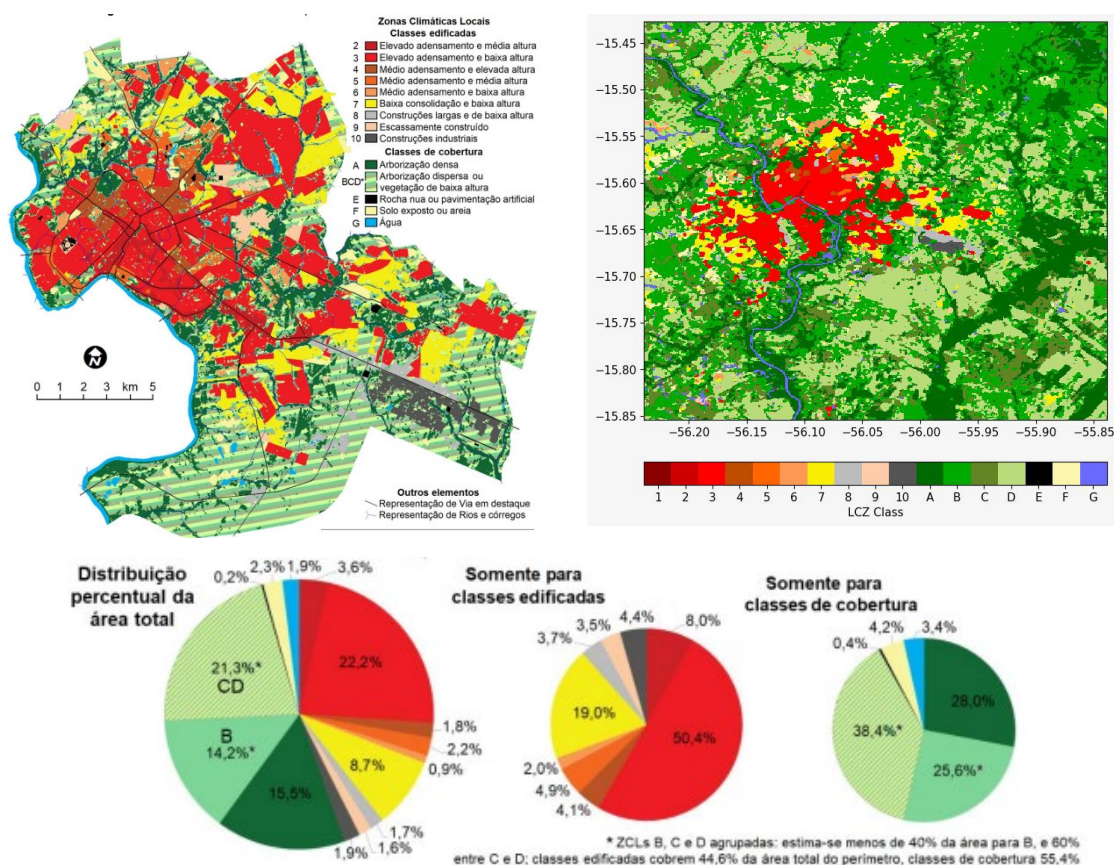


FIGURA 29 - LCZs no interior do perímetro urbano de Cuiabá, 2019 (esquerda) e 2022 (direita), com distribuição percentual das LCZs no território urbano.

FONTE: (Esquerda) - Ferreira (2019). (Direita) - WUDAPT (2022). Disponível em: <http://lcz-generator.rub.de/submissions>

Outros critérios foram considerados para a seleção dos pontos representativos: 1) pontos mais centrais e consolidados; 2) pontos cuja classe principal da LCZ identificada coincida com as classificações anteriores citadas, ainda que a subclasse não coincida; 3) pontos com condições microclimáticas desfavoráveis, necessitadas de intervenções para promover uma melhoria na qualidade de vida da população.

A Figura 30 apresenta o mapa geral de Cuiabá com o recorte ampliado do trajeto analisado, e destaque para os dois pontos finais selecionados (P1 e P2), a partir da ampliação dos recortes estabelecidos para as investigações. As imagens ampliadas dos recortes dos pontos P1 e P2 são imagens do cenário real atual, obtidas do Google Earth, e as imagens dos cenários com variação de vegetação arbórea foram modeladas no Envi-met.

As Figuras 31 e 32 apresentam as características dos pontos P1 e P2 respectivamente, com descrição da geometria urbana, cobertura do solo, principais materiais de construção, uso predominante e da arborização. O P1 apresenta uso predominantemente comercial e institucional, predominando edificações pequenas e de baixa altura, de até dois pavimentos, em arranjo compacto. A largura da caixa viária varia de 30m com canteiro central variando em torno de 5m. Apesar de haver um parque com vegetação arbórea densa dentro do diâmetro analisado (Parque Morro da Luz) e alguns quintais preservados na área tombada do centro histórico, todo tecido urbano restante é característico de LCZ 3. Quanto à arborização viária, não há árvores no canteiro central e calçadas, que são estreitas devido ao processo histórico, dificultando a implantação das espécies. Todas as árvores presentes estão localizadas fora da caixa viária, ou seja, se encontram no parque mencionado, quintais, praça e um grande terreno desocupado. Dentre as espécies levantadas estão: Oiti (*Licania tomentosa*); Palmeiras diversas; Pata de Vaca (*Bauhinia forficata*); Louro preto (*Cordia glabrata*); Sete Copas (*Terminalia catappa* L); Mangueira (*Mangífera indica* L.); Ipê roxo, (*Handroanthus avellanedae*); Pau-ferro (*Caesalpinia leiostachya*); Farinha seca (*Albizia niopoides*); Chuva de ouro (*Cassia ferruginea*) e Baganvília (*Bougainvillea spectabilis*).

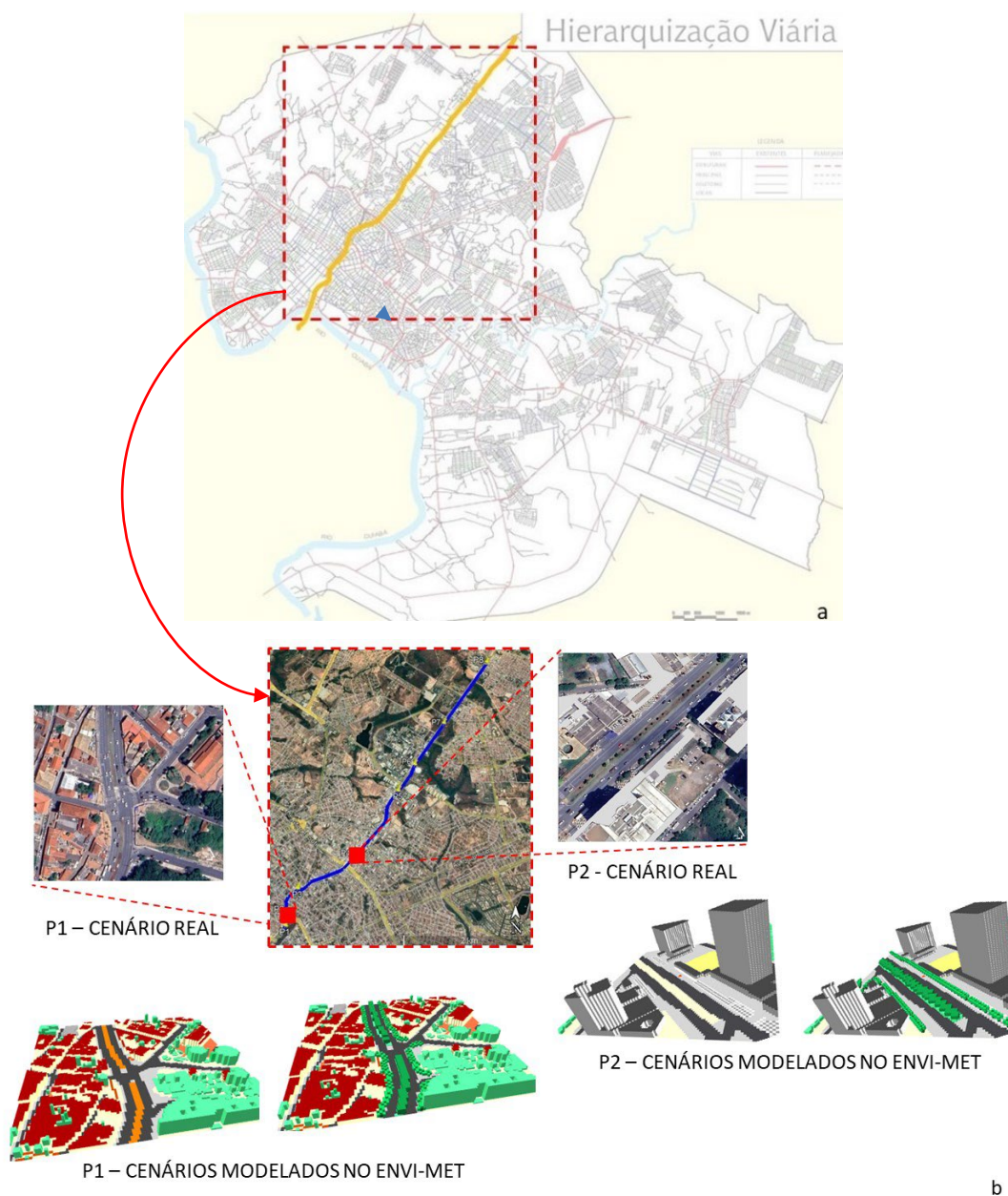


FIGURA 30 - (a) Mapa geral de Cuiabá com o recorte da área de estudo. (b) Mapa de localização dos pontos selecionados (Google Earth), com destaque dos recortes urbanos e modelagem tridimensional no Envi-met.

FONTE: Elaboração: Autora

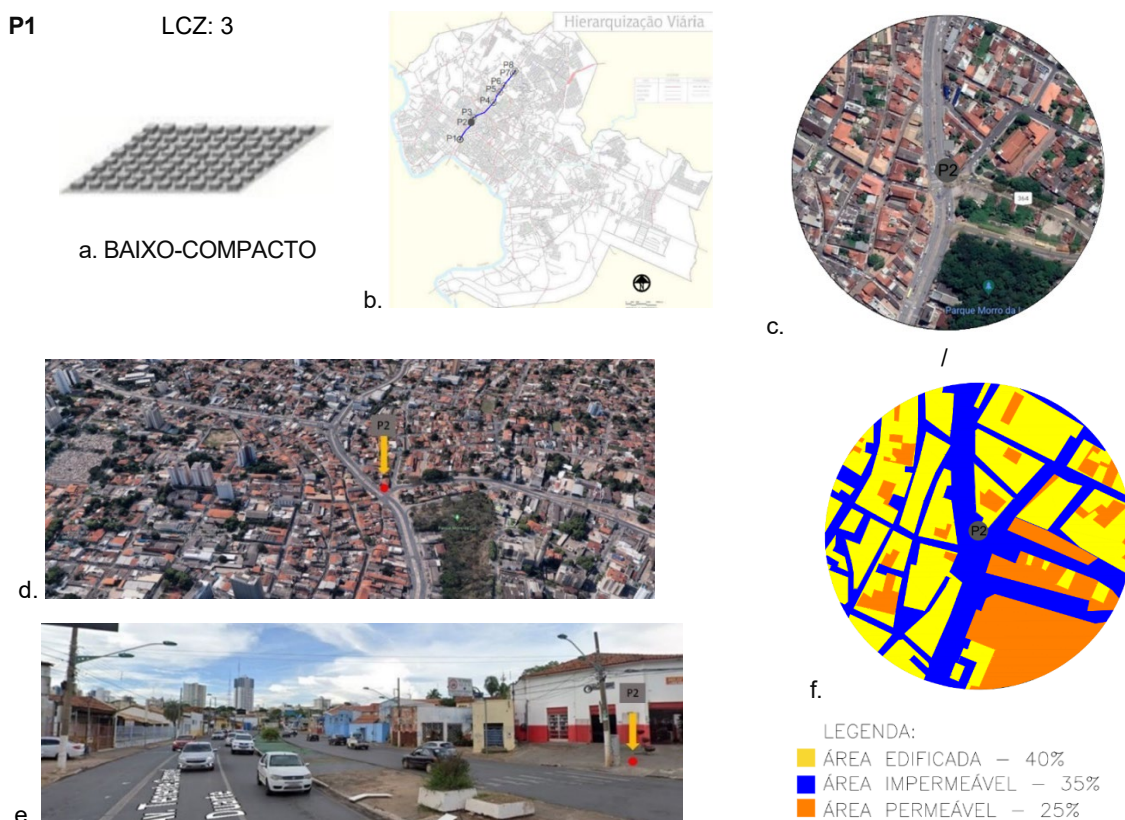


FIGURA 31 - Ponto 2: (a) Tipologia LCZ; (b) Mapa Hierarquização de Cuiabá; (c) Imagem da área de estudo delimitada; (d) Vista Aérea 3D do ponto analisado e entorno; (e) Eixo visual do ponto analisado e entorno; (f) Mapeamento da cobertura.

FONTE: (a) Stewart e Oke (2012); (b) Prefeitura Municipal de Cuiabá, 2022; (c) Google Earth Pro, 2023; (d) Google Earth Pro (2023); (e) Google Earth Pro, 2022; (f) Elaboração: os autores (2022).
Organização: Autora, 2023.

O P2 apresenta uso misto (comercial e residencial), edificações altas acima de nove pavimentos, em arranjo aberto, marcam a paisagem, apesar do grande número de edificações térreas do tipo galpões comerciais entre estes. A largura da caixa viária varia é de 50m com canteiro central variando em torno de 10m. Apesar do adensamento e verticalização crescente, nesta área de abrangência encontram-se alguns lotes desocupados (objetos de especulação imobiliária), que funcionam como estacionamento, com área permeável, tanto com cobertura vegetal quanto com o solo exposto. Dentro do diâmetro analisado, há uma porção da área de preservação no interior do bairro adjacente (Bosque da Saúde), com massa arbórea considerável, em contraponto à pavimentação predominante desta zona.

Quanto à arborização Viária, foram implantadas em 2020 uma fileira da espécie *Khaya senegalensis*, com afastamento de 7 a 8m entre si, no canteiro central. Nas calçadas, há arborização apenas em um lado da via. As espécies encontradas em

toda a área delimitada foram: Caroba do Cerrado (*Swietenia mahagoni*); *Buganvília* (*Bougainvillea spectabilis*); Chuva de Ouro (*Cassia ferruginea*); *Ipê roxo* (*Handroanthus avellanedae*); Mangueira (*Mangífera indica* L.); Neem (*Azadirachta indica* A. Juss.); *Castanhola* (*Pachyra aquática*); Pata de vaca (Pata de Vaca); *Palmeiras Imperial, Bocaiúva e Carandá*; Figueira (*Ficus benjamina*) e Oiti (*Licania tomentosa*).

P2 LCZ: 4

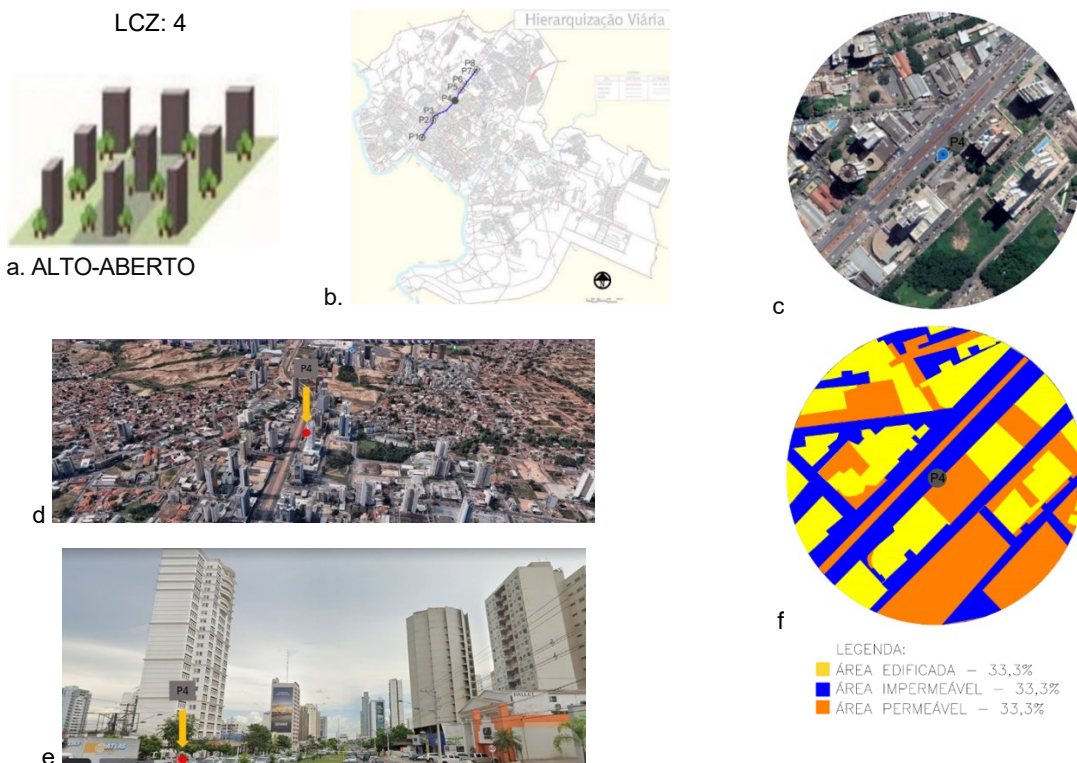


FIGURA 32 - Ponto 4: (a) Tipologia LCZ; (b) Mapa Hierarquização de Cuiabá; (c) Imagem da área de estudo delimitada; (d) Vista Aérea 3D do ponto analisado e entorno; (e) Eixo visual do ponto analisado e entorno; (f) Mapeamento da cobertura.

FONTE: (a) Stewart e Oke (2012); (b) Prefeitura Municipal de Cuiabá, 2022; (c) Google Earth Pro, 2023; (d) Google Earth Pro (2023); (e) Google Earth Pro, 2022; (f) Elaboração: Autora, 2023

4.3. MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS

A medição nesta pesquisa tem o objetivo de coletar dados das variáveis climáticas para a calibração do software. Além disto, contribui para a compreensão do comportamento climático nos diferentes pontos de LCZ variadas. No entanto, os dados coletados não são objeto da análise proposta como objetivo geral do trabalho.

A coleta de dados foi realizada a partir de um transecto móvel, que consiste em uma estação meteorológica fixada em automóvel, que registra as variáveis climáticas em percursos pré-determinados dentro da área de estudo. Pode ser

realizado a pé, em bicicleta ou veículos automotores, sendo muito empregado no estudo da climatologia urbana para verificar diferenças entre os parâmetros climáticos em pontos de distintas ocupações do solo, tendo-se difundido em função de sua aplicação relativamente mais simples e de baixo custo operacional do que a instalação de várias estações fixas para coleta dos dados. Portanto, apresentam a vantagem de realizar medições em mais de um ponto com apenas uma estação meteorológica e de não haver a necessidade de a instalar em ponto fixo no local de medição, evitando problemas com furtos e vandalismo, principalmente em locais públicos de grande fluxo de pessoas, como é o caso desta área de estudo.

Para a medição desta pesquisa, adaptou-se uma estação meteorológica fixa do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental - PGFA da Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, na cidade de Cuiabá – MT, de maneira que pudesse ser fixada no veículo, sem perder o padrão comumente adotado nas pesquisas, permitindo a repetitividade e comparações dos estudos por outros pesquisadores.

Seguindo o mesmo procedimento de Lima et al (2021), o abrigo foi fixado em uma régua metálica e posicionado sobre o carro com o auxílio de suportes. A estação montada é composta por um sensor de temperatura e umidade, modelo HOB0 U30 Station, que mede temperaturas nas escalas de - 40 a 125°C e a umidade do ar nas faixas de 0 a 100% e um *datalogger* (Registrador de dados), programado em placa microcontroladora da marca HOB0 (Figura 33). A estação utilizada dispõe ainda de sensor de radiação solar; de pressão atmosférica; anemômetro; medidor de direção dos ventos do tipo cata-vento, porém estas variáveis não foram utilizadas na análise. Os sensores foram calibrados antes das medições, para garantir precisão e eficácia, e posicionados com uma distância entre si para evitar interferência, principalmente da radiação solar, em que a sombra de um dos dispositivos pode intervir nesta medição.

A velocidade do veículo durante o percurso foi constante na maior parte do tempo entre 20 e 40km/h, tentando manter 30 km/h, com variações em curvas, semáforos, faixas de pedestres, trânsito intenso ou outras situações, porém nunca ultrapassando o limite de 40 km/h.



FIGURA 33 - Ilustração da montagem e fixação dos componentes da estação. Da esquerda para a direita, tem-se respectivamente: Estação montada e fixada no teto do veículo com ventosas e fitas de amarração; sensor de temperatura e umidade dentro do abrigo e Datalogger (Registrador de dados), abrigado em caixa e fixado sobre o veículo

FONTE: Elaboração da autora

Foram estabelecidos dois períodos para medição: o primeiro representando o período seco, nos dias 04, 05 e 06 de agosto de 2022, e o outro período representando o úmido: nos dias 20, 21 e 22 de dezembro de 2022. Os horários de coleta foram: 08h, 14h e 20h (horário local), nos 3 dias consecutivos, conforme o trajeto determinado na área de estudo, com extensão de 6,215 km, contendo os 08 (oito) pontos de referência, cada um representando uma zona climática local, ou seja, com diferentes configurações geométricas e tipos de cobertura do solo, conforme ilustrado na Figura 27. A Figura 34 apresenta o mapa com destaque para o trajeto e marcação dos pontos de medição, reforçando que, após a seleção final dos pontos, o P2 e P4 foram definidos para as áreas de estudo da pesquisa, recebendo uma nova denominação, de P1 e P2, respectivamente.

Todo o percurso, considerando o retorno ao ponto inicial foi realizado dentro do intervalo de uma hora, não sendo necessário aplicar fator de correção nos dados coletados. A leitura dos sensores e a localização do GPS foram sincronizadas, com registro do *datalogger* a cada 10 segundos. O veículo ficou parado em cada ponto fixo por 2 minutos, adotando-se os valores obtidos após 1 minuto, devido ao tempo necessário para a estabilização dos sensores, no intuito de evitar possíveis interferências da ventilação forçada do carro em movimento (desaceleração e aceleração do veículo). (Lima et al., 2021)

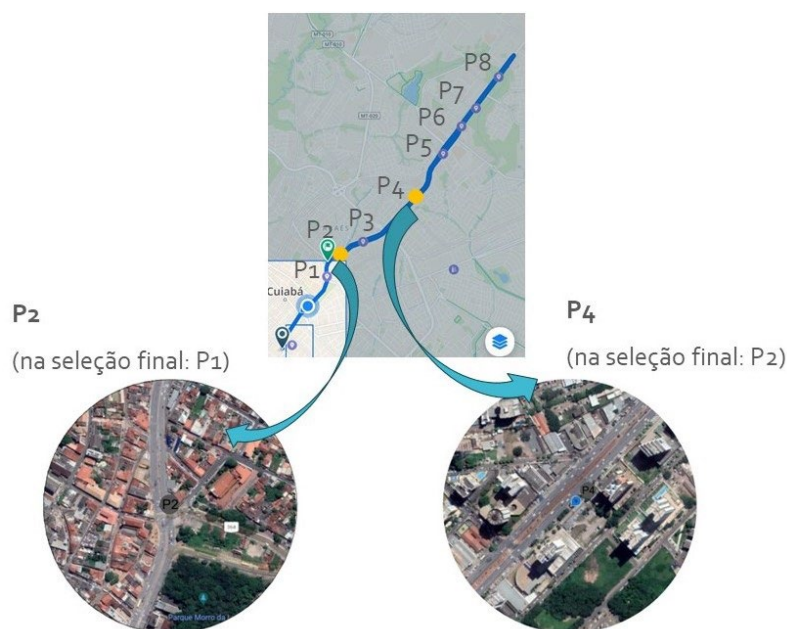


FIGURA 34 - Trajeto percorrido com o transecto móvel, com marcação dos 08 (oito) pontos de medição e destaque para o P2 e P4, que foram selecionados para ser a área de estudo (Na seleção final foram renomeados de P1 e P2, respectivamente)

FONTE: Elaboração da autora

4.4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O software adotado nesta pesquisa é o Envi-met (BRUSE; FLEER, 1998; ENVI-MET - DECODE URBAN NATURE WITH ENVI-MET SOFTWARE, 2021), escolhido para a pesquisa por ser reconhecido na comunidade científica, comprovado por diversos estudos e por ser um dos poucos que descreve a maior parte dos processos climáticos que agem no ambiente urbano. A versão utilizada foi a versão 5.1, a mais recente até o momento inicial das simulações.

4.4.1. Simulação para calibração

Esta simulação tem o objetivo de calibrar o modelo, ajustando-se os dados de entrada inseridos no programa computacional. Consiste na simulação em que o modelo geométrico é construído buscando aproximar ao máximo as características geométricas, construtivas e de vegetação, conforme observado no recorte da área de estudo, inserindo-se os dados climáticos de acordo com os dados obtidos para os mesmos dias de medição, ou quando não possível, o mais próximo possível para caracterizar as mesmas condições existentes no momento da coleta de dados. Então, os dados obtidos em medição são comparados com os obtidos por meio da

simulação, permitindo avaliar o funcionamento do software e a sua precisão para as particularidades do local. Os dados de entrada são inseridos manualmente, já que arquivos climáticos representam um padrão e não a situação específica do dia de medição, não servindo para esta finalidade. Em caso de discrepâncias, deve-se fazer os ajustes necessários nos dados de entrada, sejam do clima ou dos materiais construtivos, para prosseguir com as avaliações dos cenários hipotéticos com precisão e segurança. É comum haver diferenças, devido à falta de informação precisa dos dados de entrada, sendo na maioria das vezes, dados aproximados, mas que podem interferir nos resultados. Apesar das inúmeras comprovações quanto à validação do Envi-met para avaliação de microclima urbano, um estudo recente que analisou as atualizações das versões mais recentes (OUYANG et al., 2022), reforça a necessidade de se calibrar o programa por questões de segurança, para ajustá-lo às particularidades de cada local, pois a simulação não representa totalmente o mundo real devido ao uso de aproximações e simplificações de cálculos de modelos de vegetação (HUTTNER, 2012; SIMON, 2016). Por este motivo, optou-se em fazer a calibração nesta pesquisa.

Nesta etapa, algumas simulações “testes” foram realizadas com a finalidade de compreender a sensibilidade do programa perante variações de alguns dados espaciais de entrada (*inputs data*), como propriedade dos materiais, das espécies arbóreas, etc. Estes testes são importantes, pois permitem compreender as limitações e especificidades do modelo de forma a minimizar o tempo de processamento e os possíveis erros, garantindo maior precisão dos resultados. Desta forma, alguns dados de entrada puderam ser aproximados, após testar-se em simulações rápidas para avaliação do nível de precisão e sensibilidade do programa computacional.

Em síntese, a metodologia adotada para o levantamento, desenvolvimento e validação do modelo seguiu as seguintes etapas: a) Levantamento das características construtivas, climáticas e da vegetação; b) “Construção” do modelo; c) Configuração dos dados de entrada; d) Simulação; e) comparação dos resultados medidos e simulados; (f) ajuste de dados de entrada, caso seja necessário.

O Envi-met é dividido em vários módulos, com funções específicas e que são facilmente acessados a partir de ícones na barra principal de tarefas. Assim, existe o local para realizar cada tarefa até se completar todas as informações necessárias para

o software calcular as condições atmosféricas: modelagem 3D do cenário, com informações das construções, topografia, e demais elementos do cenário; inserção de dados climáticos; edição do banco de dados de materiais e vegetação, e outras configurações gerais, até a definição dos “*outputs*”, que são os resultados desejados. A seguir serão descritas as etapas percorridas para a simulação.

a) Construção do Modelo

A primeira etapa foi a modelagem dos dois cenários reais, o P1 e o P2, que é feita no módulo *Space*, do *ENVI-met*, onde se “constrói” o modelo geométrico, conforme as características do cenário real: mesma geometria construtiva, tipos de cobertura do solo e materiais construtivos das edificações e revestimentos. As dimensões adotadas levaram em consideração o tempo de processamento do programa e a escala de análise. Por ser uma análise em escala microclimática, definiu-se o modelo quadrado de 100 x 100 grids (cada grid com 2m), com altura variada para cada cenário, pois esta depende da altura dos edifícios, sendo que a altura total recomendada para o modelo deve somar a altura do ponto mais alto dos edifícios adicionada à duas partes iguais com espaço livre (ROSSETI, 2013). Como a altura dos edifícios varia nos dois modelos, o P1 ficou com 09 (nove) grids de altura, pois o edifício mais alto considerado tem 9m, e o P2 com 69m, que é a altura do edifício mais alto. Cada grid no eixo z (altura) corresponde a 3m, atingindo assim a altura final recomendada.

O receptor foi posicionado a uma altura de 1,4m, na mesma posição em que o veículo ficou parado no momento da medição (ponto vermelho nas imagens 2D do modelo, ao centro, da Figura 35), aproximando-se da altura aproximada de um pedestre, sendo a mesma altura de fixação da estação meteorológica durante o transecto móvel utilizado nas medições.

A construção do modelo geométrico se deu a partir das imagens do *Google Earth* para o ano de 2023, que serviram de base para a modelagem dos cenários apresentados na Figura 35, referentes ao P1 e P2, respectivamente. As alturas foram obtidas com o *Google Earth Street* e a partir de imagens e vídeos realizados por veículo aéreo não tripulado e controlado remotamente.

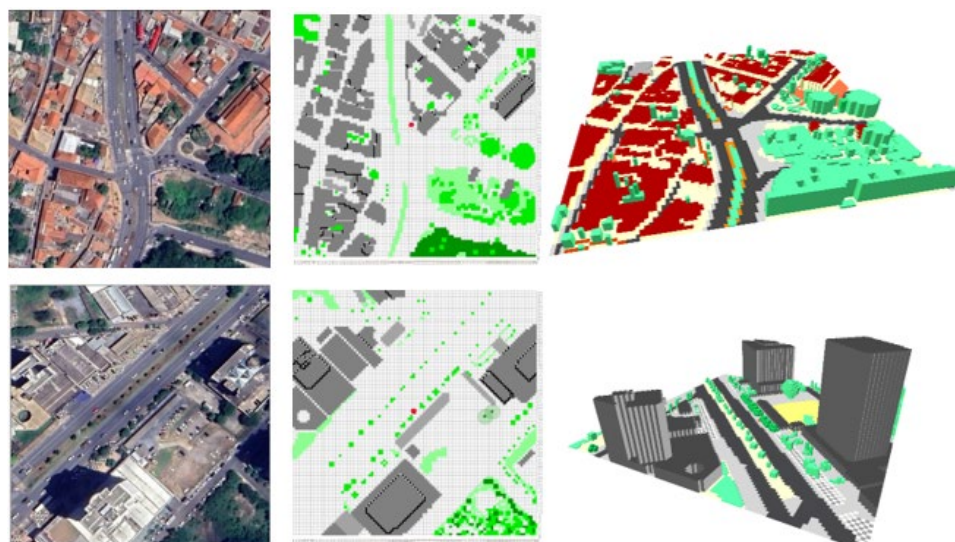


FIGURA 35 - Processo de modelagem do P1 (superior) e P2 (inferior). Imagem do Google Earth (esquerda); Modelo 2D (centro) e Modelo 3D (direita).

FONTE: Elaboração da autora

b) Configuração dos dados de entrada

A configuração do arquivo de entrada é um ponto muito importante para que se alcance a acurácia desejada. Nele, são informados todos os dados que interferem no cálculo da interface termodinâmica entre superfícies, atmosfera e vegetação para que o modelo simule os processos termodinâmicos que ocorrem na área de estudo. Consistem em dados meteorológicos, construtivos, da cobertura do solo, da vegetação, dos tipos de gases e partículas emitidos, condições de nebulosidade e ajustes de radiação de onda curta, entre outras definições necessárias para o correto funcionamento do software. Para a inserção dos dados de entrada, o arquivo de configuração do Envi-met é um arquivo de texto que possui uma configuração pré-definida padrão (*default*), sendo que algumas foram mantidas enquanto outras informações mais específicas foram editadas de acordo com os dados medidos ou obtidos por fontes secundárias, buscando adequá-las o mais próximo possível da situação real para garantir bons resultados.

Quanto aos dados dos materiais, foram inseridos no modelo de acordo com levantamento in loco e com o auxílio de imagens obtidas a partir do *Google Earth* e de veículo aéreo não tripulado e controlado remotamente (drone). Buscou-se o máximo de fidelidade com o cenário real, porém com algumas simplificações, no que diz respeito aos materiais das vedações e coberturas dos edifícios para os quais não se obteve total visibilidade para definir essas informações. Desta maneira, foi feita

uma distribuição equivalente e proporcional dos materiais mais encontrados, assim como cores das fachadas. Algumas propriedades foram configuradas com o material padrão do software, porém a maioria foi editada de acordo com valores conhecidos dos materiais encontrados. No Envi-met, definem-se as propriedades dos materiais no módulo *DB Manager* e depois cada material especificado é vinculado aos elementos construídos no módulo *Spaces*. A cobertura padrão adotada para o modelo do P1 é a telha de barro, porém na modelagem há a diferenciação de algumas edificações, que são minoria nesta área, com telha de fibrocimento. Já a parede padrão adotada para todos os edifícios foi a taipa (técnica vernacular que utiliza o barro), pois no centro histórico, neste recorte em especial, predominam edificações antigas da época colonial, com este material de vedação. Já no P2 a telha padrão adotada é a telha de fibrocimento, muito utilizada nos galpões e edifícios altos presentes nesta área de estudo. As paredes são de alvenaria com argamassa, adotando-se o coeficiente de absorção igual a 0,4, representando uma média entre as cores claras e escuras presentes das fachadas. Na primeira definição, as cores foram estabelecidas conforme o levantamento de campo, individualmente para cada edifício, porém o programa acusou um erro inesperado e por isso, definiu-se um padrão geral de cor intermediária. As propriedades térmicas inseridas nos dois modelos, P1 e P2, constam na Tabela 9. Para todos os materiais foram adotados os dados padrões (*default*) do programa, como do cimento das calçadas, do asfalto da via, da grama e do solo exposto.

