



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO  
AMBIENTE

ANTONIO CELSO DE SOUSA LEITE

**INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÕES REMOTAS PARA A AVALIAÇÃO DE  
SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS DA VEGETAÇÃO**

Recife - PE  
2025

ANTONIO CELSO DE SOUSA LEITE

**INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÕES REMOTAS PARA A AVALIAÇÃO DE  
SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS DA VEGETAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de doutor(a) em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de concentração: Desenvolvimento e Meio Ambiente, com a linha de pesquisa Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável.

Orientador (a): Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Josiclêda Domiciano Galvíncio.

Recife - PE

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Leite, Antonio Celso de Sousa.

Integração de informações remotas para a avaliação de serviços ecossistêmicos da vegetação / Antonio Celso de Sousa Leite. - Recife, 2025.

101f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, 2025.

Orientação: Josicléda Domiciano Galvíncio.

Inclui referências.

1. Sensoriamento Remoto; 2. Índices Espectrais; 3. Atividades Ecossistêmicas. I. Galvíncio, Josicléda Domiciano. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

ANTONIO CELSO DE SOUSA LEITE

**INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÕES REMOTAS PARA A AVALIAÇÃO DE  
SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS DA VEGETAÇÃO**

**Banca Examinadora**

Aprovado em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Josiclêda Domiciano Galvâncio (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jarcilene Silva de Almeida (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria José Nascimento Soares (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Sergipe – UFS

---

Prof. Dr. Antonio Joaquim da Silva (Examinador Externo)  
Instituto Federal do Piauí- IFPI

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Bruna de Freitas Iwata (Examinador Externo)  
Instituto Federal do Piauí- IFPI

**SUPLENTES:**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Werônica Meira de Souza (Examinador Interno)  
Universidade Federal do Agreste Pernambucano - UFAPE

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Élida Maria Cardoso de Brito (Examinador Externo)  
Instituto Federal do Piauí - IFPI

Aos meus filhos, Cauã e Téo, e minha esposa Jeneildes,  
que esteve sempre ao meu lado para eu chegar aqui.

*Dedico*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Divino e Grande Mestre, pela vida, saúde e força para superar os desafios desta caminhada, no qual vejo esse momento de ligação com o superior essencial nessa etapa da minha vida.

Aos meus familiares, em especial Jeneildes, Cauã e Téo, pelo amor incondicional, incentivo e compreensão durante os momentos de ausência e dedicação à pesquisa.

À orientadora, Profa. Dra. Josiclêda, pela orientação competente, paciência, confiança e ensinamentos que contribuíram para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), pelos conhecimentos compartilhados e pelas valiosas contribuições para a construção deste trabalho.

Aos colegas e amigos de jornada, que, de diferentes formas, estiveram presentes com palavras de apoio, parcerias e companheirismo ao longo desta etapa, em especial aos amigos Ulisses Alencar Bezerra, Fernando Antonio Marçal Garcia e Simone de Paula Silva, aos quais, sempre que solicitados, prontamente se dispuseram a colaborar com as demandas acadêmicas.

À instituição Universidade Federal de Pernambuco, pela oportunidade de realização deste curso e pelo apoio acadêmico e estrutural.

## **RESUMO**

Com o crescimento populacional, os impactos ambientais em escala local e global têm se intensificado, sendo potencializados pela ação antrópica, comprometendo a degradação dos recursos naturais, refletindo na qualidade ambiental e de vida da população, evidenciando a urgência da aplicação de tecnologias voltadas ao monitoramento da biosfera e dos ecossistemas. Diante desse cenário, o objetivo geral desta tese é investigar os serviços ecossistêmicos associados às funções da cobertura vegetal, empregando técnicas de sensoriamento remoto no perímetro urbano de Teresina-PI. Para tanto, foram realizadas extrações de informações a partir de dados obtidos por drones e de imagens de satélites orbitais, com a finalidade de identificar os serviços ecossistêmicos convergindo com a literatura existente, bem como a espacialização desses serviços através do mapeamento realizado, focando a cobertura verde urbana. Os resultados apresentados em artigos decorrentes desta pesquisa, destacaram que a partir de dados remotos foram identificados índices espectrais mais adequados a detecção de áreas com cobertura vegetal. Em outro estudo, identificaram-se tipos específicos de serviços ecossistêmicos em áreas urbanas, os quais foram caracterizados com base na literatura e mapeados, além de avaliar os impactos decorrentes do uso e cobertura da terra sobre esses serviços. Conclui-se, portanto, que a análise da cobertura arbórea, por meio de técnicas de mapeamento, constitui um instrumento essencial para o monitoramento do desenvolvimento urbano, contribuindo para um planejamento territorial mais ordenado e orientado à conservação ambiental.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto. Índices Espectrais. Atividades Ecossistêmicas.

## ABSTRACT

With population growth, environmental impacts at both local and global scales have intensified, being further exacerbated by anthropogenic actions, which contribute to the degradation of natural resources, thereby compromising environmental quality and human well-being. This situation highlights the urgency of applying technologies aimed at monitoring the biosphere and ecosystems. In this context, the general objective of this thesis is to investigate the ecosystem services associated with vegetation cover functions, employing remote sensing techniques within the urban perimeter of Teresina, Brazil. To this end, information was extracted from data obtained by drones and orbital satellite imagery, with the purpose of identifying ecosystem services in line with the existing literature, as well as spatializing these services through mapping, with emphasis on urban green cover. The results, presented in articles derived from this research, revealed that remote sensing data allowed the identification of spectral indices most suitable for detecting areas of vegetation cover. In another study, specific types of ecosystem services in urban areas were identified, characterized based on the literature, and spatially mapped, in addition to assessing the impacts of land use and land cover on these services. It is concluded, therefore, that the analysis of tree cover, through mapping techniques, constitutes an essential tool for monitoring urban development, contributing to more orderly territorial planning and to environmental conservation.

**Keywords:** Remote Sensing. Spectral Indexes. Ecosystem Activities.

## LISTA DE FIGURAS

### TESE

Figura 1 -	Relações estabelecidas no conceito de Ecologia de Paisagem....	23
Figura 2 -	Potencialização dos Serviços Ecossistêmicos.....	28
Figura 3 -	Diferentes comportamentos espectrais dos objetos.....	31
Figura 4 -	Mapa de localização da área do estudo.....	35

#### CAPÍTULO 1 - ARTIGO 1: EFICIÊNCIA DE ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO NO MAPEAMENTO DA COBERTURA ARBÓREA COM FOCO NA CLASSIFICAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

Figura 1 -	Mapa de localização de Teresina-PI.....	40
Figura 2 -	(A) Divisão das Zonas Urbanas de Teresina, (B) Núcleo Urbano Dandara dos Cocais e (C) recorte espacial da quadra utilizada para geração dos dados.....	41
Figura 3 -	Fluxograma dos métodos realizados.....	42
Figura 4 -	Pontos de controle obtidos no campo e mostrados na realização do processamento.....	43
Figura 5 -	Histogramas de frequências do (A) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e (B) Índice de Folha Verde (GLI).....	46
Figura 6 -	Carta imagem do (A) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e (B) Índice de Folha Verde (GLI).....	47
Figura 7 -	Pontos amostrais localizados nas cartas com (A) Composição colorida, (B) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e (C) Índice de Folha Verde (GLI).....	49
Figura 8 -	Comportamento espectral de algumas áreas tendo como referência a imagem de (A) composição colorida e suas análises correspondentes ao (B) NDVI e (C) GLI.....	51
Figura 9 -	A) Fragmentos de NDVI extraídos por métrica de paisagens. B) Imagem colorida representando a vetorização do dossel da vegetação. C) Fragmentos de GLI extraídos por métrica de paisagens.....	52

#### CAPÍTULO 2 - ARTIGO 2: USO DA GEOTECNOLOGIA NA AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS NA FORMAÇÃO FLORESTAL EXISTENTE NA ZONA URBANA DE TERESINA.

Figura 1 -	Localização de Teresina.....	69
Figura 2 -	Delineamento da pesquisa.....	70
Figura 3 -	Micro classes observadas na área do estudo.....	71
Figura 4 -	Classes de uso e cobertura da terra entre os anos de 2016 e 2023 .....	72
Figura 5 -	Alteração das classes referente aos anos de 2016 e 2023.....	74
Figura 6 -	Mapeamento e checagem dos serviços ecossistêmicos.....	77
Figura 7 -	Registro nas áreas categorizadas como Florestas e relação com os serviços ecossistêmicos investigados conforme a literatura –	

	(A) Ponto 1, (B) Ponto 2, (C) Ponto 3, (D) Ponto 4 e (E) Ponto 5	79
Figura 8 -	Mapa comparativo relacionando a Temperatura da Superfície com os dados do MapBiomas.....	82
Figura 9 -	Influência da cobertura verde na amenização da temperatura em meio aos fenômenos de ilhas de calor.....	83

## **LISTA DE TABELAS**

### **TESE**

Tabela 1 - Funções e Serviços Ecossistêmicos.....	26
---	----

#### **CAPÍTULO 1 - ARTIGO 1: EFICIÊNCIA DE ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO NO MAPEAMENTO DA COBERTURA ARBÓREA COM FOCO NA CLASSIFICAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS**

Tabela 1 - Estatísticas dos índices.....	45
Tabela 2 - Pontos amostrais com as respostas espectrais dos índices.....	50
Tabela 3 - Quantificação das classes comparando os índices estudados.....	53
Tabela 4 - Classificação dos serviços e funções ecossistêmicas da biomassa conforme a CICES.....	54

#### **CAPÍTULO 2 - ARTIGO 2: USO DA GEOTECNOLOGIA NA AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS NA FORMAÇÃO FLORESTAL EXISTENTE NA ZONA URBANA DE TERESINA.**

Tabela 1 - Categorização dos Serviços Ecossistêmicos MEA × TEEB × CICES.....	67
Tabela 2 - Área das classes para os anos de 2016 e 2023.....	75
Tabela 3 - Serviços Ecossistêmicos ofertados pela Classe Florestal conforme o CICES.....	84

## **LISTA DE QUADROS**

### **CAPÍTULO 1 - ARTIGO 1: EFICIÊNCIA DE ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO NO MAPEAMENTO DA COBERTURA ARBÓREA COM FOCO NA CLASSIFICAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS**

Quadro 1 - Índices de Vegetação aplicados no estudo.....	44
--	----

### **CAPÍTULO 2 - ARTIGO 2: USO DA GEOTECNOLOGIA NA AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS NA FORMAÇÃO FLORESTAL EXISTENTE NA ZONA URBANA DE TERESINA.**

Quadro 1 - Resultados chaves do estudo Millennium Ecosystem Assessment – MEA.....	65
Quadro 2 - Serviços de Regulação a partir de áreas urbanas citadinas.....	68
Quadro 3 - Tipo de Serviço Ecossistêmico e exemplo visto na área do estudo.....	78

## **LISTA DE SIGLAS**

ARP	Aeronaves Remotamente Pilotadas
BLUE	Blue (Azul)
CICES	Common International Classification of Ecosystem Services
GLI	Green Leaf Index (Índice de Folha Verde)
GREEN	Green (Verde)
GSD	Ground Sample Distance (Distância de amostra do solo)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
InVEST	Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs
LecoS	Landscape Ecology Statistics
MEA	Millennium Ecosystem Assessment
NATCAP	Natural Capital Project
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)
NIR	Near-Infrared (Infravermelho-próximo)
ONU	Organização das Nações Unidas
PSA	Pagamento por serviços ambientais
RED	Red (Vermelho)
RGB	Red, Green, Blue (Vermelho, Verde, Azul)
RPA	Remotely Piloted Aircraft
SA	Serviços Ambientais
SE	Serviços Ecossistêmicos
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SRO	Sensoriamento Remoto Óptico
SR	Sensoriamento Remoto
TEEB	Economics of Ecosystems and Biodiversity
VANT	Veículo Aéreo não tripulado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	19
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>20</b>
3.1	MUDANÇA DA PAISAGEM POR AÇÕES ANTRÓPICAS.....	20
3.1.1	Ecologia de Paisagem e Serviços Ecossistêmicos Fundamentos e Definições.....	22
3.1.2	Informações do Sensoriamento Remoto – Meios de Aquisição.....	29
3.1.2.1	Tendências dos Serviços Ecossistêmicos através das informações espaciais.....	32
3.1.2.2	Análise de áreas espacialmente vegetadas.....	33
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
4.1	Área do Estudo.....	35
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>CAPÍTULO 1 - EFICIÊNCIA DE ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO NO MAPEAMENTO DA COBERTURA ARBÓREA COM FOCO NA CLASSIFICAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS.....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>CAPÍTULO 2 - ARTIGO 2: USO DA GEOTECNOLOGIA NA AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS NA FORMAÇÃO FLORESTAL EXISTENTE NA ZONA URBANA DE TERESINA.....</b>	<b>61</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>90</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Divisão de População das Nações Unidas, estima que a população global irá atingir a marca de 10 bilhões de habitantes no ano de 2080, e considerando o cenário atual, as áreas urbanas têm se destacado com percentual maior de regiões povoadas mundialmente, com 54% da população mundial residindo nessas áreas, e possui um aumento previsto para mais de 2 bilhões até 2050, estimando um percentual de 66% da população mundial que viverá futuramente nas regiões urbanas (ONU, 2022).

Nesse sentido, no Brasil, historicamente caracterizado como um país predominantemente povoado no meio agrário e rural, destaca-se que nos últimos 60 anos o crescimento acelerado das cidades tem mudado esse cenário de predominância da população rural, apontando um percentual de 85% da população total do país que vive nas áreas urbanas (IBGE, 2010).

No Censo de 2022, 177,5 milhões de pessoas viviam em áreas urbanas e 25,6 milhões em áreas rurais, significando que a taxa de urbanização do Brasil é de 87,4%, o número é mais alto do que em 2010, seguindo uma tendência histórica de urbanização (IBGE, 2022).

Dessa forma, o crescimento populacional favorece uma expansão com o tecido urbano agregado em áreas naturais na sua configuração, necessitando, dessa forma, de planejamento e gestão urbana sustentáveis. Nesse sentido, considerando que o meio natural propicia uma boa qualidade de vida para a população, nota-se um crescimento nas mudanças do uso da terra promovido pela urbanização, causando uma crescente preocupação a cientistas e gestores urbanos (Carneiro, Espíndola e Lopes, 2021).

Sob esse viés, com o crescimento populacional, os impactos ambientais locais e globais têm aumentado e, associados a ação humana, contribuem para desastres naturais e mudanças na temperatura global. Logo, as supracitadas alterações afetam negativamente a saúde, o meio ambiente, a sociedade e a economia. Além disso, a rápida urbanização, a exemplo da ampliação da malha viária, da construção de edifícios, indústrias e estradas, altera o equilíbrio energético da superfície terrestre, modificando a absorção e reflexão da radiação solar (Galvâncio, 2019; Santos *et al.*, 2020).

Nessa linha, a degradação dos recursos naturais resulta na perda da qualidade ambiental e diminuição da qualidade de vida da população, tornando urgente a

aplicação de tecnologias que auxiliem no monitoramento da biosfera e dos ecossistemas nela contidos. Um exemplo de tecnologia de monitoramento é o Sensoriamento Remoto (SR), definido por Moreira (2011) como a medição da radiação eletromagnética, que interage com os alvos presentes na superfície terrestre, através da radiação emitida ou refletida por esses alvos. Dessa maneira, a radiação é capturada remotamente por um sensor, gerando informações, traduzidas em imagens orbitais, capazes de serem interpretadas para monitorar o ambiente.

Assim, as interações da radiação eletromagnética oferecem oportunidades para analisar e monitorar o meio ambiente. Nesse sentido, a análise desse fenômeno permite observar mudanças no uso e na ocupação do solo, em diversas escalas, por utilizar índices espectrais para identificar áreas que sofreram grandes alterações. Exemplificando os parâmetros mencionados, os índices de vegetação podem ser empregados para essa finalidade (Pereira *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2020).

Nessa perspectiva, na literatura, alguns estudos exploraram a interação das radiações para o mapeamento e análise dos serviços ecossistêmicos (SE), esses serviços, oferecidos naturalmente pelos ecossistemas, proporcionam diversas funções, como a preservação da biodiversidade, a regulação do ciclo hidrológico, a minimização da poluição atmosférica e climática, a redução da poluição sonora e a oferta de lazer, entre outros, essenciais ao bem-estar humano (Huang *et al.*, 2020; Errea, 2021).

Ademais, buscando compreender as principais questões sobre o tema e os avanços de mecanismos que possam subsidiar tais serviços, Saad *et al.* (2018) destacam em sua pesquisa o uso do Sensoriamento Remoto, dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e a modelagem computacional para compreender diferentes estratégias de restauração e oferta de serviços ecossistêmicos.

Sob essa ótica, em estudo subsequente, foi realizado o mapeamento detalhado do serviço ecossistêmico de sequestro de carbono na cobertura florestal do Parque Estadual Mata do Pau-Ferro e sua zona de amortecimento, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e análise espacial. Os resultados obtidos mediante a realização desse estudo têm implicações diretas para a gestão e conservação de áreas protegidas, através da formulação de políticas públicas voltadas à proteção ambiental e ao uso sustentável dos recursos naturais, com base nos dados obtidos na pesquisa (Campos; Lima; Costa, 2023).

Portanto, ao utilizar e integrar dados de sensoriamento remoto no estudo em

questão, foi viável observar os serviços ecossistêmicos provenientes da vegetação, a exemplo dos serviços de regulação da temperatura urbana, e executado em consonância com a qualidade descrita, a pesquisa poderá contribuir para a literatura acadêmica, acrescendo-a de informações a respeito dos serviços ecossistêmicos. Nesse sentido, poderão ser oferecidos dados e análises que serão úteis em pesquisas de diversas áreas do conhecimento, em especial, aquelas relacionadas ao planejamento territorial, destacando, portanto, a importância da pesquisa para a compreensão e valorização dos serviços ecossistêmicos provenientes da vegetação.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta tese envolve investigar os serviços ecossistêmicos relacionados às funções da cobertura vegetal, utilizando-se do sensoriamento remoto no perímetro urbano de Teresina-PI.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Utilizar dados de tecnologias remotas, como imagens de Satélites Orbitais e de Drones para extração de informações relacionadas aos serviços ecossistêmicos da cobertura vegetal da área urbana de Teresina-PI;
- b. Produzir mapas que representem a relação entre a cobertura de formação florestal e savânica e os serviços ecossistêmicos provenientes da vegetação;
- c. Identificar os principais serviços ecossistêmicos ofertados pelos fragmentos de formação florestal e savânica, tendo como base a literatura existente que aborda a temática, além de averiguar a degradação de áreas verdes e possíveis impactos em relação aos serviços ecossistêmicos, quando alteradas essas áreas.

## 2.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho aborda na sua parte introdutória o aumento populacional e sua relação direta com a urbanização, que por sua vez, afeta os ecossistemas naturais, resultando na perda da qualidade ambiental, onde o uso de tecnologias espaciais que obtém dados da superfície terrestre de forma remota, podendo auxiliar no monitoramento do ambiente para efetiva tomada de decisão.

O referencial teórico trata das questões das mudanças da paisagem pelas atividades antrópicas executadas, além do que tratou a respeito do conceito de Ecologia de Paisagem, sendo essa definida como a aplicação da ciência para fins de investigação da paisagem e suas mudanças. Também, a pesquisa discorre sobre os Serviços Ecossistêmicos, mostrando os principais tipos de serviços existentes conforme o embasamento literário. Ainda, esse elemento textual, aborda aplicações de tecnologias remotas para investigação da superfície terrestre, como foi mostrado através de algumas pesquisas realizadas e publicadas, quando usada imagens de satélites e drones e através das análises realizadas por índices espectrais.

A tese está organizada na forma de artigos. O primeiro capítulo traz a utilização de índices espectrais mais apropriados para mapeamento do dossel vegetal, sendo esse componente ambiental provedores de alguns serviços ecossistêmicos. Esse estudo é importante, pois ao ser realizado se utilizando de índices espectrais de vegetação, destacam as características do comportamento de uma determinada cobertura vegetal, colaborando no mapeamento desses recursos naturais e prevendo o planejamento urbano alinhado com a preservação ambiental que culmina na oferta de serviços e funções ecossistêmicas. No segundo capítulo, o artigo abordado na tese retrata o mapeamento dos serviços ecossistêmicos, tendo a referência de bases espaciais obtidas por satélites, bem como a identificação dos serviços prestados, associando com a literatura, e a viabilidade de investigação da oferta ou não de algum serviço, quando analisado o cenário de alteração na área investigada através de uma análise temporal.

A pesquisa de tese é encerrada com as conclusões gerais, onde este trabalho procura contribuir para aplicações de dados remotos para identificar os tipos de serviços promovidos em determinadas áreas, favorecendo a ampliação de estudos nas áreas de ciências ambientais.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 MUDANÇA DA PAISAGEM POR AÇÕES ANTRÓPICAS

A industrialização e comercialização estão entre as atividades humanas que impulsionam a urbanização, resultando no crescimento rápido da população urbana e, consequentemente, favorecendo mudanças no uso e cobertura do solo (Silva *et al.*, 2011; Oliveira, 2012). Nesse sentido, Jesus (2010) destaca que as mudanças da superfície terrestre vêm sendo potencializadas, historicamente, pelas ações antrópicas, que se tornam cada vez mais participativas no processo de alteração do uso e cobertura do solo, destacam-se as atividades de impermeabilização do solo e canalização do escoamento superficial.

O crescimento acelerado da população mundial, especialmente em países em desenvolvimento, impulsiona a expansão das áreas urbanas e as ações antrópicas. Atualmente, as cidades representam a principal forma de organização social humana, gerando transformações no uso da terra, bem como alterações econômicas e demográficas que afetam ecossistemas naturais e impactam negativamente as biotas e populações locais (Cunha, 2023).

A título de exemplo dos efeitos da ação antrópica negativa, cita-se o aquecimento urbano, responsável por causar a liberação de calor em atividades como a queima de combustíveis fósseis e a impermeabilização do solo. Dessa forma, materiais como concreto e asfalto contribuem para esse problema, absorvendo grande parte da radiação solar e aquecendo o ar através da troca de calor com a atmosfera, e sem medidas mitigadoras, o acúmulo excessivo de calor nas cidades pode causar desconforto térmico severo, prejudicando a qualidade de vida e representando um desafio ambiental significativo (Cunha, 2023).

Ademais, Gheyi *et al.* (2012), tratando a respeito das alterações que atuam na modificação dos ambientes naturais, mencionaram que o comprometimento natural do ambiente em virtude de chuvas irregulares e das altas taxas de evaporação são possíveis agravantes para a dinâmica hídrica e da paisagem. Além disso, as ações humanas, caracterizadas pela utilização em excesso do uso e ocupação do solo em áreas urbanas e da exploração de recursos naturais desordenadamente nessas regiões, não obedecendo a um planejamento urbano e ambiental, contribuem para o agravamento desse fenômeno.

Brayn (1996) destaca o conceito de paisagem apontando-a como a observação e compreensão integrada da terra, incluindo flora, fauna, rochas, solos, formas de relevo, água e usos humanos do ambiente, proporcionando ao observador, direta ou indiretamente, a oportunidade de analisar esses aspectos da Terra e suas inter-relações no espaço, empregando o uso de mapas temáticos, fotos aéreas ou imagens de satélites. Assim, ao observar alguns conceitos de paisagens, noções dessa temática podem ser delineadas, como a exemplo de uma compreensão integrada da realidade, envolvendo relações espaciais diversas que são modificadas ao longo do tempo.

Ferreira (2004), por sua vez, caracteriza a paisagem no contexto relacionado às mudanças do ambiente em virtude das interações antrópicas, destacando a etimologia da palavra, que em francês, *pays*, significa território ou país, que remete a região, pátria ou lugar, e o sufixo nominal *age*, significando ação ou resultado de ação, considerando, dessa forma, a palavra paisagem como a transformação de territórios por meio da ocorrência de processos dinâmicos antrópicos.

Desse modo, Martins *et al.*, (2004) mostram as ações antrópicas como um agente fundamental na transformação da paisagem, através das suas atividades, principalmente com o desenvolvimento da tecnologia. Nessa linha, é possível citar, por exemplo, as modificações em áreas de cobertura vegetal utilizando maquinário, que, por sua vez, afetam o funcionamento hídrico do solo e os ciclos biogeoquímicos, engendrando problemas ambientais de escala regional e acelerando as mudanças climáticas globalmente.

Consequentemente, as relações do ser humano com a natureza promovem o surgimento de ambientes construídos, dentre os quais se têm as cidades, resultado de uma mudança permanente, caracterizadas por apresentar uma diversidade de habitats. Nesse cenário, os objetos da paisagem urbana são edificações, imóveis, arborização em áreas públicas e privadas, ruas e avenidas pavimentadas, superfícies hídricas artificiais, entre outros (Martins *et al.*, 2020).

### **3.1.1 Ecologia de Paisagem e Serviços Ecossistêmicos – Fundamentos e Definições**

A Ecologia de Paisagem trata-se de uma área do conhecimento que visa estudar diversas ciências que investigam a paisagem, objetivando uma compreensão mais abrangente dos aspectos ecológicos e suas mudanças espaciais ao longo do tempo (Farina, 1988; Antrop; Van Eetveld, 2000). Dentre as abordagens da Ecologia de Paisagem, na estrutura territorial, a ação decorrente da articulação entre natureza e ocupações humanas, destaca-se, por permitir a compreensão da integridade ecológica, seja por meio das dinâmicas ambientais naturais ou dos distúrbios antrópicos (Firehock; Walker, 2019).

A Ecologia de Paisagens é o campo que investiga a estrutura, a função e a dinâmica de áreas compostas por diversos ecossistemas heterogêneos. Essa disciplina combina o estudo funcional da ecologia com análises espaciais geográficas, se concentrando na relação espacial entre as diferentes unidades da paisagem, explorando as interações entre manchas próximas, além das conexões entre matriz, manchas e corredores (Nascimento, 2023).

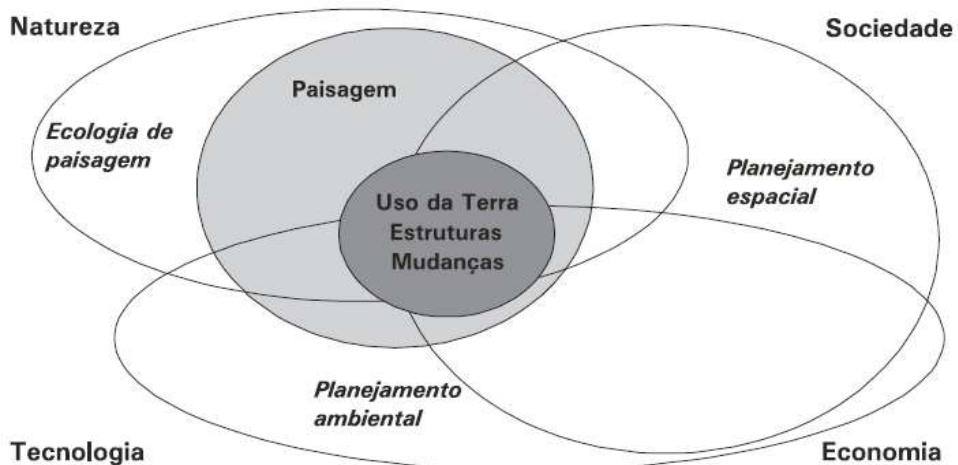
Dessa maneira, a Ecologia de Paisagem trata a paisagem como um sistema composto por diversas escalas e arranjos ecossistêmicos. Tendo como principais características a estrutura, que se refere ao arranjo espacial de recursos naturais, como as áreas vegetadas; a função, que contempla o movimento de energia, matéria e seres vivos nas estruturas naturais; e a mudança, que se refere às alterações no padrão espacial e nas funções naturais ao longo do tempo (Forman; Godron, 1986; Pellegrino, 2000).

A Ecologia de Paisagens busca compreender as causas e os efeitos da heterogeneidade ou dos padrões espaciais nos processos ecológicos, incluindo os serviços ecossistêmicos. Esses serviços, que representam os benefícios fornecidos pela natureza à sociedade humana, englobam o fornecimento de energia, biomassa, água e lazer, além da manutenção da qualidade do habitat, solo e retenção hídrica. Também desempenham papel importante em atividades de pesquisa, educação, proteção do solo, controle de pragas e qualidade da água (Nascimento, 2023).

