



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

**ANÁLISE DE ZONAS CLIMÁTICAS E ÍNDICES ESPECTRAIS: UMA
ABORDAGEM PARA LEITURA DO TERRITÓRIO URBANO DE CUIABÁ**

CAMILA DE SOUZA CARVALHO

**PROF^a. DR^a. FLÁVIA MARIA DE MOURA SANTOS
ORIENTADORA**

**CUIABÁ - MT
2025**

CAMILA DE SOUZA CARVALHO

**ANÁLISE DE ZONAS CLIMÁTICAS E ÍNDICES ESPECTRAIS: UMA
ABORDAGEM PARA LEITURA DO TERRITÓRIO URBANO DE CUIABÁ**

/

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Física Ambiental do Instituto de Física da Universidade Federal de Mato Grosso como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Física Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Flavia Maria de Moura Santos

**CUIABÁ-MT
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

C331a Carvalho, Camila de Souza.

Análise de zonas climáticas e índices espectrais: [recurso eletrônico] : uma abordagem para leitura do território urbano de Cuiabá / Camila de Souza Carvalho. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 123 f., il. color., pdf). -- 2025.

Orientador: Flávia Maria de Moura Santos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2025.

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

Inclui bibliografia.

1. Zonas Climáticas Locais. 2. Temperatura de Superfície Terrestre. 3. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada. 4. Climatologia Urbana. I. Santos, Flávia Maria de Moura, *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: ANÁLISE DE ZONAS CLIMÁTICAS E ÍNDICES ESPECTRAIS: UMA ABORDAGEM PARA LEITURA DO TERRITÓRIO URBANO DE CUIABÁ

AUTORA: MESTRANDA CAMILA DE SOUZA CARVALHO

Dissertação defendida e aprovada em **30 de outubro de 2025**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. PROFA DRA FLAVIA MARIA DE MOURA SANTOS [Presidente Banca / **Orientadora**]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

2. PROFA DRA MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE NOGUEIRA [Examinadora Interna]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

3. PROFA DRA NATÁLLIA SANCHES E SOUZA [Examinadora Externa]

INSTITUIÇÃO: CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VÁRZEA GRANDE

CUIABÁ, 30/10/2025.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES**, **Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 04/11/2025, às 12:47, 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 04/11/2025, às 12:53, 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 04/11/2025, às 13:02, 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 **Natallia Sanches e Souza**, **Usuário Externo**, em 04/11/2025, às 15:10, 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 **8612817** e o código CRC **9C3FAA3A**.

Dedico esse trabalho a Deus por ter me dado força, foco e sabedoria. Dedico a minha mãe querida, ao meu pai que é meu anjo e minha luz na eternidade e ao meu irmão por sempre me apoiarem. Muito obrigada por serem meu alicerce.

AGRADECIMENTOS

A minha família, por toda força e apoio em todos os momentos. Vocês são a minha fortaleza, meu porto seguro nessa e em outras vidas, amo tanto vocês. A todos os meus amigos por sempre me lembrar que sou capaz e por sempre me mostrar o melhor lado da vida.

A Prof.^a Dr.^a Flávia Maria de Moura Santos por sua orientação e transmissão de conhecimento. Obrigada por ser tão adorável e querida. Sem seu apoio essa pesquisa não se tornaria particularmente especial. Terei sua cordialidade como exemplo.

Ao professor Marcelo por ser sempre dedicado, disponível e cordial, além de transmitir conhecimentos valiosos, assim como todo o corpo docente da Física Ambiental. A professora Iramaia, Serginho e Denilton que me ensinaram um pouco da beleza da Física. Vocês foram maravilhosos, só tenho a agradecer por todo o conhecimento durante nossa vivência.

A todas as pessoas que transmitiram conhecimento direta ou indiretamente. A todas as pesquisas dos membros discentes que foram fonte de inspiração durante o desenvolvimento desse trabalho.

A Prof.^a Dr.^a Jeane Godoy Rosin foi minha orientadora na graduação em 2018, e teve um papel fundamental na minha formação. Com ela, aprendi não apenas conteúdos acadêmicos, mas, sobretudo, sobre humanidade e empatia. Sou profundamente admiradora da sua inteligência, simpatia, sensibilidade e generosidade. Suas palavras sempre tão belas e inspiradoras foram decisivas para que eu continuasse trilhando o caminho da vida acadêmica.

A Capes pelo apoio financeiro durante a realização desta pesquisa.

EPÍGRAFE

“Todos os dias, quando acordo
Não tenho mais o tempo que passou
Mas tenho muito tempo
Temos todo o tempo do mundo.”

Renato Russo, 1986

RESUMO

Analisar as transformações na morfologia urbana é fundamental para compreender as alterações na paisagem e seus efeitos sobre o clima local, especialmente em cidades que passaram por processos intensos de urbanização. Este estudo investigou as mudanças nas Zonas Climáticas Locais (LCZ) e em índices espectrais como o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e TST (Temperatura da Superfície Terrestre) do município de Cuiabá -MT, entre os anos de 2004 e 2024. A pesquisa parte da premissa de que a dinâmica urbana interfere diretamente nos padrões microclimáticos, especialmente em contextos de clima tropical como o de Cuiabá, onde são frequentes as altas temperaturas e baixos índices de umidade relativa do ar durante a estação seca.

A análise das LCZs revelou uma reconfiguração significativa na ocupação do solo ao longo do período estudado. A classe LCZ A (vegetação arbórea densa), embora tenha aumentado em termos absolutos em algumas regiões, apresentou redução em áreas estratégicas próximas à macrozona urbana, refletindo o avanço da urbanização sobre zonas verdes. Por outro lado, as classes LCZ 3 (ocupação baixa e compacta) e LCZ 6 (tipologia construtiva baixa aberta) cresceram consideravelmente nessas mesmas áreas, indicando um processo de adensamento urbano com pouca consideração ao equilíbrio ambiental.

A partir de imagens dos satélites Landsat 5 e Landsat 8, foi possível calcular os índices NDVI e TST para os dois anos analisados. Os resultados apontam para um aumento médio de 3,8 °C na TST entre 2004 e 2024, com nível de confiança estatística de 95%. Paralelamente, observou-se uma diminuição nos valores de NDVI justamente nas regiões em que houve aumento da temperatura, evidenciando uma correlação inversa entre as duas variáveis. Esse padrão reforça a hipótese de que a perda de cobertura vegetal ou a substituição por vegetação de menor porte contribui significativamente para a elevação das temperaturas superficiais.

Esse cenário alerta para a necessidade de incorporar critérios climáticos ao planejamento urbano, de forma a mitigar os impactos negativos da urbanização acelerada e promover o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e resilientes às mudanças ambientais.

Palavras-chave: Zonas Climáticas Locais. Temperatura de Superfície Terrestre. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada. Climatologia Urbana.

ABSTRACT

Analyzing transformations in urban morphology is essential for understanding landscape changes and their effects on the local climate, especially in cities that have undergone intense urbanization processes. This study investigated the changes in Local Climate Zones (LCZs) and spectral indices such as NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and LST (Land Surface Temperature) in the municipality of Cuiabá, Mato Grosso, between the years 2004 and 2024. The research is based on the premise that urban dynamics directly influence microclimatic patterns, particularly in tropical climate contexts such as Cuiabá, where high temperatures and low relative humidity levels during the dry season are common.

The analysis of the LCZs revealed a significant reconfiguration of land use over the study period. The LCZ A class (dense tree vegetation), although it increased in absolute area in some regions, showed a reduction in strategic areas near the urban macrozone, reflecting the advance of urbanization over green zones. In contrast, the LCZ 3 (compact low-rise) and LCZ 6 (open low-rise) classes expanded considerably in these same areas, indicating a process of urban densification with little consideration for environmental balance.

Using satellite imagery from Landsat 5 and Landsat 8, NDVI and LST values were calculated for the two analyzed years. The results indicate an average increase of 3.80 °C in land surface temperature between 2004 and 2024, with a 95% statistical confidence level. Simultaneously, a decrease in NDVI values was observed in the same areas where temperature increased, highlighting an inverse correlation between the two variables. This pattern reinforces the hypothesis that the loss of vegetation cover, or its replacement with lower biomass vegetation, significantly contributes to the rise in surface temperatures.

This scenario underscores the need to integrate climate-sensitive criteria into urban planning, in order to mitigate the negative impacts of accelerated urbanization and to promote the development of more sustainable and climate-resilient cities.

Keywords: Local Climate Zones. Land Surface Temperature. Normalized Difference Vegetation Index. Urban Climatology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem térmica do centro de Sacramento, Califórnia, junho de 1998.....	22
Figura 2 - Seção transversal generalizada de uma típica ilha de calor urbana	23
Figura 3 - Fluxograma das informações de entrada e saída do LCZ Generator.....	33
Figura 4 - Diagrama ilustrativo dos quatro principais elementos das técnicas de SR.....	35
Figura 5 - Camadas de informações de um SIG empilhadas.....	39
Figura 6 - Tipos de dados vetoriais de um SIG	40
Figura 7 - Esquema de representação de dado vetorial e raster.....	40
Figura 8 - Alterações do perímetro urbano de Cuiabá e áreas urbanas distritais (1934-2011)	45
Figura 9 - Município de Cuiabá e divisão em Macrozonas Urbana e Rural.	46
Figura 10 - Regiões administrativas atuais de Cuiabá.....	47
Figura 11 - Fluxograma das etapas de classificação das LCZs no LCZ Generator.....	52
Figura 12 - Fluxograma para discriminação de classes.....	54
Figura 13 - Delimitação das áreas de treinamento dentro da ROI escolhida	55
Figura 14 - Formulário virtual do LCZ Generator	56
Figura 15 - Fluxograma da submissão de dados	57
Figura 16 - Informações fornecidas e geradas pelo LCZ Generator	58
Figura 17 - Distribuição espacial das LCZ sobre a ROI com referência ao ano de 2004	59
Figura 18 - Distribuição espacial das LCZ sobre a ROI com referência ao ano de 2024	60
Figura 19 - Resultados da acurácia classificada por cada LCZ referente ao ano de 2004	61
Figura 20 - Resultados da acurácia classificada por cada LCZ referente ao ano de 2024	62
Figura 21 - Distribuição espacial das classes LCZ sobre a classificação do ano de 2004.....	62
Figura 22 - Distribuição espacial das classes LCZ sobre a classificação do ano de 2024	63
Figura 23 - Imagens Satelitais extraídas do USGS.....	65
Figura 24 - Fluxograma de cálculos da TST e do NDVI – Landsat 5.....	66
Figura 25 - Tela de inserção dos dados para cálculos de TST e NDVI - Landsat 8.....	75
Figura 26 - Distribuição espacial das LCZs na Macrozona Urbana para 2004 e 2024	87
Figura 27 - Área por KM ² para classes construtivas em 2004	97
Figura 28 - Área por KM ² para classes de cobertura do solo em 2004	97
Figura 29 - Área por KM ² para classes construtivas em 2024	99
Figura 30 - Área por KM ² para classes de cobertura do solo em 2024	99
Figura 31- Temperatura da Superfície Terrestre da Macrozona urbana de Cuiabá - 2004	102
Figura 32 - Temperatura da Superfície Terrestre da Macrozona urbana de Cuiabá - 2024 ...	103
Figura 33 - Boxplot da TST para os anos de 2004 e 2024	104
Figura 34 - Boxplot de TST das LCZs do ano de 2004.....	106
Figura 35 - Boxplot de TST das LCZs do ano de 2024.....	107
Figura 36 - Diagrama de espalhamento de Moran da TST para o ano de 2004	108
Figura 37 - Diagrama de espalhamento de Moran da TST para o ano de 2024	109
Figura 38 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada -2004.....	110
Figura 39 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - 2024.....	110
Figura 40 - Boxplot da NDVI para os anos de 2004 e 2024	112
Figura 41 - Boxplot do NDVI das LCZs do ano de 2004	114
Figura 42 - Boxplot do NDVI das LCZs do ano de 2024	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definições das Zonas Climáticas Locais – LCZ.....	28
Tabela 2 – Cobertura do Solo das Zonas Climáticas Locais – LCZ.....	29
Tabela 3 - Valores de propriedades geométricas e de cobertura superficial para LCZ.....	31
Tabela 4 – Histórico da coleção de satélites LANDSAT.....	36
Tabela 5 – Comparativo das Especificações dos Satélites Landsat 5 e Landsat 8.....	37
Tabela 6 – Abairramento de Cuiabá.....	48
Tabela 7 - Faixas de NDVI e valores de emissividade atribuídos.....	70
Tabela 8 - Dados inseridos na ferramenta COART.....	75
Tabela 9 - Dados sintetizados do processo de classificação de 2004 no Google Earth Pro.....	84
Tabela 10 - Dados sintetizados do processo de classificação de 2024 no Google Earth Pro...	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ODS - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

LCZ – Zonas Climáticas locais

UFMT - Universidade Federal de Mato Grosso

NDVI - Índices de Vegetação de Diferença Normalizada

TST - Temperatura da Superfície Terrestre

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

OMM - Organização Meteorológica Mundial

WUDAPT - World Urban Database and Access Portal Tools

SR - Sensoriamento Remoto

ND - Números digitais

USGS - Serviço Geológico dos Estados Unidos

MSS - Sensor Multispectral Scanner

TM - Thematic Mapper

OLI - Operational Land Imager

TIRS - Thermal Infrared Sensor

NIR - Infravermelho Próximo

TIR - Infravermelho Termal

SWIR - Infravermelho de Ondas Curtas

SIG - SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

QGIS - *QuantumGIS*

IPDU - Instituto de Planejamento e Desenvolvimento Urbano de Cuiabá

CMDU - Conselho Municipal de Desenvolvimento Urbano

RMVRC - Região Metropolitana do Vale do Rio Cuiabá

ROI - Região de Interesse

GEE - Google Earth Engine

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro adaptado das estruturas das classes do sistema LCZ.....	27
Quadro 2 – Panorama e perfil evolutivo das classes LCZ para os anos de 2004 e 2024.....	88

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Problemática	16
1.2 Justificativa.....	17
1.3 Estrutura da dissertação	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Condições atmosféricas e o clima urbano	21
2.2 Elementos e fatores climáticos	21
2.3 Alterações do clima em relação a elementos climáticos	22
2.4 A forma física urbana e suas tipologias.....	25
2.5 Compreensão das Zonas Climáticas Locais (LCZ)	25
2.5.1 Critérios morfológicos para a classificação LCZ	31
2.5.2 Projeto LCZ Generator	32
2.6 Sensoriamento Remoto.....	34
2.6.1 Satélites da série Landsat	35
2.6.2 Sistema de Informações Geográficas (SIG)	39
2.6.3 QuantumGIS – QGIS.....	40
2.6.4 Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).....	41
2.6.5 Temperatura da Superfície Terrestre (TST)	42
3 ÁREA DE ESTUDO	43
3.1 Breve histórico da evolução urbana de Cuiabá	43
3.2 Aspectos do município	46
3.3 Clima urbano de Cuiabá	49
3.3.1 Efeitos microclimáticos observados em estudos em Cuiabá	50
4 METODOLOGIA.....	51
4.1 Classificação LCZ	51
4.2 Criação das áreas de treinamento	52
4.2.1 Submissão dos dados de entrada.....	55
4.2.2 Processamento da classificação: geração do mapa de LCZ.....	57
4.2.3 Mapas das LCZ e análise da acurácia	58
4.2.4 Pós classificação – delimitação da área de estudo	63
4.3 Coleta de dados de Sensoriamento Remoto	64
4.3.1 Processamento das imagens: cálculo da TST e do NDVI do Landsat 5	66

4.3.2	<i>Processamento das imagens: cálculo da TST e do NDVI do Landsat 8</i>	71
4.4	Tratamento estatístico	77
4.4.1	<i>Análise da distribuição dos dados</i>	78
4.4.2	<i>Análise da variância da TST e NDVI</i>	78
4.4.3	<i>Análise de correlação</i>	80
4.4.4	<i>Análise de dados espaciais</i>	81
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
5.1	Classificação de Zonas Climáticas Locais para Cuiabá	83
5.1.2	<i>Classificação LCZ para o território municipal – ano 2024</i>	84
5.1.3	<i>Comparativo das LCZs entre os anos de 2004 e 2024</i>	86
5.1.4	<i>Contrastes térmicos e desigualdades climáticas no espaço urbano de Cuiabá</i>	100
6	CONCLUSÃO	117
7	REFERENCIAS	118
7.1	Referências bibliográficas citadas	118
7.2	Referências bibliográficas consultadas	120

1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo abordará o contexto introdutório referente a pesquisa desse trabalho através do problema e da justificativa.

1.1 Problemática

A Revolução Industrial que se fortaleceu ao longo do século XVIII até o início do século XXI, incorreu em um significativo movimento migratório da população rural para as áreas urbanas principalmente na Europa. No decorrer dos anos, esse processo de urbanização transformou o comportamento das variáveis climáticas em nível local, influenciando as condições atmosféricas que caracterizam o clima urbano. Com o crescimento desordenado e acelerado da população nas cidades, podem ser observados impactos ambientais cada vez mais drásticos, que afetam diretamente as cidades e os ambientes naturais.

No Brasil a migração territorial do campo para a cidade se intensificou durante o século XX tendo o maior fluxo entre as décadas de 1960 e 1980 resultando em cerca de 37% dessa migração, sendo que entre as décadas de 1970 e 1980 chegou a ser responsável por cerca de 17,4% do crescimento populacional nas cidades o que em quantidade, significa que cerca de 12 milhões de pessoas migraram para os centros urbanos. Já na primeira década do século XXI, o crescimento mostrou-se desacelerado com cerca de 3,5% ou 5,6 milhões de pessoas se deslocando até os centros urbanos.

Para um estado como Mato Grosso, cujo impulsionamento da ocupação ocorreu por meio de programas de assentamentos rurais através do incentivo de políticas públicas na segunda metade do século XX, torna-se evidente uma contradição, já que apesar da sua estrutura econômica ser fortemente alicerçada na agropecuária, conta com uma população reduzida residindo nas zonas rurais. Esse cenário reflete as consequências do modelo de desenvolvimento adotado ao longo de sua história.

Em 1970 cerca de 598 mil pessoas habitavam no estado e no censo no ano de 2022 esse número passou de 3,5 milhões de pessoas. Ainda de acordo com o censo de 2022 cerca de 82% da população desse estado vive nas cidades.

Cuiabá, a capital do estado do Mato Grosso é atualmente o município mais populoso do estado e assim como a maioria das cidades também teve seu crescimento urbano sem planejamento, ausente de políticas públicas para manter a ordem e a preservação ambiental, não só para proteção natural, mas também para o bem estar das pessoas.

Apesar de ter sido fundada em 1719, Cuiabá sofreu um impacto significativo em seu crescimento urbano também a partir de 1970, mas só em 1992 o Plano Diretor de Desenvolvimento de Cuiabá foi criado através da Lei Complementar 003 a fim de ordenar o crescimento territorial funcional, eficaz e sustentável. Mesmo diante legislações vigentes, o crescimento urbano se mostrou desordenado principalmente pela falta de fiscalização dos órgãos competentes fazendo com que tais ações se tornam em partes, ineficaz.

A urbanização em larga escala trouxe consequências ambientais difíceis de serem superadas uma vez que a atenção voltada ao tema ocorreu tardiamente e mesmo com iminentes alertas, os responsáveis pelo planejamento das cidades não incluíram recomendações climáticas em suas legislações.

Uma breve exemplificação de alguns itens constantes no Plano Diretor do Município obriga que em Projetos Arquitetônicos de residências unifamiliares é necessário que tenha o mínimo de 25% de área permeável, no mínimo 5% de área arbórea ambos em relação a área de terreno e que tenha uma árvore a cada 5 metros na calçada dentro dos padrões exigidos. Porém na prática, a execução não ocorre de acordo com o projeto aprovado nos órgãos competentes e a fiscalização não se faz ao rigor necessário para eficácia do atendimento da Lei.

Dessa forma, as alterações climáticas por meio da elevação da temperatura ocasionadas principalmente pela falta de compreensão da importância de atender recomendações ambientais, aumento no consumo de energia, implicações da qualidade do ar, unidos á problemas ambientais, como as ondas de calor, queimadas, estiagem, baixa umidade relativa do ar, poluições e impactos na saúde são inevitáveis.

A integração entre legislação urbana e estudos climatológicos ainda carece de eficácia. Este projeto propõe-se a utilizar análises de zonas climáticas e índices espectrais para oferecer insights que possam aprimorar o planejamento urbano.

Portanto, é de extrema importância que estudos e dados do clima urbano sejam incorporados a políticas públicas de urbanização, a fim de mitigar e quem sabe, reparar parcialmente danos ambientais, uma vez que a continuidade da urbanização é inevitável. Além disso, é fundamental realizar estudos e mapeamentos detalhados da qualidade ambiental para orientar as intervenções futuras de maneira responsável e sustentável.

1.2 Justificativa

Diante a apresentação da problemática e analisando como a urbanização se constituiu, com a intenção de contribuir na inserção de estudos climatológicos ao planejamento urbano, busca-se auxiliar através dessa pesquisa e seguindo alguns princípios dos Objetivos do

Desenvolvimento Sustentável (ODS) são eles: item 11- Cidades e Comunidades Sustentáveis, item 13 - Ação contra mudança global do clima e item 16- Paz, justiça e instituições eficazes, a fim de contribuir com um crescimento sustentável da cidade e também na melhoria da cidade já construída. A cidade protagonista desse estudo é Cuiabá, a capital do Mato Grosso que ao longo do tempo assim como outras cidades brasileiras vem sofrendo as consequências de um crescimento desordenado.

Apesar das primeiras tentativas de automatizar o geoprocessamento de dados para fins de produção de mapas ocorrer nos anos 50 a popularização e facilidade dessa atividade se deu nos anos 90 e se perpetuou nos anos 2000 em decorrência do avanço da tecnologia. Tal feito proporcionou o acesso nas funções de análise de dados espaciais e é através da evolução dessa atividade ao longo dos anos que essa pesquisa pôde ser desenvolvida.

Buscou-se uma identificação territorial por meio da distribuição de dados espaciais e do cruzamento de dados com variáveis como cobertura do solo e temperatura permitiu a análise entre essas duas variáveis. Para isso, através da utilização de imagens satelitais foi possível observar o comportamento do clima em diferentes períodos.

A análise foi feita por meio do método proposto por Stewart e Oke, 2012, referente às classificações de Zonas Climáticas Locais (LCZ - Local Climate Zones). O método de Stewart e Oke introduziu um conceito para a classificação da tipologia construtiva e da cobertura do solo com base em critérios climáticos, caracterizando áreas por zonas climáticas. Além disso, estabeleceu um padrão global relacionado às características físicas e urbanas.

Os dados provenientes do sensoriamento remoto oferecem recursos para avaliar mudanças na paisagem de maneira singular, periódica e abrangente. Esse recurso será utilizado para gerar informações para o planejamento, o desenho urbano e pesquisas sobre o clima urbano. Dessa forma podemos coletar dados para quantificar as diferentes temperaturas da superfície terrestre no município de Cuiabá ao longo dos anos através dos índices de NDVI (índices de vegetação de diferença normalizada e TST (temperatura da superfície terrestre) durante as três últimas décadas.

Diante o exposto, o objetivo geral consistiu em contribuir com o planejamento urbano do município por meio de mapas analisando a evolução das Zonas Climática Locais e índices espectrais, como a cidade de Cuiabá vem crescendo, quais as tipologias construtivas, quais características do paisagismo e onde estão localizadas as ilhas de calor nos anos 2004 e 2024.

Os objetivos específicos desse trabalho consistem em:

- a) Identificar e mapear as zonas climáticas de Cuiabá;
- b) Utilizar índices espectrais para analisar as condições ambientais da cidade;
- c) Determinar índices NDVI e TST por imagens de satélites;
- d) Relacionar as classes LCZ, ao índice NDVI e TST;

Essa pesquisa tem o objetivo principal por contribuir com o planejamento urbano da cidade através de mapas ilustrando as características paisagísticas da tipologia construtiva e da cobertura do solo, a fim de incluir temas ambientais nas discussões referente ao uso e ocupação do solo.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho está organizado em sete capítulos, conforme descrito abaixo:

- Capítulo 1 - Introdução: Este capítulo apresenta a problemática e a justificativa da pesquisa, contextualizando a importância do estudo das mudanças climáticas urbanas e a relevância do caso de Cuiabá. Também são definidos os objetivos do estudo e a organização geral da dissertação.
- Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: Este capítulo aborda os conceitos fundamentais sobre condições atmosféricas e o clima urbano, discutindo os principais elementos e fatores climáticos que influenciam o ambiente urbano. São apresentados também os efeitos das alterações climáticas sobre esses fatores, a morfologia urbana e as tipologias das cidades, com ênfase na classificação das zonas climáticas locais (LCZ). Além disso, são discutidos os métodos e ferramentas utilizados para análise climática, como o sensoriamento remoto, os satélites Landsat, os índices de vegetação (NDVI), e a temperatura da superfície terrestre (TST).
- Capítulo 3 - Área de Estudo: Aqui, são apresentados detalhes sobre a evolução urbana de Cuiabá e os aspectos geográficos e climáticos do município, que servem como base para a análise da morfologia urbana e suas transformações ao longo dos anos.
- Capítulo 4 - Metodologia: Neste capítulo, é detalhada a metodologia adotada na pesquisa. A classificação das zonas climáticas locais (LCZ) é explicada, com ênfase nos critérios morfológicos e no processo de classificação. A seguir, são descritos os métodos de criação das áreas de treinamento e o processamento das imagens satelitais para gerar

os mapas de LCZ, incluindo as etapas de análise da acurácia e pós-classificação. Também são abordadas as etapas de coleta e processamento de dados de sensoriamento remoto para calcular os índices NDVI e a TST. A seção final discute o tratamento estatístico dos dados, com análises de distribuição, variância, correlação e dados espaciais.

- Capítulo 5 - Resultados e Discussões: Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da classificação das zonas climáticas locais (LCZ) para Cuiabá, juntamente com a análise dos dados de TST e NDVI. As discussões interpretam os resultados à luz da literatura existente, destacando as mudanças na morfologia urbana e seus impactos no clima local.
- Capítulo 6 - Conclusão: O último capítulo resume os principais achados da pesquisa, destacando as contribuições do estudo para o entendimento das mudanças climáticas urbanas em Cuiabá. Também são apresentadas as limitações do estudo e sugestões para futuras pesquisas.
- Capítulo 7 - Referências: Este capítulo contém todas as referências bibliográficas utilizadas para embasar a pesquisa, seguindo as normas de citação e formatação recomendadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo visa apresentar a fundamentação teórica responsável para o desenvolvimento dessa pesquisa. Veremos a seguir o detalhamento do conceito utilizado para a relação destes com os dados coletados.

2.1 Condições atmosféricas e o clima urbano

As condições atmosféricas referem-se às características que ocorrem na atmosfera em um momento específico, também conhecidas como condições adversas ou tempo. Elas são influenciadas por diversos fatores, como temperatura, umidade, cobertura de nuvens, precipitação, pressão atmosférica, ventos e radiação solar. Esses elementos são determinantes para os padrões climáticos diários em uma região geográfica. (BRITO, SILVA, CRISPIM, 2019).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais informa que o clima representa a síntese das condições atmosféricas de uma região, comprovadas ao longo de um extenso período. Em contraste, o tempo refere-se às variações momentâneas da atmosfera, podendo mudar de uma hora para outra ou de um dia para o outro. Enquanto o tempo é passageiro, o clima é uma característica mais estável.

Sendo o clima urbano entendido como o clima de um dado espaço associado ao seu processo de urbanização, que expressa as condições atmosféricas resultantes da interação de diferentes escalas climáticas e de superfície (MONTEIRO, 1976). A observação do clima local deve ser acompanhada da análise das características geoambientais, características físicas do meio geográfico, assim como, das características do processo de urbanização dos espaços a serem estudados, pois, dessa forma é possível identificar quais as alterações climáticas e suas magnitudes, além de relacioná-las às ações sociais.

2.2 Elementos e fatores climáticos

Os elementos climáticos são as características que definem o clima de uma região, enquanto os fatores climáticos são as condições que determinam as características do clima. As alterações climáticas são causadas por fatores climáticos que estão sendo alterados pela ação humana.

De acordo com Marcílio (2019), os elementos climáticos correspondem a títulos mensuráveis da atmosfera, que podem ser medidos ou calculados, são elas: temperatura, umidade e pressão atmosférica, radiação, direção e velocidade do vento, além da precipitação.

Já os fatores climáticos são aspectos que determinam e alteram os elementos do clima. São eles que definem as diferentes condições climáticas dos lugares, são eles: latitude, altitude, massas de ar, correntes marítimas, continentalidade, Albedo e maritimidade.

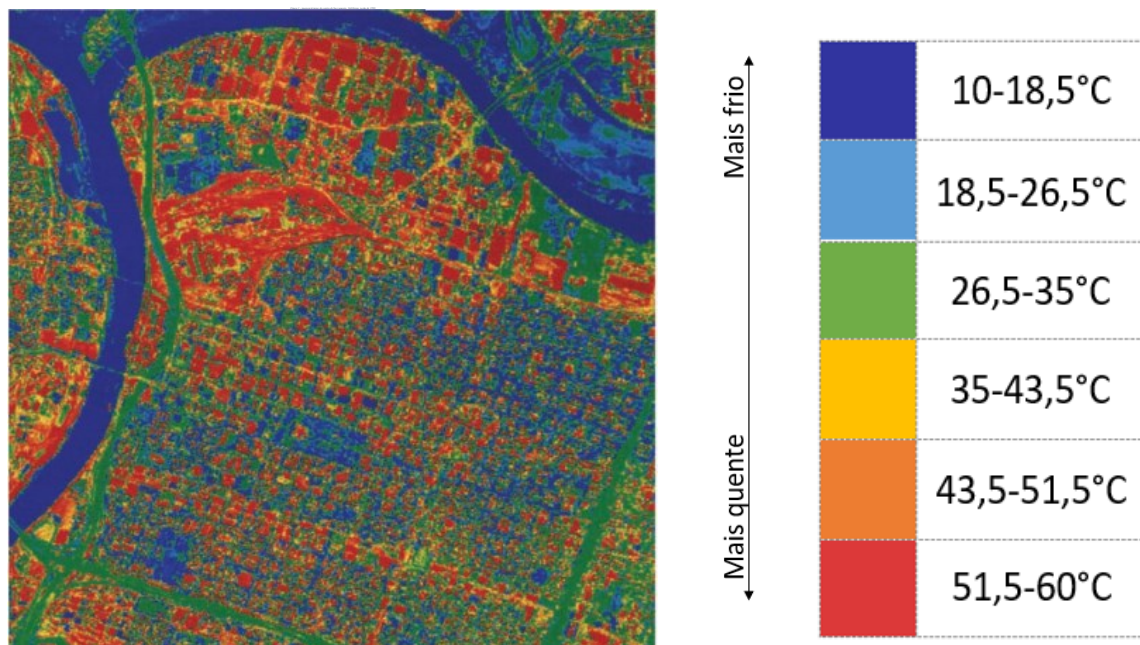
2.3 Alterações do clima em relação a elementos climáticos

A temperatura do ar é um elemento climático resultante do aquecimento e resfriamento da superfície da terra. Neste sentido, a diferença de temperatura entre as áreas urbanas e seus arredores é conhecida como ilha de calor, causada pelas alterações que o desenvolvimento urbano provoca no balanço de energia onde a cidade está localizada (OKE et. al., 2017).

Fialho (2012), com base em uma revisão bibliográfica, identifica três tipos de ilhas de calor, que se diferem a partir dos métodos e técnicas de mensuração, denominadas: ilha de calor de superfície, ilha de calor atmosférica e ilha de calor vertical.

Ilhas de calor são formadas em áreas urbanas e suburbanas porque muitos materiais de construção comuns absorvem e retêm mais calor do sol do que materiais naturais em áreas rurais menos urbanizadas. Existem duas razões principais para esse aquecimento. A primeira é que a maior parte dos materiais de construção é impermeável e estanque, e verão. A vegetação costuma manter a temperatura igual ou inferior à temperatura do ar, desde que esteja devidamente hidratada. (GARTLAND, 2008).

Figura 1 - Imagem térmica do centro de Sacramento, Califórnia, junho de 1998.



Adaptado: Fonte: Gorsevski et al., 1998.

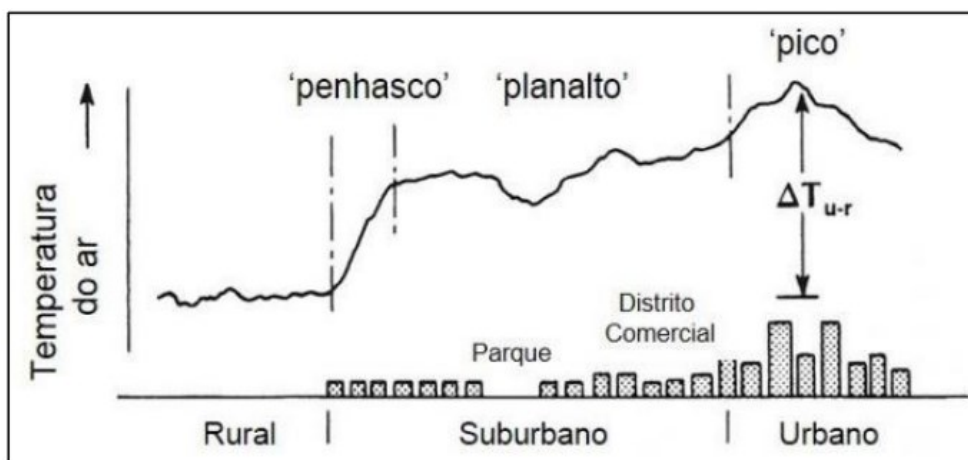
Na figura anterior expõe a imagem térmica do centro de Sacramento, Califórnia, em 29 de junho de 1998 ao meio-dia, obtida por um sobrevoo em um Lear Jet pelo programa ATLAS da NASA.

De acordo com, Gartland (2010), existem duas razões para o aquecimento de regiões urbanas, a primeira se refere aos materiais de construção, que em sua maior parte são impermeáveis e estanques, assim não havendo umidade suficiente para dissipar o calor do sol. A segunda razão refere-se à combinação de materiais escuros de edifícios e pavimentos em geometria do tipo cânion, que absorvem e armazenam mais energia. Outras contribuições para a formação das ilhas de calor, são: calor antropogênico, padrões de menor velocidade do vento e poluição do ar.

Segundo Oke (1987), o fenômeno das ilhas de calor urbano pode ser comparado a uma ilha, na qual a temperatura relativa da cidade se projeta nitidamente no seu entorno, gerando um gradiente horizontal que pode ser bastante elevado, chegando a 4 °C/km na chamada área do penhasco.

A maior parte da área urbana é designada como um planalto de ar quente com gradiente horizontal constante, interrompido pela influência de áreas mais frias, como parques e lagos, e áreas mais quentes, como regiões comerciais, industriais ou densamente edificadas. Em algumas cidades, o núcleo urbano pode apresentar o pico da ilha de calor, onde a temperatura máxima urbana é encontrada, o que define a intensidade da ilha de calor urbana. (ARAÚJO,2023)

Figura 2 - Seção transversal generalizada de uma típica ilha de calor urbana



Fonte: Adaptado de Oke, 1976, apud Oke (1987)

As teorias de Howard eram precisas. Estudos realizados ao longo do século XX determinaram que as superfícies urbanas são mais quentes do que as superfícies rurais por dois principais motivos. O primeiro é que as superfícies construídas pelo homem são compostas por materiais escuros que prontamente absorvem e armazenam o calor do sol. E para exacerbar essa alta absorção do calor solar, as construções e pavimentos formam cânions que tendem a refletir o calor. O segundo é a maioria dos materiais de construção é resistente à água, portanto a água de chuva corre e vai embora, e não consegue dissipar o calor por meio da evaporação ou evapotranspiração quando existem plantas envolvidas.

É fato que a discussão referente a alterações climáticas ocorre por diversos fatores causados por pessoas e a cada ano as consequências se tornam cada vez mais alarmantes. A exemplo, logo no primeiro trimestre de 2025, dados emitidos pelo INMET em meados de fevereiro de 2025 se tornou preocupante pois afeta diretamente a pessoas habitantes da região sudeste do Brasil.

Em janeiro de 2025, uma primeira onda de calor aconteceu entre os dias 17 e 23 de janeiro e a segunda, entre os dias 2 e 12 de fevereiro, ambas no Rio Grande do Sul onde as temperaturas passaram de 40°C e sensação térmica chegou aos 50°C, o que para essa região é incomum não só nesse período. A região sudeste do país enfrentou a terceira onda de calor. As temperaturas aumentaram cerca de 5 graus acima da média histórica que para esse período, em São Paulo, é de 24°C, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A sensação térmica é a intensidade do frio ou do calor percebida pelo corpo humano. Essa percepção é influenciada, não só pela temperatura externa, mas também pelas condições de umidade e do vento. Quando a temperatura e a umidade estão altas de forma concomitante, a transpiração não ocorre de forma eficiente, aumentando a sensação de calor percebida pela pessoa.

Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), ocorre uma onda de calor quando as temperaturas máximas diárias ultrapassam em 5°C ou mais a média mensal durante, no mínimo, cinco dias consecutivos. Essas condições podem abranger uma área ampla e não apenas uma localidade.

A relação entre ilhas de calor e o clima local está diretamente ligada a tipologia construtiva da zona urbana e também a cobertura do solo. É visível o desarranjo climático em escala mundial através de dados oficiais e por esse motivo, a inserção de informações climáticas no planejamento das cidades se torna essencial e urgente. De fato, o poder público tem caminhado a passos lentos quanto ao assunto, o que prejudica ainda mais a vivência de uma forma geral.

2.4 A forma física urbana e suas tipologias

Segundo Besussi et. al (2010), a morfologia urbana refere-se à forma física da cidade e à configuração espacial de suas partes constituintes. A classificação da morfologia urbana, por sua vez, envolve a identificação de padrões na forma física da cidade e a categorização desses padrões de acordo com critérios específicos, como explicado por Oliveira (2016).

De acordo com Hillier e Hanson (1984), a morfologia urbana pode ser analisada em diferentes níveis de complexidade e escala, desde o nível do edifício até o nível da cidade como um todo. Em cada um desses níveis, é possível identificar elementos que influenciam a aparência, a eficiência e a acessibilidade do espaço urbano.