TABELA 9 - Propriedades térmicas dos materiais de vedação, no P1 e no P2

PARÂMETRO	COBERTURA		PAREDE	
	P1	P2	P1	P2
	Telha de barro	Telha fibrocimento	Taipa cor média	Argamassa cor média
Espessura (m)	0.05	0.01	0.05	0,01
Reflexão	0.50	0.70	0.50	0.60
Absorção	0.50	0.30	0.50	0.40
Transmissão	0.00	0.00	0.00	0.00
Emissividade	0.90	0.90	0.90	0.90
Calor específico	840.00	840.00	840.00	850.00
Condutividade térmica	0.81	1.90	0.81	1.60
densidade	1700	2500	1700	2220

FONTE: Elaboração da autora

A simulação foi programada para começar 12h antes do início do período analisado (às 20h do dia anterior), considerando um período de adaptação e estabilização do software, chamado de *warm up*, para calcular o microclima, totalizando assim 36 horas.

Quanto aos dados meteorológicos, foram utilizados os dados dos dias específicos em que foram realizadas as duas medições, adquiridos na estação de referência do INMET, disponível no site do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET⁸. Os dados de entrada referentes às condições de tempo atmosférico, requisitados pelo programa para a realização da simulação são: temperatura do ar e umidade relativa do ar horárias do dia, horário de ocorrência da temperatura e umidade relativa do ar da máxima e mínima; velocidade do ar média diária; direção predominante dos ventos, e temperatura do solo em quatro profundidades, umidade específica em 2500m, a nebulosidade e o comprimento de rugosidade (referente à geometria urbana e impacta na velocidade do ar), conforme especificado na Tabela 10. Os dados não conhecidos, foram mantidos conforme o valor padrão (*default*) adotado pelo software ou encontrados na literatura. Estes dados foram inseridos manualmente no programa, na opção “*simple forcing*” no módulo “ENVI-guide”, como demonstra a Figura 36.

A variável “umidade específica” na altitude de 2500m em relação ao nível do mar, geralmente obtida da estação do aeroporto Marechal Rondon (estação 83362), e fornecida pela Universidade de Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>), não estava disponível. Por isso, adotou-se o mesmo valor de Rosseti (2013), que usou uma média para o período úmido, que foi comparado por outros valores mais recentes da literatura e considerado adequado. Os dados de velocidade dos ventos do dia avaliado no período úmido não foram disponibilizados pelo INMET, portanto, adotou-se uma média dos últimos 09 (nove) dias disponibilizados pela estação, entre 29/11 e 07/12, período mais próximo do dia de medição (20.12.2022), que foi comparado com a média adotada por Rosseti (2013) para o período úmido. Devido à similaridade de ambas as referências, adotou-se o valor

⁸ INMET, 2022. Disponível em: <http://portal.inmet.gov.br>. Acesso em: 20 de março de 2023

médio para o período úmido, conforme sugere a autora. Já para o período seco, adotou-se a média diária da direção predominante e da velocidade, registrada pelo INMET no dia da medição, 05.08.2022. A rugosidade está relacionada com a altura média dos edifícios, o que interfere no fluxo do ar na camada próxima à superfície, para o P1 considerou-se 0.1 e para o P2, 0.9, conforme recomendado por Stewart e Oke (2012).

Os dados do solo foram os mesmos adotados por Rosseti (2013), em uma primeira simulação. Durante o processo de calibração, principalmente da umidade relativa do ar às 20h, que estava muito abaixo da de medição, alterou-se para os dados adotados por Callejas et al (2020), referentes ao mês junho de 2019 (período quente-seco). Porém, para o período quente-seco, os primeiros dados do solo inseridos apresentaram resultados mais próximos das variáveis medidas, retornando com os dados, conforme indicado na Tabela 10. Este processo de ajuste se refere a etapa de calibração que deve ser realizado, principalmente quando não se dispõe de dados meteorológicos completos, com vistas a tornar os dados obtidos na simulação mais próximo daqueles de medição.

TABELA 10 - Dados de entrada na aba *Metereology* do Envi-met

Variáveis	P. Quente-úmido	P. Quente-seco
	20.05.2022	05.08.2022
Temperatura máxima / horário	34,2 °C/ 16h	36,6 °C / 16h
Temperatura mínima / horário	24,5 °C/ 5h	21,70 °C / 6h
Umidade relativa máxima / horário	81% / 6h	61% / 6h
Umidade relativa mínima / horário	37% / 16h	17% / 16h
Velocidade do ar (m/s)	2,09m/s	1,04m/s
Direção do vento (°)	330° (NW)	54 (NE)
Nebulosidade (nuvens baixas)	4	0
Nebulosidade (nuvens médias)	1	0
Nebulosidade (nuvens altas)	0	0
Umidade específica	10,67g/kg	7,7 g/kg
Umidade do solo (0-20cm)	60%	31,5%
Umidade do solo (20-50cm)	65%	31,0%
Umidade do solo (50-200cm)	70%	31,0%
Temperatura do solo (0-20cm)	30,00 °C	28,00 °C
Temperatura do solo (20-50cm)	31,85 °C	29,00 °C
Temperatura do solo (50-200cm)	32,85 °C	29,50 °C

FONTE: Elaboração da autora

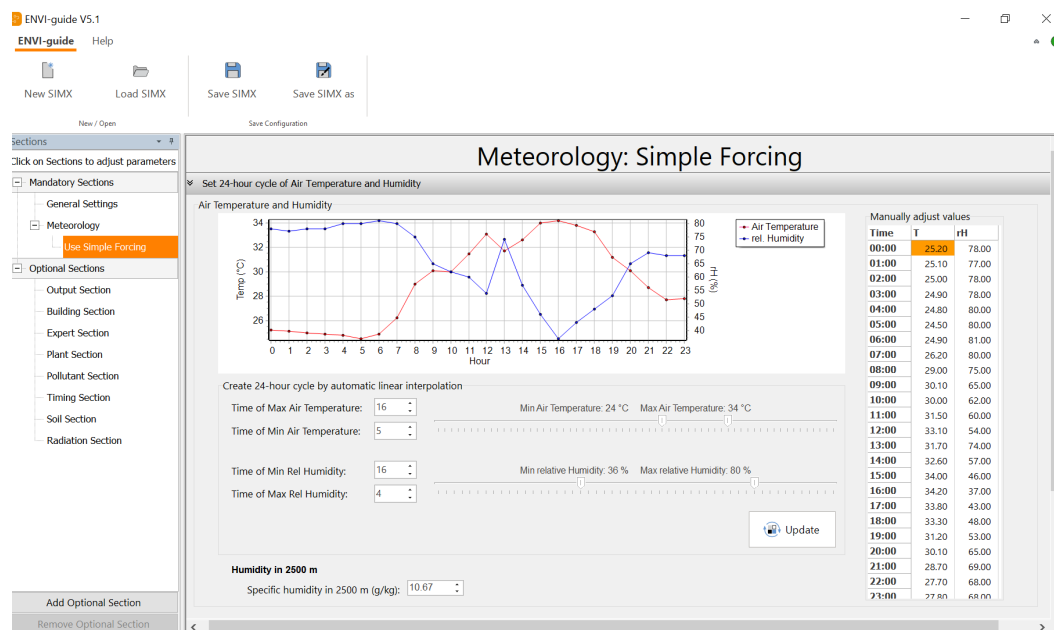


FIGURA 36 - Tela do ENVI-guide: módulo do ENVI-Met para inserção de dados climáticos e temporais, na opção de “Simple Forcing”

FONTE: ENVI-Met v. 5.1.

c) Dados das espécies arbóreas

Para a definição do banco de árvores da simulação do cenário real, adotou-se dois métodos distintos: o primeiro se refere aos espécimes arbóreos que se conhecia a priori o valor de IAF, obtido por meio de medição. Portanto foram criados modelos com informações mais precisas que aquelas disponibilizadas no banco de dados 3D-Plants do software. A segunda, adotada para as demais árvores, usualmente situadas em quintais privados e em áreas grandes de massa arbórea, optou-se por escolher em função das suas características, aquelas existentes no banco de árvores 3D-Plants do software, que foram posteriormente editadas para adaptar às características de altura, de IAF e ainda se a planta era caducifólia ou não. Para a configuração de Densidade de Área Foliar (DAF) no banco de dados de vegetação do software Envi-met das arvores criadas ou modificadas, que considera o IAF distribuído em 10 camadas da altura total da árvore, optou-se por utilizar o método proposto por Rosseti et al., (2019), a partir da identificação de um padrão de densidade de área foliar e geometria de copa das árvores de elevada frequência de ocorrência em Cuiabá – MT. Nos parques mais adensados, como o Morro da Luz (P1) e área de preservação (P2), adotou-se uma mistura de tipologias, assim como ocorre nos cenários reais, porém

sem dados específicos de medição ou identificação dos espécimes arbóreos. De um modo geral, para as espécies não identificadas, foram criados três padrões principais de árvores, conforme a densidade e altura das espécies, denominadas de Árvore Padrão de Baixa Densidade (BD); Árvore Padrão de Média Densidade (MD) e Árvore Padrão de Alta Densidade (AD).

Apesar de algumas árvores frondosas, como a Mangueira e algumas Oitis de grande porte, na arborização implantada na avenida pesquisada, é mais comum e usual a presença de árvores com dosséis pouco densos, galhos espalhados e poucas folhas. Em razão disso, e baseado nas aferições realizadas no local, em diversos espécimes de baixa, média e alta densidade, os valores de IAF adotados ficaram abaixo dos valores considerados por Rosseti et al., (2019), considerando que as aferições serviram de parâmetro e permitiram uma adaptação ao padrão predominante dos espécimes locais.

O diâmetro das espécies foi definido durante a modelagem, de acordo com a imagem satélite e inserida como base na malha dos grids (2m x 2m) adotado, não apresentando uma configuração fixa. Quanto ao ciclo sazonal das folhas, na configuração para calibração, todas as espécies foram consideradas perenes. A aferição de IAF foi feita apenas no período quente-úmido, não sendo possível constatar exatamente a diferença de IAF entre os períodos. Apesar da constatação feita por Lenza e Klink (2006) apud Miranda (2018) e Novais et al. (2021), de que existe um decréscimo na intensidade foliar do dossel arbóreo de espécies nativas do Cerrado da região centro oeste brasileira, em torno de 50 a 60%, entre agosto e setembro, para as espécies encontradas na área de estudo não se observou este comportamento. A Figura 36 ilustra alguns espécimes da espécie *Khaya* presentes no canteiro central da avenida, registradas em junho de 2022 (inverno) e em fevereiro de 2023 (verão), quando foram aferidas, demonstrando pouca diferença na densidade foliar entre os períodos. No entanto, o principal motivo de se adotar valores idênticos para ambos os períodos se deu em virtude da necessidade de realização de ajuste durante a etapa de calibração. Em uma primeira simulação, foram usados arquivos de banco de dados de vegetação diferentes para cada período, considerando uma redução no IAF de algumas espécies, as decíduas e exóticas, no período quente-seco. No entanto, para ajustar alguns resultados de umidade relativa do ar deste período,

simulou-se novamente (apenas para este período) com os mesmos valores de IAF adotados no período quente-úmido, obtendo-se resultados mais próximos.

Na Tabela 11 apresenta-se a relação das espécies criadas no banco dos espécimes arbóreos, com a configuração de IAF e respectiva altura. Já na Tabela 12 estão indicadas as propriedades térmicas, consideradas nas configurações padrões do Envi-met, para o qual apenas se alterou o IAF, a altura e as dimensões do dossel, mantendo-se as demais propriedades. Embora seja uma tarefa difícil configurar todas as informações dendométrica das árvores padrões existentes no banco de dados do Envi-met, devido à abrangência da plataforma de modelagem de vegetação do software, seguiu-se a recomendação de pelo menos ajustar o IAF e a altura a partir de medições e campo (RUI et al., 2021).

TABELA 11 - Relação das espécies arbóreas inseridas no modelo real.

Nome	IAF	h	Local	Nome	IAF	h	Local
Árvore Padrão BD	3,50	4-6	P1/P2	Palmeira Fênix P2	1,3	3,2	P2
Árvore Padrão MD	4,9	7-9	P1/P2	Palmeira P	0,85	5	P1
Árvore Padrão AD	6,3	≥ 10	P1/P2	Palmeira Imperial M	0,85	10	P2
Árvore grande vazada	2	15,0	P1/P2	Árvore Talude	2,10	10	P1
Árvore média vazada	0,9	5	P1/P2	Khaya P	2,7	3/4	P2
Árvore pequena vazada	1,3	2,5	P1/P2	Khaya M	3,3	4/5	P2
Arbusto baixo	1	0,6	P1	Cica	3	2	P2
Arbusto denso	2	1,0	P1	Areca	2	4	P2
Arbusto	1	1,5	P1	Ficus BD	2,8	4/5	P2
Oiti grande	2,24	11	P1	Ficus MD	3,3	5/6	P2
Mangueira PP	4	6	P1	Árvore P2 a	3,0	6,0	P2
Mangueira P	4	8	P2	Árvore P2 b	1,75	5,0	P2
Mangueira M	5	13	P1	Árvore P2 c	2,0	6,0	P2
Mangueira G	6,5	15	P1	Árvore P2 d	2,5	6,5	P2
Palmeira Fênix P1	1	3,2	P1	Grama baixa	1,0	0,1	P1/P2

FONTE: Elaboração da autora

TABELA 12 - Propriedades térmicas das espécies arbóreas.

Parâmetro	valor
Tipo de fixação de CO ₂	C3
Tipo de folhas	dicotiledôneas
Albedo	0,2
Emissividade	0,97
Transmitância	0,3
Profundidade da raiz	2,0

FONTE: ENVI-Met / Simple-plant. Elaboração da Autora

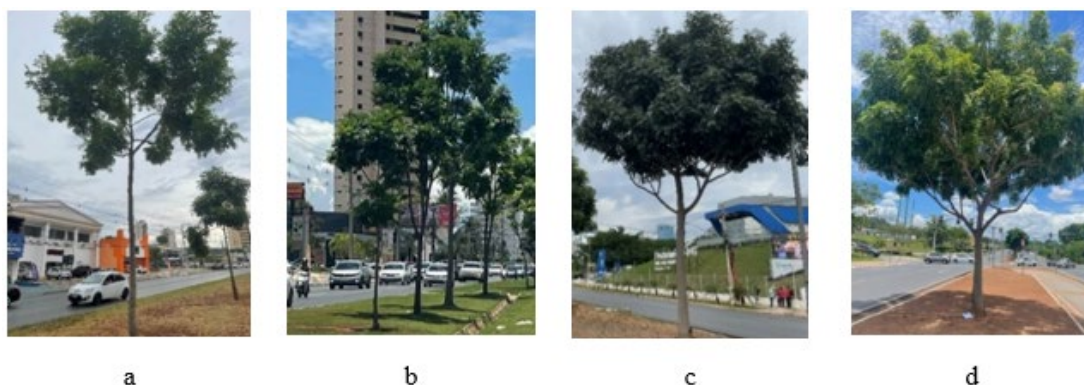


FIGURA 37 - (a) - Espécie *Khaya* em junho /2022; (b) mesma espécie em fevereiro/2023; (c) Outro espécime da *Khaya* em junho/2022; (d) mesmo espécime de (c) em fevereiro/2023

FONTE: Autora

A aferição do Índice de Área foliar (IAF) se deu por meio do analisador *Ceptometer Accupar* modelo LP80, que realiza estimativa instantânea dos valores do IAF e mede a radiação solar no intervalo do comprimento de ondas da PAR em $\mu\text{mol m}^2/\text{s}$ (DECAGON DEVICES, 2017).

A aferição ocorreu no período chuvoso, nos horários de máxima radiação solar, entre 11h e 12h (OLIVEIRA et al. 2013), em 04 (quatro) pontos: 03 (três) sob a área do dossel e 01 (um) fora da área do dossel arbóreo, ou seja, com exposição plena a radiação solar. Por ser período chuvoso, houve a dificuldade de se encontrar dias sem nuvens no exato horário recomendado, por isso, algumas medidas foram feitas em dezembro e outras em janeiro, algumas delas sendo repetidas para confirmação de valores. Os valores aferidos foram usados apenas nas simulações de calibração.

d) Dados de saída

Para a calibração do modelo, foram comparados os resultados das variáveis climáticas Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e Umidade relativa do ar (%), obtidas na simulação computacional com os dados obtidos na medição de campo.

4.4.2. Simulação dos cenários hipotéticos

A simulação computacional é a estratégia escolhida para realizar a etapa experimental da pesquisa, visando atingir o objetivo geral de investigar o efeito dos diferentes índices de cobertura arbórea em duas tipologias distintas de morfologia

urbana (LCZ), contribuindo para a implementação de estratégias de mitigação do aquecimento urbano. A vantagem da simulação computacional se refere a possibilidade de testar diferentes cenários hipotéticos, sem que as intervenções urbanísticas precisem ser implementadas em campo, podendo assim fundamentar/embasar possíveis estratégias projetuais de intervenções urbanísticas em uma região da cidade.

Em síntese, a metodologia adotada para a simulação experimental seguiu as seguintes etapas: a) Definição de um índice de densidade arbórea específico para arborização viária; b) Definição dos cenários hipotéticos e suas variações; c) Modelagem dos cenários no Envi-met; d) Criação do banco de espécies arbóreas; e) Levantamento e seleção dos dados climáticos; f) Definição dos parâmetros de conforto e dados de saída; g) Simulação; h) Elaboração de gráficos e mapas, com análise comparativa dos resultados.

a) Levantamento das áreas para o cálculo de um índice de cobertura arbórea em vias.

Antes da definição dos cenários hipotéticos, com áreas de cobertura arbórea (ACA) distintas, tendo em vista o objetivo geral, que é avaliar o impacto da arborização viária, adotando o índice de cobertura arbórea (ICA) como principal parâmetro, foi preciso estabelecer um método de cálculo para o índice e quais critérios seriam fundamentais considerar na definição da área de referência. Então, foram levantadas as áreas que poderiam ser relacionadas com a ACA, visando a definição de um índice para ser adotado como parâmetro nas avaliações do impacto da arborização viária no conforto térmico de uma via. O principal desafio foi definir qual área deveria ser considerada para expressar uma relação de proporção com a densidade arbórea. Conforme apresentado na revisão bibliográfica (item 2.8), geralmente, os índices verdes costumam relacionar a ACA com uma das seguintes áreas: área total delimitada para o estudo (que pode ser uma praça, uma quadra um determinado recorte da malha urbana); área de superfície edificada e área total edificada (densidade construtiva). No entanto, estes índices não são voltados especificamente para a análise do impacto da arborização viária no conforto térmico do pedestre, costumam ser usados como parâmetros de qualificação do microclima de determinados recortes urbanos. Por isso, considerou-se que a delimitação da área

de estudo para propor um índice que expresse uma proporção de ACA capaz de impactar no conforto térmico do pedestre deveria incluir apenas a área da caixa viária, pois essa tem grande impacto no microclima e no conforto do pedestre, devido à pavimentação asfáltica que absorve e armazena grande quantidade da radiação solar. Além disso, são locais de grande produção de calor antropogênico em consequência da concentração de veículos que emitem CO₂. Logo, descartou-se a possibilidade de se relacionar a ACA com a densidade construtiva ou com uma delimitação de área que inclui os lotes lindeiros, pois estas não impactam no conforto térmico no nível do pedestre.

A Figura 38 ilustra o recorte da área de estudo do P1 e do P2, a partir de imagens do *Google Earth*, demonstrando as áreas que foram cogitadas para servir de relação paramétrica com a área de cobertura arbórea, na definição de um índice para atender ao objetivo desta pesquisa.



FIGURA 38 - Áreas levantadas para serem consideradas no cálculo de um índice para arborização viária, no P1 (superior) e no P2 (inferior).

FONTE: Elaboração da autora

TABELA 13 - Áreas levantadas para serem consideradas no cálculo de um índice para arborização viária

	Áreas	P1	P2	Índice
	Área total de estudo delimitada (via e lotes lindeiros)	15.719 m ²	30.791 m ²	IDAAT
	Área edificada total (térreo e pavimentos superiores)	6.174 m ²	41.280 m ²	IDAAE
	Área da via (calçada, faixa de veículo e canteiro)	6.172 m ²	12.280 m ²	IDAAV
	Área de calçadas (e canteiros, quando existentes)	2.889 m ²	4.785 m ²	IDAAC

FONTE: Elaboração da autora

Os índices que surgiram a partir da relação entre a ACA e as áreas definidas na Tabela 13, foram identificados desta maneira: IDAAT (índice de densidade arbórea por área total); IDAAE (índice de densidade arbórea por área edificada); IDAAV (índice de densidade arbórea por área da via) e IDAAC (índice de densidade arbórea por área de calçadas e canteiros).

b) Definição dos cenários hipotéticos

Para analisar o impacto da arborização viária, definiu-se como método de análise a comparação entre 04 (quatro) cenários diferentes, cuja principal variável é a porcentagem de cobertura arbórea na área da via (implantada em calçadas e canteiros), que é uma consequência de arranjos arbóreos distintos na variação dos seguintes aspectos: dimensão dos espécimes arbóreos (altura total e diâmetro do dossel) e o arranjo, definido pela quantidade e espaçamento entre eles. Estabeleceu-se primeiro um modelo padrão de referência, que é o cenário real existente com a supressão total de todos os espécimes arbóreos na área da caixa viária. As demais massas vegetadas foram mantidas, ainda que diferentes para cada ponto, pois representam o padrão da tipologia morfológica de cada LCZ. Para o P1, o cenário real não tem arborização de calçadas e canteiro central, mas no P2 as árvores existentes no canteiro e nas calçadas foram eliminadas, padronizando-se os cenários de referência como cenários sem arborização na área da caixa viária. Os cenários de referência, do P1 e do P2, foram denominados de Cenário 1 (C1). A partir deste modelo, outros três cenários hipotéticos foram criados com aumento gradativo na área de cobertura arbórea. O próximo passo foi estabelecer um índice de cobertura arbórea comum aos arranjos arbóreos propostos aos cenários nos 02 (dois) pontos, P1 e P2. Embora se encontrem na mesma avenida, de mesma hierarquia viária (via estrutural), com padrão geométrico mínimo (PGM) de 30m), as dimensões da caixa viária, das calçadas e canteiros centrais não são iguais. Por isso, não seria possível manter os arranjos arbóreos (dimensões e distanciamento) no P1 e no P2, pois apresentariam relações diferentes com a área da via, o que impossibilitaria uma comparação equivalente entre áreas com mesmo índice de cobertura arbórea. Então, estabeleceu-se um índice que relaciona a área de cobertura arbórea com a área da via (toda caixa viária), considerando a primeira como a soma da área de projeção dos dosséis arbóreos, enquanto a segunda como a área total da caixa viária (faixas de

pedestre, faixa de veículos e canteiro central). Este parâmetro, o IDAAV (Tabela 13), foi um parâmetro inicial para a definição dos cenários, para que tivessem uma relação proporcional entre a cobertura arbórea e uma área de referência que expressa uma característica da via analisada, e para que a variação dos cenários tivesse um aumento gradativo de mesma proporção nas duas morfologias urbanas analisadas (P1 e P2) avaliados. Contudo, ainda não é uma proposta de índice paramétrico para a arborização viária, pois este exige uma análise mais detalhada para definir um índice representativo na análise qualitativa da arborização viária urbana. Após a análise dos resultados, será apresentada uma discussão quanto à adoção do IDAAV e a sua adequação para ser usado e investigado nas próximas pesquisas em busca de um indicador paramétrico que traga uma relação entre a área de cobertura arbórea e o conforto térmico no nível do pedestre. O objetivo é que o índice sirva de parâmetro na implementação de estratégias de mitigação do calor urbano, especialmente do desconforto térmico do pedestre nas vias urbanas.

De um modo geral, o Cenário (C1) é uma proposta com cobertura arbórea considerada mínima, na qual se atingiu o IDAAV de 15%; o Cenário (C2) com um incremento adicional de 7%, atingindo-se 22% de IDAAV, e o Cenário 3 (C3) é a proposta com cobertura arbórea máxima alcançada, considerando as restrições dimensionais das calçadas e canteiro central. As variáveis entre os cenários, além da área de cobertura arbórea, são os atributos da altura total, diâmetro do dossel e o espaçamento entre espécimes arbóreos, que determinam a área de projeção da cobertura arbórea, e consequentemente o IDAAV.

Os atributos dos arranjos arbóreos foram definidos a partir das referências citadas na revisão bibliográfica (item 2.7 e 2.8) e a da legislação local (Decreto Nº 5.144 de 15 de fevereiro de 2012), buscando atender ambas para testar as referências encontradas, porém sem obrigatoriedade, já que é uma investigação que tem a finalidade de testar novos parâmetros, dentro dos objetivos propostos e das particularidades locais. Priorizou-se atender às restrições de distâncias e de porte dos espécimes, estabelecidas no decreto, pois são coerentes no que diz respeito à mobilidade do pedestre, considerando a segurança e o conforto geral. Assim, as seguintes diretrizes foram atendidas:

- As espécies com fuste maior que 2m, devido à acessibilidade do pedestre, quando em calçadas dotadas de infraestrutura da rede elétrica;
- Árvores de pequeno porte (03 a 05 metros de altura) em calçadas com largura entre 1,50 e 2,00m;
- Árvores de médio porte (6 a 10 metros de altura) em calçadas com largura entre 2,00 e 2,40 m;
- Adotar árvores de médio (6 a 10 metros de altura) e/ou grande porte (acima de 15 metros de altura) em calçadas com largura entre 2,40 e 3,00 m;
- Árvores de grande porte apenas em calçadas com largura superior a 3,00m;
- Distância mínima entre árvores de: 5,00 m (entre árvores de pequeno porte); 8,00 m (entre árvores de médio porte) e 12,00m (entre árvores de grande porte).

Apenas o último item não foi atendido completamente. No P1, em todos os cenários foi possível atender as distâncias mínimas recomendadas, porém, no P2, por ter dimensões maiores, foi necessário aproximar mais as árvores de médio porte do canteiro central para atingir o IDAAV de 35%, diminuindo de 8,00 metros para 7,00 metros a distância entre as árvores do canteiro central e para 5,50 metros nas calçadas. São testes necessários para se investigar os impactos no conforto térmico, e não foram considerados prejudiciais no canteiro central e em calçadas largas, maiores que 3,50 metros, como é o caso do P2.

O P1 encontra-se na área do centro histórico, cujas calçadas e o canteiro central são muito estreitos, exigindo um estudo mais específico para a implementação de um plano de arborização. Por isso, é preciso reforçar que são modelos hipotéticos (cenários reais com propostas hipotéticas de arborização) e não se trata de um projeto de arborização específico para o local. Estes demandariam a análise e especificação de outros aspectos, como a distância entre postes, do meio-fio, de placas e semáforos, larguras mínimas para a circulação livre do pedestre, as questões biológicas das espécies, entre outros fatores. Portanto, essa tese não tem o objetivo de aprofundar estas questões, enfatizando o impacto no microclima e no conforto térmico humano em espaços abertos, e a sua relação com os atributos da arborização investigados, adotando recortes da área urbana para o estudo, mas que

devem atender a outras localidades com mesma morfologia urbana (LCZ) e condição climática.

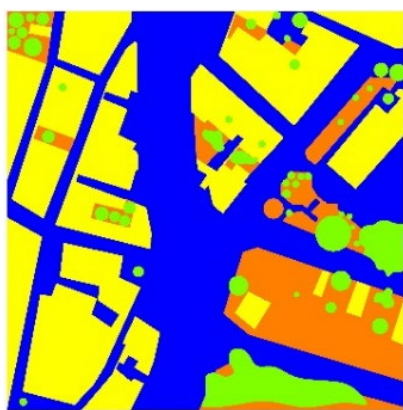
Em paralelo às diretrizes do decreto, buscou-se conciliá-las com os atributos já testados por estudos mencionados na revisão bibliográfica, e que obtiveram os melhores resultados para o conforto térmico. A relação entre a altura e a distância entre as árvores, o ART, ficou entre 0,9 e 1,43, atendendo às conclusões de Zhang et al., (2018) de que ART menores que 2 (dois) devem ser uma prioridade para mitigar o desconforto de ambientes quentes, devido à grandes efeitos na redução do PET no verão.

O diâmetro foi definido a partir da largura das calçadas, considerando um padrão geral de calçadas, permitindo que seja adotado em outras áreas da cidade, não apenas das situadas nas áreas analisadas. Os principais cuidados é que as copas não invadam a testada das fachadas, conflita com os fios da rede elétrica e não gerem manutenção excessiva. Visando coerência entre as características das espécies arbóreas estudadas, embora não seja o objetivo do trabalho aprofundar nas propriedades biológicas das espécies, buscou-se aproximar as características físicas de uma espécie possível de ser implantada em um plano de arborização. Assim, algumas espécies recomendadas para a arborização de Cuiabá, segundo o Decreto municipal (Nº.5144, de 15 de fevereiro de 2012), muitas delas também encontradas no levantamento de campo, são: ipê-branco (*Tabebuia róseo alba* (Ridl.) Sandwith), angelim-do-cerrado (*Vatairea macrocarpa* (Benth.) Ducke), pata-de-vaca (*Bauhinia blakeana* Dunn.), jacarandá caroba (*Jacaranda cuspidifolia* Mart.), ipê-amarelo (Cham.) Standl.), ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart. ex DC) Standl., oiti (*Licania tomentosa* Benth.), acácias (*Acacia* spp.), aroeira-salsa (*Schinus molle* L.), pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.), sucupira- branca (*Pterodon emarginatus* Vogel), tamarindo (*Tamarindus indica* L.); chuva-de-ouro (*Cassia fistula* L.), sombreiro (*Clitoria racemosa* Benth.), louro (*Cordia glabrata* (Mart.) DC), saboneteira (*Sapindus saponaria* L.), entre outras. Como as espécies possuem características diferentes, principalmente na estrutura da copa, nas dimensões e nos valores de IAF, adotou-se uma geometria similar à da espécie oiti (*Licania tomentosa* Benth), apenas como uma referência, pois essa também apresenta variação entre

porte pequeno a grande e nos valores de IAF, porém geralmente apresenta alta densidade foliar e formato globoso de copa.

As Figuras 39 a 46 ilustram a variação dos cenários hipotéticos, com os respectivos arranjos arbóreos, e demais informações das variáveis dos cenários de arborização, como: índice de cobertura arbórea; altura total (h), diâmetro do dossel (D), distância (d) e a relação h/d (altura / distância). Os cortes transversais e longitudinais à via ilustram como as árvores estão implantadas na calçada e no canteiro, e as suas relações dimensionais.