Nessa perspectiva, a inter-relação entre diversas áreas do conhecimento também é destacada no conceito de Ecologia de Paisagem (Figura 1). Desse modo,

a imagem destaca que ecólogos e planejadores da paisagem utilizam a terra, a estrutura da paisagem e os padrões de mudança como elementos de interseção presentes em diferentes âmbitos, como natureza, sociedade, tecnologia e economia (Antrop, 2001).

Figura 1 – Relações estabelecidas no conceito de Ecologia de Paisagem



Fonte: Antrop (2001).

Sob esse viés, Spirn (1995) relata que o uso da terra, com seus diferentes padrões de ocupação do solo, cria condições que podem facilitar ou dificultar o acesso aos chamados serviços ecossistêmicos. Assim, a relação entre ecossistemas e as diversas formas de ocupação humana reflete na qualidade de vida da sociedade e da natureza ao longo do tempo, exigindo constantemente a consideração dos conhecimentos sobre os ecossistemas e suas dinâmicas de funcionamento, para proporcionar uma gestão territorial eficaz do uso e ocupação do solo.

Nesse sentido, o conceito de Serviços Ecossistêmicos (SE) ou Serviços Ambientais (SA) tem ganhado destaque nas agendas governamentais, nos debates ambientais e nas ações de organizações civis que buscam mitigar os conflitos entre a sociedade e as questões ambientais. À vista disso, os serviços ressaltam a importância da interconexão entre o meio ambiente, a economia e a sustentabilidade, ao evidenciar as relações entre o funcionamento dos ecossistemas e as necessidades humanas de subsistência e bem-estar (Ferraz et al., 2019).

Dessa forma, os serviços ecossistêmicos referem-se aos benefícios fornecidos pelos ecossistemas naturais e pelas espécies que os formam, essenciais para manter as condições necessárias à sobrevivência humana na Terra. Nesse

contexto, tanto os ecossistemas naturais quanto os modificados pelo ser humano fornecem recursos e serviços ecossistêmicos, sendo o termo "serviços" usado para descrever tanto os benefícios tangíveis quanto os intangíveis provenientes da natureza, frequentemente divididos em "bens" e "serviços", respectivamente (Hinata, 2023).

As alterações nos serviços ecossistêmicos impactam o bem-estar humano de diversas maneiras, o que envolve múltiplos aspectos, como os recursos necessários para uma vida digna, a liberdade de fazer escolhas, a saúde, relações sociais positivas e a segurança. Ele pode ser visto como o oposto da pobreza, que é caracterizada pela "privação acentuada de bem-estar". Assim, os elementos que compõem o bem-estar, como são experimentados e percebidos pelas pessoas, dependem do contexto, refletindo fatores como a localização geográfica, a cultura e as condições ecológicas (Hinata, 2023).

Embora não exista um conceito único de serviços ecossistêmicos, amplamente na literatura, é possível encontrar diferentes definições propostas pelos autores, conforme os exemplos de maior destaque relacionados a seguir: Segundo Daily (1997), os serviços ecossistêmicos englobam os processos e condições originados dos ecossistemas naturais e das espécies que os integram, os quais são essenciais para sustentar e preservar a vida humana.

O Millennium Ecosystem Assessment – MEA (2005), definem os serviços ecossistêmicos como algo que representam os benefícios que os ecossistemas fornecem às pessoas. Também é possível citar a compreensão proporcionada por FAO (2007), que esclarece que os serviços ambientais envolvem uma parte específica dos serviços ecossistêmicos, definidos como externalidades positivas.

Ademais, segundo Farley (2012), os serviços ecossistêmicos consistem em elementos do ecossistema que podem ser usados ou consumidos para gerar o bem-estar humano. Por fim, alinhado as declarações anteriores, de acordo com o GVCES (2015), os ecossistemas oferecem contribuições, tanto diretas quanto indiretas, que promovem o bem-estar humano.

Portanto, partindo dos diversos conceitos de serviços ecossistêmicos, observa-se haver, como resultado em comum, a existência de definições que promovam o bem-estar humano. Nesse sentido, os serviços ecossistêmicos requerem uma compreensão das relações entre as funções dos ecossistemas e demandas para a manutenção da sociedade humana, no tocante aos processos de tomada de decisão,

planejamento e desenvolvimento sustentável (Fisher *et al.*, 2009).

Sob essa ótica, os serviços ecossistêmicos, essenciais para a sociedade, foram inicialmente organizados em 17 categorias principais e, posteriormente, a Avaliação Ecossistêmica do Milênio classificou esses serviços em quatro grupos: culturais, de suporte, de provisão e de regulação, com foco deste estudo nos dois últimos. Os serviços de provisão incluem recursos naturais como alimentos, água, madeira, fibras, bioquímicos e energia. Por outro lado, os serviços de regulação ajudam a manter o equilíbrio dos ecossistemas, abrangendo regulação climática, controle hídrico, polinização e manejo de doenças, conforme afirma Nascimento (2023).

Assim, o entendimento das funções dos ecossistemas é abordado no conceito proposto por De Groot *et al.* (2002), que discute como a capacidade de promover bens e serviços por meio da natureza, pode ser classificada em serviços de abastecimento ou provisão. Bem como, em serviços de regulação, serviços de suporte e serviços culturais, conforme apontado pelo Millennium Ecosystem Assessment – MEA (2005).

Além disso, as funções ecossistêmicas (Tabela 1) devem ser consideradas processos interativos entre os elementos estruturais, bióticos (seres vivos) e abióticos (componentes não vivos) de um ecossistema. Logo, resultam na geração de serviços ecossistêmicos claramente definidos, apresentando uma tipologia de classificação das funções ecossistêmicas, nas quais são definidas como funções de regulação, funções de produção, funções de habitat e funções de informação (De Groot *et al.*, 2002; Farley, 2004).

Tabela 1 – Funções e Serviços Ecossistêmicos.

<b>Serviço e Função Ecossistêmica</b>	<b>Processos e componentes dos ecossistemas</b>	<b>Exemplos de serviços ecossistêmicos ofertados ao ser humano</b>
Serviços de Provisão e Função de Regulação	Capacidade de autorregulação dos processos ecológicos essenciais ao funcionamento dos ecossistemas naturais ou antropizados.	Manutenção de clima favorável (temperatura, precipitação etc.) para, por exemplo, cultivo, habitação e saúde humana.
Serviços de Provisão e Função de Produção	Capacidade de produção biológica dos ecossistemas, tanto terrestres quanto aquáticos, baseada na produção primária, realizada pelos organismos autotróficos (plantas e algas), e posterior conversão secundária, que ocorre pela ação dos organismos heterotróficos (animais decompositores).	Disponibilidade de matéria-prima empregada na construção e indústria (madeira, couro etc.). Combustível e energia (lenha, matéria orgânica etc.). Forragem e fertilizantes (krill, folhas, ninhadas etc.).
Serviços de Suporte e Função de Habitat ou Suporte	São os ecossistemas naturais que fornecem refúgio e habitat de reprodução para plantas e animais selvagens, contribuindo para a conservação da diversidade biológica, genética e dos processos evolutivos.	Reprodução e manutenção de espécies comercialmente exploradas.
Serviço Cultural e Função de Informação ou Cultural	Variedade na natureza com valor científico e educacional, advindos do contato com os ecossistemas (turismo, educação, apreciação estética, recreação, saúde física e espiritual).	Uso de sistemas naturais para excursões escolares etc. Uso da natureza para pesquisa científica.

Fonte: Adaptado de De Groot et al., (2002) e Farley (2004).

Assim, com base na tabela acima, os serviços ecossistêmicos são caracterizados como benefícios provenientes dos processos naturais dos ecossistemas. Nesse contexto, as funções ecossistêmicas, por sua vez, geram bens, serviços e produtos, caracterizando os aspectos subjetivos relacionados ao bem-estar

psicológico, espiritual e cognitivo para a sociedade humana, afetando-a de forma direta ou indireta.

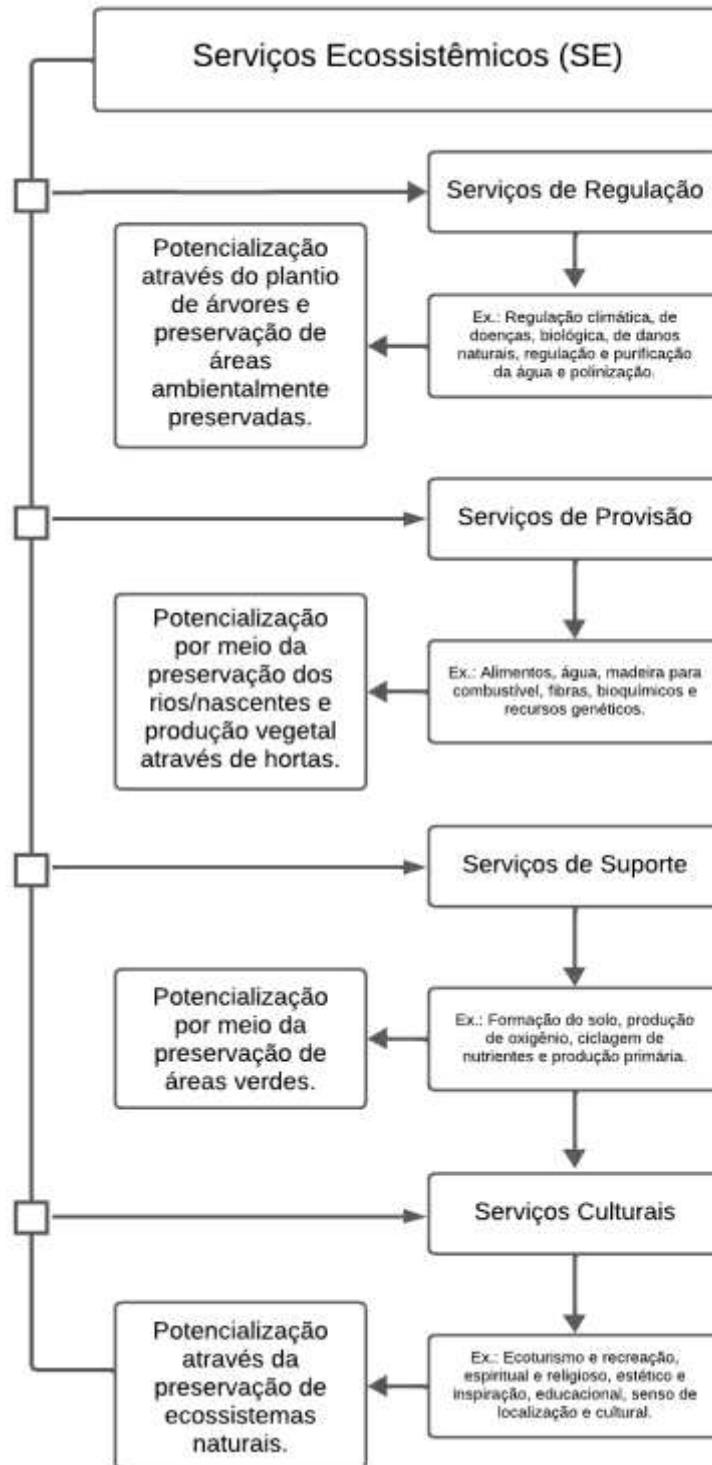
Dessa maneira, a nível de exemplificação, a realização de estudos sobre a fragmentação de habitats é fundamental para compreender as relações espaciais entre remanescentes, permitindo o desenvolvimento de modelos de conservação e estratégias para conectar manchas. Assim, a Ecologia de Paisagens oferece as ferramentas necessárias para essas análises, assegurando a manutenção dos processos e da estrutura natural (Nascimento, 2023).

Ademais, cita-se que as métricas da Ecologia de Paisagem são essenciais para avaliar o impacto da fragmentação na biodiversidade nos estudos das ciências florestais. Dessa forma, temas como conectividade, fragmentação e padrões da paisagem desempenham um papel central nos estudos quantitativos de ecossistemas, que se apresentam como fundamentais (Nascimento, 2023).

O uso e manejo adequado dos recursos naturais favorecem a potencialização dos serviços ecossistêmicos, representando, dessa forma, um capital natural essencial para a sustentabilidade das atividades humanas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

A Figura 2 apresenta um diagrama que ilustra as diferentes categorias dos serviços ecossistêmicos e as ações que podem, potencialmente, ampliar esses serviços, promovendo um equilíbrio sustentável entre a exploração dos recursos e a conservação ambiental.

Figura 2 – Potencialização dos Serviços Ecossistêmicos



Fonte: Adaptado de Millennium Ecosystem Assessment (2005).

Nessa perspectiva, Dominati *et al.* (2010) relatam que o aumento populacional impulsiona o consumo e a produção, criando um problema em relação ao declínio dos serviços ecossistêmicos, que não conseguem acompanhar os padrões atuais de

consumo. Por outro lado, Ab'Saber (2003) alerta para o impacto do novo modelo econômico e da modernização sobre os domínios morfoclimáticos e paisagísticos, tanto urbanos quanto rurais. Desse modo, ele destaca a necessidade de órgãos ambientais desenvolverem técnicas que conciliem o progresso com a preservação dos recursos naturais, evitando degradações que possam causar graves modificações nos ecossistemas, comprometendo os serviços ecossistêmicos.

Pesquisas sobre serviços ecossistêmicos têm ganhado destaque na comunidade científica, com um aumento significativo de estudos amplamente divulgados e debatidos em diversos países e instituições. As comunidades científicas da América do Norte, China e Europa se destacam ao levantar diversas questões multidisciplinares sobre o tema, abordando-o sob diferentes perspectivas (Garcia *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2023).

### **3.1.2 Informações do Sensoriamento Remoto — Meios de aquisição**

De acordo com Melo *et al.* (2021), a definição de sensoriamento remoto é bastante abrangente, dado que há diversas formas de obter informações sobre um alvo sem contato direto, como o uso de dispositivos como rádio, ecobatímetros, sismógrafos, gravímetros, magnetômetros, cintilômetros e equipamentos radiográficos. Esses instrumentos identificam distúrbios no ambiente, conhecidos como movimento ondulatório, o que inclui o sensoriamento remoto.

Nesse sentido, de acordo com Melo *et al.* (2021), a National Aeronautics and Space Administration (NASA) aponta que esse movimento pode ocorrer de duas formas: mecânica ou eletromagnética. Assim, como exemplo de ondas mecânicas citam-se as ondas na água ou as sonoras (acústicas), que surgem de vibrações ou perturbações na matéria e podem se propagar em meios sólidos, líquidos ou gasosos.

A evolução do sensoriamento remoto, que inicialmente utilizava fotografias aéreas como recurso tecnológico e, posteriormente, com o avanço tecnológico, passou a empregar imagens de satélites e drones captadas por sensores, se tornando uma importante ferramenta para a avaliação da cobertura terrestre, haja vista que a obtenção de informações dos objetos terrestres, sem necessitar de contato direto, fazendo a detecção, aquisição e análise da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres, registradas por sensores à distância, descrevendo as feições dos objetos que compõem a superfície terrestre (Moraes, 2002).

Partindo do princípio de funcionamento do sensoriamento remoto, Hinata (2023) destaca o processo de gerar dados em formatos digitais, como imagens, que podem ser analisadas em um Sistema de Informação Geográfica, estabelecendo uma relação complementar entre o sensoriamento remoto e o Sistema de Informação, sendo este último essencial para o armazenamento e processamento das imagens geradas a partir dos dados obtidos remotamente.

As mudanças resultantes da ação humana sobre o meio ambiente podem ser compreendidas por meio da análise de dados provenientes do sensoriamento remoto, que, com seus avanços tecnológicos, permitem melhorar as imagens capturadas e convertê-las em mapas sobre o uso e a cobertura do solo. Esses mapas se tornam uma ferramenta valiosa para o planejamento regional ou local, além de apoiar nas tomadas de decisões que possam contribuir para o desenvolvimento sustentável (Hinata, 2023).

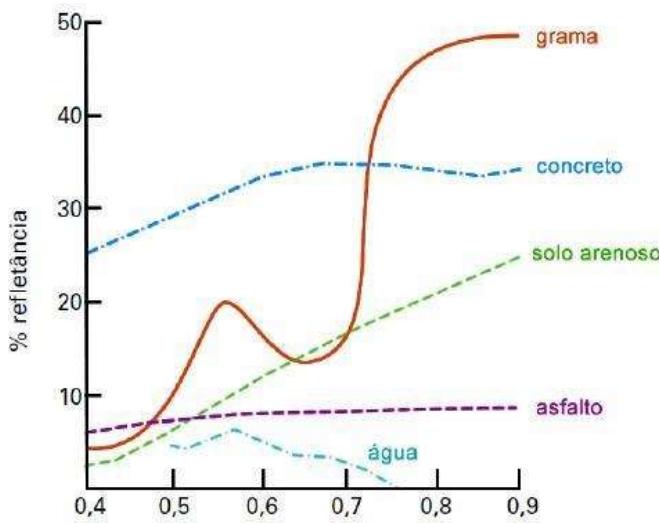
Com os avanços tecnológicos do sensoriamento remoto, essa tecnologia ainda apresenta limitações na qualidade das informações geradas, pois elementos atmosféricos como gases, vapor d'água e aerossóis causam efeitos como espalhamento, absorção e refração de energia, resultando em perda de dados da superfície capturados pelo sensor (Jensen, 2011).

Estudos conjuntos de várias organizações de pesquisa buscam por inovações no sensoriamento remoto, promovendo o constante aperfeiçoamento e a evolução na coleta de dados, buscando minimizar as limitações existentes, objetivando o desenvolvimento de sensores que estejam intimamente ligados às necessidades dos usuários, através de novos serviços, observações e inovações tecnológicas (Melo et al., 2021).

Desse modo, apesar da perda de dados, o sensoriamento remoto permite determinar padrões espaciais e temporais dos diferentes usos e coberturas do solo, por meio da resposta espectral dos alvos terrestres, fornecendo subsídios para o mapeamento e a verificação das mudanças no ambiente (Antunes, 2012).

Bhandarie et al. (2012) explicam que os objetos na superfície terrestre exibem comportamentos espectrais distintos nas diferentes regiões das bandas, em imagens adquiridas remotamente. Dessa forma, a combinação dessas bandas permite destacar feições espacialmente distribuídas e compreender a dinâmica do ambiente (Figura 3).

Figura 3 – Diferentes comportamentos espectrais dos objetos.



Fonte: Adaptado de Jensen (1985).

À vista disso, a utilização de imagens é considerada uma ferramenta acessível e eficaz para a análise dos efeitos do uso e cobertura da terra, sendo fundamental no apoio à tomada de decisão em diversas áreas. Desse modo, a utilização de diferentes métodos, como a aplicação de equações de bandas, gerando índices espectrais, permite a extração de informações para avaliar as alterações decorrentes do uso do solo em áreas urbanas ao longo dos anos (Lombardo, 1985; Pielke *et al.*, 2002; Xiong *et al.*, 2012; Ranagalage *et al.*, 2017).

Nessa perspectiva, a obtenção de imagens da superfície terrestre, seja por sensores transportados por satélites ou por Aeronaves Remotamente Pilotadas (Remotely Piloted Aircraft - RPA), popularmente conhecidas como drones, tem sido amplamente utilizada em pesquisas voltadas para o monitoramento de coberturas vegetais. Ademais, esse uso tem ganhado destaque no meio técnico-científico, especialmente com a aplicação de técnicas de cálculo de bandas, resultando em índices espectrais capazes de avaliar tanto ambientes rurais quanto urbanos (D'oleire-Oltmanns *et al.*, 2012; Fang *et al.*, 2016; Tagliarini, 2020).

Além disso, Santos *et al.* (2020) destacam a extração de informações das áreas de vegetação, por meio de índices espectrais, como um dos temas mais discutidos na área ambiental. Dessa maneira, quando aplicada a tecnologia de obtenção das imagens remotamente, é possível compreender as mudanças no ambiente através do comportamento da vegetação, apoiando a tomada de decisões em diversas frentes, como o planejamento, manutenção e acompanhamento de áreas destinadas ao

plantio, preservação e conservação ambiental.

Bem como, o emprego da tecnologia influencia no uso adequado dos recursos hídricos, dinâmica fotossintética da vegetação, regulação da temperatura, entre outros. Além disso, como demonstrado nos estudos de Libombo e Galvíncio (2023), ao utilizarem imagens de satélite para análise da cobertura vegetal do município de Moçambique, identificaram áreas com processo de degradação na região sudeste de Moçambique, em virtude da supressão vegetal, partindo de análises feitas através da adoção dos índices espectrais.

Nesse sentido, muitos estudos têm o envolvimento das bandas espectrais na faixa do infravermelho, a exemplo dos índices utilizados em estudos e avaliações vegetais. Ademais, essas pesquisas que utilizam os índices baseados apenas na porção visível do espectro eletromagnético, ainda se mostram insuficientes, frente aos estudos de Hunt-Jr *et al.* (2005), Zhu *et al.* (2009) e Córcoles *et al.* (2013), ao investigarem as métricas que utilizam as faixas espectrais do vermelho (em inglês, Red) e infravermelho-próximo (em inglês, Near-Infrared — NIR), obtiveram resultados mais difundidos e robustos para análises da vegetação, quando comparado com as métricas na faixa do visível.

Dessa maneira, salienta-se que o sensoriamento remoto tem sido fundamental para o avanço das descobertas científicas, permitindo a formação de grandes grupos de pesquisa interinstitucionais. Esses grupos servem como alicerces para o aprimoramento de técnicas e expandem as possibilidades de estudo em diversas áreas científicas (Melo *et al.*, 2021).

### **3.1.2.1 Tendências dos Serviços Ecossistêmicos através das informações espaciais**

Compreender as funções ecológicas e os serviços ecossistêmicos requer o uso de ferramentas que permitam a extração de informações espaciais para análises sob perspectivas ecológicas (naturais), sociais e econômicas. Pois, essas informações representam uma oportunidade para a gestão sustentável dos recursos naturais, por oferecer uma visão holística através do mapeamento dos serviços ecossistêmicos e suas diferentes opções de gerenciamento, conforme suas especificidades, integrando aspectos ecológicos, econômicos e sociais (Grêt-Regamey *et al.*, 2017).

Nesse sentido, Maes *et al.* (2015) explicam que a extração de informações

espaciais por meio do mapeamento de serviços ecossistêmicos, pode ser realizada de maneira simplificada, com baixo nível de detalhe e acurácia, ou de forma mais complexa, com a adição de dados que aumentam a densidade e a precisão das informações. Dessa maneira, as informações subsidiam políticas públicas e a tomada de decisões, dependendo, portanto, da disponibilidade de dados espacialmente explícitos sobre o estado e as tendências dos ecossistemas e seus serviços.

Além disso, a avaliação das unidades espaciais para gestão, com base ecossistêmica, requer o uso de metodologias de aquisição de informação baseadas nas opiniões de especialistas, método conhecido como “conhecimento de especialistas”, sendo essa metodologia definida como um procedimento que captura o conhecimento de estudiosos para uma determinada área, representando esse conhecimento em uma base de dados, capaz de reduzir as incertezas relacionadas aos dados produzidos, e transmitindo-os ao usuário ou pesquisador (Asmus *et al.*, 2018).

A realização de mapeamentos, associada a aplicação de modelos mais completos, também é abordada na literatura atual, essa metodologia, baseada em modelos de processos biológicos e físicos, que afetam os serviços ecossistêmicos, pode prever a oferta desses serviços. Assim, um exemplo é a plataforma InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs), desenvolvida pelo Projeto Capital Natural (NATCAP - Natural Capital Project), essa ferramenta tem uma extensão espacial, permitindo análises com dados espaciais, imagens de sensoriamento remoto, que ajudam a quantificar e mapear os valores dos serviços ecossistêmicos (EC, 2015; NATCAP, 2020).

### 3.1.2.2 Análise de áreas espacialmente vegetadas

As áreas vegetadas são importantes espaços ocupados, que asseguram a manutenção e o equilíbrio dos ecossistemas. Pois, possuem a finalidade de garantir a sustentabilidade, seja ela econômica, ambiental ou social, além de auxiliar na minimização dos impactos negativos advindos da urbanização e da supressão vegetal (Almeida; Silva; Guimarães, 2023).

Desse modo, considerando o contexto espacial urbano, a vegetação vem sofrendo pressões no tocante a redução de área de cobertura, em função das cidades, que apresentaram grande crescimento populacional, espacial e de atividades, o que

acaba afetando a sustentabilidade nessas áreas (Labaki *et al.*, 2011).

Portanto, entende-se que para o alcance da sustentabilidade urbana, diversas vertentes devem ser consideradas, como a social, ambiental, cultural e espacial, principalmente no contexto urbano. Tendo em vista que as áreas vegetadas precisam ser as protagonistas para a sustentabilidade, por meio de áreas verdes protegidas ambientalmente, a exemplo da APP (Área de Proteção Permanente) e com a instalação de áreas que preservem a cobertura vegetal, como os parques urbanos (Lima; Lopes e Façanha, 2021).

Ardoïn, Bowers e Gaillard (2020), discorrem que as transformações na sociedade e no meio ambiente, por meio das atividades voltadas para a gestão ambiental, tendem a impactar na qualidade de vida humana e no desenvolvimento sustentável do meio urbano. Nesse sentido, a gestão ambiental se configura mediante ambientes capazes de proporcionar aquisição de saúde por meio de espaços com academia ao ar livre, bem como áreas que possam ofertar lazer e conhecimento cognitivo, visto muitas áreas verdes pertencentes ao tecido urbano.

Assim, Almeida, Silva e Guimarães (2023) destacam que a vegetação em espaços livres é essencial aos ecossistemas urbanos, ao desempenharem muitas funções, como o controle da umidade do ar, redução da poluição do ar e amenização da sensação térmica causada pelas altas temperaturas. Por fim, Amato-Lourenço *et al.* (2016) e Oliveira *et al.* (2023), explicam que as áreas verdes urbanas trazem inúmeros benefícios derivados de serviços ecossistêmicos, resultando em melhoria na qualidade de vida para a população, dentre os quais, se destaca a relevância da vegetação em relação redução da velocidade do escoamento superficial.

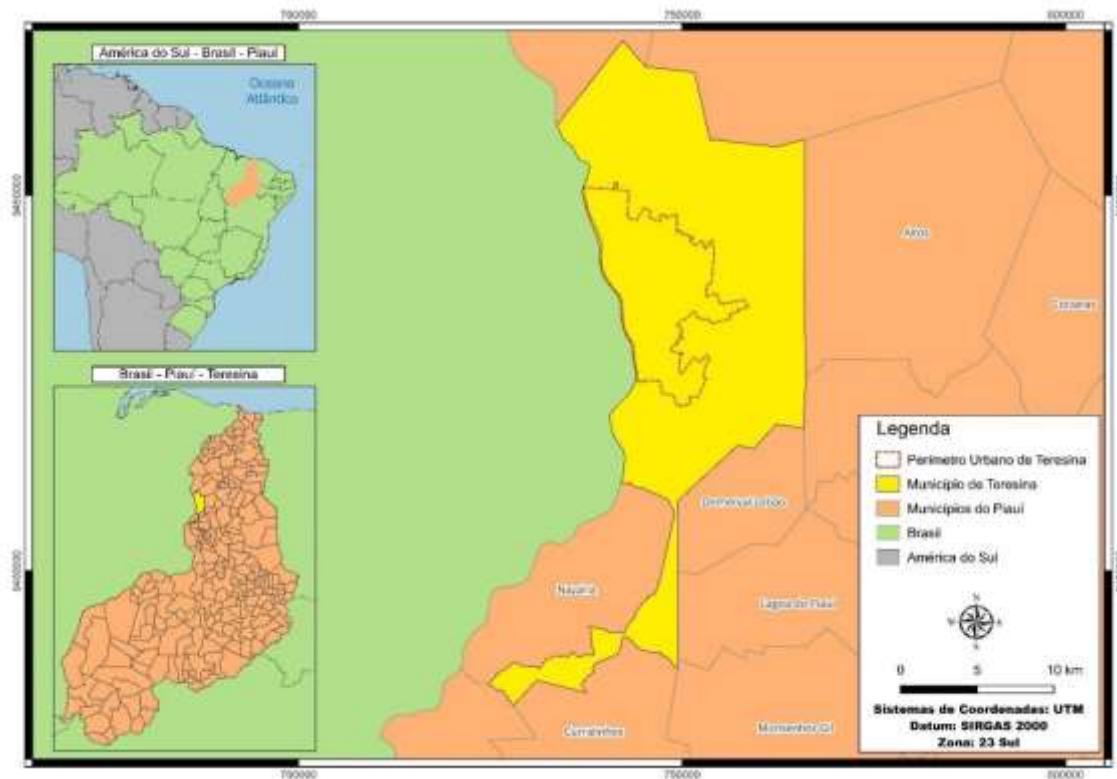
## 4 METODOLOGIA

## 4.1 ÁREA DO ESTUDO

Esta pesquisa comprehende como área de estudo o perímetro urbano de Teresina (Figura 4), sendo aquela área localizada nos limites dos perímetros urbanos, bem como os perímetros que delimitam os núcleos urbanos inseridos na Área Rural. Assim, destaca-se que essas áreas apresentam maior densidade populacional, também possuem maior e mais diversificada oferta de infraestrutura, comércio e serviços (Teresina, 2019).