Conforme Araújo (2023) descreve, no nível do edifício, a morfologia pode ser analisada em termos de forma, tamanho, proporção e orientação. Já no nível do quarteirão, a análise se concentra em elementos como tamanho, forma, orientação e uso do solo, que afetam a conectividade e a permeabilidade do espaço urbano, bem como a acessibilidade e a diversidade do uso do solo.

No nível da cidade como um todo, a morfologia urbana pode ser analisada em termos de forma, tamanho, densidade e conectividade. A configuração da cidade influencia a acessibilidade, a mobilidade e a diversidade do uso do solo, bem como a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas urbanos. Além disso, a morfologia urbana também pode ser analisada em termos de sua história, cultura e identidade, que influenciam a percepção e a apropriação do espaço urbano pelos seus habitantes (HILLIER E HANSON, 1984).

Oke (1982) também destacou que o ambiente urbano é caracterizado pela maior absorção da radiação solar devido à reflexão e radiações múltiplas, maior retenção de radiação infravermelha em adensamentos urbanos, maior absorção e liberação retardada de calor por edifícios e superfícies pavimentadas, entre outros.

Importante salientar que a finalidade dessa pesquisa não é elaborar um mapa do clima urbano, mas classificar a paisagem tendo como base elementos que influenciam o clima, como tipologia construtiva e cobertura do solo, podendo tanto quanto os mapas climáticos, balizar as discussões ambientais no desenvolvimento de medidas eficazes para uma cidade eficiente, sustentável e resiliente.

2.5 Compreensão das Zonas Climáticas Locais (LCZ)

Em 2006, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) publicou o Guia de orientações iniciais para observações meteorológicas representativas em locais urbanos,

elaborado por Oke com a colaboração de Grimmond (2006), a respeito dos instrumentos e métodos de observação como resultado de 30 anos de pesquisa.

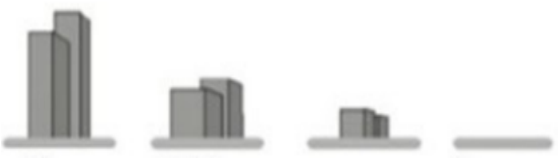
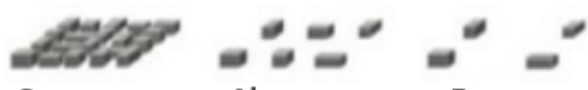
Em 2011 Ian Douglas Stewart, doutorando da Universidade de Colúmbia Britânica, Vancouver através de sua tese de doutorado, iniciou o desenvolvimento do método de classificação de Zonas Climáticas Locais pela orientação do professor Timothy Oke. Assim, em 2012, Stewart e Oke apresentaram uma classificação eficaz desse sistema de classificação denominado Local Climate Zones (LCZ) ou em tradução livre Zonas Climáticas Locais.

Esse sistema de classificação fundamenta-se na tipologia das construções e na cobertura do solo, tornando-se uma ferramenta essencial para a caracterização e o planejamento de recomendações específicas aos contextos climáticos específicos. Dada a complexidade dos ambientes urbanos e a indefinição entre os conceitos de rural e urbano, esse método confere maior representatividade ao caráter de interesse.

De acordo com os autores, no método LCZ, a forma é representada pela classificação tipológica, diferenciando inicialmente, dois grupos principais: tipologias construídas e de cobertura do solo. As tipologias construídas abrangem áreas urbanizadas, resultantes da ação humana, enquanto as tipologias de cobertura do solo incluem tanto espaços naturais, como florestas e corpos d'água, quanto áreas antropizadas, associadas à exploração econômica do solo, como cultivos agrícolas. Essa classificação permite uma primeira distinção dos usos do solo e uma análise inicial das dinâmicas espaciais em diferentes escalas, sejam regionais, municipais ou intraurbanas.

As tipologias construtivas para classificação são divididas entre altura dos edifícios (alto, médio, baixo), tipo físico (compacta, aberta, esparsa), presença de arborização, permeabilidade do solo e materiais de construção (Quadro 1). O esquema compreende 17 zonas baseadas principalmente em propriedades de estrutura de superfície (por exemplo, altura e densidade de edifícios e árvores) e cobertura de superfície (permeável vs. impermeável). Cada zona é local em escala, o que significa que representa distâncias horizontais de centenas de metros a vários quilômetros.

Quadro 1 – Quadro adaptado das estruturas das classes do sistema LCZ

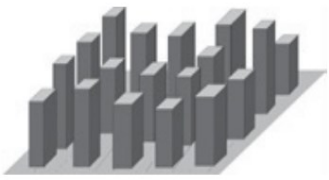
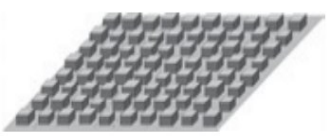
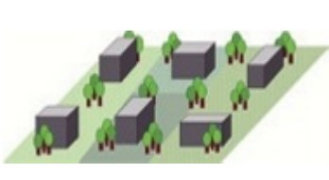
Classificação das estruturas	
Altura dos elementos	
Edificação	Vegetação
 Altos Médios Baixos Sem construção	 Árvores Arbustos Plantas Solo
Distribuição dos elementos	
Edificação	Vegetação
 Compacta Aberta Esparsa	 Compacta Aberta Esparsa
Cobertura da superfície	
 Impermeáveis Permeáveis (Cobertura vegetal) Permeáveis (Solo)	
Materiais Construtivos	
 Pesados Leves	

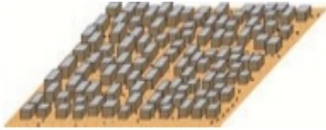
Fonte: Autora. Adaptado de OKE, 2012.

Esse sistema desenvolvido por Stewart e Oke em 2012 é composto por 10 LCZs definidas por tipologias e a forma de adensamento das construções (Tabela 1) e 07 LCZs relativas à cobertura do solo e suas propriedades de superfícies (Tabela 2) totalizando a definição de 17 Zonas Climáticas Locais.

Existem diversas formas de unir estudos relacionados a cobertura do solo das cidades e uma delas é a partir da identificação através da classificação das Zonas Climáticas Locais (LCZ) desenvolvida por OKE e STEWART. Essa pesquisa foi desenvolvida através dessa metodologia, uma vez que para alcançar os resultados referente ao clima local, a classificação da morfologia construtiva e cobertura do solo da cidade de Cuiabá se fez necessária.

Tabela 1 – Definições das Zonas Climáticas Locais – LCZ

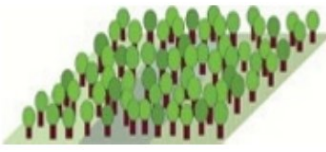
Tipologia construtiva	Descrição
LCZ 1. Edifícios altos compactos	
	Mistura densa de edifícios altos com dezenas de pavimentos. Pouca ou nenhuma árvore. Com cobertura do solo predominantemente pavimentada. Materiais construtivos de concreto, aço, pedra e vidro.
LCZ 2. Edifícios médios compactos	
	Mistura densa de edifícios intermediários (3-9 pavimentos). Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura da terra predominantemente pavimentada. Materiais construtivos de pedra, tijolo, azulejo e materiais.
LCZ 3. Edifícios baixo compacto	
	Mistura densa de edifícios baixos (1-3 pavimentos). Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura da terra predominantemente pavimentada. Materiais construtivos de pedra, tijolo, azulejo e concreto.
LCZ 4. Edifícios altos com espaço aberto	
	Arranjo aberto de edifícios altos com dezenas de pavimentos. Abundância permeável de cobertura do solo (plantas baixas e árvores espalhadas). Materiais construtivos de concreto, aço, pedra e vidro.
LCZ 5. Edifícios médios com espaços abertos	
	Arranjo aberto de edifícios intermediários (3–9 pavimentos). Abundância permeável de cobertura do solo (plantas baixas e árvores espalhadas). Materiais construtivos de concreto, aço, pedra e vidro.
LCZ 6. Edifícios baixos com espaços abertos	
	Arranjo aberto de edifícios baixos (1–3 pavimentos). Abundância permeável de cobertura do solo (plantas baixas, árvores dispersas). Materiais construtivos de madeira, tijolo, pedra, azulejo e concreto.

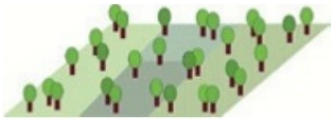
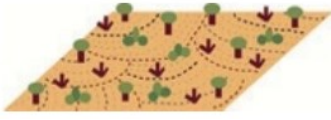
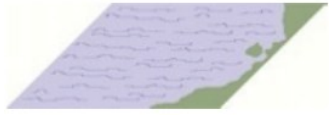
LCZ 7. Adensamento de edifícios baixos leves	
	Densa mistura de edifícios de um só pavimento. Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura da terra predominantemente compactada. Construção de materiais leves (por exemplo, madeira, palha, metal corrugado).
LCZ 8. Grandes edifícios baixos, galpões	
	Arranjo aberto de grandes edifícios baixos (1–3 pavimentos). Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura do solo maioritariamente pavimentada. Materiais construtivos de aço, concreto, metal e pedra.
LCZ 9. Esparsa com construções pequenas ou médias	
	Disposição esparsa de edifícios de baixo e médio porte em um ambiente natural. Abundância de terras permeáveis com cobertura de vegetação herbácea, arbustiva ou árvores espalhadas.
LCZ 10. Indústria pesada	
	Estruturas industriais baixas e médias (torres, tanques, pilhas). Poucas ou sem árvores. Cobertura do solo principalmente pavimentada ou impermeável. Materiais predominantemente em metal, aço e concreto.

Fonte: Autora. Adaptado de OKE, 2012.

Abaixo, a tabela 2 referências às mais comuns coberturas do solo identificadas, de acordo com a classificação das Zonas Climáticas Locais desenvolvidas por Stewart e Oke (2012).

Tabela 2 – Cobertura do Solo das Zonas Climáticas Locais – LCZ

Tipologias de Cobertura de Solo	Descrição
LCZ A. Árvores adensadas	
	Paisagem densamente arborizada de árvores decíduas e/ou de folhas perenes. A cobertura do solo é principalmente permeável (plantas baixas). A função da zona é floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.

LCZ B. Árvores dispersas	
	Paisagem levemente arborizada de árvores de folha caduca e/ou de folhas perenes. A cobertura do solo é principalmente permeável (plantas baixas). A função da zona é floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.
LCZ C. Arbustos	
	Arranjo aberto de arbustos e árvores curtas e lenhosas. A cobertura do solo é principalmente permeável (solo exposto ou areia). A função da zona é arvoredos naturais ou agricultura.
LCZ D. Plantas baixas	
	Paisagem com características de grama ou plantas/colheitas herbáceas. Pouca ou nenhuma árvore. Função de zona é pastagem natural, agricultura ou parque urbano.
LCZ E. Pavimentação/ Pedra exposta	
	Paisagem com característica de rocha ou cobertura pavimentada. Poucas ou nenhuma árvore ou planta. A função da zona é o deserto natural (rocha) ou o transporte urbano.
LCZ F. Solo exposto/ Areia	
	Paisagem com característica de solo ou cobertura de areia. Poucas ou nenhuma árvore ou planta. A função da zona é deserto natural ou agricultura.
LCZ G. Água	
	Corpos de água grandes e abertos, como mares e lagos, ou pequenos corpos, como rios, reservatórios e lagoas.

Fonte: Autora. Adaptado de OKE, 2012.

A classificação de Zonas Climáticas Locais (LCZ), proposta por Stewart e Oke (2012), tem ganhado destaque na literatura científica devido à sua relevância na análise das dinâmicas climáticas e ambientais nas áreas urbanas. O método LCZ tem sido demonstrado ao ser aplicado tanto em grandes áreas metropolitanas quanto em cidades de médio e pequeno porte, embora, conforme ressaltado por Cai et al. (2017) e Perera e Emmanuel (2016), sejam necessárias adaptações específicas para cada contexto local. Em resumo, a classificação de Zonas Climáticas Locais configura-se como uma ferramenta de grande relevância para entender os

impactos das mudanças climáticas nas cidades e dessa forma, contribuir para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes.

2.5.1 Critérios morfológicos para a classificação LCZ

Após o exposto referente a identificação e definições das Zonas Climáticas Locais, serão apresentados na tabela 3 os parâmetros morfológicos de classificação para cada LCZ seguindo o desenvolvimento dessa metodologia por Stewart e Oke (2012).

Tabela 3 - Valores de propriedades geométricas e de cobertura superficial para LCZ.

LCZ	FVC	W-H	% EDIF.	% IMP.	% PER.	A.RUG.	C. RUG.
Tipologias construtivas							
1	0,2 - 0,4	> 2	40 - 60	40-60	<10	>25	8
2	0,3 - 0,6	0,75 - 2	40 - 70	30-50	<20	10-25	6-7
3	0,2 - 0,6	0,75 - 1,5	40 - 70	20-50	<30	3-10	6
4	0,5 - 0,7	0,75 - 1,25	20 - 40	30-40	30-40	>25	7-8
5	0,5 - 0,8	0,3 - 0,75	20 - 40	30-50	20-40	10-25	5-6
6	0,6 - 0,9	0,3 - 0,75	20 - 40	20-50	30-60	3-10	5-6
7	0,2 - 0,5	0,1 - 0,2	60 - 90	<20	<30	2-4	4-5
8	> 0,7	0,1 - 0,3	30 - 50	40-50	<20	3-10	5
9	> 0,8	0,1 - 0,25	10 - 20	<20	60-80	3-10	5-6
10	0,6 - 0,9	0,2 - 0,5	20 - 30	20-40	40-50	5-15	5-6
Tipologias de cobertura do solo							
A	< 0,4	> 1	<10	<10	>90	3-30	8
B	0,5 - 0,8	0,25-0,75	<10	<10	>90	3-15	5-6
C	0,7 - 0,9	0,25 - 1,0	<10	<10	>90	<2	4-5
D	> 0,9	< 0,1	<10	<10	>90	<1	3-4
E	> 0,9	< 0,1	<10	<10	>90	<0,25	1-2
F	> 0,9	< 0,1	<10	<10	>90	<0,25	1-2
G	> 0,9	< 0,1	<10	<10	>90	-	1
Legenda: LCZ: Zonas Climáticas Locais FVC: Fator de Visão do Céu H/W: Relação H/W %EDIF.: Fração de Porcentagem Edificada %IMP.: Fração de Porcentagem Impermeável %PERM.: Fração de Porcentagem Permeável A. RUG.: Altura da Rugosidade C. RUG.: Classe de Rugosidade do Terreno							

Fonte: Adaptado de STEWART e OKE, 2012

A tabela descrita acima facilita o entendimento das classificações de cada LCZ por ter sido padronizada durante seu desenvolvimento, facilitando assim a compreensão dos resultados obtidos. Resultados esses provenientes de combinações das propriedades da superfície e dos elementos compostos.

Embora a recomendação por parte dos autores seja de que cada LCZ tenha um diâmetro mínimo entre 400 e 1.000 m para garantir a maior homogeneidade possível nas condições atmosféricas de cada classe, na prática, podem ocorrer variações internas. Essas heterogeneidades podem surgir dependendo da cidade, do desenho urbano, do planejamento e do estágio de desenvolvimento do setor urbano, seja ele na expansão ou na consolidação da cidade.

Além disso, as classes principais do método LCZ podem não se aplicar integralmente a todas as cidades, exigindo adaptações. Uma alternativa é a criação de subclasses por meio da combinação de duas classes principais. No entanto, Stewart e Oke (2012), idealizadores da metodologia, alertam contra o excesso de subclasses, pois isso pode aumentar a complexidade do processo sem oferecer vantagens significativas, especialmente no que diz respeito ao campo térmico, que pode permanecer semelhante ao das classes principais, tornando a compreensão dos resultados dificultosa.

Com a eficácia das classificações LCZ, o método se popularizou propiciando o desenvolvimento do Portal de Acesso das Ferramentas do Banco de Dados Urbanos Mundial com o título original sendo World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) desenvolvido em 2015 onde é descrito o LCZ Generator, um sistema de classificador automático para as LCZs. Além da WUDAPT os programas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) também ajudam da coleta dos dados e identificação das classes da metodologia aplicada nessa pesquisa.

2.5.2 Projeto LCZ Generator

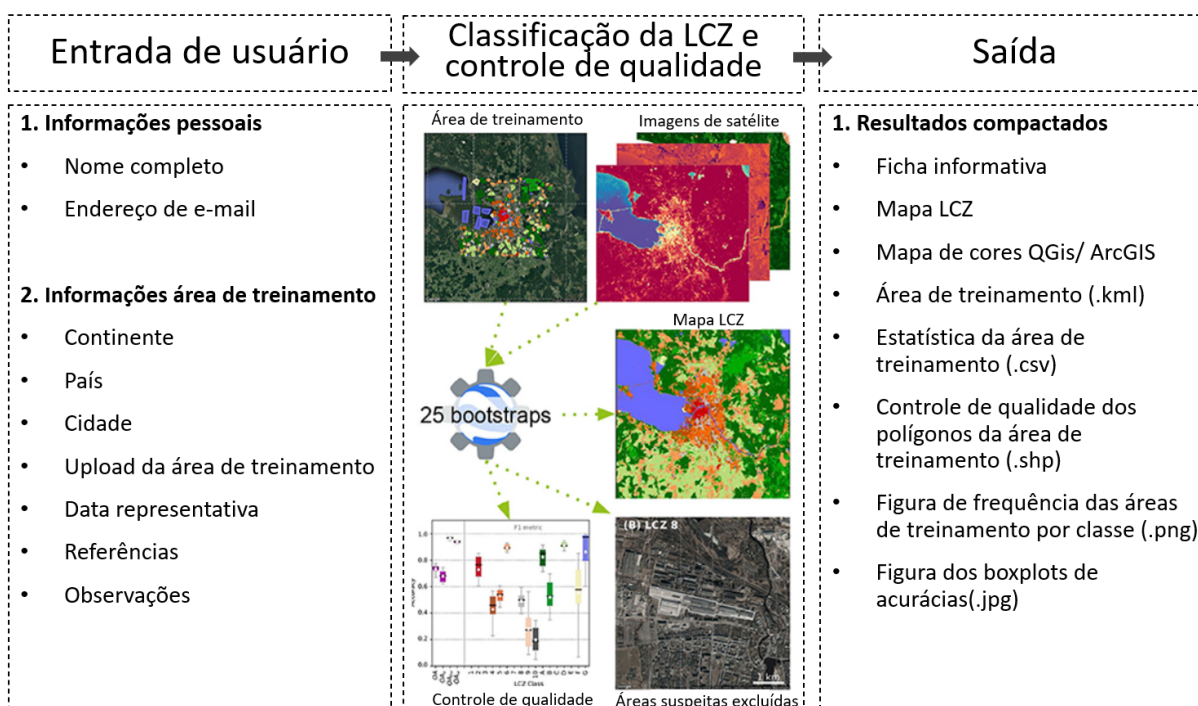
O LCZ Generator é uma ferramenta proposta para facilitar a acessibilidade e compreensão das classes de LCZ ao oferecer uma plataforma online e gratuita capaz de mapear uma cidade de interesse e identificar as Zonas Climáticas Locais. Esse recurso requer um arquivo de área de treinamento e alguns metadados como entrada. Essa ferramenta de acesso online incorpora as mais avançadas técnicas de mapeamento das LCZs, fornecendo ao mesmo tempo, uma avaliação automatizada de precisão e qualidade, derivação de dados de treinamento e uma abordagem para identificar áreas de treinamento.

A ferramenta utiliza imagens de satélite de denominação Landsat e Sentinel, e o procedimento para criar um mapa com a classificação de LCZ demanda um conjunto de áreas de treinamento e um algoritmo de classificação de imagens. (Bechtel et al, 2015).

O LCZ Generator consiste em três etapas principais. Em uma primeira etapa, informações pessoais e de áreas de treinamento precisam ser enviadas por meio do aplicativo de forma online. Após o envio, a classificação e o controle de qualidade da LCZ são iniciados no para produzir um mapa de LCZ com controle de qualidade, estatísticas de metadados e rótulos para polígonos suspeitos. Em uma terceira e última etapa, os resultados compactados são enviados ao usuário por e-mail e adicionados simultaneamente à tabela de envio on-line. (DEMUZERE; KITTNER e BECHTEL,2021).

Após a identificação do tipo de arranjo físico e altura das edificações, procede-se para as demais propriedades, como cobertura do solo em relação a área permeável, impermeável e projeção das edificações. Quando não há correspondência com nenhuma das classes dispostas no método, utiliza-se a classe de maior aproximação. (TONIOLI, 2023)

Figura 3 - Fluxograma das informações de entrada e saída do LCZ Generator



Fonte: Autora. Adaptado de DEMUZERE; KITTNER e BECHTEL,2021.

Essa ferramenta é capaz de gerar mapas e dados analíticos de uma área com clareza o suficiente para o entendimento quanto ao objetivo pretendido nessa pesquisa. Na metodologia será descrito com maiores detalhes o passo a passo da obtenção dos resultados.

2.6 Sensoriamento Remoto

A década de 1960 ficou conhecida como a década da corrida espacial e foi nesse período que ocorreu um rápido desenvolvimento quanto aos foguetes lançadores de satélites. O termo Sensoriamento Remoto se deu no início da década de 1960 por Evelyn L. Pruitt e colaboradores, que se perpetuou como uma tecnologia eficaz na coleta de dados para levantamento, monitoração e análise dos recursos da cobertura terrestre em uma escala global.

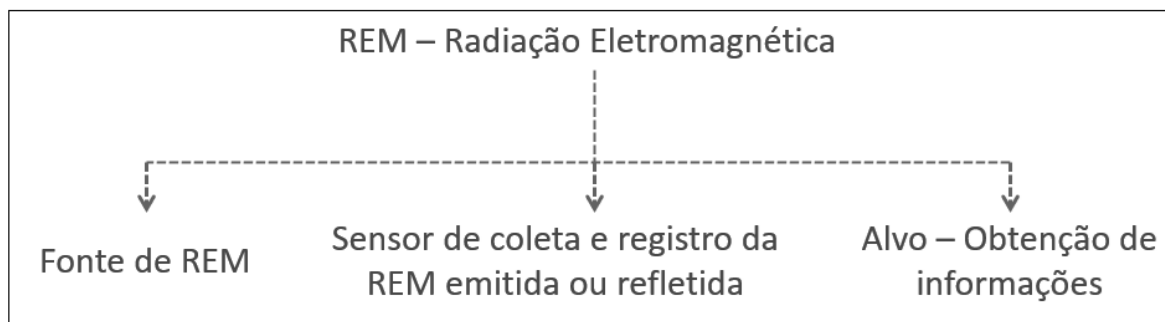
Historicamente, se reconhece que o termo Sensoriamento Remoto foi criado para designar o desenvolvimento dessa nova tecnologia de instrumentos capaz de obterem imagens da superfície terrestre a distâncias remotas. Por isso, a definição mais conhecida ou clássica de sensoriamento remoto é: Sensoriamento remoto é uma técnica de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto. (MENESES, ALMEIDA, 2012).

Um marco importante que deu início à era do sensoriamento remoto moderno foi o lançamento pelos Estados Unidos da América, do primeiro satélite de sensoriamento remoto, ERTS-1, posteriormente renomeado para Landsat 1, colocado em órbita em 1972 a cerca de 919 km de altura. O sensor imageador multiespectral desse primeiro satélite de sensoriamento remoto possibilitava a obtenção simultânea de quatro imagens nas faixas do espectro do visível e do infravermelho próximo e uma imagem no termal, portanto, além do que era possível com o uso de filmes fotográficos. (MENESES, ALMEIDA, 2012).

Atualmente, inúmeros sensores orbitais estão em operação no espaço, capturando imagens da superfície terrestre em diferentes faixas espectrais e oferecendo uma ampla variedade de resoluções espaciais e temporais. Enquanto alguns sensores hiperespectrais registram centenas de bandas espectrais, fornecendo um nível detalhado de informações espectrais, outros se destacam pela alta resolução espacial, conseguindo identificar objetos na Terra com menos de 50 cm de tamanho. Para superar a barreira das nuvens, especialmente em regiões constantemente nubladas como a Amazônia, sensores de radar utilizam fontes artificiais de radiação eletromagnética, tornando as nuvens praticamente invisíveis para o mapeamento da cobertura do solo.

De acordo com Novo e Ponzoni (2001), para que possamos obter informações quanto ao sensoriamento remoto, é necessário que existam quatro elementos apresentados na figura 4, a seguir.

Figura 4 - Diagrama ilustrativo dos quatro principais elementos das técnicas de SR.



Fonte: Autora. Adaptado de Novo e Ponzoni, 2001.

Conforme apontado por Novo e Ponzoni (2001), as técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) capturam energia em diversas bandas do espectro eletromagnético, cada uma correspondente a diferentes comprimentos de onda.

Tais sensores remotos medem variáveis, como a temperatura de superfície terrestre (TST) de forma indireta, detectando a radiação de onda longa, que pode ser caracterizada como radiância aparente por incluir a influência da atmosfera e de objetos vizinhos, sendo convertida em números digitais (ND) no próprio sensor, e que posteriormente deve ser convertida para radiância espectral no topo da atmosfera e depois, em temperatura de brilho (ZHOU et al., 2019).

Após um breve resumo referente ao Sensoriamento Remoto, quanto a sua concepção e evolução ao longo dos anos, é compreendido que essa é uma das ferramentas que dão embasamento na busca dos resultados dessa pesquisa. A seguir, será exposto informações dos satélites que fornecem as informações e dados que interessam a essa pesquisa.

2.6.1 Satélites da série Landsat

De acordo com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) o Programa Landsat é uma série de missões de observação da Terra por satélite gerenciadas em conjunto pela NASA e pelo Serviço Geológico dos EUA.

Os satélites da coleção Landsat têm resolução terrestre e bandas espectrais ideais para rastrear com eficiência o uso da terra e documentar mudanças na terra devido a mudanças climáticas, urbanização, seca, incêndios florestais, mudanças na biomassa (avaliações de carbono) e uma série de outras mudanças naturais e causadas pelo homem. Desde a sua estreia a coleção possui 9 satélites sendo que 6 deles já foram desativados 1 falhou ao atingir a órbita e 2 estão em operação.

Tabela 4 – Histórico da coleção de satélites LANDSAT

Satélite	Lançamento	Status
Landsat 1	23 de julho de 1972	Desativado em 6 de janeiro de 1978
Landsat 2	22 de janeiro de 1975	Desativado em 27 de julho de 1983
Landsat 3	5 de março de 1978	Desativado em 7 de setembro de 1983
Landsat 4	6 de julho de 1982	Desativado em 15 de junho de 2001
Landsat 5	1 de março de 1984	Desativado em 5 de junho de 2013
Landsat 6	5 de outubro de 1993	Falha ao atingir a órbita
Landsat 7	15 de abril de 1999	A missão científica estendida começou em 5 de maio de 2022
Landsat 8	11 de fevereiro de 2013	Em operação
Landsat 9	27 de setembro de 2021	Em operação
Landsat Futuro	Prevista para 2031	Lançamento futuro

Fonte: Autora. Adaptado de NASA, 2025

Para essa pesquisa os satélites Landsat 5 e Landsat 8 são os que forneceram informações no espaço temporal definido. Em 1 de março de 1984 o Landsat 5 foi lançado no espaço para orbitar no entorno da Terra com o objetivo de fornecer dados globais de superfície terrestre e esteve em atividade por 28 anos e 10 meses até ser desativado em junho de 2013. Já o Landsat 8 foi lançado em 27 de setembro de 2021 com arranjos tecnológicos capazes de fornecer imagens da superfície terrestre de alta precisão.

Em 2013 Charles Bolden, Astronauta e ex-administrador da NASA disse que o Landsat é uma peça central do programa de ciências da Terra da NASA, e o lançamento bem-sucedido do satélite 8 estenderá o mais longo registro contínuo de dados da superfície da Terra, visto do espaço. Esses dados são uma ferramenta essencial para monitorar as mudanças climáticas e levaram à melhoria da saúde humana e da biodiversidade.

De fato, a resolutividade das imagens fornecidas pelo Landsat 8 surpreende pesquisadores e por conta da mais refinada tecnologia a ele imputado, a excelência da obtenção de imagens e mapas auxiliam na qualidade das pesquisas.

Cada satélite da coleção possui características na apresentação de informações importantes a serem mencionadas. Na tabela 5 a seguir serão apresentadas as características de atividades do Landsat 5 e do Landsat 8, objetos da extração de informações pertinentes para essa pesquisa.

Tabela 5 – Comparativo das Especificações dos Satélites Landsat 5 e Landsat 8

Landsat 5		
Sensor	Banda	Características
Scanner multiespectral (MSS)	Banda 4	Verde visível (0,5 a 0,6 μm) 80 m
	Banda 5	Vermelho visível (0,6 a 0,7 μm) 80 m
	Banda 6	Infravermelho Próximo 0,7 - 0,8 (μm) 80 m
	Banda 7	Infravermelho Próximo 0,8 - 1,1 (μm) 80 m
Mapeador Temático (TM)	Banda 1	Azul visível (0,45 - 0,52 μm) 30 m
	Banda 2	Verde visível (0,52 - 0,60 μm) 30 m
	Banda 3	Vermelha visível (0,63 - 0,69 μm) 30 m
	Banda 4	Infravermelho próximo (0,76 - 0,90 μm) 30 m
	Banda 5	Infravermelho próximo (1,55 - 1,75 μm) 30 m
	Banda 6	Térmica (10,40 - 12,50 μm) 120 m
	Banda 7	Infravermelho médio (2,08 - 2,35 μm) 30 m
Landsat 8		
Imageador Operacional da Terra (OLI)	Banda 1	Aerossol costeiro (0,43 - 0,45 μm) 30 m
	Banda 2	Azul (0,450 - 0,51 μm) 30 m
	Banda 3	Verde (0,53 - 0,59 μm) 30 m
	Banda 4	Vermelho (0,64 - 0,67 μm) 30 m
	Banda 5	Infravermelho próximo (0,85 - 0,88 μm) 30 m
	Banda 6	SWIR 1 (1,57 - 1,65 μm) 30 m
	Banda 7	SWIR 2 (2,11 - 2,29 μm) 30 m
	Banda 8	Pancromática (PAN) (0,50 - 0,68 μm) 15 m
	Banda 9	Cirrus (1,36 - 1,38 μm) 30 m
Sensor infravermelho térmico (TIRS)	Banda 10	TIRS 1 (10,6 - 11,19 μm) 100 m
	Banda 11	TIRS 2 (11,5 - 12,51 μm) 100 m

Fonte: Autora. Adaptado de USGS, 2025.

Vejamos agora qual a função de cada sensor apresentado na tabela acima. No Landsat 5 estão presentes dois sensores. O sensor Multispectral Scanner (MSS) registrava variações na luz solar refletida da Terra, já o sensor Thematic Mapper (TM) permitia a varredura multiespectral da Terra. Ele foi projetado para ter maior resolução de imagem, separação espectral mais nítida, e maior precisão radiométrica.

No Landsat 8 também estão presentes dois sensores, porém com funções distintas as do Landsat 5, o Operational Land Imager (OLI) mede nas porções visíveis, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (VNIR, NIR e SWIR) do espectro. O Thermal Infrared Sensor (TIRS) mede a temperatura da superfície terrestre em duas bandas térmicas com aplicação da física quântica para detectar calor.

Referente a denominação banda de um satélite adotada pela ciência, refere-se a uma faixa específica de comprimentos de onda do espectro eletromagnético que o sensor do satélite é capaz de capturar. Os satélites de sensoriamento remoto, como os da série Landsat, possuem sensores que registram a radiação refletida ou emitida pela superfície da Terra em diferentes bandas espectrais. Essas bandas podem abranger desde o visível (luz que o olho humano enxerga) até o infravermelho e o micro-ondas, permitindo o monitoramento de diversos aspectos do ambiente como:

- Banda do Visível: Útil para gerar imagens semelhantes ao que veríamos a olho nu, analisando vegetação, corpos d'água e áreas urbanas;
- Banda do Infravermelho Próximo (NIR): Importante para avaliar a saúde da vegetação e a cobertura do solo.
- Banda do Infravermelho Termal (TIR): Mede a temperatura da superfície, auxiliando no monitoramento do calor urbano e da temperatura dos oceanos.
- Banda do Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR): Usada para identificar a umidade do solo e a composição mineral.
- Banda de Micro-ondas (Radar): Permite a observação da superfície mesmo em condições nubladas ou noturnas, pois utiliza uma fonte própria de radiação.

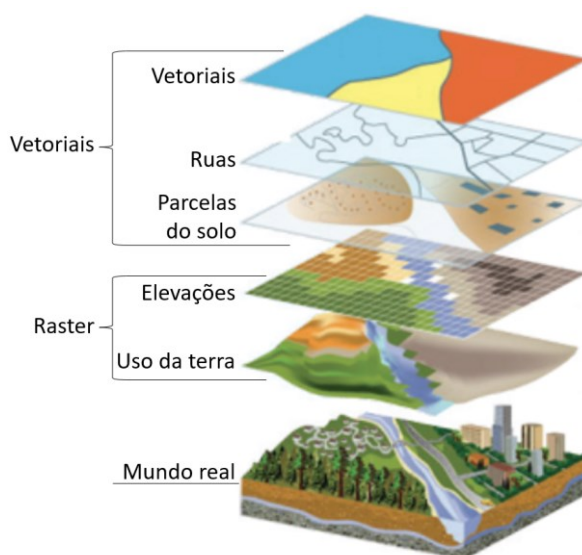
De acordo com Tonioli, (2024), é importante destacar que, ao estudar o clima urbano dos municípios, nem sempre há disponibilidade de estações meteorológicas, especialmente em cidades de médio e pequeno porte. Mesmo em grandes centros urbanos, a quantidade de estações pode ser limitada e insuficiente para representar toda a área de estudo. Nesse contexto, o Sensoriamento Remoto (SR) se torna uma ferramenta valiosa para o desenvolvimento de pesquisas sobre o clima urbano.

2.6.2 Sistema de Informações Geográficas (SIG)

O Sistema de Informações Geográficas, de acordo com Burrough e McDonnell (1998), constitui o tipo de estrutura mais importante em termos de viabilização do geoprocessamento, esse último sendo um conjunto de procedimentos computacionais que, operando sobre uma base de dados integradas, possibilita a execução de análises e cálculos que variam desde a álgebra cumulativa até álgebra não cumulativa (operações lógicas), permitindo a elaboração de mapas politemáticos (contendo dados qualitativos e quantitativos), reformulações e sínteses sobre os dados ambientais disponíveis, constituindo-se em instrumento de grande potencial para o estabelecimento de estudos integrados.

O SIG se diferencia de outros sistemas computacionais por sua capacidade única de estabelecer relações espaciais entre elementos gráficos, o que o torna especialmente adequado para a análise e o tratamento de dados geográficos, pois durante a utilização de um programa de SIG, podemos separar e/ou sobrepor as camadas geradas, para integra-las e gerar informações de interesse.

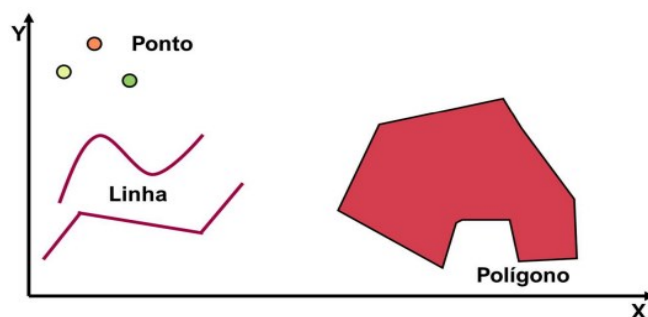
Figura 5 - Camadas de informações de um SIG empilhadas



Fonte: Adaptado de ArcGis.com

Os dados em um SIG podem ser representados em dois formatos principais: vetorial e matricial (raster), dependendo da forma como são armazenados e processados. Os dados vetoriais são definidos por coordenadas geográficas e podem ser representados por três elementos básicos: pontos, que são definidos por um par de coordenadas geográficas; linhas, que são formadas pela conexão de múltiplos pontos sequenciais e polígonos, que são estruturados a partir de um conjunto fechado de linhas, delimitando áreas específicas.

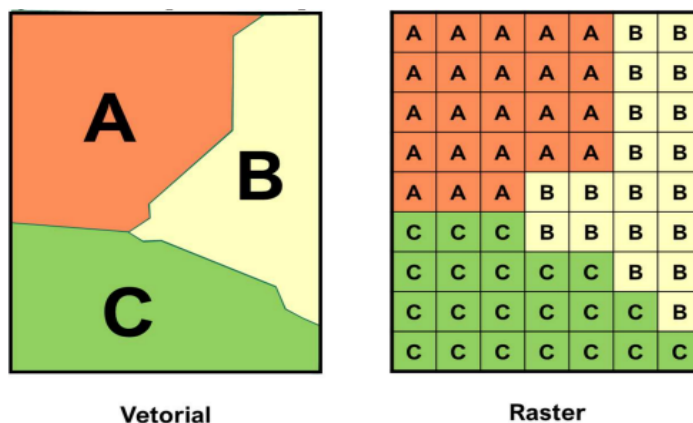
Figura 6 - Tipos de dados vetoriais de um SIG



Fonte: LIMA, 2023

Os dados raster são compostos por uma grade de células representadas por pixels, cada uma contendo um valor associado a uma determinada característica geográfica, como temperatura, altitude ou uso do solo. Essa diferenciação permite que os SIGs lidem com uma ampla variedade de dados espaciais, possibilitando análises detalhadas e representações precisas do espaço geográfico.

Figura 7 - Esquema de representação de dado vetorial e raster



Fonte: LIMA, 2023

Para essa pesquisa ambos os formatos de arquivos SIG foram utilizados para mapeamento por LCZ para obter informações completas e fornecer melhores resultados. Os mapas são representações cartográficas do ambiente cultural e físico, e nos últimos anos os avanços em hardwares de computadores e tecnologias de softwares, associados aos SIGs, tem modificado profundamente a forma como essas representações são criadas e utilizadas (SILVA et al., 2022).