CENÁRIO: C1 – SEM VEGETAÇÃO



LEGENDA:

- Área edificada
- Área impermeável (vias e calçadas pavimentadas)
- Área permeável (vegetada ou não)
- Área de cobertura arbórea
- Área da caixa viária (via estrutural) - 6.172,00 m²

FIGURA 39 – P1: Cenário 1 (sem vegetação)

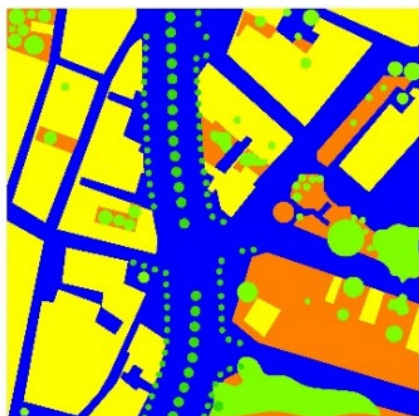
FONTE: Elaboração da autora

CENÁRIO: C2

Dados das Árvores:

Canteiro:

Calçada:



Altura (h):

Diâmetro (D):

Distância (d):

h/d:

Área cobertura arbórea:

Área da caixa viária:

IDAAV:

7m

5m

5m

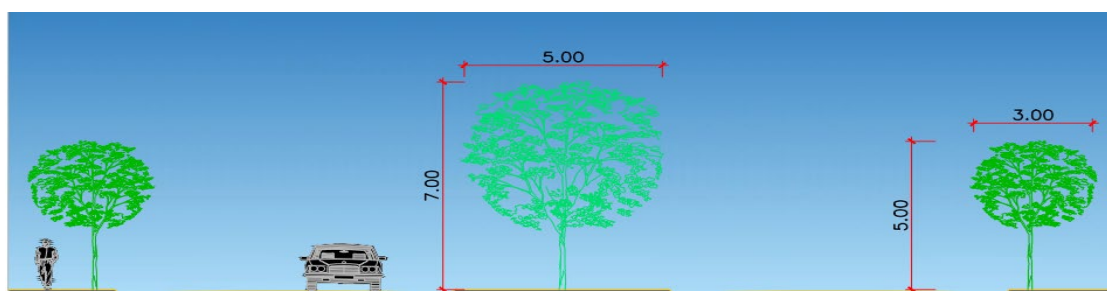
3m

7,5m

5,5m

0,93 (< 1)

0,9 (< 1)

926 m²6.172 m² $926/6.172 = 0,15$ 

Corte transversal (acima) e longitudinal (abaixo, canteiro central e calçada, respectivamente)

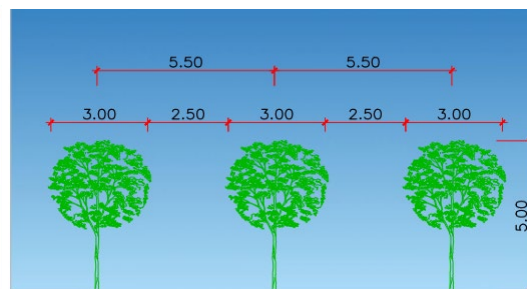
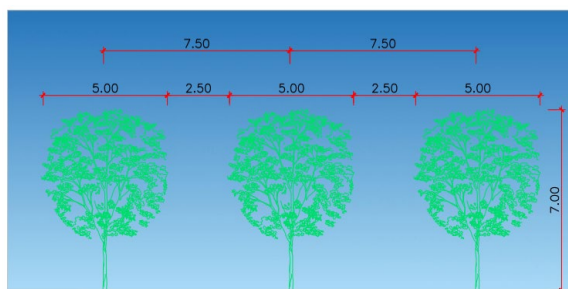
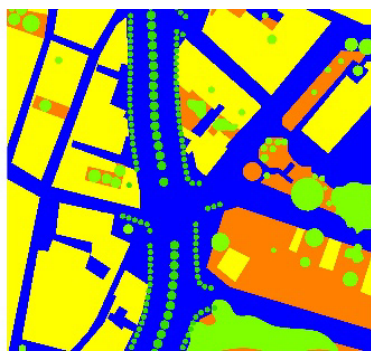


FIGURA 40 - P1: Cenário C2

FONTE: Elaboração da autora

CENÁRIO: C3



Dados das Árvores:

Altura (h):

7m

Diâmetro (D):

5m

Distância (d):

5,5m

h/d:

1,27 (>1)

Área cobertura arbórea:

1357 m²

Área da caixa viária:

6.172 m²

IDAAV:

 $13.57/6.172 = 0,22$

Canteiro:

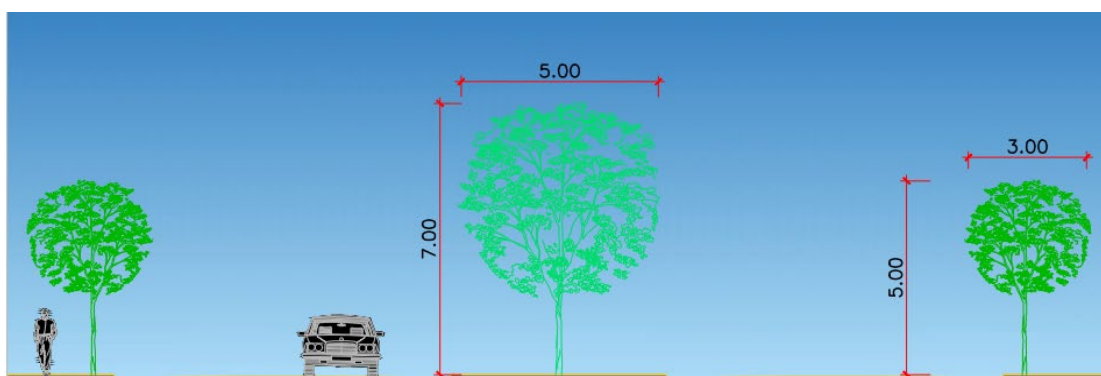
Calçada:

5m

3m

3,5m

1,43 (>1)



Corte transversal (acima) e longitudinal (abaixo, canteiro central e calçada, respectivamente)

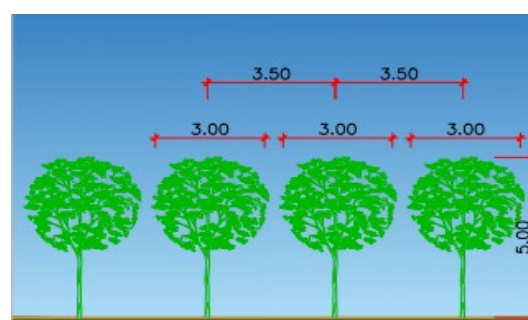
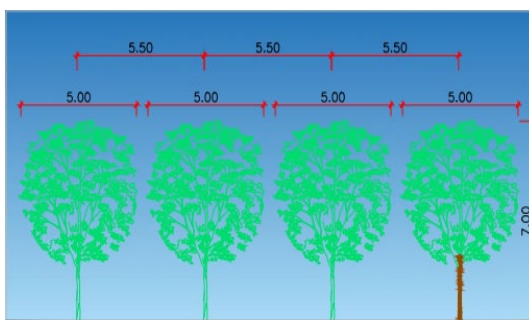
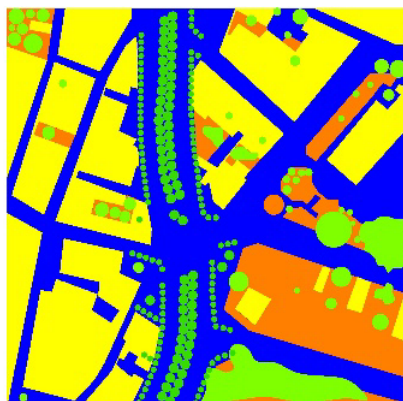


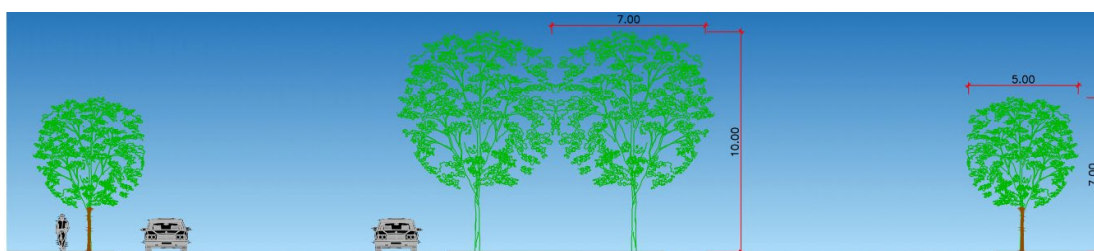
FIGURA 41 - P1: Cenário C3

FONTE: Elaboração da autora

CENÁRIO: C4



Dados das Árvores:	Canteiro:	Calçada:
Altura (h)	7m	5m
Diâmetro (D)	5m	3m
Distância (d)	7,5m	5,5m
h/d	0,93 (< 1)	
Área cobertura arbórea	2160 m ²	
Área da caixa viária	6.172 m ²	
IDAAB	$2.160/6.172 = 0,35$	



Corte transversal (acima) e longitudinal (abaixo, canteiro central e calçada, respectivamente)

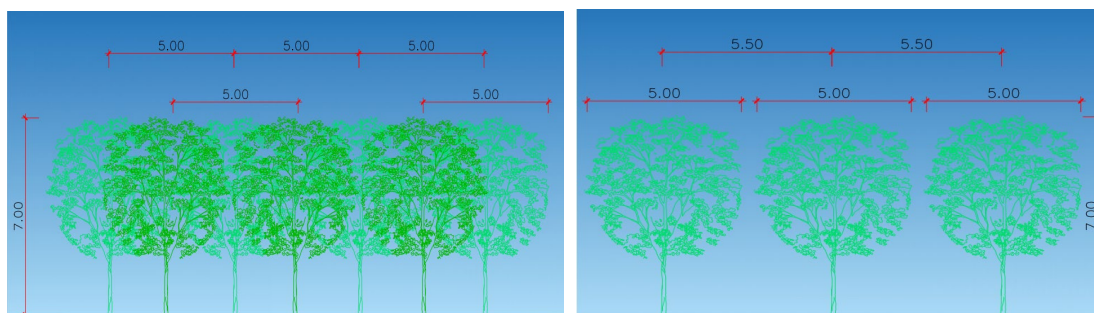
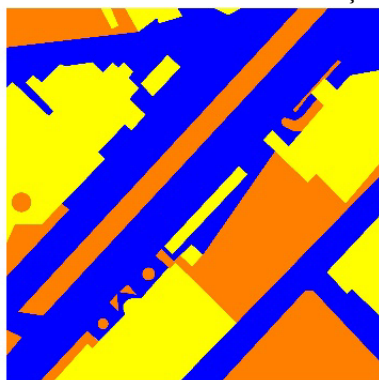


FIGURA 42 - P1: Cenário C4
FONTE: Elaboração da autora

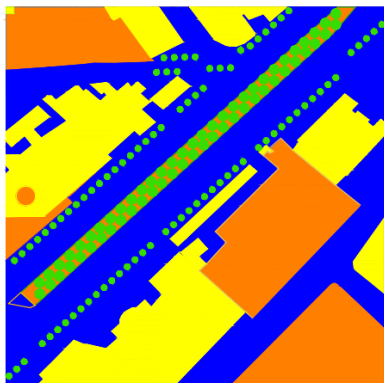
CENÁRIO: C1 – SEM VEGETAÇÃO



Área edificada
 Área impermeável (vias e calçadas pavimentadas)
 Área permeável (vegetada ou não)
 Área de cobertura arbórea
 Área da caixa viária - 12.280,00 m²

FIGURA 43 - P2: Cenário 1 (sem vegetação)
FONTE: Elaboração da autora

CENÁRIO: C2



Dados das Árvores:

Altura (h):

Canteiro:

7m

Calçada:

5m

Diâmetro (D):

5m

3m

Distância (d):

5,7 - 7,5m

5,5m

h/d:

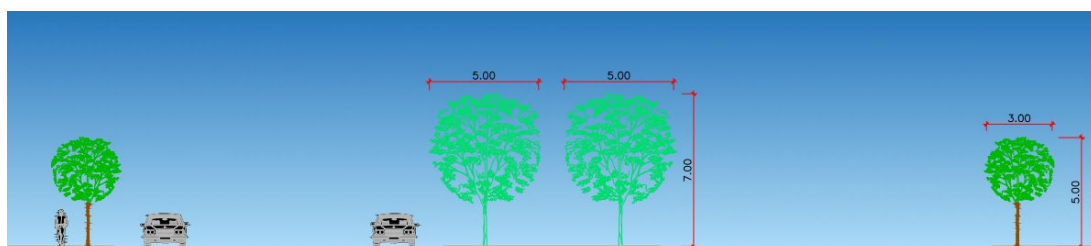
0,93-1,23

0,90

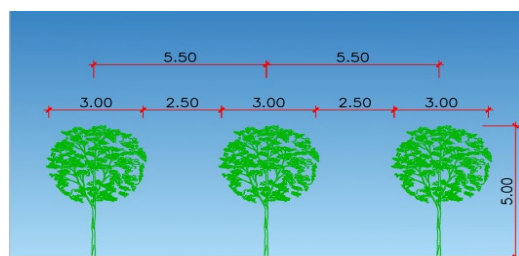
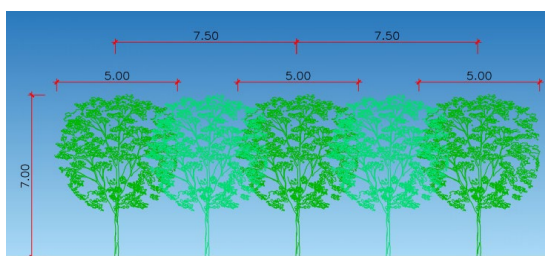
Área cobertura arbórea:

1850 m²

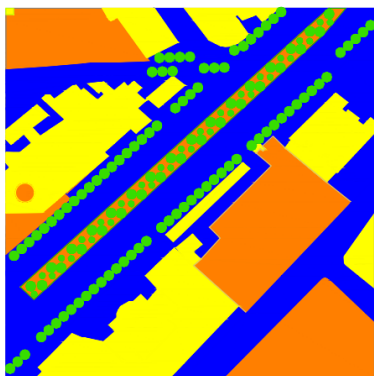
IDAAV:

 $1850/12.280 = 0,15$ 

Corte transversal (acima) e longitudinal (abaixo, canteiro central e calçada, respectivamente)

**FIGURA 44 - P2: Cenário C2****FONTE:** Elaboração da autora

CENÁRIO: C3



Dados das Árvores:

Altura (h):

Canteiro:

7 e 10m

Calçada:

5m

Diâmetro (D):

5 e 7m

5m

Distância (d):

5,2 - 7,5m

5,5m

h/d:

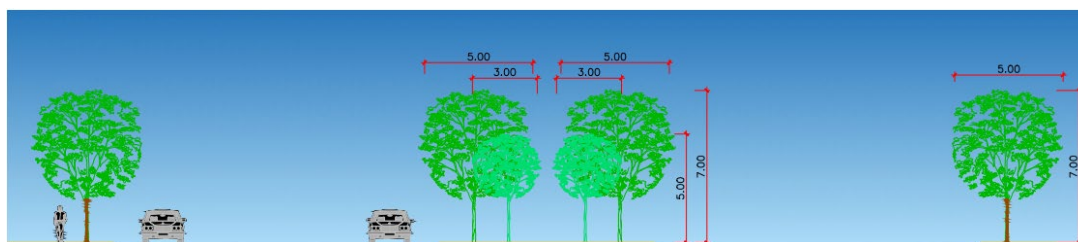
1,33 - 1,35

0,90

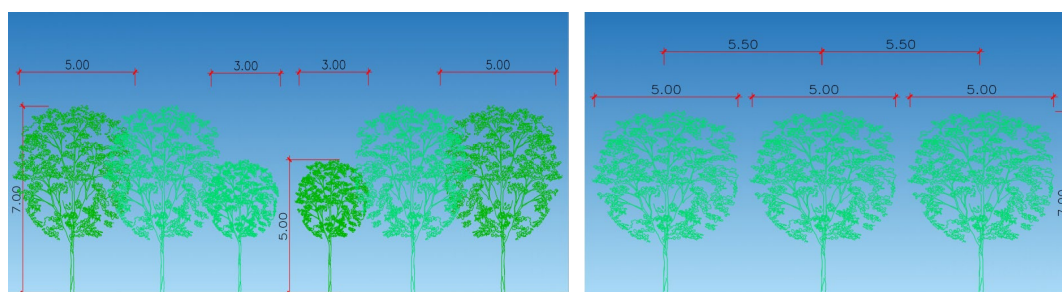
Área cobertura arbórea:

2693 m²

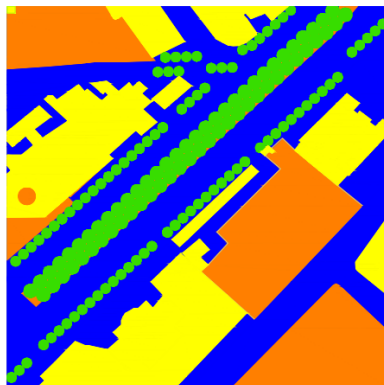
IDAAV:

 $2693/12.280 = 0,22$ 

Corte transversal (acima) e longitudinal (abaixo, canteiro central e calçada, respectivamente)

**FIGURA 45 - P2: Cenário C3****FONTE:** Elaboração da autora

CENÁRIO: C4



Dados das Árvores

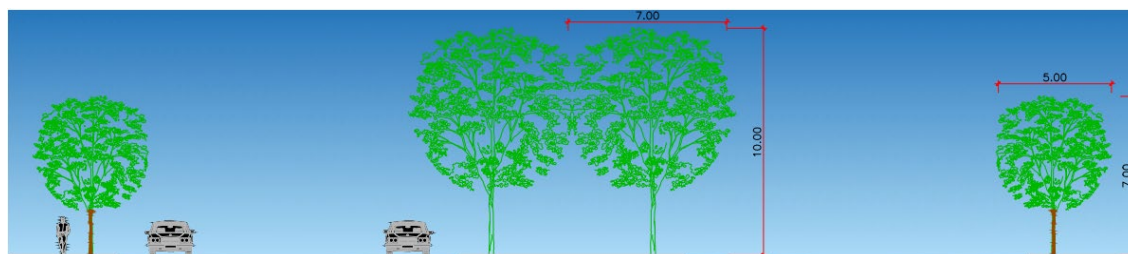
Altura (h)
Diâmetro (D)
Distância (d)
h/d
Área cobertura arbórea
IDAAV

Canteiro:

10m
7m
7m
1,43

Calçada:

5m
5m
5,5m
0,90

4329 m² $4329/12.280 = 0,35$ 

Corte transversal (acima) e longitudinal (abaixo, canteiro central e calçada, respectivamente)

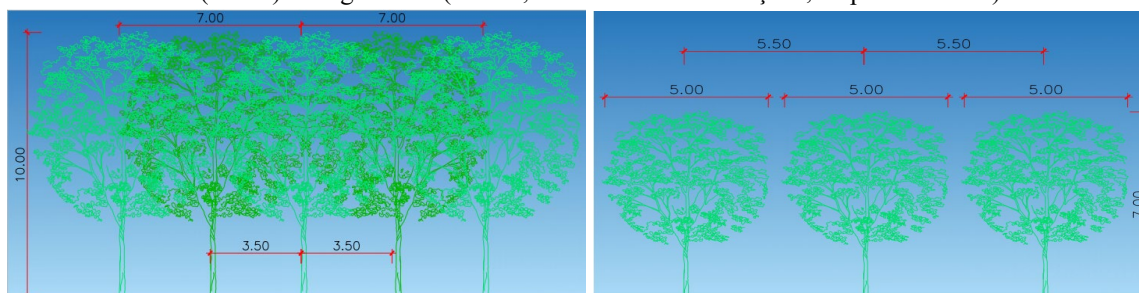


FIGURA 46 - P2: Cenário C4
FONTE: Elaboração da autora

c) Modelagem dos Cenários

Os cenários reais dos pontos P1 e P2, modelados no Envi-met para a calibração do modelo, foram os mesmos usados para servir de cenários de referências desta etapa de simulações experimentais, cujo objetivo foi avaliar o impacto da cobertura arbórea no conforto térmico, e a sua relação com as outras variáveis da arborização viária: altura, diâmetro do dossel e distância entre os espécimes arbóreos. A única alteração foi a remoção total de espécies arbóreas, quando presentes na caixa viária (apenas no P2). A partir do cenário de referência para cada ponto, os demais cenários com as variações no IDAAV e no arranjo foram criados, conforme especificado nas Tabelas 11 e 12, resultando nos modelos geométricos apresentados Tabela 13. Apenas a arborização viária é hipotética, a geometria construtiva e as características de cobertura do solo e revestimento dos materiais foram definidas conforme as características reais, aproximando-se ao máximo da realidade.

Definiu-se a área do modelo geométrico de 100 x 100 grids (200 x 200m), adotando uma área maior que a área de estudo propriamente dita, que é a área da caixa viária, pois o entorno interfere na interface termodinâmica entre superfícies, atmosfera e vegetação para que o modelo calcule com precisão os processos climáticos que agem na área de estudo. Como a morfologia desta área é sinuosa, a área do modelo abrange quadras adjacentes à via estrutural estudada e outras vias, embora não sejam consideradas como objeto de estudo.

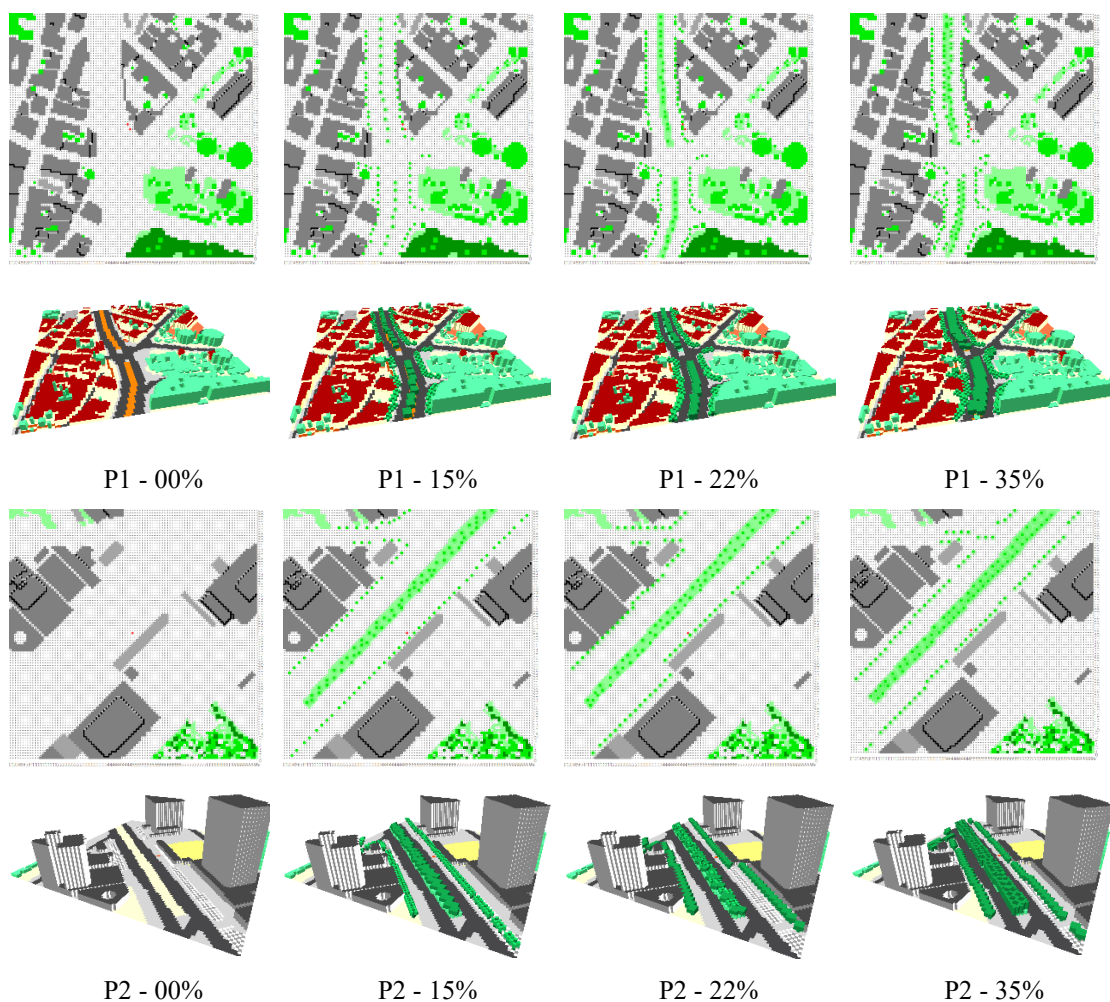


FIGURA 47 - Variação dos cenários, em imagens 2D e 3D, para os pontos P1 e P2

FONTE: Elaboração da autora

d) Dados de Entrada

O banco de dados de materiais construtivos foi o mesmo adotado na simulação de calibração. Basicamente, os novos dados inseridos para esta etapa foram o banco climático e o de vegetação.

Para as simulações dos cenários hipotéticos foi utilizada a opção *Full Forcing*, por ser mais completa e detalhada que o *Simple Forcing*, e por permitir avaliar as condições de um dia típico de cada período e não necessariamente de um dia específico, como foi na simulação para calibração. O arquivo climático adotado foi o *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), em formato “.epw” (*EnergyPlus Weather*), que contém dados de um Ano Climático de Referência (o arquivo adotado é referente ao ano de 2009), construído a partir de anais climáticos com longos períodos de avaliação do local de estudo, da estação meteorológica Marechal Rondon (Várzea Grande-MT). A única seção editada manualmente foi a seção do solo, cujos valores foram os mesmos usados por Rosseti, (2013) para a temperatura, e de Callejas et al., (2020) para a umidade, porém com alguns ajustes baseados na análise dos resultados da simulação de calibração, aumentando um pouco os níveis de umidade (Tabela 14). Os demais itens editáveis foram mantidos na opção *default* do programa.

TABELA 14 - Dados do solo

Variável	Período quente-seco			Período quente-úmido		
	0-20cm	20-50cm	50-200cm	0-20cm	20-50cm	50-200cm
Temperatura inicial do solo (°C)	30	31,85	32,85	28	29	29,50
Umidade do solo (%)	50	60	60	60	65	70

FONTE: adaptado de ROSSETI, (2013); CALLEJAS et al., (2020).

A simulação foi configurada para processar nos mesmos dias que ocorreram as medições (05.08 e 20.12), apenas por uma questão metodológica, sem que tivessem as mesmas condições meteorológicas, já que os resultados não seriam comparados.

Quanto ao banco de dados de vegetação, as árvores utilizadas para a variação do modelo vegetado, foram configuradas no plugin *Albero L-System Editor*, um módulo aprimorado apresentado na versão 5 do Envi-met que conta com um banco de espécies mais amplo, sem alterações de configurações do modelo padrão do software.

Assim, conforme apresentado nas especificações dos cenários, das Tabelas 11 e 12, foram criadas três espécies, com dimensões diferentes de altura e diâmetro: uma de pequeno porte, com 5m de altura e 3m de diâmetro; uma de médio porte,

com 7m de altura e 5 m de diâmetro; e uma de grande porte, com 10m de altura e 7m de diâmetro (segundo a classificação do decreto Nº 5.144). A espécie grande foi utilizada apenas no canteiro central do P2, no Cenário 3 (C3), para atingir a área de cobertura arbórea necessária para enquadrar no IDAAV de 35%. Na Figura 48 é possível verificar o formato e as dimensões se encaixando em módulos de 1m x 1m na tela de modelagem do software Envi-met.

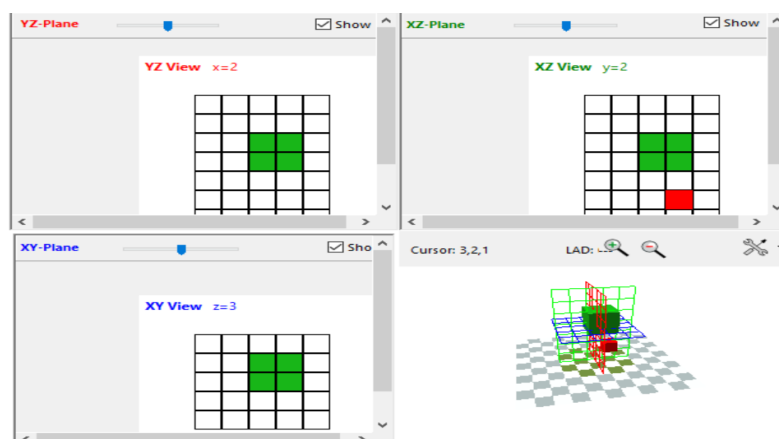


FIGURA 48 - Área de modelagem do Albero / ENVI-met, ilustrando o espécime de 7m de altura e 5 m de diâmetro

FONTE: ENVI-Met / Albero 5.1. Elaboração da Autora

As espécies adotadas são de dossel esférico, pois considerou-se as constatações de Shinzato e Duarte (2019), de uma redução levemente maior na temperatura superficial abaixo deste formato de dossel, em relação à das árvores de copas cilíndricas, mas principalmente por considerar que se adequa melhor nas calçadas sem impactar nas fiações elétricas e demais elementos presentes de fachada ou comunicação visual. Apenas a espécie de porte maior, com 10m de altura, é cilíndrica.

Quanto à densidade foliar, apesar de ser um fator de grande influência, não é uma variável analisada nesta pesquisa, portanto estabeleceu-se um valor fixo para todos os cenários e espécimes inseridos, para que se pudesse avaliar o impacto do índice de cobertura arbórea, para um mesmo valor de IAF. Adotou-se como referência, as conclusões de Shinzato e Duarte, (2018), de que árvores com IAF maior têm mais impactos nos efeitos de resfriamento do ar, confirmando as mesmas constatações de Sun et al, (2017) e Zhang et al., (2018). Por este motivo, e para ter uma área de projeção de dossel efetiva de sombreamento, adotou-se um valor de IAF de espécies de média a alta densidade foliar, com valor de entre 4 e 5m²/m³, tomando

como referência o levantamento realizado por Rosseti et al., (2019), de padrões de densidade de área foliar e geometria de copa das árvores de elevada frequência de ocorrência na arborização pública cidade de Cuiabá (clima tropical em região central do Brasil), considerando espécies nativas e exóticas. A Tabela 16 apresenta os valores de IAF obtidos para as categorias de “baixa densidade”, “média densidade” e “alta densidade”, conforme padrão visual de permeabilidade da copa. Observa-se que em todos os métodos de levantamento, as espécies de categoria de média e alta densidade apresentam valores de IAF próximos de 5.

A oiti (*Licania tomentosa* Benth.), utilizada como uma referência de espécie que poderia ser utilizada na arborização da área de estudo, atende às características do formato de dossel e do valor de IAF. Algumas amostras de oiti foram aferidas e obteve-se uma variação entre 4 e 5 $5\text{m}^2/\text{m}^2$, com poucas exceções para baixo e para cima, a depender do estado de crescimento e saúde da espécie. Porém a maioria se enquadrou na faixa de valores de IAF apresentados na Tabela 15, cuja média é em torno de $5\text{m}^2/\text{m}^2$.

TABELA 15 - IAF para as categorias de baixa, média e alta densidade de área foliar obtidos por meio da metodologia de fotografia hemisférica (com seleção de menor e maior porção da imagem) e ceptômetro

Levantamento	Sequência	IAF		
		Baixa Densidade	Média Densidade	Alta Densidade
GLA menor porção	Árvore 1	2,28	3,83	3,91
	Árvore 2	2,06	3,76	5,4
	Árvore 3	2,82	4,07	6,41
GLA Maior porção	Árvore 1	2,44	3,46	4,10
	Árvore 2	2,41	3,49	4,98
	Árvore 3	3,25	3,80	5,20
Ceptômetro	Árvore 1	0,26	3,98	5,23
	Árvore 2	3,82	5,04	7,12
	Árvore 3	2,84	5,28	7,18

FONTE: Adaptado de ROSSETI et al., (2019)

No entanto, o dado de entrada que o Envi-met considera é o DAF, que é caracterizado em seu banco de dados de vegetação, por meio da divisão da altura do indivíduo arbóreo em dez camadas, contadas acima do solo até o topo da copa. A

somatória da DAF de cada uma das camadas conduz ao valor do IAF da vegetação (Figura 40). Desta maneira, a partir da definição do IAF adotado, obteve-se o valor de DAF, que, ficou estabelecido com o valor fixo de 2 nos 03 (três) espécimes arbóreos criados. assumindo-se a homogeneidade da DAF no interior das camadas.

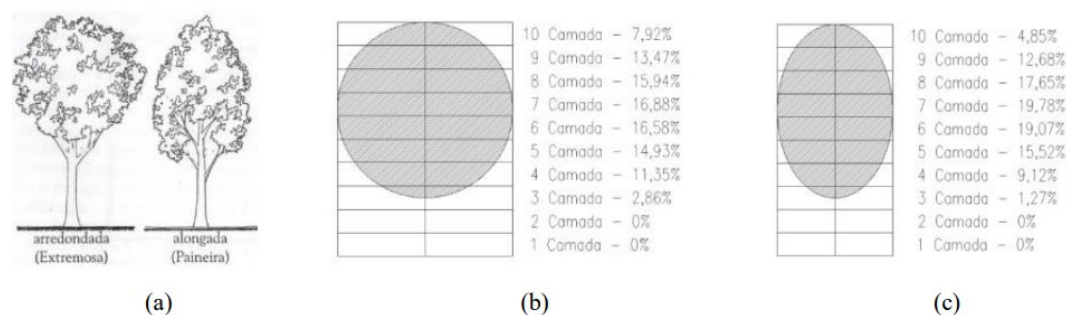


FIGURA 49 - (a) Exemplo de geometrias de copas, arredondada e alongadas, (b) fatores de distribuição da DAF, em 10 camadas, obtido para copas arredondadas e (c) fatores de distribuição da DAF para copas alongadas

FONTE: Gusson e Shinzato, 2015.

As demais propriedades fisiológicas foram mantidas de um modelo padrão do banco de dados, devido à pouca variabilidade entre espécies, baseando-se em características de algumas espécies existentes e recomendadas para a região de estudo, variando-se a altura e o diâmetro apenas, conforme especificado na Tabela 16.

TABELA 16 - Propriedades fisiológicas das espécies

Propriedades	Valores
Tipo de folha (sazonalidade)	perene
Tipo de fixação de CO ₂	C3
Albedo - ondas curtas da folhagem	0.18
Transmitância - ondas curtas da folhagem	0.30
Emissividade das folhas	0.96
Capacidade isoprene	12.00
Peso das folhas (g/m ²)	100.00
Diâmetro da raiz	3.0
LAD (para cada camada)	2.0

FONTE: Adaptado de ROSSETI (2013) e CALLEJAS et al., (2020).

Foi editado um calendário anual, em que é possível colocar um fator de redução para a densidade foliar, deixando os meses de junho, julho e agosto com 90% da densidade foliar da espécie em relação aos demais meses.

e) Configuração dos Parâmetros de Conforto

O Modelo Envi-met calcula o índice PET (*Physiological Equivalent Temperature*) no módulo BioMet, a partir da inserção dos dados relativos a uma pessoa (características corpóreas e da atividade) e das variáveis climáticas, incluindo na análise os efeitos da radiação direta, difusa e refletida pelos pavimentos e edificações. Para o cálculo da sensação térmica, adotou-se o padrão da ISO 7730 (2005), mesmos adotados por Yoshida, Shinzato e Duarte (2022): Idade: 35 anos; Gênero: masculino; Peso: 70kg; altura: 1,70m; atividade: caminhando com velocidade igual a 1,21m/s, e taxa metabólica de 130 W; valor de isolamento térmico das roupas: 0,5clo (roupas de verão).

f) Tratamento dos Dados de Saída

O processamento de dados e geração dos resultados no Envi-met se dá no módulo Biomet, em caso de se adotar parâmetros de conforto, e depois são analisados e tratados com o módulo acoplado ao software, chamado Leonardo, que disponibiliza os dados das variáveis resultantes e possibilita fazer a análise e representações dos efeitos proporcionados pelos elementos nas simulações.

O último passo, para iniciar a simulação propriamente dita, foram as configurações no módulo Envi-core sobre o período analisado (duração da simulação), considerando um período de adaptação do microclima de 24h, antes do início do período avaliado, então a duração da simulação foi configurada para um total de 48 horas obtendo assim uma estabilização da simulação do software.

Todos os resultados das simulações se referem a pontos situadas a 1,5 metros de altura acima do solo, por ser a altura média aproximada do core central do corpo humano, em pé, nos usos habituais do espaço urbano.

Quanto às variáveis climáticas a serem adotadas como parâmetro de avaliação, definiu-se para cada objetivo específico qual ou quais variáveis climáticas seriam adotadas nas análises. Então, a análise dos resultados foi dividida em 04 (quatro) etapas, cada uma para responder a um objetivo específico.

A primeira e principal análise tem o objetivo geral de avaliar o impacto da arborização viária no conforto térmico do pedestre, considerando o índice de cobertura arbórea como a principal variável avaliada. Para isso, foi realizada uma análise em que se comparou as variáveis climáticas Temperatura do ar (T_{ar}), em °C; Umidade Relativa do Ar (UR), em %, e Temperatura radiante média (T_{rm}), em °C, entre um determinado ponto (denominado Ponto A) no cenário sem arborização viária (C1), e sob o dossel arbóreo nos cenários arborizados, com índices de cobertura arbórea crescentes (C1, C2 e C3). A diferença entre a T_{rm} (ΔT_{rm}) de cada cenário foi calculada, utilizando-se os dados das 14h, horário em que se registraram as T_{rm} máximas, para verificar qual cenário obteve o maior impacto.