Nesse sentido, a escolha dessa área se deu em virtude do espraiamento territorial que vem sofrendo, através do incremento de solos impermeáveis, também chamados de solos urbanizados, que aumentaram cerca de 86,74%. Ao contrário disso, houve uma redução de 49,52% nos solos permeáveis, que incluem solos vegetados e solos expostos, resultado da supressão vegetal, especialmente nas áreas vegetadas localizadas no entorno das manchas urbanas consolidadas (Lima; Lopes; Façanha, 2021).

Figura 4 – Mapa de localização da área do estudo.



Fonte: O autor (2024).

Dessa forma, a partir da análise da figura acima, é possível inferir que o perímetro de Teresina apresenta uma área de 272,66 km<sup>2</sup>. Ademais, essa área, escolhida como alvo da investigação dessa pesquisa, vivencia uma expansão expressiva, evidenciada através da ocupação do solo, incentivada pela urbanização e pelo processo de antropização.

Os procedimentos metodológicos realizados no trabalho que auxiliaram para consolidar os resultados e discussão, podem ser sintetizados nas seguintes etapas: 1) Revisão bibliográfica; 2) Registro fotográfico para listagem dos possíveis serviços ecossistêmicos observados diretamente; 4) Aquisição de informações espaciais obtidas remotamente (Drone e Satélites Orbitais) para mapeamento dos possíveis serviços ecossistêmicos prestados; 5) Classificação e análise dos serviços prestados utilizando a tabela CICES (v.5.1) e outras fontes da literatura.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que o Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente permite a produção científica decorrente da tese em formato de artigos, seguem os artigos produzidos e organizados em forma de capítulos.

- CAPÍTULO 1 - Artigo 1: LEITE, A. C.; GALVINCIO, J.D. EFICIÊNCIA DE ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO NO MAPEAMENTO DA COBERTURA ARBÓREA COM FOCO NA CLASSIFICAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS.
- CAPÍTULO 2 - Artigo 2: LEITE, A. C.; GALVINCIO, J.D.; OLIVEIRA, L.M.M. USO DA GEOTECNOLOGIA NA AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS NA FORMAÇÃO FLORESTAL EXISTENTE NA ZONA URBANA DE TERESINA.

## **6 CAPÍTULO 1 - ARTIGO 1: EFICIÊNCIA DE ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO NO MAPEAMENTO DA COBERTURA ARBÓREA COM FOCO NA CLASSIFICAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS**

### **6.1 INTRODUÇÃO**

A transformação da natureza em ecossistemas urbanos, especialmente em áreas vegetadas, através da supressão da vegetação, é realizada para atender às necessidades humanas por ambientes construídos, intensificando problemas associados à urbanização, como a formação de ilhas de calor, impermeabilização do solo, redução da vegetação arbórea, canalização de cursos d'água no espaço urbano e maior dispersão de poluentes na atmosfera, aumentando a capacidade de absorção térmica nas cidades (Honorato, 2012).

Com isso, quando observado em grandes cidades, o clima urbano passa a enfrentar desafios crescentes, como o aumento das ilhas de calor e a diminuição da qualidade do ar, identificada principalmente pela redução da cobertura vegetal (Almeida et al., 2022; Errea et al., 2023).

A dinâmica decorrente do uso e ocupação do solo configura-se como um fator crucial para a manutenção do equilíbrio ambiental, ecológico e climático, ao passo que possibilita uma análise mais aprofundada dos efeitos provocados pela perda e fragmentação dos habitats naturais sobre a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos, especialmente no contexto dos sistemas socioecológicos (Santos et al., 2023).

Muitos estudos tem abordado, por exemplo, o comportamento das áreas vegetadas por meio da prestação de seus Serviços Ecossistêmicos, quando ao serem preservadas em áreas urbanas, criam uma rede de reservas e oferta de funções de forma natural pelos ecossistemas, constituindo os benefícios que as pessoas adquirem desses recursos naturais, como a preservação da biodiversidade, proteção de encostas nas áreas de risco, regulação do ciclo hidrológico, minimização da poluição atmosférica e sonora, formação de cinturões verdes e garantia da disponibilidade hídrica e alimentar da população, essenciais ao bem-estar humano (Monteiro, 2018; Huang et al., 2020; Ferreira, 2021).

Estudos de vegetação relacionados a conservação e monitoramento das mudanças na superfície terrestre, nas últimas décadas, tem se destacado a aplicação

atuante de índices espectrais em imagens geradas por meio de tecnologias no contexto do Sensoriamento Remoto Óptico (SRO), a exemplo da pesquisa de Bezerra et al., (2017), quando utilizado o SRO para análise multitemporal por meio dos índices de vegetação na bacia hidrográfica do rio Moxotó partindo do cálculo entre as faixas espectrais que vai do visível ao infravermelho, evidenciaram a dinâmica ocorrida na superfície terrestre mostrando o grau de conservação em determinada área.

Almeida et al., (2022) e Ferreira et al., (2022), destacam o uso intenso do sensoriamento remoto, principalmente em estudos do clima urbano, sendo comumente aplicado para obter a temperatura superficial terrestre e outras características superficiais de grandes áreas (W. Zhang et al., 2024).

A disponibilização gratuita de imagens de satélite com grande resolução espacial, proporciona essa intensa utilização, possibilitando o acesso fácil a essa tecnologia e a possibilidade de avaliar mudanças na paisagem de uma localidade, sua cobertura vegetal, uso do solo, dentre outros (Jardim et al., 2022; Shah e Patel, 2023; Zhu et al., 2021; Kozak e Arsen, 2023).

Além do SRO , destacam-se as tecnologias de aquisição das informações da superfície terrestre por meio de plataformas suborbitais, como por exemplo as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP), conhecido popularmente como “drones”, definido como todo e qualquer objeto voador não tripulado, onde ao serem obtidas as imagens por essas plataformas suborbitais, é dispensada as correções de influências atmosféricas por fenômenos de espalhamento, absorção e refração da energia eletromagnética, em virtude dessas plataformas executarem o voo em baixa altitude, diferenciando das imagens de plataformas orbitais, que são coletadas em elevadas altitudes por meio dos sensores que ficam a bordo dos satélites (Tagliarini, 2020).

Nesse sentido, o uso de tecnologias seja em nível orbital ou suborbital tem ganhado destaque em pesquisas de monitoramento e planejamento espacial, a exemplo das áreas de vegetação no meio natural e urbano, sendo esse um dos temas mais abordados e discutidos na temática ambiental, quando aplicada essas tecnologias, proporcionando entender as mudanças no ambiente através do comportamento da vegetação, apoiando a tomada de decisões que favoreçam o planejamento, manutenção e acompanhamento relacionado aos estudos de aquisição de áreas para plantio, preservação/conservação ambiental, uso apropriado dos recursos hídricos, dinâmica fotossintética da vegetação, entre outros (Santos et al., 2020).

No contexto da aplicação do Sensoriamento Remoto em estudos voltados à vegetação e ao monitoramento urbano, destaca-se a utilização de câmeras RGB acopladas a Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP). Essa tecnologia tem se mostrado eficaz na avaliação das transformações no uso e ocupação do solo, especialmente por meio do cálculo de índices de vegetação voltados à caracterização dos recursos naturais e à análise de impactos ambientais. As imagens geradas permitem investigar os diferentes estágios de degradação ambiental, com ênfase nas áreas de recursos hídricos, cobertura vegetal e expansão urbana, bem como nos processos associados à ocorrência dessa degradação (Silva et al., 2019; Assis et al., 2014; Bandini et al., 2017; Yurovskaya et al., 2018)

O uso do ARP, dão suporte à proteção ambiental, através das análises em situações de regiões em diferentes ecossistemas, favorecendo ao planejamento ambiental, de modo que esses veículos aéreos pilotados remotamente tem suas fontes potenciais para geração de imagens, podendo ser considerados como a terceira geração de plataformas para obtenção de dados dentro dos avanços no campo do Sensoriamento Remoto (Milas et al., 2018).

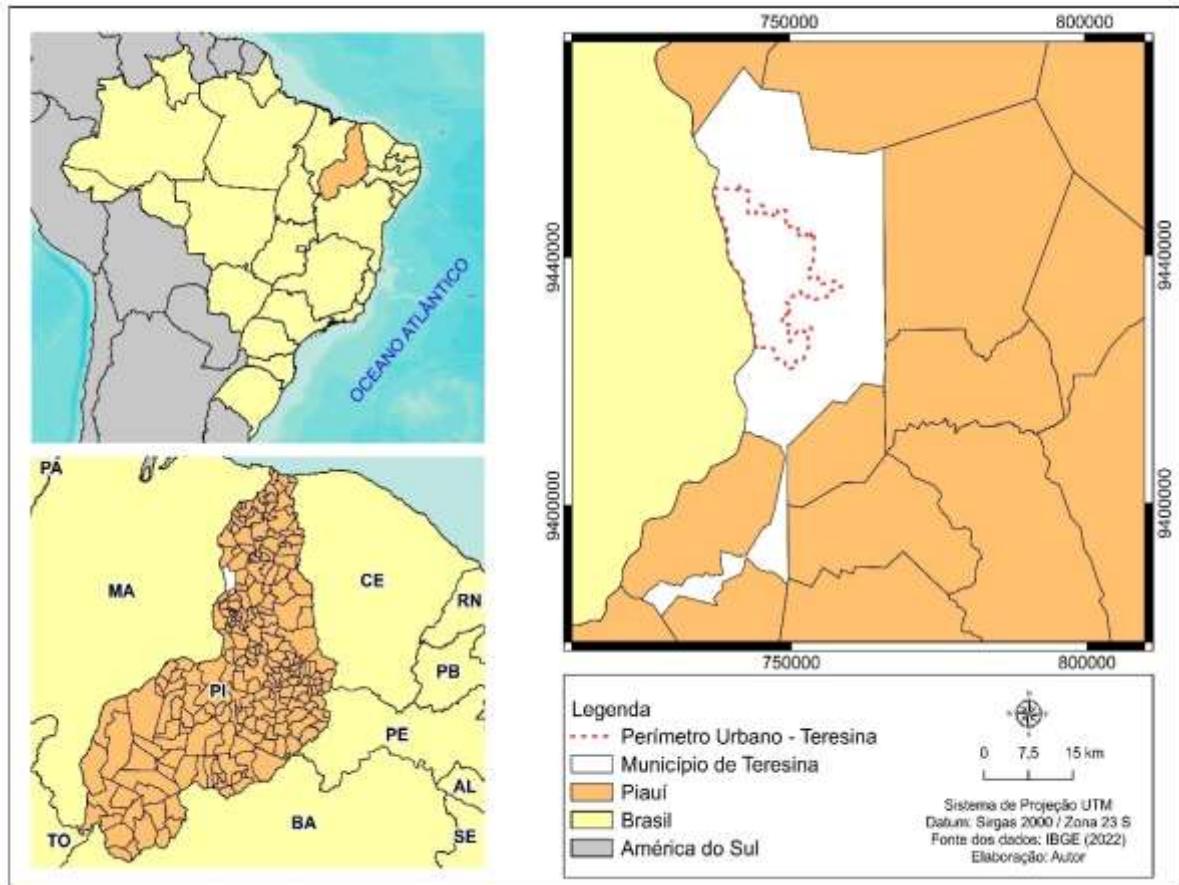
Levando em consideração o uso de índices de vegetação para monitoramento dos recursos ambientais, o estudo objetiva aplicar e avaliar o desempenho entre os índices de vegetação aplicados em imagens obtidas por tecnologia remotamente pilotada em uma área urbana com cobertura arbórea no município de Teresina-PI, para posterior associação da biomassa mapeada com relação aos Serviços Ecossistêmicos identificados.

## 6.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 6.2.1 Área de estudo

A Figura 1 ilustra o mapa de localização de Teresina-PI, detalhando o seu limite urbano, sendo este município a capital do Estado do Piauí com uma população de 866.300 pessoas, conforme apontou o último Censo Demográfico (IBGE, 2022).

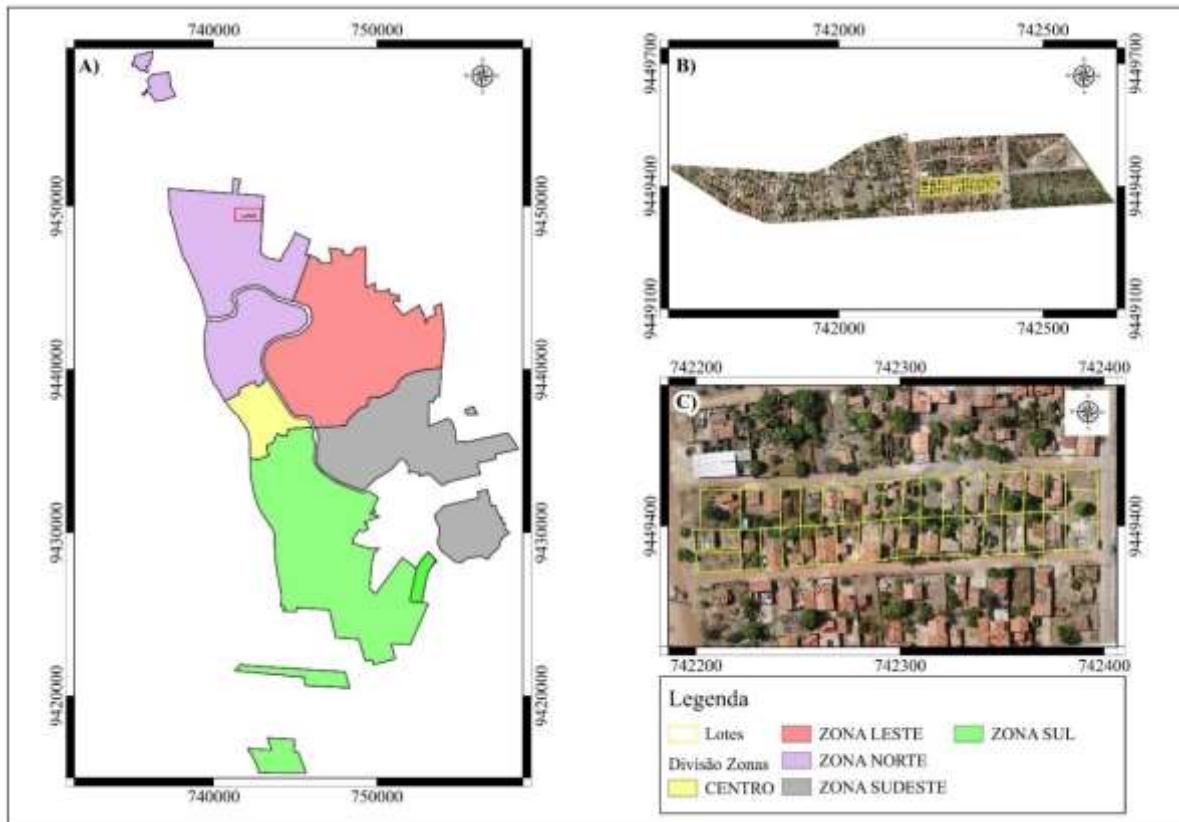
Figura 1 – Mapa de localização de Teresina-PI.



Fonte: Autor (2024)

O estudo comprehende o Núcleo Urbano Dandara do Cocais, com uma área de 171.014,00 m<sup>2</sup>. Esse núcleo urbano fica localizado na Zona Norte da cidade de Teresina-PI, como mostra a Figura 2, sendo caracterizado por uma região densamente povoada, com mais de 300 famílias vivendo nesse local (Empresa Teresinense de Serviços Urbanos, 2023).

Figura 2 – (A) Divisão das Zonas Urbanas de Teresina, (B) Núcleo Urbano Dandara dos Cocais e (C) recorte espacial da quadra utilizada para geração dos dados.



Fonte: Autor (2024)

A justificativa para a escolha da área está baseada na Lei Federal nº 13.465 de 11 de julho de 2017 e na Lei Complementar nº 5.788 de 24 de agosto de 2022, que procede a elaboração do projeto de regularização fundiária em núcleos urbanos informais, haja vista que a área do estudo está passando pelo processo de regularização fundiária urbana (Brasil, 2017; Teresina, 2022).

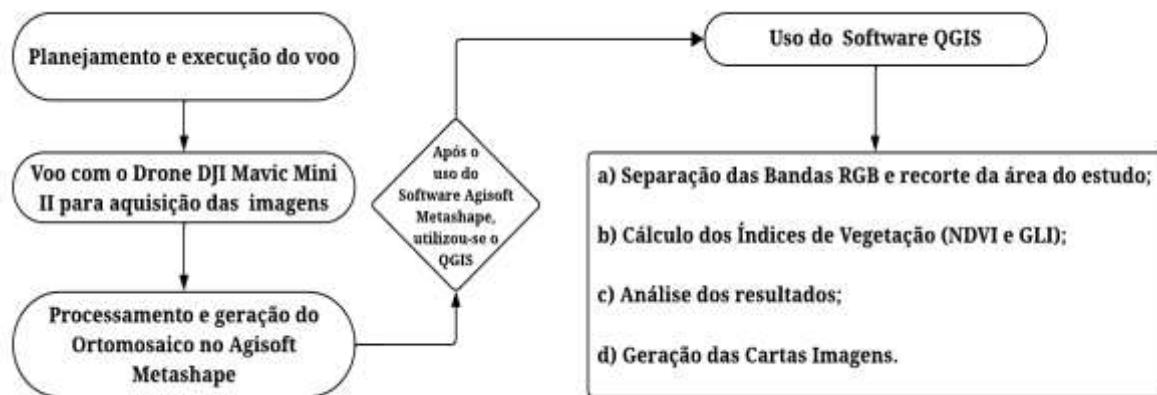
### 6.2.2 Etapas da Metodologia

A descrição das etapas dos métodos utilizados neste artigo está apresentada no fluxograma da Figura 3. Nesse sentido, o uso do Drone DJI Mavic Mini 2 exigiu um planejamento cuidadoso para a execução do voo e a aquisição das imagens. Dessa maneira, após a coleta das imagens, foram realizados o processamento e a geração do ortomosaico no software Agisoft Metashape Professional, a partir da sua

finalização, foi realizada a separação das bandas e o recorte da quadra de interesse na área de estudo.

Em seguida, foram executados os cálculos dos índices de vegetação, que culminaram na análise dos resultados por meio de estatística descritiva e cartas imagens. Além disso, foram realizados cálculos da métrica de paisagem, utilizando o plugin do Qgis Landscape Ecology Statistics (LecoS), buscando descrever os padrões espaciais nas respostas dos índices em relação à área vegetada investigada e quantificar certas características espaciais de fragmentos no mapa.

Figura 3 – Fluxograma dos métodos realizados.



Fonte: Autor (2023)

#### 6.2.3 Características do levantamento do voo

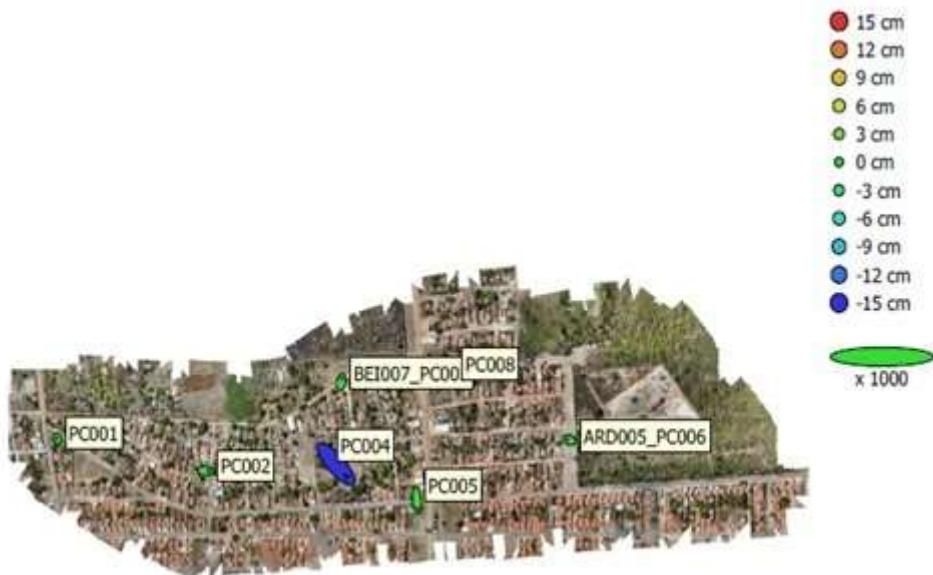
Ao realizar o voo com o Drone DJI Mavic Mini 2, foram estabelecidas no planejamento prévio do voo as condições climáticas, como a velocidade do vento e o planejamento próximo ao meio-dia, de modo a garantir um bom desempenho e menos incidência de sombra sobre as imagens. Bem como, a definição de parâmetros, como a altura de voo e as taxas de recobrimento.

Além disso, as configurações técnicas foram precisas, com a altura de voo de 77,1 metros e as taxas de recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 70%, resultando na definição de 25 linhas de voo, minimizando a possibilidade de ocorrerem falhas na cobertura e depois no processamento. Dessa maneira, garantindo múltiplas vistas dos pontos no terreno e resultando no Ground Sample Distance (GSD), ou seja, distância de amostra do solo, sendo expressa por cada pixel da foto com resolução

espacial de 2,56 cm/pixel obtidas no voo e no processamento realizado no software Agisoft Metashape Professional.

Ademais, a geração do ortomosaico contemplou uma imagem com área de 15,274 ha, gerando um grande volume de dados, na qual para a realização do cálculo dos índices de vegetação, foi realizado um recorte dessa área considerando uma quadra de 8.493,30 m<sup>2</sup>. Além disso, antes da realização do voo, foram obtidos alguns pontos de controle na área de estudo (Figura 4), objetivando fazer a correção geométrica da imagem, refletindo em uma melhor acurácia no levantamento aéreo.

Figura 4 – Pontos de controle obtidos no campo e mostrados na realização do processamento.



Fonte: Autor (2023)

#### 6.2.4 Índices de Vegetação (NDVI e GLI)

Os Índices de Vegetação propostos para serem aplicados no estudo (Quadro 1), comprehende as fórmulas com o uso das bandas que operam nas faixas espectrais do visível ao infravermelho, a partir da semelhança na funcionalidade dos índices aplicados para o infravermelho e visível, possibilitando a comparação na eficiência desses índices para os alvos em imagens obtidas por drone.

Quadro 1 – Índices de Vegetação aplicados no estudo.

Índice de Vegetação	Descrição	Fórmula
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada	$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})}$
GLI	Índice Folha Verde	$GLI = \frac{(2 * GREEN - RED - BLUE)}{(2 * GREEN + RED + BLUE)}$

Fonte: Autor (2023)

As imagens obtidas pelo drone operam na faixa do visível, sendo necessário estimar a banda do infravermelho a partir da câmera RGB a bordo do drone. Assim, aplicando a equação proposta por Arai *et al.*, (2016) para obtenção da banda Infravermelha Próximo - *NIR*, utilizando a banda do visível, calcula-se (Equação 1):

$$NIR = \frac{(360,6 - GREEN)}{(1,1941)} \quad (1)$$

Onde:

*GREEN* se refere a banda do verde na faixa do visível.

Em seguida, após o cálculo da banda do Infravermelho Próximo - *NIR*, foi aplicada a equação proposta por Rouse *et al.* (1973), que trata a respeito do cômputo do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI). Nesse contexto, sua utilização ocorre para realçar o vigor vegetativo de determinada região, através da razão entre a diferença do valor da reflectância monocromática do infravermelho próximo ( $\rho_{NIR}$ ) e do vermelho ( $\rho_{RED}$ ), e a soma delas (Equação 2).

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (2)$$

É importante destacar que o supracitado índice apresenta uma variação padrão, variando entre -1 e 1, sendo que valores negativos de NDVI indicam água e nuvens, valores próximos a 0 refletem superfícies sem vegetação, enquanto, valores próximos de 1 são específicos de vegetação saudável e verde (Ponzoni *et al.*, 2012).

Sequencialmente, após a aplicação da fórmula do NDVI, obteve-se o *Green Leaf Index* (Índice Folha Verde - GLI), sendo esse índice sugerido por Louhaichi *et al.*

(2001) e surgido a partir de aerofotografias, tendo seu uso eficiente nas imagens de alta resolução. É possível citar como a exemplo, imagens oriundas dos drones com câmeras de grande qualidade, sua aplicabilidade se dá através da Equação 3, onde *GREEN*, *RED* e *BLUE* são os números digitais (com variação entre 0 – 255) das bandas verde, vermelho e azul, respectivamente.

$$GLI = \frac{(2 * GREEN - RED - BLUE)}{(2 * GREEN + RED + BLUE)} \quad (3)$$

### 6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 6.4 ESTATÍSTICAS DOS ÍNDICES GERADOS

Comparando os resultados estatísticos das imagens para os índices gerados (Tabela 1), verificou-se haver uma superioridade dos valores médios NDVI, quando comparado com o GLI, no qual este apresentou valores médios inferiores, que podem ser conferidos na tabela a seguir:

Tabela 1 – Estatísticas dos índices.

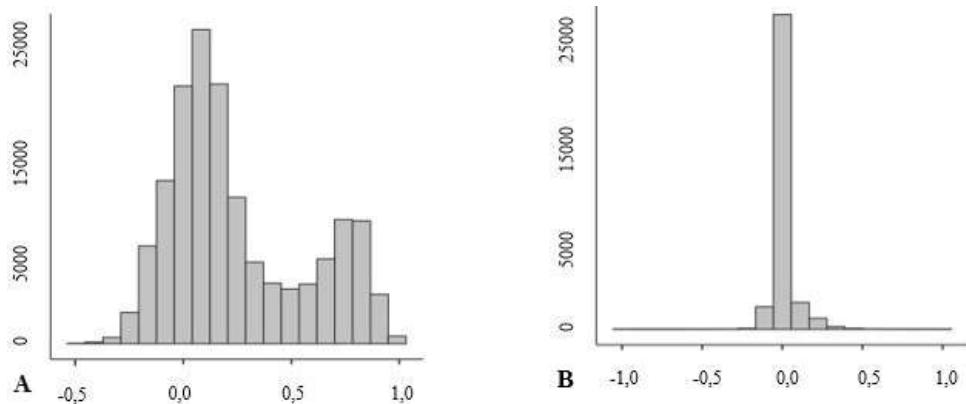
Cálculo dos índices	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-Padrão
NDVI	-0,49	1,00	0,250	0,317
GLI	-1,00	1,00	0,007	0,067

Fonte: Autor (2023)

Considerando essa ótica, os valores de desvio-padrão, mínimo e máximo, sofreram alterações, evidenciando a diferenciação das respostas espectrais dos índices, conforme esclarecido por Ponzoni *et al.* (2012), ao discursarem que o cálculo dos índices em estudos de vegetação tem influência de vários fatores limitantes, como interferência atmosférica e resolução espacial do sensor. Em seguida, partindo para uma análise mais profunda, na tabela, obtém-se que o Desvio-Padrão do NDVI foi de 0,317, enquanto o GLI apresentou um Desvio-Padrão de 0,067. Esse valor inferior no GLI indica menor variabilidade em comparação ao NDVI, o que sugere que os resultados do NDVI são mais heterogêneos em relação à sua média.