2.6.3 *QuantumGIS* – QGIS

Atualmente há uma diversidade de programas SIGs mas dois estão em destaque o ArcGis e o QGis. Para essa dissertação, será utilizado o QGis. Este, é um software SIG livre e de

código-fonte aberto, desenvolvido em Python. Outro ponto positivo ao seu favor refere-se à disponibilidade de sua interface em vários idiomas, o tornando mais acessível. Tem uma grande comunidade de apoio e desenvolvimento que contribuem para o aprimoramento do mesmo e elaboração de ferramentas (plugins) e funções que otimizam o trabalho (FONSECA, 2020).

2.6.4 *Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)*

O NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) é um índice espectral amplamente utilizado no sensoriamento remoto para medir a saúde e a qualidade da vegetação. Ele é calculado a partir da reflexão da luz em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético, utilizando principalmente as bandas do vermelho e do infravermelho próximo (NIR). A fórmula a seguir representa como o NDVI é calculado.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

NIR (Infravermelho Próximo) - Refletância da banda no infravermelho próximo;

RED (Vermelho) - Refletância da banda no vermelho.

A fórmula, gera um índice entre -1 e 1, onde valores negativos refletem regiões com corpos de água e os valores positivos, quanto maiores, maior o verdor vegetativo do local (SOUSA FILHO, et. al., 2008). Para estudos climáticos esse índice trabalha no monitoramento de variações sazonais na cobertura vegetal da área de interesse.

Conforme relata Pinheiro (2021), o estudo da vegetação urbana com SR fornece múltiplos indicadores biofísicos, que auxiliam no entendimento de situações envolvendo a supressão da cobertura vegetal, que por vezes, acompanha a impermeabilização do solo e redução da infiltração de água no solo, colaborando com as consequências negativas associadas ao clima via as alterações microclimáticas.

Dada a importância das estruturas verdes em ambientes urbanos, consideradas essenciais para promover a sustentabilidade e a resiliência das cidades, diversas intervenções têm sido adotadas, incluindo soluções baseadas na natureza, infraestruturas verdes e azuis e abordagem arquitetônica que integra elementos naturais aos espaços construídos.

Nesse contexto, observa-se a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, utilizando imagens de satélite para extrair informações do tecido urbano e analisar variáveis como Temperatura da Superfície Terrestre (TST) e NDVI. Esses indicadores desempenham um papel fundamental na identificação e mitigação dos efeitos das ilhas de calor urbanas, influenciando

diretamente o resfriamento/aquecimento e o conforto térmico humano, especialmente durante o verão ou em períodos de clima quente e seco.

2.6.5 Temperatura da Superfície Terrestre (TST)

A análise da temperatura da superfície terrestre está frequentemente ligada ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), uma vez que o aumento da temperatura está diretamente associado às mudanças na paisagem natural, especialmente pela redução da cobertura vegetal devido à expansão urbana, construção de edificações e outras transformações no ambiente.

A temperatura da superfície terrestre (TST) é um parâmetro físico que diz respeito ao fluxo de calor dado em função do balanço de radiação que chega e que sai de um corpo (AVOA DE, 2001). A Temperatura da Superfície Terrestre (TST) desempenha um papel fundamental na compreensão das interações entre a superfície e a atmosfera, sendo essencial para a modelagem da temperatura do ar nas camadas inferiores da atmosfera urbana. Sua aplicação é ampla, sendo utilizada em diversos estudos, incluindo a elaboração de modelos climáticos e a análise de fenômenos ambientais.

A emissividade espectral de uma superfície é um pré-requisito necessário para estimativa o TST, pois é um parâmetro físico relacionado à habilidade inerente da superfície de converter a energia armazenada em energia radiante, emitindo-a para o espaço. (SOBRINO et al., 1993)

Werneck (2022), relacionou para o Distrito Federal (DF), as LCZ existentes com TST e também índices de vegetação como Índice de Vegetação Melhorado (EVI) e o Índice de Umidade de Diferença Normalizada (NDMI), obtendo como conclusão de que existem para as classes LCZ diferentes respostas térmicas no tecido urbano do DF.

Pelo desenvolvimento do método de classificação LCZ de Stewart e Oke (2012), algumas associações entre a TST e as classes identificadas na área de estudo, foram realizadas, onde os pesquisadores buscaram discutir e compreender a heterogeneidade das áreas de estudo, as diferenças da TST entre as LCZs e como isso reflete no clima local (MANANDHAR et. al., 2019; FERREIRA, 2020; MAIGUA, 2020; WERNECK, 2022).

Os dados de uma TST são coletados através de sensores acoplados em satélites, que no caso dessa pesquisa é o Landsat 8 pois registram a radiação térmica refletida pelos objetos na superfície pelo sensor TIRS (Thermal Infrared Sensor), permitindo a estimativa da TST.

3 ÁREA DE ESTUDO

Nesta seção é desenvolvida uma análise histórica da área em estudo, ressaltando tanto o processo de expansão populacional quanto aspectos adicionais que dialogam diretamente com os objetivos da pesquisa.

3.1 Breve histórico da evolução urbana de Cuiabá

Cuiabá, no decorrer dos anos, passou por sucessivas transformações em seu território desde sua fundação em 1719. Na época da descoberta das Minas, pertencia à Capitania de São Paulo, sendo no ano de 1727 elevada à categoria de vila, com o nome de Vila Real do Senhor Bom Jesus de Cuiabá. A capitania de Mato Grosso foi criada somente em 1748, quando desmembrou-se da Capitania de São Paulo. (IPDU,2014)

Desde então, o crescimento se mostrou estável. Saltando para o ano de 1938 onde temos histórico de medidas tomadas a interesse de Cuiabá, a cidade já dispôs de nove regulamentações definindo o seu perímetro urbano. A primeira regulamentação deu-se pelo Ato n.º 176, de 25 de julho de 1938. Posteriormente, em 4 de junho de 1960, sancionou a Lei n.º 534, delimitando as zonas urbanas e suburbanas da cidade, estabelecendo a área urbana em 4,50km².

A cidade de Cuiabá manteve-se relativamente contida até o início da década de 1960. A partir desse período, seu desenvolvimento tomou um novo rumo, impulsionado por incentivos federais voltados à integração nacional e à ocupação da Amazônia. Benefícios fiscais e creditícios atraíram grandes empresas agropecuárias para o norte do estado, intensificando a ocupação da região amazônica mato-grossense. Esse processo fortaleceu Cuiabá como um importante centro de suporte à expansão territorial, impulsionando fluxos migratórios crescentes e a consequente necessidade de novos espaços e infraestrutura urbana.

Até 1960, a população total do município permanecia em torno de 50 mil habitantes. Na década seguinte, esse número dobrou, ultrapassando 100 mil em 1970, e continuou a crescer nas décadas de 1970 e 1980, impulsionado por sucessivas ondas migratórias. Grande parte desses novos habitantes se estabeleceu na cidade, porém, a área urbana disponível tornou-se insuficiente para acomodar esse crescimento. Como resposta, foram sancionadas leis para expandir os limites do perímetro urbano, permitindo a adequação da infraestrutura à nova realidade populacional.

De acordo com o Instituto de Planejamento e Desenvolvimento Urbano de Cuiabá (IPDU), em 12 de março de 1974, foi sancionada a Lei n.º 1.346, delimitando as áreas urbanas e de expansão urbana da cidade, ficando Cuiabá com a área urbana de 48,45km². No ano de

1978, foi sancionada a Lei n.º 1.537, redefinindo as áreas urbanas e de expansão, passando a área urbana para 104,98km². Em 1979 foi sancionada a Lei n.º 1.601, alterando a lei anterior, porém apenas com a ampliação da área de expansão urbana. Em 1982, a Lei n.º 2.023, de 9 de novembro, que dispõe sobre o uso e a ocupação do solo urbano no município de Cuiabá, definiu a nova zona urbana Cuiabá com 153,06km².

O censo demográfico do IBGE de 1980 registrou uma população superior a 200 mil habitantes em Cuiabá. Durante a década de 1980, esse crescimento se acelerou significativamente e em 1991, a cidade já ultrapassava os 400 mil habitantes. Para atender à crescente demanda por moradia, os poderes públicos estadual e municipal promoveram a construção de diversos núcleos habitacionais, muitos dos quais localizados além dos limites do perímetro urbano, impulsionando ainda mais o processo de urbanização.

Em 1992, a Lei Complementar n.º 003, de 1992, se tratando Plano Diretor, foi sancionada. No ano de 2003, tendo-se em vista a construção de um núcleo habitacional em área contígua à zona urbana, foi aprovada pelo Conselho Municipal de Desenvolvimento Urbano (CMDU) a recomendação da ampliação do perímetro urbano na região denominada Sucuri, a fim de que fosse construído conjunto habitacional municipal destinado ao assentamento de pessoas moradoras em áreas de risco de inundação. (IPDU,2014)

Em julho de 2004, o perímetro urbano municipal foi novamente alterado com a sanção da Lei n.º 4.598, incorporando a região do Sucuri para a construção do Núcleo Habitacional Sucuri, estabelecendo a área do perímetro urbano em 252,58 km², atualmente sendo alterado para Vinhedos pela mudança socioeconômica da região. Entretanto, em dezembro de 2004, com a sanção da Lei n.º 4.719, o limite do perímetro urbano foi ampliado em 1,99 km². Incorporou-se parte da área definida pela Lei n.º 4.485, passando a macrozona urbana a contar 254,57 km². (IPDU,2014)

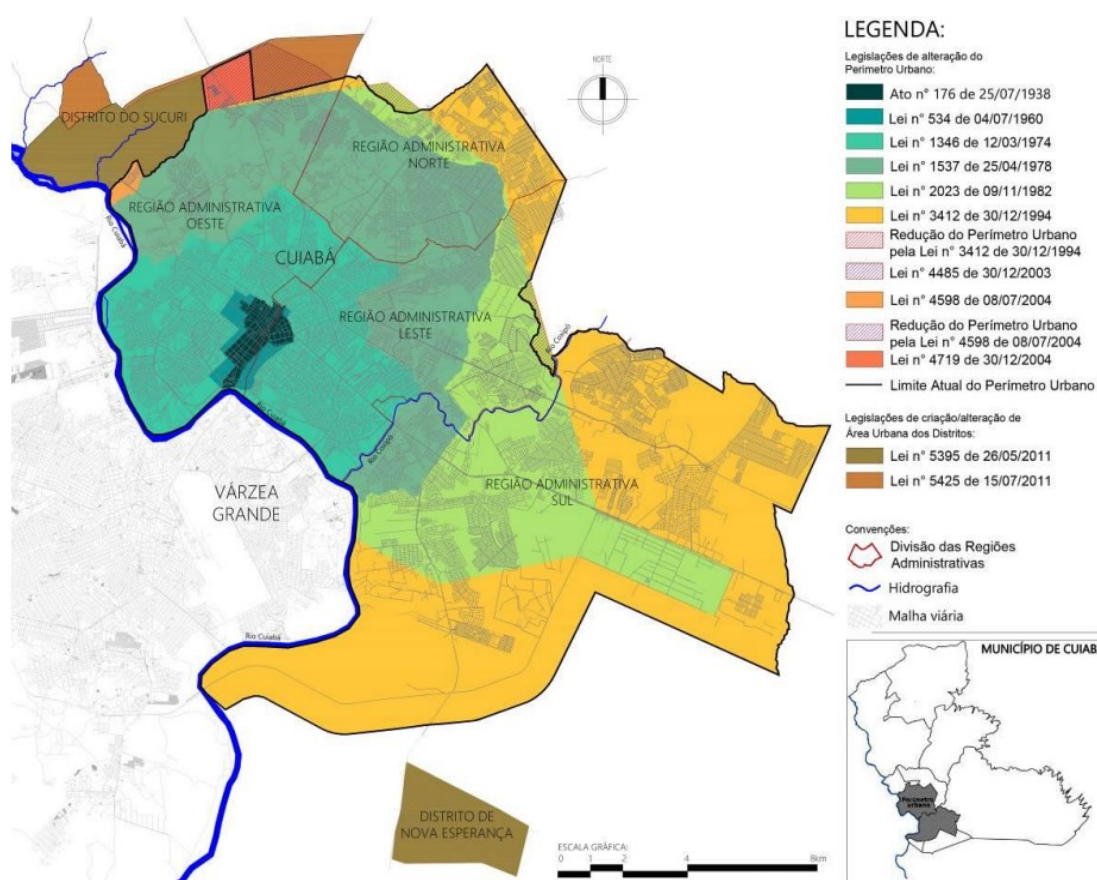
O Plano Diretor de Desenvolvimento Estratégico de Cuiabá, consolidado na Lei Complementar n.º 0150, de janeiro de 2007, determinou em seu artigo 89 a proibição da ampliação do perímetro urbano pelo período de 10 (dez) anos, a partir da aprovação da lei, salvo em situação de calamidade pública e juntamente com a Lei de Uso e Ocupação do solo auxiliam na regulamentação do desenvolvimento do município.

De acordo com o site oficial da Prefeitura Municipal, a nova revisão do Plano Diretor estava prevista para 2021, com o objetivo de adequar as diretrizes urbanísticas às novas exigências do município (CUIABÁ, 2010). Contudo, após quase 16 anos de vigência do atual Plano Diretor, sua revisão, apesar do atraso justificado pelo período pandêmico, encontrava-se

no ano de 2023 em fase final, prestes a ser submetida à aprovação da Câmara de Vereadores (ANTONIACOMI, 2023).

É válido salientar que cidade de Cuiabá, nas últimas duas décadas, vivenciou um processo de expansão urbana rápida e desordenada, o que aliado a um planejamento ineficaz do poder público, resultou em modificações ambientais (JESUS et al., 2016). Tais modificações no ambiente urbano resultam em uma série de desafios para a qualidade de vida da população, principalmente no que tange ao conforto térmico e à sustentabilidade. (COLOMBO,2023)

Figura 8 - Alterações do perímetro urbano de Cuiabá e áreas urbanas distritais (1934-2011)



Fonte: Adaptado de Prefeitura de Cuiabá (2007). Fonte: Frank Fraporti.

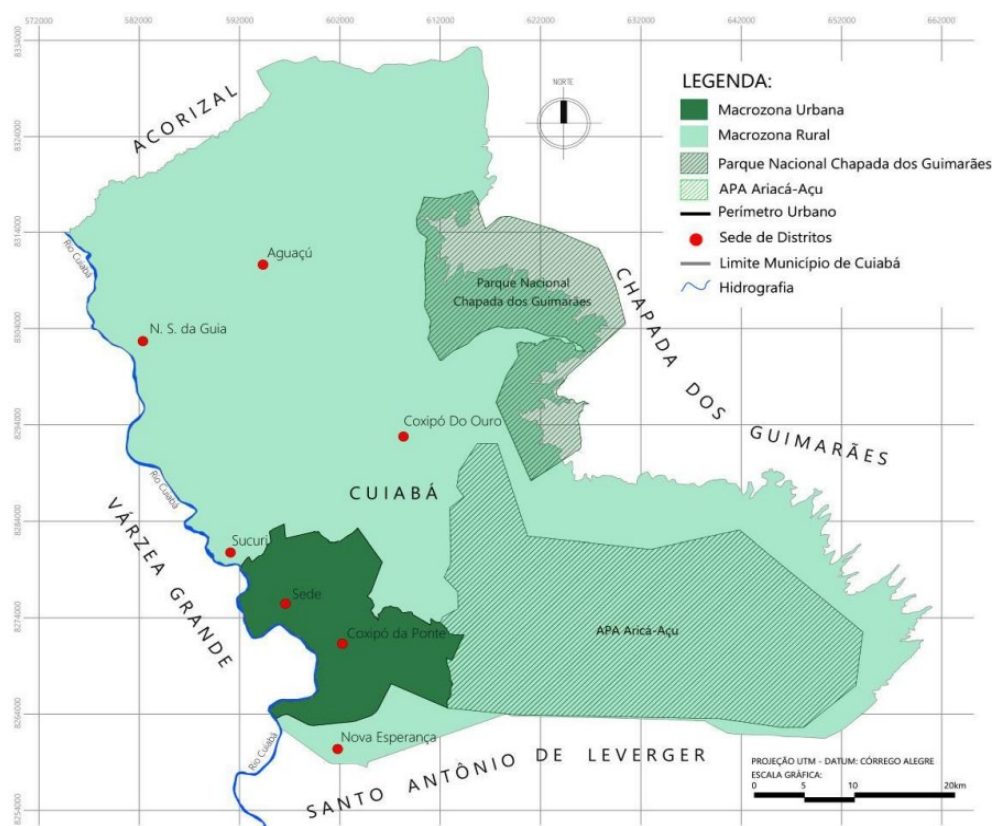
Podemos observar na figura acima a evolução do município até o ano de 2007. É sabido que Cuiabá está em acelerado crescimento desde então, sendo que na cidade já construída, as áreas vazias vêm sendo ocupadas e nas suas extremidades a exemplo da construção da via nomeada de Contorno Leste que interliga o Distrito Industrial à MT-251, essa que beneficiará pelo menos 40 bairros existentes proporcionando infraestrutura para que haja desenvolvimento urbano nas regiões, tornando possível o crescimento dos bairros e núcleos habitacionais.

3.2 Aspectos do município

A área de estudo é o perímetro urbano da cidade de Cuiabá, capital do estado de Mato Grosso, situada entre as coordenadas geográficas de 15°10', 15°50' de latitude sul e 50°50', 50°10' de longitude oeste, na região Centro-Oeste brasileira (SANTOS ET AL., 2013). Cuiabá possui uma área aproximada de 4.327,220 km², sendo dessa área 160,59 km² a macrozona urbana e 4.166,63 km² a área rural IBGE (2023).

A Região Metropolitana do Vale do Rio Cuiabá (RMVRC) é formada por Cuiabá e outros municípios, como: Acorizal, Chapada dos Guimarães, Nossa Senhora do Livramento, Santo Antônio de Leverger, Várzea Grande.

Figura 9 - Município de Cuiabá e divisão em Macrozonas Urbana e Rural.



Fonte: Adaptado de Prefeitura de Cuiabá (2008, 2011a, 2011b). Fonte: Frank Fraporti.

Seu crescimento populacional foi de aproximadamente 952% entre os anos de 1960 e 2010, conforme dados do IBGE (2010). Nas décadas de 70 e 80 o município passou por um processo de explosão populacional, sofrendo transformações na estrutura da paisagem e ocupação do solo urbano. Em algumas áreas houve uma concentração do crescimento vertical das edificações, entre as quais o centro da cidade. As construções verticalizadas absorvem e

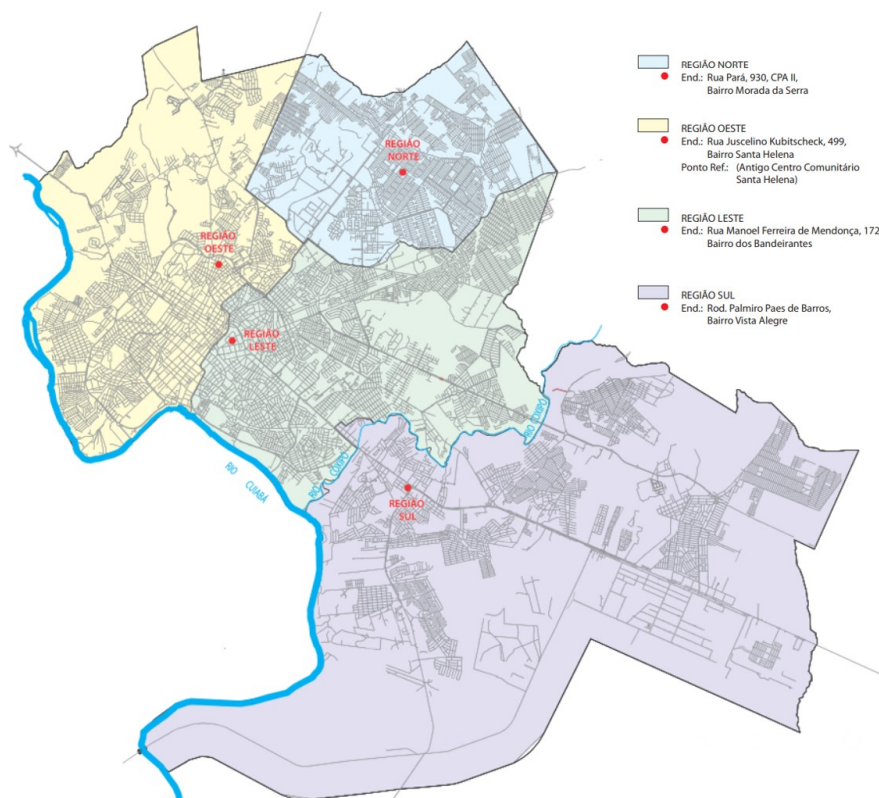
armazenam parte da energia calorífica durante o dia, emitindo-a durante a noite para o ar atmosférico, mantendo o ambiente aquecido por mais tempo. (SANTOS ET AL., 2013).

Atualmente a Lei vigente para Uso e Ocupação do Solo de Cuiabá é a Lei Complementar nº 389, de 03 de novembro de 2015. É um fato que o crescimento desordenado das cidades causa prejuízos principalmente nas questões climáticas, objeto de discussão nessa pesquisa. Sendo assim, entender como a cidade foi e está sendo construída é de grande valia para que possamos amparar o poder público a fim de auxiliar na implementação de Leis que garantam um desenvolvimento urbano ordenado e resiliente.

A cidade está se expandindo também nas adjacências da Rodovia Helder Cândia sentido Distrito da Guia, recebendo diversos empreendimentos predominantemente residenciais como condomínios horizontais e novos bairros e consequentemente toda a estrutura comercial para atender as necessidades da população do seu entorno.

A zona urbana do município e objeto de análise dessa pesquisa é composta por quatro regiões administrativas sendo elas denominadas como, Região Norte composta por 10 bairros e 1 área para expansão; Região Oeste composta por 24 bairros e 1 área para expansão; Região Leste composta por 47 bairros e 1 área para expansão e Região Sul composta por 34 bairros, 1 zona de expansão do Manduri e uma 1 área para expansão.

Figura 10 - Regiões administrativas atuais de Cuiabá



Fonte: Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano – SMDU/DUP, 2010.

Em todas as regiões administrativas da Zona Urbana do município é possível observar bairros com alta densidade demográfica de acordo com o censo de 2010, mas a região Leste se destaca. A influência da alta densidade se dá por fatores históricos que podem ser incorridos pelo processo de ocupação do território, fatores socioeconômicos que podem ser incorridos pelo tipo da urbanização, atendimento à saúde, fluxos migratórios e por fatores naturais tais como clima, topografia e vegetação.

Tabela 6 – Abairramento de Cuiabá

Região	Bairros		Região	Bairros	
Oeste	01	Jardim Ubirajara	Leste	35	Novo Horizonte
	02	Ribeirão do Lipa		36	Planalto
	03	Novo Colorado		37	Residencial Itamarati
	04	Jardim Mariana		38	Novo Mato Grosso
	05	Santa Marta		39	Sol Nascente
	06	Despraiado		40	Jardim Eldorado
	07	Alvorada		41	Residencial São Carlos
	08	Quilombo		42	São Roque
	09	Duque de Caxias		43	Residencial Santa Inês
	10	Ribeirão da Ponte		44	Carumbé
	11	Santa Rosa		45	Bela Vista
	12	Barra do Pari		46	Dom Bosco
	13	Jardim Santa Isabel		47	Terra Nova
	14	Cidade Verde		48	Jardim Aclimação
	15	Cidade Alta		49	Canjica
	16	Jardim Cuiabá		50	Campo Verde
	17	Da Goiabeira		51	Bosque da Saúde
	18	Popular		52	Do Baú
	19	Centro Norte		53	Da Lixeira
	20	Centro Sul		54	Dos Bandeirantes
	21	Do Porto		55	Do Areão
	22	Coophamil		56	Jardim Leblon
	23	Novo Terceiro		57	Pedregal
	24	Dos Araés		58	Jardim Itália
	117	Área de Expansão Urbana		59	Morada dos Nobres
Norte	25	Jardim Florianópolis		60	Santa Cruz
	26	Jardim Vitória		61	Recanto dos Pássaros
	27	Paraíso		62	Jardim Imperial
	28	Nova Conquista		63	Jardim Universitário
	29	Primeiro de Março		64	Cachoeira das Garças
	30	Três Barras		65	Boa Esperança
	31	Morada da Serra		66	UFMT
	32	Morada do Ouro		67	Jardim das Américas
	33	Centro Político Administrativo		68	Pico do Amor
	34	Paiaguás		69	Do Poção
	117	Área de Expansão Urbana		70	Dom Aquino

Região	Bairros		Região	Bairros	
Leste	71	Do Terceiro	Sul	107	Coophema
	72	Jardim Paulista		108	São Gonçalo Beira Rio
	73	Jardim Europa		109	Parque Georgia
	74	Campo Velho		110	Nossa Senhora Aparecida
	75	Jardim Tropical		111	Jardim Comodoro
	76	Jardim Petrópolis		112	Cohab São Gonçalo
	77	Grande Terceiro		113	Jardim Mossoró
	78	Praeiro		114	Parque Atalaia
	79	Jardim Califórnia		115	Parque Cuiabá
	80	Jardim Shangri-Lá		116	Zona de expansão do Manduri
	81	Praeirinho		117	Área de Expansão Urbana
	82	Bela Marina		118	Distrito Industrial
	117	Área de Expansão Urbana			
Sul	83	Osmar Cabral			
	84	São João del-Rei			
	85	Jardim Fortaleza			
	86	Santa Laura			
	87	São Sebastião			
	88	Pascoal Ramos			
	89	Pedra 90			
	90	Nova Esperança			
	91	Jardim Industriário			
	92	Jardim Passaredo			
	93	São Francisco			
	94	Lagoa Azul			
	95	Tijucal			
	96	Jardim dos Ipês			
	97	Altos do Coxipó			
	98	Jardim Presidente			
	99	Residencial Coxipó			
	100	São José			
	101	Parque Ohara			
	102	Jardim das Palmeiras			
	103	Jordão			
	104	Coxipó			
	105	Vista Alegre			
	106	Jardim Gramado			

Fonte: Autora. Adaptado SMDU/DUP/2010.

3.3 Clima urbano de Cuiabá

O município de Cuiabá é a Capital do Estado de Mato Grosso e centro geodésico da América Latina (FIGURA 1), pertencente à região centro-oeste do Brasil. O município possui área de 3.224,68km², dividida em 254,57km² (7,89%) de área urbana e 2.970,11km² (92,1%)

de área rural (SANTOS, 2008; NOVAIS et al., 2015). Está a uma altitude de 165 m acima do nível do mar, localizado na província geomorfológica denominada Depressão Cuiabana. O clima regional é do tipo Aw, segundo a classificação climática de Köppen, caracterizado por ser quente e úmido com chuvas no verão e estiagem no inverno, com estações, úmida e seca, distintas (NOVAIS et al., 2014).

Com clima Tropical Continental, sem influência marítima, onde já foi detectada a interferência do uso do solo urbano na ocorrência de ilhas de calor, Cuiabá apresenta baixa frequência e velocidade média dos ventos, que torna a influência do espaço construído sobre a temperatura do ar mais perceptível, já que as trocas térmicas por convecção são minimizadas (OLIVEIRA, 2011).

3.3.1 Efeitos microclimáticos observados em estudos em Cuiabá

Diversos estudos locais têm evidenciado o comportamento microclimático intraurbano em Cuiabá. Santos et al. (2013) e Oliveira et al. realizaram medições de temperatura e umidade por meio de transectos móveis noturnos nas quatro estações do ano, demonstrando que, quanto mais urbanizada e menos vegetada é a área, maiores são as temperaturas e menores os valores de umidade relativa do ar. O estudo “Análise do clima urbano de Cuiabá-MT via transectos móveis” reforça que o adensamento urbano e a supressão da vegetação são fatores determinantes nas alterações termo-higrômétricas, evidenciando que as áreas verdes apresentam temperaturas mais baixas e maior umidade.

Outros trabalhos abordaram o microclima em espaços públicos, como o artigo “Microclima urbano - praças públicas em Cuiabá/MT/Brasil”. Os resultados indicaram temperatura média do ar próxima de 29 °C em ambos os períodos, umidade relativa média de aproximadamente 56 % no período seco e 70 % no chuvoso, além de baixa velocidade média dos ventos, com direções predominantes noroeste e norte.

Por fim, análises com dados microclimáticos contínuos entre 2014 e 2015, utilizando o modelo ENVI-Met, investigaram variáveis como temperatura, umidade e precipitação a partir de estações de superfície na cidade. Os resultados mostraram que, nos meses secos, a umidade relativa do ar pode cair a cerca de 30 %, enquanto em períodos úmidos atinge aproximadamente 77 %. As temperaturas máximas registradas chegaram a 37,3 °C em determinados meses, e as mínimas situaram-se em torno de 29,3 °C, refletindo as variações sazonais típicas do clima local.

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a descrição dos procedimentos metodológicos adotados com o intuito de atingir os objetivos propostos pela pesquisa.

4.1 Classificação LCZ

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

O algoritmo de classificação de imagens exerce uma função essencial no processo de extração de informações contidas em imagens, visando à identificação de padrões espectrais homogêneos. No âmbito do sensoriamento remoto, sua aplicação tem como finalidade o mapeamento de áreas da superfície terrestre que correspondem aos temas definidos como foco da investigação (DPI/INPE, 2018). Um exemplo de sua utilização é a produção de mapas temáticos de uso e ocupação do solo.

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

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

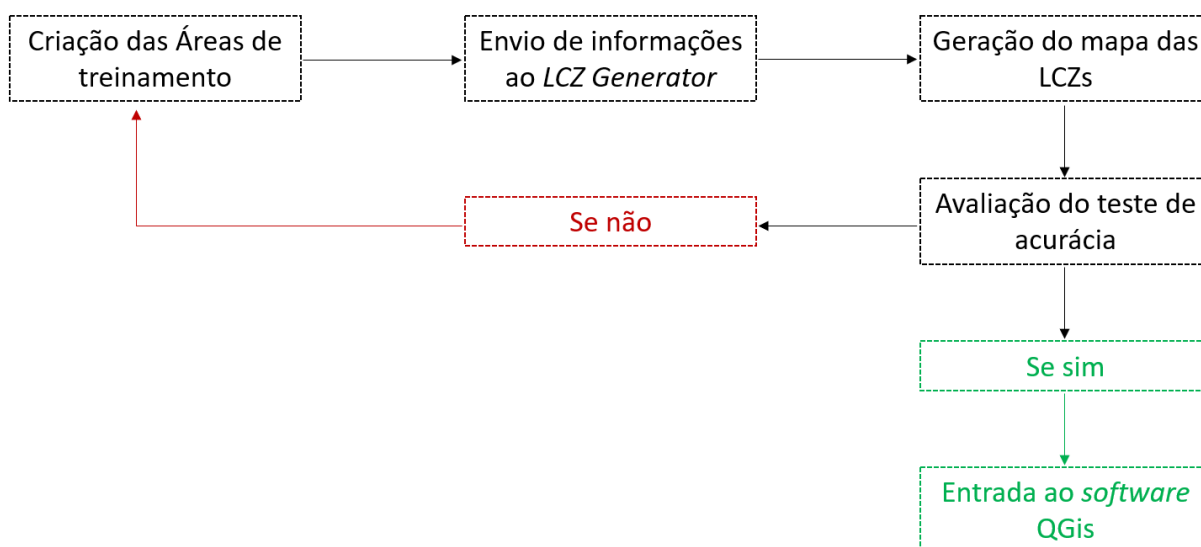
O tipo de classificação que demanda o conhecimento prévio de alguns aspectos da área é chamado de classificação supervisionada. As áreas são identificadas pelo seu padrão, a partir do qual os pixels serão comparados e classificados. Esse processo equivale à criação de áreas de treinamento para o reconhecimento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

Demuzere, Kittner e Bechtel (2021) descrevem a utilização do LCZ Generator em três etapas, contando que o conjunto de áreas de treinamento para seu classificador já tenha sido criado. Então, primeiramente, as informações pessoais e as áreas de treinamento são enviadas

por meio do aplicativo da web. Se a submissão for bem sucedida, a classificação LCZ e controle de qualidade são disparados no back-end. Na terceira etapa os resultados são enviados ao usuário via e-mail.

Nesta pesquisa, o fluxograma do método de trabalho contempla as etapas previamente descritas, além da inclusão de duas etapas adicionais. A primeira refere-se à criação das áreas de treinamento, enquanto a última corresponde à etapa de pós-classificação, conforme ilustrado na Figura 11. Esta etapa final tem como objetivo a realização de operações espaciais, cálculos estatísticos e reclassificações das Zonas de Clima Local (LCZs).

Figura 11 - Fluxograma das etapas de classificação das LCZs no LCZ Generator



Fonte: Autora, 2025

4.2 Criação das áreas de treinamento

A delimitação das áreas de treinamento constitui uma etapa essencial para assegurar a acurácia do mapeamento das Zonas de Clima Local (LCZs). Essa delimitação foi realizada com base na análise das tipologias construtivas e das coberturas do solo, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2, além dos parâmetros morfológicos descritos na Tabela 3. No contexto do mapeamento automatizado, utilizou-se um modelo padronizado de rótulos das classes principais do sistema LCZ, disponibilizado pelo World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT), para orientar a definição das áreas de treinamento no ambiente digital do Google Earth Pro. Adicionalmente, foi seguido o protocolo de digitalização de áreas de treinamento proposto pelo WUDAPT.

Contudo, estudos apontam que classificações errôneas podem ocorrer por conta da subjetividade ao discriminar as classes e da dificuldade de obtenção dos parâmetros morfológicos (DORIGAN, 2019; VERDONCK et al., 2019).

Cabe ressaltar que nem todos os parâmetros podem ser observados de forma direta, seja em levantamentos de campo ou por meio de análise remota em ambientes digitais, como o Google Earth. Para superar essas limitações, dois estudos foram particularmente relevantes no apoio à identificação visual das classes e à sua posterior delimitação no Google Earth Pro.

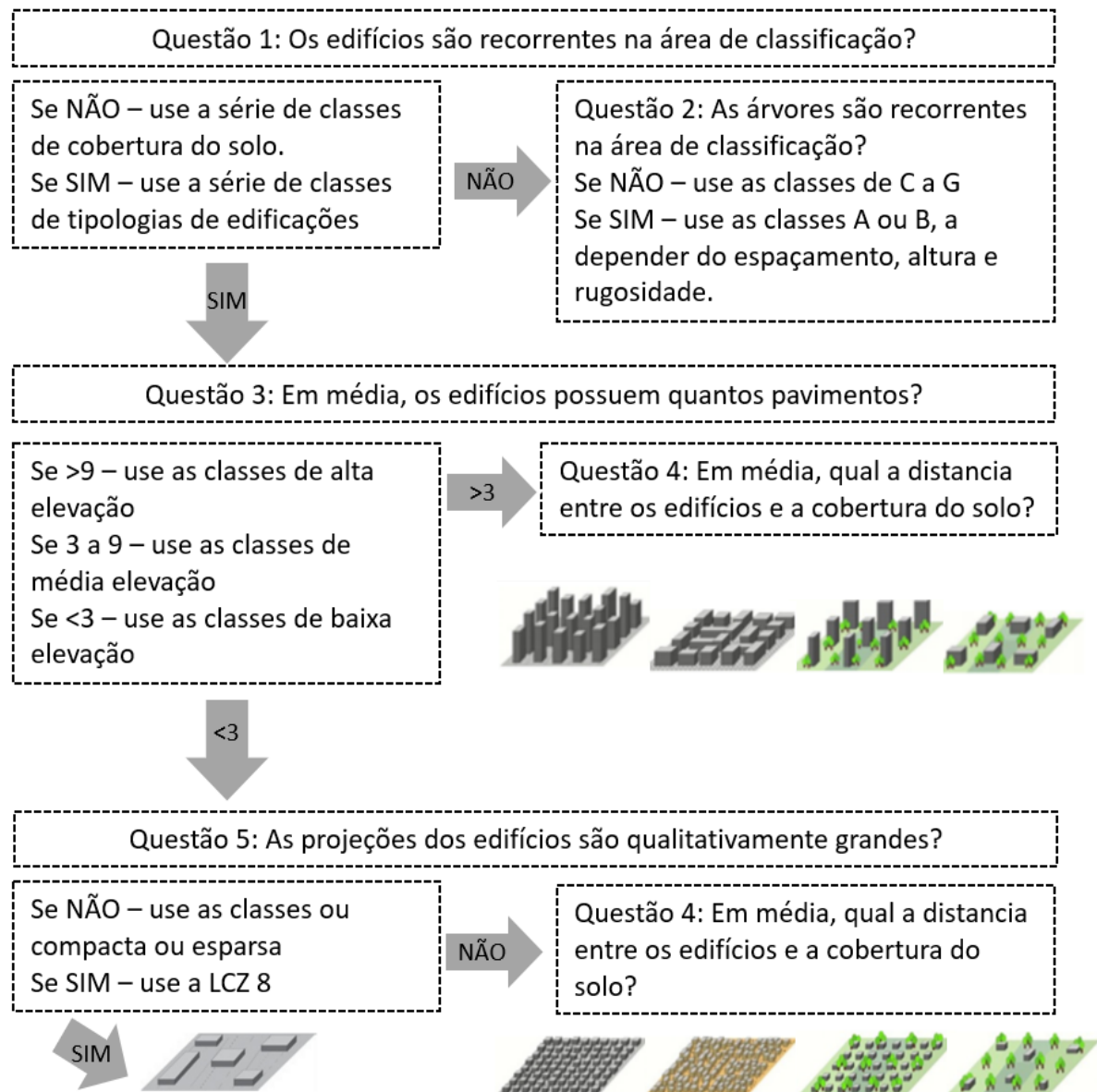
O primeiro material de apoio utilizado foi o guia de campo elaborado por Stewart (2018), desenvolvido a partir da análise de erros recorrentes na identificação das classes, especialmente no que se refere aos arranjos dos elementos urbanos e à cobertura do solo. O guia propõe uma sequência de etapas para auxiliar na identificação das áreas mais suscetíveis a equívocos, a partir da qual foi adaptado um fluxograma específico para esta pesquisa (Figura 12).

O segundo trabalho foi o do projeto HUMINEX (HUMan INfluence EXperiment), introduzido para investigar a variabilidade e qualidade das áreas de treinamentos produzidas por diferentes pesquisadores usando a metodologia do WUDAPT (VERDONCK et al., 2019).