A outra variável adotada para completar esta análise foi a média das T_{rm} , que permite avaliar o impacto na redução geral da T_{rm} do cenário todo, e não de maneira pontual nos pontos de sombra e de exposição. A média considera as T_{rm} de todos os pontos contidos no modelo de 100x100 grids (para cada grid o Envi-met gera um resultado).

Por último, para a análise da sensação de conforto térmico nos diferentes cenários de cobertura arbórea, adotou-se, o PET (*Physiological Equivalent Temperature*), que é o mais recomendado (LIU et al., 2021). É um índice amplamente utilizado em análises climatológicas urbanas e por isso considerado o mais viável a comparação entre estudos de diferentes regiões e zonas térmicas. Porém, deve-se considerar que o índice foi desenvolvido na Europa, com condições de aclimação para os climas europeus, podendo superestimar a sensação de calor, por não se adequar à realidade regional. Não é objetivo deste trabalho calibrar o PET convencional para o PET do clima local, sendo essa uma sugestão para trabalhos futuros. A análise dos PETs foi feita a partir de mapas cromáticos que permitem visualizar espacialmente como a sensação térmica se difere nos diferentes pontos do cenário.

Após a comparação entre as variáveis climáticas dos cenários com índices de cobertura arbórea distintos, será feita uma análise quanto ao índice de cobertura arbórea mais adequado para servir de parâmetro nas avaliações do impacto da arborização viária no conforto térmico do pedestre. Nesta análise são apresentados

dois métodos para o cálculo do índice e sugerido o que for considerado mais adequado para atender a essa função.

Na terceira etapa de avaliação, foi feita uma análise paramétrica para verificar a influência do porte das árvores no efeito de resfriamento da arborização viária. Esta é a única análise feita isoladamente dos cenários modelados das áreas de estudo da pesquisa (P1 e P2). Esta análise é importante, pois na metodologia adotada nesta pesquisa, os cenários apresentam fatores variados que podem interferir no efeito de atenuação das temperaturas, como a cobertura do solo, a distância entre os espécimes e a morfologia urbana. Assim, a análise contribui para a análise do impacto do índice de cobertura arbórea, pois permite compreender quais outros fatores interferem. Para isso criou-se um modelo geométrico simples de 100x100 grids, com uma geometria construtiva ortogonal e simétrica, composta por uma via no centro com 30m de largura e lotes dos dois lados de 35 x 24m. Os lotes possuem ao fundo uma área permeável de 5m de profundidade e o restante da área é ocupada por edificação térrea, em arranjo característico de LCZ 3. Cada simulação avaliou o efeito de um dos espécimes arbóreos criados no banco de dados do Albero: uma árvore de porte pequeno, com 5m de altura e 3m de diâmetro (arranjo com 3m de distância); uma árvore de porte médio, com 7m de altura e 5m de diâmetro (arranjo com 5m de distância); e outra de grande porte, com 10m de altura e 7m de diâmetro (arranjo com 7m de distância). Foram modelados 3 cenários idênticos, inclusive com índices de cobertura arbórea iguais, com a única variável sendo o porte das árvores, que foram alocadas na calçada bilateral e no canteiro centra, apenas um tipo para cada cenário. A Figura 50 ilustra o modelo 2D, do cenário com a árvore grande, com imagem do Envi-met.



FIGURA 50 - Modelo geométrico para simulação paramétrica da análise do impacto do porte das árvores

FONTE: Elaboração da autora/ Envi-met

A quarta e última etapa de avaliação tem o objetivo de investigar a influência do tipo de cobertura do solo nos efeitos de resfriamento da arborização viária. Como o índice de cobertura arbórea não é objeto de análise aqui, adotou-se apenas um dos cenários, tomando o cenário de maior cobertura arbórea (C4), como referência. Da mesma maneira, a morfologia urbana também não é analisada nesta comparação, por isso apenas o P1 (LCZ 3) foi considerado para esta análise específica, pois tem menor interferência do sombreamento provocado pelos edifícios e por ser a área de estudo mais quente no período diurno.

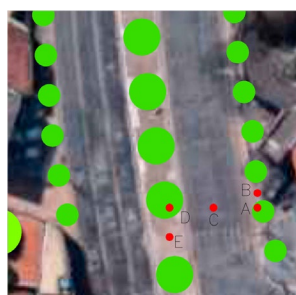
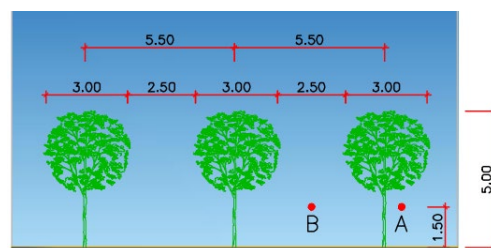
Foram estabelecidos 05 (cinco) pontos (Tabela 17), em posições diferentes no cenário, em relação à exposição da radiação solar e ao tipo de cobertura do solo, para avaliar o impacto da arborização viária, em pontos sombreados e não sombreados, e a influência da cobertura do solo. comparou-se a T_{rm} dos Pontos A, B, C, D e E (Figuras 50 e 51) do cenário com maior cobertura arbórea, com a T_{rm} do Ponto B do cenário de referência, sem arborização viária (C1). O motivo de se comparar com o Ponto B é que é o ponto na calçada, onde os pedestres transitam, embora todos os pontos no cenário de referência apresentem temperaturas praticamente iguais, com no máximo 0,07 °C de diferença.

TABELA 17 - Localização dos pontos de avaliação e condições

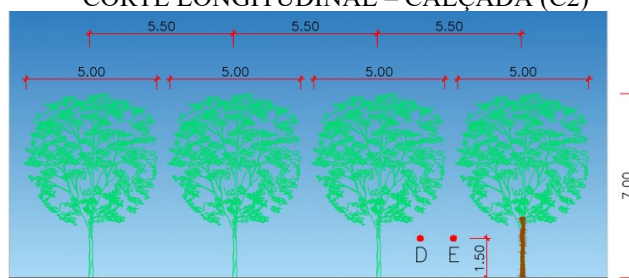
Ponto	Condição	Local	Cobertura do solo
A	sob dossel arbóreo	calçada	concreto
B	fora da projeção do dossel arbóreo	calçada	concreto
C	Exposição solar (longe dos dosséis)	Faixa veículo	asfalto
D	sob dossel arbóreo	Canteiro central	grama
E	fora da projeção do dossel arbóreo	Canteiro central	grama

FONTE: Elaboração da Autora.

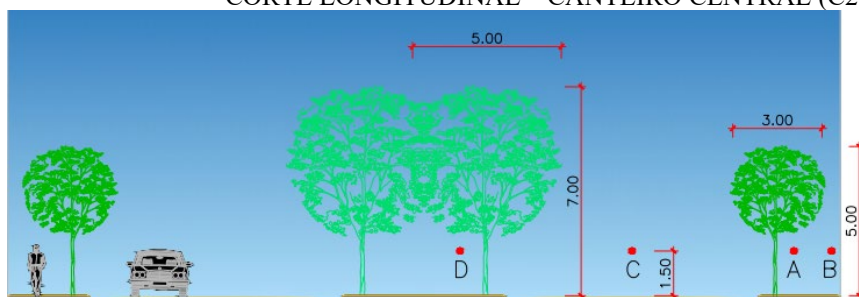
A Figura 51 e 52 ilustram a posição dos pontos avaliados nos cenários, do P1 e do P2, respectivamente. Adotou-se um dos cenários arborizados para demonstrar a posição dos pontos em relação à exposição solar, o C2 (cenário de menor IDAAV) para o P1, e o C4 (cenário de maior IDAAV), para o P2. Nos demais cenários os pontos seguem com a mesma característica, apenas ajustando-os aos arranjos arbóreos, que se diferem entre os cenários.

VISTA SUPERIOR
(Recorte do cenário C2)

CORTE LONGITUDINAL – CALÇADA (C2)



CORTE LONGITUDINAL – CANTEIRO CENTRAL (C2)



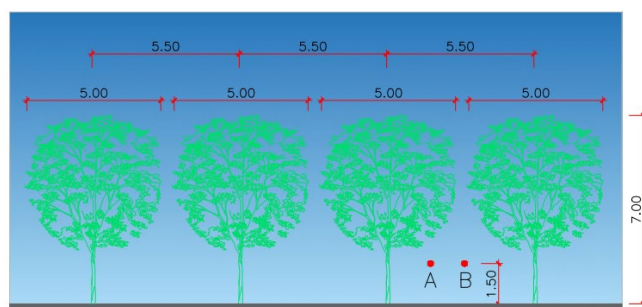
CORTE TRANSVERSAL (C2)

FIGURA 51 - No P1: (a) Posição dos pontos de avaliação estabelecidos, em vista superior; (b) em corte transversal, e (c) em corte longitudinal.

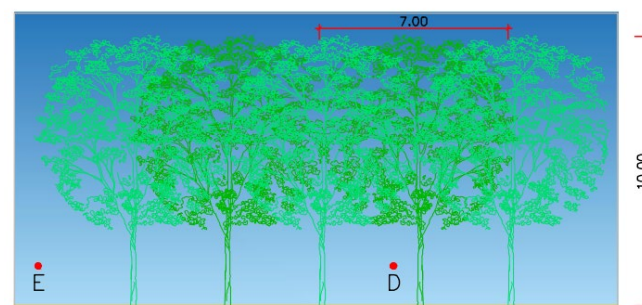
FONTE: Elaboração da autora



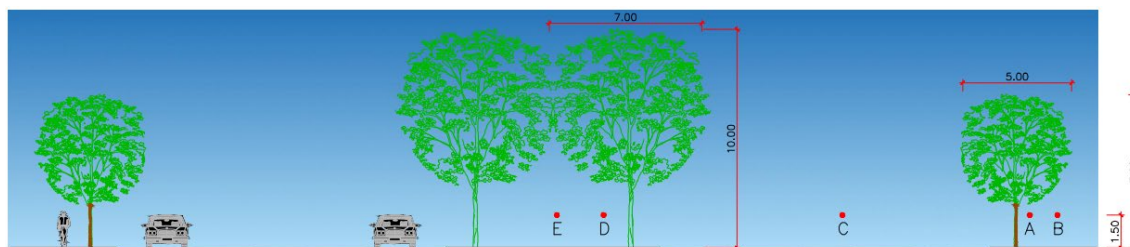
VISTA SUPERIOR
(Recorte do cenário C4)



CORTE LONGITUDINAL – CALÇADA (C3 e C4)



CORTE LONGITUDINAL – CANTEIRO CENTRAL (C4)



CORTE TRANSVERSAL (C4)

FIGURA 52 - No P2: (a) Posição dos pontos de avaliação estabelecidos, em vista superior; (b) em corte transversal, e (c) em corte longitudinal.

FONTE: Elaboração da autora

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. CALIBRAÇÃO DOS MODELOS TRIDIMENSIONAIS

A Tabela 18 e a Figura 53 ilustram os resultados obtidos, da medição (em linha contínua), da simulação (em linha tracejada) e da estação de referência (INMET), para os mesmos horários (em linha pontilhada). Os dados da estação não são dados do momento exato da medição, é uma média entre valores máximos e mínimos do horário analisado. Além disto, é importante lembrar que a estação não se encontra exatamente no local experimental, e sim a alguns quilômetros distantes, justificando pequenas diferenças entre as variáveis climáticas, servindo por isso apenas como uma referência aproximada. Na Tabela 19 apresenta-se as diferenças entre a temperatura e umidade relativa do ar dos dados da medição e da simulação, destacando, com fundo cinza, os valores que não atenderam ao requisito de tolerância de erro, de 10%.

TABELA 18 - Dados de Medição e de Simulação

HORÁRIO	8h		14h		20h	
VARIÁVEIS / PONTOS	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Tar: INVERNO - MEDIÇÃO	26,52	26,60	38,31	37,40	30,93	30,57
Tar: INVERNO - SIMULAÇÃO	26,28	26,35	34,98	34,46	31,43	31,31
Tar: INVERNO - ESTAÇÃO REF.	25,95	25,95	36,75	36,75	30,10	30,10
Tar: VERÃO - MEDIÇÃO	30,12	29,22	34,2	34,41	28,97	28,62
Tar: VERÃO - SIMULAÇÃO	28,82	29,03	33,51	33,16	30,92	30,63
Tar: VERÃO - ESTAÇÃO REF.	27,50	27,50	31,80	31,80	29,40	29,40
UR: INVERNO - MEDIÇÃO	50,00	50,10	25,30	25,20	40,60	40,70
UR: INVERNO - SIMULAÇÃO	49,36	47,62	23,82	24,22	30,12	30,28
UR: INVERNO - ESTAÇÃO REF.	38,50	38,50	14,00	14,00	27,50	27,50
UR: VERÃO - MEDIÇÃO	69,70	71,90	53,30	52,30	73,40	74,90
UR: VERÃO - SIMULAÇÃO	68,87	66,68	52,23	51,45	56,14	57,34
UR: VERÃO - ESTAÇÃO REF.	69,00	69,00	50,50	50,50	58,00	58,00

TABELA 19 - Diferenças na temperatura e umidade relativa do ar, entre medição e simulação

Temperatura do ar (°C)			TOLERÂNCIA		TOLERÂNCIA
			DE 10%		DE 10%
			INVERNO		VERÃO
				ΔT VERÃO	
				(°C)	
			ΔT INVERNO		
		(°C)			
P1	8h	0,24	2,65	-1,30	3,01
	14h	3,33	3,83	-0,69	3,42
	20h	-0,50	3,09	1,95	2,90
	8h	0,25	2,66	-0,18	2,92
	14h	2,94	3,74	-1,25	3,44
	20h	-0,74	3,06	2,01	2,86
Umidade do ar (%)			TOLERÂNCIA		TOLERÂNCIA
			DE 10%		DE 10%
			INVERNO		VERÃO
				ΔUH VERÃO	
				(°C)	
			ΔUH INVERNO		
		(°C)			
P1	8h	0,64	5,00	-0,83	6,97
	14h	1,48	2,53	-1,07	5,33
	20h	10,48	4,06	-17,26	7,34
	8h	2,48	5,01	-5,22	7,19
	14h	0,98	2,52	-0,85	5,23
	20h	10,42	4,07	-17,56	7,49

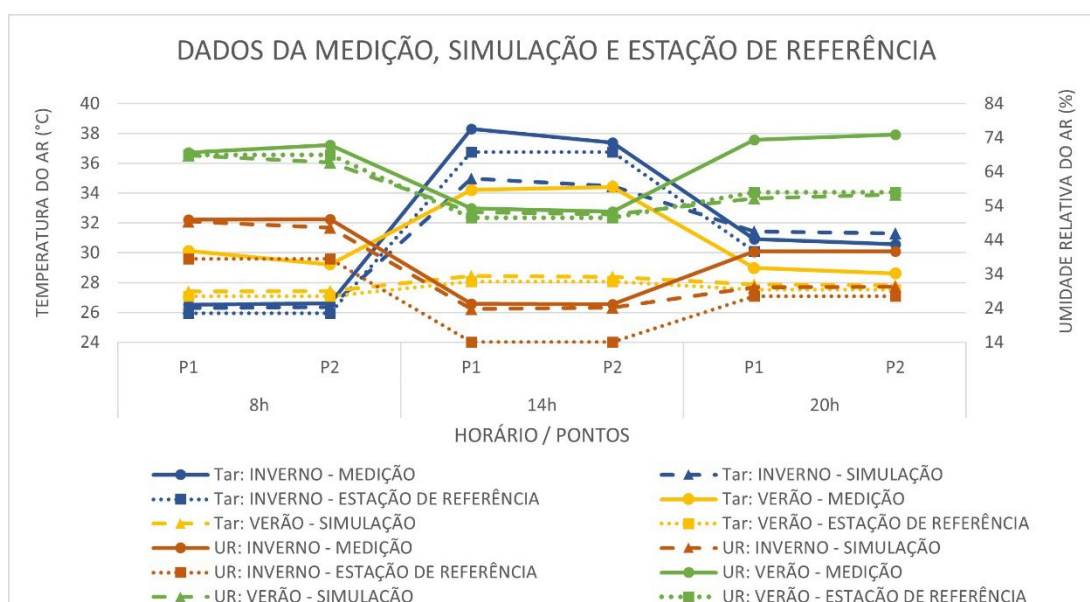


FIGURA 53 - Gráfico com dados de Medição, simulação e da estação de referência

FONTE: Elaboração da Autora

A validação dos resultados foi feita com a tentativa de garantir de que todas as diferenças de valores entre simulação e medições estivessem dentro do limite de tolerância ao longo de todo o período de avaliação. Assim, todas as diferenças entre registros de simulação e medição deveriam ser inferiores ao critério de 10%,

geralmente adotado nas pesquisas. De um modo geral, isso foi alcançado, observando-se o mesmo comportamento das variáveis na medição e na simulação, com exceção da umidade relativa do ar, às 20h, tanto no período quente-seco (inverno), quanto no período quente-úmido (verão), nos pontos pesquisados.

Para verificar o grau de correlação entre os dados medidos e simulados, foi feita uma análise estatística, adotando-se os métodos de Regressão Linear e Correlação de Pearson. A Figura 54 apresenta os resultados da Regressão Linear, enquanto a Tabela 20 apresenta os valores obtidos a partir dos métodos adotados, para o P1 e para o P2, no período quente-seco e quente-úmido.

TABELA 20 - Resultados obtidos nas análises estatísticas

Variável/ Período	Método estatístico	
	Regressão Linear	Correlação de Pearson
Temp. ar / quente-seco	0,93	0,97
Temp. ar / quente-úmido	0,68	0,83
Umidade Rel. / quente-seco	0,83	0,92
Umidade Rel. / quente-úmido	0,39	0,62

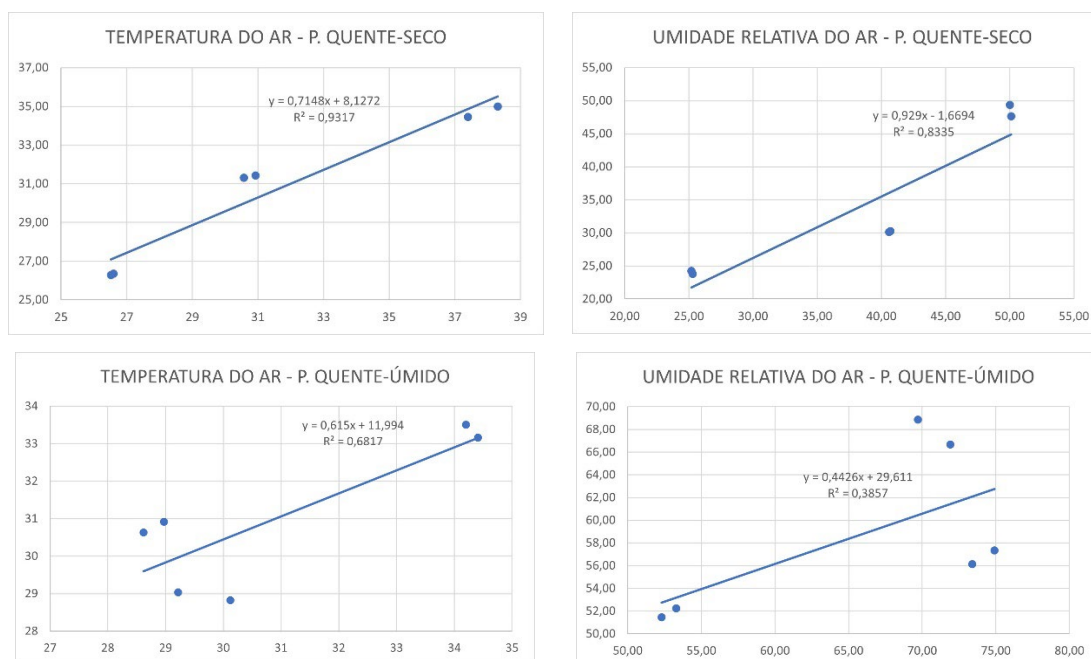


FIGURA 54 - Gráficos de Regressão Linear para dados de Temperatura do ar e Umidade relativa do ar, nos períodos avaliados.

A análise confirmou as constatações visualizadas por meio dos gráficos, principalmente quanto à baixa correlação obtida para a umidade relativa do ar, na

estação do verão. Para ajustar os resultados, principalmente da umidade relativa do ar às 20h que estava muito abaixo da de medição, os dados do solo foram alterados para os mesmos dados adotados por Callejas et al (2020), referentes a junho de 2010 (período quente-seco). Porém, para o período quente-seco, a diferença em relação aos dados medidos foi maior, retornando com os primeiros dados considerados, conforme a Tabela 10. Este ajuste no processo de calibração é natural, principalmente quando não se conhece todos os dados do dia, pois usar valores médios ou aproximados não correspondem à realidade podendo prejudicar a comparação entre simulação e medição.

Outros ajustes realizados foram nos valores de nebulosidade, velocidade do ar e dados de IAF (apenas no inverno), porém, apesar de melhorar alguns dos valores em alguns horários, outros pioraram e a umidade do ar às 20h ainda continuou discrepante. Então retomou-se os valores da primeira simulação, cujos dados de entrada foram os mais próximos dos reais obtidos. Esta diferença brusca, maior que a tolerância de 10% aceitável, corrobora os resultados obtidos de Michelin (2021), para Florianópolis (SC), em que o autor verificou a tendência do software Envi-met subestimar a UR, que ficou abaixo dos valores medidos nos três horários, em ambos os períodos avaliados, especialmente às 20h.

Nos outros horários, obteve-se aderência entre os dados medidos e simulados, todos dentro da faixa de 10% de tolerância. A temperatura do ar, às 14h no inverno (período quente-seco) foi a que apresentou discordância maior, de 3,33°C, contudo, ainda dentro do limite estipulado. Sun et al (2017) explica que desvios de 10 e 35% entre dados de simulação no ENVI-met e dados de medição são comuns devido às diferenças na inserção dos parâmetros entre cenário real e simulado, das propriedades térmicas dos edifícios, as propriedades das árvores e os dados meteorológicos que nem sempre são medidos ou obtidos com precisão. Liu et al. (2021) reforçam este fato afirmando que na modelagem, por questão de tempo, os dados de entrada muitas vezes são assumidos de maneira generalizada, ao invés de medidos, ou seja, adotando dados aproximados ou médias de uma série de dados obtidos para outros períodos ou locais próximos, o que pode alterar o resultado do cálculo termodinâmico.

Outros erros não sistemáticos de operações experimentais ocorrem com certa frequência, como por exemplo, o calor antropogênico gerado pela influência humana, dos veículos e dos sistemas mecânicos de resfriamento, que geralmente não são contabilizados; o calor da energia solar transmitida através de um dossel vegetativo não uniforme, o que pode superestimar a radiação solar, ou ainda possíveis erros de medição da densidade de área foliar, que pode influenciar a distribuição da folhagem e introduzir incertezas. Além destes fatores, os dados de inicialização de temperatura do ar e umidade relativa foram obtidos de uma estação meteorológica situada em local diferente do local experimental, que embora não muito afastada, pode apresentar diferenças microclimáticas. Considerando estas observações e as condições em que esta simulação aconteceu, conclui-se que, mesmo com alguns parâmetros aproximados, e mesmo com a discordância observada para a umidade relativa do ar às 20h, o Envi-met forneceu uma representação coerente dos dados medidos em campo, considerando-o adequado para prosseguir com as simulações experimentais dos cenários hipotéticos. Contudo, ressalta-se a importância de se fornecer dados de entrada mais próximos possíveis da realidade para evitar erros.

5.2. SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas simulações computacionais, conforme definido no Capítulo 4 (Material e Métodos). A análise foi dividida em quatro etapas: A primeira tem o objetivo de avaliar o impacto da arborização viária no conforto térmico humano, considerando o índice de cobertura arbórea como principal parâmetro. Para isso foram comparadas as seguintes variáveis climáticas entre os cenários com diferentes índices de cobertura arbórea: Temperatura do ar (T_{ar}); Umidade Relativa do ar (UR); Temperatura radiante média (T_{rm}); Diferença da T_{rm} (ΔT_{rm}) entre cenários; média da T_{rm} e PET. Na segunda análise, a partir dos resultados obtidos na primeira, se discute a adequação do índice IDAAV (índice de densidade arbórea por área de via) para servir de parâmetros em análises do impacto da arborização viária, comparando-se com outro índice, o IDAAC (índice de densidade arbórea por área de calçadas e canteiro). Na terceira análise, realiza-se a comparação entre cenários, considerando-se o IDAAC. A quarta e última análise apresenta a comparação entre pontos sombreados e não sombreados,

em diferentes coberturas do solo, no mesmo cenário e em uma morfologia urbana apenas (P1), com o objetivo de se avaliar a influência da cobertura do solo no efeito de resfriamento da arborização.

As tabelas matrizes que reúnem todos os dados obtidos para o P1 e P2, nos dois períodos analisados, seguem em anexo para conferência dos dados (Tabela 21 a 24).

5.2.1. Análise do impacto da arborização viária, comparando cenários com diferentes índices de cobertura arbórea. (T_{ar} ; UR; T_{rm} ; média T_{rm} ; ΔT_{rm} ; PET)

a) Temperatura do ar

A Figura 55 apresentam os resultados da Temperatura do ar, plotados em gráficos, separados pelo período do ano e por morfologia urbana: P1 (LCZ 3) e P2 (LCZ 4).

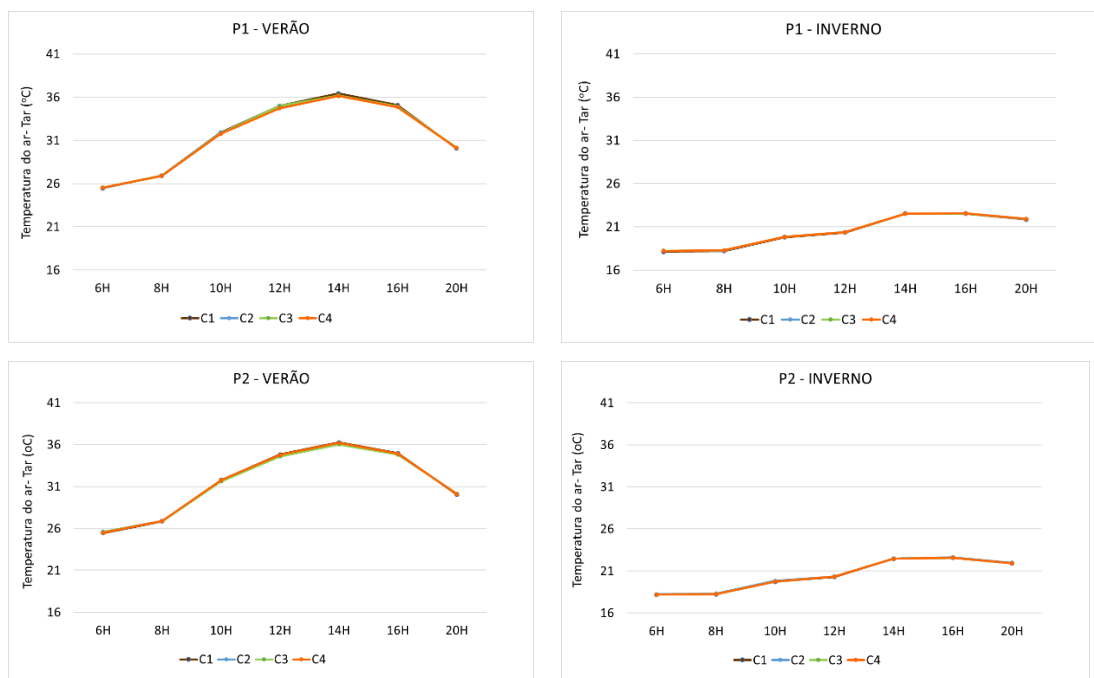


FIGURA 55 - Dados de Temperatura do ar do Ponto A, nos cenários (C1, C2, C3, C4), no P1 (superior) e no P2 (inferior)

Os gráficos e mapas indicam que a arborização viária não impacta na temperatura do ar do ponto A (na calçada), tanto no P1(LCZ 3) quanto no P2 (LCZ 4), no verão e no inverno e em todos os cenários avaliados. A redução máxima da T_{ar} ocorreu no P2, no período mais quente do dia, às 14h, com 0,22 °C de redução no

verão, sendo menor ainda no P1. No inverno, embora as diferenças sejam irrelevantes, ocorreu o efeito contrário ao resfriamento, com aumento da T_{ar} , maior no P2 (LCZ 4), onde se constatou uma média 0,06 °C de aumento na temperatura ao longo do dia. Este resultado demonstra que mesmo com o incremento na área de cobertura arbórea, a arborização não é suficiente para se atingir reduções relevantes na temperatura.

As figuras 56 a 59 confirmam os resultados acima, ilustrando espacialmente com a temperatura se comporta diante dos elementos arbóreos e construtivos. A vantagem da análise espacial é que não se limita a comparar apenas o impacto em um ponto, pois permite visualizar como a redução ocorre no espaço. Como a temperatura do ar não sofreu impactos significativos, não foi dado enfoque na análise desta variável. Em síntese, observa-se que os impactos ocorrem de maneira mais expressiva, ainda que sutilmente, sob os dosséis arbóreos do canteiro central, com menor efeito nas bordas. O impacto maior ocorreu no verão, com máxima redução no P1, de até 0,3 °C no canteiro, com uma abrangência espacial maior no C4, e menor no C3. Nas calçadas a redução da temperatura foi nula (como demonstrado nos gráficos da Figura 53), sendo que em algumas áreas a temperatura aumenta com a arborização. Quanto às áreas adjacentes à via, não foi verificado nenhum efeito na redução da temperatura do ar das áreas adjacentes à via, ao contrário, em algumas áreas verificou-se um aumento sutil de até 0,03°C na temperatura (área de mancha rosa escuro e vermelho no mapa), principalmente no C4 do P1 e no C2 do P2, ambos no inverno.

No P2, percebe-se um resfriamento sutil de no máximo 0,03 °C nas áreas que são sombreadas pelo edifício alto, no horário avaliado (14h), demonstrando que nas áreas mais ensolaradas o sombreamento arbóreo em pouco contribui para redução da temperatura. O C2 apresentou o maior impacto, com abrangência do impacto na área da via, enquanto o C3 obteve o menor impacto. Apesar de pequeno, o impacto da vegetação se estende no verão para além das áreas do canteiro e calçadas, uma vez que o vento transporta a umidade do ar para as demais regiões.

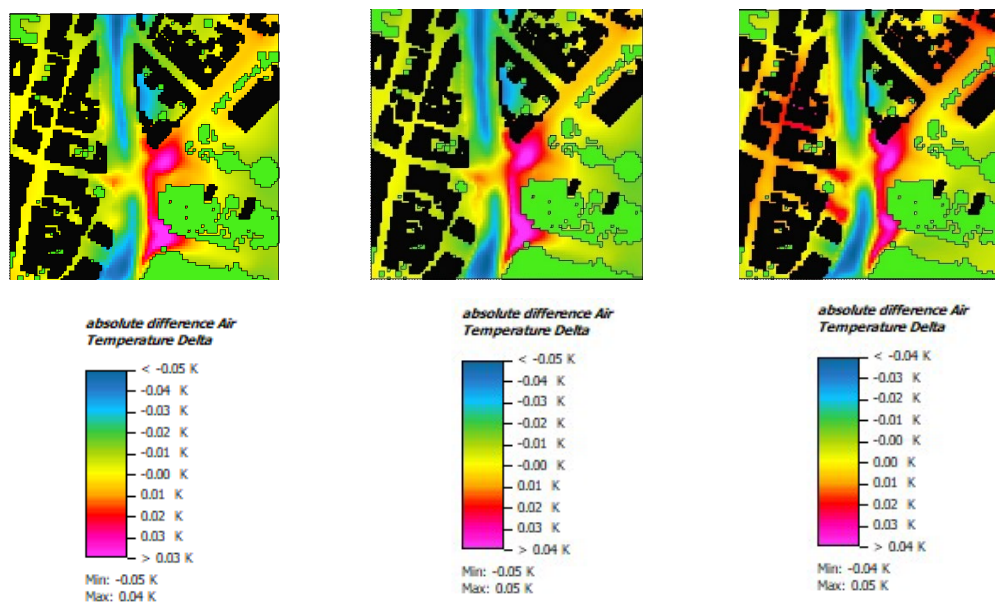


FIGURA 56 - Mapas cromáticos de ΔT , às 14h, entre os cenários (C2) (esq.), (C3) (centro) e (C4) (dir.), em relação ao cenário de referência (C1), no P1 e no inverno.