Na Figura 5, são apresentados os histogramas de frequências referentes aos índices NDVI (Figura 5A) e GLI (Figura 5B).

Figura 5 – Histogramas de frequências do (A) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e (B) Índice de Folha Verde (GLI).



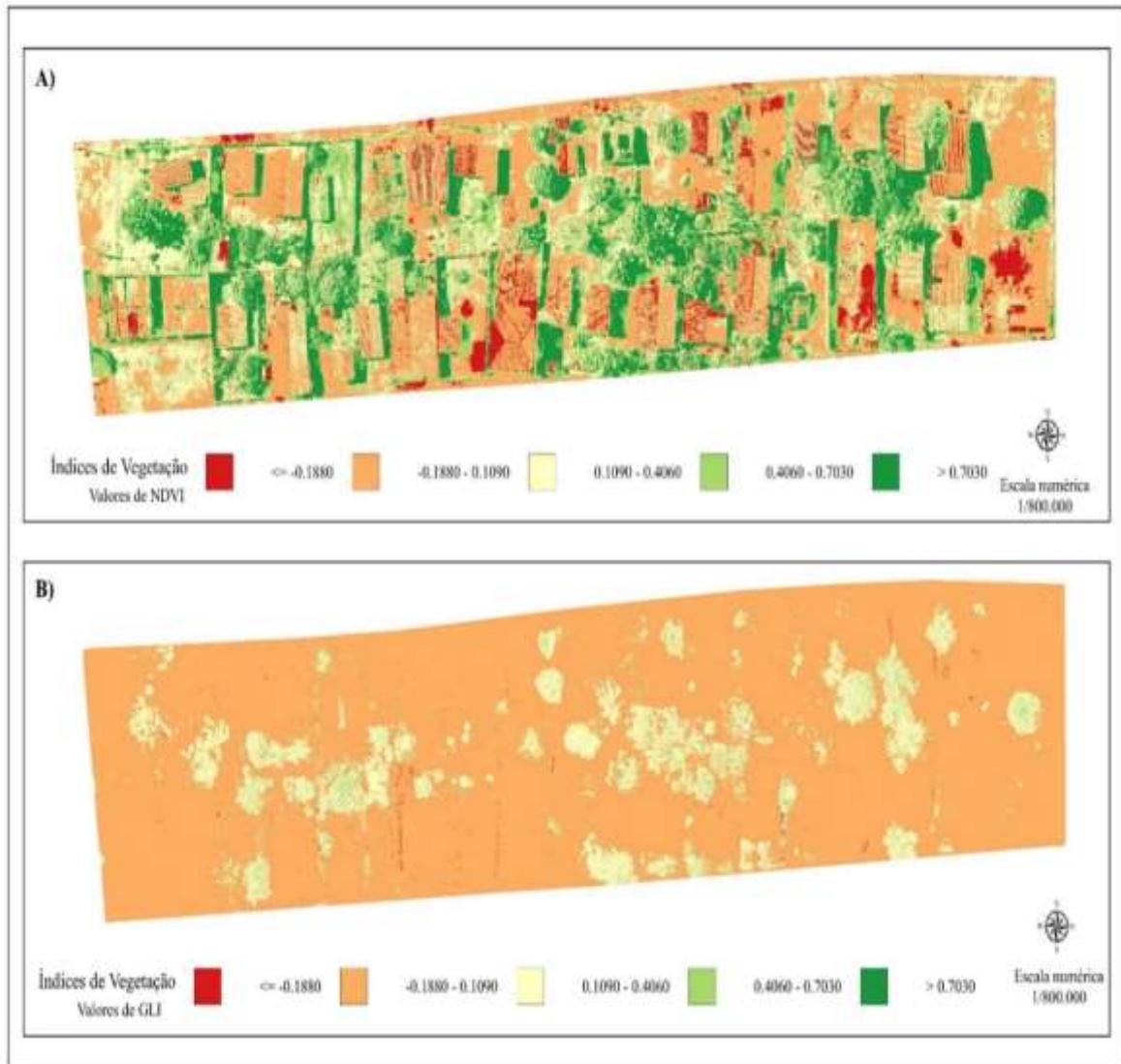
Fonte: Autor (2023).

Ao se observar os histogramas de frequência do NDVI (A) e GLI (B), esses mostraram comportamentos diferentes nos conjuntos de dados extraídos dos valores dos pixels (respostas espectrais) das imagens analisadas para o NDVI e GLI, verificando diferentes variações no histograma do NDVI. Pois, os valores mais comuns estão próximos de 0,0 (zero), normalizado positivamente, e a dispersão dos dados é evidente de -0,5 a 1,0. Assim, no histograma do GLI, a maior frequência dos dados está representada pelo 0,0 (zero), bem como a dispersão apresentou valores menores no intervalo de -0,5 a 0,5, representando uma variação menor no GLI quando comparado com o NDVI.

#### 6.4.1 Análise das cartas imagens dos índices de vegetação

A análise das imagens de NDVI e GLI, por meio das cartas imagens (Figura 6), mostram que há diferenças existentes nas respostas espectrais entre os cálculos realizados dos índices através da equação das bandas. Assim, a análise dos valores apresentados na legenda evidencia a distinção entre as áreas, observando-se que a carta do NDVI (Figura 6A) apresenta uma maior variação em comparação com a carta do GLI (Figura 6B), na qual nesta última se percebe uma maior uniformidade no cômputo do índice.

Figura 6 – Carta imagem do (A) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e (B) Índice de Folha Verde (GLI).



Fonte: Autor (2023).

As análises das imagens de NDVI e GLI mostram que há diferenças existentes nas respostas espectrais entre os cálculos realizados dos índices através da equação das bandas, revelando a diferenciação das áreas com base nos valores apresentados na legenda, notando que visualmente a carta do NDVI (Figura 6A) apresenta uma maior variabilidade de cores quando comparado com a carta imagem do GLI (Figura 6B), em que essa por sua vez, nota-se visualmente uma homogeneidade nas cores da carta.

Analizando os valores dos índices NDVI e GLI mostrados na carta imagem, merecem destaque os valores negativos ( $\leq -0,1880$ ) que caracteriza áreas construídas e de solo exposto, valores próximos a zero (0,1090 a 0,4060) associando a condição

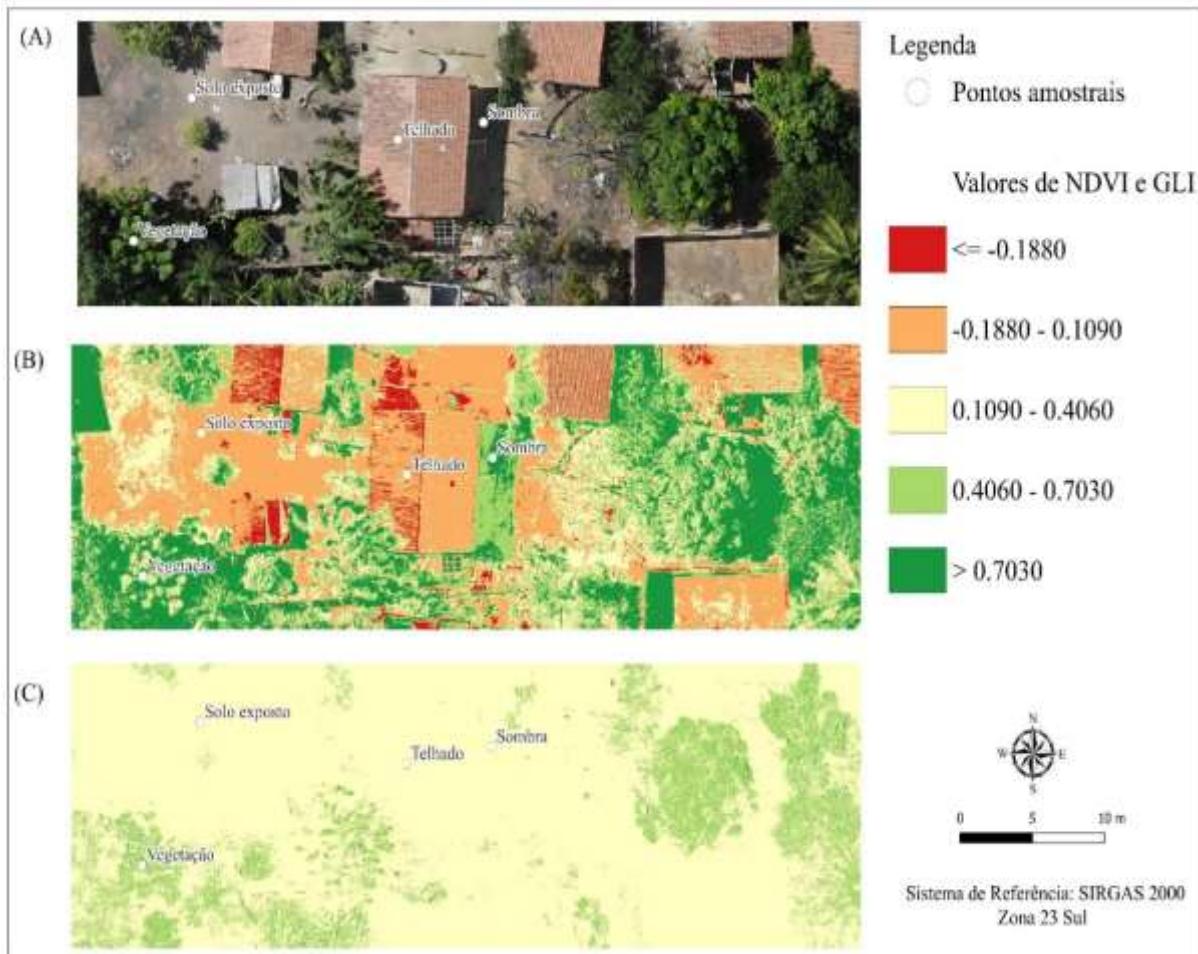
de uma vegetação com baixo vigor vegetativo/estressada, e valores de 0,4060 a  $\geq$  0,7030, relacionando a predominância da área de maior vigor vegetativo, condizendo com os resultados encontrados nos estudos de Libombo e Galvíncio (2023), ao utilizarem imagens de satélite para análise da cobertura vegetal do município de Moçambique, identificaram áreas com respostas espectrais de valores negativos, caracterizando o processo de degradação na região sudeste daquele país em virtude da supressão vegetal.

Portanto, ao analisar os dados das cartas imagens com os resultados dos histogramas, fica notório uma superioridade na dispersão dos dados para as cartas de NDVI, percebendo uma coloração mais instável e a frequência dos valores mais próximos a normalização positiva de zero (0,4060 a  $\geq$  0,7030), representados na cor verde, convergindo naquilo que é representado na carta imagem (Figura 6A) e no histograma (Figura 5A). Ainda, para o GLI, ao observar a carta (Figura 6B) e o histograma (Figura 5B), há uma predominância visual da cor laranja, caracterizada nos valores espectrais de -0,1880, apontando a dispersão do intervalo de acordo com o histograma, quando mostrado os valores menores dentro do intervalo de -0,5 a 0,5, bem como passando pelo valor mais comum 0 (zero), conforme também mostrou o histograma.

#### 6.4.2 Análise dos pontos amostrais na área do estudo

A Figura 7 apresenta pontos amostrais obtidos com base na ortofoto de composição RGB (Figura 7A), objetivando mostrar o comportamento da resposta espectral de alguns pontos amostrais, considerando os índices estudados conforme a localização desses alvos destacados nas imagens do NDVI (Figura 7B) e GLI (Figura 7C).

Figura 7 – Pontos amostrais localizados nas cartas com (A) Composição colorida, (B) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e (C) Índice de Folha Verde (GLI).



Fonte: Autor (2024).

Além de comparar visualmente os valores das respostas espectrais para os índices, considera-se também a tabela com os valores (Tabela 2), e observa-se que para o NDVI e o GLI, há a presença de valores positivos e negativos, a depender das assinaturas espectrais para os pontos amostrais de solo exposto, telhado, sombra e vegetação, em que a partir dessas análises, o GLI apresentou características com melhor desempenho de separação dos alvos, condizendo com os estudos de Silva et. al (2022), ao mostrar na sua pesquisa a sensibilidade do GLI na identificação das áreas de solo exposto, por exemplo, em uma imagem obtida por Aeronave Remotamente Pilotada (ARP).

Tabela 2 - Pontos amostrais com as respostas espectrais dos índices.

Ponto	Coordenada X	Coordenada Y	NDVI	GLI
Solo exposto	742319,53 m	9449414,92 m	-0,0254375	-0,010687
Telhado	742333,81 m	9449412,37 m	0,15151	-0,0197628
Sombra	742339,73 m	9449413,41 m	0,72166	0,00584795
Vegetação	742315,51 m	9449406,19 m	0,588801	0,447471

Fonte: Autor (2024).

Assim, as respostas espectrais dos alvos quando observado o GLI, mostraram-se negativamente para solo exposto e telhado, onde ao computar esse índice, valores negativos representam solo e características não vivas, além do que números bem próximos de zero, tiveram como respostas espectrais regiões de sombra, enquanto valores positivos representam folhas e caules verdes.

Além disso, os valores correspondentes aos pontos amostrais caracterizados como sombra, ficaram confusos ao computar o NDVI, que nesse caso, foram caracterizados como vegetação, apresentando valores normalizados positivamente na resposta do índice (0,72166), diferente da resposta espectral do GLI para esse mesmo ponto amostral, onde a sombra (0,00584795) realçou valores bem próximos de zero, não havendo confusão espectral entre as áreas vegetadas e sombra, expressando a função do GLI destaca por Louhaichi et al. (2001), ao discorrerem que esse índice tem a funcionalidade de ser um indicador de clorofila e criado para verificar onde existe plantas vivas, mortas e solo exposto.

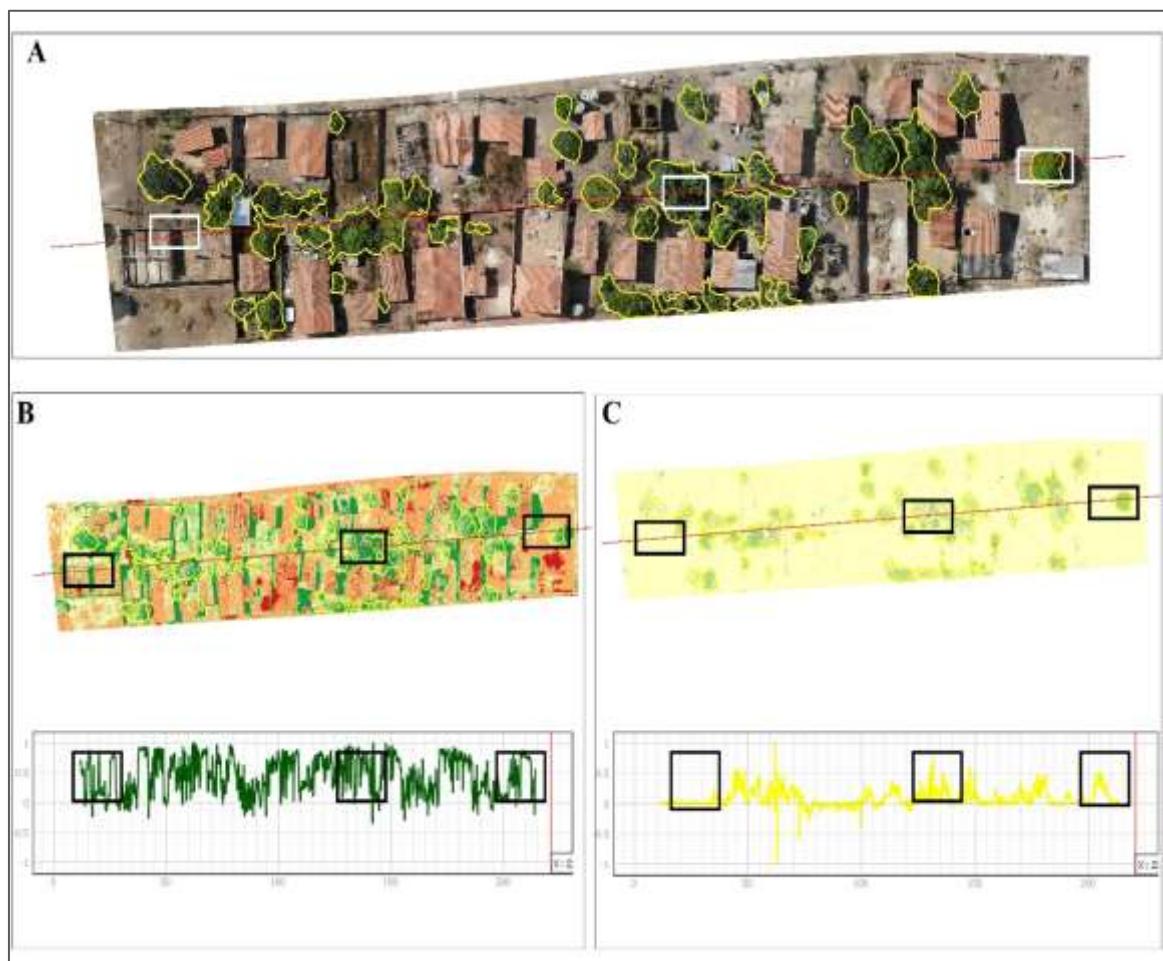
Sampaio et al. (2020), calculando o NDVI para comparar índices de vegetação extraídos de imagens obtidas por VANT (Veículo Aéreo não tripulado) e Satélite Orbital, identificaram valores não superiores a -0,2 ao observar nas imagens às áreas de solo exposto, e equiparando os resultados obtidos com os referidos autores, observou-se uma relação com as áreas de solo exposto para os valores encontrados nessa classe, validando, dessa forma, os dados da pesquisa.

Outra análise ao verificar pontos amostrais de vegetação, é que esses alvos se mostraram com valores oscilando entre os intervalos positivos de 0,1090 a > 0,7030, conforme apontado no mapa (Figura 7), revelando dessa forma, a vegetação com baixa, média e alta densidade, associando essas medidas conforme o comportamento

da vegetação, indicando o seu vigor vegetal, quando definida por uma vegetação verde e sadiã com dossel carregado de água e exercendo adequadamente suas funcionalidades metabólicas e fisiológicas, condizendo com os estudos de Vieira et al. (2023).

Ainda, para validar os valores em relação às respostas espectrais, foram marcados recortes espaciais de algumas áreas que caracterizam o aglomerado de diferentes alvos como mostra a Figura 8, em que se obteve às análises para estes recortes os índices estudados, partindo do traçado para geração do perfil em relação ao comportamento espectral.

Figura 8 – Comportamento espectral de algumas áreas tendo como referência a imagem de (A) composição colorida e suas análises correspondentes ao (B) NDVI e (C) GLI.



Fonte: Autor (2024).

O perfil do NDVI, representado na Figura 8 (B), evidenciou maior heterogeneidade nos valores, indicando uma possível confusão espectral entre os diferentes alvos da paisagem. Entretanto, o perfil apresentado na Figura 8 (C),

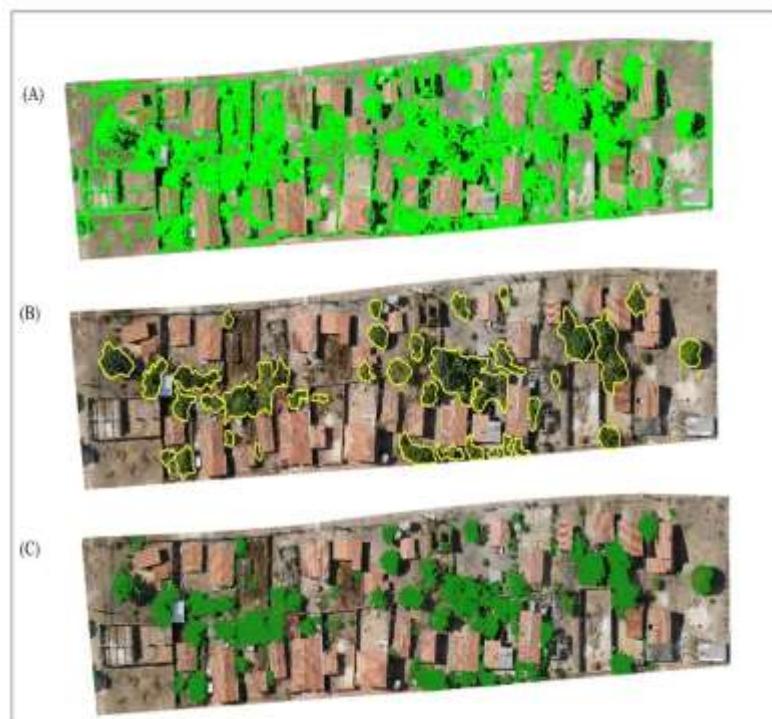
referente ao índice GLI, apresentou uma oscilação mais homogênea, com valores consistentemente acima de zero nas regiões com presença de vegetação.

#### 6.4.3 Extração e quantificação por Métricas de Paisagem

Além das análises mencionadas no presente estudo, voltadas para a identificação da dinâmica ambiental e do comportamento dos alvos, Pereira et al. (2001) ressaltam a importância da caracterização das alterações no uso e na cobertura da terra por meio do emprego de métricas de paisagem, sendo essas consideradas ferramentas fundamentais no campo da ecologia da paisagem, por possibilitarem a quantificação da estrutura espacial de habitats, ecossistemas ou demais tipos de cobertura terrestre.

Desta maneira, a Figura 9 ilustra a situação da métrica de paisagem aplicada, considerando as imagens de NDVI e GLI, onde considerou-se as classes associadas às respostas espectrais das áreas de vegetação que compreendem os intervalos de 0,4060 a > 0,7030, classes 4 e 5.

Figura 9 – A) Fragmentos de NDVI extraídos por métrica de paisagens. B) Imagem colorida representando a vetorização do dossel da vegetação. C) Fragmentos de GLI extraídos por métrica de paisagens.



Fonte: Autor (2024).

Na imagem vetorizada Figura 9 (B) e nos fragmentos extraídos da métrica de paisagem, o índice GLI, Figura 9 (C), demonstrou uma disposição espacial mais coerente dos pixels associados à biomassa, com menor confusão espectral entre os alvos, apresentando uma área mais coerente com a espacialização da vetorização do dossel, diferente do NDVI, em que não há uma coerência na espacialização das classes investigadas para com os polígonos vetorizados, conforme é visto na Figura 9 (A).

Com a aplicação da métrica de paisagem, tendo como base as respostas espectrais nas imagens de NDVI e GLI, também foi possível indicar quantitativamente os aspectos da estrutura espacial da paisagem na área do estudo, como mostra a Tabela 3, considerando todas as classes geradas através dos índices aplicados.

Tabela 3: Quantificação das classes comparando os índices estudados.

<b>Classe</b>	<b>Área NDVI (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área GLI (m<sup>2</sup>)</b>
1	459,93	0,08
2	3205,18	4,67
3	1750,15	7940,59
4	1267,69	517,94
5	1567,29	2,21
<b>Total</b>	<b>8277,27</b>	<b>8465,49</b>

Fonte: Autor (2024).

Porém, ao verificar as classes 4 e 5, sendo essas associadas aos fragmentos de vegetação com o vigor vegetal mais evidente, nota-se que a área dos fragmentos de pixel para o NDVI compreende um total de 2.834,98 m<sup>2</sup>, enquanto que para o GLI, essa mesma classe corresponde a 520,15 m<sup>2</sup>, onde nota-se visualmente que este índice apresenta um comportamento de estrutura dos fragmentos do dossel de forma mais homogênea, diferenciando do NDVI, onde este por sua vez, resulta em uma área maior, algo que pode estar associado aos fragmentos dos pixels que se comportam de maneira desigual.

#### 6.4.4 Classificação dos serviços ecossistêmicos prestados pela biomassa

A utilização da métrica de paisagem com base no GLI apresentou uma maior acurácia na representação das áreas de vegetação, favorecendo ao mapeamento da biomassa para diversas aplicações, dentre elas, pode-se usar a biomassa para investigar os serviços ecossistêmicos em áreas urbanas, em conformidade com a Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos – CICES (2018), que tem como finalidade classificar esses serviços considerando as contribuições que os ecossistemas oferecem ao bem-estar humano, diferenciando-os dos bens e benefícios derivados desses serviços (Tabela 4).

Tabela 4: Classificação dos serviços e funções ecossistêmicas da biomassa conforme a CICES.

<b>Tipo de Serviço</b>	<b>Função</b>	<b>Exemplos</b>
Provisão: Alimentos, água, materiais, energia, habitat.	Espaços verdes fornecem alimentos e habitat para pássaros, insetos e polinizadores.	Diversidade de espécies e abundância de pássaros e abelhas.
Regulação e manutenção: Controle de erosão, purificação da água, regulação do clima.	Filtragem, sequestro, armazenamento, sombreamento. Controle da erosão hídrica e eólica. Preservação de áreas de alimentação.	Capacidade de filtragem do solo, remoção de poluentes e regulação da temperatura urbana. Prevenção da perda de solo por ação da água e do vento. Ambientes que sustentam alimentação da fauna.
Culturais: Recreação, espiritualidade, identidade, conhecimento.	Uso direto do ambiente natural para lazer ou atividades físicas. Educação formal e informal, desenvolvimento cognitivo. Estética e senso de lugar	Caminhada e piquenique. Atividades educativas ao ar livre, visitas escolares Apreciação de paisagens, identidade cultural ligada ao território

Fonte: Adaptado de CICES (2018).

Como já destacado, o índice GLI apresentou maior acurácia na representação da cobertura arbórea, sua aplicação integrada à classificação dos serviços

ecossistêmicos, especialmente aqueles comumente associados às áreas verdes, conforme ilustrado na Tabela 4, mostra-se que a integração desses dados com a classificação dos tipos de serviços e funções, podem servir como base para o desenvolvimento de indicadores ambientais e socioeconômicos, subsidiando o planejamento e a formulação de políticas públicas ambientais, além de contribuir para processos de avaliação de impacto ambiental.

Ademais, destaca-se que pode ser aplicada as técnicas dos índices de vegetação para usar seu potencial na mensuração voltada ao pagamento por serviços ambientais (PSA), instrumento econômico que visa incentivar, por meio de remuneração, práticas que favoreçam ou preservem a qualidade dos serviços ecossistêmicos, promovendo, assim, a sustentabilidade e a conservação dos recursos naturais.

Desta maneira, partindo do uso do GLI como o índice mais sensível e favorável ao mapeamento da cobertura arbórea na área do estudo, nota-se que no recorte espacial da área há vários serviços e funções que pode-se identificar comumente, como os apresentados na Tabela 4, caracterizados através dos Serviços de Provisão, identificados nas áreas verdes preservadas à medida que estas desempenham a função de fornecer habitat para a fauna local, além de contribuírem para a produção de alimentos, por meio da presença de espécies arbóreas frutíferas. Essa característica favorece a diversificação da fauna e da flora na região.

Adicionalmente, foram identificados na área do estudo os Serviços de Regulação e Manutenção, os quais incluem a oferta de sombra, contribuindo para a amenização das condições microclimáticas, o sequestro biológico de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), realizado por meio da fotossíntese, processo em que as plantas absorvem  $\text{CO}_2$  e armazenam carbono em sua biomassa, e o controle da erosão, evidenciado pela atuação das raízes vegetais na estabilização do solo e na prevenção de processos erosivos, observação que converge com a descrição da oferta de serviços pelas componentes ambientais conforme a CICES.

Outro serviço encontrado comumente em áreas contempladas com biomassa, é caracterizado por Serviços Culturais, podendo oferecer funções de lazer, desenvolvimento cognitivo, onde essas áreas podem ser exploradas para realização de aulas de campo promovida por escolas, bem como a preservação da identidade cultural do território, proporcionando a conservação da memória dos aspectos característicos daquela região.

## 6.5 CONCLUSÃO

A variação no conjunto de dados para a área do estudo, tem apresentado comportamentos espectrais diferentes de acordo com o tipo de objeto mapeado na imagem.

