



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GUSTAVO LIMA CABRAL

**DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE TELHADOS VERDES: TÉCNICAS
COMPENSATÓRIAS PARA A DRENAGEM URBANA EM RECIFE**

RECIFE - PE

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GUSTAVO LIMA CABRAL

**DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE TELHADOS VERDES: TÉCNICAS
COMPENSATÓRIAS PARA A DRENAGEM URBANA EM RECIFE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a D.Sc. Sylvana Melo dos Santos

Coorientadora: Prof.^a M.Sc. Débora Natália Oliveira de Almeida

RECIFE - PE

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Cabral, Gustavo Lima.

DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE TELHADOS VERDES: TÉCNICAS
COMPENSATÓRIAS PARA A DRENAGEM URBANA EM RECIFE /
Gustavo Lima Cabral. - Recife, 2025.

50 : il., tab.

Orientador(a): Sylvana Melo dos Santos

Coorientador(a): Débora Natália Oliveira de Almeida

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil -
Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. conforto térmico. 2. infraestruturas verdes. 3. sensoriamento remoto. I.
Santos, Sylvana Melo dos. (Orientação). II. Almeida, Débora Natália Oliveira
de . (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO: Gustavo Lima Cabral

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora: Sylvana Melo dos Santos

Coorientadora: Debora Natália Oliveira de Almeida

Examinador 1: Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Examinador 2: Camila Oliveira de Britto Salgueiro

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Desempenho hidrológico de telhados verdes: técnicas compensatórias para a drenagem urbana em Recife.

LOCAL: Sala de aula do Laboratório de Hidráulica.

DATA: 29/04/2025

HORÁRIO DE INÍCIO: 15:00 horas.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com **NOTA: 10,0**.

1) (x) aprovado(s) (nota > = 7,0), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0**, será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s) (nota <3,0).

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo candidato.

Recife, 29 de abril de 2025.

Orientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato:

Documento assinado digitalmente
gov.br SYLVANA MELO DOS SANTOS
Data: 02/05/2025 11:12:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
gov.br DEBORA NATALIA OLIVEIRA DE ALMEIDA
Data: 02/05/2025 11:36:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
gov.br CAMILA OLIVEIRA DE BRITTO SALGUEIRO
Data: 05/05/2025 15:25:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
gov.br GUSTAVO LIMA CABRAL
Data: 05/05/2025 15:37:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº. Cidade Universitária. Recife-PE CEP: 50740-530.

Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219.

À minha família, pelo apoio incondicional e incentivo durante toda a minha jornada acadêmica. Aos meus orientadores, cuja sabedoria e dedicação foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresso minha gratidão à minha orientadora, Profa. Dra. Sylvana Melo dos Santos, e à coorientadora, Profa. M.Sc. Débora Natália Oliveira de Almeida, pela orientação dedicada, pelos valiosos ensinamentos e pela paciência durante todo o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha família, meu eterno agradecimento: aos meus pais, Esdras e Gláucia, pelo amor incondicional e por serem meus maiores incentivadores em cada etapa da minha formação; à minha tia, Esdriane, pela contribuição fundamental neste trabalho, compartilhando generosamente seu conhecimento e experiência acadêmica; e à minha irmã, Érica, pelo apoio constante e pela alegria que sempre trouxe para minha vida.

À minha namorada, Maria Vitória, por toda a paciência em me aturar durante os momentos intensos do TCC, pelas palavras de ânimo nos períodos de desânimo e por ser meu porto seguro nos desafios que surgiram ao longo desse caminho.

Aos colegas de curso, professores e amigos que acompanharam essa jornada, pelas discussões enriquecedoras, parcerias e momentos de descontração que tornaram o processo mais leve. Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

*"Não é possível superar os limites se você não
estiver disposto a ir um pouco além deles."
— Ayrton Senna*

RESUMO

Este estudo avaliou o desempenho hidrológico e térmico de telhados verdes como técnica compensatória para a drenagem urbana em Recife, uma cidade costeira vulnerável a inundações e mudanças climáticas. Foram analisados dados pluviométricos históricos (1994–2021), índices espectrais (NDVI, NDWI, NDBI e albedo) por meio de imagens do satélite Sentinel-2, e experimentos na Unidade Experimental de Telhados Ecológicos (UETER). Os resultados demonstraram que os telhados verdes reduziram o pico de escoamento superficial em 28,6% e proporcionaram maior estabilidade térmica em comparação aos telhados convencionais. A análise espacial identificou áreas prioritárias para implantação, como regiões com alta impermeabilização e baixa cobertura vegetal. Conclui-se que os telhados verdes são uma solução viável para mitigar inundações, melhorar o conforto térmico e promover cidades mais resilientes, alinhando-se às políticas públicas locais, como a Lei Municipal nº 18.112/2015.