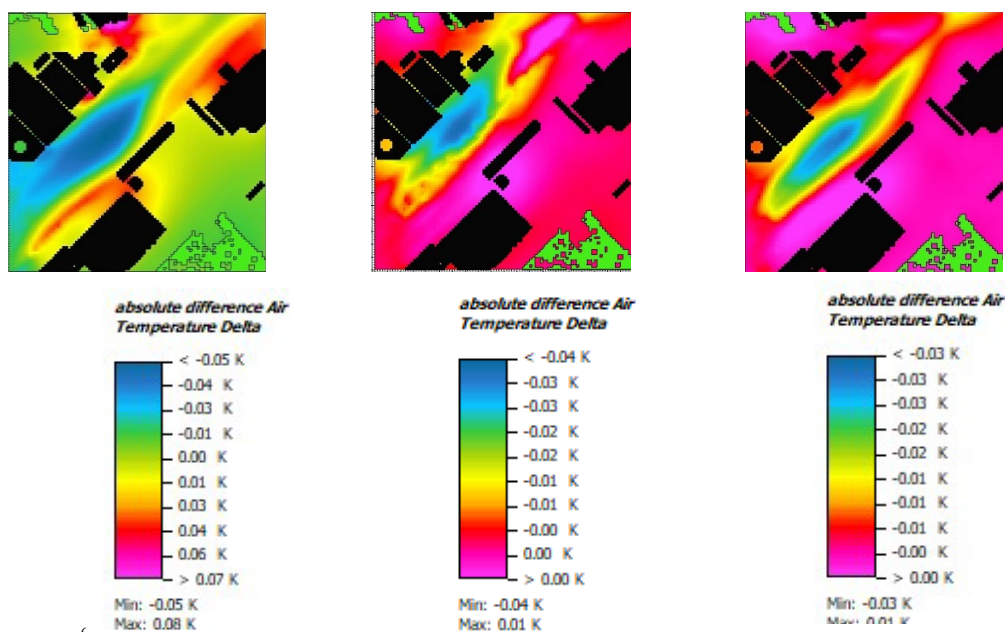
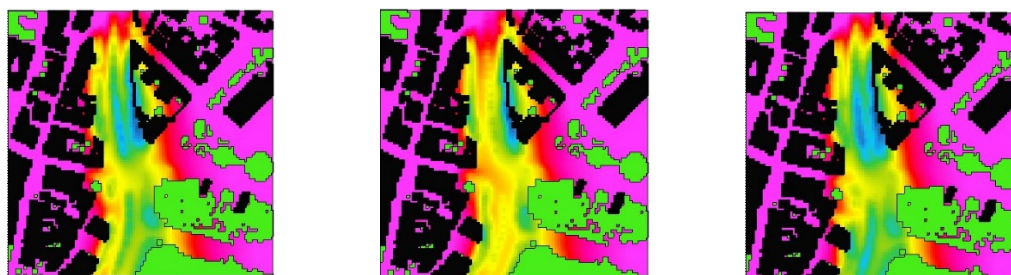


FIGURA 57 - Mapas térmicos de ΔT , às 14h, entre os cenários (C2) (esq.), (C3) (centro) e (C4) (dir.), em relação ao cenário de referência (C1), no P2 e no inverno.



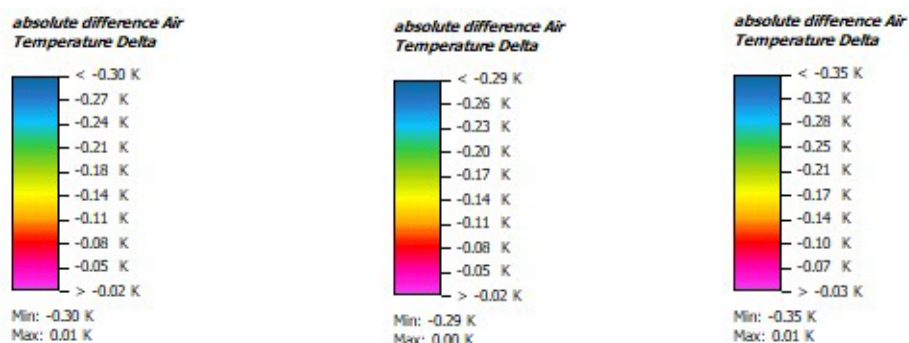


FIGURA 58 - Mapas térmicos de ΔT , às 14h, entre os cenários (C2) (esq.), (C3) (centro) e (C4) (dir.), em relação ao cenário de referência (C1), n P1 e no verão.

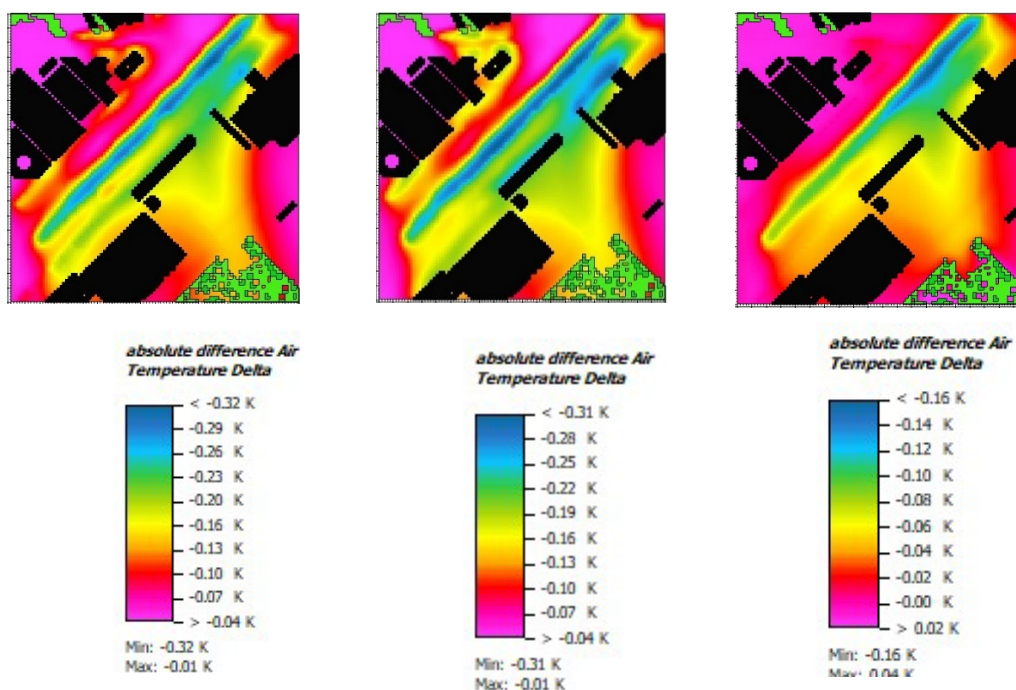


FIGURA 59 - Mapas térmicos de ΔT , às 14h, entre os cenários com (C2) (esq.), (C3) (centro) e (C4) (dir.), em relação ao cenário de referência (C1), no P2 e no verão.

É esperado que as reduções sejam sutis, devido ao rigor climático da região e devido aos outros fatores do ambiente urbano que interferem, como os revestimentos, por exemplo. Há de se considerar, contudo, as pesquisas que também obtiveram respostas pouco impactantes e/ou negativas na T_{ar} , em cenários arborizados em relação aos não arborizados, como a de Yoshida, Shinzato e Duarte (2022); Novais et al., (2021) e Callejas et al., (2020), estes últimos para a mesma região de estudo, em que também se observou uma redução pequena, de apenas $0,1^{\circ}\text{C}$ na temperatura do ar (CALLEJAS et al., 2020). Isto é devido a evapotranspiração ser um processo que tem efeito sobre a temperatura de bulbo úmido e não de bulbo seco, por isso tende a manter a temperatura do ar estável. A diminuição do fluxo dos ventos e da dissipação

da radiação de ondas longas, causada pelas copas das árvores, também podem interferir negativamente no microclima devido ao efeito guarda-chuva. Liu, Zheng e Zhao (2018), também constataram uma subestimação do efeito térmico das árvores, ou seja, das diferenças entre áreas sem árvores e áreas sombreadas, que costumam ser menores no Envi-met para cada variável do microclima, em relação às medidas de campo. Isso pode ser considerada uma limitação do software, pois não consegue simular a evaporação que ocorre nas folhas das plantas de forma adequada, ocasionando subestimação dos valores, se comparados aos medidos.

Observa-se, portanto, a importância de se avaliar, além do índice de cobertura arbórea e de sombreamento arbóreo, as variações no arranjo (distância entre elas), da altura das espécies e do IAF, para confirmar quais aspectos podem melhorar o desempenho térmico e impacto desta estratégia de mitigação nos espaços urbanos. (ZHANG et al., 2018; RUI et al, 2018).

b) Umidade relativa do ar

A Figura 60 apresenta os resultados da umidade relativa, demonstrando que esta variável também não sofre impacto significativo da arborização arbórea em nenhuma das morfologias urbanas (LCZ 3 e 4) e nos dois períodos do ano. Uma investigação acerca da umidade do solo deve ser verificada em futuros estudos para averiguar se este parâmetro é o responsável pelo efeito pequeno, já que é um aspecto importante que influencia na evapotranspiração da vegetação.



FIGURA 60 - Umidade relativa do ar (%), do Ponto A, nos cenários (C1, C2, C3, C4), no P1 (superior) e no P2 (inferior).

Ainda assim, a umidade aumentou devido ao fenômeno de evapotranspiração, intrínseco à presença da vegetação, embora sutilmente. O impacto maior da UR se deu no verão, nos horários mais quentes, com aumento de 1,11% (às 14H) no P2 (LCZ 4) e 0,81% (às 12H) no P1 (LCZ 3). Já no inverno, obteve-se um efeito contrário, com redução, embora sutil (máximo de 0,21%, no P1). Portanto, a arborização não contribuiu para o aumento da umidade relativa do ar. A obstrução dos ventos, que dificulta a evaporação, é apontada como uma das causas para este efeito. Outro fator se refere ao déficit de água no solo, que é um fator determinante para evapotranspiração da vegetação, e por isso, um dado de entrada importante a ser considerado no Envi-met. Buscar informações sobre valores reais são recomendados para a confirmação e precisão dos resultados

c) Temperatura radiante média (T_{rm})

A temperatura radiante média (T_{rm}) é a variável que sofreu os maiores impactos nos horários mais ensolarados, principalmente no P2 (LCZ 4), conforme demonstra a Figura 61. Por ser a variável mais impactante e que mais interfere no conforto térmico, foi adotada como principal variável de avaliação.



FIGURA 61 - Temperatura radiante média (oC), do Ponto A, nos cenários (C1, C2, C3, C4), no P1 (superior) e no P2 (inferior).

Em todos os cenários arborizados (C2, C3, C4), a presença da arborização viária reduz os valores da T_{rm} no Ponto A, no período diurno, principalmente nos horários mais quentes (14h), com reduções máximas no verão, de 14,16 °C e 30,92 °C, no P1 (LCZ 3) e P2 (LCZ 4), respectivamente. No entanto, no período noturno e nas primeiras horas da manhã, antes da incidência solar, há o efeito praticamente nulo no inverno e contrário no verão, com aumento da T_{rm} , de cerca de 0,50 °C às 6h e cerca 2,0 °C às 20h. Isso ocorre por causa do efeito guarda-chuva das copas das árvores, e das múltiplas reflexões de radiações de ondas longas, que aquecem a superfície do solo e o ar adjacente, que não consegue dissipar o calor sob as copas, mantendo-o aquecido por mais tempo, em relação aos pontos descobertos.

No P1, as reduções na T_{rm} são proporcionais ao incremento da cobertura arbórea, com diferenças sutis entre o C3 e o C4, demonstrando que o aumento da área de cobertura arbórea tem benefícios, porém até certo ponto, pois podem prejudicar o resfriamento do ar logo abaixo das copas. Já no P2, a redução da T_{rm} ocorreu inversamente proporcional ao índice de cobertura arbórea, com o efeito decrescente mais notório no verão. Ou seja, neste período, as maiores ΔT_{rm} ocorreram no cenário de menor cobertura arbórea (C2), seguido do C3 e, por último no C4, que obteve o menor impacto, contudo ainda significativo, de 10,5 °C. No inverno, os cenários (C3 e C4) obtiveram resultados próximos, ambos com pouco impacto na redução da T_{rm} , em média de 1,04 °C, entre 10h e 14h, enquanto o C2,

assim como no verão, impactou mais significativamente, com ΔT_{rm} de 12,2 °C. Isso demonstra que para este tipo de morfologia, caracterizada pela presença de edifícios altos em arranjo esparsos (LCZ 4), e consequentemente um menor fator de visão do céu, o incremento nas áreas de cobertura arbórea pode prejudicar a dissipação do calor que se acumula sob as copas devido às múltiplas reflexões de ondas longas. Ou seja, o sombreamento arbóreo impacta na T_{rm} , pois intercepta a radiação solar direta. Por outro lado, a obstrução ao vento e à emissão de ondas longas, causada pelas copas das árvores, prejudica as perdas convectivas e radiativas, tendo por isso um efeito negativo ao resfriamento. Deve-se investigar outros fatores que possam influenciar na redução da T_{rm} , além da morfologia urbana, como altura e a distância entre as espécies. Isso porque os cenários (C2, C3 e C4), embora apresentem mesmo índice de cobertura arbórea (IDAAV) nas duas morfologias urbanas, P1 e P2, não apresentam o mesmo arranjo arbóreo, pois a área das caixas viárias e consequentemente das calçadas e canteiros não são iguais, gerando arranjos diferentes para que atingir um mesmo índice de cobertura arbórea. Outro fator que pode influenciar no impacto da arborização é a orientação solar do eixo da via, pois impacta no maior ou menor sombreamento provocado pelos edifícios altos na caixa viária. Porém, este aspecto não é objeto de análise nesta pesquisa. Então, é necessário analisar outros aspectos como o arranjo e a altura, para confirmar quais aspectos impactam mais nessa estratégia de mitigação do calor urbano, corroborando os achados de Zhang et al (2018) e Rui et al (2018).

Com exceção dos resultados para P2 no verão, nas demais simulações o C3 (IDAAV de 22%) e o C4 (IDAAV de 35%) apresentam T_{rm} semelhantes, ficando com valores muito próximos em alguns momentos do dia. Porém, no P1, em alguns momentos do dia, no C4, embora maior cobertura arbórea, há aumento da T_{rm} em relação ao C3.

A Figura 62 evidencia os impactos na T_{rm} entre o cenário sem arborização (C1) e os cenários arborizados (C2, C3 e C4), às 14h, que é o horário em que a T_{rm} é máxima no cenário sem vegetação, confirmando os resultados observados.

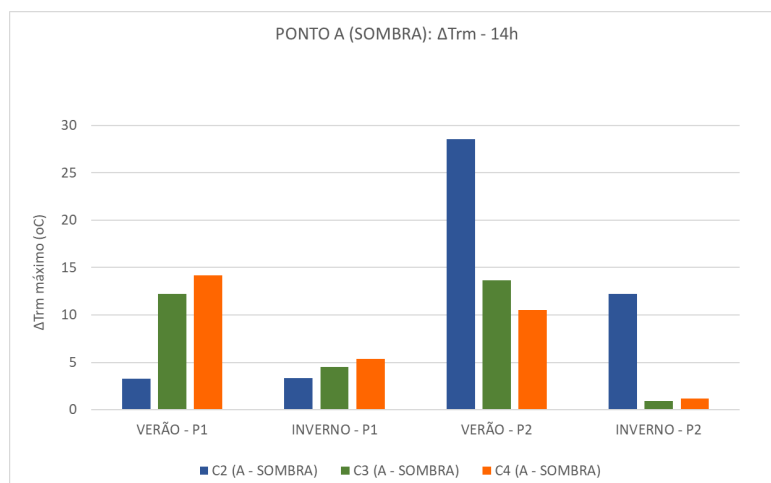


FIGURA 62 - ΔTrm às 14h (máxima Trm) entre o Ponto A de cada cenário arborizado (C2; C3 e C4) e o cenário não arborizado (C1)

Na Figura 63, a Trm do P1 e P2 estão plotadas juntas em um dos cenários (C2) para melhor visualização da diferença do impacto da arborização entre as morfologias urbanas, no verão e no inverno, sem avaliar o incremento do índice de cobertura arbórea. Percebe-se que em ambas as estações do ano, o impacto é maior no P2, em relação ao P1.

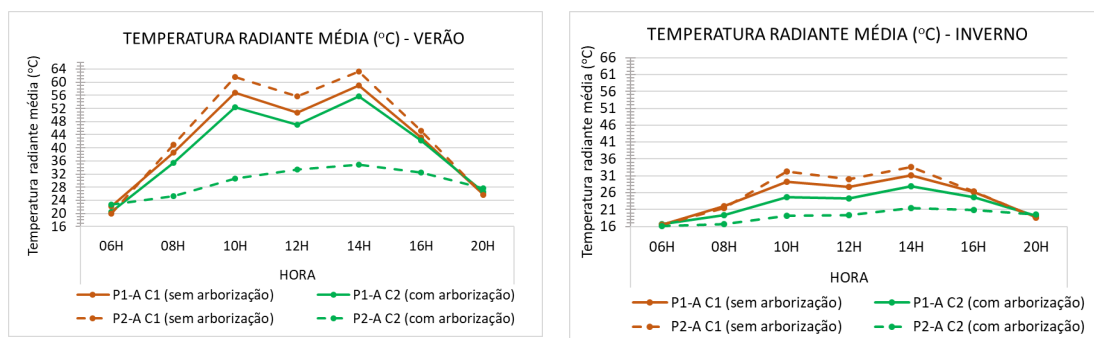


FIGURA 63 - Comparação da Trm entre cenário não vegetado e cenário vegetado, no P1 e no P2.

Quanto ao grau de impacto nas diferentes estações do ano, a umidade do ar e do solo, é um fator determinante. Nos períodos secos, devido ao déficit de umidade do ar, costuma ocorrer maior evaporação da água para o ambiente, por meio do processo de evapotranspiração da vegetação, desde que haja disponibilidade de água no solo. Neste caso, ao observar impactos expressivamente menores no inverno, dois aspectos devem ser considerados: o primeiro que talvez haja pouca disponibilidade de água no solo, conforme já mencionado no capítulo de Materiais e Métodos, este não foi um dado medido e por isso pode estar impreciso; e o segundo é que a umidade relativa do ar do dia selecionado (adotou-se o mesmo dia da medição: 05 de

agosto), apesar de ser na estação seca da área de estudo, está acima da média do período, para a cidade estudada.

d) Média da T_{rm}

As Figuras 64 e 65 apresentam a média das T_{rm} de cada cenário, permitindo uma análise do impacto na área de estudo como um todo e não apenas pontual. Enquanto as análises anteriores se referem às diferenças obtidas entre um determinado ponto de um cenário não arborizado e o mesmo ponto sombreado por dossel arbóreo, em cenários com diferentes índices de cobertura arbórea, esta analisa a média das T_{rm} de todos os pontos do cenário, incluindo pontos sombreados pelo dossel arbóreo e expostos à radiação solar, e com diferentes coberturas do solo.

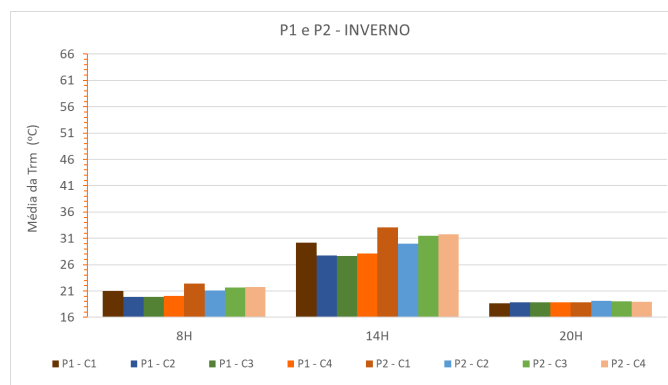


FIGURA 64 - Média das T_{rm} de cada cenário, no inverno

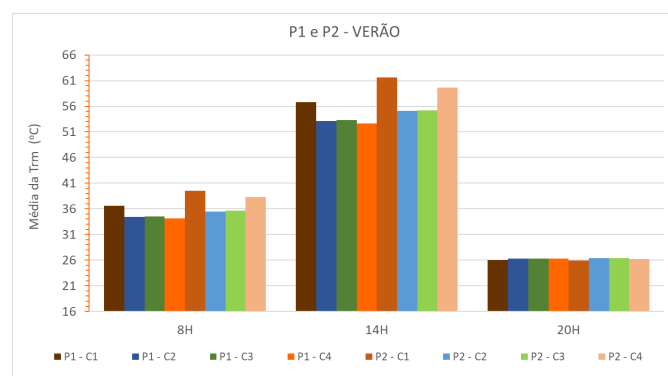


FIGURA 65 - Média das T_{rm} de cada cenário, no verão

A constatação mais importante desta análise é que todos os cenários arborizados apresentam redução na média da T_{rm} , coincidindo com o efeito pontual analisado anteriormente. Outro ponto importante, que também reforça as constatações das análises anteriores das outras variáveis é de que às 20h o impacto é

praticamente nulo na média da T_{rm} , nas duas estações do ano, com aumento sutil da T_{rm} dos cenários arborizados.

Assim, como já observado, a diferença é mais expressiva nos horários diurnos e no verão, distinguindo-se o comportamento entre o P1 e o P2 e entre as estações do ano. Enquanto no P2, a redução da média da T_{rm} é inversamente proporcional ao incremento do índice de cobertura arbórea, no P1 o impacto é proporcional ao incremento do IDAAV. Assim, verificou-se às 14h (horário mais quente) no inverno, a redução na média da T_{rm} de 3,18°C; 1,67 °C e 1,33 °C, no C2; C3 e C4, respectivamente. Já no verão, no mesmo horário, o C2 e o C3 do P2 apresentam reduções semelhantes, de cerca de 6,5 °C na média da T_{rm} . O C4 foi o cenário com menor impacto na redução da média (no verão), cerca de 2,01 °C, demonstrando outra vez que o maior índice de cobertura arbórea pode prejudicar o efeito de resfriamento e que não basta incrementar a área de sombreamento arbóreo, pois outros fatores precisam ser analisados.

No P1, em ambas as estações, nota-se a diferença mais expressiva entre o cenário não arborizado e qualquer um dos cenários arborizados. Já entre os cenários arborizados, as diferenças são discretas, ou seja, o índice de cobertura arbóreas não impacta na média da T_{rm} do cenário nesta LCZ (edifícios baixos e arranjo compacto).

Cabe um aprofundamento nas comparações entre os cenários para compreender a causa do menor impacto no cenário de maior índice de cobertura arbórea. Dois fatores são apontados como causas: o primeiro é a morfologia urbana, pois a LCZ 4 (P2) apresenta menor fator de visão do céu (FVC), conforme explicado. A segunda causa está na altura da espécie adotada no canteiro central, pois o C4 do P2 é o único cenário que adotou espécies de 10 m de altura. Embora o dossel também tenha diâmetro proporcionalmente maior, os espécimes com maior altura podem ter diminuído a proteção das múltiplas reflexões que ocorrem neste cenário, onde há edifícios altos e a faixa de veículos de asfalto é mais larga. Para verificar a influência da altura, foi realizada uma simulação paramétrica para avaliar este aspecto isoladamente, que será apresentada na sequência das análises.

Fazendo uma análise comparativa entre os cenários, em todas as situações (P1 e P2, período seco e chuvoso), o acréscimo de 15% no IDAAV, levou à redução da T_{rm} . Já quando se passa para o cenário com 22% de IDAAV, com exceção do P2 no

verão, nota-se um pequeno aumento na Trm. (Isto se deve ao fato de que o arranjo arbóreo no canteiro central do cenário com 22% do P1 ficou sem afastamento entre elas e com uma única espécie de alturas iguais, enquanto no P2, por ter um canteiro central mais espaçoso, o arranjo entre as espécies é mais esparsa e há variação de duas espécies com alturas diferentes. Reforçando o que ZHANG et al., (2018) constatou, a variação de alturas favorece o fluxo de vento, melhorando as taxas de evapotranspiração e, consequentemente, o resfriamento do ar. Este mesmo motivo justifica o pior resultado do cenário com 35% de ICA. Ao mesmo tempo que o sombreamento aumenta, interceptando a radiação solar, a ventilação bloqueada interfere nas trocas convectivas, resultando em pouco efeito de resfriamento.

e) PET (Temperatura Fisiológica equivalente)

Os mapas cromáticos (Figuras 65-68) ilustram a distribuição espacial do índice de conforto PET (Temperatura Fisiológica Equivalente) para demonstrar como a arborização viária impacta na sensação térmica nos diferentes pontos dos cenários. Assim, é possível relacionar os valores de PET com as condições do ambiente em relação à exposição solar, à cobertura do solo, à proximidade com as edificações e demais elementos da morfologia urbana que podem influenciar o efeito da arborização na via.

No verão, o Envi-met obteve valores elevados de PET no cenário não vegetado, sendo o horário mais quente às 14h, quando também ocorrem os maiores impactos na redução do PET. Com valores máximos semelhantes entre o P1 (LCZ 3) e P2 (LCZ 4), este último obteve valores maiores, atingindo 59,31 °C no verão, e 32,04 °C no inverno. Os impactos mais relevantes na redução dos valores de PET foram de até 7 °C, no P1, e 6,4°C, no P2, nas calçadas, sob o dossel arbóreo (no verão). No canteiro central, onde a cobertura é de grama, a redução máxima chega 5,0°C, no P1, e 6,4°C no P2. Apesar de expressiva, a redução não é suficiente para fornecer sensação térmica de conforto, pois os menores valores de PET às 14h (horário mais quente do dia) ficam em torno de 43°C, nas calçadas dos cenários vegetados, que é considerado como sensação de “alto stress térmico por calor”, se considerar a calibração do PET para o clima de Cuiabá, conforme realizado por Callejas et al (2020) e indicado na Tabela 6.

Em uma análise geral, os resultados demonstraram que nas duas estações do ano e nas duas morfologias urbanas analisadas, P1 (LCZ 3) e P2 (LCZ 4), o comportamento ao longo do dia se assemelha com o que se observou na análise da T_{rm} , já que esta é uma das principais variáveis de efeito nos valores de PET: Durante o período diurno, há redução dos valores máximos de PET quando comparado ao cenário sem arborização, em todos os cenários arborizados, enquanto à noite (às 20h), há um aumento geral nos valores de valor de PET, tanto sob as copas das árvores, quanto na faixa de veículos. O aumento nos valores de PET à noite, é mais expressivo no verão que no inverno, com cerca de 3,6°C nas calçadas (embaixo e entre dosséis) e faixa de veículo (afastado das árvores) do P1; enquanto no P2 é de 2,0 C nas calçadas e 0,8°C, na faixa de veículos. No inverno os aumentos são menores: entre 1 e 2°C, tanto no P1 quanto no P2, em média para a caixa viária em geral. Isso ocorre pois no verão a radiação solar é mais elevada, levando ao maior aquecimento das superfícies do solo e das fachadas por meio de múltiplas reflexões, e conseqüentemente, aquecendo mais o ar próximo a estas. O motivo da arborização proporcionar elevação nos valores de PET às 20h é o mesmo já mencionado na análise da T_{rm} , de que à noite as superfícies aquecidas se esfriam mais rapidamente no cenário não arborizado, por não haver obstrução do céu.

Assim, pode-se dizer que, embora as superfícies nos cenários arborizados recebam menor incidência da radiação solar, aquecendo-se menos, também se resfriam mais lentamente quando comparados ao cenário sem vegetação arbórea, resultando, em alguns momentos do dia, no balanço energético em que os ganhos são maiores que as perdas. No entanto, neste horário as temperaturas são mais amenas, mesmo no verão, com desconforto térmico considerado moderado, por isso a estratégia de mitigação do calor não é tão relevante no período noturno quanto nos horários de exposição solar. No P1, para todos os cenários arborizados, com resultados semelhantes, o PET máximo às 20h, na caixa viária é cerca de 29 a 30 °C, e abaixo de 27,70 °C nas calçadas, o que pode ser considerado confortável, se considerar as faixas interpretativas dos valores de PET, calibrados para o clima local, apresentadas por Callejas et al (2020).

Nota-se diferença entre a distribuição espacial da sensação térmica de calor entre as duas morfologias urbanas analisadas. No P1 (LCZ 3), o mapa cromático é

mais uniforme, pois as variações de PET são mais discretas na área da caixa viária, enquanto no P2 (LCZ 4), as variações são mais contrastantes devido ao efeito de sombreamento dos edifícios. Percebe-se que as manchas com valores maiores de PET (sensações térmicas de mais calor) estão concentradas na região que fica entre os edifícios altos, pois nesta área o resfriamento é mais lento devido à redução do fator de visão do céu. Este comportamento é agravado nos cenários arborizados, pois as copas das árvores dificultam ainda mais as perdas.

Analisando o período diurno, observa-se que os impactos se diferem entre o verão e o inverno. No inverno, observou-se um aumento discreto na sensação de calor entre 1 °C e 2 °C, tanto às 8h quanto às 14h, principalmente nas áreas sob o dossel arbóreo. Porém, os valores de PET neste período do ano não são muito altas, mesmo as temperaturas máximas (às 14h) não passam de 22,60 °C no P1, e 24 °C no P2, que se inserem dentro da faixa de temperaturas consideradas confortáveis (24.1 °C a 30.6°C), de acordo com a calibração do PET original para o clima local (Tabela 6). Por isso, no inverno, embora algumas áreas sob o dossel arbóreo tenham sofrido aumento no valor de PET (entre 1 e 1,8 °C), ainda apresenta uma redução no PET máximo do cenário geral, de 2,3 °C no P2, e 1,68 °C no P1.

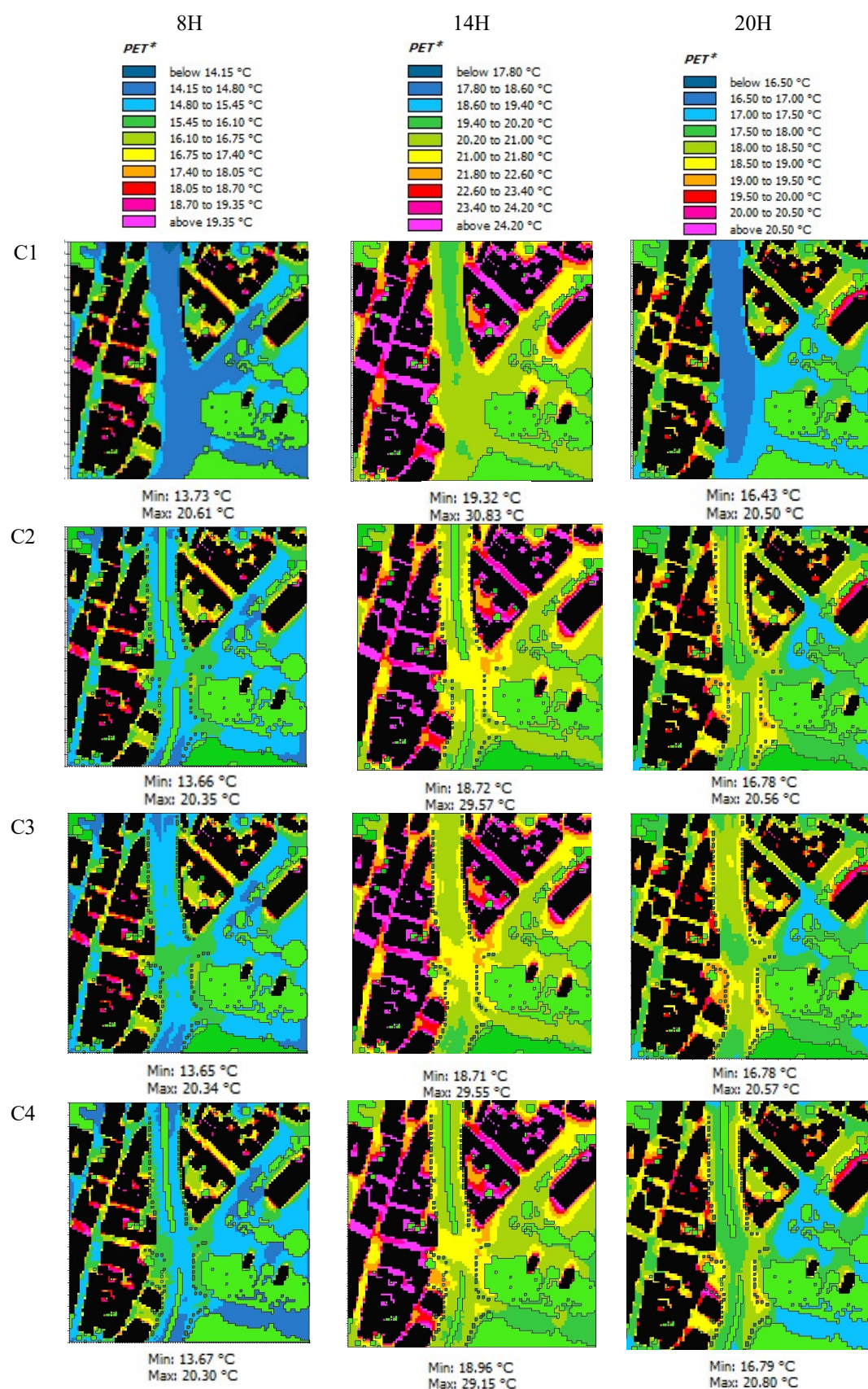


FIGURA 66 - Mapas de PET dos cenários (C1, C2, C3 e C4), no P1 e no inverno.