As análises realizadas indicaram que as áreas de superfície destinadas ao treinamento estão diretamente relacionadas à representatividade espacial das zonas correspondentes a cada classe. Em casos de sub-representação, observa-se a presença de áreas de treinamento reduzidas. No entanto, essa limitação pode comprometer o desempenho do classificador automático, uma vez que a escassez de informações disponíveis sobre determinada classe pode dificultar sua correta identificação.

Dessa forma, embora o mapa final de LCZ possa incluir zonas sub-representadas, a acurácia da classificação tende a ser reduzida, conforme apontado por Verdonck et al. (2019). Os autores ressaltam, ainda, que como os mapas de LCZ têm como finalidade representar as condições do clima local, é essencial que cada zona possua dimensões suficientes para permitir tal caracterização.

Figura 12 - Fluxograma para discriminação de classes



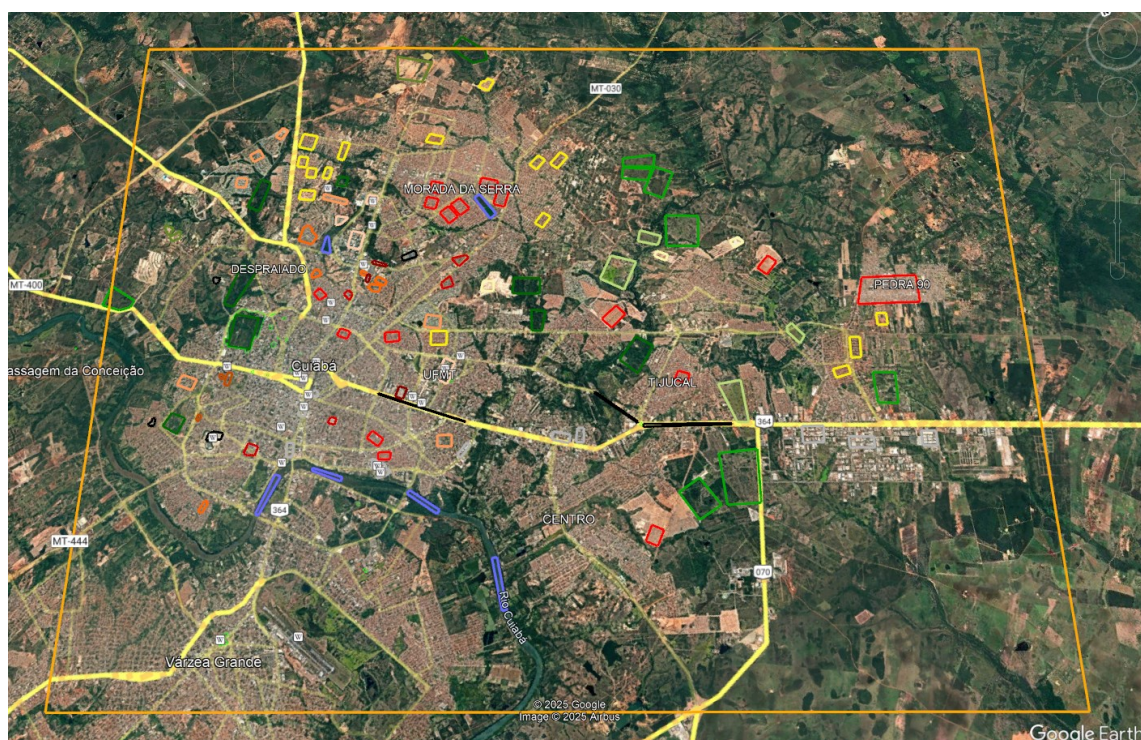
Para isso, recomenda-se que o menor lado do polígono delimitador exceda 200 metros e que a área total da zona seja superior a 1 km². Zonas com dimensões inferiores ou que estejam incorporadas a outras áreas geralmente devem ser excluídas do conjunto de áreas de treinamento, a fim de evitar prejuízos à qualidade da classificação. Portanto, a classificação seguiu três passos essenciais, sendo eles:

1. Identificação visual das classes baseado no fluxograma da Figura 12;
2. Verificação dos parâmetros morfológicos em áreas amostrais de resolução espacial de 200x200m: altura dos edifícios, rugosidade, projeção dos edifícios e área permeável. Neste passo, foi utilizado o Google Street View;

3. Na sequência, as áreas de treinamento foram digitalizadas no Google Earth Pro seguindo o protocolo do WUDAPT.

Ao final do processo, foi definida uma Região de Interesse (ROI – *Region of Interest*), a qual corresponde a um polígono de maior extensão que abrange os polígonos menores utilizados como áreas de treinamento. De acordo com as orientações de Demuzere, Kittner e Bechtel (2021), para garantir a eficiência computacional do LCZ Generator, o tamanho máximo permitido para a ROI é de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, o que equivale, aproximadamente, a uma área de 277,85 km por 277,85 km.

Figura 13 - Delimitação das áreas de treinamento dentro da ROI escolhida



Fonte: Autora, 2025.

4.2.1 Submissão dos dados de entrada

A submissão dos dados de entrada é realizada por meio de um formulário disponível na plataforma virtual do LCZ Generator (<https://lcz-generator.rub.de/>). Esse formulário requer o preenchimento de informações pessoais do responsável pela submissão, como nome e e-mail, além de dados referentes à área a ser classificada, incluindo o arquivo das áreas de treinamento, localização geográfica (cidade, país e continente), data de referência e eventuais observações relevantes ao estudo. Nessa etapa, os desenvolvedores do sistema implementaram uma série de verificações automáticas com o objetivo de garantir a consistência e a conformidade dos dados fornecidos conforme podemos verificar na figura 14.

Figura 14 - Formulário virtual do LCZ Generator

Submissão da Área de Treinamento LCZ

1. Informações pessoais

Primeiro nome *	Sobrenome *	Endereço de email *
Camila	Carvalho	camila.carvalho.s@gmail.com 

2. Informações da área de treinamento

Continente *	País *
América do Sul	Brazil, Federative Republic of
Nome da cidade *	
Cuiabá	
Carregar arquivo kmz/kml *	Data representativa das Áreas de Treinamento *
Escolher arquivo [Cuiabá MT][06-2024][Camila C.].kmz	05/06/2024 

3. Adicione informações adicionais

Referência

Referência para arquivo de área de treinamento - Forneça um DOI, se disponível - Caso contrário, forneça uma referência completa, incluindo um link que aponte para o recurso - Se não houver nenhuma referência, deixe em branco

Observações

Adicione coautores: nome, sobrenome (se houver vários, separe-os com ;) Adicione qualquer outra coisa para descrever suas áreas de treinamento

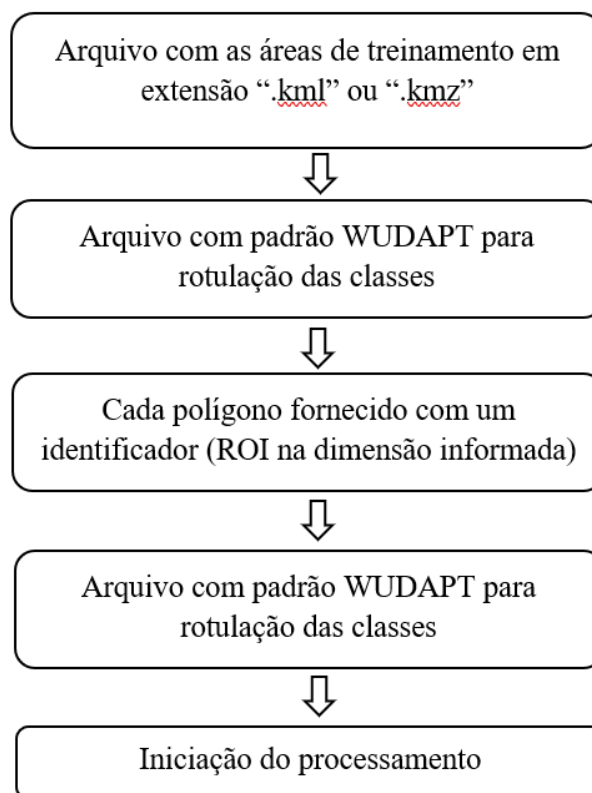
* obrigatório

- ☒ Eu concordo em mostrar meu nome na [tabela de submissão](#) e no LCZ-Factsheet ?
- ☒ Concordo com os [Termos de Serviço](#) e a [Declaração de Consentimento](#) e li as [Diretrizes de Atribuição](#) *

Fonte: LCZ Generator, 2025.

Inicialmente, o arquivo contendo as áreas de treinamento deve estar no formato “.kml” (*Keyhole Markup Language*) ou em sua versão compactada, com extensão “.kmz”. Outra verificação importante refere-se à conformidade do arquivo com o padrão estabelecido pelo WUDAPT, especialmente no que diz respeito à rotulagem correta das classes. Nessa etapa, cada polígono deve possuir um identificador específico a exemplo (LCZ 1 e a cor padrão indicada pelos autores), o qual é essencial para a realização do teste automatizado de acurácia, ou seja, o ROI deve ter o tamanho citado anteriormente. Se todas as verificações forem aprovadas, uma mensagem é retornada informando que os dados foram corretamente enviados e o processamento é iniciado.

Figura 15 - Fluxograma da submissão de dados



Fonte: Autora, adaptado de LCZ Generator

4.2.2 *Processamento da classificação: geração do mapa de LCZ*

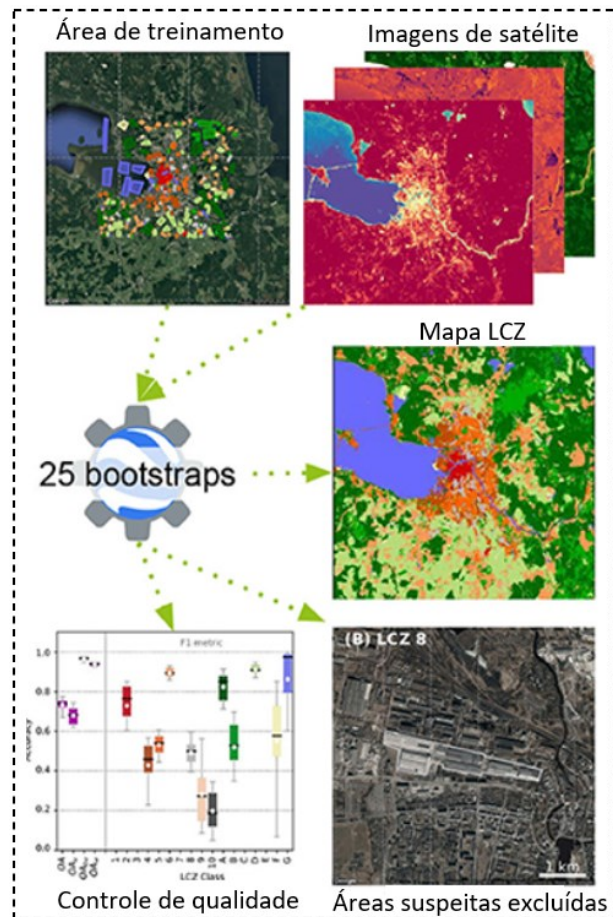
Nesta etapa ocorre o processamento da classificação e do teste de acurácia em um ambiente computacional inacessível para os usuários, pois o processamento é baseado em nuvem. Para tal, o Google Earth Engine – GEE – (GORELICK et al, 2017) foi empregado tanto pelo poder computacional, como também pelo acesso ao conjunto de imagens satelitais do Landsat e do Sentinel e algoritmos predefinidos (DEMUZERE, KITTNER e BECHTEL, 2021).

De acordo com informações de Demuzere, Kittner e Bechtel (2021), um total de 33 recursos de entrada disponíveis globalmente e armazenados de forma online no GEE estão à disposição em uma resolução espacial de 100x100m, sendo que 16 recursos são oriundos do Landsat 8, 5 recursos são do Sentinel 1, 8 recursos advém do Sentinel 2 e 4 recursos adicionais que refletem o terreno e a altura do dossel das árvores ou florestas.

Para assegurar a qualidade do mapa LCZ gerado, o controle de qualidade é uma etapa essencial. Com esse objetivo, é aplicada uma abordagem de validação cruzada automatizada baseada em 25 bootstraps (Bechtel et al., 2019). Este é um método estatístico não paramétrico de reamostragem sendo que em cada iteração, 70% dos polígonos são utilizados para treinamento e 30% para teste, sendo selecionados por amostragem aleatória estratificada por

tipo de LCZ, de modo a preservar a distribuição original das classes. Esse processo é repetido 25 vezes, permitindo a estimativa de intervalos de confiança para as métricas de acurácia. Adicionalmente, essa metodologia possibilita a geração de um mapa de probabilidade, que expressa a frequência (em %) com que o modo foi mapeado ao longo das iterações.

Figura 16 - Informações fornecidas e geradas pelo LCZ Generator



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

Como saída de processamento, o principal dado é o mapeamento digital de LCZs em resolução espacial de 100x100m. Somado a isso, foi enviado por e-mail também descrições básicas das áreas de treinamento como quantidade e áreas dos polígonos, gráfico boxplot e teste de acurácia, sob os quais é possível inferir informações, como classe com predominância de ocorrência na área mapeada.

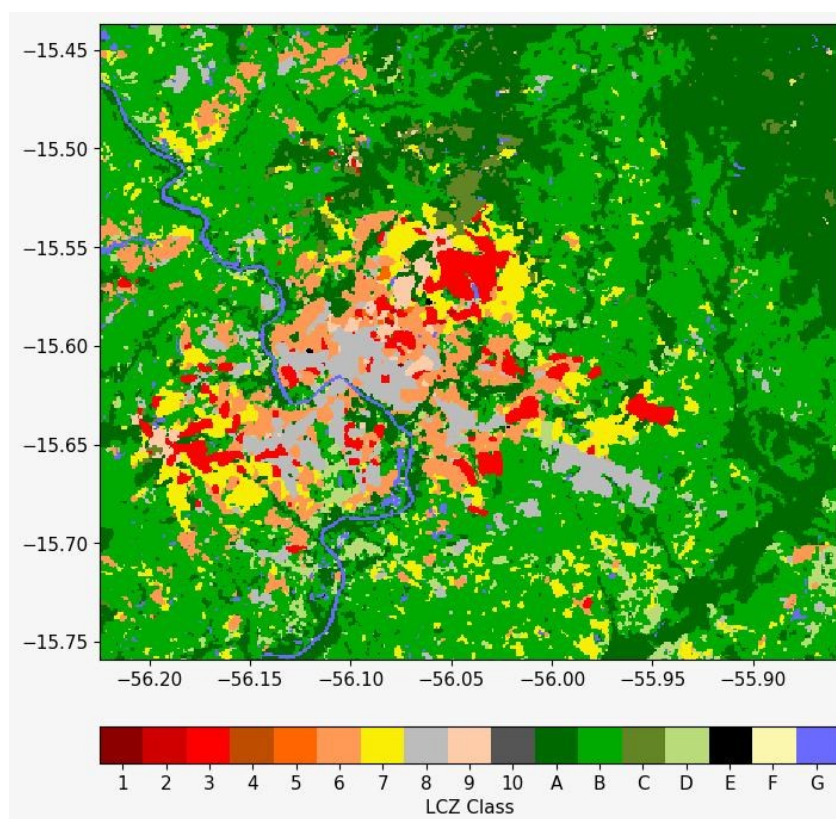
4.2.3 Mapas das LCZ e análise da acurácia

Os dados processados pelo LCZ Generator são recebidos nesta etapa em uma pasta compactada pelos seguintes arquivos:

1. Página da internet com resumo dos resultados .html
2. Mapeamento de LCZs – resolução 100 x 100 metros) .tif
3. Áreas de treinamento submetidas .kml
4. Estatística básica das áreas de treinamento .csv
5. Controle de qualidade dos polígonos das áreas de treinamento .shp
6. Figura da frequência das áreas de treinamento por classe .png
7. Figura do mapa de LCZs (versão com filtro) .jpg
8. Figura dos boxplots de acurácias .jpg

Em posse dos resultados, avalia-se o mapa de LCZ e os valores da acurácia de acordo com a porcentagem de pixels classificados corretamente. Os valores são divididos em: acurácia geral (OA); acurácia geral para classes urbanas (OAu); acurácia geral para classes urbanas versus naturais (OAbu) e acurácia ponderada (OAw). WERNECK (2022).

Figura 17 - Distribuição espacial das LCZ sobre a ROI com referência ao ano de 2004



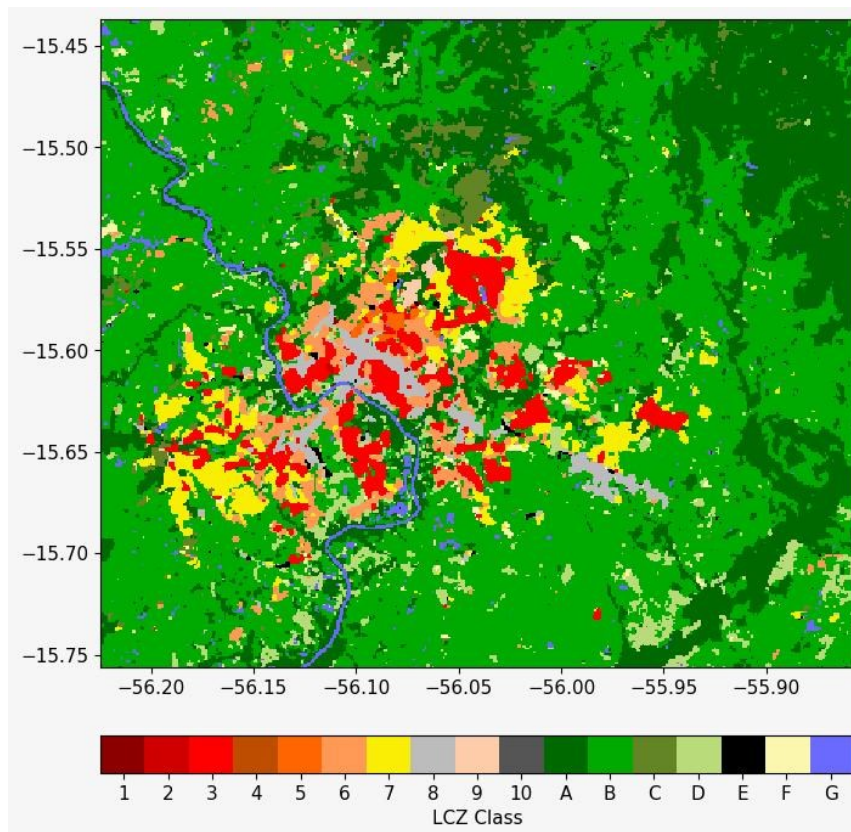
Fonte: Gerado pelo LCZ Generator, 2025.

A ROI foi composta pelo município de Cuiabá e uma porção do município de Várzea Grande uma vez que a ROI deve ter o formato retangular, impedindo a exclusão da porção do município vizinho. Além disso, no mapa gerado pelo *LCZ Generator* possui dados espaciais de

Várzea Grande pelo fato de também ser uma região urbanizada muito próxima ao município de interesse dessa pesquisa.

Para o ano de 2004, as áreas de treinamento produzidas na classificação do município totalizaram 46 polígonos e um quantitativo de área treina da com 24,84km². Para o ano de 2024, as áreas de treinamento produzidas na classificação do município totalizaram 51 polígonos e um quantitativo de área treinada com 29,91km².

Figura 18 - Distribuição espacial das LCZ sobre a ROI com referência ao ano de 2024



Fonte: Gerado pelo LCZ Generator, 2025.

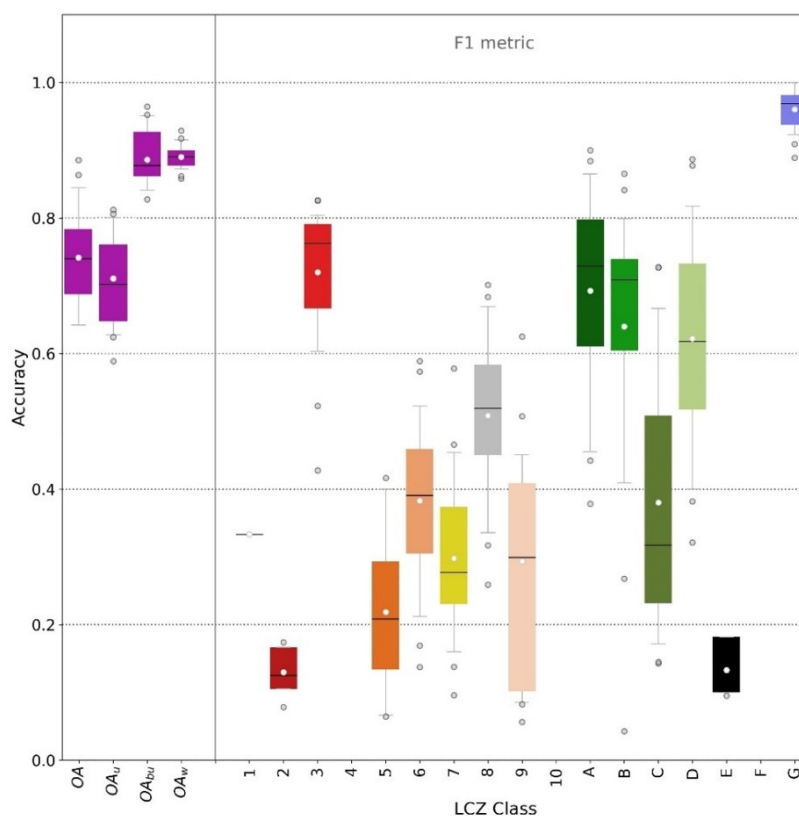
De posse dos documentos enviados, foi avaliado se o mapa de LCZ gerado estava condizente com a área de estudo e também se os valores de acurácia geral estavam acima de 70%, parâmetro escolhido na pesquisa para corte de resultados (DEMUZERE; KITTNER, BECHTEL; 2021; WERNECK, 2023)

Entre os arquivos de resultado, há uma figura com boxplots que representam os intervalos de todas as métricas de acurácia, inclusive discriminadas por classe LCZ. Essa visualização permite identificar quais classes apresentaram melhor ou pior desempenho, facilitando a avaliação da qualidade do modelo e a decisão sobre a necessidade de aprimoramento do processo ou a aceitação dos resultados obtidos de acordo com a Figura 12.

Para obtenção de resultados satisfatórios foram feitas 14 tentativas para o ano de 2004 e 29 tentativas para o ano de 2024, sendo que as 5 primeiras tentativas foram feitas para entendimento dos resultados fornecidos pelo LCZ Generator recebidos via e-mail. Após a devolutiva dos resultados pretendidos, foram feitas outras 4 submissões diversificando os polígonos com a intenção de refinar os resultados.

A delimitação das áreas de treinamento se iniciou com o ano de referência de 2024 pelo fato de a paisagem urbana já ter se modificado em relação ao ano de 2004 e assim apresentou maior assertividade quanto aos anos de análise.

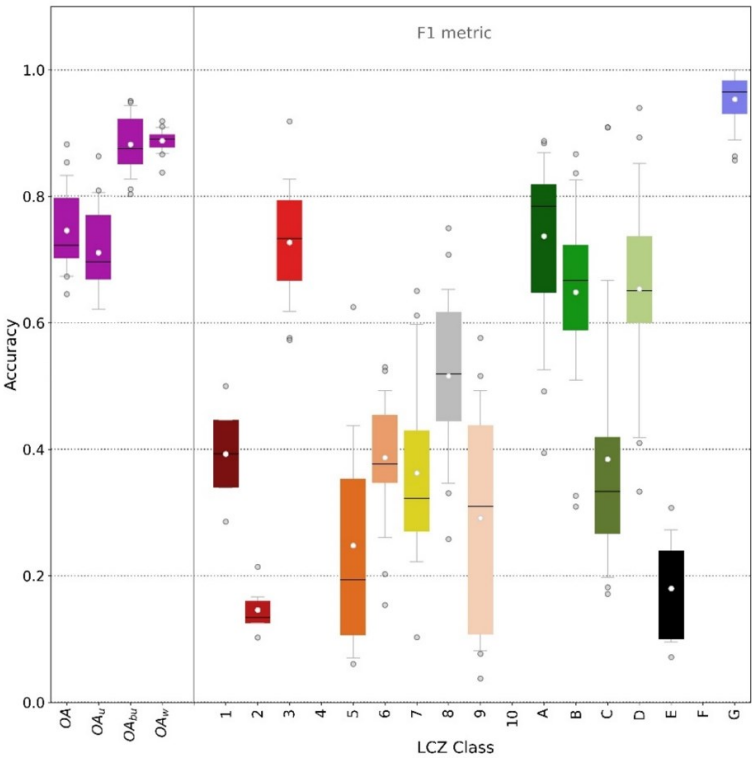
Figura 19 - Resultados da acurácia classificada por cada LCZ referente ao ano de 2004



Fonte: Gráfico criado pelo *LCZ Generator*

De acordo com a estatística de acurácia do ano de 2004 e do ano de 2024 podemos analisar alterações da paisagem urbana do município de Cuiabá, assim como os mapas criados pelo *LCZ Generator*.

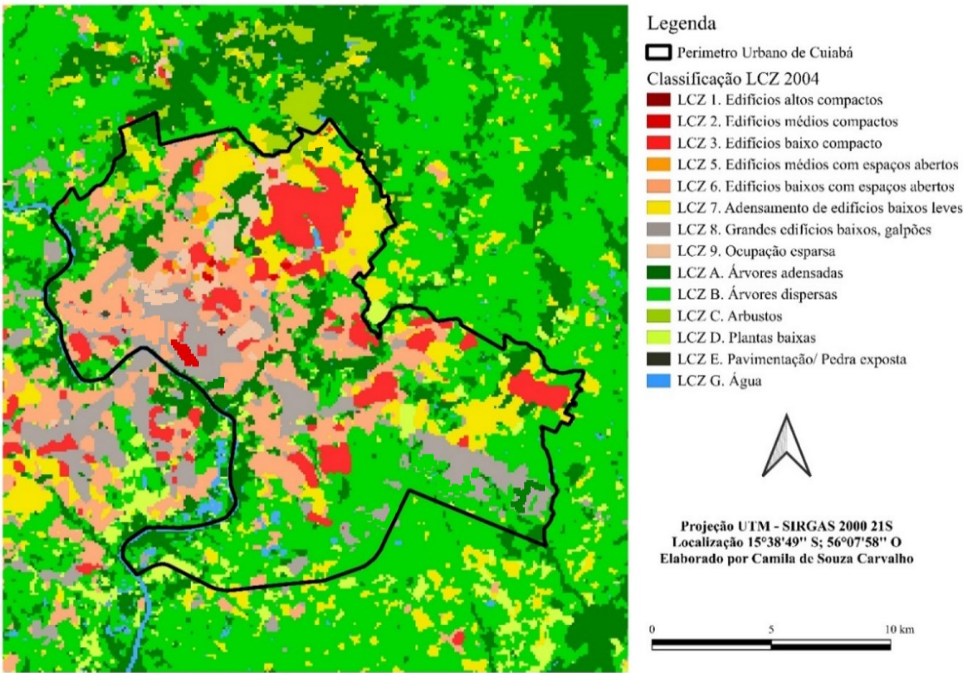
Figura 20 - Resultados da acurácia classificada por cada LCZ referente ao ano de 2024



Fonte: Gráfico criado pelo *LCZ Generator*

A distribuição espacial das LCZs sobre a Macrozona Urbana do município de Cuiabá, gerada pelo LCZ Generator, é apresentada nas figuras abaixo, correspondentes aos anos de 2004 e 2024, respectivamente.

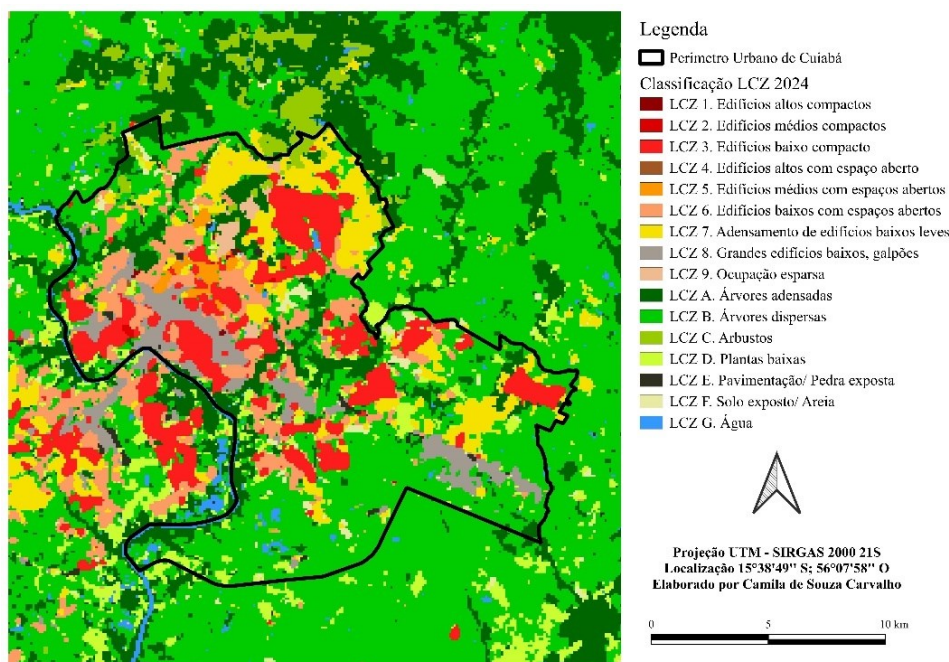
Figura 21 – Distribuição espacial das classes LCZ sobre a classificação do ano de 2004



Fonte: Programa LCZ Generator e adaptado no QGIS pela autora

É importante destacar que a classificação foi realizada considerando o município de Cuiabá, conforme a delimitação estabelecida nos mapas adaptados no QGIS. No entanto, na entrega dos resultados, uma porção da Macrozona Urbana de Várzea Grande foi incluída, uma vez que o LCZ Generator não dispõe de funcionalidades para excluir áreas adjacentes aos limites da região de interesse.

Figura 22 - Distribuição espacial das classes LCZ sobre a classificação do ano de 2024



Fonte: Programa LCZ Generator e adaptado no QGIS pela autora

4.2.4 Pós classificação – delimitação da área de estudo

A ROI (Região de Interesse) foi inicialmente definida por uma área maior do que a necessária para os objetivos desta pesquisa, conforme ilustrado na Figura 13. Para ajustar essa área ao escopo da pesquisa, utilizou-se o software gratuito QGIS (versão 3.36.2), com referência ao sistema de coordenadas SIRGAS 2000 - UTM Zona 21S, sobre os limites do município de Cuiabá. Este recorte espacial permitiu a delimitação da área de estudo, fundamental para as análises que embasarão os resultados desta pesquisa.

Após a obtenção e análise dos dados fornecidos pelo programa LCZ Generator, o mapa de classificação gerado foi importado para o QGIS. A camada do mapa foi configurada de acordo com as necessidades específicas da análise, permitindo uma visualização clara e precisa da região de interesse. As imagens resultantes desse processo estão representadas nas Figuras 21 e 22.

4.3 Coleta de dados de Sensoriamento Remoto

As imagens de satélite utilizadas nesta pesquisa foram obtidas gratuitamente por meio do portal do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Considerando o intervalo temporal do estudo e a necessidade de comparar diferentes períodos, foram empregadas imagens provenientes de dois sensores distintos: o Landsat 5 – Thematic Mapper (TM) e o Landsat 8 – Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS), ambos correspondentes à órbita 226 e ponto 71, que abrangem o município de Cuiabá (MT).

O processo de seleção das imagens no sistema EarthExplorer envolveu a inserção de informações geográficas e critérios específicos, como o intervalo de datas, a localização geográfica sendo latitude -15.5989 e longitude -56.0949, o satélite e sensor de origem, além de um limite máximo de nebulosidade de 10%, conforme recomendações metodológicas apresentadas por Lima (2023). Assim, foi selecionada uma imagem do Landsat 5/TM referente a 21 de junho de 2004, registrada às 13h27min01s (horário local), e outra do Landsat 8/OLI-TIRS, datada de 12 de junho de 2024, registrada às 13h44min25s (horário local). Ambas pertencem à Coleção 2, Nível 1, que apresenta melhorias significativas nos processos de correção geométrica, calibração radiométrica e refinamento do alinhamento interbanda, assegurando maior precisão nos resultados obtidos.

As bandas espectrais utilizadas nesta pesquisa foram selecionadas com base na literatura técnica e científica, considerando a adequação das mesmas para o cálculo da Temperatura de Superfície da Terra (TST) e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

No caso do Landsat 5/TM, as bandas espectrais abrangem sete faixas do espectro eletromagnético, das quais foram utilizadas:

- Banda 3 (vermelho), com intervalo espectral de 0,63 a 0,69 μm e resolução espacial de 30 metros, sensível à absorção pela clorofila, sendo ideal para avaliar o vigor da vegetação;
- Banda 4 (infravermelho próximo – NIR), com intervalo de 0,76 a 0,90 μm e resolução espacial de 30 metros, que reflete intensamente a radiação nas áreas com vegetação densa, sendo essencial para o cálculo do NDVI;
- Banda 6 (termal), abrangendo 10,4 a 12,5 μm , com resolução original de 120 metros, reamostrada para 30 m nos produtos da Coleção 2, utilizada para a estimativa da TST, pois capta a radiação térmica emitida pela superfície terrestre.

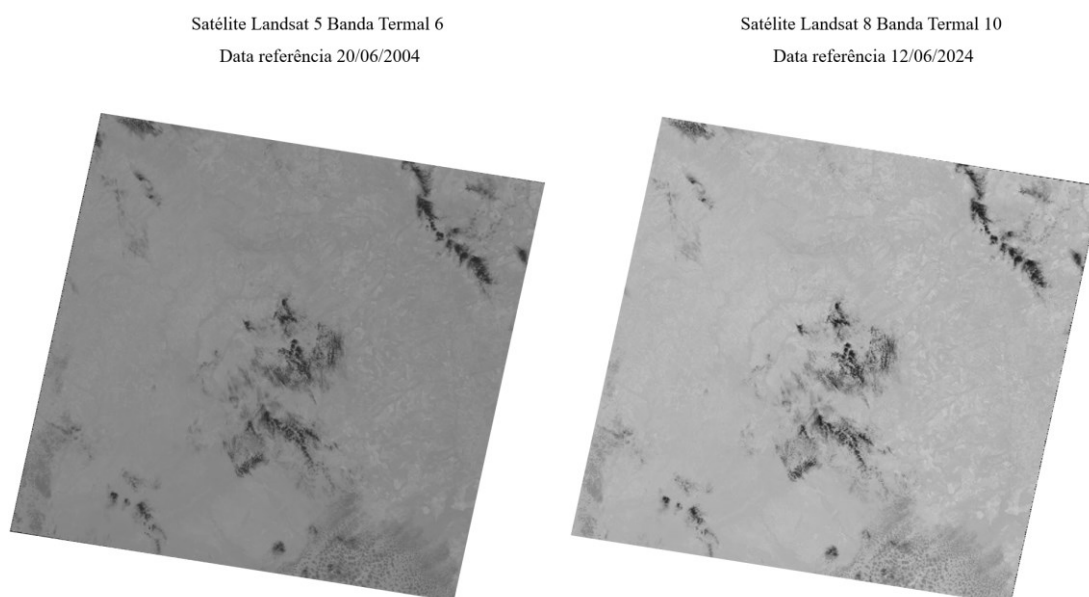
No Landsat 8/OLI-TIRS, as bandas possuem aprimoramento radiométrico e maior capacidade de discriminação espectral, permitindo análises mais precisas:

- Banda 4 (vermelho), com intervalo espectral de 0,64 a 0,67 μm , utilizada para representar a reflectância em regiões de alta absorção pela clorofila;
- Banda 5 (infravermelho próximo – NIR), com intervalo de 0,85 a 0,88 μm , empregada em conjunto com a Banda 4 para o cálculo do NDVI;
- Banda 10 (termal infravermelha 1 – TIRS 1), que cobre o intervalo de 10,60 a 11,19 μm , sendo a principal utilizada para o cálculo da temperatura de superfície devido à sua estabilidade radiométrica e menor interferência atmosférica;
- Banda 11 (termal infravermelha 2 – TIRS 2), com intervalo espectral de 11,50 a 12,51 μm , utilizada como apoio e para verificação de consistência dos valores obtidos pela Banda 10, conforme recomendação do USGS (2024).

Conforme já mencionado o NDVI foi calculado a partir da razão normalizada entre as refletâncias do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED). Valores próximos de +1 indicam alta densidade de vegetação, enquanto valores próximos de 0 ou negativos representam áreas urbanizadas, corpos d'água ou superfícies desprovidas de cobertura vegetal.

Já a Temperatura de Superfície da Terra (TST) foi derivada a partir da radiância espectral das bandas termais, convertida para temperatura em Kelvin e posteriormente ajustada para Celsius, considerando emissividade da superfície e constantes de calibração específicas de cada sensor.

Figura 23 - Imagens Satelitais extraídas do USGS



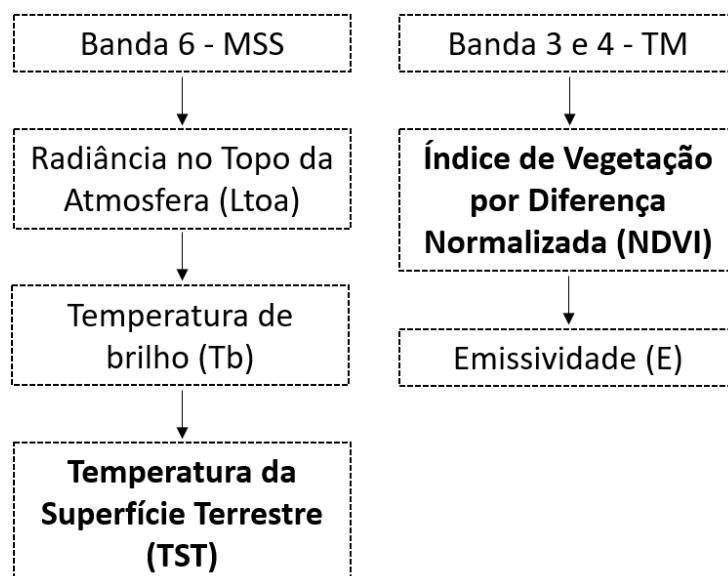
Fonte: Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS)

A escolha das bandas e sensores foi fundamentada nas recomendações do *U.S. Geological Survey (USGS, 2024)*, bem como em referências clássicas de sensoriamento remoto como Jensen (2009) e Chander, Markham e Helder (2009), que destacam a confiabilidade e a consistência das bandas TM e OLI/TIRS na análise de parâmetros biofísicos e microclimáticos. Assim, a combinação das bandas ópticas e termais permitiu uma análise integrada entre os padrões de cobertura vegetal e a distribuição térmica na área urbana de Cuiabá, evidenciando as variações espaciais do microclima e os efeitos do processo de urbanização ao longo do tempo.