Palavras-chave: conforto térmico; infraestruturas verdes; sensoriamento remoto.

ABSTRACT

This study evaluated the hydrological and thermal performance of green roofs as a compensatory technique for urban drainage in Recife, a coastal city vulnerable to flooding and climate change. Historical rainfall data (1994–2021), spectral indices (NDVI, NDWI, NDBI, and albedo) from Sentinel-2 satellite images, and experiments at the Experimental Unit of Ecological Roofs (UETER) were analyzed. Results showed that green roofs reduced peak surface runoff by 28.6% and provided greater thermal stability compared to conventional roofs. Spatial analysis identified priority areas for implementation, such as regions with high impermeability and low vegetation cover. It is concluded that green roofs are a viable solution to mitigate flooding, improve thermal comfort, and promote more resilient cities, aligning with local public policies, such as Municipal Law No. 18.112/2015.

Keywords: thermal comfort; green infrastructure; remote sensing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização de Recife e da UETER.....	20
Figura 2 - Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife (UETER)	21
Figura 3 - Escort iMINI MX-IN-S-8-L.....	23
Figura 4 - Precipitação pluviométrica média mensal para os anos de 1994 a 2021..	29
Figura 5 - Comparação do Escoamento de Água	31
Figura 6 - Dados de temperatura do dia mais quente (01/06/2024)	32
Figura 7 - Dados de temperatura do dia de maior amplitude térmica (29/06/2024) ..	33
Figura 8 - Dados de temperatura do dia menos quente (30/06/2024).....	34
Figura 9 - Cartas georreferenciadas de NDVI	35
Figura 10 - Cartas georreferenciadas de NDWI	37
Figura 11 - Cartas georreferenciadas de NDBI	39
Figura 12 - Cartas georreferenciadas do Albedo.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Banda, resolução e comprimento de onda do sensor do Sentinel-2.	24
Tabela 2 - Especificações das Bandas do Sensor Sentinel-2A.....	25
Tabela 3 - Coeficientes de ponderação para o cálculo do albedo usando a Eq. (5) .	27

LISTA DE ABREVIações

BMPs	Best Management Practices (Melhores Práticas de Gestão)
ESA	European Space Agency (Agência Espacial Europeia)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IVs	Índices de Vegetação
IVP	Infravermelho Próximo
IVM	Infravermelho Médio
LID	Low Impact Development (Desenvolvimento de Baixo Impacto)
MSI	MultiSpectral Instrument (Instrumento Multiespectral)
NDBI	Normalized Difference Built-up Index (Índice de Diferença Normalizada de Áreas Urbanas)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada)
NDWI	Normalized Difference Water Index (Índice de Água da Diferença Normalizada)
QGIS	Quantum Geographic Information System
SR	Sensoriamento Remoto
SLSTR	Sea and Land Surface Temperature Radiometer (Radiômetro de Temperatura da Superfície Terrestre e Marinha)
SWIR	Short-Wave Infrared (Infravermelho de Onda Curta)
UETER	Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	<i>Objetivo Geral:</i>	15
1.2.2	<i>Objetivo Geral:</i>	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Sensoriamento Remoto	16
2.2	Tipos de telhados	17
2.3	Desempenho Térmico	18
2.4	Drenagem Urbana	19
3	METODOLOGIA	20
3.1	Área de estudo	20
3.2	Apoio nas unidades experimentais	21
3.3	Aquisição de dados	22
3.3.1	<i>Análise de dados pluviométrica</i>	22
3.3.2	<i>Aquisição dos dados de temperatura</i>	22
3.3.3	<i>Aquisição de imagens multiespectrais</i>	23
3.4	Procedimentos	23
3.4.1	<i>NDVI</i>	25
3.4.2	<i>NDWI</i>	26
3.4.3	<i>NDBI</i>	26
3.4.4	<i>Albedo de Superfície</i>	26
3.5	Análise de uso e ocupação do solo	28
4	RESULTADOS	29

4.1	Análise da precipitação pluviométrica	29
4.2	Análise dos experimentos na UETER	29
4.3	Índices espectrais.....	34
4.3.1	<i>NDVI</i>	34
4.3.2	<i>NDWI</i>	36
4.3.3	<i>NDBI</i>	38
4.3.4	<i>Albedo de Superfície.....</i>	40
5	CONCLUSÃO.....	42
	REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