Quanto aos índices analisados individualmente, pode atestar-se que o NDVI apresentou uma variação de dados caracterizados de forma heterogênea, conforme apontado nos dados estatísticos, histograma e carta imagem, onde foi notado uma confusão do alvo sombra associada a vegetação, dificultando, dessa forma, a separação do dossel vegetal para com outros alvos.

Em relação ao GLI, esse mostrou resultados mais homogêneos, principalmente apresentando uma frequência nos valores próximos a zero, caracterizando assim, áreas de solo exposto e outras estruturas que não seja vegetação, separando as áreas de cobertura vegetal com dossel de estrutura sadia, e não havendo confusão com outros alvos.

Dado o exposto, destaca-se nesse estudo a utilização do GLI como um método mais suscetível em relação ao NDVI para a investigação de áreas com cobertura vegetal, podendo contribuir substancialmente para a gestão de áreas verdes urbanas, apontando o monitoramento dos indivíduos arbóreos, sendo esses provedores de serviços ecossistêmicos diversos, como serviços de provisão, regulação e cultural.

Além disso, os dados apresentados busca evidenciar a ecologia de paisagem, partindo da importância do homem nas modificações da dinâmica natural do ambiente, considerando a sustentabilidade através da preservação ambiental por meio de um planejamento urbano, arbóreo e regularização fundiária dentro de uma normatização e organização territorial, principalmente na área urbana, na qual a cobertura arbórea nesse espaço pode oferecer funções de regulação climática, controle da erosão, aquisição de ciência, educação e recreação, planejando a área de tal forma que possa atender um planejamento e regularização urbana sustentável de referência para a promoção de serviços ecossistêmicos, haja vista que a área em questão está passando por um processo de regularização urbana fundiária.

Portanto, estudos aplicando índices de vegetação destacam as características do comportamento de uma determinada cobertura vegetal, colaborando no mapeamento desses recursos naturais e prevendo o planejamento urbano com a preservação ambiental que culmina na oferta de serviços e funções ecossistêmicas.

Porém, para esse estudo, recomenda-se futuramente, o pré-processamento das imagens através da calibração (radiância e reflectância), utilizando a metodologia do Sensoriamento Remoto Óptico, objetivando analisar os resultados das imagens com e sem correção atmosférica.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, C., Furst, L., Gonçalves, A., & Teodoro, A. (2022). Remote Sensing Image-Based Analysis of the Urban Heat Island Effect in Bragança, Portugal. **Environments**, 9, 98. <https://doi.org/10.3390/environments9080098>.
- Arai, K. et al., 2016. Method for nir reflectance estimation with visible camera data based on regression for ndvi estimation and its application for insect damage detection of rice paddy fields. **International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence**, v. 5, n. 11, p.17–22.
- Assis, J. et al., 2014. Mapeamento do Uso e Ocupação do Solo no Município de Belém de São Francisco-PE nos Anos de 1985 e 2010. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, n.05, p. 859-870.
- Bandini, F. et al., 2017. Measuring water level in rivers and lakes from lightweight Unmanned Aerial Vehicles. **Journal of Hydrology**, v.548, p. 237-250.
- Bezerra, U. A. et al., 2017. Multitemporal analysis of vegetation indices for the superior region of the Moxotó River hydrographic basin. **Journal Of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, p. 272-283.
- Brasil. **Lei nº 13.465 de 11 de julho de 2017**. Dispõe sobre a regularização fundiária rural e urbana, sobre a liquidação de créditos concedidos aos assentados da reforma agrária e sobre a regularização fundiária no âmbito da Amazônia Legal; institui mecanismos para aprimorar a eficiência dos procedimentos de alienação de imóveis da União; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2017]. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/lei/l13465.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/lei/l13465.htm). Acesso em: 05 jan. 2024.
- Empresa Teresinense de Serviços Urbanos. **Diagnóstico do Núcleo Urbano**. Teresina-PI, 2023.

Errea, C. L., Almeida, C. R. de, Gonçalves, A., & Teodoro, A. C. (2023). Remote Sensing Analysis of the Surface Urban Heat Island Effect in Vitoria-Gasteiz, 1985 to 2021. **Remote Sensing**, 15(12), Artigo 12. <https://doi.org/10.3390/rs15123110>.

Ferreira, M. A.; Zabotto, A.; Periotto, F. **Verde urbano**. Engenheiro Coelho: Editora Universitária Adventista, 2021. E-book. Disponível em: <http://www.unep.org/pt-br/resources/publicacoes/restaurando-cidades-e-book-verde-urbano-0.pdf>. Acesso em: 14 out. 2022.

Ferreira, B., Estevam, A., & Maia, D. (2022). Clima Urbano e Ilhas de Calor no Miolo Urbano na Cidade de Salvador (BA). **Revista Brasileira de Geografia Física**, 15, 2768–2780. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.6.p2768-2780>.

HAINES-YOUNG, Roy; POTSCHEIN-YOUNG, Marion. **Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and guidance on the application of the revised structure**. Nottingham: Fabis Consulting Ltd., 2018. Disponível em: <https://cices.eu/>. Acesso em: 27 fev. 2025.

Honorato, A. F. A. Ilhas de calor e frescor na área urbana da cidade de Aquidauana, MS. **Revista Geonorte**, v. 2, n. 4, p.878-886, 2012.

Huang, Q. et al., 2020. Linking ecosystem services and subjective well-being in rapidly urbanizing watersheds: Insights from a multilevel linear model. **Ecosystem Services**, v. 144, n. 109532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101106>.

IBGE. **Teresina - Panorama**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pi/teresina/panorama>.

Jardim, A. M. da R. F., Araújo Júnior, G. do N., Silva, M. V. da, Santos, A. dos, Silva, J. L. B. da, Pandorfi, H., Oliveira-Júnior, J. F. de, Teixeira, A. H. de C., Teodoro, P. E., de Lima, J. L. M. P., Silva Junior, C. A. da, Souza, L. S. B. de, Silva, E. A., & Silva, T. G. F. da. (2022). Using Remote Sensing to Quantify the Joint Effects of Climate and Land Use/Land Cover Changes on the Caatinga Biome of Northeast Brazilian. **Remote Sensing**, v.14, n.8. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14081911>.

Libombo, S. E.; Galvino, J. D., 2022. Análise da cobertura vegetal do município de Mocambique, utilizando imagens de satélites. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.12, n.6, p. 410-417.

Louhaichi, M.; Borman, M.M. & Johnson, D.E. 2001. Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. **Geocarto International**, v. 16, n. 1, p. 65-70.

Milas, A. S.; Cracknell, A. P.; Warner, T. A., 2018. Drones – the third generation source of remote sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, v.39, n.21, p. 7125–7137. DOI: <http://doi.org/10.1080/01431161.2018.1523832>.

Monteiro, M. S. **Serviços Ecossistêmicos e Planejamento Urbano: A natureza a favor do desenvolvimento sustentável das cidades**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2018.

Ponzoni, F.J.; Shimabukuro, Y.E.; Kuplich, T.M. **Sensoriamento Remoto da vegetação**. São José dos Campos: Editora Oficina de Textos, 2012. 135 p.

Rouse, J.W.J.R.; Haas, R.H.; Schell, J.A. & Deering, D.W., 1973. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. in: Proceedings of the third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3, Washington, D.C.

Shah, P., & Patel, C. 2023. Integration of Remote Sensing and Big Data to Study Spatial Distribution of Urban Heat Island for Cities with Different Terrain. **International Journal of Engineering**, 36, 71–77. <https://doi.org/10.5829/IJE.2023.36.01A.09>

Sampaio, H. S. et al., 2020. Comparação entre índices de vegetação obtidos por imagens aéreas com veículo aéreo não tripulado (VANT) e satélite. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 14, n. 2, p. 111-124.

Santos, C.V.B. et al., 2020. Uso de Sensoriamento Remoto na análise da temperatura da superfície em áreas de floresta tropical sazonalmente seca. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 03, p. 941-953.

Santos, J. B. et al., 2023. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e seu uso no estudo da saúde humana: uma revisão de escopo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 03, p. 1115-1144, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>. Acesso em: 5 maio 2025.

Silva, J.F. et al., 2019. Remote Sensing vegetation index for processing images in the visible band (RGB). **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.9, n.4, p. 228-239.

Silva, M. H.; Elias, A. R.; Rosário, L. L., 2022. Análise da cultura da soja a partir de índices de vegetação (ExG – GLI – TGI – VEG) advindos de imagens RGB obtidas

com ARP. **Revista Brasileira de Geomática**, v.10, n.2, p. 140-154.

Tagliarini, F. S. N., 2020. Imagens de drone e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para classificação segmentada em Áreas de Preservação Permanente (APP). **Tese** (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

Teresina. **Lei n.º 5.788 de 24 de agosto de 2022**. Dispõe sobre a política de Regularização Fundiária Urbana no município de Teresina-PI e dá outras providências. Teresina: Câmara Municipal, [2022]. Disponível em: [Vieria, B. F.; COSTA, J. J.; ALMEIDA, A., 2023. Quintão de. Análise temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada \(NDVI\) na Serra da Caboronga, em Ipirá-BA. \*\*Revista Brasileira de Geografia Física\*\*, v. 16, n. 06, p. 3593-3606. Disponível em: < <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>. Acesso em: 22 set. 2024.](http://200.23.153.37/acervodigital/norma/lei-complementar-5788022#:~:text=ALTERA%20DISPOSITIVOS%20DA%20LEI%20COMPLEMENTAR,PI%20E%20D%C3%81%20OUTRAS%20PROVID%C3%8ANCIAS%E2%80%9D.&text=n%C2%BA%2013.465%2F2017%2C%20de%2011%20de%20julho%20de%202017.&text=informais%20comprovadamente%20existentes%20na%20forma%20desta%20Lei. Acesso em: 05 jan. 2024.</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

Yurovskaya, M. et al., 2018. Wave spectrum retrieval from airborne sunglitter images. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 61-71.

Worsa-Kozak, M., & Arsen, A. 2023. **Groundwater Urban Heat Island in Wrocław, Poland**, v.12, n.658. DOI:<https://doi.org/10.3390/land12030658>

Zhang, W., Yang, X., Yuan, Z., Chen, Z., & Xu, Y. 2024. A Framework for Fine-Grained Land-Cover Classification. **Remote Sensing**, v.16, n.390. DOI:<https://doi.org/10.3390/rs16020390>.

Zhu, W., Sun, J., Yang, C., Liu, M., Xu, X., & Ji, C. 2021. How to Measure the Urban Park Cooling Island? A Perspective of Absolute and Relative Indicators Using Remote Sensing and Buffer Analysis. **Remote Sensing**, v.13, n.3154. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13163154>.

## 7 CAPÍTULO 2 - ARTIGO 2: USO DA GEOTECNOLOGIA NA AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS NA FORMAÇÃO FLORESTAL EXISTENTE NA ZONA URBANA DE TERESINA.

### 7.1 INTRODUÇÃO

O crescimento das áreas urbanas é um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico dos países, estados e municípios, sendo a urbanização, um importante indicador do nível de modernização de uma região, caracterizada principalmente, pelo uso e ocupação do solo nessas áreas (Castells, 2002).

A urbanização pode contribuir para a melhoria social e o desenvolvimento econômico, impactando em diversas áreas, bem como a alteração da infraestrutura faz parte desse processo (Bertinelli e Black, 2004). Entretanto, quando a urbanização acontece de forma desordenada, ela traz uma série de modificações nos ecossistemas já existentes, afetando os equilíbrios energéticos locais e regionais, ciclo hidrológico, fixação total de carbono e a produção vegetal (Peng *et al.*, 2017).

Atrelado ao processo de urbanização, surge o que se conhece hoje como ecossistemas urbanos, caracterizado pelas comunidades biológicas, vegetais e animais, que habitam as grandes cidades, e fornecendo bens e serviços valiosos, através dos chamados serviços ecossistêmicos (Alberti, 2008).

Andersson *et al.*, (2014), define que a capacidade de uma cidade promover os serviços ecossistêmicos, dependem da configuração espacial dos ecossistemas urbanos, partindo da interação dos elementos dos ecossistemas naturais com aqueles construídos pelo homem.

Os ecossistemas urbanos são compostos pelos mesmos elementos dos ecossistemas naturais, mas com uma condição que haja a interação desses elementos com os elementos artificiais. Nos ambientes citadinos, a identificação de arborização nas ruas, nos gramados e nos parques, a existência de florestas urbanas, áreas cultivadas, áreas pantanosas, ambientes de recursos hídricos como lagos, mar e cursos d'água, são elementos que fazem parte dos ecossistemas urbanos (Bolund e Hunhammar, 1999).

Adler e Tanner (2015), por sua vez, caracterizam esses elementos de maneira mais reduzida, onde para esses autores, os ecossistemas urbanos compreendem

quatro diferentes habitats, caracterizando-os como ambientes construídos (muros, construções, áreas pavimentadas etc.), ambientes de resíduos (aterros e lotes abandonados), verdes (parques, jardins, campos de jogo, cemitérios etc.) e aquáticos (charcos, reservatórios, cursos d'água etc.).

Entre os habitats existentes nos ecossistemas urbanos, Eigenbrod *et al.*, (2011), enfatizam que as áreas verdes urbanas como parques, canteiros, jardins e outras áreas com a presença de habitats natural, têm sido fundamentais para a prestação dos serviços ecossistêmicos, contribuindo, e muito, para o conforto e a saúde da população urbana, sendo crucial o mapeamento dessas áreas para elencar os serviços ali presentes.

O mapeamento de serviços ecossistêmicos vem ganhando destaque, tornando visível a distribuição espacial desses serviços, sendo um método cada vez mais utilizado para fornecer informações na tomada de decisão, auxiliando no aumento da conscientização da população e na criação de estratégias para conservação, podendo revelar consequências decorrentes das mudanças do uso e ocupação do solo associadas a urbanização, que ocorrem através de atividades antrópicas e geram efeitos nos ecossistemas naturais, afetando diretamente a oferta dos serviços ecossistêmicos (Malinga *et al.*, 2015; Maes, Crossman e Burkhard, 2016).

Considerando o crescimento urbano nas cidades brasileiras, a expansão territorial de Teresina tem sido marcada por um crescimento horizontal acelerado, caracterizada pela formação de vazios urbanos e desigualdades territoriais, em que entre as décadas de 1950 e 1960, o setor industrial foi primordial na produção do espaço urbano, associado ao aumento de atividades comerciais e a política de habitação nacional, acarretando, dessa forma, o crescimento do perímetro urbano para a construção de conjuntos residenciais (Façanha, 2003; Viana, 2005).

Nesta perspectiva, esta pesquisa tem como objetivo mapear as áreas que promovem os serviços ecossistêmicos no perímetro urbano de Teresina-PI, apontando os serviços ecossistêmicos ali presentes, bem como realizar o monitoramento das mudanças no uso e ocupação do solo para com o fornecimento desses serviços, por meio de uma análise espaço-temporal na área investigada. Como hipótese, considera-se que essa abordagem seja relevante para às conservações dos ecossistemas urbanos naturais, proporcionando conhecer às funções ecossistêmicas dos elementos naturais em atendimento às necessidades ecológicas do município.

## 7.2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 7.2.1 A urbanização brasileira

Os ambientes urbanos são o local de vida de mais da metade da população da Terra, onde a tendência é que esse processo de urbanização siga aumentando. Conforme McDonnell e MacGregor-Fors (2016), pouco mais de 4 bilhões de pessoas vivem em cidades, ou seja, cerca de 54% da população global, e este percentual deverá se elevar a 68% em 2050.

No Brasil, o processo de urbanização é recente, que aconteceu de forma acelerada, processo esse marcado pelo deslocamento da população rural para a área urbana nas décadas de 1940 a 1980, motivadas pelas oportunidades oferecidas nos ambientes urbanos (Santos, 2005).

A migração da população para as áreas urbanas incentivou diversas ações de melhoria, como o aperfeiçoamento das condições sanitárias e o avanço dos padrões de vida decorrentes das atividades industriais, nos quais esses fatores foram vistos como atrativos que impulsionaram o crescimento populacional de forma vertiginosa ao longo dos anos. Além disso, o rápido crescimento urbano também gerou desafios significativos, como a pressão sobre a infraestrutura, mobilidade, habitação e o uso do solo (Silva, Santos e Lima, 2022).

Ainda, Silva, Santos e Lima (2022), relatam que no contexto atual, com a crescente do aumento populacional, diversas cidades brasileiras enfrentam barreiras estruturais, como Teresina, onde a expansão urbana se dá de forma dispersa e com marcantes desigualdades socioespaciais, onde é fundamental articular o crescimento urbano com o uso do solo através de um planejamento territorial ordenado.

Além dos problemas relacionados à existência de estruturas para atendimento à população, o processo de urbanização propicia um visível distanciamento entre sociedade e natureza, onde as cidades tornam-se espaços com evidências mais artificiais, em detrimento ao declínio dos elementos naturais. Cavalheiro (2009), comenta que o incremento de uma paisagem artificial é em função das atividades provenientes da concentração humana nos espaços urbanos, provocando uma

ruptura no funcionamento do ambiente natural.

As consequências negativas da urbanização mostradas através da poluição, da impermeabilização do solo e a canalização de córregos, comprometem a qualidade ambiental no meio urbano, principalmente quando há a ausência de elementos naturais que são suprimidos em virtude da transformação artificial do espaço, onde a preocupação recai sobre a qualidade ambiental proporcionada nestes espaços, como por exemplo, àquelas evidenciadas através dos serviços ecossistêmicos, cujo esses serviços oferecem benefícios fornecidos pelos ecossistemas naturais, impactando o bem-estar humano de diversas maneiras, haja vista que o bem-estar está profundamente ligado à saúde dos ecossistemas, e a continuidade da degradação comprometerá o desenvolvimento sustentável (McDonnell e MacGregor-Fors, 2016; Hinata, 2023).

#### 7.2.2 Categorização dos Serviços Ecossistêmicos e seu mapeamento em ambientes urbanos

O Millennium Ecosystem Assessment (2005), ou Avaliação Ecossistêmica do Milênio, foi um estudo amplo sobre as condições dos ecossistemas mundiais, lançado em 2001 e concluído em 2005, coordenada pelas Nações Unidas, o estudo objetivou avaliar as consequências das mudanças nos ecossistemas para o bem-estar humano e estabelecer a base científica para ações que melhorem a conservação e o uso sustentável dos ecossistemas.

O estudo do Millennium Ecosystem Assessment – MEA (2005) ao ser realizado, envolveu mais de 1.360 especialistas de todo o mundo, organizados em equipes temáticas e regionais, em que a metodologia adotada baseou-se em análises científicas integradas, combinando dados ecológicos, sociais, bem como realizado um estudo amplo sobre as condições dos ecossistemas naturais, em que os resultados chaves da pesquisa são mostrados no Quadro 1, no qual observa-se o percentual da situação dos ecossistemas, benefícios e prejuízos, impactos desiguais e categorização dos serviços ecossistêmicos.

Quadro 1. Resultados chaves do estudo Millennium Ecosystem Assessment - MEA.

RESULTADO	DESCRIÇÃO
Degradação acelerada dos ecossistemas	Aproximadamente 60% dos serviços ecossistêmicos avaliados estavam sendo degradados ou usados de forma insustentável.
Benefícios a curto prazo x prejuízos a longo prazo	A exploração intensiva trouxe ganhos econômicos imediatos, mas comprometeu a capacidade de manutenção dos ecossistemas.
Impactos desiguais	A degradação afeta principalmente populações pobres e vulneráveis, que mais dependem diretamente dos serviços ecossistêmicos.
Serviços ecossistêmicos categorizados	Provisão: alimentos, água, madeira, fibras, combustíveis. Regulação: clima, enchentes, doenças, qualidade da água. Culturais: valores espirituais, recreação, estéticos. Apoio/suporte: formação do solo, ciclo de nutrientes, fotossíntese.

Fonte: Adaptado de MEA (2005).

Dentre os resultados apresentados por esse estudo, a literatura tem dado destaque aos serviços ecossistêmicos, onde tem apontado diversos conceitos, mas de modo geral, esses serviços podem ser compreendidos como as funções desempenhadas pelos ecossistemas de forma natural, bem como aquelas mantidas, aprimoradas ou restauradas por ações antrópicas, visando conservar as condições ambientais adequadas à manutenção da vida no planeta (Monteiro, 2018).

Saldanha e Costa (2019) destacam a classificação de diferentes serviços ecossistêmicos, como os identificados em suas pesquisas, ao observarem a existência dos serviços de provisão, manutenção e/ou regulação e culturais na zona estuarina do Rio Piancó-Piranhas-Açu, no qual esses serviços proporcionaram uma série de benefícios diretos ou indiretos, sejam eles para benefício do homem como também do próprio ambiente.

Ao longo dos anos, diversas pesquisas têm evidenciado o mapeamento de serviços ecossistêmicos, proporcionando tomadas de decisão que melhorem a conservação e o uso sustentável dos ecossistemas, principalmente em ambientes

urbanos, haja vista a intensa interação antrópica com os elementos naturais em áreas urbanas. Nesse sentido, Duarte et al., (2017) analisaram o papel da cobertura vegetal nas cidades e sua influência na qualidade de vida urbana, destacando, por exemplo, a regulação térmica proporcionada pela presença da cobertura florestal, sendo este serviço ecossistêmico caracterizado como serviços de regulação, com base na Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos – CICES (2018), em que esta classificação busca sistematizar a tipologia de serviços ecossistêmicos, ampliando as propostas do Millennium Ecosystem Assessment (2005) e do Economics of Ecosystems and Biodiversity – TEEB (2010).

Essa discussão dialoga diretamente com as categorias propostas pelo Millennium Ecosystem Assessment (2005), reconhecendo, por exemplo, que os serviços de regulação são essenciais para a manutenção das condições ambientais adequadas ao bem-estar humano, incluindo o controle do microclima urbano. Concomitantemente, The Economics of Ecosystems and Biodiversity – TEEB (2010) reforça a relevância de tais serviços, ao destacar os benefícios econômicos e sociais derivados da manutenção de áreas verdes em cidades, os quais vão desde a redução de custos energéticos até a mitigação dos efeitos das ilhas de calor, sendo que a presença da cobertura vegetal em ambientes urbanos não apenas favorece a qualidade de vida, mas também constitui um elemento estratégico para o planejamento sustentável das cidades, ao integrar dimensões ecológicas, sociais e econômicas.

Desse modo, ao se realizar o mapeamento dos serviços ecossistêmicos em ambientes urbanos, pode-se encontrar a classificação em diferentes categorias desses serviços, considerando àquelas principais da literatura, como a Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos – CICES, Millennium Ecosystem Assessment - MEA e do Economics of Ecosystems and Biodiversity – TEEB, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Categorização dos Serviços Ecossistêmicos MEA × TEEB × CICES

Referência	Enfoque	Categorias Principais	Contribuição
MEA	Bem-estar humano e condições ambientais globais.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Provisão (alimentos, água, madeira, fibras)</li> <li>- Regulação (clima, doenças, qualidade da água, ar)</li> <li>- Culturais (espirituais, recreativos, estéticos)</li> <li>- Suporte (ciclos de nutrientes, formação do solo).</li> </ul>	Estabeleceu a primeira tipologia global de serviços ecossistêmicos, relacionando-os ao bem-estar humano.
TEEB	Valorização econômica da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Serviços de provisão</li> <li>- Serviços de regulação</li> <li>- Serviços culturais</li> <li>- Serviços de suporte</li> </ul>	Evidenciou os benefícios econômicos da natureza e propôs instrumentos de integração na política pública.
CICES	Padronização internacional para pesquisa, monitoramento e políticas ambientais.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Serviços de provisão</li> <li>- Serviços de regulação e manutenção</li> <li>- Serviços culturais</li> </ul>	Estrutura hierárquica (seções, divisões, grupos, classes), voltada para comparabilidade internacional. Simplifica e atualiza as categorias anteriores.

Fonte: Adaptado de MEA (2005), TEEB (2010) e CICES (2018).

Ainda, com relação ao mapeamento de áreas e serviços ecossistêmicos, Silva, Lima e Damineli (2024), discorreram em seu trabalho a importância da aplicação do mapeamento em áreas degradadas, uma vez que essas aplicações tendem a identificar às áreas vegetadas e suprimidas, proporcionando a restauração ambiental, nessa última, uma vez que a recuperação dessas áreas pode garantir a prestação de serviços ecossistêmicos diversos, como mostrou a pesquisa, como a criação de corredores ecológicos e estoque de carbono.

### 7.2.3 Serviços Ecossistêmicos nas áreas verdes

As diferentes paisagens existentes nas cidades apresentam características complexas, dinâmicas e que sofre intensa pressão, em virtude do aumento populacional e acelerada expansão territorial, onde é notório que, nesse aspecto, a importância das áreas verdes tende a assumir na garantia de serviços ecossistêmicos

básicos à população, destacando-se assim, a preservação desses recursos naturais (Grimm et al., 2008).

As áreas verdes existentes, quando inserida no tecido urbano, sua dinâmica espacial pode ser vista de diversas formas, como por exemplo, em canteiros de ruas e avenidas, na mata ciliar de cursos ou corpos d'água, em parques urbanos e nos quintais das residências, sendo esses elementos naturais importantes para a regulação climática, por exemplo.

Quando se trata das áreas verdes urbanas, entre os serviços ecossistêmicos existentes nessas áreas, os serviços de regulação tende a ser um dos que mais se manifestam, em que esses serviços são aqueles decorrentes das funções regulatórias dos ecossistemas e que se relacionam à sua capacidade de manutenção da qualidade climática, purificação da água, polinização, controle de erosão, enchentes, desastres naturais e regulação biológica (Andrade, 2006).

Nas áreas verdes citadinas, vários autores abordam o papel da vegetação como fator mitigador no contexto urbano, podendo impactar direta e indiretamente as populações humanas através de algumas funções de regulação, como mostrado no Quadro 2 (Andersson et al., 2014; Queiroz et al., 2019).

Quadro 2. Serviços de Regulação a partir de áreas urbanas citadinas.

IMPACTO	FUNÇÃO DO SERVIÇO DE REGULAÇÃO
	Processos de polinização;
Aspectos reprodutivos da planta	Interação entre plantas e determinadas espécies animais; Aspectos abióticos, como pássaros, insetos, morcegos, vento e água, que contribuem para a regulação biológica, um serviço ecossistêmico essencial no combate a pragas, no caso de plantações e de propagação de espécies, em caso de vegetação nativa.
Conservação da biodiversidade	Manter o patrimônio genético e o processo evolutivo; Ecossistemas propícios para locais de abrigo, refúgio e berçário para animais e plantas, onde a maioria dos processos biológicos e ecológicos acontecem.
Cultural, conforto térmico e qualidade de vida	Valor estético às paisagens, busca cognitiva, uso recreativo, religioso, esportivo e de lazer. Busca por amenização térmica em espaços arborizados.