4.3.1 Processamento das imagens: cálculo da TST e do NDVI do Landsat 5

A seguir, apresenta-se um fluxograma com as etapas de cálculo na Figura 24. Cada uma das etapas é detalhada, considerando que as bandas 3, 4 e 6 foram utilizadas como arquivos de entrada no procedimento metodológico adotado nesta pesquisa.

Figura 24 - Fluxograma de cálculos da TST e do NDVI – Landsat 5



Fonte: Adaptado de Tonioli, 2024

I. Radiância no Topo da Atmosfera:

O sensor infravermelho do Landsat 5 MSS capta a intensidade da radiação emitida pela superfície terrestre. Esse valor corresponde à chamada radiância aparente, pois sofre interferências da atmosfera e de elementos ao redor. No próprio sensor, esses dados são transformados em Números Digitais (DN), distribuídos em diferentes faixas de amplitude (SANTOS et al., 2014).

Após a obtenção das imagens de satélite, o primeiro processo é converter os DN em radiância (NDOSSI e AVDAN, 2016). Para o tratamento da imagem infravermelha termal, os números digitais da banda termal 6 foram convertidos para radiância espectral do topo da atmosfera (L_{toa}), conforme Equação 1.

A estimativa da TST foi realizada a partir da banda termal (banda 6) do Landsat 5 TM, seguindo três etapas principais: conversão de DN em radiância espectral, cálculo da temperatura de brilho e, por fim, correção da emissividade superficial.

A conversão dos valores digitais em radiância espectral no topo da atmosfera (L_{toa}) foi realizada por meio da equação disponibilizada pela USGS:

$$L_{toa} = \left(\frac{L_{m\acute{a}x} - L_{m\acute{i}n}}{Q_{calm\acute{a}x} - Q_{calm\acute{i}n}} \right) \times (Q_{cal} - Q_{calm\acute{i}n}) + L_{m\acute{i}n} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

1. L_{toa} : radiância espectral no topo da atmosfera;
2. $L_{m\acute{a}x}$: radiância espectral máxima;
3. $L_{m\acute{i}n}$: radiância espectral mínima;
4. $Q_{calm\acute{a}x}$: valor máximo que o Q_{cal} pode atingir;
5. $Q_{calm\acute{i}n}$: valor mínimo que o Q_{cal} pode atingir.
6. Q_{cal} = valor digital da imagem.

Com exceção do Q_{cal} que corresponde aos valores digitais da própria imagem da Banda 6, as demais variáveis presentes na fórmula representam parâmetros de calibração e foram extraídas do arquivo de metadados, fornecido junto com as imagens digitais. (TONIOLI, 2024).

Para facilitar a identificação e coleta dessas variáveis, é necessário fazer o download completo da cena no formato .ZIP ou .TAR, disponível no portal do USGS após a inserção dos dados citados acima. As bandas espectrais estão nomeadas com a extensão .TIF, sendo possível identificar a Banda 6 diretamente pelo seu número.

O arquivo de metadados, por sua vez, possui a terminação .MTL.txt e contém as informações necessárias para o cálculo da radiância espectral, incluindo os coeficientes de multiplicação e adição. Para esta pesquisa, os valores constantes obtidos foram os seguintes:

- a) $L_{m\acute{a}x}$: 15.303 (RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6)
- b) $L_{m\acute{i}n}$: 1.238 (RADIANCE_MINIMUM_BAND_6)
- c) $Q_{calm\acute{a}x}$: 255
- d) $Q_{calm\acute{i}n}$: 1

II. Temperatura de brilho (Tb)

A temperatura de brilho no sensor ou temperatura radiante assume que a Terra é um corpo negro, isto é, com emissividade igual a 1, e inclui efeitos atmosféricos como absorção e outras emissões ao longo do caminho da superfície-sensor (SANTOS et. al., 2014).

Essa radiância é inserida na equação inversa da Lei de Planck, fornecida pelo USGS com as constantes de calibração K_1 e K_2 :

$$T_B = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_{toa}} + 1 \right)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Tb: temperatura de brilho no sensor, medido em Kelvin (K);

Ltoa: radiância espectral no topo da atmosfera;

Ln: logaritmo natural

k1: constante de calibração 1;

k2: constante de calibração 2;

De acordo com Ghulam (2010), os valores de calibração k_1 e k_2 para o sensor TM do Landsat 5 correspondem, respectivamente, a 607,76 e 1.260,56. Esses valores puderam ser confirmados no arquivo de metadados (*MTL*) disponibilizado junto às imagens do satélite.

III. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

Os índices de vegetação representam a atividade fotossintética da vegetação com variações estruturais do dossel (MARION, et. al., 2021). O NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, é considerado um dos índices analíticos mais antigos em sensoriamento remoto e continua sendo o mais amplamente usado para avaliação da vegetação, devido à sua capacidade de ser calculado por meio de qualquer sensor multiespectral com bandas visível e infravermelho próximo (HUANG et al., 2021).

Conforme citado anteriormente, o cálculo do NDVI baseia-se na reflexão da luz em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético, utilizando principalmente as bandas do vermelho e do infravermelho próximo (NIR).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

NIR é o valor da reflectância no infravermelho próximo (para Landsat 5, corresponde à banda 4); RED é o valor da reflectância na banda do vermelho (para Landsat 5, corresponde à banda 3).

IV. Emissividade

Emissividade é a razão entre a radiação emitida por um objeto e a radiação emitida por um emissor perfeito. Quanto maior a emissividade, mais rápido uma superfície, como o solo, esfria à noite. Albedo (ou refletividade) é a razão entre a radiação refletida e a radiação incidente. (JACOBSON, 2005).

No mundo real, um material que satisfaz as propriedades de um corpo negro perfeito não existe. Como resultado disso, há a necessidade de fazer a correção da E ao calcular a TST (TONIOLI, 2024).

Conforme Van de Griend et. al. (1992), a relação entre emissividade e o NDVI pode ser expresso pela Equação abaixo, quando o valor do NDVI varia de 0,157 para 0,727. Essa é uma expressão empírica que relaciona a emissividade efetiva (E) à variabilidade do NDVI usando o logaritmo natural ($\ln$) do NDVI.

$$E = 1,0094 + 0,047 \times \ln(NDVI) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

E representa a emissividade da superfície terrestre;

$\ln$ é o logaritmo natural do NDVI;

Os coeficientes 1,0094 e 0,047 foram determinados por ajuste estatístico com base em dados experimentais ou simulações.

Para as áreas cujo valor de NDVI esteja fora da faixa de 0,157 a 0,727, os pixels são classificados em cinco intervalos distintos, de acordo com o tipo de cobertura do solo. Cada intervalo é associado a um valor típico de emissividade, que pode ser atribuído manualmente

por meio da interface do software SIG (BASTIAANSEN et al., 1998). Um exemplo de classificação frequentemente utilizada na literatura é o seguinte:

Tabela 7 - Faixas de NDVI e valores de emissividade atribuídos

Faixa de NDVI	Tipo de cobertura	Emissividade (ϵ)
$NDVI < 0,0$	Superfícies de água	0,990
$0,0 \leq NDVI < 0,157$	Solo exposto	0,970
$0,157 \leq NDVI \leq 0,727$	Cálculo via relação logarítmica	Variável
$0,727 < NDVI \leq 0,900$	Vegetação densa	0,985
$NDVI > 0,900$	Vegetação extremamente densa	0,990

Fonte: Adaptado de Bastiaansen et al. (1998).

V. Temperatura da Superfície Terrestre (TST)

Segundo Li et al (2013), a TST é um dos parâmetros mais importantes nos processos físicos de energia superficial, uma vez que funciona como a força motriz direta na troca de radiação de ondas longas e fluxos de calor turbulentos na interface superfície-atmosfera. Nesse contexto, a temperatura da superfície terrestre pode ser utilizada em diferentes estudos, como: ciclo hidrológico, evapotranspiração, monitoramento da vegetação, clima urbano, entre outros.

A equação 5 é empregada para converter a temperatura de brilho (T_b) em Temperatura de Superfície da Terra (TST), levando em consideração a emissividade da superfície (ϵ) e realizando a conversão de Kelvin para Celsius ao final por meio da subtração de 273,15.

$$TST = \frac{T_B}{1 + \left(\frac{\lambda \cdot T_B}{\rho} \right) \ln(\epsilon)} - 273,15 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

TB: Temperatura de Brilho (em Kelvin), obtida a partir da radiância medida pelo sensor.

λ : comprimento de onda central da banda termal 6, para Landsat 5 é aproximadamente 11,5

ρ : constante física, definida como $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{ mk}$ proveniente de a: $(h \times c / \sigma)$ onde:

h: constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$);

c: velocidade da luz ($2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$);

σ : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$);

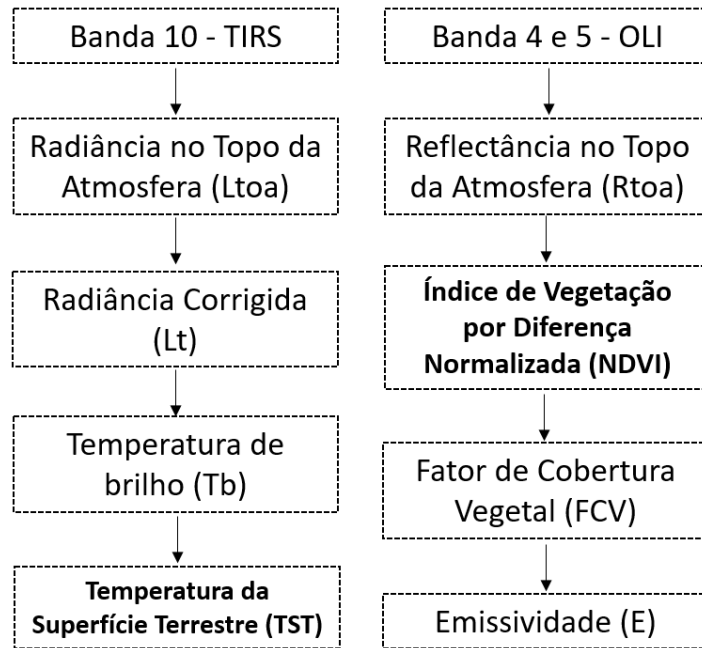
E: emissividade da superfície (valor entre 0 e 1).

273,15: é o valor para converter Kelvin para graus Celsius.

4.3.2 Processamento das imagens: cálculo da TST e do NDVI do Landsat 8

Assim como realizado para os dados da série Landsat 5, as etapas de processamento dos dados do Landsat 8 foram organizadas e descritas no fluxograma a seguir. No entanto, diferentemente da análise referente ao ano de 2004, o procedimento metodológico utilizou as bandas 4, 5 e 10 como arquivos de entrada.

Figura 24 – Fluxograma de cálculos da TST e do NDVI – Landsat 8



Fonte: Adaptado de Tonioli, 2024

I. Radiância no Topo da Atmosfera (Ltoa)

Na imagem termal infravermelha, os Números Digitais (NDs) da banda 10 foram transformados em valores de radiância espectral no topo da atmosfera (Ltoa). A fórmula utilizada é fornecida pelo USGS (2022), enquanto os parâmetros necessários constantes, fator multiplicativo e fator de redimensionamento, foram extraídos do arquivo de metadados da respectiva cena.

$$L_{toa} = M_L \times Q_{cal} + A_L$$

Equação 6

Onde:

Ltoa: radiância espectral no topo da atmosfera;

ML: Coeficiente multiplicativo de redimensionamento da banda 10;

Qcal: valor digital de cada pixel da banda 10;

AL: Coeficiente de redimensionamento aditivo específico da banda 10.

Para obter os coeficientes ML e AL presentes na equação bastam acessar o arquivo de metadados da imagem coletada e identificar os itens “RADIANCE_MULT_BAND_10” e “RADIANCE_ADD_BAND_10”.

Onde:

ML: 0.00033420

AL: 0,10000

II. Refletância no Topo da Atmosfera (Rtoa)

As imagens obtidas por sensores orbitais estão sujeitas a interferências atmosféricas. Como esses sensores registram dados sob diferentes condições de geometria, ângulo de visada e iluminação, é fundamental compreender de que forma essas variáveis influenciam as respostas espectrais dos alvos na superfície terrestre. Alterações nos ângulos zenitais e azimutais, tanto da radiação solar incidente quanto do próprio sensor, podem comprometer a comparabilidade entre imagens adquiridas em distintos períodos (JENSEN, 2009). Dessa forma, as bandas 4 e 5 utilizadas no cálculo da reflectância no topo da atmosfera foram submetidas a correções de reflectância, seguindo a Equação 7 disponibilizada pela USGS.

$$R_{toa} = \frac{ML \times Q_{cal} + AL}{\sin(\theta_{sol})} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

Rtoa: refletância no topo da atmosfera;

ML: fator multiplicativo de redimensionamento para a banda 4 e banda 5, ,

Sendo:

ML – banda 4: 0,00005 - REFLECTANCE_MULT_BAND_4

ML – banda 5: 0,00005 - REFLECTANCE_MULT_BAND_5

Qcal: número digital de cada pixel da banda 4 e banda 5;

AL: fator de redimensionamento aditivo para a banda 4 e banda 5,

sendo:

AL – banda 4: $-0,100000 - \text{REFLECTANCE_ADD_BAND_4}$

AL – banda 5: $-0,100000 - \text{REFLECTANCE_ADD_BAND_5}$

e: Elevação do ângulo solar, encontrado no arquivo de metadados da imagem, correspondente ao valor de 45,24065061- $\text{SUN_ELEVATION} = 41.41851432$

Os coeficientes analisados foram obtidos a partir do mesmo protocolo de coleta de dados adotado para o ano de 2004, utilizado nas imagens do satélite Landsat 5. Para o ano de 2024, a coleta foi realizada com base nos metadados orbitais e radiométricos das imagens adquiridas no mês de junho pelo satélite Landsat 8, assegurando a comparabilidade temporal entre os períodos. Essa abordagem considera a resolução espacial de 30 metros, a resolução radiométrica aprimorada do Landsat 8 e a consistência temporal das órbitas, permitindo maior confiabilidade na análise multitemporal dos coeficientes.

III. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O cálculo do NDVI foi igualmente realizado por meio da Equação 1. No entanto, para as imagens do Landsat 8, a Banda 5 corresponde ao intervalo do infravermelho próximo, enquanto a Banda 4 representa a faixa do vermelho.

IV. Fator de Cobertura Vegetal (FCV)

O Fator de Cobertura Vegetal (FCV) corresponde à fração do solo efetivamente recoberta por vegetação verde em determinada área, sendo obtido a partir da normalização dos valores de NDVI entre as condições de solo exposto e de vegetação densa.

De acordo com Barbosa et. Al. (2017). Esse índice, com valores variando entre 0 (ausência de cobertura vegetal) e 1 (cobertura total), constitui um parâmetro biofísico relevante para a caracterização da superfície terrestre. Sua aplicação é fundamental na melhoria da interpretação dos resultados do NDVI, além de contribuir para a compreensão da relação entre cobertura vegetal e Temperatura de Superfície Terrestre (TST), visto que áreas com maior FCV tendem a apresentar temperaturas mais amenas em função do sombreamento e da evapotranspiração, enquanto áreas com baixo FCV estão associadas a temperaturas mais elevadas. Esse fator foi cálculo pela equação abaixo.

$$FCV = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

FCV: fator de cobertura vegetal;

NDVI: índice de vegetação por diferença normalizada;

NDVImín: representa o valor mínimo do NDVI, associado ao solo exposto;

NDVImáx: corresponde ao valor máximo do NDVI, associado a áreas com vegetação densa.

Essa formulação linear é amplamente adotada em estudos de sensoriamento remoto, como os realizados por Lima (2023) e Barbosa et al. (2017), que utilizam essa abordagem para estimar a cobertura vegetal e sua relação com variáveis ambientais.

V. Emissividade Efetiva (E)

Corresponde a uma forma de calcular a emissividade efetiva (E) da superfície terrestre considerando uma mistura de vegetação e solo exposto.

$$E = (E_v \cdot FCV) + E_g (1 - FCV) (1 - 1,74 FCV) + 1,7372 FCV (1 - FCV) \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

E: emissividade efetiva;

FCV: fator de cobertura vegetal;

Ev: emissividade referente a vegetação, assumida em 0,985;

Eg: emissividade do solo, definida como 0,96.

VI. Radiância Corrigida (Lt)

Para cálculo da temperatura superficial, a radiância espectral deve ser corrigida atmosféricamente a partir dos valores de transmissividade atmosférica, radiância emitida e recebida pela superfície. Até janeiro de 2024 os dados eram obtidos através de uma calculadora nomeada como “Atmospheric Correction Parameter Calculator” fornecida pelo site da Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica (NASA). Essa ferramenta foi substituída pela ferramenta “Coupled Ocean–Atmosphere Radiative Transfer Model - COART”.

No âmbito metodológico, utilizou-se a calculadora de radiância e transmitância para atmosfera/oceano disponibilizada pelo portal da NASA. Para a devida parametrização do modelo, foram inseridas as informações correspondentes à cena analisada, incluindo comprimento de onda, saída em TOA e superfície, a data de aquisição (dia, mês, ano e dia juliano) e o horário exato de captura (hora e minuto), o modelo atmosférico.

Complementarmente, foram informadas as coordenadas geográficas da área de interesse, expressas em latitude e longitude. Após a submissão, a ferramenta processou os dados e disponibilizou os resultados através da WEB.

Tabela 8 - Dados inseridos na ferramenta COART

Ferramenta para coleta	Dados remetidos
Comprimento de onda	10.6 (TIRS – Banda 10)
Saída (resultado)	TOA, Surface
Dia Juliano	2460481
GMT (hora)	13.44
Latitude	-15.596
Longitude	-56.097
Modelo Atmosférico	Tropical
Modelo de Aerosol	Tropospheric typical
Nuvens	Sem

Fonte: Metadados fornecidos pelo Serviço Geológico dos EUA, 2025.

A ferramenta COART, disponibilizada pela NASA, permite realizar a correção atmosférica no cálculo da temperatura da superfície terrestre. Isso é possível porque ela fornece, com base nos dados inseridos, informações sobre a quantidade de radiação que atravessa a atmosfera, quanto é emitido por ela e quanto efetivamente atinge a superfície. Dessa forma, as variáveis utilizadas para a obtenção dos resultados foram:

- a) Ls: radiância emitida pela superfície ou emergente da superfície; UP0,85
- b) Ld: radiância recebida pela superfície ou descendente; DOWN 0,88
- c) t: transmissividade da atmosfera. 1,20

Figura 25 - Tela de inserção dos dados para cálculos de TST e NDVI - Landsat 8

Coupled Ocean and Atmosphere Radiative Transfer (COART)

This is a tool for you to calculate radiance and irradiance (flux) at any levels in the atmosphere and ocean. Specify the inputs simply by clicking the buttons and changing the default numbers in the table. Setting Ocean_depth=0 reduces it to conventional atmospheric radiative transfer model. [More information here.](#)

Select calculation type and Output levels:

☒ Spectral fluxes (irradiance) (up and down) ($W/m^2/\mu m$) at a single wavelength (μm)

☐ Spectral fluxes ($W/m^2/\mu m$) at multiple wavelengths from μm to μm at every μm .

☐ Integrated fluxes (W/m^2) from to μm in Spectral resolution of μm .

☐ Broadband shortwave (0.20-4.0 μm) fluxes (W/m^2). (Takes about 30 seconds)

☐ Radiance ($W/m^2/\mu m/Sr$) at wavelength (μm).

☐ Radiance ($W/m^2/\mu m/Sr$) at multiple wavelengths from μm to μm at every μm .

☐ Radiance ($W/m^2/\mu m/Sr$) in band: to μm in Spectral Resolution of μm ;
OR ☐ in satellite channel: AVHRR1 NOAA10 (Need few minutes)

? Want to include the Water-leaving radiance output? ☐ yes ☒ no

Radiance output angles: ☐ at Zenith(deg) or ☒ at every (deg) from to

☐ Azimuth(deg) or ☒ at every (deg) from to

[**See how the angles are defined here.](#)

Output at: ☒ TOA, ☒ Surface, ☒ km above surface, and ☒ (m) below surface; OR ☐ All levels in atmosphere.

Solar Zenith Angle Calculation or Input

☒ JulianDay: 30 GMT(hour): 18.55 Latitude(deg N): 36.91 Longitude(deg E): -75.71
☐ Ignore time and location, at a directly inputed Solar Zenith Angle (deg): 60.0
☐ At multiple Solar Zenith Angles (deg): from 20 to 80 in step of 20
*Note: Method 1 calculates Earth-Sun distance, Methods 2 and 3 use mean Earth-sun distance.

☒ If checked, use less atmospheric layers to save computation time (not recommended for UV and IR).
☐ If checked, input your total integrated precipitable water (g/cm²): 4.2
☐ If checked, input your integrated ozone amount (atm-cm): 0.350 (1 atm-cm=1000 Dobson)
 You can also change these trace gas amounts by a factor (1.0 for no change) of --> CO₂: 1.0 CH₄: 1.0

Select Mixed layer aerosol: MODTRAN Maritime & Stratospheric aerosol: No aerosol
 Select a method to specify aerosol loading (To be ignored if "No aerosol" selected above):
☐ by Visibility (km): 23.0 ☒ by AOT at 0.5um: 0.20 ☐ by AOT at 0.55um: 0.20
☐ If checked, input aerosol optical properties in the table below (not required to fill all elements, undefined numbers will be fit in by the selected model above):

λ (um):										
AOT:										
SSA:										
g:										

☐ If checked, upload aerosol phase function file: Escolher arquivo Nenhum arquivo escolhido

Select Cloud: No Cloud Bottom(km): 3 Top(km): 4 size RE(um): 10
☒ LWP(g/m²): 200 or ☐ OpticalDepth(0.6um): 10 (RE is effective size for nonspheric)

Ocean

Wind speed(m/s): 0 Depth (m): 100 Bottom albedo: 0.1 Chl (mg/m³): 0.2 (Chlorophyll)
 Particle scattering coefficient (m⁻¹): $b_p(\lambda) = b_p(550/\lambda)^{0.68} [Chl]^k$, Input b_p : 0.45, n : 0.6 and k : 0.62
 Particle scattering phase function (Petzold Average(bb=b=0.0183)) If use F-F func., input bb/b:
☐ If checked, input absorption a (m⁻¹): (Override the default parameterization)
☐ If checked, input your a_{440DOM} (m⁻¹): 0.20 (DOM absorption coefficient at 440nm)
☐ If checked, ignore surface roughness and assume Flat ocean surface.

*Note: Input Depth=0 will ignore the ocean and ocean inputs above (no water, same as atmosphere-land case).

Submit Form Reset Form ... Not clear on some input? Read "The Input" section [Here](#)

Fonte: COART, 2025

Com os resultados obtidos e demonstrados na Figura 20, foi realizada a correção radiométrica de acordo com a Equação 10 (OLIVEIRA; PONZONI; MORAES. 2009).

$$L_t = \frac{L_{toa} - L_u - (1 - \varepsilon) \cdot L_d}{\varepsilon \cdot \tau} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

Lt: Radiância de emissão da superfície no topo da atmosfera;

Ltoa: Radiância medida no topo da atmosfera;

ε : Emissividade da superfície (varia de 0 a 1);

Lu: 0,85

Ld: 0,88

τ (t): 1,20

VII. Temperatura de brilho (Tb)

A temperatura de brilho foi calculada conforme a Equação 2, porém, as constantes de calibração K1 e K2 foram atualizadas de acordo com as especificações do Landsat 8, assumindo os valores de 774,8853 para K1 e 1.321,0789 para K2. Além disso, a variável Ltoa é substituída

por L_t , que representa a radiância corrigida da superfície terrestre, já descontados os efeitos atmosféricos. Portanto:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{toa}} + 1\right)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Tb: temperatura de brilho no sensor, medido em Kelvin (K);

Lt: radiância corrigida da superfície terrestre;

Ln: logaritmo natural

k1: constante de calibração 1;

k2: constante de calibração 2;

VI. Temperatura da Superfície Terrestre (TST)

A temperatura da superfície terrestre foi calculada a partir da Equação 5, adaptando o índice λ ao comprimento de onda médio da banda termal 10, sendo 10,895 μm .

4.4 Tratamento estatístico

Foram empregados dois softwares para a realização das análises estatísticas nesta pesquisa. Após o mapeamento das classes Zonas Climáticas Locais (LCZ) e dos índices espectrais, os dados foram integrados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), abrangendo todo o perímetro urbano do município de Cuiabá, com resolução espacial de 100×100 metros.

As análises estatísticas foram conduzidas com base na hipótese de que cada classe LCZ, tanto para o ano de 2004 quanto para 2024, apresenta diferenças estatisticamente significativas nos valores de temperatura de superfície. Inicialmente, foi realizada a análise de distribuição dos dados, incluindo testes de normalidade, a fim de verificar a adequação ao uso de métodos paramétricos ou não paramétricos.

Dessa forma, as análises estatísticas adotadas nesta pesquisa foram:

1. Análise da distribuição dos dados;
2. Análise da variância da TST e NDVI;
3. Análise de correlação;
4. Análise de dados espaciais

4.4.1 *Análise da distribuição dos dados*

Para esta etapa, optou-se pela utilização do diagrama de caixa, uma técnica estatística amplamente empregada para a comparação entre grupos e para a visualização da distribuição dos dados de maneira clara e padronizada. Esse tipo de gráfico permite identificar medidas de tendência central, dispersão e possíveis valores atípicos, fornecendo uma representação sintética, mas informativa, do comportamento dos dados.

De acordo com Araujo (2012), o diagrama de caixa é um gráfico de um conjunto de dados que consiste de uma linha que se estende do valor mínimo ao valor máximo, em uma caixa com linhas verticais, traçadas no primeiro quartil (Q1), na mediana e no terceiro quartil (Q3). Os quartis, isto é, primeiro quartil, a mediana e o terceiro quartil são três valores que dividem os dados ordenados em quatro grupos com aproximadamente 25% dos valores em cada grupo. Na Estatística Descritiva ou na análise exploratória e comparação de dados, o diagrama de caixa é um gráfico configurado para poder identificar os outliers (valores discrepantes), valores que são bastante incomuns, no sentido de estarem muito afastados da maioria dos dados.

Para a análise da distribuição dos dados, utilizou-se o software R, uma ferramenta amplamente empregada pela comunidade científica para análises estatísticas. Esse ambiente de programação oferece recursos robustos para manipulação de dados, construção de gráficos e aplicação de testes estatísticos, garantindo maior precisão e reprodutibilidade dos resultados. Além disso, sua ampla gama de pacotes especializados permite realizar desde análises descritivas simples até métodos estatísticos avançados, o que o torna especialmente adequado para pesquisas acadêmicas e científicas.

4.4.2 *Análise da variância da TST e NDVI*

Para a realização do estudo sobre a variância dos dados de Temperatura da Superfície Terrestre (TST) e do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), aplicou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov, método estatístico não paramétrico utilizado para verificar se uma amostra segue determinada distribuição teórica ou, ainda, as duas amostras distintas apresentam distribuições semelhantes ou divergentes.

A aplicação do teste foi conduzida no software QGIS que, além de suas funcionalidades intrínsecas voltadas ao geoprocessamento, dispõe de recursos para análises estatísticas descritivas. Com o intuito de ampliar essas capacidades, incorporou-se ao ambiente do QGIS

um plugin de integração com o software R, permitindo a execução de scripts estatísticos avançados diretamente na interface SIG, o que reforçou a robustez e a abrangência das análises realizadas.

Para a análise de distribuição da TST e NDVI, a ferramenta utilizada foi *basic statistics* dentro do software que serve para calcular estatísticas descritivas básicas dos dados. O teste de Kolmogorov-Smirnov foi realizado via software R com informações advindas do QGIS. Esse script automatiza o cálculo da estatística do teste e o valor p, permitindo avaliar se os dados seguem determinada distribuição ou se duas amostras são estatisticamente diferentes, sendo que as hipóteses testadas foram:

- a) Hipótese nula (H0): distribuição dos dados é normal (valor $p > 0,05$);
- b) Hipótese alternativa (H1): distribuição dos dados não é normal (valor $p < 0,05$).

Os dados não seguiram a distribuição normal (gaussiana), ou seja, não puderam ser analisados por testes paramétricos. Por isso, foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis, que é não paramétrico e serve para comparar se há diferenças estatisticamente significativas entre 3 ou mais grupos independentes, considerando as medianas. O objetivo foi comparar as medianas das classes LCZs (Zonas Climáticas Locais) em relação às variáveis TST (Temperatura de Superfície Terrestre) e NDVI (Índice de Vegetação) ao longo do período analisado. A primeira etapa do teste consiste em verificar se há ou não diferenças entre as classes LCZs.

- a) Hipótese nula (H0): não existe diferença estatística entre as classes LCZs (valor $p > 0,05$);
- b) Hipótese alternativa (H1): existe pelo menos uma diferença significativa entre as classes LCZs (valor $p < 0,05$).

Com a verificação de que existe pelo menos uma diferença significativa entre as classes LCZs com relação a TST e NDVI, para que se pudesse entender quais são estas diferenças, foi realizado o teste de post-hoc de Dunn, por comparação entre pares, com resultado ajustado pelo método de Bonferroni. (TONIOLI,2024). As hipóteses testadas, foram:

Para TST

- a) Hipótese nula (H0): TST da LCZx 2004 = TST da LCZy 2024 (valor $p > 0,05$);
- b) Hipótese alternativa (H1): TST da LCZx 2004 $\neq$ TST da LCZy 2024 (valor $p < 0,05$).

Para NDVI

- a) Hipótese nula (H0): NDVI da LCZx 2004 = NDVI da LCZy 2024 (valor $p > 0,05$);
- b) Hipótese alternativa (H1): NDVI da LCZx 2004 $\neq$ NDVI da LCZy 2024 (valor $p < 0,05$).

Inicialmente, foram realizadas comparações das mesmas classes entre os diferentes anos. Por exemplo, a classe LCZ 1 foi comparada entre 2004 e 2024, assim como a classe LCZ 2, e assim sucessivamente para todas as classes identificadas em ambos os anos.

A fim de garantir uma base estatística para evidenciar que as classes se distinguem entre si dentro de cada período, também foram comparadas as classes entre si, conforme cada ano, da seguinte maneira:

Para TST - 2004

- a) Hipótese nula (H0): TST da LCZx 2004 = TST da LCZy 2004 (valor $p > 0,05$);
- b) Hipótese alternativa (H1): TST da LCZx 2004 $\neq$ TST da LCZy 2004 (valor $p < 0,05$).

Para TST – 2024

- a) Hipótese nula (H0): TST da LCZx 2024 = TST da LCZy 2024 (valor $p > 0,05$);
- b) Hipótese alternativa (H1): TST da LCZx 2024 $\neq$ TST da LCZy 2024 (valor $p < 0,05$).

Para NDVI - 2004

- a) Hipótese nula (H0): NDVI da LCZx 2004 = NDVI da LCZy 2004 (valor $p > 0,05$);
- b) Hipótese alternativa (H1): NDVI da LCZx 2004 $\neq$ NDVI da LCZy 2004 (valor $p < 0,05$).

Para NDVI - 2024

- a) Hipótese nula (H0): NDVI da LCZx 2024 = NDVI da LCZy 2024 (valor $p > 0,05$);
- b) Hipótese alternativa (H1): NDVI da LCZx 2024 $\neq$ NDVI da LCZy 2024 (valor $p < 0,05$).

4.4.3 Análise de correlação

Foi feita uma análise de correlação para verificar se existe relação entre duas variáveis: a Temperatura de Superfície Terrestre (TST) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Como já havia sido identificado anteriormente que os dados não seguem distribuição

normal, não seria adequado usar métodos paramétricos, como a correlação de Pearson. Por isso, foi escolhido um método não paramétrico, mais apropriado para esse tipo de dado: o coeficiente de Spearman (ρ) (SPEARMAN, 1904). Esse coeficiente mede se há uma relação monotônica, ou seja, quando uma variável aumenta ou diminui de forma consistente em relação à outra, não necessariamente de forma linear, entre TST e NDVI.

No contexto da modelagem estatística adotada nesta pesquisa, a TST foi definida como variável dependente e o NDVI como variável explicativa, uma vez que a presença de vegetação influencia diretamente o comportamento térmico da superfície. Áreas mais vegetadas tendem a apresentar menores temperaturas de superfície, de modo que o NDVI contribui para explicar as variações observadas no TST.

O coeficiente de correlação varia entre -1 e 1, em que valores próximos de zero indicam ausência de correlação, valores negativos refletem correlação inversa e valores positivos indicam correlação direta entre as variáveis. Quanto mais próximo de ± 1 , maior a intensidade da relação observada. A análise foi conduzida em ambiente SIG, também por meio da ferramenta *Basic Statistics*.

4.4.4 Análise de dados espaciais

De acordo com Tonioli (2024), a análise espacial dos dados é necessária para identificar padrões e a interdependência entre as variáveis de um conjunto de informações. Nesta pesquisa, optou-se pelo uso do índice global de Moran (I) para avaliar a dependência espacial de atributos, como TST ou NDVI, em relação aos polígonos, que neste caso correspondem às classes LCZs identificadas em cada ano analisado.

O procedimento para essa análise, foi realizado no software R, por meio da opção *Univariate Moran's I*. Esse é um coeficiente que mede a autocorrelação espacial, ou seja, verifica se os valores de uma variável estão espacialmente agrupados, dispersos ou distribuídos de forma aleatória. Seus valores variam entre -1 e 1, sendo que -1 indica correlação espacial inversa, 1 indica correlação espacial direta e 0 indica ausência de padrão espacial. As hipóteses verificadas através dessa análise são:

- a) Hipótese nula (H_0): não há autocorrelação espacial (valor $p > 0,05$);
- b) Hipótese alternativa (H_1): há autocorrelação espacial (valor $p < 0,05$).

As análises realizadas no software R resultaram, inicialmente, no gráfico de dispersão de Moran, que permite visualizar a relação entre os valores de cada polígono e a média dos valores de seus vizinhos espaciais. Em seguida, foi aplicado o teste de pseudo-significância, com configuração de 999 permutações, com o objetivo de avaliar a significância estatística do Índice de Moran.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram discutidos os resultados provenientes de toda metodologia descrita no capítulo anterior.

5.1 Classificação de Zonas Climáticas Locais para Cuiabá

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos com a aplicação do programa web LCZ Generator, que utiliza o sistema de classificação da paisagem desenvolvido por Stewart e Oke (2012). Nesta pesquisa, foi realizada uma abordagem classificatória histórica, descritas a seguir, por ano analisado.

5.1.1 Classificação LCZ para o território municipal – ano 2004

A acurácia geral do processo de classificação para o ano de 2004 foi de 77%, representada pela Acurácia Global (OA). A acurácia das classes relacionadas à ocupação urbana (OAu) foi de 76%, enquanto a acurácia geral para a distinção entre as classes urbanas e naturais (OAbu) atingiu 84%. A Acurácia Ponderada (OAw) foi de 86%, refletindo um bom desempenho do processo de classificação. No total, foram identificadas 8 classes LCZs referentes à tipologia construtiva e 6 classes associadas à cobertura do solo.

Em relação às classes de tipologia construtiva, a LCZ 2, correspondente a edifícios médios compactos, foi representada por 5 polígonos, totalizando uma área de 0,32 km². A LCZ 3, referente a edifícios baixos compactos, contou com 15 polígonos, abrangendo uma área de 2,57 km². Para a LCZ 4, que caracteriza edifícios altos com espaço aberto, foram delineados 3 polígonos, somando 0,37 km². A LCZ 5, que representa edifícios médios com espaço aberto, foi mapeada com 6 polígonos, totalizando 0,52 km².

Já a LCZ 6, referente a edifícios baixos com espaço aberto, teve 6 polígonos inseridos, com uma área de 1,02 km². A LCZ 7, associada ao adensamento de edifícios baixos leves, contou com 15 polígonos, somando 1,74 km². Para a LCZ 8, relativa a grandes edifícios baixos ou galpões, foram utilizados 9 polígonos, totalizando 1,06 km². Por fim, a LCZ 9, que representa ocupação esparsa, foi mapeada com 5 polígonos, resultando em uma área de 2,11 km².

A LCZ 1, correspondente a edifícios altos e compactos, e a LCZ 10, relativa a áreas de indústria pesada, não foram identificadas na área de estudo ou não apresentaram um conjunto de informações suficientemente representativo para serem consideradas na classificação.

No que se refere às classes associadas à cobertura do solo, a LCZ A, correspondente a áreas com árvores adensadas, foi composta por 9 polígonos, totalizando 3,95 km². A LCZ B, relativa a árvores dispersas, contou com 8 polígonos, abrangendo uma área de 4,40 km². A LCZ C, referente a áreas com arbustos, teve 4 polígonos inseridos, totalizando 2,43 km². A LCZ D, que representa áreas cobertas por plantas baixas, foi mapeada com 4 polígonos, somando 1,46 km². A LCZ E, associada à pavimentação ou pedra exposta, contou com 7 polígonos e uma área total de 0,62 km². A LCZ F, correspondente a solo exposto ou areia, teve 6 polígonos desenhados, abrangendo 1,23 km². Por fim, a LCZ G, que representa corpos d'água, foi delimitada por 6 polígonos, totalizando 1,08 km².