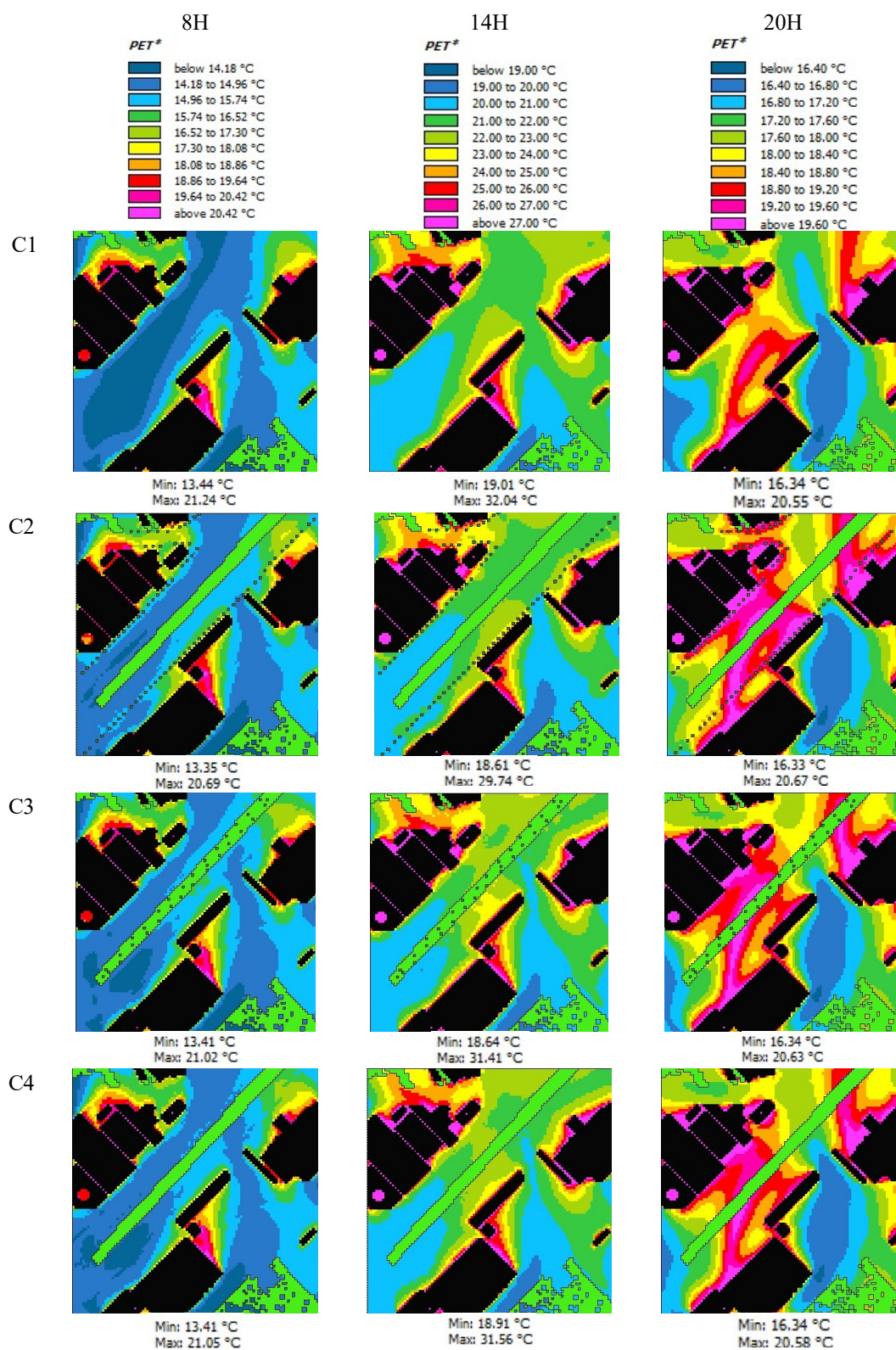


FIGURA 67 - Mapas de PET dos cenários (C1, C2, C3 e C4), no P2 e no inverno.

Quanto aos diferentes impactos entre os cenários arborizados, a incorporação progressiva de vegetação arbórea impactou pouco no PET. Percebe-se que o impacto nos diferentes cenários de índices de cobertura arbórea é proporcional na LCZ 3 e

inversamente proporcional na LCZ 4, apesar de diferenças discretas, quase nulas. Assim, os cenários que impactaram mais na redução do PET foram o C4 no P1 (LCZ 3) e o C2 no P2 (LCZ 4), tanto no verão quanto no inverno. No P2, o C4 resultou em valores de PET significativamente maiores que no C2 e C3, enquanto no P1 as diferenças são quase imperceptíveis. Estes resultados coincidem com as médias da T_{rm} dos cenários, pois se relaciona com a sensação de conforto. A diferença entre o P1 e o P2 demonstra que a morfologia urbana influencia no impacto dos valores de PET causado pela arborização, pois em áreas onde o fator de visão do céu é reduzido devido à presença de edifícios altos, como na LCZ 4, o incremento de cobertura arbórea pode se tornar mais uma barreira para as perdas de radiação de ondas longas entre superfície e ambiente, aquecendo as áreas imediatamente abaixo dos dosséis.

Portanto, o sombreamento arbóreo tem impacto positivo no conforto térmico, principalmente nas áreas sombreadas, porém até um determinado limite de cobertura arbórea, por isso é fundamental estabelecer uma relação entre área de cobertura arbórea e área de calçadas, para servir de parâmetro aos projetistas e gestores, visando garantir o benefício da arborização. Outro aspecto a ser analisado é o arranjo arbóreo, pois os diferentes arranjos adotados na variação dos cenários para o P2, indicam que o arranjo arbóreo mais espaçado da calçada do C2, impacta mais na redução do PET que o arranjo da calçada do C3 e C4 (é igual nestes cenários), que é menos espaçado, ainda que a cobertura arbórea seja maior. O arranjo arbóreo do canteiro central do C2, também resultou em maior redução do PET, em relação ao C3, pois a área de cobertura neste último é maior e tem espaçamento entre as copas, embora área de cobertura arbórea seja maior no cenário geral. No P1, o arranjo mais espaçado do C2 também obteve resultado melhor que o arranjo compacto do C3. No C4, apesar do arranjo ser compacto, há espaço entre as copas e a área de cobertura é maior que no C2, favorecendo o sombreamento. Apesar do impacto expressivo e positivo para a sensação de conforto nos horários de extremo calor, às 14h, o sombreamento arbóreo não foi suficiente para se atingir o conforto térmico. Isso indica que a arborização tem potencial de resfriamento no período diurno, porém deve ser utilizada em conjunto com outras estratégias para se alcançar níveis adequados de conforto térmico. Outros estudos também obtiveram resultados

semelhantes em relação ao impacto da arborização na sensação térmica de calor, como o de Yoshida, Shinzato e Duarte (2022) e Callejas et al., (2020).

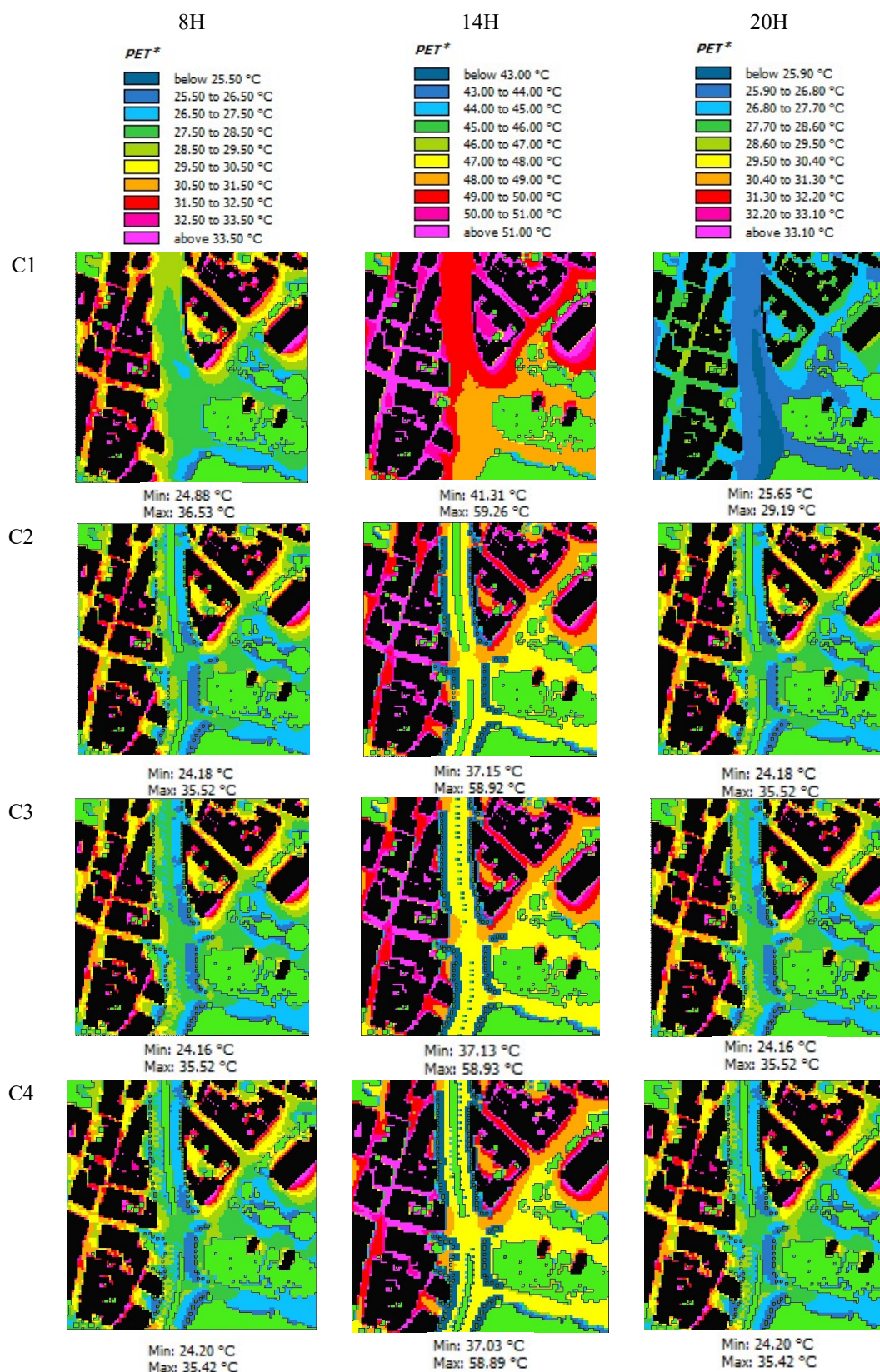


FIGURA 68 - Mapas de PET dos cenários (C1, C2, C3 e C4), no P1 e no verão.

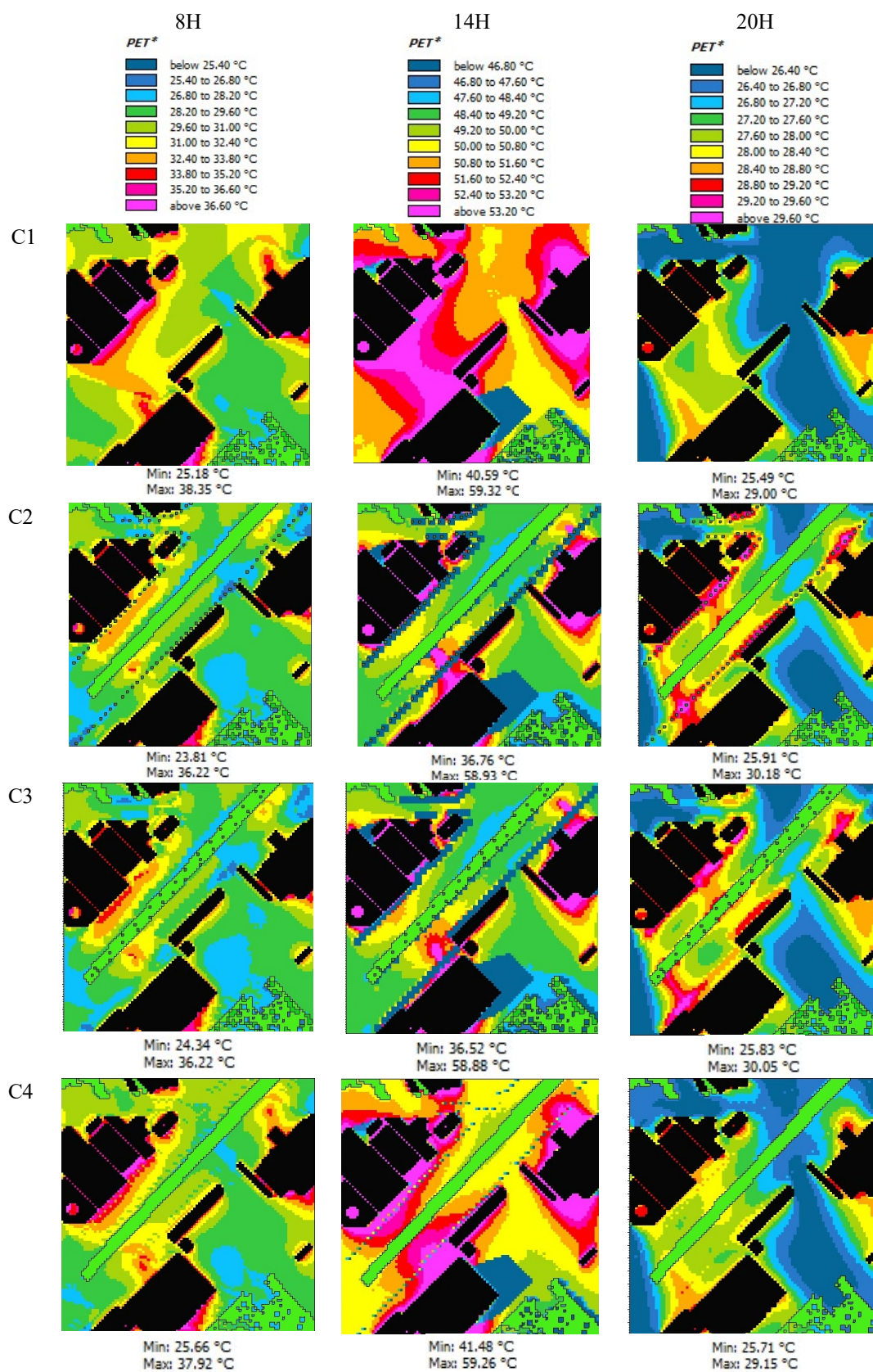


FIGURA 69 - Mapas de PET dos cenários (C1, C2, C3 e C4), no P2 e no verão.

A Tabela 21 apresenta a síntese dos resultados das variáveis climáticas analisadas, T_{rm} (ponto A); média da T_{rm} e PET, entre os cenários com distintos índices de cobertura arbórea. O objetivo é confirmar se há concordância nos impactos da arborização viária nas variáveis analisadas, em relação aos impactos máximos, horários, períodos do ano e morfologia urbana.

Tabela 21 - Síntese da comparação das variáveis climáticas analisadas entre os cenários com distintos IDAAV

Variável		Morfologia urbana	Cenário de maior impacto	Cenário de menor impacto	Período ano	Hora (h)	Δ máximo (°C)
T_{rm} (Ponto A)	1º	P2 (LCZ 4)	C2	C4	verão	10h/14h	29,73*
T_{rm} (ponto A)	2º	P1 (LCZ 3)	C4	C2	verão	10h/14h	14,56*
T_{rm} (média)	1º	P2 (LCZ 4)	C2	C4	verão	14h	6,52
T_{rm} (média)	2º	P1 (LCZ 3)	C4	C3	verão	14h	4,15
PET	1º	P1 (LCZ 3)	C4	C2	verão	14h	7
PET	2º	P2(LCZ 4)	C2	C4	verão	14h	6,4

Obs. 1. * valor médio entre os dados das 10h e 14h, que foram muito próximos.

2. Na segunda coluna, os números ordinais se referem ao maior impacto e o segundo maior impacto.

FONTE: Elaboração da autora

Sintetizando a análise descritiva e quantitativa, pode se afirmar que:

- Os maiores impactos ocorreram no verão, predominantemente às 14h ou às 10h (segunda maior frequência);
- A variável mais impactada é a temperatura radiante média (T_{rm});
- O impacto ocorre de maneira contrária entre as morfologias urbanas distintas;
- Na LCZ 3 (P1), o cenário mais impactante foi o C4 (maior índice de cobertura arbórea), enquanto no P2 (LCZ 4), foi o C2 (menor índice de cobertura arbórea).

Embora os impactos maiores tenham ocorrido no verão, costuma ocorrer no inverno, por ser o período mais seco e por isso favorece a resfriamento evaporativo. O motivo para o resultado contrário ao esperado pode estar relacionado ao dado de entrada da umidade específica e do solo, que não foram precisos (baseados em medições).

A análise comparativa entre as morfologias urbanas instigou a uma análise quanto ao índice IDAAV para verificar se esse é adequado para a avaliação do impacto do índice de cobertura arbórea

5.2.2. Análise do índice de densidade arbórea.

A partir da análise dos resultados, em função do baixo impacto que o incremento da ACA causou na sensação de conforto térmico (nos valores de PET), verificou-se que o IDAAV não é o índice mais adequado para expressar a relação entre a densidade arbórea e o conforto térmico do pedestre em área de via. O principal motivo está no fato de que a caixa viária é composta predominantemente pela faixa de veículos, que representa uma área de grande produção de calor, devido à maior absorção de radiação solar direta (ondas curtas) e indireta (ondas longas) do asfalto e do calor antropogênico causado pela emissão de CO₂ dos veículos. Ao mesmo tempo, é uma área destinada ao veículo, em que motoristas e passageiros se encontram abrigados e podem adotar estratégias de refrigeração para alcançar o conforto. Portanto, o pedestre não transita nesta faixa e ainda há de se considerar que não é possível implantar espécimes arbóreos na faixa de veículos. Por isso considerou-se, que para climas caracterizados por altas temperaturas e incidência solar, o índice IDAAV não é adequado. Percebe-se que, os maiores índices de cobertura arbórea possíveis de serem implementados, assim como nos cenários com IDAAV de 35%, não causam impacto proporcional na redução dos valores de PET. Por esta razão, considera-se que o índice mais adequado deve considerar apenas a área destinada à circulação do pedestre ou áreas que sejam possíveis de receber a arborização para incrementar o sombreamento, ou seja, as calçadas e os canteiros centrais. Sendo assim, comparou-se o índice IDAAV (índice de densidade arbórea por área da via), que foi adotado preliminarmente na definição dos cenários com o IDAAC, como ponto de partida para a análise, com o IDAAC (índice de densidade arbórea por área de calçadas e canteiro central). O Objetivo foi estabelecer a relação entre o índice de cobertura arbórea, a partir desta concepção, com os impactos nos valores de PET resultantes.

A Tabela 22 apresenta a relação das áreas adotadas no cálculo dos índices IDAAV e IDAAC.

Tabela 22 - Comparação dos índices IDAAV e IDAAC, no P1

Cenário	Área da via (AV)	Área de calçada e canteiro (AC)	Área de cobertura arbórea (ACA)	ACA / AV (IDAAV)	ACA/AC (IDAAC)
C1	6172 m ²	2889 m ²	0,00 m ²	0,00	0,00
C2	6172 m ²	2889 m ²	953 m ²	0,15	0,33
C3	6172 m ²	2889 m ²	1365 m ²	0,22	0,47
C4	6172 m ²	2889 m ²	2180 m ²	0,35	0,75

FONTE: Elaboração da autora

Tabela 23 - Comparação dos índices IDAAV e IDAAC, no P2

Cenário	Área da via (AV)	Área de calçada e canteiro (AC)	Área de cobertura arbórea (ACA)	ACA / AV (IDAAV)	ACA/AC (IDAAC)
C1	12280	4785	0,00	0,00	0,00
C2	12280	4785	1850	0,15	0,20
C3	12280	4785	2693	0,22	0,29
C4	12280	4785	4329	0,35	0,46

FONTE: Elaboração da autora

Quando se adota a relação da área de cobertura arbórea (ACA) com a área das calçadas e canteiros, ao invés da área de toda caixa viária, obtém-se os índices de 0,33; 0,47 e 0,75 para os cenários C2, C3 e C4, no P1, respectivamente e 0,2; 0,29 e 0,46 para os cenários C2, C3 e C4, no P2, respectivamente. Comparando-se os dois índices, percebe-se que o IDAAV não expressa a proporção da cobertura arbórea sobre a área efetiva de utilização dos pedestres, por isso considerou-se o IDAAC mais adequado. No entanto, é necessário fazer uma nova comparação entre os cenários, adotando-se este índice, para comparar os resultados. Observando a Tabela 24, quando se adota o IDAAC, o C2 do P1 é equivalente ao C3 do P2, em termos de proporção com a área das calçadas e canteiros (ambos aproximadamente com 0,30 de índice); e o C3 do P1 é equivalente ao C4 do P2. Assim, fazendo-se a conversão entre os índices adotados, os cenários passam a ter novos valores, de 0,30 e 0,45 (aproximadamente). Por isso realizou-se uma nova análise, em que se comparou os cenários entre o P1 e o P2, que tenham aproximadamente o mesmo índice de cobertura arbórea, adotando o IDAAC. Esta análise foi realizada para os dados do verão, às 14h, na calçada, em que se obteve as reduções mais expressivas.

Tabela 24 - Comparação do IDAAC, entre P1 e P2

Cenário	ACA/AC (IDAAC)	
	P1	P2
C1	0,00	0,00
C2	0,33	0,20
C3	0,47	0,29
C4	0,75	0,46

A partir das relações de áreas estabelecidas e analisadas para o cálculo do índice, propõe-se a adoção do IDAAC para ser adotado em análises do impacto da arborização viária no conforto térmico do pedestre, que é apresentado na Tabela 25, com os impactos que os cenários com índice de cobertura arbórea (IDAAC), de 0,30 e 0,45 obtiveram na redução dos valores de PET, no verão. Por se tratar de uma estratégia de mitigação do calor urbano, prioritariamente mais importante para o verão, e devido ao baixo impacto verificado no inverno, o enfoque foi dado para este período.

Tabela 25 - Impacto do índice no PET, adotando-se o IDAAC

IDAAC APROX.		P1	P2	
	IDAAC	Δ PET	IDAAC	Δ PET
0,30	0,33 (C2)	7°C	0,29 (C3)	6,4 °C
0,45	0,47 (C3)	7 °C	0,46 (C4)	6,4 °C

Obs. O Δ PET se refere às 14h, no verão e na calçada (Δ PET máximo alcançado)

Para facilitar a denominação, sugere-se um novo nome: índice de arborização viária (IAV). Conforme a Tabela 25, pode-se afirmar que para o clima da cidade analisada (tropical continental), no verão, a arborização viária é capaz de impactar nos valores de PET em calçadas de concreto, em até 7°C em morfologias urbanas classificadas como LCZ 3 (edifícios baixos em arranjo compacto); e em até 6,47°C em morfologias urbanas classificadas como LCZ 4 (edifícios altos em arranjo aberto). O impacto não é alterado com o incremento da área de cobertura arbórea de 0,30 para 0,45, nas duas morfologias urbanas.

5.2.3. Análise do impacto da altura da árvore no efeito de resfriamento da arborização viária.

A Figura 70 apresenta a comparação entre a Trm obtida com as árvores de pequeno (h-5m), médio (h-7m) e grande porte (h-10m), que foram adotadas nas variações dos cenários analisados. Porém, nesta simulação paramétrica, foi criado um modelo geométrico hipotético apenas para esta simulação, mantendo todos os parâmetros fixos e idênticos. As calçadas e o canteiro central apresentam distribuição igual dos espécimes (distância entre eles), variando-se apenas a altura e diâmetro dos dosséis, conforme especificado no capítulo de materiais e métodos. A simulação foi processada com os dados de verão, período em que ocorreram os maiores impactos.

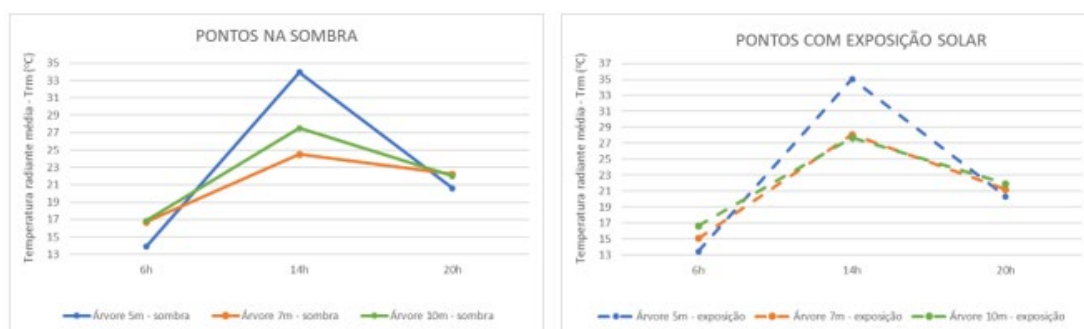


FIGURA 70 - Dados de Trm, de um ponto na sombra (esq.) e exposto à radiação solar (dir.), com as árvores de pequeno, médio e grande porte.

Observa-se que o cenário que adotou árvores de pequeno porte obteve as maiores Trm, seguido do cenário que adotou as árvores de grande porte e, por último, o cenário com as árvores médias. No ponto exposto à radiação solar, as árvores de 7m e 10m apresentam Trm iguais às 14h, distinguindo-se às 6h e 20h, horários em que a árvore mais alta tem Trm maior. O motivo é que as árvores mais baixas de 5m dificultam mais a circulação de ar e perdas de radiação de ondas longas, e por oferecerem áreas menores de sombra. Já as árvores altas de 10m, permitem uma maior incidência da radiação solar e das múltiplas reflexões do ambiente urbano, pois há mais espaço entre a copa e o solo. Desta forma, a árvore de médio porte obteve o maior efeito na redução da Trm.

Frente aos resultados, observa-se que o efeito da altura na atenuação da Trm, pode influenciar o impacto da arborização viária, mesmo com índices de cobertura iguais. Ou seja, cenários com índice de cobertura arbórea iguais, apresentam impactos diferentes quando se adotam espécimes com portes distintos. Ainda assim,

é preciso cautela ao afirmar sobre o efeito do porte das árvores, pois aqui apenas se testou um modelo dimensional para cada porte. Deve-se investigar com mais profundidade outras proporções entre a altura e o diâmetro dos dosséis, pois a mesma altura com dosséis maiores poderá ter outros efeitos e vice-versa. Aqui, nesta pesquisa o objetivo maior desta análise paramétrica foi compreender o efeito dos espécimes adotados nos modelos avaliados e confirmar que o índice de cobertura arbórea não é o único fator determinante no impacto de resfriamento da arborização viária.

5.2.4. Análise do impacto do tipo de cobertura do solo no efeito de resfriamento da arborização viária.

Para analisar a influência dos tipos de cobertura do solo no efeito de resfriamento da arborização viária, comparou-se a T_{rm} dos Pontos A, B, C, D e E (ver Tabela 17, Figuras 51 e 52) do cenário com maior cobertura arbórea, com a T_{rm} do Ponto B do cenário de referência, sem arborização viária (C1).

Os pontos analisados apresentam as seguintes condições em relação à exposição solar e ao tipo de cobertura do solo: Ponto A - sob sombra do dossel arbóreo, na calçada de concreto; Ponto B - sob exposição solar, na calçada de concreto; Ponto C - sob exposição solar, no asfalto (via de veículos); Ponto D - sob sombra do dossel arbóreo, no canteiro central com grama; Ponto E - sob exposição solar, no canteiro central com grama (Repete-se a Figura 51 para facilitar a compreensão da posição dos pontos)

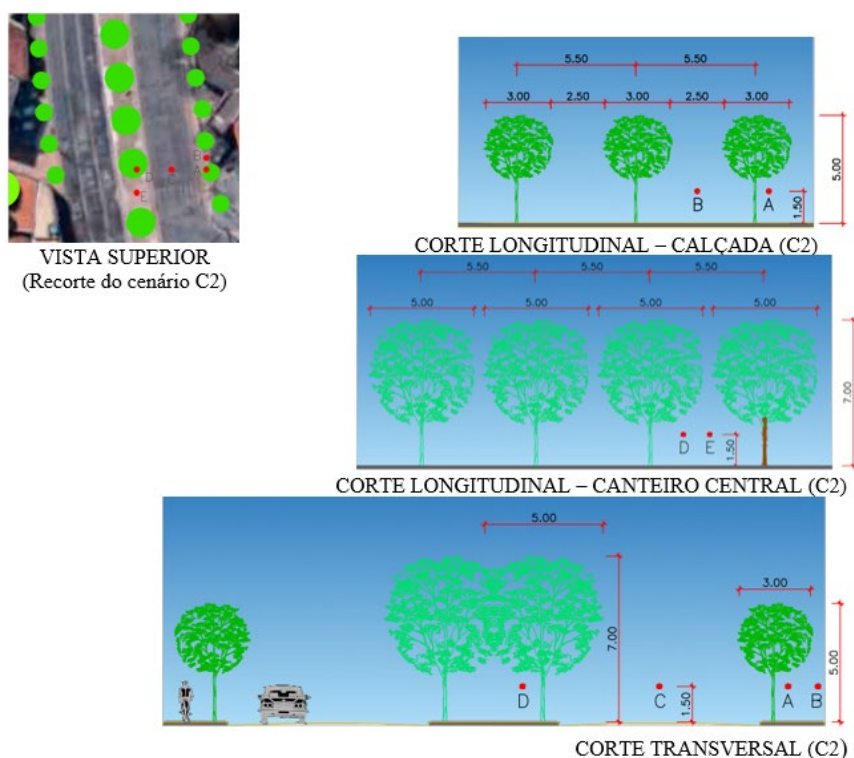


FIGURA 71 - No P1: (a) Posição dos pontos de avaliação estabelecidos, em vista superior; (b) em corte transversal, e (c) em corte longitudinal.

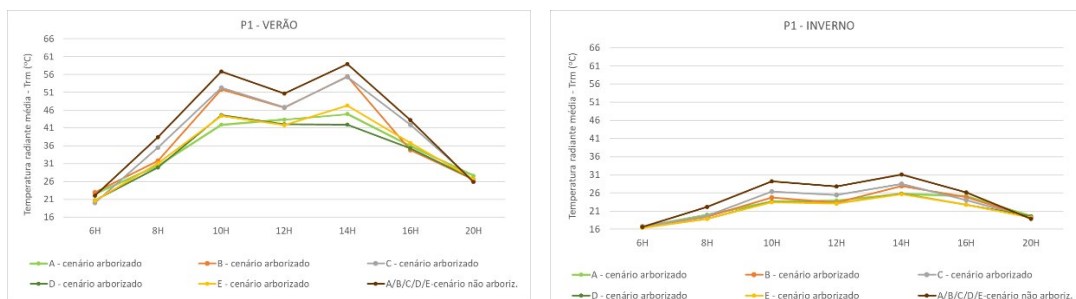


FIGURA 72 - Dados de Trm, dos Pontos A, B, C, D, E, do cenário arborizado (C4), comparados com o ponto B em cenário não arborizado, no P1.

Quando se comparam os pontos situados no cenário arborizado (C4) com os pontos no cenário de referência, sem arborização viária (C1), observa-se que há impacto expressivo em todos os pontos, mesmo nos pontos que permanecem sem sombreamento no cenário arborizado, demonstrando o efeito positivo de resfriamento da arborização em toda caixa viária, não apenas nos pontos sombreados. Os maiores impactos ocorrem no verão, nos horários mais ensolarados do dia, entre 10 e 14h.

Os pontos B e C, que estão situados em área de cobertura impermeável, de concreto e asfalto, respectivamente, apresentam diferença menor da Trm em relação

aos pontos do cenário não arborizado (ΔT_{rm}), embora expressiva, chegando a 6,61 °C no ponto B, e 4,46 °C no ponto C, ambos no verão. No inverno estas diferenças foram menores: de 4,48 °C (entre o ponto B) e 2,77 °C (entre o ponto C). A menor diferença é esperada nos pontos expostos à radiação solar, pois se aquecem mesmo nos cenários arborizados, não atenuando significativamente, como em pontos sombreados. O Ponto E, embora não sombreado, apresenta grande redução na T_{rm} (ΔT_{rm}). Isto se deve porque a cobertura do solo é de grama, não absorvendo grande radiação solar em relação ao concreto, e resfria-se pelo processo de evapotranspiração da grama e das árvores ao redor. Em alguns horários este ponto até se resfria mais que os pontos A e D, que estão sob a sombra do dossel arbóreo. O motivo está na obstrução que as copas das árvores provocam no fluxo do vento e na perda de radiação de onda longa. Portanto, pode-se dizer que, embora os pontos sombreados se aqueçam menos, também perdem menos calor para o ambiente, devido à barreira formada pelas copas, podendo em alguns momentos ter o aumento da T_{rm} .

Comparando-se o efeito do sombreamento arbóreo sobre uma superfície de concreto (ponto A) e outra com grama (ponto D), a T_{rm} se mantém menor na última, porém o impacto de redução entre pontos sombreados e não sombreados, na superfície de concreto (A e B) é maior que na redução obtida na superfície de grama (D e E), devido ao aquecimento ser maior naquela em relação à esta superfície. O gráfico da Figura 70 demonstra que nas superfícies pavimentadas de concreto das calçadas, o sombreamento arbóreo tem grande impacto, com até 10,59 °C de redução na T_{rm} . Já entre os pontos D e E, o ΔT_{rm} foi de 5,36 °C, ambos no verão. No inverno o impacto é quase nulo entre os pontos D e E, e de 2,14 °C entre os pontos A e B, pois as superfícies se aqueceram menos neste período.

Comparando-se o impacto entre os mesmos pontos, no cenário arborizado e não arborizado, a maior redução na T_{rm} foi no ponto D, com ΔT_{rm} máximo de 17,1 °C, às 14h, em relação ao ponto do cenário não arborizado, seguido do Ponto A, com ΔT_{rm} máximo de 14,1 °C (Figura 74). Estes resultados demonstram que os pontos situados em área com grama sofrem influência positiva na diminuição da T_{rm} e, conseqüentemente no conforto térmico do pedestre. Portanto, sugerem, que faixas de grama na calçada podem ser uma estratégia adequada de mitigação do desconforto

térmico do pedestre, otimizando o efeito de resfriamento. Os resultados desta análise também confirmam os achados de Erell (2017), de que o efeito do sombreamento arbóreo é influenciado pelas características do material da superfície, tais como, densidade, albedo, emissividade e difusividade térmica.

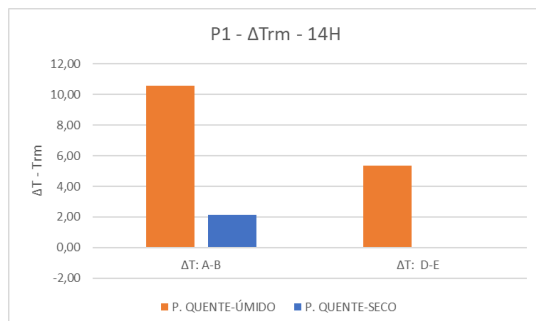


FIGURA 73 - ΔT_{rm} , entre os Pontos A e B, e entre D e E, do cenário arborizado (C4), no P1.

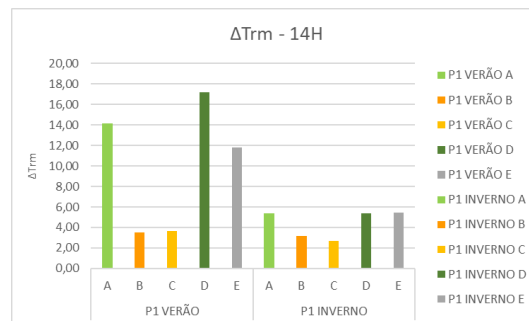


FIGURA 74 - ΔT_{rm} , entre os Pontos A, B, C, D, E, do cenário arborizado (C4), comparados com os mesmos pontos, do cenário não arborizado, no P1.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho abordou o impacto da arborização viária no microclima urbano e no conforto térmico do pedestre, adotando como principal parâmetro de avaliação o índice de cobertura arbórea. Além disso, investigou também outros aspectos que influenciam o efeito de resfriamento da arborização em vias, como a morfologia urbana, o porte das árvores e o tipo de cobertura do solo.