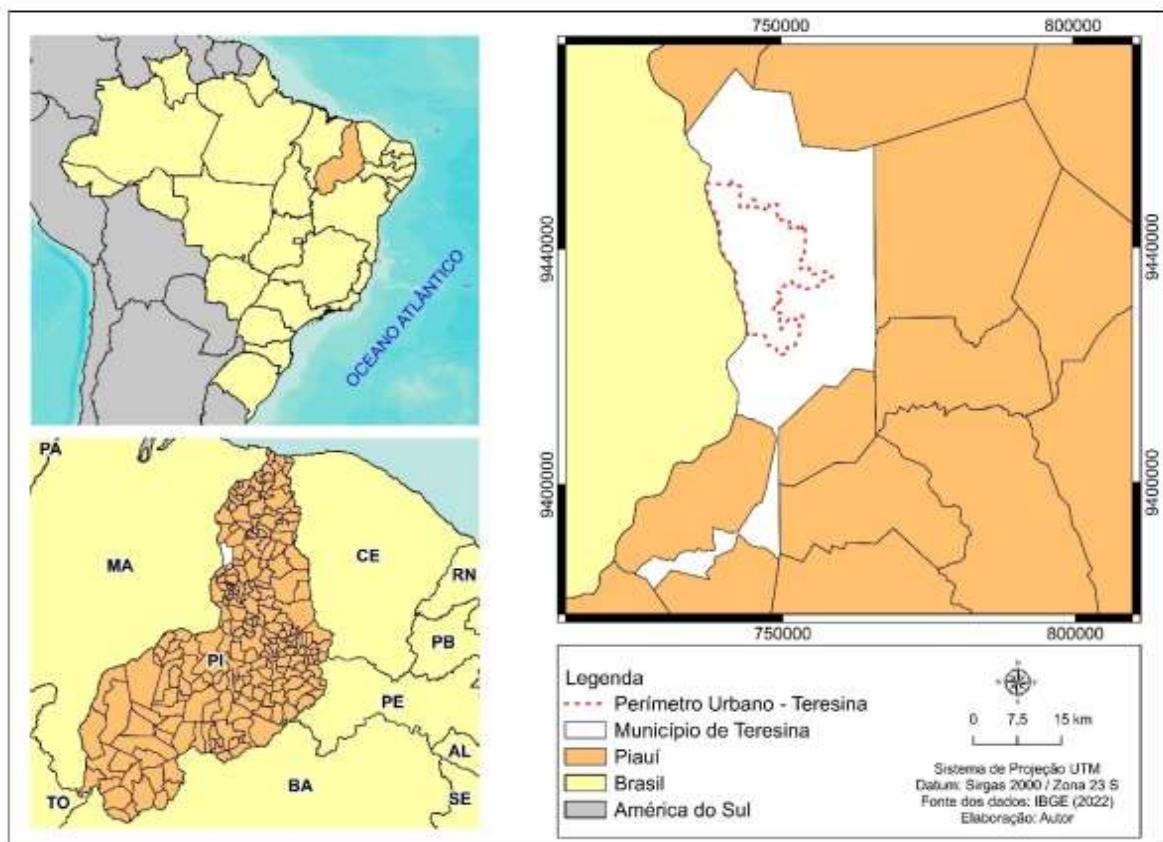
Fonte: Adaptado de Andersson et al., (2014); Queiroz et al., (2019).

### 7.3 METODOLOGIA

#### 7.3.1 Caracterização do Ambiente da Pesquisa

A presente pesquisa foi realizada no município de Teresina-PI, mais especificamente no seu limite urbano, em que o município tem a maior parte da população vivendo na área urbana delimitada, conforme mostra a Figura 1 (IBGE, 2022).

Figura 1. Localização de Teresina.



Fonte: Autor (2024).

#### 7.3.2 Delineamento da Pesquisa

Buscando compreender a influência da cobertura vegetal na qualidade de vida e seu papel enquanto serviço ecossistêmico no ambiente urbano de Teresina-PI, o presente estudo fundamentou-se em revisão de literatura sobre a temática, associada ao uso de dados provenientes de imagens de satélite, obtidas por meio de técnicas de sensoriamento remoto processadas em plataformas de computação em nuvem,

como o Google Earth Engine. Especificamente, foram utilizados os produtos da Coleção 2 (beta) do MapBiomas com 10 metros de resolução espacial que disponibiliza mapas anuais de cobertura e uso da terra para o período de 2016 a 2023, a partir das imagens do satélite Sentinel-2 (MapBiomas, 2025).

A escolha dessa Coleção justifica-se pela sua maior resolução espacial (10 metros), superior às versões anteriores, permitindo a identificação de elementos de maior detalhe, como florestas ripárias em Áreas de Preservação Permanente (APP) ao longo de rios e nascentes. Ressalta-se ainda que os dados do MapBiomas são públicos, abertos e gratuitos, disponibilizados sob a licença Creative Commons CC-BY-SA, o que amplia sua aplicabilidade em estudos científicos e no planejamento territorial.

Posteriormente, foram confeccionadas cartas georreferenciadas usando o software gratuito QGIS, a fim de averiguar os resultados e o comportamento espacial conforme as classes disponíveis pelo MapBiomas Brasil existentes na área do estudo.

A Figura 2 apresenta o delineamento metodológico da pesquisa, estruturado a partir da revisão de literatura, desde a utilização de dados espaciais para confecção dos mapas e análises até a caracterização dos serviços ecossistêmicos.

Figura 2. Delineamento da pesquisa.



Fonte: Autor (2025).

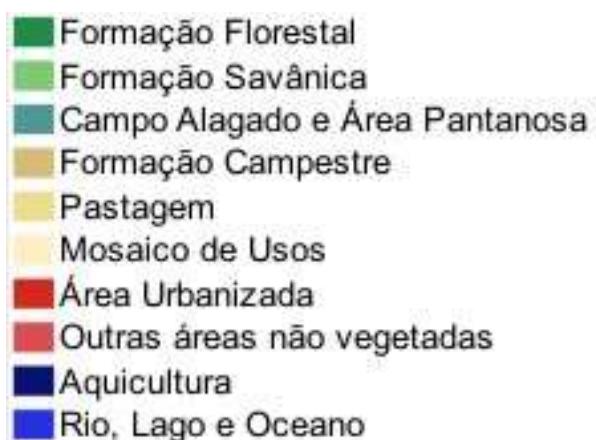
### 7.3.3 Classificação dos serviços verificados através da Common International Classification of Ecosystem Services – CICES

A checagem dos Serviços Ecossistêmicos, teve como base sua classificação através da Common International Classification of Ecosystem Services – CICES, em que a classificação apresentada teve como base uma investigação dos serviços de maneira direta *in loco*, e através da extração de informações de dados espaciais remotos para relacionar com o tipo de serviço oferecido. Com base na revisão bibliográfica, a presente pesquisa seguiu esse procedimento metodológico de verificação dos serviços com base no estudo de Araújo e Costa, (2024), onde a partir do momento que um serviço era edificado ocorria o registro dele relatando a sua presença no local.

### 7.3.4 Definição das Classes MapBiomas Brasil para uso e cobertura da terra

Para confecção dos mapas de uso e cobertura da terra, a partir dos produtos da Coleção 2 (beta) do MapBiomas, é necessário considerar as classes que estão organizadas em cinco macro classes (Floresta; Vegetação Herbácea e Arbustiva; Agropecuária; Área não Vegetada; e Corpo d'Água) e 31 micro classes. Ressalta-se que a legenda apresentada nos mapas e arquivos *raster* de cada coleção do MapBiomas varia conforme a área investigada. No caso específico da área de Teresina, as micro classes observadas encontram-se destacadas na Figura 3.

Figura 3. Micro classes observadas na área do estudo.



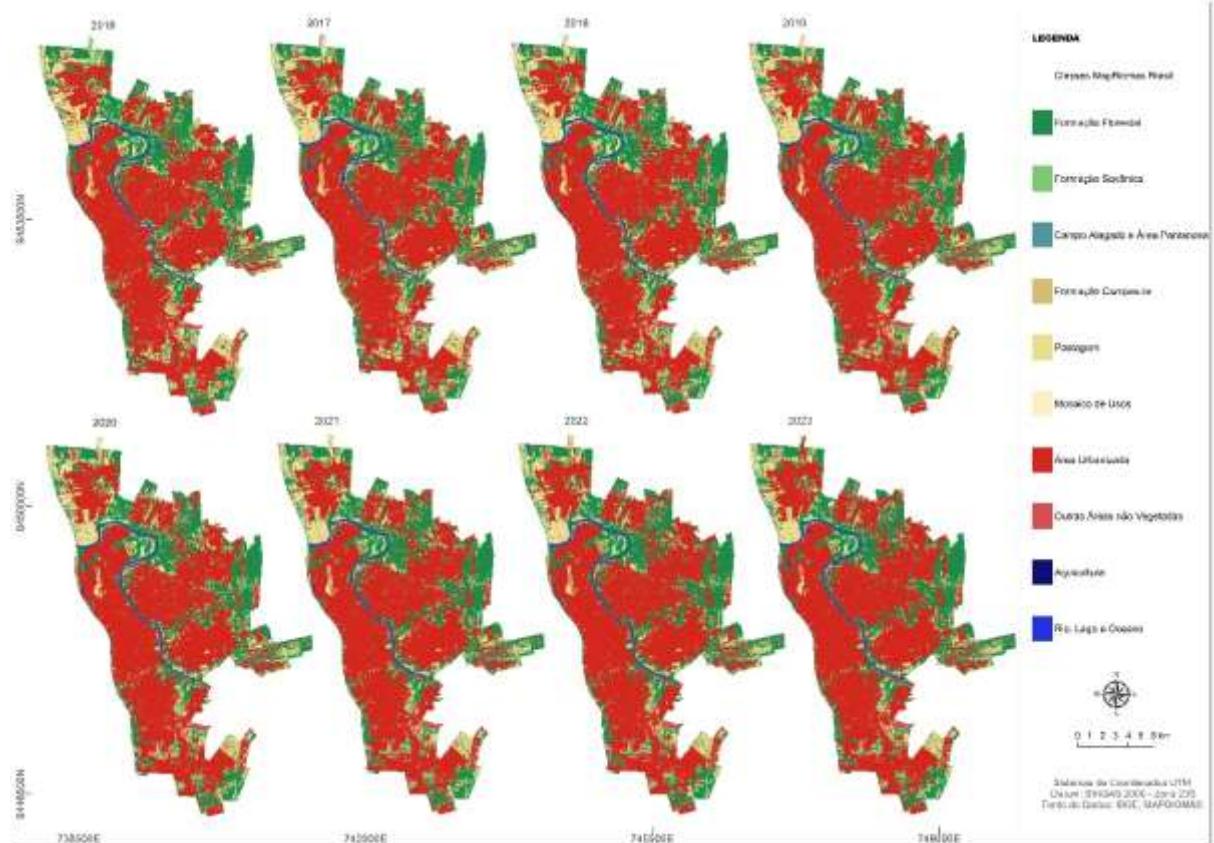
Fonte: MapBiomas Brasil (2025).

## 7.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao analisar os materiais que fizeram parte para construção deste trabalho, como por exemplo, dados espaciais remotos e pesquisas na literatura, observou-se que atualmente há a presença de serviços ecossistêmicos já identificados na literatura, bem como, através do mapeamento realizado, em determinado período, verificou-se que já não há mais a oferta de determinado serviço em algumas áreas, além do que se identificou através dos dados remotos, serviços que não são perceptíveis diretamente. Ainda, com a visita *in loco*, foi possível verificar a presença dos diferentes serviços ecossistêmicos no local, convergindo com a literatura que trata da caracterização e divisão dos serviços observados.

O mapa das classes de uso e cobertura da terra na área urbana de Teresina-PI (Figura 4), foram elaboradas a partir das imagens da coleção do MapBiomass para o período de 2016 a 2023, por ser uma série temporal mais curta disponibilizada nesta coleção ao utilizar o Satélite Sentinel-2, onde o mapeamento mostra 10 micro classes existentes na área do estudo, baseado na categorização do MapBiomass.

Figura 4. Classes de uso e cobertura da terra entre os anos de 2016 e 2023.



Fonte: Adaptado de MapBiomass Brasil (2025).

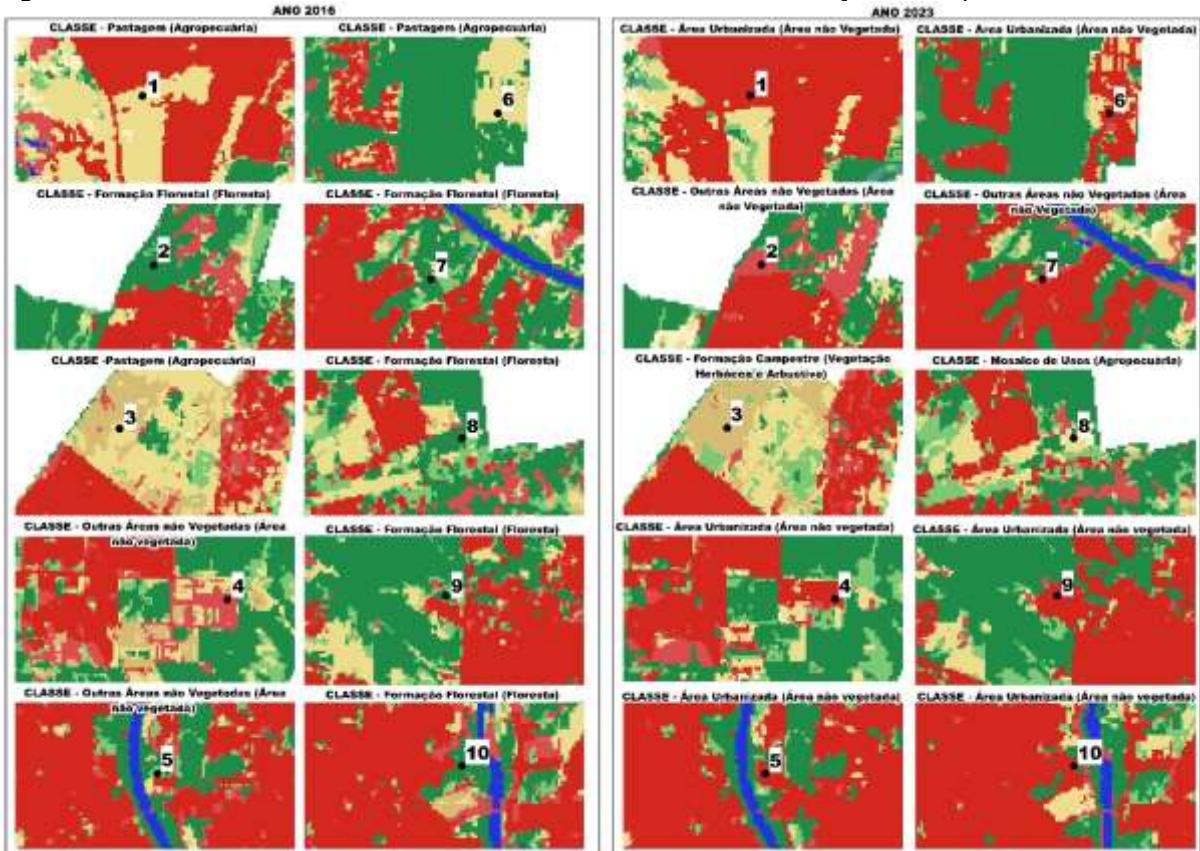
A dinâmica espacial das classes apresentada no mapa, indica que a área urbanizada se apresenta como a mais expressiva. Destacam-se, ainda, a formação florestal e a formação savânica, ambas pertencentes à macro classe Floresta, notadamente nas áreas periféricas da zona urbana, bem como nas áreas vegetadas dos corpos d'água existentes.

Os mapas representativos de uso e cobertura da terra, podem dar suporte na avaliação da ocorrência espacial de serviços ecossistêmicos, indicando onde melhorar o potencial desses serviços e onde priorizar a conservação da natureza e da biodiversidade, sendo um recurso de visualização, bem como proporcionar a investigação de qual tipo de serviço está sendo oferecido em determinada área.

Burkhard e Maes (2017), destacam que o mapeamento dos serviços ecossistêmicos contribui para a identificação de riscos à saúde do ecossistema, do uso insustentável de seu potencial de fornecimento, dos impactos negativos sobre a paisagem, dos fluxos espaciais comprometidos desses serviços, bem como das incompatibilidades entre a oferta e a demanda, além do que verifica as alterações temporais nas áreas que são provedoras de serviços ecossistêmicos.

Com isso, na Figura 5, ao considerar os mapas gerados, foi possível analisar e comparar as possíveis alterações no uso e cobertura da terra, principalmente em categorias de floresta, partindo dos dados espaciais que compõem essas categorias para os anos de 2016 e 2023 da coleção de dados do MapBiomass, caracterizando o ano inicial e ano final da série temporal disponibilizada.

Figura 5. Classes referente aos anos de 2016 e 2023, baseada na coleção do MapBiomas.



Fonte: Autor (2025).

Investigando a espacialização das classes nos pontos espacializados (Figura 5), fica evidente a urbanização como sendo o fator crucial para alterações no uso e ocupação do solo, principalmente nas áreas antes caracterizadas com Formação Florestal, em que no ano de 2016 havia algum tipo de cobertura florestal, e no ano de 2023, essa cobertura foi suprimida para o incremento de áreas urbanizadas e outras áreas não vegetadas.

Assim sendo, quando averiguado a comparação nas áreas dos anos estudados e verificado o declínio da Formação Florestal, há também a perda de algum serviço ecossistêmico relacionado aos componentes nas áreas verdes, como por exemplo, diminuição do potencial de umidade na área, destruição dos habitats naturais de espécies animais e aumento da temperatura local, por conta das mudanças e dos processos acelerados de urbanização, como apontado por Andersson et al., (2014), ao discorrerem que as fortes influências humanas em ambientes citadinos têm profunda implicações para os serviços e funções ecossistêmicas.

A tabela com os valores quantitativos (Tabela 2), apresenta as classes de 2016 e 2023 comparando o tamanho das áreas, confirmado às alterações territoriais

para às classes estudadas.

Tabela 2. Área das classes para os anos de 2016 e 2023.

Classe (macro)	Classe (micro)	Área (m <sup>2</sup> )	Ano
Floresta	Formação Florestal	63,87m <sup>2</sup> 63,28m <sup>2</sup>	2016 2023
	Formação Savânica	22,37m <sup>2</sup> 19,92m <sup>2</sup>	2016 2023
Vegetação Herbácea e Arbustiva	Campo Alagado e Área Pantanosa	162,98m <sup>2</sup> 453,33m <sup>2</sup>	2016 2023
	Formação Campestre	3,22m <sup>2</sup> 1,81m <sup>2</sup>	2016 2023
Agropecuária	Pastagem	28,31m <sup>2</sup> 18,58m <sup>2</sup>	2016 2023
	Mosaico de Usos	1,41m <sup>2</sup> 2,26m <sup>2</sup>	2016 2023
Área não vegetada	Área Urbanizada	133,56m <sup>2</sup> 151,95m <sup>2</sup>	2016 2023
	Outras Áreas não vegetadas	18,27m <sup>2</sup> 12,90m <sup>2</sup>	2016 2023
Corpo D' Água	Aquicultura	81,93m <sup>2</sup> 106,87m <sup>2</sup>	2016 2023
	Rio Lago e Oceano	3,46m <sup>2</sup> 3,46m <sup>2</sup>	2016 2023

Fonte: Adaptado de MapBiomass Brasil (2025).

Na Tabela acima, os valores quantitativos evidenciam que a classe Área Urbanizada (micro) apresentava, em 2016, uma extensão de 133,56 m<sup>2</sup>, passando para 151,95 m<sup>2</sup> em 2023, o que representa um acréscimo associado ao processo de expansão urbana. Por outro lado, ao analisar a categoria Formação Florestal juntamente com a Formação Savânica, observa-se que em 2016 o total correspondia a 86,24 m<sup>2</sup>, enquanto em 2023 essa soma reduziu para 83,20 m<sup>2</sup>, indicando uma tendência de diminuição das classes de floresta. Esse resultado corrobora os dados já apresentados, conforme a representação espacial disposta na Figura 5, que mostra as alterações das classes, em que a urbanização ganha espaço em detrimento da vegetação.

A partir das análises nos mapas de uso e cobertura da terra, pode-se identificar os serviços ecossistêmicos oferecidos pelas classes que compreende a categoria de Floresta inserida na área urbana de Teresina-PI, com base na estrutura hierárquica da Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (CICES, 2018),

haja vista que essa classificação foi baseada em categorizações anteriores apresentadas pelo Millennium Ecosystem Assessment – MEA (2005) e do Economics of Ecosystems and Biodiversity – TEEB (2010), sendo que o CICES serve como uma ampliação dos serviços abordados por MEA e TEEB (Tabela 3).

Tabela 3. Serviços Ecossistêmicos ofertados pela Classe Florestal conforme o CICES.

Serviço Ecossistêmico Observado	Seção	Divisão	Grupo	Classe
Sombreamento de árvores urbanas	Regulação e Manutenção	Regulação do Clima	Regulação microclimática e da umidade	Regulação local da temperatura e umidade por vegetação
Purificação do ar por árvores	Regulação e Manutenção	Regulação da qualidade do ar	Remoção de poluentes atmosféricos por vegetação	Remoção de compostos e partículas do ar por plantas
Produção de frutos por árvores nativas ou cultivadas	Provisão	Biomassa	Plantas cultivadas ou silvestres para nutrição	Produção de frutos comestíveis por vegetação
Sequestro de carbono por vegetação arbórea	Regulação e Manutenção	Regulação do Clima	Regulação climática em larga escala	Captura de carbono atmosférico por biomassa
Refúgio para fauna urbana (aves, insetos, etc.)	Regulação e Manutenção	Manutenção de habitats	Refúgios e suporte a populações	Provisão de habitat para espécies silvestres
Valor estético e sensação de bem-estar proporcionados por árvores	Culturais	Estéticos e simbólicos	Inspiração cultural, estética ou espiritual	Apreciação estética da paisagem e sensação de pertencimento
Filtragem de água da chuva pelas raízes e solo vegetado	Regulação e Manutenção	Regulação da qualidade da água	Filtragem e regulação por vegetação	Filtragem e purificação da água por processos biofísicos
Redução da temperatura urbana (ilhas de calor)	Regulação e Manutenção	Regulação do Clima	Regulação microclimática	Mitigação do efeito de ilhas de calor urbanas por cobertura vegetal
Atividades educativas em praças arborizadas	Culturais	Educação, ciência e recreação	Educação ambiental e científica	Uso da vegetação como recurso para educação formal ou informal
Caminhadas e lazer em áreas verdes	Culturais	Interações físicas e	Uso direto do ambiente para	Recreação em ambientes naturais

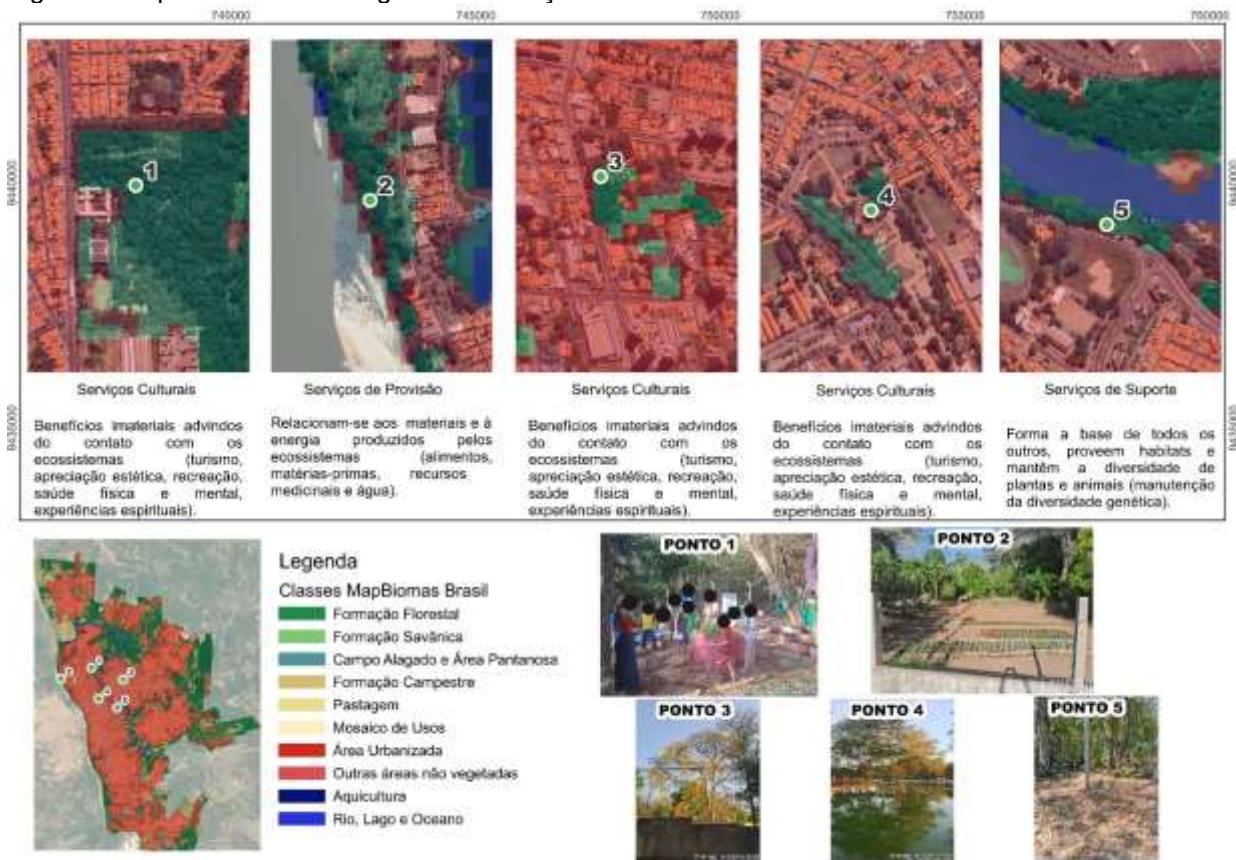
Serviço Ecossistêmico Observado	Seção	Divisão	Grupo	Classe
		recreativas	lazer	vegetados

Fonte: Adaptado de CICES (2018).

Destaca-se que a classificação dos serviços ecossistêmicos pela a CICES foi adotada no presente estudo por ter sido bastante utilizada em pesquisas para identificação, realização de indicadores, mapeamento e avaliação dos ecossistemas.

Nesse sentido, a partir do mapa de uso e cobertura da terra, pode-se atribuir os serviços ecossistêmicos oferecidos pelas classes que compreende a categoria de Floresta inserida na área urbana de Teresina-PI, onde é notado nesse estudo a existência dos serviços ecossistêmicos divididos em Serviços Culturais, Serviços de Provisão e Serviços de Suporte, sendo que o registro fotográfico obtido *in loco*, como mostrado na Figura 6, confirma a existência desses serviços.

Figura 6. Mapeamento e checagem dos serviços ecossistêmicos.



Fonte: Autor (2025).

Com base nos pontos amostrais obtidos nas áreas verdes visitadas e nas evidências explícitas registradas nas fotografias, constatou-se a ocorrência de serviços ecossistêmicos que convergem com aqueles apontados pela literatura. A descrição dos exemplos apresentados nas imagens reforça e valida a presença desses serviços, conforme sintetizado no Quadro 3.

Quadro 3. Tipo de Serviço Ecossistêmico e exemplo visto na área do estudo.

Ponto	Tipo de Serviço	Exemplo observado na área
1	Serviço Cultural	Realização de palestra de educação ambiental voltada para crianças.
2	Serviço de Provisão	Utilização de lote urbano em área verde para produção e cultivo de alimentos.
3	Serviço Cultural	Valor estético às paisagens em virtude do período de florada do Ipê ( <i>Handroanthus</i> ) em determinada época do ano.
4	Serviço Cultural	Espaço destinado principalmente para atividades de lazer e esporte.
5	Serviço de Suporte	Identificação de Iguana em habitat natural, proporcionando refúgio e manutenção das diversidades de sua espécie.

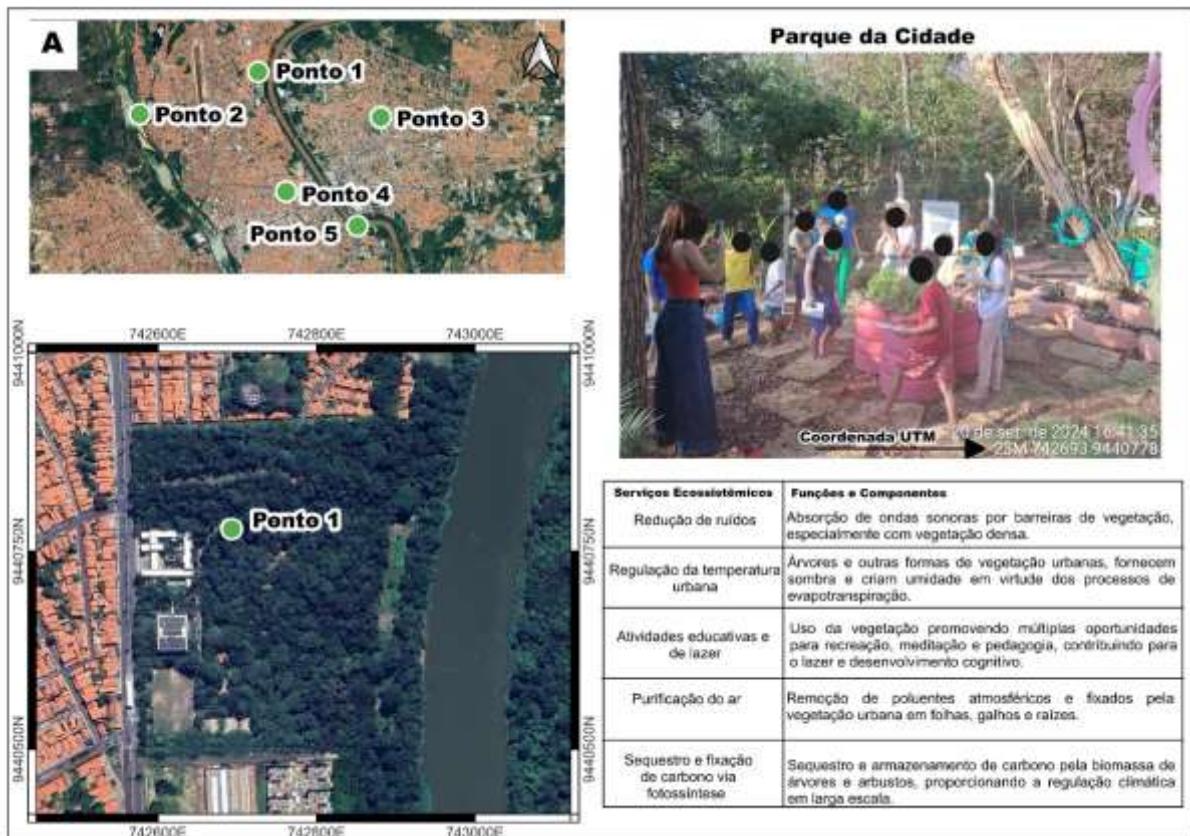
Fonte: Autor (2025).