Tabela 9 - Dados sintetizados do processo de classificação de 2004 no Google Earth Pro

Classes LCZ	Polígonos	Km²
LCZ 2. Edifícios médios compactos	5	0,32
LCZ 3. Edifícios baixos compactos	15	2,57
LCZ 4. Edifícios altos com espaço aberto	3	0,37
LCZ 5. Edifícios médios com espaço aberto	6	0,52
LCZ 6. Edifícios baixos com espaço aberto	6	1,02
LCZ 7. Adensamento de edifícios baixos leves	15	1,74
LCZ 8. Grandes edifícios baixos ou galpões	9	1,06
LCZ 9. Ocupação esparsa	5	2,11
LCZ A. Árvores adensadas	9	3,95
LCZ B. Árvores dispersas	8	4,40
LCZ C. Arbustos	4	2,43
LCZ D. Plantas baixas	4	1,46
LCZ E. Pavimentação/ pedra exposta	7	0,62
LCZ F. Solo exposto/ areia	6	1,23
LCZ G. Água	6	1,08

Fonte: Autora.2025

5.1.2 Classificação LCZ para o território municipal – ano 2024

O resultado da coleta de dados para o ano de 2024 ocorreu da mesma forma que em 2004. A acurácia global (OA) foi de 76%, refletindo o desempenho geral da classificação. A acurácia das classes relacionadas à ocupação urbana (OAu) foi de 75%, enquanto a acurácia geral para

a distinção entre classes urbanas e naturais (OAbu) atingiu 84%. A acurácia ponderada (OAw) foi de 86%, demonstrando um bom desempenho do processo de classificação. No total, foram identificadas 9 classes LCZ referentes à tipologia construtiva e 7 classes associadas à cobertura do solo.

No que se refere às classes de tipologia construtiva, a LCZ 1, correspondente a edifícios altos e compactos, contou com o treinamento de 4 polígonos, totalizando uma área de 0,38 km². Para a LCZ 2, que representa edifícios médios e compactos, foram utilizados 5 polígonos, somando 0,45 km². Já a LCZ 3, associada a edifícios baixos e compactos, foi representada por 13 polígonos, com uma área total de 9,97 km². A maior representação dessa classe justifica-se pelo fato de que boa parte do território municipal é composta por edificações que se enquadram nas características de altura e composição de materiais típicas da LCZ 3.

Para a classe LCZ 4, que representa edifícios altos com espaço aberto, foram inseridos 3 polígonos, totalizando uma área de 0,24 km². A LCZ 5, correspondente a edifícios médios com espaço aberto, foi representada por 6 polígonos, somando aproximadamente 0,68 km². Já a LCZ 6, relativa a edifícios baixos com espaço aberto, contou com 7 polígonos, totalizando uma área de 2,85 km².

Quanto às demais três classes consideradas, a LCZ 7, que representa o adensamento de edifícios baixos leves, foi mapeada com 10 polígonos, totalizando uma área de 5,10 km². A LCZ 8, correspondente a grandes edifícios baixos ou galpões, contou com 11 polígonos, somando 2,45 km². Por fim, a LCZ 9, associada à ocupação esparsa, foi representada por 5 polígonos, com área total de 2,55 km².

A classe LCZ 10, que se refere à indústria pesada, não foi considerada, uma vez que não há na porção urbana do município, uma área mínima que atenda aos critérios estabelecidos pelos autores da proposta metodológica deste estudo.

Em relação aos resultados das classes pertencentes à cobertura do solo, a LCZ A, correspondente a áreas com árvores adensadas, foi representada por 9 polígonos, totalizando 5,22 km². Para a LCZ B, referente a árvores dispersas, foram inseridos 8 polígonos, com área total de 5,16 km². A LCZ C, que representa áreas com arbustos, contou com 3 polígonos, somando 1,03 km². Já a LCZ D, relativa a plantas baixas, foi mapeada com 4 polígonos, totalizando 1,38 km². A LCZ E, que corresponde a pavimentação ou pedra exposta, foi representada por 7 polígonos, com um total de 0,62 km². Para a LCZ F, associada a solo exposto

ou áreas nuas, foram utilizados 3 polígonos, totalizando 0,36 km². Por fim, a LCZ G, que representa corpos d'água, foi delineada por 6 polígonos, com área total de 1,08 km².

Ao total foram considerados 64 polígonos o que resultou em uma área de 24,67 km² para o treinamento das classes consideradas na tipologia construtiva. E para classes consideradas na cobertura do solo foram considerados 40 polígonos totalizando uma área de 14,85 km²

Tabela 10 - Dados sintetizados do processo de classificação de 2024 no Google Earth Pro

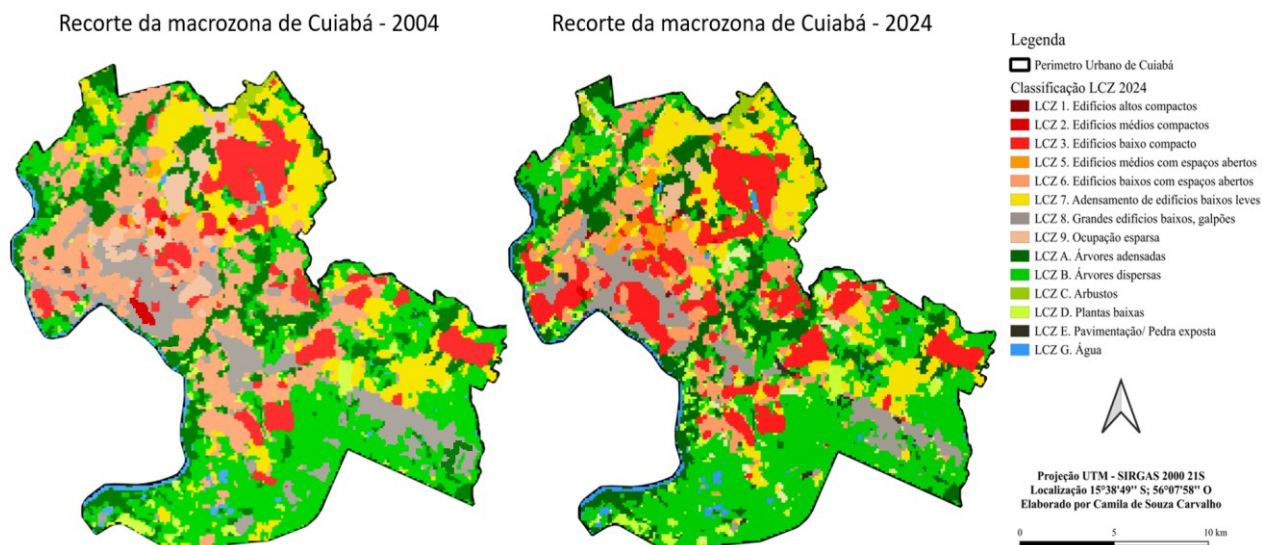
Classes LCZ	Polígonos	Área Km²
LCZ 1. Edifícios altos compactos	4	0,38
LCZ 2. Edifícios médios compactos	5	0,45
LCZ 3. Edifícios baixos compactos	13	9,97
LCZ 4. Edifícios altos com espaço aberto	3	0,24
LCZ 5. Edifícios médios com espaço aberto	6	0,68
LCZ 6. Edifícios baixos com espaço aberto	7	2,85
LCZ 7. Adensamento de edifícios baixos leves	10	5,10
LCZ 8. Grandes edifícios baixos ou galpões	11	2,45
LCZ 9. Ocupação esparsa	5	2,55
LCZ 10. Industria pesada	1	Não computado
LCZ A. Árvores adensadas	9	5,22
LCZ B. Árvores dispersas	8	5,16
LCZ C. Arbustos	3	1,03
LCZ D. Plantas baixas	4	1,38
LCZ E. Pavimentação/ pedra exposta	7	0,62
LCZ F. Solo exposto/ areia	3	0,36
LCZ G. Água	6	1,08

Fonte: Autora, 2025

5.1.3 Comparativo das LCZs entre os anos de 2004 e 2024

Com o objetivo de compreender a alteração da paisagem na área de interesse dessa pesquisa entre os anos de 2004 e 2024 seguem análises quantitativas e comparativas das classes LCZ tanto para a tipologia construtiva ou urbana quanto para tipologia de cobertura do solo ou naturais.

Figura 26 - Distribuição espacial das LCZs na Macrozona Urbana para 2004 e 2024



Fonte: Elaborado pela autora a partir do LCZ Generator e QGIS, 2025.

Com base na figura 26 que compara os mapas da macrozona de Cuiabá entre os anos de 2004 e 2024, observa-se uma expansão significativa da urbanização, sobretudo nas classes correspondentes às zonas construídas, como LCZ 3 (edifícios baixos compactos) e LCZ 6 (edifícios baixos com espaços abertos), que apresentam aumento expressivo em densidade e extensão espacial.

Observa-se também um crescimento notável da LCZ 9 (ocupação esparsa), indicando a ampliação das áreas periféricas e possivelmente do processo de urbanização informal ou expansão horizontal. Em contrapartida, as áreas de vegetação natural, como LCZ A (árvores adensadas) e LCZ B (árvores dispersas), sofreram redução em diversas regiões do município, evidenciando a substituição de áreas verdes por novos empreendimentos urbanos.

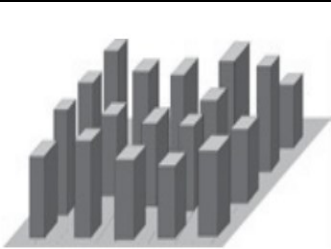
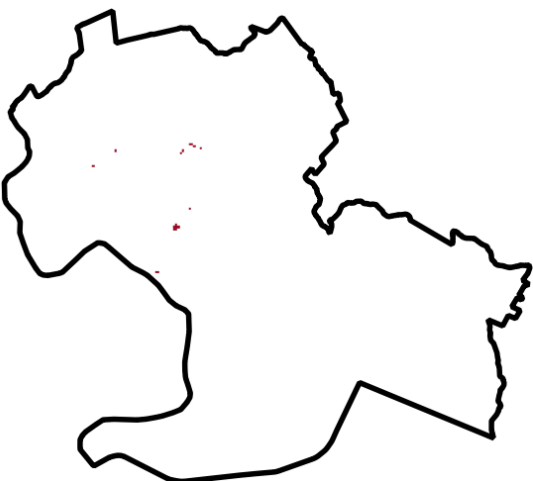
A classe LCZ E (pavimentação/pedra exposta) também ganhou maior representatividade em 2024, o que pode indicar tanto o aumento de infraestrutura viária quanto o avanço da impermeabilização do solo.

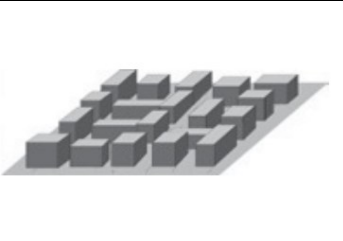
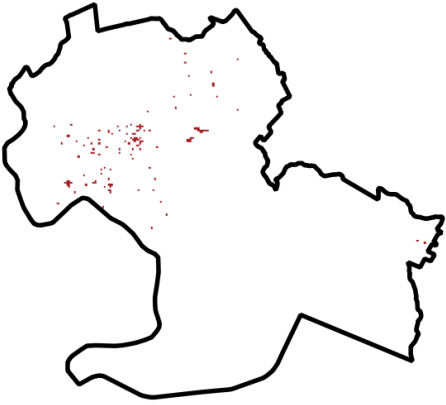
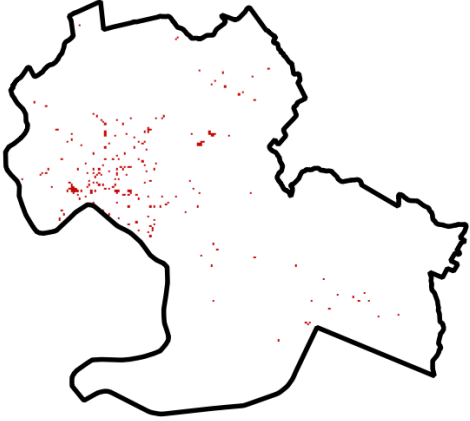
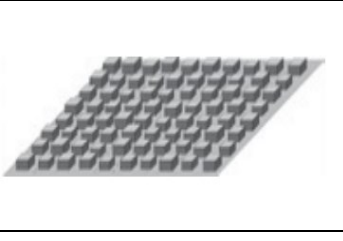
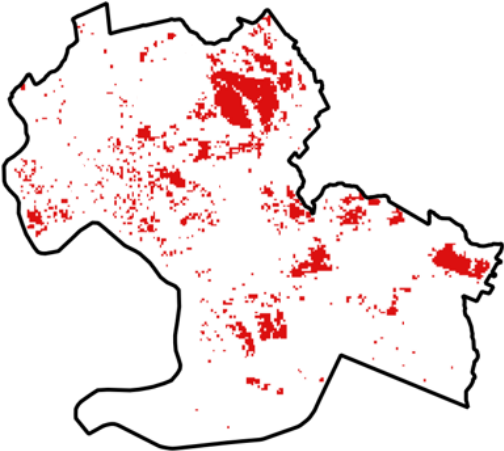
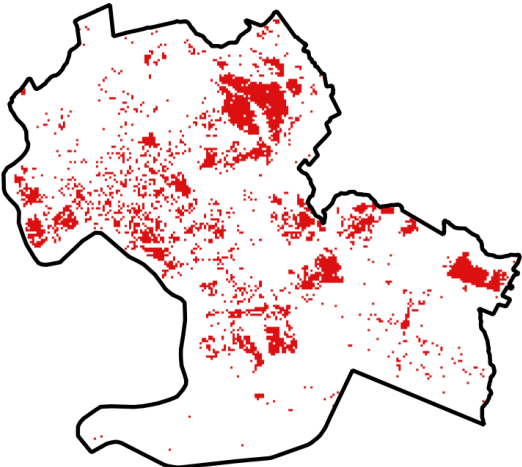
No geral, os mapas revelam uma tendência de crescimento urbano marcado pela intensificação da ocupação do solo, muitas vezes em detrimento das áreas naturais, o que reforça a necessidade de políticas urbanas mais sustentáveis para o planejamento futuro da cidade.

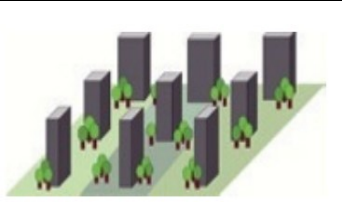
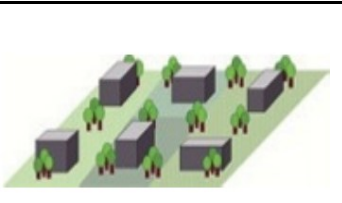
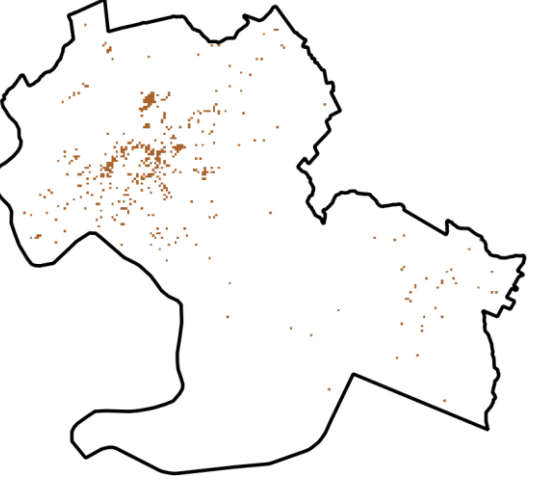
A seguir, o Quadro 2 apresenta as classes construtivas e naturais identificadas na área de estudo, com o auxílio das ferramentas Google Earth Pro e Street View. Associado a esses recursos, são apresentados também os recortes da porção urbana referentes a cada classe LCZ,

elaborados no QGIS, para os anos de 2004 e 2024. Essa abordagem permite uma análise comparativa e visual das mudanças ocorridas na paisagem, evidenciando tanto as transformações na estrutura urbana quanto a permanência ou redução das áreas naturais.

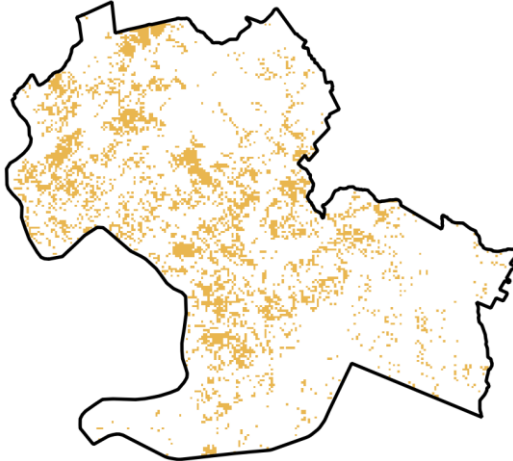
Quadro 2 – Panorama e perfil evolutivo das classes LCZ para os anos de 2004 e 2024

Tipologia construtiva	Descrição
LCZ 1. Edifícios altos compactos	
	
 2004 2024	
Em 2004, essa classe está presente de forma pontual e esparsa, com destaque para áreas centrais, como os bairros Goiabeiras e Quilombo. Para 2024 houve leve ampliação, ainda concentrada em áreas centrais e regiões valorizadas. No entanto, a classe não atinge grande expressividade espacial devido à limitação vertical predominante em Cuiabá.	

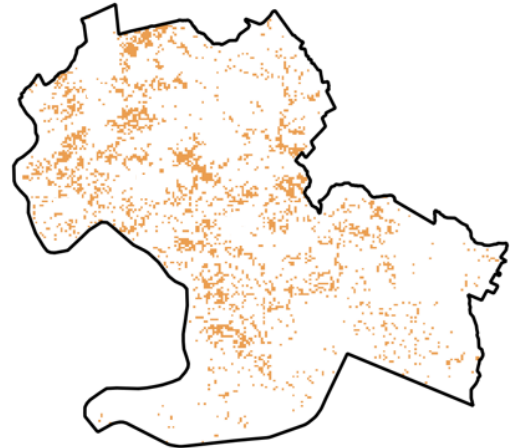
LCZ 2. Edifícios médios compactos		
		
 2004		 2024
Em 2004, apresentou pequena mancha urbana, dispersa e com baixa densidade. Já em 2024 houve uma expansão evidente, especialmente em bairros como Jardim das Américas e Jardim Aclimação, indicando aumento de condomínios e edifícios residenciais de médio porte.		
LCZ 3. Edifícios baixo compacto		
		
 2004		 2024
Em 2004 essa classe já era predominante, espalhada em grande parte da zona urbana. Em 2024 a área ocupada por essa classe aumentou consideravelmente, confirmando sua posição como principal forma de ocupação urbana em Cuiabá, com residências de baixa altura e alta densidade. consolidação da morfologia urbana densa, com construções térreas próximas entre si.		

LCZ 4. Edifícios altos com espaço aberto	
	
 2004	 2024
Para essa LCZ não foram identificadas construções suficientemente pertinentes para atender as exigências dessa metodologia para o ano de 2004. Em 2024 apresentou-se manchas esparsas na malha	
LCZ 5. Edifícios médios com espaços abertos	
	
 2004	 2024
Em 2004 houve a presença moderada, distribuída em bairros de transição entre áreas centrais e periféricas. Já em 2024, houve um crescimento significativo, com novas manchas urbanas podendo ser representados por condomínios e bairros planejados com menor densidade.	

LCZ 6. Edifícios baixos com espaços abertos



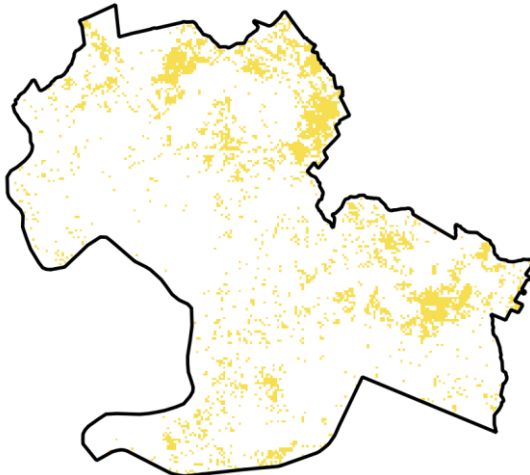
2004



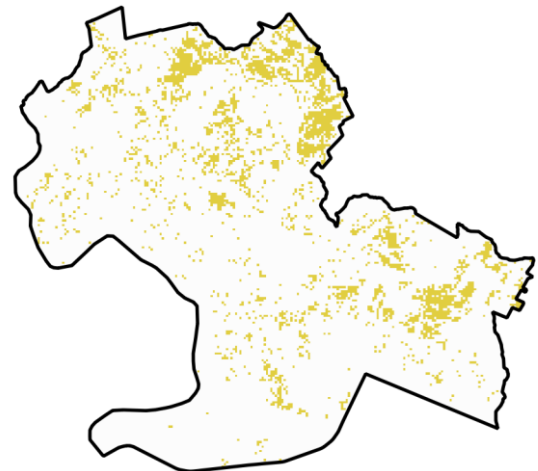
2024

Em 2004 essa classe já estava presente em porções periféricas ou não planejadas da cidade. Em 2024 houve uma expansão notável, sobretudo em áreas de crescimento horizontal e novos loteamentos com tendência em urbanização extensiva, com baixa verticalização e grandes lotes.

LCZ 7. Adensamento de edifícios baixos leves



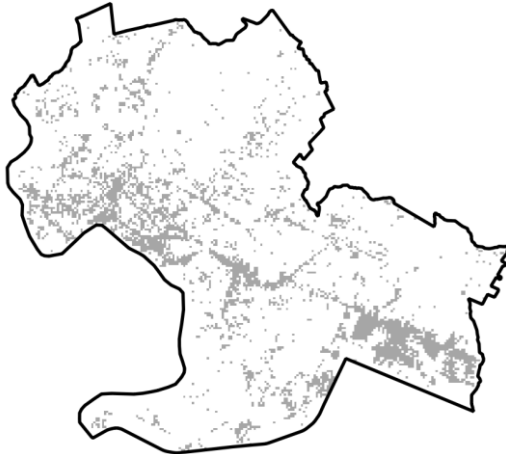
2004



2024

Essa classe em 2004 estava presente em áreas pontuais, principalmente em regiões periféricas. Já em 2024 ocorreu um aumento visível, refletindo a informalidade urbana ou ocupações com construções menos consolidadas.

LCZ 8. Grandes edificios baixos, galpões



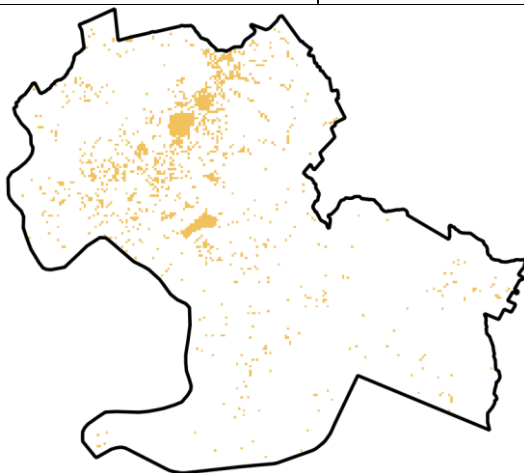
2004



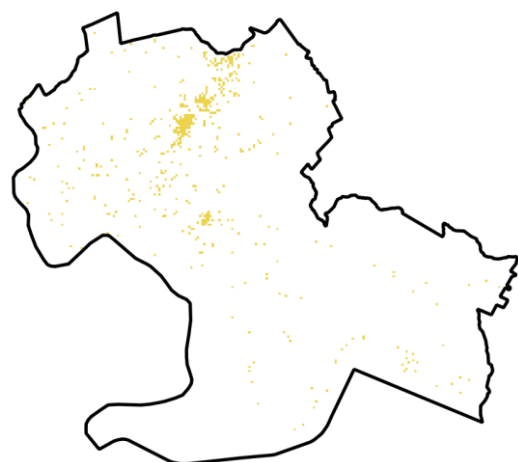
2024

Em 2004 mostrou-se pouca representação, ligada a áreas industriais ou centros logísticos. Para 2024 houve um crescimento leve de galpões ou edificios espaçosos e baixos, com destaque para áreas mais próximas às rodovias e zonas industriais, tendenciando o aumento da infraestrutura logística e expansão de áreas comerciais/industriais.

LCZ 9. Esparsa com construções pequenas ou médias

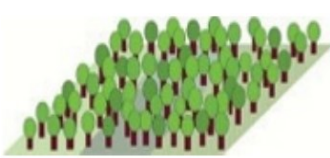
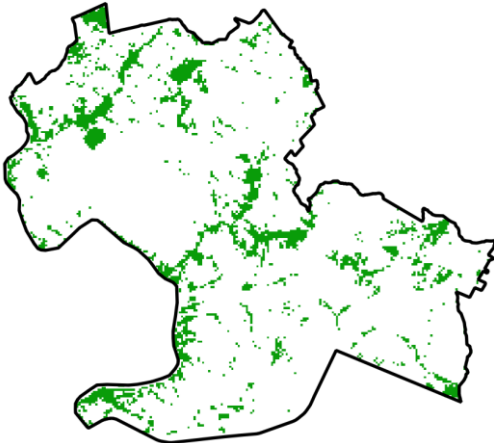
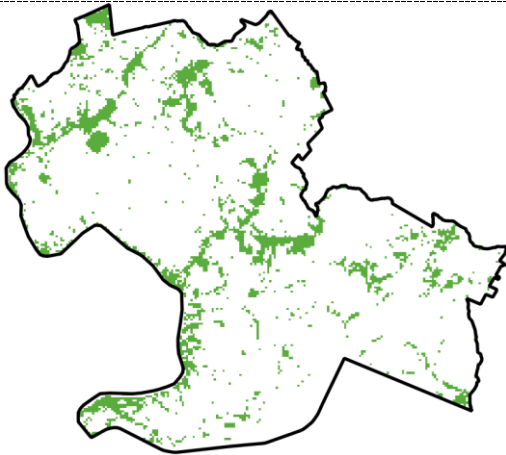
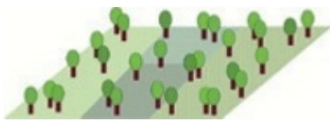
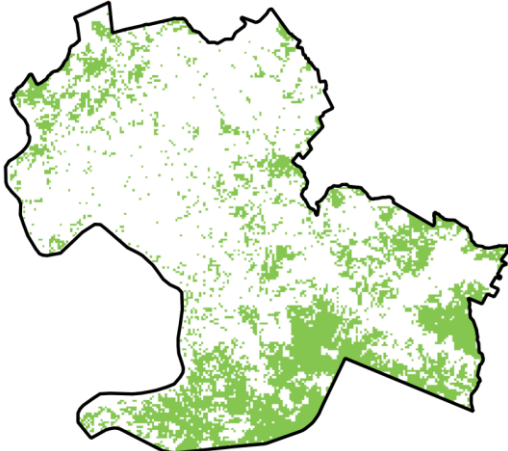
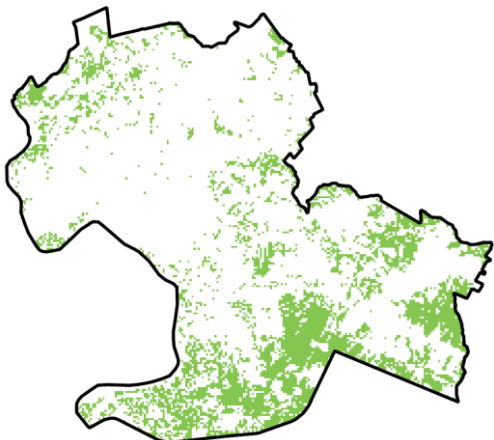


2004



2024

Em 2004 apareceu com grande extensão em porções periféricas e descontinuidades urbanas. Para 2024 a classe cresceu ainda mais, indicando processos de expansão desordenada ou loteamentos pouco consolidados, o que indica crescimento difuso em locais afastados da região central

Tipologias de Cobertura de Solo	Descrição	
LCZ A. Árvores adensadas		
		
 2004  2024		
Essa classe se mostrou muito mais presente em 2004. Em 2024, houve forte redução, substituída por áreas urbanizadas.		
LCZ B. Árvores dispersas		
		
 2004  2024		
Em 2004 apresentou-se bem distribuída em áreas periurbanas. Em 2024 sofreu redução, fragmentando-se em manchas menores. Mostra o avanço urbano sobre áreas verdes.		

LCZ C. Arbustos



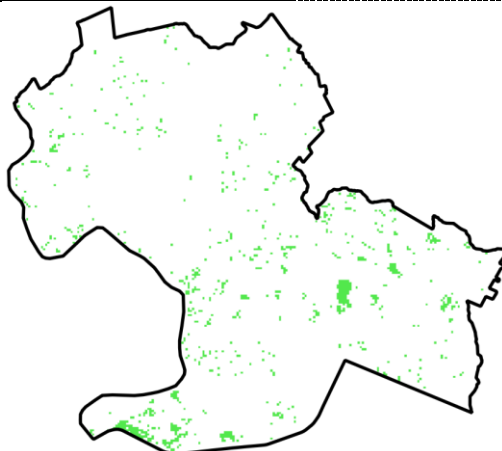
2004



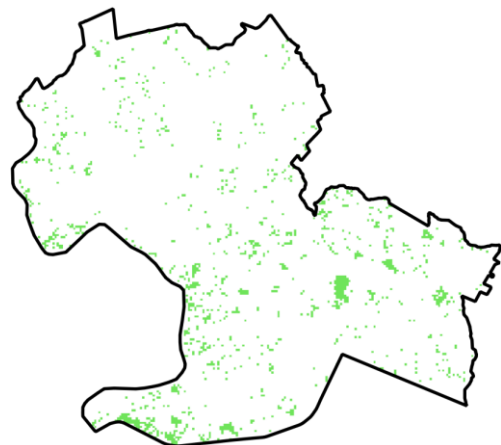
2024

Em 2004 se apresentou em zonas periféricas. Já em 2024 houve uma grande redução, possivelmente sendo substituída por ocupação esparsa e pavimentação.

LCZ D. Plantas baixas



2004



2024

Essa classe em 2004 foi encontrada em áreas abertas e não urbanizadas com diversos pontos espalhados macro região urbana, mas em 2024 houve uma diminuição acentuada, restando apenas manchas pequenas.

LCZ E. Pavimentação/ Pedra exposta



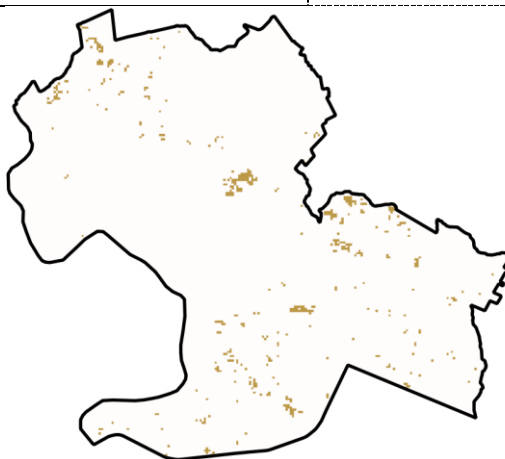
2004



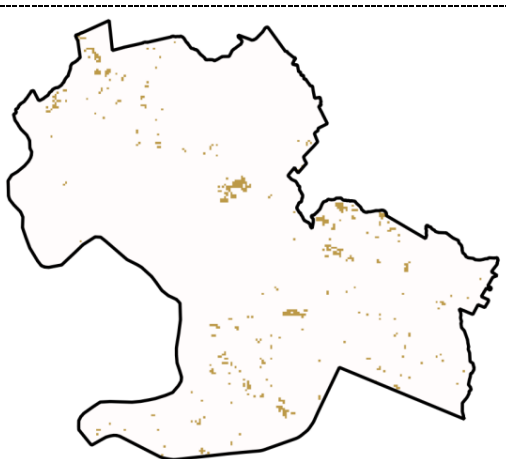
2024

Em 2024 apresentou um crescimento expressivo, associado à expansão de vias, áreas desmatadas e novas infraestruturas para atender a expansão urbana nas adjacências da cidade, mas não só.

LCZ F. Solo exposto/ Areia

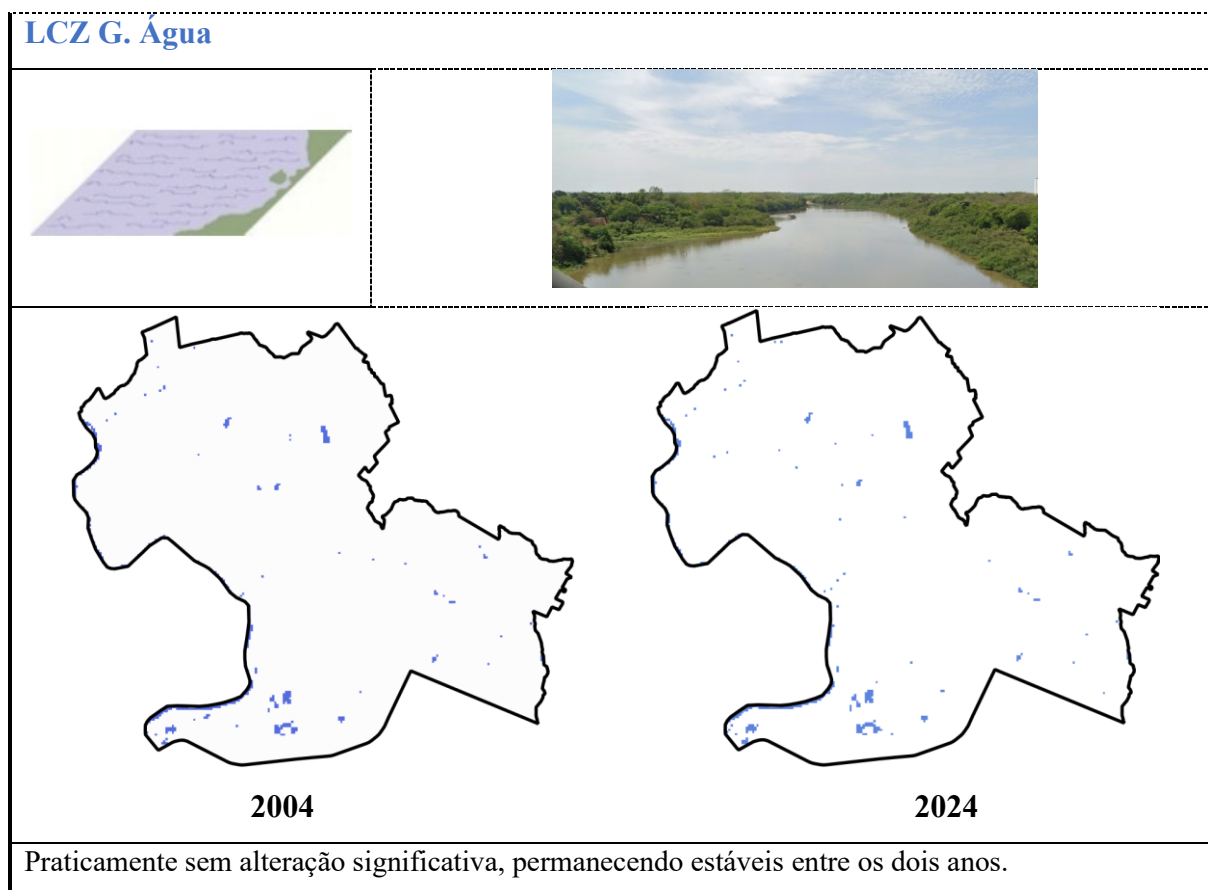


2004



2024

No geral apresentou-se entre os dois anos analisados com maior tendência para o ano de 2004, porém não houve grande expressividade na mudança para o ano de 2024.



Fonte: Elaborado pela autora a partir do LCZ Generator e QGIS, 2025.

A análise das áreas correspondentes às Zonas Climáticas Locais para os anos de 2004 e 2024 evidencia um padrão espacial que reflete, simultaneamente, o processo de urbanização e a manutenção de áreas naturais dentro da região estudada. Para fins de sistematização dos resultados, as classes foram agrupadas em duas categorias principais: classes urbanas e classes naturais, o que possibilita evidenciar a distribuição territorial em termos de cobertura do solo e das diferentes tipologias urbanas (Stewart & Oke, 2012).

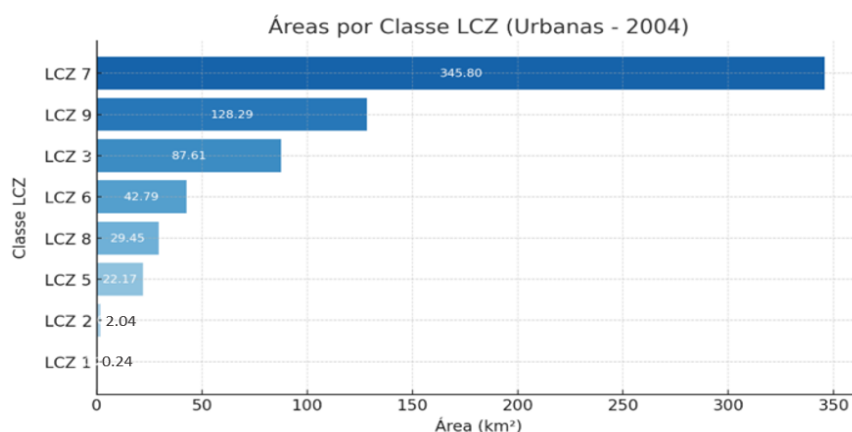
Para o ano de 2004, o gráfico das classes construtivas evidencia a predominância de áreas representadas pelas classes LCZ 7 com 345,80 km², LCZ 9 com 128,29 km² e LCZ 3 com 87,61 km², sendo a primeira a de maior extensão no conjunto urbano. Outras classes, como LCZ 6 com 42,79 km², LCZ 8 com 29,45 km² e LCZ 5 com 22,17 km², apresentam relevância espacial intermediária.

Em contraste, as classes LCZ 1 com 0,24 km² e LCZ 2 com 2,04 km² possuem áreas bastante reduzidas, revelando menor representatividade. Essa distribuição aponta para um predomínio de formas urbanas menos densas e de características periféricas, em detrimento das tipologias mais compactas e centrais.

No gráfico das classes de cobertura do solo, destaca-se a predominância da LCZ C com 583,11 km², configurando a classe mais expressiva. A LCZ A, com 95,59 km², também apresenta participação significativa, enquanto LCZ F soma 67,38 km². Em contrapartida, as classes LCZ G com 23,99 km², LCZ D com 4,99 km², LCZ B com 2,52 km² e LCZ E com 1,67 km² apresentam pouca expressividade.