Quanto à ferramenta adotada para as simulações computacionais, foi possível evidenciar as vantagens do uso do modelo tridimensional Envi-met, assim como a sua adequação e adaptabilidade para modelos representativos de Cuiabá e para espaços urbanos abertos em microescala. Porém, deve-se atentar para que todos os dados climáticos de entrada sejam o mais real possível em relação às condições meteorológicas do local estudado, para garantir a precisão da simulação.

Os resultados das simulações no Envi-met v.5 demonstraram que a arborização viária se mostra uma estratégia importante para a redução dos efeitos do aquecimento urbano, capaz de reduzir a temperatura radiante média e o índice de conforto térmico adotado nesta pesquisa, PET. No entanto não impactou na temperatura e na umidade relativa do ar, com reduções praticamente nulas, enquanto na Trm verificou-se uma redução expressiva de até 30, 92°C e no índice PET de 7 °C, no verão, às 10h e 14h, com valores próximos entre o P1 (LCZ 3) e P2 (LCZ 4).

Ficou evidente que a arborização reduz o aquecimento e melhora a sensação de conforto térmico urbano, principalmente no período diurno, contudo, há limitações nos efeitos microclimáticos, principalmente nos momentos de altas temperaturas, como às 10h e 14h, por exemplo, em que o sombreamento arbóreo e o resfriamento evaporativo da vegetação não são suficientes para se atingir o conforto térmico. É preciso adotar outras estratégias em conjunto com a arborização para mitigar o aquecimento urbano rigoroso, como a pintura de fachadas com cores claras, pavimentação com menores índices de absorção; inserção de corpos d'água, espaçamento entre as edificações para permitir circulação dos ventos, entre outras.

No período noturno, a arborização tem efeito nulo ou contrário, podendo aumentar a Trm devido ao efeito guarda-chuva das copas, que além de reduzir o fluxo dos ventos, prejudica as perdas da radiação de ondas longas devido às múltiplas reflexões do meio ambiente urbano. Assim, embora o sombreamento

arbóreo intercepte a radiação solar, por outro lado funciona como uma barreira para as perdas convectivas e radiativas. Ainda assim, esse efeito não é considerado significativo e prejudicial, pois neste período do dia as temperaturas não são extremamente elevadas.

Quanto ao impacto da arborização viária nos períodos do ano, para este clima analisado, caracterizado por duas estações definidas, quente-seco (inverno) e quente-úmido (verão), constatou-se que o impacto é maior no verão, sendo pouco significativo no inverno. Porém, algumas limitações do método de pesquisa podem ter influenciado o resultado, como por exemplo os dados de entrada de temperaturas e umidade do solo, que foram utilizados baseados em outros estudos, podendo não ser precisos para o local específico e período, por não haver dados do local disponíveis.

Em relação ao incremento na área de cobertura arbórea pôde-se concluir que o impacto na redução do índice PET e da Trm, tanto pontual quanto na média da Trm dos cenários, são proporcionais na área de tipologia morfológica urbana da classe LCZ 3 e inversamente proporcional na da classe LCZ 4. O motivo está no cânion urbano da LCZ 4, que reduz o fator de visão do céu, e com isso dificulta as perdas do calor infravermelho (radiação de ondas longas). Assim, pode-se dizer que, apesar do benefício duplo de sombreamento e evapotranspiração que esta estratégia promove, pode causar um efeito negativo no conforto térmico, principalmente em arranjos fechados e com espécies arbóreas baixas. Neste sentido, os cenários com maior índice de cobertura arbórea nem sempre obtiveram os maiores impactos na atenuação da Trm, portanto, não se deve afirmar que o efeito de resfriamento é proporcional ao incremento de área de cobertura arbórea. São muitos os fatores que interferem nas trocas térmicas entre atmosfera, superfície e vegetação, como por exemplo as dimensões de altura, diâmetro e o afastamento entre elas, sem falar nas propriedades fisiológicas das espécies, uma vez que diferentes tipos de vegetação têm efeitos distintos sobre o microclima e a qualidade do ar, porém este aspecto precisa ser investigado com mais aprofundamento, pois não é objetivo desta pesquisa.

Os resultados indicaram que os pontos nos cenários com árvores de médio porte, (com 7m de altura e 5m de diâmetro) obtiveram a menor Trm e que nos cenários com as de pequeno porte, (com 5m de altura e 3m de diâmetro), alcançaram

as maiores Trm. Isso é devido à maior retenção da radiação de ondas longas em copas mais próximas ao solo, entre outros fatores, que precisam ser investigados com mais aprofundamento. Por outro lado, as árvores de grande porte, (com 10m de altura e 7m de diâmetro), embora apresentem maior área de projeção do dossel, resultaram em impactos intermediários, pois com esta altura há maior incidência da radiação solar oblíqua e das múltiplas reflexões, entre o solo e a copa, protegendo menos a superfície sob a projeção das suas copas que uma árvore de 7m. No entanto, é necessário investigar outras proporções entre altura e diâmetro das copas, e ainda o espaçamento entre os espécimes, em busca das soluções eficientes na mitigação do calor urbano.

Frente aos resultados, verificou-se que a cobertura do solo influencia no impacto da arborização viária sobre a Trm. Entre os pontos com diferentes coberturas do solo (a 1,5m do solo), observou-se que, embora diferenças discretas, o impacto maior se deu no ponto sobre o concreto, pois estas superfícies se aquecem mais que as superfícies cobertas com grama quando expostos à radiação solar. Os pontos não sombreados, tanto na superfície de asfalto quanto na de grama, também sofreram impacto com a implementação da arborização, embora sutil (até 5,31°C e 20,76°C, respectivamente), demonstrando que o impacto de resfriamento não se restringe às áreas sombreadas. Já os pontos sombreados pelo dossel arbóreo impactam de maneira mais expressiva na Trm, em relação ao cenário não arborizado (até 28,53 °C na calçada de concreto, e 15,34 °C no canteiro central coberto com grama).

Quanto ao índice de cobertura arbórea para servir de parâmetro em avaliações do impacto da arborização viária no microclima conforto térmico, conclui-se que o índice (IAV), que considera a relação entre a área de cobertura arbórea e a área das calçadas e canteiro é mais adequado que o índice que considera a relação entre a área de cobertura arbórea e a área total da caixa viária (IDAAV), pois neste, a faixa de veículos é proporcionalmente muito maior que a área de calçadas, tornando-as irrelevantes e por isso causando baixo impacto no resfriamento quando se adota este índice. Adotando-se o IAV, a partir dos resultados, pode-se afirmar que para o clima da cidade analisada (tropical continental), no verão, a arborização viária com IAV entre 0,3 e 0,45 é capaz de impactar nos valores de PET em calçadas de concreto, em até 7°C em morfologias urbanas classificadas como LCZ 3 (edifícios baixos em

arranjo compacto); e em até 6,47°C em morfologias urbanas classificadas como LCZ 4 (edifícios altos em arranjo aberto). Assim, propõe-se o índice de arborização viária (IAV), que pode servir como um parâmetro quantitativo para os planos de arborização, auxiliando nas decisões projetuais da gestão urbana e evitando equívocos que, além de gerar altos custos de implantação e manutenção, não desempenham sua função como estratégia de mitigação do calor urbano.

6. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

É preciso continuar a investigação em busca de soluções adequadas de arborização viária, capaz de mitigar o desconforto térmico decorrente do calor urbano, a influência da vegetação no microclima da cidade. Algumas recomendações para trabalhos futuros para aprofundar e complementar o conhecimento que envolve o impacto da arborização no microclima e conforto térmico humano:

- Análise mais aprofundada para as condições meteorológicas da estação quente-seca (inverno), obtendo-se dados de entrada precisos;
- Investigar o funcionamento do software em relação aos dados de velocidade do ar, temperatura e umidade do solo, comparando-se diferentes valores para testar a acurácia e sensibilidade em relação a estes parâmetros;
- Realizar simulações paramétricas (testes de sensibilidade), antes de se simular cenários reais, para analisar com mais profundidade o impacto das propriedades da espécie arbórea, como o IAF e o arranjo (distância entre os espécimes), assim como aprofundar em análises quanto à altura, investigando o efeito da proporção entre altura e diâmetro do dossel. Para isso, sugere-se comparar os parâmetros variados em cenários de mesmo índice de cobertura arbórea.
- Analisar o impacto do índice de cobertura arbórea em outras tipologias morfológicas (LCZs). Propõe-se para este estudo, adotar cenários hipotéticos em que apenas a geometria construtiva é alterada, além do ICA, mantendo-se os demais fatores fixos.
- Testar o índice de arborização viária (IAV), proposto neste trabalho, para avaliações em outros tipos de vias (locais, coletoras e principais), e verificar a adequação para análise do impacto da arborização viária em outros tipos de climas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7.1. REFERÊNCIAS CITADAS

DE ABREU-HARBICH, Loyde Vieira; LABAKI, Lucila Chebel; MATZARAKIS, Andreas. Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. **Landscape and Urban Planning**, v. 138, p. 99-109, 2015.

ARNFIELD, A. J. A simple model of urban canyon energy budget and its validation. **Physical Geography**, v. 21, p. 305–326, 2000.

ARNFIELD, A. J. Simulating radiative energy budgets within the urban canopy layer. *Modeling and Simulation*, v. 15, p. 227–233, 1984. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**.

AMORIM, A. L. Discutindo City Information Modeling (CIM) e conceitos correlatos: Gestão e Tecnologia de Projetos. **São Paulo**, v. 10, n. 2, 2015.

AL-HAGLA, Khalid S.; EL-SAYAD, Zeyad T. **Using simulation methods to investigate the impact of urban form on human comfort. Case Study: Coast of Baltim, North Coast, Egypt**. Alexandria Engineering Journal, Alexandria University, 2019

ASHRAE. American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers. **Standart 55**. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Disponível em: <https://www.ashrae.org>. Acesso em: 19 de setembro de 2023.

BAY, André & AGUIAR, Walter. **Era da Fervura Global: Cuiabá na fila da vulnerabilidade das mudanças climáticas**. Crea-MT. Disponível em: <https://www.crea-mt.org.br/portal>. Acesso em: 13 de setembro de 2023.

BIZ, S.; PASTÓRIO, A. P.; BRUN, F. G. K.; BRUN, E. J.; WATZLAWICH, L. F;. **Indicadores de diversidade para a arborização viária do bairro centro norte da cidade de Dois Vizinhos–Paraná**. REVSBAU, v.10, n.3, p.1-13, 2016

ONG, Boon; FRYD, Ole; HES, Dominique; NGO, Tuan & Aye, Lu. **Chapter 12 Green Plot Ratio and Mutorpia**: The integration of green infrastructure into an ecological model for cities. Research Gate Publication. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324775362>, 2017.

BRITTER, R.; HANNA, S. R. Flow and dispersion in urban areas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 35, p. 469–496, 2003.

BRUSE, M.; FLEER, H. **Simulating Surface Plant-Air Interactions Inside Urban Environments with a Three-Dimensional Numerical Model**. *Environmental Software and Modelling*, v. 13, p. 373-384, 1998.

CALLEJAS, I. J. A. Avaliação temporal do balanço de energia em ambientes urbanos na cidade de Cuiabá-MT. Cuiabá, 2012. 265f. **Tese** (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso

_____, Ivan Júlio; CAMPOS, Affonso Ciekalski Soares; DURANTE, Luciane Cleonice; NOGUEIRA, Marta Cristina de Jesus Albuquerque. Índices arbóreos e suas relações com o microclima urbano. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Juiz de Fora (MG), 2012

_____, Ivan A.; NOGUEIRA, Marta C. de A.; OLIVEIRA, Ângela, S. de. **Relações entre vegetação Arbórea e uso de Praças Públicas: Estudo de Caso em Cidade de Clima Tropical**. In: XII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e VIII Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído, Brasília, 2013. Disponível em: researchgate.net. Acesso em: 06 de outubro de 2018.

_____, I. J. A.; DURANTE, L. C.; ROSSETI, K. D. A. C. **Pavimentação Asfáltica: Contribuição no Aquecimento de Áreas Urbanas**. E&S Engineering and Science, v.3, n.1, p.64-72, 2015.

_____, J. A. C.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; BIUDES, M. S.; DURANTE, L. C. **Seasonal variation of surface energy balance of a central Brazil city**. Mercator, Fortaleza, v.15, n.3, p. 85-106, 2016

_____, Ivan Julio; DURANTE, Luciane C.; DIZ-MELLADO, Eduardo; GALÁN-MARÍN, Carmen. Thermal sensation in courtyards: Potentialities as a passive strategy in tropical climates. **Sustainability**, v. 12, n. 15, p. 6135, 2020.

_____ et al., Thermal Sensation in Courtyards: Potentialities as a Passive Strategy in tropical Climates. **Sustainability**, 2020; doi:10.3390/si12156135.

_____, Ivan; KRÜGER, Eduardo & BORGES, Vera. (2022). Relação entre estados de humor e a percepção térmica de pedestres. 1-12. 10.46421/entac. v19i1.2121

CAMPBELL, J. Introduction to Remote Sensing. Guildford Press, New York, 2008.

CARDOSO, R. S.; AMORIM, M. C. C. T. **Intensidade das ilhas de calor em Presidente Prudente (SP) através de zonas climáticas locais (LCZ)**. In. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada e I Congresso Nacional de Geografia Física. Anais. Campinas-SP, 2017. DOI - 10.20396/sbgfa.v1i2017.2105 - ISBN 978-85-85369-16-3

CARVALHO, Paulo Ernani Ramalho. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2003. 1v. (1.039p.) ; il. ; (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras). ISBN 85-7383-167-7

CHEN, Y.; WONG, N. H. **Thermal Benefits of the City parks**. Energy and Buildings, v. 38, p. 105- 120, 2006.

CHEN, J. M.; BLACK, T. A. Defining Leaf Area Index For Non-Flat Leaves. Plant, Cell and Environment v. 15, p. 421-429, 1992.

CHOW, W.; ROW, M. **Temporal Dynamics of the Urban Heat Island in Singapore**. International Journal of Climatology, v. 26, p. 2243-2260, 2006.

CHING et al, 2018. **WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene**. American Meteorological Society, 2018.

COCCOLO et al. **Thermal Comfort Maps to estimate the impact of urban greening on the outdoor human comfort**. Revista Urban Forestry & Urban Greening, 2018.

COELHO FILHO, M. A.; VILLA-NOVA, N. A.; ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R.; RIGHI, C. A. Método para estimativa do IAF de árvores isoladas ou de plantações com dossel fechado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi, v.16, n.5, p. 529-538, 2012.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S). Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/>. Acesso em 21 de setembro de 2023.

CORTES, Aiza et al. Evaluating mitigation strategies for urban heat island in Mandaue City using ENVI-met. **Journal of Urban Management**, v. 11, n. 1, p. 97-106, 2022

COUTTS, A. et al. **Watering our Cities: the capacity for water sensitive urban design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context**. Progress in Physical Geography, v. 37, p. 2-28, 2012.

COMAM - CONSELHO MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE. Plano Diretor de Arborização Urbana de Porto Alegre. Resolução Comam no 5, de 28 de setembro de 2006. Disponível em: http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/smam/usu_doc/resolucao_5_comam_republicacao_final.pdf>. Acesso em: 9 out. 2008.

COX, Elisa Pagliarini. **Arbustificação e (des)arborização de calçadas de rua em Cuiabá: uma tendência da sociedade urbana**. Rio de Janeiro, 2015. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Urbanismo - PROURB, Rio de Janeiro, 2015.

DANDOU, A.; PAPANGELIS, G.; KONTOS; SANTAMOURIS, M.; TOMBROU, M. **On the cooling potential of urban heating mitigation technologies in a coastal temperate city**. Landscape and Urban Planning, v. 212, p. 104106, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104106>

DO COUTO N. P. C.; DE MOURA S. F. M.; DE SOUZA N. J.; NOGUEIRA, M. C. D. J. A. **Conforto térmico dos usuários em vegetação e revestimentos urbanos no campus da UFMT em Cuiabá-MT**. Revista Monografias Ambientais, v.13, n.4, p.3529-3541, 2014.

DOBBERT, L. Y.; PRATA-SHIMOMURA, A. R.; MENDES, F. H.; SILVA FILHO, D. F. The influence of tree canopy cover on urban thermal comfort. Pluris - Reinventar a cidade em tempos de mudança, 6º congresso luso-brasileiro para planeamento urbano, regional, integrado e sustentável, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, p.1509-1516, 2014

DORIGON, L. P., AMORIM, M. C. de C. T. (2021). As Classificações dos Climas das Cidades. **GEOGRAFIA** (Londrina), 30(2), 211–231. <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2021v30n2p211>

DA SILVA NEVES, T. B., & LABAKI, L. C. **Proposição para um modelo de implementação computacional: indicadores para o verde urbano (IVU)**. Gestão & Tecnologia de Projetos, 17(1). 159-183, 2022.

DUARTE, Denise. **Padrões de ocupação do Solo e Microclimas Urbanos na Região de clima Tropical continental**. São Paulo, 2000. Tese (Doutorado), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.

DUARTE, Denise. **O impacto da vegetação no microclima em cidades adensadas e seu papel na adaptação aos fenômenos de Aquecimento Urbano**. São Paulo, 2015. Tese (Livre-Docência), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.

DUARTE, D. H. S.; SHINZATO, P.; GUSSON, C. dos S.; ALVES, C. A. The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. **Urban Climate**, v. 14, p. 224–239, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.006>

EAS Envimet Analytical Systems Ges. M. B.H. Versão ENVI-met BETA 5: EAS ENVI-met. Disponível em: <http://envi-met.software.informer.com/>. Acesso em: junho/2012.

ELRAOUF, Reem Abd et al. Evaluating urban outdoor thermal comfort: a validation of ENVI-met simulation through field measurement. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 15, n. 2, p. 268-286, 2022.

ENVI-met - Decode urban nature with ENVI-met **software**. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://www.envi-met.com/>.

EPA - U.S. Environmental Protection Agency. Disponível em: <https://www.epa.gov/2008>. Acesso em: Junho de 2023

ERLWEIN, S.; ZÖLCH, T.; PAULEIT, S. Regulating the microclimate with urban green in densifying cities: Joint assessment on two scales. **Building and Environment**, v. 205, p. 108233, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108233>

FERNANDES, M. E.; MASIERO, E. Relação entre conforto térmico urbano e Zonas Climáticas Locais. urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, vol. 12, 2020

Pontifícia Universidade Católica do Paraná. DOI: 10.1590/2175-3369.012. e 20190247.

FERREIRA, D. G. **A influência da superfície urbana na variação da temperatura de superfície: uma proposta metodológica de análise.** Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Escola de Arquitetura, Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. Belo Horizonte, 2021.

FERREIRA, M. J. **Balanço de energia na superfície da cidade de São Paulo.** 2010. 183f. Tese (Doutorado) - Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010

FERREIRA, R. de C; HERRMAN, C. R. A. **Influência de espécies Arbóreas no microclima e Conforto Térmico de seu entorno imediato sob condições climáticas do cerrado Goiano.** Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana - REVSBAU, Piracicaba – SP, v.11, n.1, p. 14-33, 2016.

FERREIRA, H. V. L. **A organização do espaço urbano e a estrutura térmica da cidade de Cuiabá-MT.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Humanas e Sociais. Cuiabá, 2019.

FERREIRA, H. V. L.; UGEDA JÚNIOR, J. C. **Variação da temperatura da superfície através de imagens Aster em zonas climáticas locais da cidade de Cuiabá, Brasil.** Revista Brasileira de Climatologia, vol. 26, 2020. ISSN: 2237-8642.

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

FERREIRA, D. G.; DINIZ, C. B.; ASSIS, E. S. **Methods to calculate urban surface parameters and their relation to the LCZ classification.** URBAN CLIMATE, v. 36, p. 1-13, 2021

FERREIRA, L. C.; FERRETO D., DUARTE, D. H. Mapeando a morfologia urbana: aplicações do método Local Climate Zones (LCZ) em diferentes escalas do projeto. **Revista PosFAUUSP.** São Paulo, 2023. <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2317-2762.posfauusp.2023.197563>

GISGEOGRAPHY. Disponível em: <https://gisgeography.com>. Acesso em: março de 2023.

GOOGLE. Google Earth Pro V.7.3.2 5491. Mountain View, CA: Google, 2018]. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/versions/#earth-pro>. Acesso: maio 2023.

GONÇALVES, Naiara Silva. **Palmeiras e árvores remanescentes da vegetação original na cidade de Cuiabá-MT.** 2011. viii, 22 f. TCC (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Biociências, Cuiabá, 2011.

GONÇALVES, A.; MENEGUETTI, K. S. **Projeto de arborização como patrimônio da cidade**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 15, n. 1, p. 99-118, jan./mar. 2015. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212015000100009>

GRIMMOND, C. S. B.; SOUCH, C.; HUBBLE, M. D. Influence of tree cover on summertime surface energy balance fluxes, San Gabriel Valley, 1996.

GUSSON, C.S.; SHINZATO, P. **ENVI-metV4 Preview**. Apostila apresentada para a disciplina Conforto Ambiental em Espaços Urbanos Abertos. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 14 abr. 2016. Disponível em: Acesso em 12 mai. 2019.

HAMDI, R.; KUSAKA, H.; DOAN, Q. Van; CAI, P.; HE, H.; LUO, G.; KUANG, W.; CALUWAERTS, S.; DUCHÊNE, F.; VAN SCHAEYBROEK, B.; TERMONIA, P. **he State of-the-Art of Urban Climate Change Modeling and Observations**. [S. l.]: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00193-3>

HARMAN, I. N. **The energy balance of urban areas**. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Meteorology. University of Reading, October 2003, 167 p.

RAHMAN, M. A.; ENNOS, A. R. **What we know and don't know about the cooling benefits of urban trees**. Technical Report, Trees & Design Action Group. Available from: < <https://www.researchgate.net/publication/303868184>. January 2016.

HÖPPE, P. **The physiological equivalent temperature: a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment**. Int J Biometeor, 1999.

HUETE, A.; Liu, H. Q.; Batchily, K.; Leween, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, n. 59, p. 440–451, 1997.

_____, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E. P.; Gao, X.; Ferreira, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, n. 83, p. 195-213, 2002.

HUTTNER, S. **Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met**. Mainz: [s. n.], 2012

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa Político do Mato Grosso, 2010. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em 15 de fevereiro de 2022.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Portal Cidades/Panorama, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/cuiaba/panorama>. Acesso em 17 de fevereiro de 2022.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Dados climáticos.** Acesso em setembro de 2022. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>

JENDRITZKY, G.; DE DEAR, R.; HAVENITH, G. **UTCI - why another thermal index?** International Journal of Biometeorology, 56 (3), pp. 421 – 428. 2012.

JOHANSSON E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. **Building and Environment**, nº41, p. 1326-1338, 2006.

JOHANSSON, E.; EMMANUEL, R. The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. **International Journal of Biometeorology**, v.51, p.119-133, 2006.

JOHANSSON, E.; THORSSON, S.; EMMANUEL, R.; KRÜGER, E. **Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies** - The need for standardization. Urban Climate, v. 10, n. P2, p. 346–366, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>

KANG et al., **Development of a computational fluid dynamics with tree drag parameterizations:** Application to pedestrian wind comfort in na urban área. Revista Building and Environment, 2017.

KATZSCHNER, L.; THORSSON, S. Microclimatic investigations as tool for urban design. In INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, v.7, 2009.

KÖPPEN, W. **Das geographische System der Klimate.** In: Handbuch der Klimatologie, Köppen, W.; Geiger, G. (Eds.), Gebrüder Borntraeger, p. 1–44, part C, 1936

KULKA, Daniele Duarte. **Conforto térmico em áreas verdes urbanas no município de Itapetinga, Bahia**, 2014.

LABAKI, L. C. et al. **Vegetação e Conforto Térmico em Espaços Urbanos Abertos.** Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, 2009.

LABAKI, Lucila Chebel; SANTOS, Rozely Ferreira dos; BUENTO-BARTHOLOMEI, Carolina Lotufo; ABREU, Loyde Vieira de. **Vegetação e conforto térmico em espaços urbanos abertos.** Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, 4(1), 2013.

LABEE. LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Disponível em: www.labee.ufsc.br. Acesso em: junho/2012.

LEHNERT, M et al. **Mapping Local Climate Zones and Their Applications in European Urban Environments:** A Systematic Literature Review and Future Development Trends. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2021, 10, 260. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040260>

LENZA, E.; KLINK, C. A. **Comportamento fenológico de espécies lenhosas em um cerrado sentido restrito de Brasília, DF**. Revista Brasileira de Botânica, v.29, n.4, p. 627-638, 2006.

LIU, Zhixin et al. Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4. **Building and Environment**, v. 200, p. 107939, 2021.

MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S.; QUERINO, C. A. S.; DANELICHEN, V. H. de M.; VELASQUE, M. C. S. Seasonal and interannual pattern of meteorological variables in Cuiabá, Mato Grosso State, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 33 n.3, p.1-10, 2015.

MAITELLI, G. T. **Uma abordagem tridimensional de clima urbano em área tropical continental: o exemplo de Cuiabá-MT**. Tese (Geografia Física). USP, São Paulo-SP. 1994

MARANHOLI, Henrique e GONZALES, Alfredo Z. D. **Análise d Evolução da Ilha de Calor na**

Cidade de Cuiabá e Alterações durante o evento El Niño. Equador: Revista do Programa de PósGraduação da Universidade Federal do Piauí, v.7, n.1, 2018

MATZARAKIS A, MAYER H. Another kind of environmental stress: Thermal stress. **WHO Newsletter**, 18: 7-10, 1996.

_____, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology** 2006 51:4, v. 51, n. 4, p. 323–334, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S00484-006-0061-8>

_____, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. **Aplicativo computacional Ray Man 1.2**. Disponível: www.mif.unifreiburg.de/rayman/2000, Acesso em :10 abr. 2011.

MEGDA, O. R., & MASIERO, E. (2021). Análise das Ilhas de Calor Urbano sobre Zonas Climáticas Locais com o uso de VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado – em uma cidade média. urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v.13, e20200333. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20200333>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. Programa Cidades+Verdes. Brasil: [s. n.], 2022.

MIRANDA, Soneize Auxiliadora de. **Sombreamento Arbóreo em superfícies pavimentadas de área urbana tropical**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2018.

MICHELON, Tiago. **Análise por simulação computacional da influência de elementos vegetados e de sombreamento no conforto térmico ao nível do pedestre em microclima urbano para Florianópolis – SC**. Dissertação

(mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2021.

MODIS. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Disponível em: MODIS Web (nasa.gov). Acesso em: 19 de setembro de 2023.

MONTEIRO, C. A. F. **Notas para o estudo do clima do Centro-oeste brasileiro.** Em: Revista Brasileira de Geografia, ano XIII, n. 1. 1951.

MUNDOEDUCAÇÃO. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/sistema-informacoes-geograficas-sig.htm>. Acesso em 03 nov. de 2021.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Overview of the Earth Science Enterprise (ESE). 2023. Disponível em: <https://www.nasa.gov>. Acesso em: out. 2022

NEVES, T. B. S., LABAKI, L. C. **Proposição para um modelo de implementação computacional: Indicadores para o Verde Urbano (IVU).** Gestão & Tecnologia de Projetos. São Carlos, v17, n1, Ano 2022. <https://doi.org/10.11606/gtp.v17i1.183799>

NICODEMO, M. L. F.; PRIMAVESI, O. **Por que manter árvores na área urbana?** – Dados eletrônicos. – São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2009.

NINCE et al. **Usos dos índices PET e UTCI na Avaliação do Conforto Termal no Campus da UFMT em Cuiabá-MT.** Rev. Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental (e-issn:2236-1170), 2013.

NOURI et al. **The Impact of Tipuana tipu Species on Local Human Thermal Comfort Thresholds in Different Urban Canyon Cases in Mediterranean Climates: Lisbon, Portugal.** Revista Atmosphere, 2018.

NOVAIS et al. Influence of Leaf Area Index on the Heat Index of a Tropic Urban Park. **Global Journal of HUMAN-SOCIAL SCIENCE: B Geography, Geo-Sciences, Environmental Science & Disaster Management.** V21 Issue 3. Global Journals Online ISSN: 2249-460x & Print ISSN: 0975-587X, 2021

OKE. **Boundary Layer Climates**, Routledge, 2nd edition. p. 262–303, 1987. Londres: Methuen, 1978. 229

_____. **Advectively-assisted evapotranspiration from irrigated urban vegetation.** Boundary Layer Meteorology, v. 17, p. 167–173, 1979.

_____. **Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations.** Journal of Climatology, v. 1, p. 237–54, 1981.

_____. **The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands.** Atmosphere, v. 14, p. 268-277, 1976. OKE, T. R. The energetic basis of the urban

heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 108, p. 1-24, 1982.

OKE, T. R. **Methods in urban climatology**. In: W. KIRCHHOFER, A. OHMURA and H. WANNER (Editors), Applied Climatology (Zürcher Geog. Schriften, 14). Eidgenössische Technische Hochschule Geographische Institut, Zurich, 1984, p. 19-29.

_____. **The urban energy balance**. Progress in Physical Geography, v. 12, p. 471–508, 1988a.

_____. **Street design and urban canopy layer climate**. Energy and Buildings, v.11, p. 103–13, 1988b

_____. **The micrometeorology of the urban forest**. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, v. 324, p. 335–349. Los Angeles. Climate Research, v. 6, p. 45–57, 1989.

_____.; JOHNSON, G. T.; STEYN, D. G.; WATSON, I. D. **Simulation of surface urban heat islands under ‘ideal’ conditions at night**—part 2 Diagnosis of causation. Boundary Layer Meteorology, v. 56, p. 339–358, 1991. OKE, T.R. Boundary layer climates. 2.ed. New York: Routledge, 1996.

_____. **Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites**. In: AIR POLLUTION MODELING AND ITS APPLICATION XVII, Borrego, C. and A. L. Norman (eds), Springer, 2004a

_____. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. Instruments and Methods of Observation Programme IOM Rep. 81, WMO/TD N°. 1250, 2004b, 51 p.

_____. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. IOM Report, TD. World Meteorological Organization, Geneva, 2006.

OKE et al. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. ISBN 9781107429536

OLIVA, G. T. **A relação do conforto térmico com métricas de cobertura arbórea. Dissertação de mestrado**. USP - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2016.

ONG, B. L. **Green Plot Ratio**: an ecological measure for architecture and urban planning. Landscape and Urban Planning, v. 63, p. 197- 211, 2002.

OUYANG, Wanlu et al. **Evaluating the thermal-radiative performance of ENVI-met model for green infrastructure typologies**: Experience from a subtropical climate. Building and Environment, v. 207, p. 108427, 2022.

PAULA, D.C. J. de. **Simulação de Cenários Futuros de Ilhas de Calor e Morfologia urbana como instrumento no Planejamento de Cidades**. Tese

(doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2021.

PAULA, L. de; DUARTE, M. S. S; TOSTES, R. B.; OLIVEIRA JUNIOR, P. R. de.; RUBACK, S. S. **Arborização urbana do bairro Centro do município de Cataguases**, MG. Revista Agrogeoambiental, Pouso Alegre, v. 7, n. 2, p. 101-112, jun. 2015.

PAULA, D. C. J. ; SOUZA, N. S. ; MIRANDA, S. A. ; NOGUEIRA, M. C. J. A. ; SANTOS, F. M. M. **Evolução do fenômeno de ilha de calor em cidade de médio porte na região centro-oeste do Brasil**. Brazilian Journal of Development, v. 5, p. 11835-11845, 2019

PATERSON, D.A.; APELT, C. J. Simulation of wind flow around three-dimensional buildings. Building and Environment, v. 24, p. 39–50, 1989.

PEARLMUTTER, D.; BERLINER, P.; SHAVIV, E. **Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyons**. Building and Environment, n. 42, p. 2396–2409, 2007.

PREFEITURA DE CUIABÁ. Mapa turístico (s.d.). Disponível em: <https://turismo.cuiaba.mt.gov.br/turismo/pages/site/mapa.jsp>. Acesso em 15 de fevereiro de 2022.

QIU et al. **Experimental studies on the effects of green space and evapotranspiration on urban heat island in a subtropical megacity in China**. Revista Habitat International, 2017.

REIS et al. **Mogno-africano (Khaya spp.): atualidades e perspectivas do cultivo no Brasil** / Cristiane Aparecida Fioravante Reis ... [et al.]. - Brasília, DF: Embrapa, 2019. 378 p. : ISBN 978-85-7035-923-0

RIBEIRO, K. F. A.; VALIN JR M. de O.; SANTOS, F. M. de M.; NOGUEIRA, M. C. de J A.; NOGUEIRA, J. de S.; DE MUSIS C. R. **Análise da temperatura interna e superficial em diferentes sombreamentos arbóreos**. Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana, Piracicaba, v.10, n.2, p. 40-60, 2015

RISSO, J.; RIZZI, R.; EPIPHANIO, R. D. V.; RUDORFF, B. F. T.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; FERNANDES, S. L. Potencialidade dos índices de vegetação EVI e NDVI dos produtos MODIS na separabilidade espectral de áreas de soja. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 379-386.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. **Arquitetura bioclimática do espaço público**. **Brasília**: Editora Universidade de Brasília, 2001. 226 p. :il.

ROSSETI, K.C. **Efeitos do uso de telhados vegetados em ilhas de calor urbanas com simulação pelo software ENVI-Met**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2013.

ROSSETI, K. de A. C.; SCAFFI, M. H., CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C. Proposta metodológica para levantamento e configuração de Densidade de Área Foliar (DAF) para aplicação no software ENVI-met. **E&S - Engineering and Science** ISSN: 2358-5390 DOI: 10.18607/ES201988566 Volume 2, Edição 8, 2019.