Dessa forma, ao observar e descrever os elementos investigados nas áreas verdes e associá-los aos tipos de serviços ecossistêmicos, infere-se que tais áreas prestam diferentes serviços, sobretudo aqueles perceptíveis de forma direta pela população em suas atividades cotidianas. Exemplos observados *in loco* reforçam essa constatação, em consonância com o que destacam Costanza et al. (1997) e De Groot, Wilson e Boumans (2002), ao salientarem que a categorização dos serviços ecossistêmicos constitui um mecanismo que facilita a compreensão e assimilação, por meio de pesquisas, dos benefícios ofertados. No presente estudo, essa abordagem foi aplicada conforme orientam os referidos autores.

Além disso, embora alguns serviços não sejam perceptíveis de forma imediata, eles se enquadram nas categorias já mencionadas — Manutenção, Culturais, Provisão e Regulação. Este último, não identificado em um primeiro momento com a visita *in loco*, pôde ser associado posteriormente a partir das informações relacionadas às funções correspondentes a cada tipo de serviço ofertado. Tendo como referência

a literatura, foi possível inferir a ocorrência de outros serviços ecossistêmicos que, embora não evidentes visualmente, apresentam respaldo teórico. Tais serviços, com suas respectivas funções e componentes, estão representados na Figura 7.

Figura 7. Registro nas áreas categorizadas como Florestas e relação com os serviços ecossistêmicos investigados conforme a literatura – (A) Ponto 1, (B) Ponto 2, (C) Ponto 3, (D) Ponto 4 e (E) Ponto 5.



**B**

**Margeando a Avenida Maranhão**

Coordenada UTM: 27 de ago. de 2024 16:02:59  
23M 740711 9439750

Serviços Ecosistêmicos	Funções e Componentes
Produção de frutos por vegetação nativa ou cultivadas	Produção de alimentos comestíveis da vegetação, por meio de plantas cultivadas ou silvestres.
Conversão de energia em plantas comestíveis por meio de fotossíntese	Suprimento de alimentos vegetais produzidos em lotes urbanos e áreas periurbanas.

**C**

**Área da Sede do IBAMA**

Coordenada UTM: 27 de ago. de 2024 16:02:58  
23M 745711 9439750

Serviços Ecosistêmicos	Funções e Componentes
Valor estético	Apreciação estética da paisagem e apresentação de beleza cênica.
Polinização e dispersão de sementes	Movimentação de gametas florais (células reprodutivas) pela biota, bem como surgimento de habitat para pássaros e insetos polinizadores.

**D**

**Parque da Cidadania**

**Coordenada UTM:** 20 de ago. de 2025 17:21:31  
23M 743393 9437921

Serviços Ecosistêmicos	Funções e Componentes
Valor estético.	Apreciação estética da paisagem e apresentação de beleza cônica.
Caminhadas e lazer em áreas verdes.	Interações físicas e recreativas.

**E**

**Margeando a Avenida Marechal Castelo Branco**

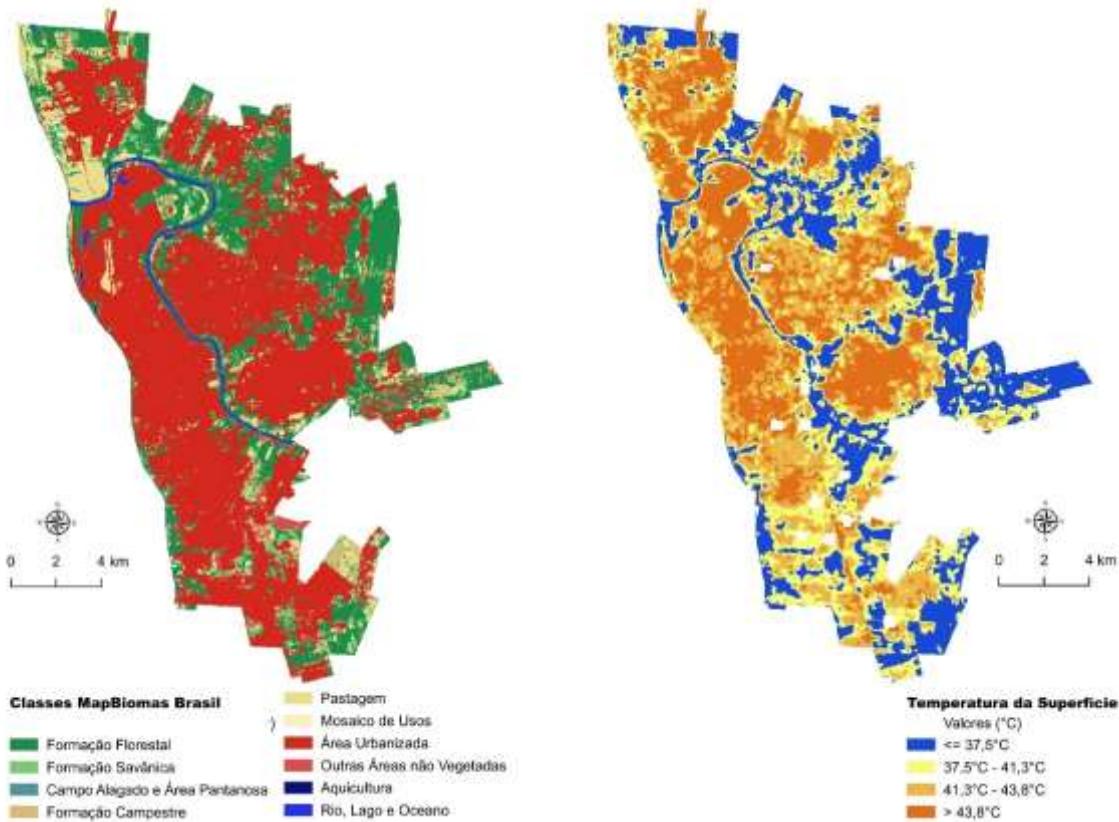
**Coordenada UTM:** 31 de ago. de 2024 17:20:01  
23M 7417451 9437581

Serviços Ecosistêmicos	Funções e Componentes
Refúgio para a fauna urbana (aves, insetos e etc).	Áreas verdes urbanas oferecem habitat para espécies silvestres, caracterizando refúgio e suporte para essas populações.
Filtragem da água da chuva pelas raízes e solo vegetado	Filtragem e purificação da água por processos biofísicos, bem como sustentação do solo pelas raízes das árvores.
Regulação do fluxo de água e mitigação de runoff	Solo e vegetação percolam a água durante chuvas fortes e/ou prolongadas.

Fonte: Autor (2025).

A utilização de dados espaciais obtidos remotamente, também contribuíram para a verificação de alguns serviços, como os Serviços de Regulação, onde a checagem do comportamento desse serviço foi realizado através da extração de informações para o mapeamento da Temperatura da Superfície ( $T_{sup}$ ), ao usar as imagens do Satélite Landsat-8, onde com a banda térmica desse satélite, foi possível observar e comparar a oferta de serviços para a função de regulação climática nas áreas de Formação Florestal mapeadas em relação aos dados do MapBiomas, conforme é visto na Figura 8.

Figura 8. Mapa comparativo relacionando a Temperatura da Superfície com os dados do MapBiomas.



Fonte: Autor (2025).

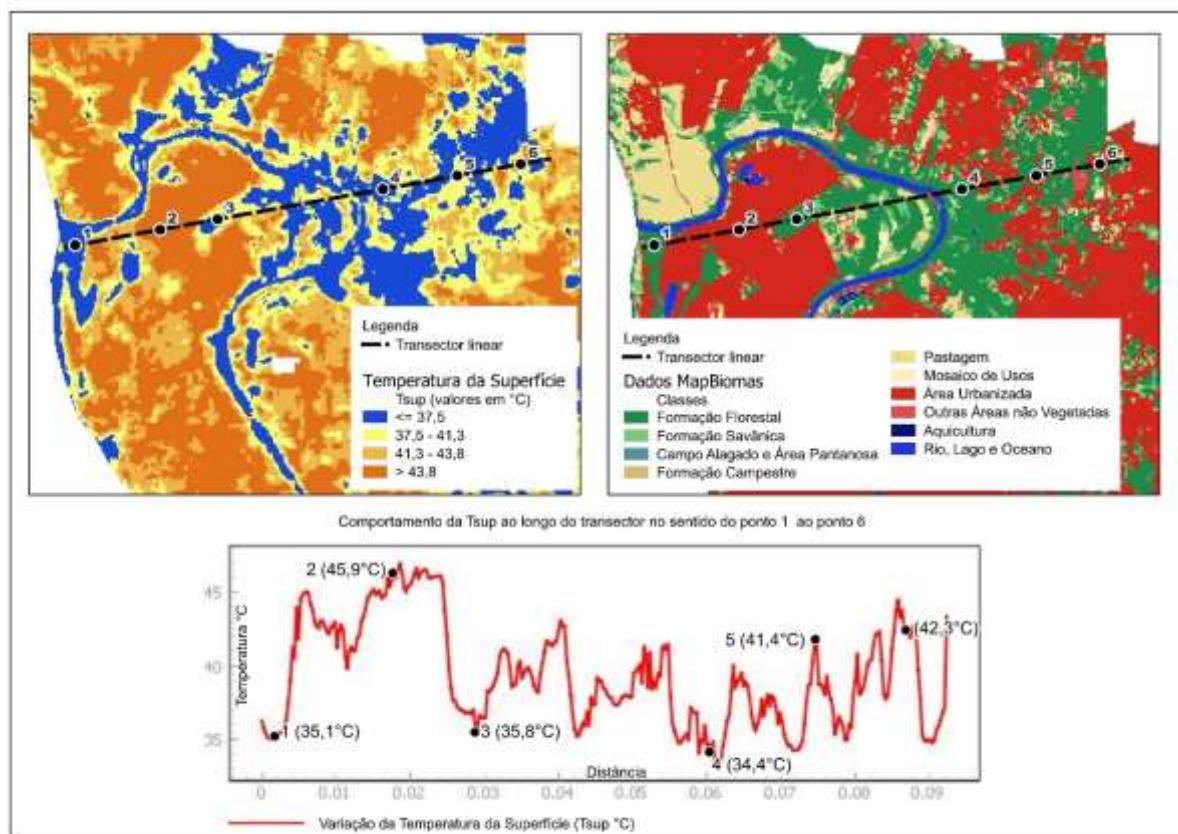
Ao comparar as informações das classes explícitas pelo MapBiomas e os dados de temperatura da superfície da banda termal do Satélite Landsat-8 (Figura 8), o serviço ecossistêmico oferecido é notado, em que aplicando o uso de informações espaciais através do mapeamento de comportamentos de fenômenos com variação contínua no espaço, a exemplo da temperatura superficial mostrada no mapa, percebe-se que as classes de Formação Florestal têm apresentado as menores temperaturas da superfície, registrando os menores valores de temperatura

escalonados, interpretados em menor ou igual a 37,5°C, espacialmente localizadas nas regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Sul, além da mata ciliar na margem dos rios, por consequência da existência de cobertura vegetal nessas áreas.

Diante desta análise, inferindo-se que, conforme o embasamento na literatura, o serviço ali oferecido por essas classes se enquadra como serviços de regulação, sendo importante para a função de regulação local da temperatura por parte dos indivíduos arbóreos existentes, proporcionando amenização climática.

Ainda, os serviços de regulação têm a função de atenuar a geração das chamadas ilhas de calor, fenômeno esse que com a ocupação dos espaços urbanos, como um todo, estabelecem inquestionável influência sobre o perceptível crescimento das temperaturas, causadoras de inquietações ou incômodos de natureza térmica, como mostra a Figura 9.

Figura 9. Influência da cobertura verde na amenização da temperatura em meio aos fenômenos de ilhas de calor.



Fonte: Autor (2025).

A partir da visualização (Figura 9), percebe-se uma variação nos valores da Temperatura de Superfície, em que as cores mais quentes, mostram as temperaturas maiores (de 41,3 a > 43,8), sendo associadas as classes de urbanização.

Com isso, ao longo do transecto linear que vai no sentido do ponto 1 ao ponto 6, os valores dos pixels de T<sub>sup</sub> variaram entre <=37,5°C a > 43,8°C, onde os pontos espacializados mostraram os menores valores de temperatura, caracterizados pela Formação Florestal, registrado no Ponto 1 (35,1°C), Ponto 3 (35,8°C) e Ponto 4 (34,4°C), todos eles localizados espacialmente em regiões vizinhas de áreas urbanizadas, em que o comportamento ao longo do transecto para as regiões de cobertura verde variaram com temperaturas abaixo ou próximas dos 35°C, compreendendo o intervalo do transecto linear traçado.

Já na Área Urbanizada, os pontos ali localizados mostraram maiores registros de temperatura, no Ponto 2 (45,9°C), Ponto 5 (41,4°C) e Ponto 6 (42,3°), evidenciando a influência da urbanização na elevação da temperatura quando comparado com os fragmentos de Formação Florestal circunvizinhos, que estes por sua vez, apontaram temperaturas menores, influenciando uma amenização no micro clima dessas regiões, como relatado na pesquisa de Silveira et al. (2022), onde mostraram que as árvores modificam o clima das cidades e melhoram o conforto térmico urbano, visto que elas atuam como elementos de sombreamento, além do que ressalta-se a importância da preservação de áreas verdes em centros urbanos, como parques e praças arborizadas, em razão da manutenção que exercem na temperatura da superfície.

## 7.5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa evidenciou a relevância das áreas verdes urbanas de Teresina-PI na provisão de serviços ecossistêmicos, demonstrando que tais espaços desempenham funções essenciais para o equilíbrio ambiental e para o bem-estar da população. A análise integrada de dados espaciais, a partir do MapBiomias, aliada às observações *in loco*, possibilitou identificar diferentes categorias de serviços ecossistêmicos, notadamente os de provisão, culturais, de suporte e de regulação, confirmando a literatura especializada sobre a temática.

Os resultados apontaram a expansão da área urbanizada no período de 2016 a 2023, acompanhada da redução das classes de Formação Florestal e Savânica, revelando um processo de perda gradual de cobertura natural. Essa dinâmica territorial implica diretamente na diminuição da oferta de serviços ecossistêmicos, como a regulação climática, a manutenção da biodiversidade e a disponibilidade de recursos naturais, elementos indispensáveis para a sustentabilidade urbana.

Adicionalmente, o estudo ressaltou que, embora parte dos serviços ecossistêmicos seja perceptível de forma imediata, muitos outros, menos evidentes visualmente, foram identificados com base no embasamento teórico, reafirmando a importância de metodologias integradas para o seu mapeamento e avaliação.

Nesse contexto, conclui-se que o mapeamento e a análise espaço-temporal dos serviços ecossistêmicos constituem ferramentas estratégicas para subsidiar o planejamento urbano sustentável, contribuindo para a mitigação de impactos decorrentes da urbanização desordenada e para a formulação de políticas públicas voltadas à conservação e valorização das áreas verdes urbanas. Assim, este estudo reforça a necessidade de ações efetivas de preservação e gestão ambiental, de modo a garantir a manutenção dos serviços ecossistêmicos e, consequentemente, a melhoria da qualidade de vida no espaço urbano de Teresina.

## REFERÊNCIAS

- ADLER, Frederik L.; TANNER, Colby J. **Ecossistemas Urbanos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 36 p.
- ALBERTI, M. Modeling the urban ecosystem: A conceptual framework. In: MARZLUFF, J. et al. (Eds.). **Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature**. Nova Iorque: Springer, p. 623-646, 2008.
- ANDERSSON, E. et al. Reconnecting Cities to the Biosphere: Stewardship of Green Infrastructure and Urban Ecosystem Services. **Ambio**, v. 43, n. 4, p. 445–453. 2014. DOI: 10.1007/s13280-014-0506-y. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-014-0506-y>. Acesso em: 14 ago. 2025.
- ANDRADE, C. S. P. Teresina e Clima: indissociabilidade no estudo da cidade. **Revista Equador**, Teresina, UFPI, v. 5, n. 3, ed. especial 2, p. 398-420, 2016. Disponível em: <https://revistas.ufpi.br/index.php/equador/article/view/5056/3034>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- ARAÚJO, Ana Liliane dos Santos; COSTA, Diógenes Félix da Silva. Impactos da ação humana sobre os serviços ecossistêmicos em um reservatório de água durante a estação chuvosa, no semiárido do Brasil. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 25, n. 101, p. 209-223, out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG2510172759>. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/72759>. Acesso em: 20 ago. 2025
- BERTINELLI, L.; BLACK, D. Urbanization and growth. **Journal of Urban Economics**, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 80-96, 2004.
- BOLUND, Per. ; HUNHAMMAR, Sven. Ecosystem services in urban areas. **Ecological Economics**, n. 63, p. 616 – 626, 1999.
- BURKHARD, B.; MAES, J. Mapping Ecosystem Services. **Pensoft Publishers**, Sofia, 377 pp., 2017.
- CASTELLS, M. Urban Sociology in the Twenty-First Century. **Cidades, Comunidades e Territórios**, [s. l.], n. 5, p. 9-19, 2002.
- CAVALHEIRO, F. **Urbanização e alterações ambientais**. In: SANTOS, D. G.; NUCCI, J. C. Paisagens geográficas: um tributo a Felisberto Cavalheiro. Campo Mourão: Ed. da Fecilcam, 2009. 196p.
- COSTANZA, R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, London, v. 387, p. 253-260, 1997.
- DUARTE, Taíse Ernestina Prestes; ANGEOLETTO, Fabio Henrique Soares; SANTOS, Jeater Waldemar Maciel Correa; LEANDRO, Deleon da Silva; BOHRER, João Fernando Copetti; VACCHIANO, Marcelo Caetano; LEITE, Leandro Bernardo.

O papel da cobertura vegetal nos ambientes urbanos e sua influência na qualidade de vida nas cidades. **Desenvolvimento em Questão**, Ijuí, ano 15, n. 40, p. 175-203, jul./set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2017.40.175-203>. Acesso 17 ago. 2025.

EIGENBROD, F. et al. The impact of projected increases in urbanization on ecosystem services. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, [s. l.], v. 278, n. 1722, p. 3201-3208, 2011.

FAÇANHA, Antônio Cardoso. A evolução urbana de Teresina: passado, presente e... **Carta Cepro**, Teresina V. 22. N. 01. 2003.

GRIMM, N. B. et al. Global Change and the ecology of cities. **Csience**. n. 319 (5.864), p. 756-760, 2008.

HAINES-YOUNG, Roy; POTSCHEIN-YOUNG, Marion. **Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1** and guidance on the application of the revised structure. Nottingham: Fabis Consulting Ltd., 2018. Disponível em: <https://cices.eu/>. Acesso em: 27 jul. 2025.

HINATA, Sumirê da Silva. **Avaliação e mapeamento de serviços ecossistêmicos na bacia hidrográfica do Lago Guaíba/RS**. 2023. Tese (Doutorado em análise ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em:  
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/262620/001173916.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 4 dez. 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2022: resultados preliminares**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/censo>. Acesso em: 17 ago. 2025.

MAES, Joachim; CROSSMAN, Neville D.; BURKHARD, Benjamin. Mapping ecosystem services. In: POTSCHEIN, Marion; HAINES-YOUNG, Roy; FISH, Robert; TURNER, R. Kerry (ed.). **Routledge handbook of ecosystem services**. London: Routledge, 2016. p. 188-204.

MALINGA, R.; GORDON, L. J.; JEWITT, G.; LINDBORG, R. Mapping ecosystem services across scales and continents - A review. **Ecosystem Services**, v. 13, p. 57–63, 2015.

MAPBIOMAS. **Coleção 2 (beta) de Mapas Anuais de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, com 10 metros de resolução espacial, período de 2016 a 2023**. Projeto MapBiomass: Brasília, 2024. Disponível em: <https://plataforma.mapbiomas.org/>. Acesso em: 02 ago. 2025.

MCDONNELL, M. J.; MACGREGOR-FORS, I. The ecological future of cities. **Science**, v. 352, n. 6.288, p. 936-938, 2016.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT - MA. **Ecosystems and human Well-being**: A framework for assessment. Island Press. Washington, 2005.

MONTEIRO, M. S. **Serviços Ecossistêmicos e Planejamento Urbano: A natureza a favor do desenvolvimento sustentável das cidades.** 1. ed. Curitiba: Appris, 2018.

PENG, J. et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 607-608, p. 706-714, 2017.

QUEIROZ, D. S.; DEL LAMA, E. A.; GARCIA, M. G. M. Proposta de roteiro geoturístico pelos prédios históricos do centro de Santos (SP). **Tese Didática**, Campinas, v. 15, 2019. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/article/view/8654686>. Acesso em: 5 out. 2024.

SANTOS, Milton. **A Urbanização Brasileira**. São Paulo: EDUSP, 2005.

SALDANHA, Denise Santos; COSTA, Diógenes Félix da Silva. Classificação dos serviços ecossistêmicos prestados pelas áreas úmidas na zona estuarina do Rio Piancó-Piranhas-Açu (Nordeste, Brasil). **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 13, n. 3, p. 263-282, 2019.

SILVA, J. C. G.; SANTOS, A. V.; LIMA, M. S. F. Cidade compacta, coordenada e conectada: uma análise da política urbana de Teresina (PI) sob a ótica dos princípios DOTS. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba, v. 14, e20210058, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.014.e20210058>. Acesso em: 10 ago. 2025.

SILVA, Guilherme Fauth da; LIMA, Josemar Balz de; DAMINELLI, Bruno Luís. Estratégias de resiliências às mudanças climáticas: possíveis aplicações no município de Santa Rosa (RS). **Labor & Engenho**, Campinas, v. 18, p. 1-12, e024013, 2024. DOI: [10.20396/labore.v18i00.8676738](https://doi.org/10.20396/labore.v18i00.8676738). Acesso em: 18 ago. 2025.

SILVEIRA, Paulo Carvalho da.; CAMPOS, Claudia Guimarães Camargo.; SÁ, Eder Alexandre Schatz.; BIFFI, Leonardo Josoé.; DALRI, Julia Cucco. Análise das superfícies urbanas para identificação de ilhas de calor através da aplicação de índices radiométricos e da temperatura da superfície. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 33, n. 19, p. 329-353, 2022. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v33i19.16322>. 2022. Acesso em: 15 jul. 2025.

#### **TEEB – THE ECONOMICS OF ECOSYSTEMS AND BIODIVERSITY.**

Mainstreaming the economics of nature: a synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB. Malta: Progress Press, 2010.

VIANA, Bartira Araújo da Silva. O sentido da cidade: entre a evolução urbana e o processo de verticalização. **Carta Cepro**, Teresina V. 23. N. 01. 2005.

## 8 CONCLUSÕES GERAIS

A pesquisa acadêmica destaca a relevância das áreas verdes urbanas na provisão de serviços ecossistêmicos, que são cruciais para o equilíbrio ambiental e o bem-estar humano. O mapeamento desses serviços, por meio de tecnologias que obtém dados de forma remota, são ferramenta estratégica para a tomada de decisões, o planejamento urbano sustentável e a formulação de políticas públicas ambientais.

Considerando o contexto urbano, o estudo evidenciou que a cobertura e o uso da terra exercem influência direta na oferta de serviços ecossistêmicos, destacando como a expansão da urbanização em Teresina tem provocado alterações significativas nas áreas de vegetação, comprometendo a provisão de serviços de regulação e suporte, ao mesmo tempo em que aumenta pressões ambientais relacionadas ao crescimento populacional e às mudanças climáticas. Além disso, a abordagem de mapeamento espacial e uso de dados remotos, permitiu identificar com maior precisão os padrões de alteração da paisagem e suas implicações com relação aos benefícios ocasionados pelas componentes naturais.

De forma integrada, a pesquisa reforça da importância do uso de ferramentas espaciais, e o embasamento teórico consolidado para classificação e identificação dos serviços ecossistêmicos, buscando subsidiar diagnósticos territoriais em relação aos tipos de serviços ofertados através das funções dos componentes ambientais.

Com isso, a pesquisa destaca a incorporação de técnicas que possam ser usadas na averiguação de serviços ecossistêmicos, bem como o mapeamento desses, além do que o planejamento urbano e ambiental que considerem a conservação dos ecossistemas como elemento-chave para a sustentabilidade, garantindo equilíbrio entre desenvolvimento socioeconômico e preservação da biodiversidade.

## REFERÊNCIAS

- ADLER, Frederik L.; TANNER, Colby J. **Ecossistemas Urbanos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 36 p.
- ALBERTI, M. Modeling the urban ecosystem: A conceptual framework. In: MARZLUFF, J. et al. (Eds.). **Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature**. Nova Iorque: Springer, p. 623-646, 2008.
- ALMEIDA, C., Furst, L., Gonçalves, A., & Teodoro, A. (2022). Remote Sensing Image-Based Analysis of the Urban Heat Island Effect in Bragança, Portugal. **Environments**, 9, 98. <https://doi.org/10.3390/environments9080098>.
- ALMEIDA, R. L.; SILVA, D. N. de B.; GUIMARÃES, J. de C. Espaços públicos urbanos no novo Plano Diretor de Ordenamento Territorial de Teresina. **Cadernos Metrópole**, v. 25, n. 56, p. 165–184, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2023-5607>.
- ALVES, J. E. D.; GALIZA, FRANCISCO. **Demografia e Economia nos 200 anos da Independência do Brasil e cenários para o Século XXI**. Rio de Janeiro: Editora Escola de Negócios e Seguros, 2022. Disponível em: <https://www.ens.edu.br/publicacoes-detalhes/333>. Acesso em: 7 abr. 2023.
- AMATO-LOURENÇO, L. F. et al. Metrópoles, cobertura vegetal, áreas verdes e saúde. **Estudos Avançados**, v. 30, n. 86, p. 113-130, 2016. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/115084>. Acesso em: 28 ago. 2024.
- ANDERSSON, E. et al. Reconnecting Cities to the Biosphere: Stewardship of Green Infrastructure and Urban Ecosystem Services. **Ambio**, v. 43, n. 4, p. 445–453. 2014. DOI: 10.1007/s13280-014-0506-y. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-014-0506-y>. Acesso em: 14 ago. 2025.
- ANDRADE, C. S. P. Teresina e Clima: indissociabilidade no estudo da cidade. **Revista Equador**, Teresina, UFPI, v. 5, n. 3, ed. especial 2, p. 398-420, 2016. Disponível em: <https://revistas.ufpi.br/index.php/equador/article/view/5056/3034>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- ANTUNES, R.L.S. **Variação espaço-temporal de NDVI em área de aproveitamento hidroelétrico - UHE Santo Antônio, Porto Velho (RO)**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- ANTROP, M.; VAN EETVELDE, V. Holistic aspects of suburban landscapes: visual interpretation and landscape metrics. **Landscape Urban Planning**, Amsterdam, v. 50, p. 43-58, 2000.