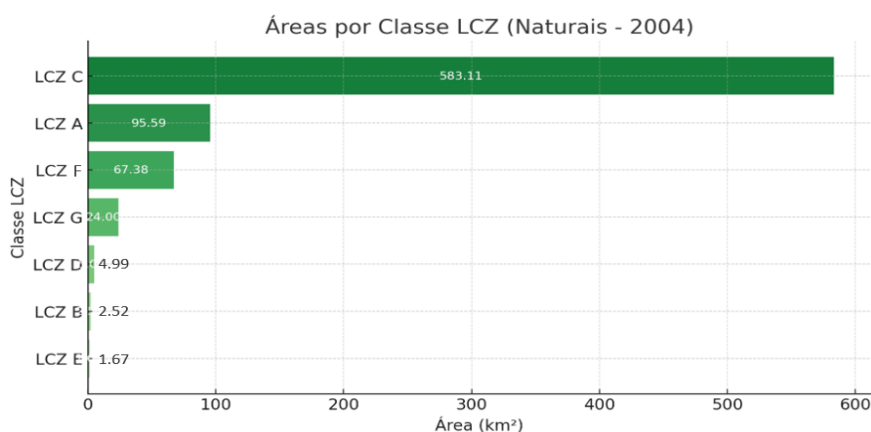
Essa configuração evidencia que, apesar da urbanização avançada, ainda persiste uma representatividade relevante de áreas vegetadas e de uso não construído no recorte espacial analisado, o que constitui um contraste importante para os estudos de climatologia urbana e para o planejamento territorial. As figuras 26 e 27 a seguir expõe as classes LCZ com maior expressividade identificadas para o ano de 2004.

Figura 27 - Área por KM² para classes construtivas em 2004



Fonte: QGIS adaptado pela autora

Figura 28 - Área por KM² para classes de cobertura do solo em 2004



Fonte: QGIS adaptado pela autora

Já a análise das Zonas Climáticas Locais para o ano de 2024 evidencia a manutenção de um padrão espacial caracterizado pela concentração em determinadas classes, tanto nas áreas de cobertura do solo quanto nas urbanas. Esse arranjo territorial revela a permanência de

grandes fragmentos de vegetação contínua, ao mesmo tempo em que indica transformações na estrutura urbana associadas à consolidação de tipologias mais compactas.

No âmbito das áreas urbanas, o ano de 2024 apresenta um quadro distinto, marcado pelo destaque da LCZ 3, que representa áreas de urbanização compacta de baixa altura, com 343,64 km². Esse resultado indica uma reconfiguração da morfologia urbana, com maior ênfase em formas adensadas de ocupação do solo. Em seguida, a LCZ 7, correspondente a áreas periféricas e de urbanização dispersa, ocupa 127,46 km², enquanto a LCZ 9, vinculada a áreas de densidade média e uso misto, soma 87,04 km².

Esses valores demonstram que, embora a expansão horizontal ainda esteja presente, há um aumento relativo das áreas compactas, sugerindo uma tendência à intensificação do uso do solo urbano.

As demais classes urbanas apresentam valores menos expressivos, como LCZ 5 somando 66,95 km², LCZ 6 com 42,51 km², LCZ 2 com 29,26 km² e LCZ 1 somando apenas 0,24 km². Essa distribuição reflete a coexistência entre tipologias de urbanização de média e baixa densidade, mas evidencia a baixa representatividade de formas urbanas verticalizadas representadas pela LCZ 1 e LCZ 2, que permanecem restritas a parcelas residuais do território.

De modo geral, os resultados de 2024 indicam dois processos espaciais centrais: de um lado, a manutenção de grandes fragmentos contínuos de vegetação, sobretudo vinculados à LCZ C e de outro, a consolidação da urbanização compacta de baixa altura e pouca vegetação, como a LCZ 3, acompanhada por tipologias de baixa densidade como a LCZ 7 e LCZ 9.

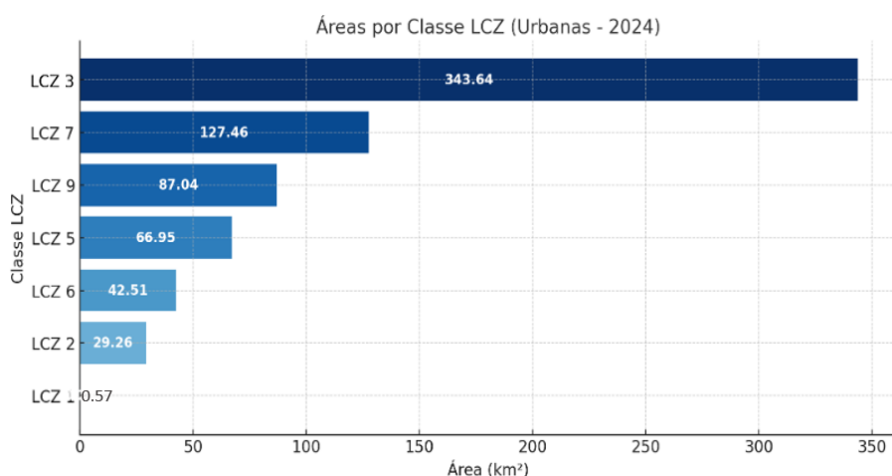
No que se refere às classes naturais, observa-se o predomínio absoluto da LCZ C, que corresponde às áreas de vegetação densa e contínua, atingindo aproximadamente 579,36 km². Esse valor representa a maior extensão registrada entre todas as classes de ocupação do solo, confirmando a centralidade dessa tipologia na manutenção da cobertura vegetal regional. Em segundo lugar, a LCZ A, associada a campos abertos e vegetação esparsa, apresenta 94,96 km², configurando-se como uma tipologia complementar, mas ainda expressiva. Somadas, as LCZ C e A concentram mais de 85% do total das áreas naturais, o que evidencia a polarização desse grupo em apenas duas categorias principais.

As demais classes naturais apresentam dimensões muito reduzidas, tais como a LCZ B somando 49,64 km², LCZ E com 23,8 km², LCZ D com 2,50 km², LCZ G com um total de 2,03 km² e LCZ F totalizando 1,66 km². Essa distribuição fragmentada demonstra a fragilidade das tipologias menos representativas, que se mantêm em porções residuais ou dispersas.

Tal situação sugere que, embora ainda haja expressivos remanescentes de vegetação contínua, a diversidade estrutural das paisagens naturais encontra-se comprometida, o que

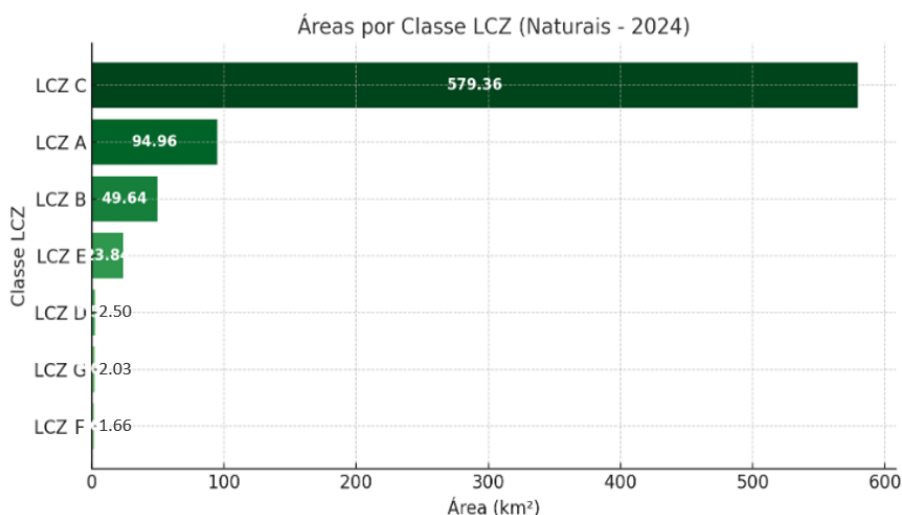
reforça a necessidade de estratégias específicas de conservação voltadas para as classes minoritárias. Seguindo o mesmo formato da representação quantitativa apresentada para o ano de 2004, procedeu-se à separação entre as classes construtivas, associadas à área urbana, e as classes de uso e ocupação do solo, representativas das áreas naturais. Dessa forma, foram elaborados os gráficos referentes ao ano de 2024, permitindo a análise comparativa entre os dois períodos e a avaliação das transformações ocorridas tanto no ambiente urbano quanto nas tipologias naturais.

Figura 29 - Área por KM² para classes construtivas em 2024



Fonte: QGIS adaptado pela autora

Figura 30 - Área por KM² para classes de cobertura do solo em 2024



Fonte: QGIS adaptado pela autora

De forma geral, a comparação entre os dois períodos evidencia uma transição importante: se em 2004 o padrão urbano estava fortemente associado à expansão horizontal de baixa densidade (LCZ 7), em 2024 observa-se a consolidação de um modelo de urbanização mais

compacto (LCZ 3). Essa mudança indica não apenas uma alteração na lógica de crescimento urbano, mas também potenciais impactos na densidade populacional, infraestrutura urbana e nas condições microclimáticas locais. Ao mesmo tempo, a estabilidade de classes como LCZ 9 e LCZ 6 sugere que determinadas tipologias urbanas mantêm sua relevância ao longo do tempo, funcionando como categorias estruturantes da morfologia urbana regional.

5.1.4 Contrastes térmicos e desigualdades climáticas no espaço urbano de Cuiabá

A análise espacial desenvolvida entre os anos de 2004 e 2024 revelou que o fenômeno das ilhas de calor urbanas se manifesta de forma desigual no território cuiabano, refletindo as contradições históricas e socioambientais do processo de urbanização local. Verificou-se que as áreas de maior densidade construtiva e menor cobertura vegetal concentram os índices mais elevados de temperatura da superfície terrestre (TST), configurando zonas de intenso desconforto térmico e vulnerabilidade ambiental. Essas regiões foram classificadas predominantemente como LCZ 3, correspondentes às edificações baixas e compactas, e LCZ 6, que representam edificações baixas com espaço aberto, ambas caracterizadas por elevada impermeabilização do solo e escassez de vegetação arbórea.

Tais zonas coincidem, em grande parte, com bairros situados em áreas de expansão urbana recente ou em setores consolidados, mas com infraestrutura urbana precária, localizados principalmente nas porções periféricas da Macrozona Urbana de Cuiabá. Nesses locais, observa-se a ausência de planejamento climático e a carência de áreas verdes, o que agrava os efeitos térmicos e amplia o contraste entre as zonas centrais e as regiões periféricas. A redução da cobertura vegetal e a predominância de materiais construtivos com alta capacidade de absorção e retenção de calor intensificam a temperatura superficial e, consequentemente, os impactos socioambientais.

Em contraposição, as regiões classificadas como LCZ A e LCZ B, compostas por vegetação arbórea densa ou dispersa, apresentaram valores significativamente mais baixos de temperatura e maiores índices de vegetação (NDVI), demonstrando o papel da arborização urbana e da presença de áreas naturais como importantes agentes de mitigação térmica. Essas zonas funcionam como refúgios climáticos, capazes de reduzir a intensidade das ilhas de calor e de contribuir para a regulação microclimática do ambiente urbano.

Os resultados obtidos permitem inferir que as populações mais vulneráveis socioeconomicamente são as que mais sofrem os efeitos das ilhas de calor. São grupos residentes em áreas de adensamento desordenado, onde predominam habitações com baixo

padrão construtivo, reduzida ventilação natural e ausência de infraestrutura verde. Nessas localidades, a capacidade adaptativa é limitada, uma vez que o acesso a sistemas artificiais de climatização é restrito, o que torna a exposição ao calor extremo ainda mais severa. Essa vulnerabilidade é agravada por fatores socioeconômicos e ambientais que se inter-relacionam, evidenciando que o impacto das ilhas de calor não é apenas um fenômeno físico, mas também social e político.

Além disso, os bairros situados nas zonas de expansão urbana tendem a reproduzir padrões construtivos homogêneos, marcados pela ausência de áreas permeáveis e pela substituição progressiva da vegetação nativa por superfícies pavimentadas. Esse processo de artificialização da paisagem urbana contribui para o avanço espacial das ilhas de calor, ampliando o gradiente térmico entre as áreas centrais, que possuem alguma arborização remanescente, e as periferias, que sofrem os efeitos diretos da falta de planejamento climático. A tendência de crescimento horizontal, somada à carência de políticas públicas integradas, reforça a desigualdade ambiental e expõe de forma desproporcional os grupos de menor renda aos riscos climáticos.

A dissertação evidencia ainda que Cuiabá apresenta clima tropical semiúmido, com médias térmicas elevadas e baixos índices de umidade relativa durante o período seco. Nesse contexto climático, a ausência de estratégias de mitigação, como arborização adequada, criação de corredores ecológicos e adoção de materiais de construção com propriedades térmicas favoráveis, acentua os efeitos do calor urbano. As características fisiográficas da cidade, associadas ao relevo e ao adensamento urbano, agravam o desconforto térmico e contribuem para a intensificação das ilhas de calor em diferentes escalas espaciais.

Portanto, as análises indicam que o fenômeno das ilhas de calor urbanas em Cuiabá é resultado direto da combinação entre urbanização acelerada, desarticulação entre políticas ambientais e ausência de instrumentos de planejamento climático urbano. Essa realidade impõe desafios à gestão pública, que deve considerar a variável climática como elemento central nas decisões de uso e ocupação do solo. A implementação de medidas mitigadoras, como o aumento da arborização urbana, a preservação de áreas permeáveis e o incentivo à infraestrutura verde, é fundamental para reduzir as desigualdades térmicas e promover o bem-estar da população.

Em síntese, conclui-se que as ilhas de calor não se distribuem de maneira homogênea pela cidade, mas refletem as desigualdades socioespaciais e a falta de integração entre o crescimento urbano e a sustentabilidade ambiental. A população de baixa renda e os moradores das zonas periféricas são os principais afetados, uma vez que vivem em regiões onde a vegetação é escassa, o solo é impermeável e as construções são densas e termicamente inadequadas. O avanço contínuo da urbanização sem planejamento tende a intensificar esse quadro, tornando

urgente a formulação de políticas públicas voltadas à adaptação climática e à justiça ambiental no espaço urbano de Cuiabá.

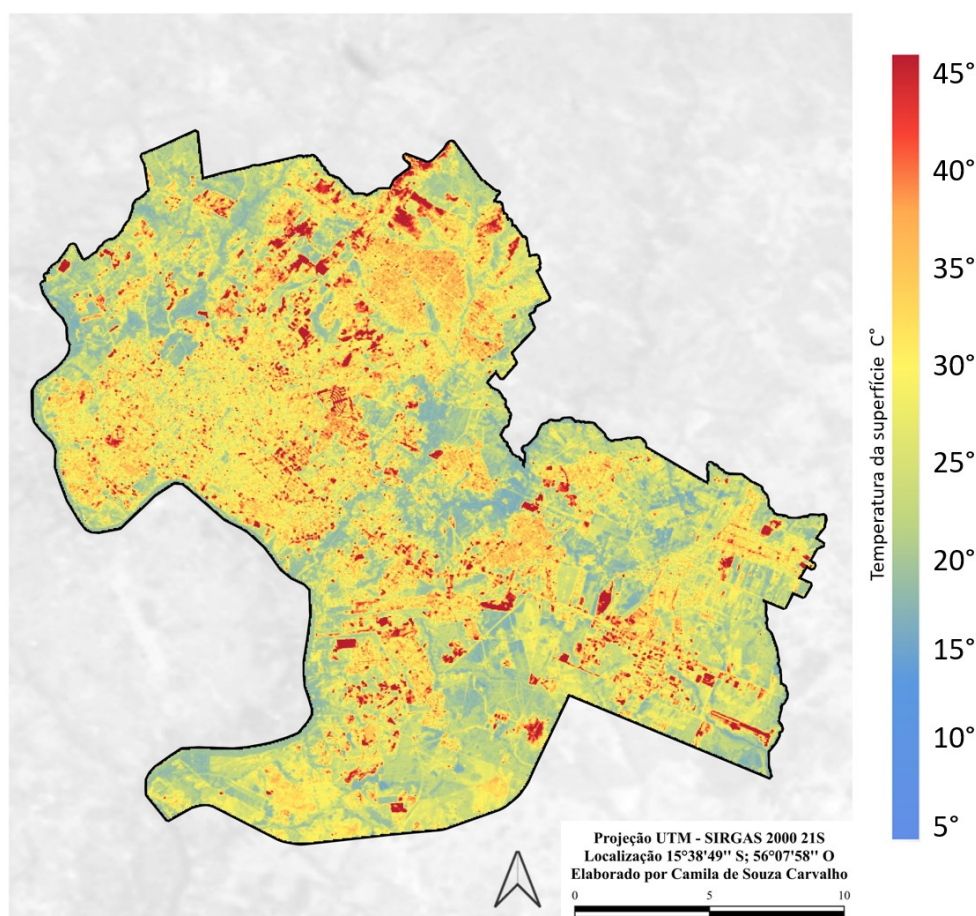
5.2 Índices espectrais – TST e NDVI para Cuiabá

Esta seção apresenta e discute os resultados referentes aos índices TST e NDVI, obtidos por meio de operações de geoprocessamento realizadas em ambiente SIG, a partir de imagens digitais dos satélites Landsat 5 e Landsat 8, correspondentes aos anos de 2004 e 2024. Para a análise dos índices espectrais, foram elaborados mapas, os quais são apresentados a seguir, organizados de acordo com cada indicador avaliado.

5.2.1 *Temperatura de Superfície Terrestre (TST)*

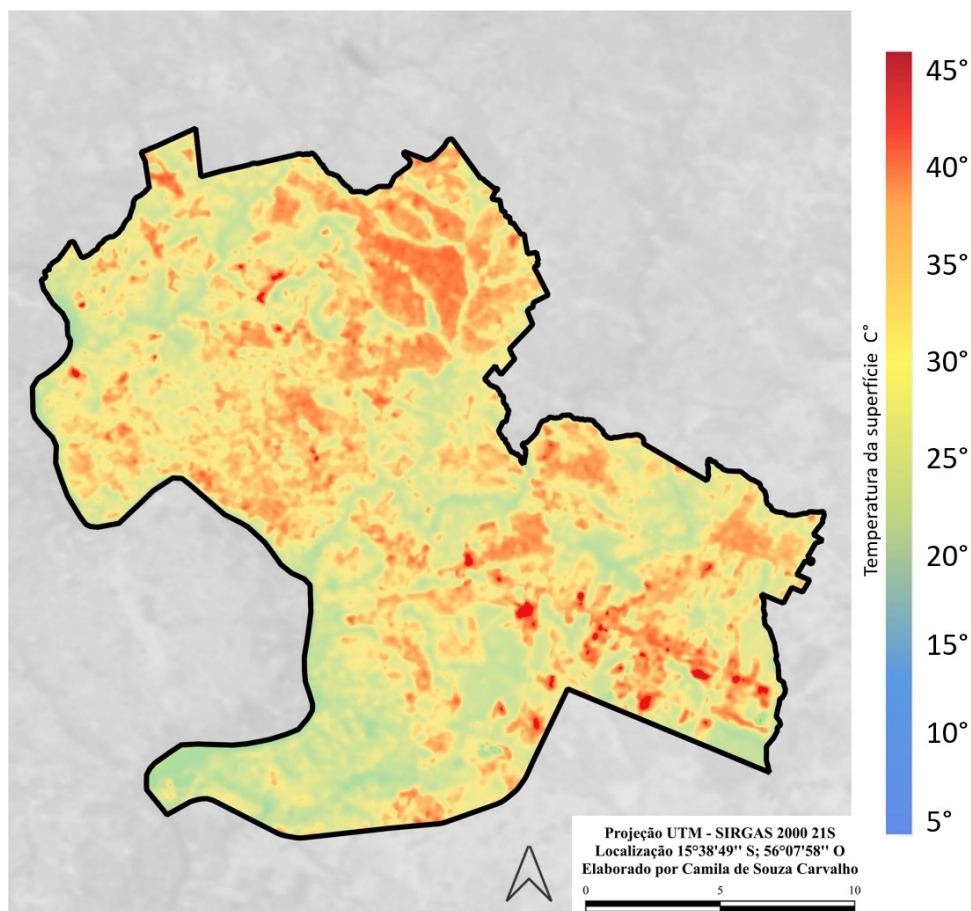
As figuras 31 e 32 apresentam o mapa temático da Temperatura da Superfície Terrestre (TST) referente a macrozona urbana de Cuiabá para os anos de 2004 e 2024.

Figura 31- Temperatura da Superfície Terrestre da Macrozona urbana de Cuiabá - 2004



Fonte: Elaborado pela autora a partir do Landsat 5 e QGIS, 2025.

Figura 32 - Temperatura da Superfície Terrestre da Macrozona urbana de Cuiabá - 2024



Fonte: Elaborado pela autora a partir do Landsat 8 e QGIS, 2025.

A associação entre a classificação das Zonas Climáticas Locais (LCZs) e a Temperatura da Superfície Terrestre (TST) permite compreender de forma mais detalhada a intensificação térmica em Cuiabá entre 2004 e 2024, especialmente no mês de julho, marcado pelo período quente-seco. Essa estação é caracterizada por baixos índices pluviométricos, déficit hídrico e elevada incidência de radiação solar, condições que potencializam o aquecimento superficial e reduzem o efeito de resfriamento via evapotranspiração.

Em 2004, as LCZs urbanas densas (LCZ 1, 2 e 3 – edificações compactas de diferentes alturas) já se destacavam como focos de maior aquecimento, registrando TST superiores a 35 °C, com picos acima de 40 °C em áreas centrais e em solos expostos (LCZ E). Em contrapartida, as LCZs naturais (LCZ A – áreas arborizadas, LCZ C – arbustos, e LCZ G – corpos d’água) desempenhavam papel essencial de mitigação térmica, apresentando valores inferiores a 25 °C. A heterogeneidade espacial era marcada pelo predomínio de classes intermediárias, como LCZ 6 e LCZ 9 (edificações abertas e ocupação esparsa), que mantinham aproximadamente 62% da área urbana entre 25 °C e 35 °C.

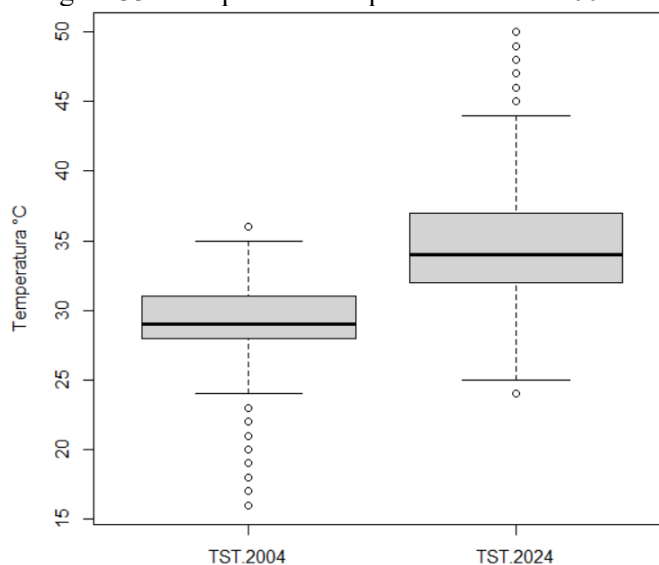
No ano de 2024, em pleno período seco, os padrões se alteraram de forma significativa. As LCZs urbanas densas ampliaram sua abrangência espacial e passaram a concentrar TST entre 38 °C e 45 °C, com setores contínuos superando 50 °C, sobretudo nas porções norte e leste da cidade. As áreas de pavimentação/pedra exposta (LCZ E) intensificaram-se e atingiram temperaturas críticas próximas de 55 °C. Ao mesmo tempo, as LCZs naturais tornaram-se mais restritas e fragmentadas, reduzindo sua capacidade de amenizar o aquecimento urbano. Esse processo reflete diretamente a perda da função termorreguladora da vegetação, agravada pela escassez hídrica típica de julho, quando a evapotranspiração se encontra reduzida.

Assim, a integração dos resultados demonstra que as condições sazonais do período quente-seco de julho intensificam os contrastes térmicos entre as LCZs. Enquanto as áreas densamente construídas e impermeabilizadas acumulam calor e ampliam a formação de ilhas de calor superficiais, os fragmentos vegetados remanescentes perdem eficiência na regulação microclimática devido ao estresse hídrico.

Portanto, a evolução observada entre 2004 e 2024 evidencia não apenas a intensificação, mas também a maior vulnerabilidade climática de Cuiabá no contexto sazonal mais crítico do ano. A expansão das LCZs urbanas compactas e a redução da vegetação reforçam a necessidade de estratégias de mitigação que considerem a sazonalidade climática local, incluindo o aumento da arborização urbana, a implementação de corredores verdes e a adoção de soluções baseadas na natureza como mecanismos de resiliência frente ao aquecimento intensificado durante o período seco.

Conjunto dos dados da TST		
Item	2004	2024
Mínimo	22,7	25,3
Q1 (1° quartil)	28,1	31,8
Q2 (Mediana)	29,9	34,2
Q3 (3° quartil)	31,8	35,7
Máximo	35,2	44,2
IQR (Q3 – Q1)	3,07	3,90
Média	29,46	34,32
Desvio padrão	2,16	1,39

Figura 33 - Boxplot da TST para os anos de 2004 e 2024



Fonte – Desenvolvido pela autora através do *software R*

A análise da Temperatura de Superfície Terrestre (TST) para os anos de 2004 e 2024 revela mudanças significativas nos valores observados, com um claro aumento nas temperaturas durante esse período.

Em 2004, a TST variou entre 22,7 °C e 35,2 °C, com a mediana de 29,9 °C e a média de 29,46 °C. A distribuição dos valores mostrou-se relativamente concentrada, já que 50% dos dados estiveram entre 28,1 °C e 31,8 °C, resultando em um intervalo interquartil (IQR) de 3,07. O desvio padrão de 2,16 indicou maior variabilidade em torno da média, e a presença de outliers inferiores sugere que ocorreram registros de temperaturas mais baixas em relação ao conjunto principal dos dados, refletindo áreas com características específicas como cobertura vegetal ou corpos hídricos.

Em 2024, a TST apresentou um comportamento distinto. Os valores oscilaram entre 25,3 °C e 44,2 °C, evidenciando aumento tanto do mínimo quanto do máximo em comparação com 2004. A mediana deslocou-se para 34,2 °C e a média para 34,32 °C, confirmando o aquecimento ao longo do período analisado. A comparação dos quartis revelou que metade dos dados se concentrou entre 31,8 °C e 35,7 °C, com o IQR de 3,90, o que representa maior dispersão. Apesar disso, o desvio padrão de 1,39 foi menor que o de 2004, indicando que, em média, os valores ficaram mais próximos da média em 2024, embora com maior amplitude nos extremos. O boxplot reforça esse padrão, mostrando o deslocamento da caixa para valores mais altos e a presença de diversos outliers superiores, ultrapassando os 40 °C, o que evidencia episódios extremos de calor.

De maneira geral, a comparação entre os dois períodos demonstra uma tendência clara de elevação da TST ao longo de duas décadas. Além do aumento da média e da mediana, observa-se também maior frequência de eventos extremos, sobretudo em 2024, quando as temperaturas máximas ultrapassaram de forma expressiva os valores observados em 2004. Esses resultados apontam para um cenário de intensificação do aquecimento superficial, possivelmente relacionado a fatores como mudanças climáticas globais, processos de urbanização e transformações no uso e cobertura da terra.

Diante da identificação de valores atípicos (outliers) por meio da análise estatística, optou-se por examinar a totalidade de cada conjunto de dados, a fim de compreender melhor as razões para sua ocorrência. Essa decisão se justifica pelo fato de que os outliers correspondem a valores que se desviam significativamente das demais observações, podendo indicar situações incomuns ou levantar questionamentos sobre a confiabilidade ou a representatividade desses dados específicos.

Antes de aplicar procedimentos estatísticos comparativos mais robustos, tornou-se necessário verificar a distribuição dos dados amostrais para os anos de 2004 e 2024. Essa verificação é essencial para a escolha adequada dos testes estatísticos, especialmente no que se refere à distinção entre métodos paramétricos e não paramétricos.

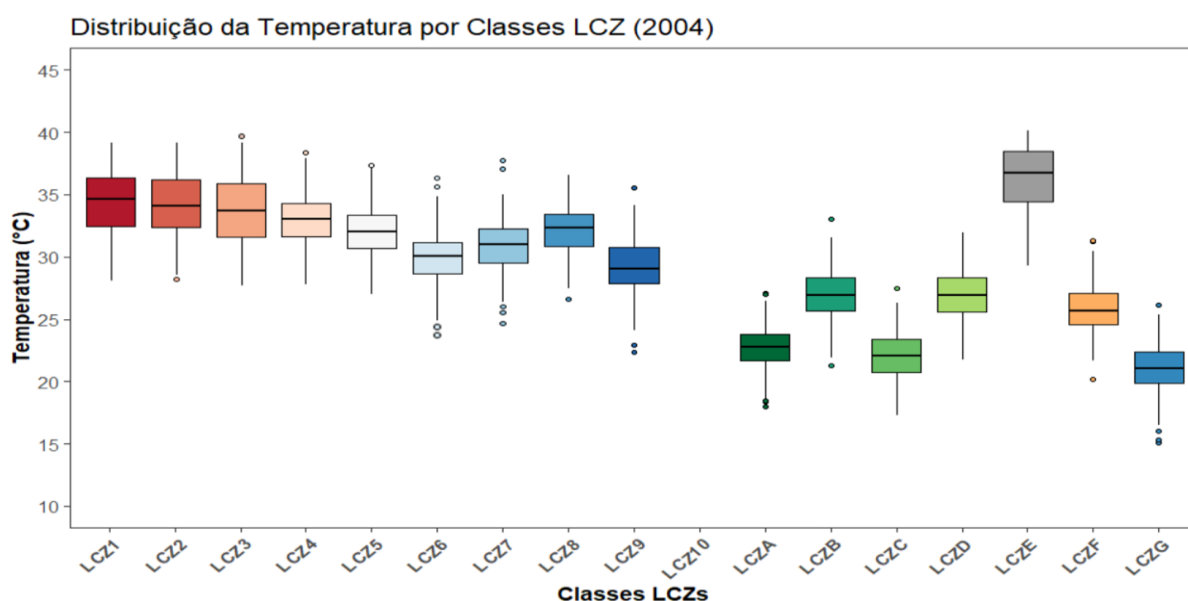
Para isso, foi utilizado o teste de normalidade de Lilliefors, uma adaptação do teste de *Kolmogorov-Smirnov*, mais apropriada quando os parâmetros da distribuição (média e desvio padrão) são estimados a partir da própria amostra.

O teste de normalidade de Lilliefors (*Kolmogorov-Smirnov*) foi aplicado aos dados de 2004, revelando uma estatística $D = 0,11628$ com valor de $p < 2,2 \times 10^{-16}$, indicando que a distribuição dos dados se desvia significativamente da normalidade.

Para os dados de 2024, o teste de Lilliefors (*Kolmogorov-Smirnov*) também foi realizado, obtendo-se $D = 0,098072$ e $p < 2,2 \times 10^{-16}$, o que igualmente aponta para uma distribuição não normal.

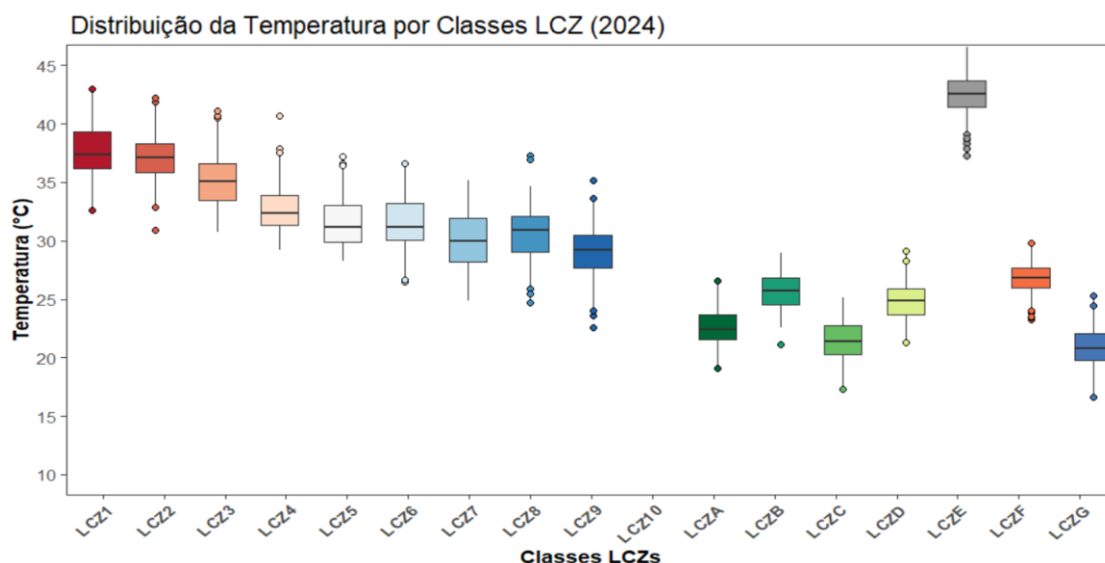
Considerando que, em ambos os casos, o valor de p foi inferior ao nível de significância estabelecido ($\alpha = 0,05$), rejeita-se a hipótese nula (H_0), que pressupõe que os dados seguem uma distribuição normal. Dessa forma, conclui-se, com 95% de confiança, que os conjuntos de dados analisados não apresentam distribuição normal. Esse resultado justifica o uso de métodos estatísticos não paramétricos nas etapas subsequentes da análise, garantindo maior robustez e confiabilidade às interpretações extraídas.

Figura 34 - Boxplot de TST das LCZs do ano de 2004



Fonte – Desenvolvido pela autora através do *software R*

Figura 35 - Boxplot de TST das LCZs do ano de 2024



Fonte – Desenvolvido pela autora através do *software R*

Pela Figura 34, observa-se os diagramas de caixa da TST para as classes LCZ do ano de 2004, e é possível perceber que todas as temperaturas médias em cada LCZ aumentaram quando comparadas com as temperaturas médias de 2024 demonstradas na Figura 35. A classe LCZ A, com maior abrangência em termos de área, entre os dois anos avaliados passou da temperatura média de aproximadamente 23,4°C para 25,2°C, a menor temperatura entre as classes para o ano de 2024. A classe LCZ 3, com ocupação baixa compacta, aumentou cerca de 4,1°C, passando de 33,2°C para 37,3°C.

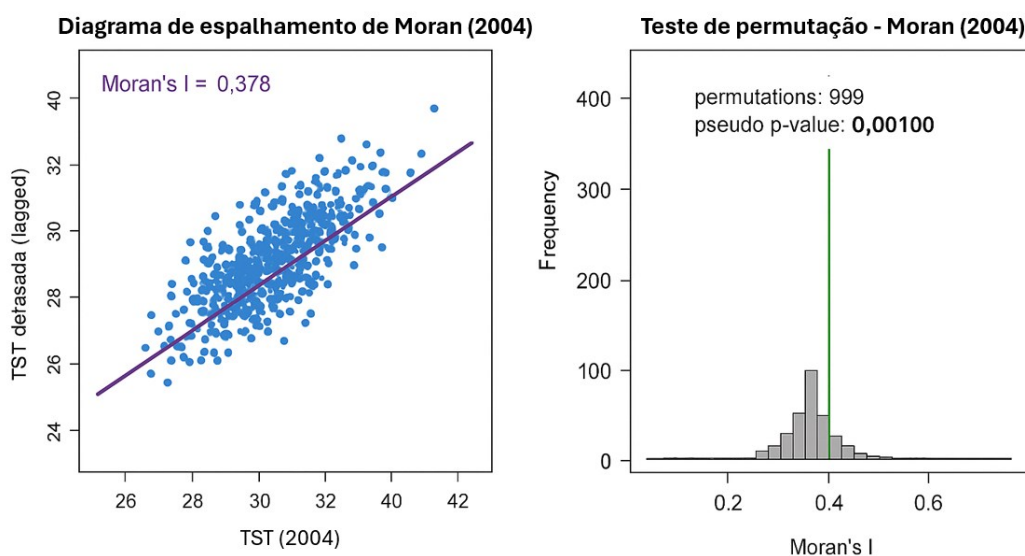
Da mesma forma, a classe LCZ 1 apresentou incremento de cerca de 3,8°C, variando de 35,5°C em 2004 para 39,3°C em 2024, enquanto a LCZ 2 elevou-se de 34,7°C para 38,5°C, correspondendo a um acréscimo de 3,8°C. A classe LCZ E destacou-se por apresentar o maior aquecimento, passando de 37,2°C em 2004 para 46,1°C em 2024, ou seja, um aumento de 11,9°C. Esses resultados evidenciam que, embora todas as classes tenham sofrido aquecimento ao longo do período, o aumento foi mais intenso nas áreas urbanas densas e nas superfícies pavimentadas, reforçando a intensificação do efeito de ilha de calor urbano.

Com o intuito de identificar possíveis diferenças significativas entre as variáveis TST nas classes LCZs ao longo do período de 2004 a 2024, foi aplicado o teste de *Kruskal-Wallis*. A análise teve início com a investigação da presença de variações estatisticamente relevantes entre as classes LCZs nos dois anos considerados. Os resultados indicaram a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as classes em ambos os anos analisados. Para 2004, o teste retornou [$H(16) = 2276$; $p < 2,2 \times 10^{-16}$], enquanto para 2024 os valores foram [$H(16) = 3773$;

$p < 2,2 \times 10^{-16}$]. Dessa forma, ao nível de 95% de confiança, conclui-se que existem diferenças significativas de temperatura entre as LCZs nos dois períodos avaliados.

A análise da autocorrelação espacial da Temperatura da Superfície Terrestre foi realizada por meio do Índice de Moran (Moran's I), com o intuito de identificar a presença e a intensidade de dependência espacial entre os valores observados nos anos de 2004 e 2024. Esse índice permite mensurar o grau de similaridade entre localidades próximas, indicando se há agrupamentos de valores semelhantes (autocorrelação positiva), dispersão de valores contrastantes (autocorrelação negativa) ou distribuição aleatória (ausência de autocorrelação). Para a verificação da significância estatística dos resultados, foi aplicado o teste de permutação de Monte Carlo com 999 repetições, o que possibilitou estimar o pseudo valor de p associado a cada estimativa do Moran's I.