RUI et al. **Suitable Configuration for forested Urban Canyons to mitigate the UHI in the City of Mendoza, Argentina**. Revista Urban Climate, 2015.

SANTAMOURIS, M. **Energy and Climate in the Urban Built Environment**. London: James and James, 2001.

SANTOS, FLÁVIA MARIA DE MOURA; VALIN JÚNIOR, MARCOS DE OLIVEIRA. Análise da utilização de abrigos termo-higrométricos alternativos para transectos móveis. **Engineering Sciences**, v. 8, p. 53-64, 2020

SHASHUA-BAR, L.; HOFFMAN, M. E. **Quantitative Evaluation of Passive Cooling of the UCL Microclimate in Hot Regions in Summer** – case study: urban streets and courtyards with trees. Journal of Building and Environment, v. 39, p. 1087-1099, 2004

SHASHUA-BAR, L.; PEARLMUTTER, D.; ERELL, E. The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. **Landscape and Urban Planning**, v. 92, n. 3–4, p. 179–186, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005>

SHINZATO, P. E DUARTE, D. **Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera**. Ambiente Construído, 2018.

SILVA FILHO, D.; PIVETTA, K. F. L.; COUTO, H. T. Z. do; POLIZEL, J. L. Indicadores de floresta urbana a partir de imagens aéreas multiespectrais de alta resolução. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 67, 2005.

SINFRA – Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística. Disponível em: <http://www.sinfra.mt.gov.br/documentos1>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2022.

DA SILVA, Priscila Weruska Stark; DUARTE, Denise; PAULEIT, Stephan. The Role of the Design of Public Squares and Vegetation Composition on Human Thermal Comfort in Different Seasons a Quantitative Assessment. **Land**, v. 12, n. 2, p. 1-20, 2023.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 93, p. 1879–1900, 2012. STONE, B. **The City and the Coming Climate**: climate change in the places we live. New York: Cambridge University Press, 2012.

SUN, Shibo et al. **Evaluating the impact of urban green space and landscape design parameters on thermal comfort in hot summer by numerical simulation**. Building and Environment, v. 123, p. 277-288, 2017.

TAHA, H. Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 99–103, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(96\)00999-1](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(96)00999-1)

TARIFA, J. R. Mato Grosso: análise e representação cartográfica. Cuiabá-MT: **Entrelinhas**, 2011.

UN/DESA. Department of Economic and Social Affairs. **World Urbanization Prospects: The 2018 revision, Highlights**. Disponível em: <http://esa.un.org/development/desa/publications>. Acesso em: 09 out. 2018.

USGS - SCIENCE FOR A CHANGING WORLD. Disponível em: <https://www.usgs.gov/>. Acesso em março de 2023.

YOSHIDA, Daniel Felipe Outa; SHINZATO, Paula; DUARTE, Denise Helena Silva. The microclimate effects of urban green infrastructure under RCP 8.5 projection and plant vitality: will plants be enough? **Proceedings: Will cities survive? The future of sustainable buildings and urbanism in the age of emergency**, 2022.

WUDAPT - WORLD URBAN DATABASE AND ACCESS PORTAL TOOLS. WUDAPT, [s.d.]. Disponível em: <https://www.wudapt.org/>. Acesso em: 20 abril, 2023.

WMO. World Meteorological Organization. Warming trend Continues in 2014. Statement. WMO, 2015. Acesso em: 10 out. 2018

VENHARI, A. A.; TENPIERIK, M.; TALEGHANI, M. **The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climat**. Journal of Arid Environments, 2019.

VERSEGHY, D.L.; MUNRO, D. S. Sensitivity studies on the calculation of the radiation balance of urban surfaces: **I. Shortwave radiation**. **Boundary Layer Meteorology**, v. 46, p.309–331, 1989a.

VERSEGHY, D.L.; MUNRO, D. S. Sensitivity studies on the calculation of the radiation balance of urban surfaces: **II. Longwave radiation**. **Boundary Layer Meteorology**. v. 48, p.1–18, 1989b.

ZHANG, Li; ZHAN, Qingming; LAN, Yuliang. Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters. **Building and Environment**, v. 130, p. 27-39, 2018.

7.2. REFERÊNCIAS CONSULTADAS

BIZ, S.; PASTÓRIO, A. P.; BRUN, F. G. K.; BRUN, E. J.; WATZLAWICH, L. F;. **Indicadores de diversidade para a arborização viária do bairro centro norte da cidade de Dois Vizinhos–Paraná**. REVSBAU, v.10, n.3, p.1-13, 2016

_____, I. J. A.; DURANTE, L. C.; ROSSETI, K. D. A. C. **Pavimentação Asfáltica: Contribuição no Aquecimento de Áreas Urbanas**. E&S Engineering and Science, v.3, n.1, p.64-72, 2015.

_____, J. A. C.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; BIUDES, M. S.; DURANTE, L. C. **Seasonal variation of surface energy balance of a central Brazil city**. Mercator, Fortaleza, v.15, n.3, p. 85-106, 2016

CAMPBELL, J. Introduction to Remote Sensing. Guildford Press, New York, 2008.

_____ et al., Thermal Sensation in Courtyards: Potentialities as a Passive Strategy in tropical Climates. **Sustainability**, 2020; doi:10.3390/si12156135.

CARVALHO, Paulo Ernani Ramalho. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR : Embrapa Florestas, 2003. 1v. (1.039p.); il.; (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras). ISBN 85-7383-167-7

CHEN, Y.; WONG, N. H. **Thermal Benefits of the City parks**. Energy and Buildings, v. 38, p. 105- 120, 2006.

CHOW, W.; ROW, M. **Temporal Dynamics of the Urban Heat Island in Singapore**. International Journal of Climatology, v. 26, p. 2243-2260, 2006.

COMAM - CONSELHO MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE. Plano Diretor de Arborização Urbana de Porto Alegre. Resolução Comam no 5, de 28 de setembro de 2006. Disponível em: < http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/smam/usu_doc/resolucao_5_comam_republicacao_final.pdf>. Acesso em: 9 out. 2008.

DO COUTO N. P. C.; DE MOURA S. F. M.; DE SOUZA N. J.; NOGUEIRA, M. C. D. J. A. **Conforto térmico dos usuários em vegetação e revestimentos urbanos no campus da UFMT em Cuiabá-MT**. Revista Monografias Ambientais, v.13, n.4, p.3529-3541, 2014.

Dorigon, L. P., & Amorim, M. C. de C. T. (2021). As Classificações dos Climas das Cidades. **GEOGRAFIA (Londrina)**, 30(2), 211–231. <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2021v30n2p211>

DUBREUIL, Vincent et al. **The types of annual climates in Brazil: an application of the classification of Koppen from 1961 to 2015**. Confins-revue Franco-bresilienne De Geographie-revista Franco-brasileira De Geografia, p. 23, 2018.

NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

AKTAS et al. A sensitivity study relating to neighbourhood-scale fast local urban climate modelling within the built environment. **Revista Science Direct**, 2017.

JINA Hong; LIUA, Siqi e KAN, Jian. **The Thermal Comfort of Urban Pedestrian Street in the Severe Cold Area of Northeast China**. Revista Science Direct, 2017

KAPLAN, S. **The Restorative Benefits of Nature: Toward an Integrative Framework**. Journal of Environmental Psychology, v. 15, p.169-182, 1995

KROPP et al. **Enhancement of the WUDAPT Portal Tool WUDAPT2ENVI-met: Introducing SiteSpecific Local Climate Zones to Wudapt2ENVI-met**. Plea, Hong Kong, 2018

KULCHETSCKI, L.; CARVALHO, P. E.; KULCHETSCKI, S. S.; RIBAS, L. L. F.; GARDINGO, J. R. **Arborização urbana com essências nativas: uma proposta para a região centro-sul brasileira**. Publicatio UEPG - Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias, v. 12, n. 3, p. 25-32, 2006.

KUO, F. E.; SULLIVAN, W. C. Environment and Crime in the Inner City: Does Vegetation Reduce Crime? **Environment & Behavior**, v. 33, n. 3, p. 343–367, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/00139160121973025>

KUO, F. E.; SULLIVAN, W. C. Aggression and Violence in the Inner City: Effects of Environment via Mental Fatigue. <http://dx.doi.org/10.1177/00139160121973124>, v. 33, n. 4, p. 543–571, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/00139160121973124>

LEWIS, C. A. **Human health and well-being: the psychological, physiological, and sociological effects of plants on people**. Acta Horticulture, v. 391, p. 31-39, 1995.

LIMA, Diana Carla Rodrigues. **Forma e arborização em cânions urbanos: tendências de estresse térmico para o pedestre em cenários futuros de Umuarama/PR**. 2017. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Plantarum, 1992. v. 2. 352 p

MACIEL, Carolina de Rezende. **Condições Microclimáticas de espaços Abertos: Simulação de estratégias por meio do software Envi-met**. Cuiabá, 2014. Tese (Doutorado), Programa de PósGraduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso.

NOVAES e MONTEIRO. **Calibração do ENVI-met para simulações termodinâmicas de espaços urbanos abertos em dias quentes**. Revista Ambiente Construído. 22 (4), Oct-Dec 2022 <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000400640>

NOWAK, D. J.; DWYER, J. F. **Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems**. In: KUSER, J. E. Urban and community forestry in the Northeast. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. p. 25-46. Disponível em: Acesso em: 8 out. 2008.

_____; HOEHN, R. E. III; CRANE, D. E.; STEVENS, J. C.; FISHER, C. L. Assessing urban forest effects and values, Chicago's urban forest. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 2010. Resource Bulletin NRS-37. Disponível em: Acesso em 02 dez. 2013

OH, J.; NGARAMBE, J.; DUHIRWE, P. N. Z.; GEUN, Y. Y.; SANTAMOURIS, M. Using deep-learning to forecast the magnitude and characteristics of urban heat island. In Seoul, Korea. **Scientific Reports**, feb.2020.

PEIXOTO A. M.; SOUZA, J. S. I.; TOLEDO, F. F. de. **Enciclopédia agrícola brasileira**: A-B. EdUSP, 1995. ISBN 8531401291, 978853140129

PERERA, N. G. R.; EMMANUEL, R. 2018, 'A "Local Climate Zone" based approach to urban planning in Colombo, Sri Lanka', Urban Climate, vol. 23, pp. 188-203. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.006>

PISELLI et al. **Outdoor comfort conditions in urban areas**: On citizens' perspective about microclimate mitigation of urban transit área. Revista Sustainable Cities and Society, 2018.

RAHUL, A.; MUKHERJEE, M.; SOOD, A. Impact of ganga canal on thermal comfort in the city of Roorkee, India. **International Journal of Biometeorology**, v. 64, n. 11, p. 1933– 1945, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01981-2>.

SÃO PAULO. Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente: **Manual técnico de arborização urbana**. 3 ed. São Paulo, 2015. 122 p. Disponível em: Acesso em: 10 out. 2015

SHIBA et al. **Classificação de imagens de sensoriamento remoto pela aprendizagem por árvore de decisão**: uma avaliação de desempenho Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 4319-4326.

SILVA, Geovany Jessé A. da. Parque Linear da Prainha, Cuiabá-MT: Uma ruptura de paradigmas na intervenção urbana. Dissertação de Mestrado. Cuiabá: UFMT, 2007.

SILVA D. E SILVA-FILHO M. **Aspectos ecológicos de Stenocercus caducus (Squamata:Iguanidae) em fragmentos de floresta no sudoeste de Mato Grosso**. RECIA, 10.24188/recia. v2. n2. 2010.280. Revista Colombiana de Ciencia Animal -, 2010.

SILVA, Marina Soares. **Vegetação e o microclima urbano em área de ocupação consolidada**: aplicação do modelo ENVI-met ao Conjunto Confisco em Belo Horizonte, MG. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura. Belo Horizonte, 2021.

SIMON, H. **Modeling urban microclimate: development, implementation, and evaluation of new and improved calculation methods for the urban**

microclimate model ENVI-met. 2016. - Johannes Gutenberg University Mainz, Mainz, 2016. Disponível em: <https://doi.org/http://doi.org/10.25358/openscience-4042>

SOUZA et al. **Classificação Climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso.** Nativa - Pesquisas Agrárias e Ambientais, Sinop, v. 01, n. 01, p.34-43, out./dez., 2013. Disponível em: <http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa>. Acesso em: 06 de julho de 2022.

TAKANO, T.; NAKAMURA, K.; WATANABE, M. **Urban residential environments, and senior citizens' longevity in megacity areas: the importance of walkable green spaces.** Journal of Epidemiological Community Health, v. 56, p. 913–918, 2002. Disponível em: < <http://jech.bmj.com/cgi/reprint/56/12/913>>. Acesso em: 14 out. 2008.

7.3. MÍDIA CONSULTADA

Rede Cuiabana. **Coração de Cuiabá, Prainha,** 2018. Disponível em: <https://aondeircuiaba.blog/coracao-de-cuiaba-prainha>. Acesso em: 23 de março de 2022

Olhar Direto. **Chorando de barriga cheia.** Disponível em: <https://www.olhardireto.com.br/noticias>. Acesso em 23 de fevereiro de 2022

Olhar Direto. **Bloqueio na Avenida do CPA começa para obras da Copa do Mundo** 2014. Disponível em: https://olhardireto.com.br/noticias/exibir.asp?noticia=Bloqueio_na_Avenida_do_CPA_comeca_para_obras_da_Copa_do_Mundo_2014&id=297825. Acesso em 19 de Maio de 2022.

TVCA/Reprodução. **Historiador e jornalista, Rubens de Mendonça dá nome a uma das principais avenidas de Cuiabá.** Disponível em: <https://g1.globo.com/mt/mato-grosso/noticia/2019/03/21/>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2022.

TVCA/Reprodução. **Rede de água rompe em avenida de Cuiabá e trânsito fica congestionado.** Disponível em: <https://g1.globo.com/mato-grosso/noticia/2014/03>. Acesso em 23 de fevereiro de 2022.

APÊNDICE A – TABLA DE DADOS DOS RESULTADOS

Tabela 26 - Tabela matriz com todos os resultados de Temperatura do ar (°C); Temperatura radiante média (°C) e Umidade Relativa do Ar (%), para o P1 (LCZ 3), no período quente-úmido.

TABELA DE RESULTADOS: P1 – PERÍODO QUENTE E ÚMIDO (VERÃO)																					
HORA	06H			08H			10H			12H			14H			16H			20H		
VARIÁVEIS	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm
P1-A C1 (00%)	25,48	88,61	22,07	26,91	82,65	38,47	31,90	63,69	56,87	36,97	51,95	50,79	36,42	43,83	59,05	35,07	49,39	43,22	30,08	69,57	25,87
P1-A C2 (15%)	25,49	88,71	20,42	26,91	82,79	35,40	31,84	64,26	52,44	34,80	52,76	47,05	36,22	44,51	55,75	34,91	49,73	42,28	30,12	69,40	26,48
P1-A C3 (22%)	25,55	88,42	22,36	26,91	82,78	31,06	31,80	64,38	42,85	34,98	52,74	44,06	36,22	44,49	46,85	34,94	49,68	43,77	30,14	69,39	27,53
P1-A C4 (35%)	25,52	88,62	22,59	26,90	82,89	30,41	31,74	64,69	41,91	34,72	53,11	43,35	36,13	44,84	44,89	34,86	49,92	35,89	30,13	69,40	27,65
P1-B C1 (00%)	25,48	88,58	22,07	26,92	82,61	38,44	31,92	63,63	56,82	34,98	51,88	50,73	36,44	43,75	59,00	35,07	49,33	43,19	30,08	69,54	25,88
P1-B C2 (15%)	25,49	88,71	20,02	26,91	82,75	35,96	31,86	64,12	52,98	34,82	52,64	47,31	36,24	44,40	55,85	34,92	49,64	42,06	30,12	69,38	26,24
P1-B C3 (22%)	25,54	88,47	20,51	26,91	82,80	32,13	31,81	64,29	43,53	34,83	52,64	47,03	36,26	44,41	55,78	34,96	49,65	42,37	31,13	69,43	26,54
P1-B C4 (35%)	25,50	88,68	22,96	26,90	82,88	31,83	31,80	64,44	51,89	34,77	52,90	46,67	36,18	44,65	55,47	34,89	49,82	34,81	30,12	69,41	26,59
P1-C C1 (00%)	25,49	88,60	22,07	26,91	82,71	38,45	31,92	63,73	56,82	34,99	51,89	50,72	36,47	43,71	58,98	35,08	49,35	43,18	30,07	69,64	25,88
P1-C C2 (15%)	25,46	88,93	19,91	26,89	82,92	35,78	31,85	64,26	52,53	34,82	52,74	46,82	36,25	44,49	55,36	34,91	49,83	37,42	30,10	69,54	26,19
P1-C C3 (22%)	25,52	88,57	19,98	26,89	82,88	36,21	31,85	64,21	53,29	34,86	52,57	47,61	36,30	44,32	56,11	34,97	49,65	42,14	30,11	69,53	26,20
P1-C C4 (35%)	25,47	88,85	20,09	26,88	82,97	35,57	31,81	64,42	52,36	34,79	52,87	46,78	36,20	44,63	55,36	34,89	49,87	41,90	30,10	69,52	26,29
P1-D C1 (00%)	25,48	88,70	22,06	26,89	82,85	38,46	31,89	63,90	56,89	34,97	51,96	50,82	36,46	43,67	59,10	35,07	49,32	43,27	30,06	69,72	25,86
P1-D C2 (15%)	25,41	89,20	21,42	25,87	83,09	31,13	31,81	64,47	43,23	34,79	52,88	41,19	36,23	44,58	46,19	34,88	49,94	37,70	30,08	69,69	27,02
P1-D C3 (22%)	25,49	88,71	23,43	26,87	83,01	36,19	31,82	64,34	49,73	34,85	52,61	45,91	36,31	44,29	52,05	34,97	49,67	43,32	30,09	69,66	26,72
P1-D C4 (35%)	25,43	89,11	20,71	26,86	83,12	29,99	31,79	64,58	44,56	34,76	52,98	42,10	36,19	44,69	41,90	34,86	49,97	35,28	30,08	69,67	26,66
P1-E C1 (00%)	25,48	88,72	22,07	26,89	82,88	38,44	31,89	63,94	56,85	34,97	52,02	50,78	36,46	43,75	59,05	35,07	49,40	43,24	30,06	69,77	25,87
P1-E C2 (15%)	25,41	89,24	20,62	26,87	83,14	30,90	31,81	64,55	44,06	34,79	52,98	41,57	36,23	44,69	47,00	34,88	50,06	35,23	30,08	69,73	26,64
P1-E C3 (22%)	25,49	88,73	19,93	26,87	83,05	36,26	31,85	64,41	53,39	34,84	52,70	47,70	36,31	44,39	56,21	34,97	49,77	42,20	30,09	69,70	26,16

P1-E C4 (35%)	25,42	89,16	20,63	26,86	83,17	31,09	31,78	64,68	44,36	34,76	53,10	41,86	36,18	44,81	47,26	34,59	50,10	36,81	30,08	69,71	26,63
---------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tabela 27 - Tabela matriz com todos os resultados de Temperatura do ar (oC); Temperatura radiante média (oC) e Umidade Relativa do Ar (%), para o P2 (LCZ 4), no período quente-úmido.

TABELA DE RESULTADOS: P2 – PERÍODO QUENTE E ÚMIDO (VERÃO)																					
HORA	06H			08H			10H			12H			14H			16H			20H		
VARIÁVEIS	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm
P2-A C1 (00%)	25,47	88,85	20,02	26,85	83,08	40,95	31,75	64,55	61,61	34,80	52,82	55,79	36,26	44,48	63,32	34,97	49,82	45,24	30,06	69,71	25,62
P2-A C2 (15%)	25,60	88,47	22,75	26,87	83,13	25,36	31,64	65,39	30,69	34,62	53,86	33,39	36,04	45,59	34,79	34,82	50,65	32,54	30,14	69,65	27,73
P2-A C3 (22%)	25,58	88,56	22,79	26,86	83,15	33,72	31,61	65,48	47,86	34,60	53,87	48,64	36,02	45,55	49,67	34,82	50,53	37,76	34,82	50,53	37,76
P2-A C4 (35%)	25,49	88,82	20,58	26,87	83,04	39,87	31,76	64,70	60,17	34,77	53,08	54,62	36,19	44,80	52,82	34,91	50,11	40,37	30,11	69,65	26,01
P2-B C1 (00%)	25,48	88,84	20,06	26,85	83,07	40,92	31,76	64,54	61,50	34,80	52,82	55,62	36,26	44,47	63,06	34,97	49,82	44,94	30,06	69,73	25,77
P2-B C2 (15%)	25,57	88,60	22,54	26,86	83,14	32,46	31,67	65,25	45,75	34,65	53,74	46,59	36,07	45,50	58,32	34,85	50,58	44,20	30,14	69,68	27,46
P2-B C3 (22%)	25,57	88,67	22,71	26,86	83,18	33,12	31,64	65,40	46,79	34,62	53,82	47,58	36,04	45,54	48,44	34,84	50,57	37,51	34,84	50,57	37,51
P2-B C4 (35%)	25,49	88,85	20,58	26,88	83,04	37,50	31,77	64,69	52,93	34,77	53,10	54,14	36,20	44,85	61,72	34,91	50,18	44,52	30,10	69,71	26,18
P2-C C1 (00%)	25,49	88,72	22,48	26,86	82,99	40,96	31,80	64,34	61,56	34,85	52,69	55,68	36,32	44,23	63,09	34,98	49,56	44,91	30,05	69,63	25,84
P2-C C2 (15%)	25,52	88,81	20,35	26,86	83,08	37,12	31,74	64,92	55,62	34,73	53,54	49,92	36,15	45,22	57,79	34,88	50,27	42,67	30,13	69,60	26,25
P2-C C3 (22%)	25,53	88,81	20,39	26,86	83,10	37,06	31,72	64,93	55,62	34,71	53,53	49,90	36,13	45,17	57,78	34,88	50,16	42,73	34,88	50,16	42,73
P2-C C4 (35%)	25,49	88,79	20,45	26,88	82,98	39,58	31,82	64,47	59,44	34,83	52,94	53,75	36,26	44,58	61,28	34,93	49,88	44,20	30,10	69,65	26,16
P2-D C1 (00%)	25,48	88,65	22,55	26,79	83,26	40,99	31,66	64,73	61,70	34,75	52,84	55,84	36,25	44,26	63,25	34,92	49,31	44,99	30,04	69,70	25,89
P2-D C2 (15%)	25,49	88,88	22,75	26,77	83,46	29,40	31,53	65,36	39,88	34,60	53,71	41,53	36,07	45,38	48,23	34,81	50,16	37,92	30,12	69,84	27,71
P2-D C3 (22%)	25,49	88,89	22,85	26,77	83,47	29,13	31,52	65,43	39,44	34,59	53,76	41,15	36,05	45,39	47,91	34,81	50,10	37,91	34,81	50,10	37,91
P2-D C4 (35%)	25,47	88,86	21,65	26,80	83,30	33,16	31,65	64,96	48,85	34,71	53,22	44,78	36,18	44,74	51,62	34,86	49,79	37,41	30,08	69,94	27,06
P2-E C1 (00%)	25,48	88,71	22,52	26,80	83,30	40,95	31,68	64,81	61,59	34,77	52,93	55,72	36,28	44,29	63,12	34,94	49,45	44,91	30,04	69,66	25,89
P2-E C2 (15%)	25,47	89,23	22,87	26,78	83,56	30,13	31,50	65,84	44,09	34,54	54,23	41,27	35,99	45,78	42,36	34,78	50,45	34,95	30,10	69,80	27,79
P2-E C3 (22%)	25,48	89,13	21,13	26,79	83,50	35,61	31,50	65,87	44,79	34,56	54,09	48,69	36,02	45,56	45,81	34,81	50,21	34,97	34,81	50,21	34,97
P2-E C4 (35%)	25,44	89,12	21,10	26,80	83,39	32,72	31,65	65,13	42,97	34,71	53,40	45,54	36,17	44,89	50,46	34,85	49,99	36,65	30,07	69,90	26,82

Tabela 28 - Tabela matriz com todos os resultados de Temperatura do ar (oC); Temperatura radiante média (oC) e Umidade Relativa do Ar (%), para o P1 (LCZ 3), no período quente-seco.

TABELA DE RESULTADOS: P1 – PERÍODO QUENTE E SECO (INVERNO)																					
HORA	06H			08H			10H			12H			14H			16H			20H		
VARIÁVEIS	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm
P1-A C1 (00%)	18,14	94,78	16,56	18,22	93,92	22,09	19,81	85,68	29,19	20,34	83,75	27,80	22,52	85,76	31,13	22,53	70,76	26,21	21,85	80,71	18,81
P1-A C2 (15%)	18,20	94,49	16,71	18,26	93,64	19,42	19,82	85,66	24,67	20,36	83,54	24,23	22,52	85,72	27,81	22,53	70,62	24,73	21,88	80,44	19,21
P1-A C3 (22%)	18,21	94,41	16,76	18,28	93,57	18,67	19,83	85,63	23,65	20,37	83,51	23,19	22,52	85,71	26,62	22,54	70,62	25,05	21,90	80,40	19,61
P1-A C4 (35%)	18,21	94,39	16,66	18,28	93,56	19,96	19,83	85,60	23,66	20,38	83,51	23,88	22,53	85,70	25,76	22,55	70,68	25,14	21,90	80,45	19,57
P1-B C1 (00%)	18,14	94,79	16,57	18,22	93,93	22,09	19,81	85,69	29,15	20,34	83,76	27,78	22,53	85,76	31,09	22,53	70,79	26,18	21,85	80,73	18,83
P1-B C2 (15%)	18,19	94,51	16,72	18,27	93,66	19,71	19,82	85,66	25,34	20,37	83,54	25,34	22,52	85,71	28,34	22,53	70,64	22,87	21,88	80,48	19,12
P1-B C3 (22%)	18,20	94,47	16,71	18,27	93,62	19,32	19,83	85,65	24,47	20,37	83,53	24,66	22,52	85,71	27,60	22,54	70,60	24,67	21,89	80,40	19,23
P1-B C4 (35%)	18,19	94,49	16,68	18,27	93,65	19,40	19,83	85,63	24,75	20,37	83,54	23,30	22,53	85,70	27,90	22,55	70,67	24,83	21,89	80,49	19,20
P1-C C1 (00%)	18,13	94,84	16,58	18,21	93,97	22,10	19,80	85,72	29,15	20,34	83,74	27,78	22,52	85,76	31,09	22,55	70,70	26,18	21,86	80,71	18,84
P1-C C2 (15%)	18,18	94,59	16,69	18,25	93,74	19,51	19,81	85,76	25,87	20,35	83,64	24,94	22,51	85,81	27,91	22,53	70,63	22,67	21,88	80,45	19,15
P1-C C3 (22%)	18,18	94,47	16,73	18,26	93,62	19,59	19,81	85,65	26,12	20,35	83,53	25,14	22,51	85,71	28,12	22,53	70,60	22,85	21,89	80,40	19,15
P1-C C4 (35%)	18,18	94,49	16,69	18,26	93,65	19,72	19,82	85,63	26,38	20,36	83,54	25,40	22,52	85,70	28,43	22,55	70,67	24,04	21,89	80,49	19,11
P1-D C1 (00%)	18,12	94,89	16,53	18,20	94,03	22,07	19,79	85,81	29,22	20,33	83,78	27,82	22,51	85,82	31,14	22,56	70,71	26,22	21,86	80,73	18,79
P1-D C2 (15%)	18,17	94,67	16,49	18,24	93,83	18,08	19,79	85,89	21,49	20,33	83,79	21,68	22,48	85,96	24,12	22,52	70,75	22,79	21,88	80,49	19,56
P1-D C3 (22%)	18,17	94,67	16,74	18,24	93,83	20,12	19,79	85,88	24,04	20,33	83,76	23,47	22,48	85,94	26,06	22,53	70,68	25,35	21,89	80,46	19,16
P1-D C4 (35%)	18,16	94,70	16,43	18,24	93,83	18,82	19,80	85,80	23,51	20,34	83,72	23,08	22,50	85,87	25,75	22,53	70,75	22,75	21,88	80,55	19,57
P1-E C1 (00%)	18,12	94,90	16,55	18,20	94,03	22,08	19,79	85,79	29,18	20,33	83,75	27,80	22,51	85,78	31,11	22,56	70,66	26,20	21,86	80,71	18,81
P1-E C2 (15%)	18,17	94,69	16,46	18,24	93,84	18,34	19,79	85,90	22,13	20,33	83,80	22,12	22,48	85,97	24,67	22,51	70,73	22,00	21,88	80,47	19,33
P1-E C3 (22%)	18,16	94,69	16,68	18,24	93,84	20,58	19,79	85,88	24,69	20,33	83,76	24,48	22,48	85,93	27,72	22,53	70,64	24,70	21,89	80,43	19,23
P1-E C4 (35%)	18,16	94,72	16,43	18,24	93,85	18,81	19,80	85,80	23,42	20,34	83,72	23,03	22,50	85,86	25,68	22,53	70,73	22,67	21,88	80,53	19,17

Tabela 29 - Tabela matriz com todos os resultados de Temperatura do ar (oC); Temperatura radiante média (oC) e Umidade Relativa do Ar (%), para o P2 (LCZ 4), no período quente-seco.

TABELA DE RESULTADOS: P2 – PERÍODO QUENTE E SECO (INVERNO)																					
HORA	06H			08H			10H			12H			14H			16H			20H		
VARIÁVEIS	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm	T.ar	UR	Trm
P2-A C1 (00%)	18,17	94,56	16,43	18,22	93,73	21,38	19,73	85,74	32,29	20,30	83,71	30,06	22,46	85,90	33,62	22,58	70,67	26,33	21,91	80,59	18,56
P2-A C2 (15%)	18,24	94,06	16,17	18,31	93,12	16,61	19,81	85,09	19,11	20,35	83,11	19,26	22,48	85,52	21,42	22,61	69,33	20,84	21,97	79,41	19,56
P2-A C3 (22%)	18,19	94,46	16,49	18,25	93,64	20,84	19,75	85,72	30,89	20,32	83,73	28,25	22,46	85,99	32,71	22,57	70,73	25,63	21,91	80,58	18,69
P2-A C4 (35%)	18,18	94,52	16,47	18,24	93,69	20,91	19,74	85,76	30,58	20,31	83,78	29,02	22,45	86,02	32,45	22,57	70,72	25,76	21,91	80,58	18,67
P2-B C1 (00%)	18,17	94,58	16,69	18,22	93,75	21,57	19,73	85,76	32,11	20,31	83,73	30,03	22,47	85,90	33,54	22,57	70,66	26,21	21,90	80,58	18,87
P2-B C2 (15%)	18,22	94,15	17,01	18,30	93,20	19,59	19,80	85,16	27,34	20,34	83,17	25,86	22,47	85,55	28,77	22,60	69,32	24,56	21,96	79,45	19,77
P2-B C3 (22%)	18,19	94,47	16,78	18,25	93,64	21,00	19,75	85,72	30,53	20,32	83,73	28,66	22,46	85,99	31,98	22,57	70,75	25,37	21,91	80,59	19,02
P2-B C4 (35%)	18,17	94,54	16,76	18,24	93,70	21,06	19,74	85,76	30,77	20,31	83,78	28,85	22,45	86,02	32,20	22,57	70,75	25,50	21,91	80,60	19,00
P2-C C1 (00%)	18,16	94,69	16,78	18,22	93,84	21,64	19,76	85,81	32,10	20,33	83,75	30,06	22,51	85,83	33,55	22,59	70,27	26,21	21,90	80,42	18,97
P2-C C2 (15%)	18,19	94,39	16,92	18,26	93,48	20,62	19,79	85,31	28,86	20,32	83,35	27,40	22,47	85,61	30,52	22,61	69,15	24,35	21,93	79,50	19,22
P2-C C3 (22%)	18,19	94,53	16,86	18,25	93,71	20,99	19,78	85,78	30,20	20,35	83,76	28,43	22,51	85,93	31,71	22,61	70,40	25,14	21,92	80,42	19,12
P2-C C4 (35%)	18,17	94,63	16,83	18,23	93,80	21,11	19,77	85,85	30,60	20,33	83,84	28,76	22,49	86,00	32,09	22,60	70,39	25,34	21,91	80,43	19,07
P2-D C1 (00%)	18,13	94,99	16,82	18,20	94,19	23,04	19,76	86,32	32,14	20,30	84,17	30,09	22,48	86,20	33,58	22,53	69,86	26,26	21,85	80,20	19,02
P2-D C2 (15%)	18,15	94,66	16,69	18,21	93,89	19,02	19,74	85,84	24,69	20,27	83,72	23,98	22,42	85,95	26,65	22,53	69,31	22,79	21,89	79,61	19,41
P2-D C3 (22%)	18,17	94,80	16,68	18,23	94,04	18,59	19,77	86,31	24,15	20,29	84,29	23,41	22,45	86,42	26,39	22,56	70,30	23,56	21,90	80,30	19,72
P2-D C4 (35%)	18,15	94,91	16,60	18,21	94,13	19,40	19,76	86,35	25,74	20,29	84,29	25,13	22,45	86,40	27,52	22,54	70,28	23,61	21,88	80,35	19,41
P2-E C1 (00%)	18,13	94,98	16,84	18,20	94,14	23,04	19,75	86,25	32,08	20,30	84,15	30,06	22,48	86,18	33,54	22,54	70,04	26,21	21,86	80,31	19,04
P2-E C2 (15%)	18,15	94,68	16,67	18,22	93,85	19,19	19,75	85,80	24,48	20,27	83,77	23,80	22,43	85,99	26,45	22,55	69,41	22,68	21,89	79,67	19,41
P2-E C3 (22%)	18,18	94,71	16,86	18,23	93,92	21,82	19,77	86,11	27,91	20,31	84,18	27,26	22,47	86,32	30,43	22,59	70,42	24,57	21,91	80,41	19,29
P2-E C4 (35%)	18,15	94,90	16,57	18,21	94,11	19,33	19,75	86,31	25,28	20,29	84,31	24,38	22,45	86,42	27,16	22,55	70,45	23,15	21,88	80,46	19,34