ANTROP, M. The language of landscape ecologists and planners: comparative content analysis of concepts used in landscape ecology. **Landscape Urban Planning**, Amsterdam, v. 55, p. 163-173, 2001.

ARAI, K. et al. Method for nir reflectance estimation with visible camera data based on regression for ndvi estimation and its application for insect damage detection of rice paddy fields. **International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence**, v. 5, n. 11, p.17–22, 2016.

ARAÚJO, Ana Liliane dos Santos; COSTA, Diógenes Félix da Silva. Impactos da ação humana sobre os serviços ecossistêmicos em um reservatório de água durante a estação chuvosa, no semiárido do Brasil. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 25, n. 101, p. 209-223, out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG2510172759>. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/72759>. Acesso em: 20 ago. 2025.

ARDOIN, N. M.; BOWERS, A. W.; GAILLARD, E. Environmental education outcomes for conservation: a systematic review. **Biological Conservation**, v. 241, n. 108244, p. 1-13, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108224>.

ARIZZA, A. 2013. **Descripción y Corrección de Productos LandSat 8 LDCM (LandSat Data ContinuityMission), versión 1.0**. Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF): Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Colombia. Disponível em <<http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>>. Acesso em: 10 de outubro 2017.

ASMUS, M. L. et al. Simples para ser útil: base ecossistêmica para o gerenciamento costeiro. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 44, p. 4-19, 2018.

ASMUS, M. L.; NICOLODI, J. L.; ANELO, L. S.; GIANUCA, K. The risk to lose ecosystem services due to climate change: a South American case. **Ecological Engineering**, v. 130, p. 233-241, 2019.

ASSIS, J. et al. Mapeamento do Uso e Ocupação do Solo no Município de Belém de São Francisco-PE nos Anos de 1985 e 2010. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, n.05, p. 859-870, 2014.

BANDINI, F. et al. Measuring water level in rivers and lakes from lightweight Unmanned Aerial Vehicles. **Journal of Hydrology**, v.548, p. 237-250, 2017.

BERTINELLI, L.; BLACK, D. Urbanization and growth. **Journal of Urban Economics**, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 80-96, 2004.

BEZERRA, U. A. et al., 2017. Multitemporal analysis of vegetation indices for the superior region of the Moxotó River hydrographic basin. **Journal Of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, p. 272-283.

BOLUND, Per. ; HUNHAMMAR, Sven. Ecosystem services in urban areas. **Ecological Economics**, n. 63, p. 616 – 626, 1999.

**BRASIL. Lei nº 13.465 de 11 de julho de 2017.** Dispõe sobre a regularização fundiária rural e urbana, sobre a liquidação de créditos concedidos aos assentados da reforma agrária e sobre a regularização fundiária no âmbito da Amazônia Legal; institui mecanismos para aprimorar a eficiência dos procedimentos de alienação de imóveis da União; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, . Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/lei/l13465.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13465.htm). Acesso em: 05 jan. 2024.

BRAYN, L. Landscape classification using GIS and national digital database. **Landscape Research**, Abingdon, v. 21, p. 277-300, 1996.

BURKHARD, B.; KROLL, F.; MÜLLER, F.; WINDHORST, W. Landscapes' capacities to provide ecosystem services - A concept for land-cover based assessments. **Landscape Online**, v. 15, n. 1, p. 1–22, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3097/LO.200915>.

BURKHARD, B.; MAES, J. **Mapping Ecosystem Services**. Pensoft Publishers, Sofia, 377 pp., 2017.

CAMPOS, J. O.; LIMA, E. R. V.; COSTA, D. F. S. Mapeamento do serviço ecossistêmico de sequestro de carbono prestado pela cobertura florestal do Parque Estadual Mata do Pau-Ferro e sua zona de amortecimento, Areia, Paraíba. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 17, n. 2, p. 115-135, 2023. ISSN 1678-7226.

CARNEIRO, E. L. N. C.; ESPINDOLA, G. M.; LOPES, W. G. R. Urban Land Mapping Based on Remote Sensing Time Series in the Google Earth Engine Platform: A Case Study of the Teresina-Timon Conurbation Area in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.13, n.1338, p. 1-16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13071338>

CASTELLS, M. Urban Sociology in the Twenty-First Century. **Cidades, Comunidades e Territórios**, [s. l.], n. 5, p. 9-19, 2002.

CAVALHEIRO, F. Urbanização e alterações ambientais. In: SANTOS, D. G.; NUCCI, J. C. **Paisagens geográficas: um tributo a Felisberto Cavalheiro**. Campo Mourão: Ed. da Fecilcam, 2009. 196p.

CÓRCOLES, J.I.; ORTEGA, J.F.; HERNÁNDEZ, D. & MORENO, M.A. 2013. Estimation of leaf area index in onion (*Allium cepa L.*) using an unmanned aerial vehicle. **Biosystems Engineering**, v. 115, n. 1, p. 31-42.

COSTANZA, R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, London, v. 387, p. 253-260, 1997.

DAILY, G. C. (Ed.). **Nature's services: societal dependence on natural ecosystems**. Washington, DC: Island Press, 1997. 412 p.

DE GROOT, R. S.; WILSON, M. A; BOUMANS, R. M. J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. **Ecological Economics**, v. 41, n. 5, p. 393-408, 2002.

D'OLEIRE-OLTMANNS, S.; MARZOLFF, I.; PETER, K.D. & RIES, J.B. 2012. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. **Remote Sensing**, v. 4, n. 11, p. 3390-3416.

DOMINATI, E.; Patterson, M.; Mackay, A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v. 69, n.9, p. 1858-1868, 2010.

DUARTE, Taíse Ernestina Prestes; ANGEOLETTTO, Fabio Henrique Soares; SANTOS, Jeater Waldemar Maciel Correa; LEANDRO, Deleon da Silva; BOHRER, João Fernando Copetti; VACCHIANO, Marcelo Caetano; LEITE, Leandro Bernardo. O papel da cobertura vegetal nos ambientes urbanos e sua influência na qualidade de vida nas cidades. **Desenvolvimento em Questão**, Ijuí, ano 15, n. 40, p. 175-203, jul./set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2017.40.175-203>. Acesso 17 ago. 2025.

EC – EUROPEAN COMISSION. **Science for environment policy: ecosystem services and the environment**. In-depth Report 11. Bristol: Science Communication Unit, UWE, 2015. Disponível em: <http://ec.europa.eu/science-environment-policy>. Acesso em: 21 set. 2024.

EIGENBROD, F. et al. The impact of projected increases in urbanization on ecosystem services. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, [s. l.], v. 278, n. 1722, p. 3201-3208, 2011.

EMPRESA TERESINENSE DE SERVIÇOS URBANOS. **Diagnóstico do Núcleo Urbano**. Teresina-PI, 2023.

ERREA, C. L., Almeida, C. R. de, Gonçalves, A., & Teodoro, A. C. (2023). Remote Sensing Analysis of the Surface Urban Heat Island Effect in Vitoria-Gasteiz, 1985 to 2021. **Remote Sensing**, 15(12), Artigo 12. <https://doi.org/10.3390/rs15123110>.

ESCADAFAL, R. & HUETE, A., 1991. Étude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. **Comptes Rendus de l'Academie des Sciences** v. 312, p. 1385–1391.

FAÇANHA, Antônio Cardoso. A evolução urbana de Teresina: passado, presente e... **Carta Cepro**, Teresina V. 22. N. 01. 2003.

FANG, S.; TANG, W.; PENG, Y.; GONG, Y.; DAI, C.; CHAI, R. & LIU, K. 2016. Remote estimation of vegetation fraction and flower fraction in oilseed rape with unmanned aerial Vehicle data. **Remote Sensing**, v.8, n.5, p. 416.

FAO. **The state of food and agriculture: paying farmers for environmental services**. Rome,2007. 222 p. (FAO agriculture series, n. 38). Disponível em: <http://www.fao.org/3/aa1200e.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2023.

FARLEY, J. Ecosystem services: the economics debate. **Ecosystem Services**, v. 1, n. 1, p. 40-49, Jul. 2012. DOI: 10.1016/j.ecoser.2012.07.002.

FARINA, A. **Principles and methods in landscape ecology**. London: Chapman and Hall, 1998. 235 p.

FERREIRA, Aurélio Buarque. **Novo dicionário Aurélio de Língua Portuguesa**. 3<sup>a</sup> ed. Curitiba: Positivo, 2004.

FERREIRA, B., Estevam, A., & Maia, D. (2022). Clima Urbano e Ilhas de Calor no Miolo Urbano na Cidade de Salvador (BA). **Revista Brasileira de Geografia Física**, 15, 2768–2780. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.6.p2768-2780>.

FERREIRA, M. A.; ZABOTTO, A.; PERIOTTO, F. **Verde urbano**. Engenheiro Coelho: Editora Universitária Adventista, 2021. E-book. Disponível em: <http://www.unep.org/pt-br/resources/publicacoes/restaurando-cidades-e-book-verde-urbano-0.pdf>. Acesso em: 14 out. 2022.

FERRAZ, R.P.; PADRO, R.B.; PARRON, L.C.; CAMPANHA, M.M. **Marco Referencial em Serviços Ecossistêmicos**. Brasília: Embrapa Solos, 2019.

FIREHOCK, K.; WALKER, R.A. **Green infrastructure: map and plan the natural world with GIS**. Redlands: Esri Press, 2019.

FISHER, B.; TURNER, K.; MORLING, P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. **Ecological Economics**, v. 68, n. 3, p. 643-653, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800908004424>. Acesso em: 2 jan. 2024.

FORMAN, R.T.T.; GODRON, M. **Landscape Ecology**. New York: John Wiley & Sons, 1986.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS – CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE – GVCE (2015). **Serviços Ecossistêmicos**. P. 22 On. Disponível em: <https://www.p22on.com.br/servicosecossistemicos/>. Acesso em: 20 dez. 2023.

GALVINCIO, J. D.; NAUE, C. R. Estimativa do NDVI com imagens do visível (RGB) obtidas com drones. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.9, n.6, p. 407-420, 2019.

GARCIA, J.M. et al. Tendência recente nos estudos sobre serviços ecossistêmicos e ambientais: 2016-2020. **Cadernos de Geografia**. v 97, n. 46, p. 93-104. DOI: 10.14195/0871-1623\_46\_7. 2022.

GHEYI, H. R. et al. **Recursos hídricos em regiões semiáridas**. 1. ed. Campina Grande: INSA/UFRB, p.258, 2012.

GRÊT-REGAMEY, A., SIRÉN, E., BRUNNER, S. H., & WEIBEL, B. (2017). Review of decision support tools to operationalize the ecosystem services concept. **Ecosystem Services**, v.26, p. 306–315. DOI:10.1016/j.ecoser.2016.10.012.

GRIMM, N. B. et al. Global Change and the ecology of cities. **Science**. n. 319 (5.864), p. 756-760, 2008.

HAINES-YOUNG, Roy; POTSCHEIN-YOUNG, Marion. **Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and guidance on the application of the revised structure.** Nottingham: Fabis Consulting Ltd., 2018. Disponível em: <https://cices.eu/>. Acesso em: 27 fev. 2025.

HINATA, Sumirê da Silva. **Avaliação e mapeamento de serviços ecossistêmicos na bacia hidrográfica do Lago Guaíba/RS.** 2023. Tese (Doutorado em análise ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em:  
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/262620/001173916.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 4 dez. 2024.

HONORATO, A. F. A. Ilhas de calor e frescor na área urbana da cidade de Aquidauana, MS. **Revista Geonorte**, v. 2, n. 4, p.878-886, 2012.

HUANG, Q. et al. Linking ecosystem services and subjective well-being in rapidly urbanizing watersheds: Insights from a multilevel linear model. **Ecosystem Services**, v. 144, n. 109532, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101106>.

HUNT-JR, E. R.; CAVIGELLI, M.; DAUGHTRY, C.S. T.; MCMURTREY, J.E.; WALTHALL, C.L. 2005. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 4, p. 359-378.

IBGE. **Panorama Cidades.** IBGE, 2020. Disponível em: <http://https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/timon/panorama>. Acesso em: 22 out. 2021.

IBGE. **Teresina - Panorama.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pi/teresina/panorama>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2022: resultados preliminares.** Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/censo>. Acesso em: 17 ago. 2025.

JARDIM, A. M. da R. F., Araújo Júnior, G. do N., Silva, M. V. da, Santos, A. dos, Silva, J. L. B. da, Pandorfi, H., Oliveira-Júnior, J. F. de, Teixeira, A. H. de C., Teodoro, P. E., de Lima, J. L. M. P., Silva Junior, C. A. da, Souza, L. S. B. de, Silva, E. A., & Silva, T. G. F. da. (2022). Using Remote Sensing to Quantify the Joint Effects of Climate and Land Use/Land Cover Changes on the Caatinga Biome of Northeast Brazilian. **Remote Sensing**, v.14, n.8. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14081911>.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** São José dos Campos: Parêntese Editora, 2011, 672p.

JESUS, J.R.P. **Análise da Dinâmica do Uso e Ocupação do Solo no Município de São Gonçalo do Rio Abaixo/MG – 1988 a 2009.** 2010. Monografia. XII Curso de Especialização em Geoprocessamento – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

LABAKI, L. C.; SANTOS, R. F. S.; BUENO-BARTHOLOMEI, C. L.; ABREU, L. V. Vegetação e conforto térmico em espaços urbanos abertos. **Revista Fórum Patrimônio**, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, p. 23-42, 2011.

LI, J.; PEI, Y.; ZHAO, S.; XIAO, R.; SANG, X.; ZHANG, C. A review of remote sensing for environmental monitoring in China. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1-25, 2020. DOI: 10.3390/rs12071130.

LIBOMBO, S. E.; Galvino, J. D., 2022. Análise da cobertura vegetal do município de Mocambique, utilizando imagens de satélites. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.12, n.6, p. 410-417.

LIMA, S. M. S. A.; LOPES, W. G. R; FAÇANHA, A. C. (2017). Urbanização e crescimento populacional: reflexões sobre a cidade de Teresina, Piauí. **Revista Gaia Scientia**, v. 11, n. 1, p. 31-51.

LOMBARDO, M.A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo, Hucite, 1985, 244p.

LOUHAICHI, M.; BORMAN, M.M. & JOHNSON, D.E. 2001. Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. **Geocarto International**, v. 16, n. 1, p. 65-70.

MAES, J.; JACOBS, S. Nature-Based Solutions for Europe's Sustainable Development. **Conservation Letters**, v.10, n.1, p. 121-124, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/conl.12216>.

MAES, Joachim; CROSSMAN, Neville D.; BURKHARD, Benjamin. Mapping ecosystem services. In: POTSCHEIN, Marion; HAINES-YOUNG, Roy; FISH, Robert; TURNER, R. Kerry (ed.). **Routledge handbook of ecosystem services**. London: Routledge, 2016. p. 188-204.

MALINGA, R.; GORDON, L. J.; JEWITT, G.; LINDBORG, R. Mapping ecosystem services across scales and continents - A review. **Ecosystem Services**, v. 13, p. 57–63, 2015.

MAPBIOMAS. Coleção 2 (beta) de Mapas Anuais de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, com 10 metros de resolução espacial, período de 2016 a 2023. **Projeto MapBiomass: Brasília**, 2024. Disponível em: <https://plataforma.mapbiomas.org/>. Acesso em: 02 ago. 2025.

MARKHAM, B.L.; BARKER, L.L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.3, p.517- 523, 1987.

MARTINS, E.S.; REATTO, A.; JÚNIOR, O. A. de Carvalho.; GUIMARÃES, R. F. **Ecologia de Paisagem: conceitos e aplicações potenciais no Brasil**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. (Embrapa Cerrados. Documentos, 121).

MARTINS, M. B.; JARDIM, M. A. G.; SABINO, W. O.; BARROS, M. F. G. S. **Reflexões em Biologia da Conservação**. Editora Executiva, 2020. Disponível em: <http://ppgca.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/documentos/Livro%20Biologia%20da%20Conservacao%C3%A7%C3%A3o%20II.pdf>. Acesso em: 13 out. 2022.

MCDONNELL, M. J.; MACGREGOR-FORS, I. The ecological future of cities. **Science**, v. 352, n. 6.288, p. 936-938, 2016.

MILAS, A. S.; CRACKNELL, A. P.; WARNER, T. A. Drones – the third generation source of remote sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, v.39, n.21, p. 7125–7137, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1080/01431161.2018.1523832>.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: a framework for assessment**. Washington, DC: Island Press, 2003. Disponível em: [http://pdf.wri.org/ecosystems\\_human\\_wellbeing.pdf](http://pdf.wri.org/ecosystems_human_wellbeing.pdf). Acesso em 27 dez. 2023.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT - MA. **Ecosystems and human Well-being: A framework for assessment**. Island Press. Washington, 2005.

MORAES, E. C. Capítulo 1 - Fundamentos de Sensoriamento Remoto. **INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. São José dos Campos. INPE-8984-PUD/62. 2002.

MONTEIRO, M. S. **Serviços Ecossistêmicos e Planejamento Urbano: A natureza a favor do desenvolvimento sustentável das cidades**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2018.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4. ed. atualizada e ampliada. Viçosa: Oficina de Textos, Editora UFV, 2011.

NATCAP – NATURAL CAPITAL PROJECT. **InVEST Software Platform (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)**. Disponível em: <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>. Acesso em: 21 ago. 2020.

NOGUEIRA, L. L. F; ESPINDOLA, G. M; CARNEIRO, E. L. N. C. Análise da ocupação urbana na zona Centro-Norte de Teresina: Considerações sobre a região do Encontro dos Rios. **Revista Equador**, v. 05, p. 25–42, 2016.

OLIVEIRA, P. J. L. de; GUEDES, J. F.; COSTA, D. F. da S. Serviços ecossistêmicos de regulação em uma bacia hidrográfica no semiárido do Brasil. **Mercator (Fortaleza)**, v. 21, p. e21028, 2023.

OLIVEIRA, T.H. **Mudança espaço temporal do uso e cobertura do solo e estimativa do balanço de energia e evapotranspiração diária no município do Recife-PE**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco) 2012.

OLIVEIRA, T. H.; SILVA, J. E.; SANTOS, M. O.; OLIVEIRA, J. S. E. S.; GALVÍNCIO, J. D. Evolução espaço-temporal da drenagem superficial e do processo de impermeabilização em Santo Amaro, Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.8, p.1571-1587, 2015.

ONU – Organização das Nações Unidas. “**World Population Prospects 2022**”. Nova York, NY, EUA, 2022.

PELLEGRINO, P.R.M. Pode-se planejar a paisagem? **Paisagem e Ambiente**, São Paulo, n. 13, p. 159-179, 2000. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/paam/article/view/134128/129939>. Acesso em: 20 dez. 2023.

PENG, J. et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 607-608, p. 706-714, 2017.

PEREIRA, A. A.; TEIXEIRA, F. R.; LIBONATI, R.; MELCHIORI, E. A.; CARVALHO, L. M. T. Avaliação de índices espectrais para identificação de áreas queimadas no Cerrado utilizando dados Landsat TM. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 68/8, ISSN 1665-1680, 2016.

PEREIRA, J. L. G.; BATISTA, G. T.; THALES, M.; ROBERTS, D. A. Métricas da paisagem na caracterização da evolução da ocupação da Amazônia. **Geografia**, v. 26, p. 59-90, 2001.

PIELKE R.A.; MARLAND, G.; BETTS, R.A.; CHASE, T.N.; EASTMAN, J.L.; NILES, J.O.; NIYOGI, D.D.S.; RUNNING, S.W. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. **The Royal Society**, v. 360, p. 1705– 1719, 2002.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento Remoto da vegetação**. São José dos Campos: Editora Oficina de Textos, 2012. 135 p.

QUEIROZ, D. S.; DEL LAMA, E. A.; GARCIA, M. G. M. Proposta de roteiro geoturístico pelos prédios históricos do centro de Santos (SP). **Tese Didática**, Campinas, v. 15, 2019. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/article/view/8654686>. Acesso em: 5 out. 2024.

RANAGALAGE, M.; ESTOQUE, R.C.; MURAYAMA, Y. An Urban Heat Island Study of the Colombo Metropolitan Area, Sri Lanka, Based on Landsat Data (1997–2017). **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v.6, n. 7, p.189, 2017.

ROUSE, J.W.J.R.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A. & DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. in: **Proceedings of the third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**, 3, Washington, D.C., 1973.

SAAD, Sandra Isay et al. Analyzing ecological restoration strategies for water and soil conservation. **Plos One**, v. 13, n. 2, e0192325, 2018. Disponível em:<<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/180387/1/2018AP11.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

SALDANHA, Denise Santos; COSTA, Diógenes Félix da Silva. Classificação dos serviços ecossistêmicos prestados pelas áreas úmidas na zona estuarina do Rio Piancó-Piranhas-Açu (Nordeste, Brasil). **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 13, n. 3, p. 263-282, 2019.

SAMPAIO, H. S. et al. Comparação entre índices de vegetação obtidos por imagens aéreas com veículo aéreo não tripulado (VANT) e Satélite. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 14, n. 2, p. 111-124, 2020.

SANTOS, C. R.; VENDRUSCULO, L. G.; ZOLIN, C. A. Análise dos serviços ecossistêmicos nos diferentes biomas brasileiros: uma revisão sistemática. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 43, n. 71185. DOI: 10.5216/bgg.v43i01.71185. 2023.

SANTOS, C.V.B. et al. Uso de Sensoriamento Remoto na análise da temperatura da superfície em áreas de floresta tropical sazonalmente seca. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 03, p. 941-953, 2020.

SANTOS, J. B. et al., 2023. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e seu uso no estudo da saúde humana: uma revisão de escopo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 03, p. 1115-1144, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>. Acesso em: 5 maio 2025.

SANTOS, Milton. **A Urbanização Brasileira**. São Paulo: EDUSP, 2005.

SHAH, P., & Patel, C. 2023. Integration of Remote Sensing and Big Data to Study Spatial Distribution of Urban Heat Island for Cities with Different Terrain. **International Journal of Engineering**, 36, 71–77.  
<https://doi.org/10.5829/IJE.2023.36.01A.09>

SILVA, B.B.; BRAGA, A.C.; OLIVEIRA, L.M.M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; BARBOSA JUNIOR, B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.1, p. 3- 8, 2016.

SILVA, B.B.; SILVA, S.T.A.; GOMES, H.B. Alterações climáticas decorrentes de mudanças no uso da terra mediante sensoriamento remoto. **Mercator (online)**, Fortaleza, v.9, n.1, p.91-106, 2011.

SILVA, Guilherme Fauth da; LIMA, Josemar Balz de; DAMINELI, Bruno Luís. Estratégias de resiliências às mudanças climáticas: possíveis aplicações no município de Santa Rosa (RS). **Labor & Engenho**, Campinas, v. 18, p. 1-12, e024013, 2024. DOI:10.20396/labore.v18i00.8676738. Acesso em: 18 ago. 2025.

SILVA, J. C. G.; SANTOS, A. V.; LIMA, M. S. F. Cidade compacta, coordenada e conectada: uma análise da política urbana de Teresina (PI) sob a ótica dos princípios DOTS. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba, v. 14, e20210058, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.014.e20210058>. Acesso em: 10 ago. 2025.

SILVA, J.F. et al. Remote Sensing vegetation index for processing images in the visible band (RGB). **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.9, n.4, p. 228-239, 2019.

SILVA, M. H.; ELIAS, A. R.; ROSÁRIO, L. L., 2022. Análise da cultura da soja a partir de índices de vegetação (ExG – GLI – TGI – VEG) advindos de imagens RGB obtidas com ARP. **Revista Brasileira de Geomática**, v.10, n.2, p. 140-154.

SILVEIRA, Paulo Carvalho da.; CAMPOS, Claudia Guimarães Camargo.; SÁ, Eder Alexandre Schatz.; BIFFI, Leonardo Josoé.; DALRI, Julia Cucco. Análise das superfícies urbanas para identificação de ilhas de calor através da aplicação de índices radiométricos e da temperatura da superfície. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 33, n. 19, p. 329-353, 2022. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v33i19.16322>. 2022. Acesso em: 15 jul. 2025.

SPIRN, A.W. **O jardim de granito**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1995.

TAGLIARINI, F. S. N. **Imagens de drone e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para classificação segmentada em Áreas de Preservação Permanente (APP)**. 2020. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2020.

TEEB – THE ECONOMICS OF ECOSYSTEMS AND BIODIVERSITY. **Mainstreaming the economics of nature: a synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB**. Malta: Progress Press, 2010.

TERESINA. **Lei nº 5.481, de 20 de dezembro de 2019**. Dispõe sobre o Plano Diretor de Teresina, denominado “Plano Diretor de Ordenamento Territorial - PDOT”, e dá outras. Diário Oficial do Município: Teresina, PI, 27 dez. 2019.

TERESINA. **Lei n.º 5.788 de 24 de agosto de 2022**. Dispõe sobre a política de Regularização Fundiária Urbana no município de Teresina-PI e dá outras providências. Diário Oficial do Município: Teresina, PI, 20 ago. 2022.

TERESINA. **Lei n.º 5.788 de 24 de agosto de 2022**. Dispõe sobre a política de Regularização Fundiária Urbana no município de Teresina-PI e dá outras providências. Teresina: Câmara Municipal, . Disponível em: [TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. \*\*Remote Sensing of Environment\*\*, v.8, p. 127-150, 1979.](http://200.23.153.37/acervodigital/norma/lei-complementar-5788022#:~:text=ALTERA%20DISPOSITIVOS%20DA%20LEI%20COMPLEMENTAR,PI%20E%20D%C3%81%20OUTRAS%20PROVID%C3%8ANCIAS%E2%80%9D.&text=n%C2%BA%2013.465%2F2017%2C%20de%2011%20de%20julho%20de%202017.&text=informais%20comprovadamente%20existentes%20na%20forma%20desta%20Lei. Acesso em: 05 jan. 2024.</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

USGS. United States Geologic Survey, 2018. **Catálogo USGS**. Disponível em <<https://earthexplorer.usgs.gov>>. Acesso em: 30 de setembro de 2022.

VIANA, Bartira Araújo da Silva. O sentido da cidade: entre a evolução urbana e o processo de verticalização. **Carta Cepro**, Teresina V. 23. N. 01. 2005.

VIERIA, B. F.; COSTA, J. J.; ALMEIDA, A. Quintão de. Análise temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na Serra da Caboonga, em Ipirá-BA. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 16, n. 06, p. 3593-3606, 2023. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>>.

- VIERIA, B. F.; COSTA, J. J.; ALMEIDA, A., 2023. Quintão de. Análise temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na Serra da Caboronga, em Ipirá- BA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 06, p. 3593-3606. Disponível em: < <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>. Acesso em: 22 set. 2024.
- WORSA-KOZAK, M., & Arsen, A. 2023. Groundwater Urban Heat Island in Wrocław, Poland, v.12, n.658. DOI:<https://doi.org/10.3390/land12030658>
- XIONG, Y.; HUANG, S.; CHEN, F.; YE, H.; WANG, C.; ZHU, C. The Impacts of Rapid Urbanization on the Thermal Environment: A Remote Sensing Study of Guangzhou, South China. **Remote Sensing**, v.4, n.12, p. 2033-2056, 2012.
- YUROVSKAYA, M. et al. Wave spectrum retrieval from airborne sunglitter images. **Remote Sensing of Environment** v. 217, p. 61-71, 2018.
- ZHANG, W., Yang, X., Yuan, Z., Chen, Z., & Xu, Y. 2024. A Framework for Fine-Grained Land-Cover Classification. **Remote Sensing**, v.16, n.390. DOI:<https://doi.org/10.3390/rs16020390>.
- ZHU, J.; WANG, K.; DENG, J. & HARMON, T. 2009. Quantifying nitrogen status of rice using low altitude UAV-mounted system and object-oriented segmentation methodology. In: **INTERNATIONAL DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCES & COMPUTERS AND INFORMATION IN ENGINEERING CONFERENCE**, California, 2009.
- ZHU, W., Sun, J., Yang, C., Liu, M., Xu, X., & Ji, C. 2021. How to Measure the Urban Park Cooling Island? A Perspective of Absolute and Relative Indicators Using Remote Sensing and Buffer Analysis. **Remote Sensing**, v.13, n.3154. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13163154>.