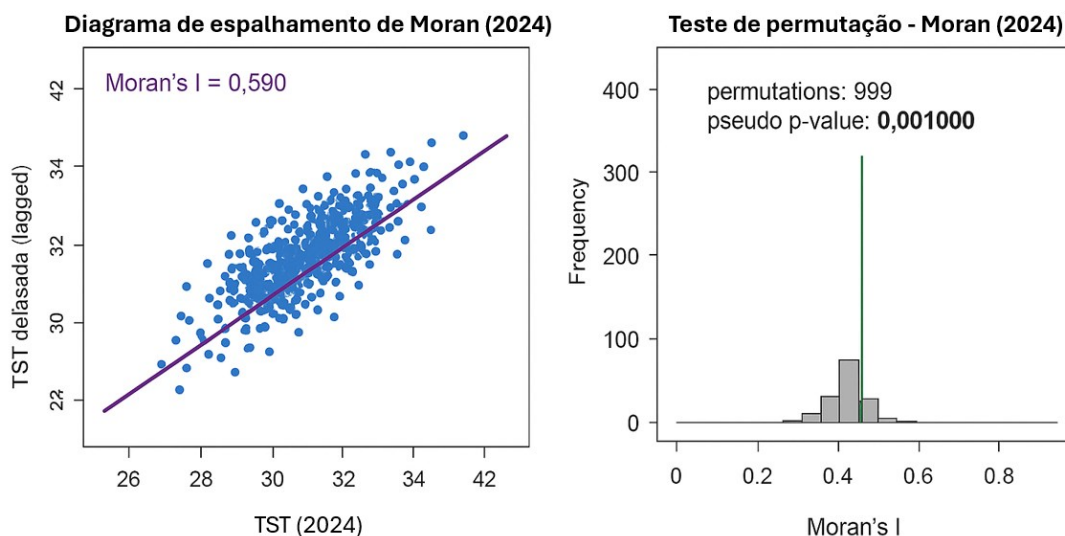
Figura 36 - Diagrama de espalhamento de Moran da TST para o ano de 2004



Fonte: Desenvolvido pela autora através do *software R*

Os resultados obtidos para o ano de 2004 revelaram um Moran's I de 0,378, evidenciando uma autocorrelação espacial positiva moderada da TST. Esse valor indica que áreas geográficas com temperaturas elevadas tenderam a se agrupar próximas a outras regiões igualmente quentes, enquanto áreas mais frias também se concentraram em zonas contíguas. O teste de permutação apresentou um pseudo valor de p igual a 0,001, o que confirma a significância estatística do índice calculado ($p < 0,01$) e rejeita a hipótese nula de aleatoriedade espacial. Dessa forma, constatou-se que a distribuição espacial da TST em 2004 não ocorreu de maneira aleatória, mas sim segundo um padrão espacial estruturado.

Figura 37 - Diagrama de espalhamento de Moran da TST para o ano de 2024



Fonte: Desenvolvido pela autora através do *software R*

Para o ano de 2024, observou-se um aumento expressivo no valor do índice, com Moran's I igual a 0,590, o que representa um fortalecimento da autocorrelação espacial positiva. Esse resultado indica que, ao longo das duas décadas analisadas, houve uma intensificação da semelhança espacial entre áreas vizinhas, sugerindo uma maior homogeneização térmica nas regiões avaliadas. O teste de permutação, novamente, apresentou um pseudo valor de p de 0,001, corroborando a robustez estatística do resultado e confirmando a existência de dependência espacial significativa.

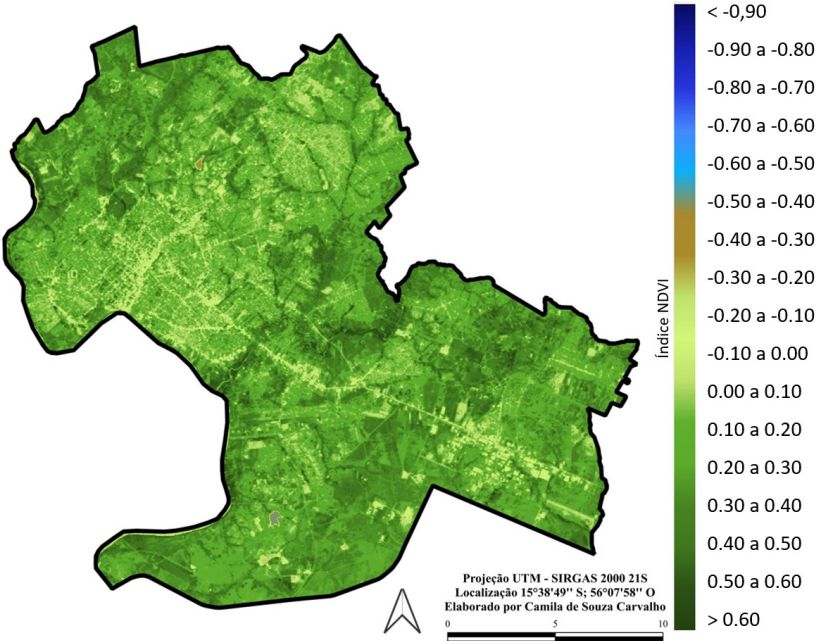
A comparação entre os dois períodos evidencia uma mudança relevante na estrutura espacial da TST. Enquanto em 2004 o padrão de autocorrelação indicava uma organização moderada, em 2024 observou-se um comportamento mais consolidado de agrupamento térmico. Essa evolução pode estar associada a fatores ambientais e antrópicos, como o avanço da urbanização, o aumento das superfícies impermeáveis, a expansão das ilhas de calor urbanas e o impacto das mudanças climáticas globais, que tendem a reduzir as variações microclimáticas e ampliar a homogeneidade térmica entre áreas próximas.

Os resultados obtidos reforçam a importância da análise espacial na compreensão das dinâmicas ambientais e climáticas regionais. O aumento da autocorrelação espacial positiva da TST entre 2004 e 2024 demonstra que as transformações no uso e cobertura da terra, aliadas a processos de aquecimento regional, influenciam de maneira significativa a organização espacial dos padrões de temperatura. Dessa forma, o Moran's I se mostra uma ferramenta eficaz para a detecção de tendências e para o monitoramento de alterações espaciais associadas às mudanças ambientais ao longo do tempo.

5.2.2 *Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)*

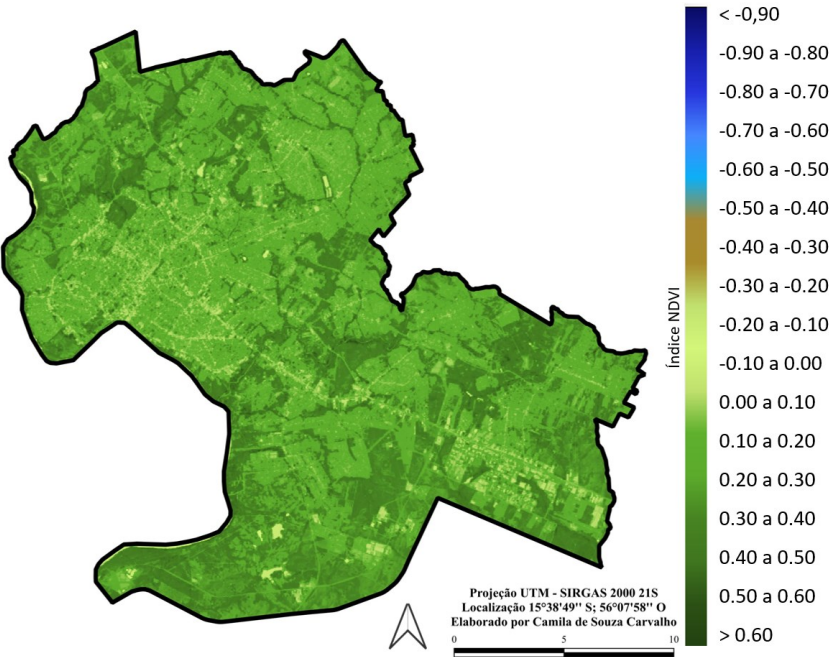
As figuras 34 e 35 apresentam o mapa temático da Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) referente à zona urbana para os anos de 2004 e 2024.

Figura 38 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada -2004



Fonte: Elaborado pela autora a partir do Landsat 5 e QGIS, 2025.

Figura 39 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - 2024



Fonte: Elaborado pela autora a partir do Landsat 8 e QGIS, 2025.

A análise dos índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para os anos de 2004 e 2024, associada à classificação das Zonas Climáticas Locais (LCZ), evidencia mudanças significativas no uso e cobertura da terra em Cuiabá ao longo de duas décadas, refletindo diretamente os efeitos do processo de urbanização sobre a estrutura ambiental do município.

Em 2004, os valores de NDVI apresentaram maior heterogeneidade espacial, com áreas periféricas exibindo índices superiores a 0,6, indicativos de vegetação densa e bem preservada. Essas áreas estavam principalmente relacionadas às classes LCZ A (árvores densas), LCZ C (arbustos) e LCZ D (plantas baixas), que se distribuem ao redor da malha urbana e em fragmentos de vegetação remanescente. Por outro lado, nas regiões centrais e mais consolidadas da cidade, observaram-se valores de NDVI inferiores a 0,3, que refletem a predominância de ambientes fortemente antropizados, representados pelas classes LCZ 2 (edifícios médios compactos), LCZ 3 (edifícios baixos compactos) e LCZ 6 (edifícios baixos esparsos). Essas tipologias urbanas caracterizam áreas de elevada impermeabilização, escassa cobertura vegetal e maior alteração microclimática.

Já em 2024, verifica-se um processo de homogeneização dos valores de NDVI, com predomínio de índices médios, entre 0,3 e 0,5, e redução significativa das áreas com vegetação mais densa ($>0,6$). Esse comportamento está diretamente associado à expansão das classes urbanas LCZ 2, LCZ 3 e LCZ 5 (grandes edifícios abertos), que avançaram sobre áreas anteriormente ocupadas por vegetação nativa ou secundária. Como consequência, observa-se a retração das classes LCZ B (árvores dispersas), LCZ C (arbustos) e LCZ D (plantas baixas), indicando a substituição gradual da cobertura vegetal por superfícies construídas e impermeáveis.

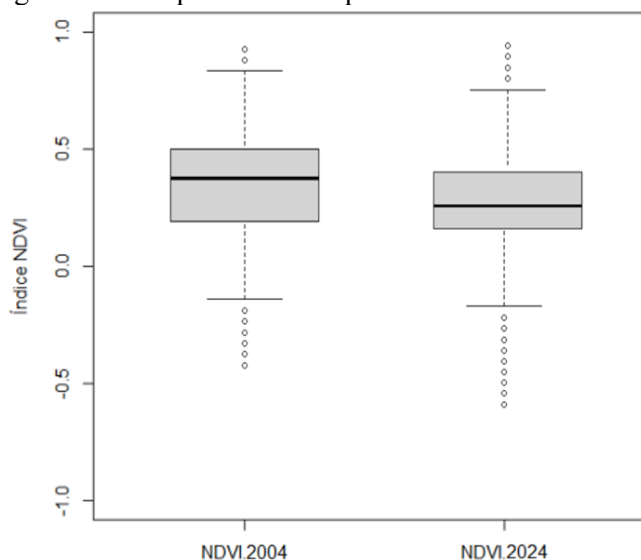
A comparação temporal evidencia que, entre 2004 e 2024, houve uma diminuição expressiva da vegetação tanto em áreas urbanas consolidadas quanto em zonas periurbanas. Essa tendência se reflete diretamente nos valores de NDVI, que passaram a indicar menor vigor vegetativo e maior uniformidade espacial, em decorrência da fragmentação e da supressão de áreas verdes. Tais alterações estão associadas ao crescimento da malha urbana, ao aumento da densidade construtiva e à intensificação da ocupação do solo.

Do ponto de vista ambiental, a redução da cobertura vegetal compromete a oferta de serviços ecossistêmicos, como a regulação térmica, a melhoria da qualidade do ar e a infiltração da água no solo. Além disso, a substituição da vegetação por superfícies impermeáveis aumenta a suscetibilidade à formação de ilhas de calor urbano, eleva os riscos de alagamentos e reduz a qualidade ambiental em escala local.

Portanto, o cruzamento entre os dados de NDVI e LCZ demonstra que a dinâmica urbana de Cuiabá no período analisado ocorreu em detrimento da vegetação, configurando um processo de transformação espacial que, caso não seja acompanhado de políticas de planejamento territorial e estratégias de manejo sustentável, tende a intensificar os impactos ambientais negativos e comprometer a resiliência da cidade frente às mudanças climáticas e ao crescimento urbano desordenado.

Conjunto dos dados da NDVI		
Item	2004	2024
Mínimo	-0,52	-0,36
Q1 (1° quartil)	0,27	0,20
Q2 (Mediana)	0,39	0,31
Q3 (3° quartil)	0,47	0,41
Máximo	0,61	0,58
IQR (Q3 – Q1)	0,23	0,24
Média	0,20	0,20
Desvio padrão	0,12	0,10

Figura 40 - Boxplot da NDVI para os anos de 2004 e 2024



Fonte – Desenvolvido pela autora através do *software R*

A análise do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para os anos de 2004 e 2024 revela variações nos padrões de vegetação ao longo desse período. Em 2004, o NDVI variou entre -0,52 e 0,61, com a mediana de 0,39 e a média de 0,20. A distribuição dos dados mostrou uma concentração dos valores entre 0,27 (primeiro quartil, Q1) e 0,47 (terceiro quartil, Q3), resultando em um intervalo interquartil (IQR) de 0,23. O desvio padrão de 0,12 indicou uma variação moderada em torno da média. A presença de um valor mínimo de -0,52 sugere áreas com vegetação escassa ou cobertas por outros tipos de superfície, como áreas urbanas ou de solo exposto, indicando uma variabilidade maior no uso da terra e no tipo de vegetação presente.

Em 2024, o NDVI apresentou um comportamento um pouco distinto. Os valores oscilaram entre -0,36 e 0,58, com a mediana ligeiramente menor, em 0,31, e a média mantida em 0,20, igual à de 2004. O primeiro quartil foi de 0,20 e o terceiro quartil de 0,41, com um IQR de 0,24, levemente maior do que o de 2004. Isso indica uma ligeira diminuição na concentração dos valores próximos à mediana, refletindo uma mudança no padrão de vegetação entre os dois períodos. O desvio padrão em 2024 foi de 0,10, o que é ligeiramente menor do que o valor

observado em 2004, sugerindo que a dispersão dos dados diminuiu, com os valores de NDVI ficando mais próximos da média.

De maneira geral, a comparação entre os dois períodos demonstra uma alteração relevante no padrão do NDVI ao longo das duas décadas. A média e a mediana indicam uma pequena redução no índice de vegetação, com a mediana caindo de 0,39 em 2004 para 0,31 em 2024. Essa mudança pode refletir uma leve redução na cobertura vegetal ou uma maior degradação da vegetação nas áreas analisadas. No entanto, o intervalo interquartil (IQR) e o desvio padrão mostram uma leve diminuição na dispersão dos dados, sugerindo que, embora tenha ocorrido uma diminuição na vegetação, a variabilidade dos valores não tenha sido significativamente afetada.

Além disso, o boxplot reforça essas mudanças, mostrando que a caixa para os dados de 2024 é um pouco mais estreita em comparação com 2004, indicando uma maior homogeneização nas áreas vegetais analisadas. Contudo, a presença de outliers em ambos os anos indica a existência de áreas com vegetação muito densa ou, ao contrário, com cobertura vegetal muito escassa.

Esses resultados sugerem uma tendência de redução da vegetação em algumas áreas ao longo do período analisado, possivelmente relacionada a fatores como mudanças no uso do solo ou expansão urbana.

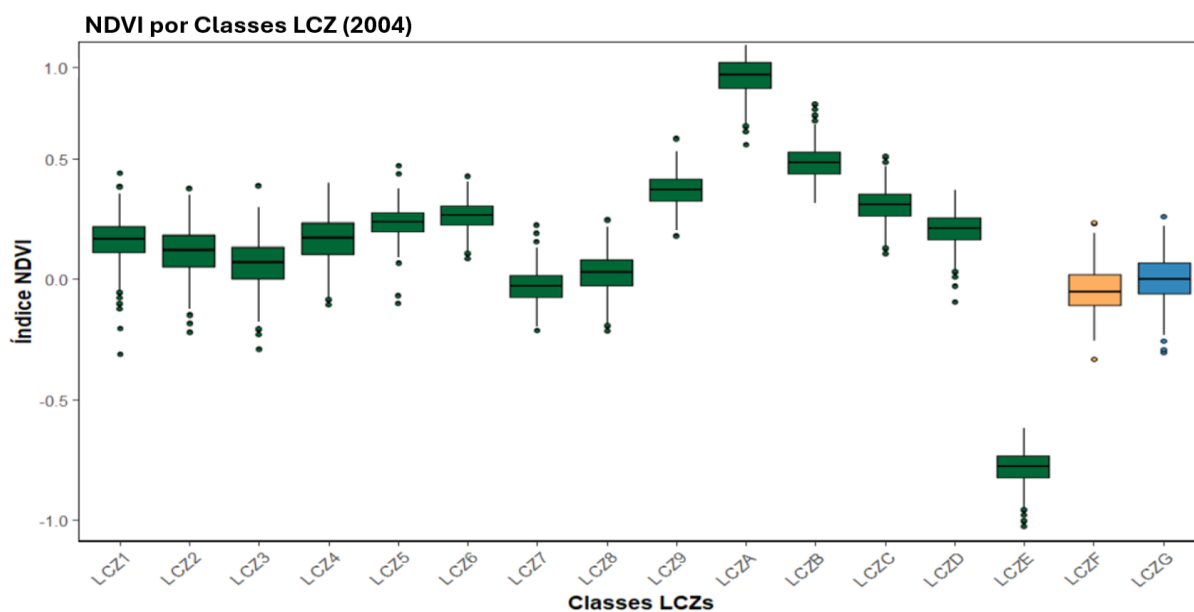
Para a análise do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), também foi realizado o teste de Kolmogorov-Smirnov, com o objetivo de avaliar a distribuição dos dados. A seguir, são apresentados os resultados desse teste estatístico para a variável NDVI nos anos de 2004 e 2024.

Em 2004, o teste de normalidade de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) foi aplicado aos dados do NDVI, resultando em uma estatística $D = 0,54032$ e valor de $p < 2,2 \times 10^{-16}$, o que indica que a distribuição dos dados se desvia significativamente da normalidade.

Para os dados de 2024, o teste de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) também foi realizado, com $D = 0,72014$ e $p < 2,2 \times 10^{-16}$, sugerindo que, assim como no ano de 2004, os dados não seguem uma distribuição normal.

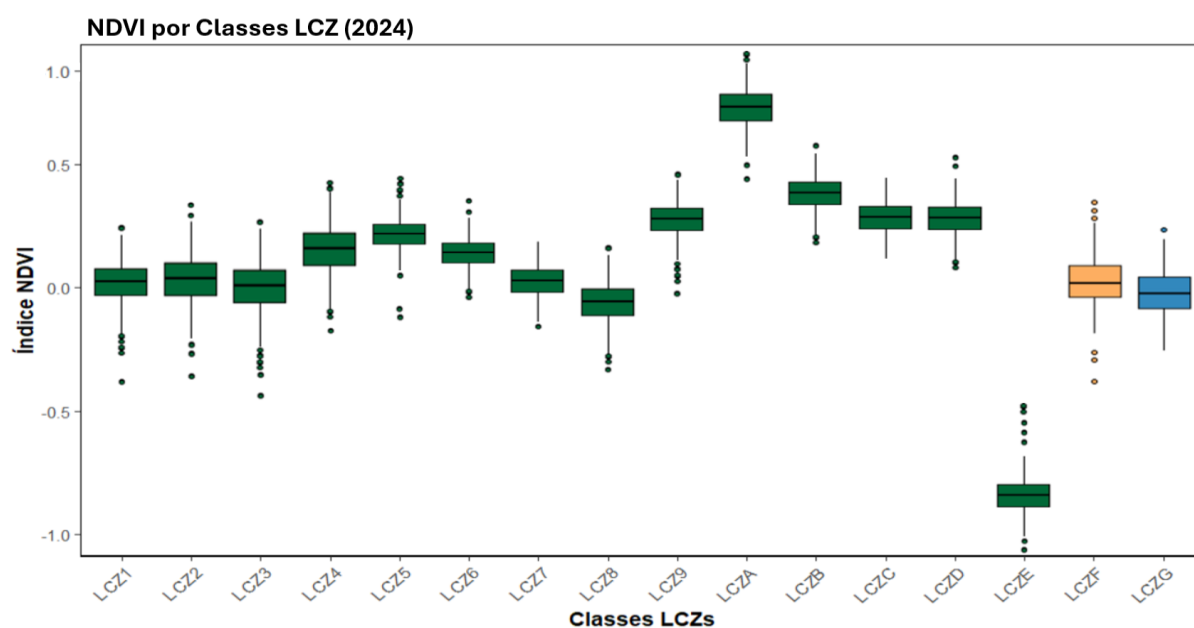
Dado que o valor de p foi inferior a 0,05 em ambos os anos, rejeitou-se a hipótese nula de que os dados seguem uma distribuição normal. Isso nos permite concluir, com 95% de confiança, que os dados do NDVI, tanto em 2004 quanto em 2024, não aderem à distribuição normal.

Figura 41 - Boxplot do NDVI das LCZs do ano de 2004



Fonte – Desenvolvido pela autora através do *software R*

Figura 42 - Boxplot do NDVI das LCZs do ano de 2024



Fonte – Desenvolvido pela autora através do *software R*

A Figura 39 apresenta a distribuição do índice NDVI para as classes LCZs referentes ao ano de 2004, enquanto a Figura 40 mostra o mesmo indicador para o ano de 2024. Em ambos os gráficos, observa-se a variação do índice de vegetação normalizada (NDVI) entre as

diferentes classes de Zonas Climáticas Locais, evidenciando o comportamento da cobertura vegetal em distintas tipologias de uso e ocupação do solo ao longo de duas décadas.

No ano de 2004, as classes associadas a áreas urbanizadas compactas como LCZ 1 a LCZ 6 apresenta valores medianos de NDVI predominantemente baixos, situando-se entre 0,1 e 0,3, o que indica uma baixa densidade de vegetação e predominância de superfícies impermeáveis, características típicas de ambientes urbanos consolidados. A dispersão dos valores dentro dessas classes revela a heterogeneidade das áreas construídas, com ocorrência de alguns outliers que sugerem pequenos fragmentos vegetados ou áreas de transição.

À medida que se avança para classes de caráter mais natural, como LCZs 8, 9 e especialmente LCZ A e LCZ B, nota-se um aumento expressivo dos valores medianos de NDVI, com médias superiores a 0,7, indicando vegetação densa e saudável, compatível com áreas florestadas e vegetação natural contínua. Já as classes relacionadas a corpos d'água como LCZ G apresentam valores negativos, coerentes com a resposta espectral típica dessas superfícies, nas quais a reflectância no infravermelho é muito baixa.

Ao se comparar os resultados de 2004 com os de 2024, verifica-se uma tendência de redução geral nos valores medianos de NDVI em algumas classes urbanas e periurbanas, sugerindo processos de adensamento urbano e supressão da vegetação ao longo do período. Essa tendência é particularmente perceptível em classes intermediárias, como LCZ 5 e LCZ 6, nas quais o deslocamento da mediana e o aumento da amplitude interquartílica indicam maior variabilidade e fragmentação da cobertura verde.

Por outro lado, observa-se que as classes de vegetação densa (LCZ A e LCZ B) mantêm altos valores de NDVI, ainda que com discreta redução, possivelmente associada à expansão de áreas antrópicas sobre bordas vegetadas ou à sazonalidade de imagens analisadas. Já as classes hídricas permanecem com valores negativos e consistentes entre os dois períodos, evidenciando estabilidade na detecção das áreas de água.

De forma geral, a comparação temporal entre os dois boxplots demonstra um padrão de redução do vigor vegetativo nas classes urbanas e manutenção relativa nas classes naturais, o que reforça o processo de urbanização e substituição da vegetação por superfícies impermeáveis entre 2004 e 2024. Essa alteração é coerente com a expansão urbana observada em diversas cidades tropicais, onde a pressão sobre as áreas verdes e a fragmentação da cobertura vegetal contribuem para a diminuição dos índices de vegetação, afetando diretamente o microclima e o conforto térmico local.

5.2.3 *Análise de correlação entre NDVI e TST*

Considerando que o NDVI influencia a TST conforme os parâmetros de cobertura identificados, avaliou-se a relação consistente entre ambas as variáveis. Observou-se que os valores médios mais frequentes de NDVI variaram de 0,31 para 2024 a 0,43 para 2004, indicativos de vegetação esparsa, como arbustos e pastagens. A seguir, são apresentados os resultados do teste estatístico para cada variável e ano analisado.

TST / NDVI – 2004

Non parametric test

data: Layer[[Field]]

Spearman, rho -0,62

TST / NDVI – 2024

Non parametric test

data: Layer[[Field]]

Spearman, rho -0,69

O coeficiente de Spearman obtido foi de -0,62 para 2004 e -0,69 para 2024, com 95% de confiança. Esses valores indicam uma correlação entre a TST (Temperatura de Superfície Terrestre) e o NDVI (Índice de Vegetação), ou seja, quando a TST aumenta, o NDVI diminui, e vice-versa.

Isso ocorre porque valores mais altos de NDVI indicam áreas com vegetação densa e saudável, como mostram as classes de cobertura do solo predominantes na área de estudo: LCZ A (vegetação arbórea densa) e LCZ B (vegetação arbórea dispersa). Já valores baixos de NDVI, especialmente abaixo de 0,30, representam regiões com pouca ou nenhuma vegetação, o que contribui para o aumento da temperatura, devido à menor capacidade dessas áreas de reter umidade e reduzir o calor.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo analisou a evolução urbana de Cuiabá - MT sob a perspectiva climática, utilizando o método das Zonas Climáticas Locais (LCZ) associado aos índices espectrais de vegetação (NDVI) e de Temperatura da Superfície Terrestre (TST), nos anos de 2004 e 2024. Por meio do sensoriamento remoto e do uso de ferramentas de geoprocessamento, foi possível identificar e quantificar as transformações ocorridas na morfologia urbana e suas repercussões no microclima local.

Os resultados obtidos evidenciam uma expansão significativa das áreas urbanizadas, especialmente das classes LCZ 3 (edifícios baixos compactos), LCZ 6 (edifícios baixos com espaço aberto) e LCZ 9 (ocupação esparsa), indicando a consolidação de um padrão de crescimento horizontal e de densidade moderada. Em contrapartida, observou-se a redução das classes naturais LCZ A (árvores adensadas), LCZ B (árvores dispersas) e LCZ C (arbustos), refletindo a substituição de áreas vegetadas por superfícies impermeáveis e construídas.

A análise comparativa entre os períodos demonstrou um aumento médio de 3,8 °C na TST e uma redução dos valores de NDVI, configurando uma correlação inversa entre temperatura e cobertura vegetal. Tais resultados confirmam o avanço do processo de urbanização sobre áreas verdes e o consequente agravamento dos efeitos de ilhas de calor urbanas.

Constatou-se, ainda, que a expansão urbana de Cuiabá ocorreu de maneira desordenada, com limitada incorporação de parâmetros climáticos e ambientais nas políticas de planejamento territorial. Apesar da existência de diretrizes no Plano Diretor, a falta de fiscalização e de articulação entre legislação urbana e estudos climatológicos tem contribuído para o agravamento das vulnerabilidades ambientais e térmicas.

Dessa forma, o estudo reforça a importância da integração entre planejamento urbano, sensoriamento remoto e climatologia, como instrumento de diagnóstico e suporte à tomada de decisão em políticas públicas. A abordagem LCZ mostrou-se uma ferramenta eficaz para a compreensão da interação entre forma urbana e clima, possibilitando a proposição de estratégias que favoreçam o conforto térmico, a sustentabilidade e a resiliência urbana.

Por fim, recomenda-se a continuidade de pesquisas que explorem a relação entre os parâmetros climáticos e sociais, bem como a ampliação do monitoramento temporal das Zonas Climáticas Locais, de modo a subsidiar práticas de planejamento urbano mais adequadas às especificidades climáticas da cidade de Cuiabá.

7 REFERENCIAS

7.1 Referências bibliográficas citadas

ALVES, E., SOUZA, G. D. S., & MARRA, R. (2011). **Êxodo e sua contribuição à urbanização de 1950 a 2010**. Revista de Política Agrícola, 20(2), 80-88.

CUNHA, J. M. P.; SILVEIRA, F. A. **Região Centro-Oeste: o esgotamento de um processo de ocupação**. Campinas: Pronex, Nepo/Unicamp, 1999. Mimeografado.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Cidades e Estados: Mato Grosso*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mt.html>_Acesso em: 15 dez. 2024.

CUNHA, J. M. P. **Dinâmica migratória e o processo de ocupação do Centro-Oeste brasileiro: o caso de Mato Grosso**. Revista Brasileira de Estudos de População, v. 23, p. 87-107, 2006.

TONIOLI, Sabrine Eduarda. **Zonas Climáticas Locais e Índices Espectrais em Várzea Grande/MT: uma Abordagem ao Planejamento Urbano**, Tese de Doutorado - Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá 2024.

MARQUES, P. M. **Análise comparativa da qualidade ambiental em área de expansão urbana na cidade de Cuiabá-MT entre os anos de 2005 e 2021**. Cuiabá, 2022.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. **Local climate zones for urban temperature studies**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (12):1879-1900, December 2012.

CAMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais**. 1999.

JÚNIOR. J.C.U.; AMORIM. M. C.C.T.; **Reflexões acerca do sistema clima urbano e sua aplicabilidade: pressupostos teórico-metodológicos e inovações técnicas**, 2016.

BRITO, E. G; SILVA, M. V. C., CRISPIM, A. B.; **Climatologia**, 2019.

AEROENGENHARIA. **O que é: condições atmosféricas**. Disponível em: <https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-condicoes-atmosfericas>.

OKE, T.R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A. e VOOGT, J. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 526p.

FIALHO, E. S. **Ilha de calor: reflexões sobre um conceito**. Revista Acta Geográfica, Boa Vista, v. 1, n. 2, Edição Especial de Climatologia Geográfica, p. 61-76, 2012a

GARTLAND, L.; **Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas**, 2008. 17p e 248p.

HOWARD, E.; **Garden Cities of To-morrow**. Edição especial, 2015.

OKE, T. R. **Towards better scientific communication in urban climate. Theoretical and Applied Climatology**. 2006.

DEMUZERE, M; KITTNER J.; BECHTEL, B. **LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps**, 2021.

NOVO, E.M.L.M; PONZONI, F.J. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**, 2001.

MENEZES, P.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: UnB, 2012. 277p

ZHOU, D.; XIAO, J.; BONAFONI, S.; BERGER, C.; DEILAMI, K.; ZHOU, Y.; FROLKING, S.; YAO, R.; QIAO, Z.; SOBRINO, J.A. **Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives**. Remote Sensing. v. 11, nº 48, p. 1 – 36, 2019.

NASA - Landsat Science. Satellites. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/> Acesso em: 13 jan. 2025

U.S. Geological Survey. Site principal do USGS. Disponível em: <https://www.usgs.gov>. Acesso em: 13 out. 2025. Acesso em: 13 jan. 2025

U.S. Geological Survey. **Landsat 5**. Disponível em: <https://www-usgs-gov.translate.goog/landsat-missions/landsat>. Acesso em: 13 jan. 2025

BURROUGH, P. A., e MCDONNELL, R. A. **Principles Geographical Information Systems**. New York: Oxford university Press. 1998.

FONSECA, S. F. D. **QGIS na Prática: Tutoriais e Aplicações**. 1. ed. [S.l.]: [s.n.], 2020.

PINHEIRO, C. de A. **Detecção remota: possibilidades para uma abordagem dinâmica e integrada do ecossistema urbano**. Revista de Morfologia Urbana, Porto, v. 9, n. 1, p.e00155. 2021. <https://doi.org/10.47235/rmu.v9i1.155>

MAIGUA, D. P. **Ciudad y Cambio Microclimático**. 2020. 322f. Tese de Doutorado Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

SANTOS, F.; OLIVEIRA, A.; NOGUEIRA, M. C.; MUSIS, C.; NOGUEIRA, J. **Análise do clima urbano de Cuiabá-MT-Brasil por meio de transectos móveis**, 2014.

SILVA, S.; RIBEIRO, D. M. **Temperatura superficial terrestre e ndvi dos bairros da área urbana de Arapiraca – AL: uma análise a partir das estatísticas zonais**. Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 24, n. 92, p. 343–355, 2023. DOI: 10.14393/RCG249264151. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/64151>. Acesso em: 6 fev. 2025.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. *Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors*. Remote Sensing of Environment, v. 113, n. 5, p. 893–903, 2009.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat 5 TM Data Users Handbook**. Sioux Falls: Department of the Interior, 2011. Disponível em: <https://www.usgs.gov>. Acesso em: 06 mai. 2025.

Toffolli, T. N. de, Junior, R. de S. R. and Ferreira, J. H. D. (2020). **Padrão Espacial do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e da Temperatura da Superfície Terrestre (TST) no Município de Campo Mourão/PR**. Anuário do Instituto de Geociências. Rio de Janeiro, BR, 42(4), pp. 182–188. doi: 10.11137/2019_4_182_188.

CONGEDO, L. **Estimativa da temperatura da superfície terrestre com Landsat e ASTER**. 2023. Disponível em: https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/en/latest/thematic_tutorial_temperature.html. Acesso em: 10 ago. 2025.

Bastiaanssen, W. G. M., et al. (1998). **A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation**. Journal of Hydrology, 212–213, 198–212.

BARBOSA, A. H. da S.; CARVALHO, R. G. de; CAMACHO, R. G. V. (2017). **Aplicação do NDVI para a Análise da Distribuição Espacial da Cobertura Vegetal na Região Serrana de Martins e Portalegre – Estado do Rio Grande do Norte**. Revista do Departamento de Geografia, 33, 128–143.

7.2 Referências bibliográficas consultadas

LIMA, L. O. S. **Análise espaço-temporal da ilha de calor urbana superficial em Várzea Grande-MT**. 2023. 89f. Tese de Doutorado - Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2023.

Prefeitura Municipal de Cuiabá. **Organização geopolítica de Cuiabá**. Instituto de Planejamento e Desenvolvimento Urbano (IPDU). Cuiabá: 2007. 130 p.

Demuzere, M., Kittner, J., Bechtel, B. (2021). **LCZ Generator: um aplicativo da web para criar mapas de Zonas Climáticas Locais**. *Frontiers in Environmental Science* 9:637455.

JACOBSON, M. Z. **Fundamentals of Atmospheric Modeling**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

TONIOLI, Sabrine Eduarda. **Zonas Climáticas Locais e Índices Espectrais em Várzea Grande/MT: uma Abordagem ao Planejamento Urbano**, Tese de Doutorado - Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá 2024.

SANTOS, A. R. **Sensoriamento Remoto no ArcGIS 10.2.2 Passo a Passo: Processamento de Imagens Orbitais** – 1. ed. Alegre: CAUFES, 2014.

PRADO, L. B.; FIALHO, E. S.; SANTOS, L. G. F.. **O sensoriamento remoto e o clima urbano: uma perspectiva de investigação através do campo térmico de superfície, na área central do município de viçosa – mg**. *Revista Brasileira de Climatologia*, [S. l.], v. 27, p. 919–946, 2021. DOI: 10.5380/rbclima.v27i0.76384. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/14302>. Acesso em: 6 fev. 2025.

Howard, Luke. **The Climate of London**. 2 vols., 1818–1820 (2ª edição em 1833). Reimpresso pela IAUC.

United States Geological Survey (USGS). **Landsat 8 (L8) Data Users Handbook**. Sioux Falls: Department of the Interior, 2021. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>. Acesso em: 06 ago. 2025.

SOUZA, J. D.; SILVA, B. **Correlação Atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5**. 2005.

GHULAM, A. **Student Handout – Calculating Temperature from Landsat 5 TM Thermal Band**. 2010. Disponível em:

https://serc.carleton.edu/files/NAGTWorkshops/gis/activities2/student_handout_calculating_t_e.pdf.

Huang, Sha; Tang, Lina; Hupy, Joseph P.; Wang, Yang; Shao, Guofan. **A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing**. Journal of Forestry Research, v. 32, n. 1, p. 1–6, 2021.

LI, Z.L; TANG, B.H; WU, H; REN, H; YAN, G; WAN, Z; TRIGO I. Z., I.F; SOBRINO, J.A. **Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives**. Remote sensing of environment, v. 131, p. 14-37, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>

GONTIJO, L. M.; RODRIGUES, C. G. **Thermal radiation and planck's formula**. 2022. Acesso em 4 jul. 2025.

PÉRICLES, C. A.; ABAR C. A. A.P. **Sobre o Boxplot no GeoGebra**. P. 13-21, 2012. Acesso em 8 jul. 2025.

RESCHENHOFER, E. **Generalization of the kolmogorov-Smirnov test**. Computational Statistics & Data Analysis. v. 24, nº 5, p. 433-441. 1996. Acesso em 10 jul. 2025.

CÂMARA, G.; CLODOVEU D.; VIEIRA, A. M. **Introdução à ciência da geoinformação - INPE**, 2001. Acesso em 15 jul. 2025

GRIFFITH, D. **Autocorrelação Espacial: Uma Introdução**. Publicações de Recursos em Geografia, Associação de Geógrafos Americanos. 1987. Acesso em 15 jul. 2025.

GOODCHILD, M. F. **Autocorrelação espacial** . Catmog 47, Geo Books. 1986. Acesso em 17 jul. 2025.

GOODCHILD, M. F. **Como funciona a autocorrelação espacial (Moran's I global)** <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/h-how-spatial-autocorrelation-moran-s-i-spatial-st.htm>. Acesso em 17 jul. 2025.

ANDRADE, L. P.; ZANGESKI N., J. W.; MUSIS, C. R.; SANCHES, L.; PEREIRA, S. P.
EFEITOS DE BORDA SOBRE O MICROCLIMA DE UM PARQUE ECOLÓGICO
URBANO EM CUIABÁ-MT. Revista Estudo & Debate, Lajeado, RS, v. 23, n. 2, 2016.

DOI: 10.22410/issn.1983-036X.v23i2a2016.1078. Disponível em:

<https://www.univates.br/revistas/index.php/estudoedebate/article/view/1078>. Acesso em: 24
set. 2025.