A migração em massa da população rural para as áreas urbanas impulsionou um rápido crescimento dos centros urbanos brasileiros, porém, muitas vezes de forma desordenada e sem a devida consideração pela infraestrutura necessária para uma drenagem adequada das águas pluviais. Segundo Neupane et al. (2021), esse fenômeno resultou em uma significativa redução das áreas com cobertura vegetal, conhecidas como áreas permeáveis, e em um aumento correspondente das áreas construídas, ou seja, áreas impermeáveis. Como ressaltado por Silva Júnior e Silva (2016), essa transformação do uso e ocupação do solo nas cidades tem sido uma realidade preocupante, resultando em inúmeros impactos negativos, especialmente em relação às inundações e à contaminação dos mananciais superficiais e subterrâneos por efluentes urbanos, afetando drasticamente a qualidade de vida da população.

De acordo com Liu et al. (2023), as precipitações intensas em áreas urbanas provocam um aumento significativo no volume de escoamento, sobrecarregando o sistema de drenagem e ocasionando inundações e alagamentos, que por sua vez impactam negativamente a infraestrutura urbana e a qualidade de vida dos cidadãos. Esse problema é particularmente grave em áreas costeiras, como o caso da cidade de Recife, onde a ocupação urbana desordenada e a vulnerabilidade do sistema de drenagem às oscilações de maré exacerbam os problemas de alagamento durante os períodos de chuvas intensas, assim como foi apontado por (Silva Júnior & Silva, 2016).

Diante do exposto, não é de se surpreender que uma grande quantidade de autores cita as tecnologias que visam resgatar o cenário pré-urbanização como a principal medida a ser tomada para mitigação de tais problemas. Nesse contexto, diversos autores destacam que as Melhores Práticas de Gestão (Best Management Practices - BMPs) e o Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development – LID) são duas medidas de controle efetivas para reduzir o escoamento e o movimento de poluentes. (Urbanas, 1994; Usepa, 2008; Liu, Bralts e Engel, 2015, entre outros)

Entre as medidas BMPs e LID, os telhados verdes se destacam como uma opção viável e eficaz, oferecendo uma série de benefícios, dentre eles tem-se a mitigação do fluxo de calor, melhora do conforto térmico, redução de ilhas de calor,

retarda escoamento superficial, dentre outros. Fazendo uma comparação com os telhados comuns tem-se que, devido a sua superfície ecológica, os telhados verdes diminuem a temperatura tanto interna quanto externa. Os telhados verdes se destacam pelo desempenho térmico, como demonstrado em pesquisas realizadas em regiões do agreste pernambucano e em áreas urbanas densas, com resultados que apontam para o aumento do conforto térmico no interior das edificações (Rocha, 2020; Vilarim, 2022; Santos, 2016). Assim, ao proporcionarem um melhor conforto térmico, é natural que também ocorra uma diminuição no gasto energético em regiões de clima quente, pela amenização do uso de eletrodomésticos com a mesma finalidade (Giacomello & Gaspari, 2021).

Além disso, de acordo com Bezerra et al. (2018.a), os telhados verdes têm como principal característica a capacidade de reter água da chuva. A vegetação presente nesses telhados mantém o solo no lugar e participa do ciclo hidrológico por meio dos processos de interceptação e evapotranspiração. Comparados aos telhados convencionais, os telhados verdes reduzem o escoamento superficial, diminuindo os riscos de inundações. Somado a isso, eles podem armazenar a água da chuva para outros usos nas edificações, como irrigação de jardins, limpeza e descarga (Chen et al., 2015).

Somado a isso, tem-se o Sensoriamento Remoto (SR) como uma ferramenta eficaz para o monitoramento do comportamento hídrico associado à variação da cobertura vegetal. Segundo Farias et al. (2017), essas técnicas têm se tornado cada vez mais frequentes no cenário mundial.

O SR é um instrumento de coleta de informações sobre a superfície da Terra por meio de sensores instalados em satélites, que detectam e respondem às radiações eletromagnéticas. Esses sensores permitem obter índices importantes para o planejamento e a avaliação dos recursos hídricos e da vegetação, como o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) e o NDWI (Índice de Água da Diferença Normalizada). Ressalta-se que, em busca de análises mais completas e precisas, tem-se complementado as informações com dados hidrológicos, gerando assim um refinamento nos resultados obtidos. (Testa et al., 2018).

Nesse contexto, destaca-se a utilização de índices espectrais obtidos por meio do sensoriamento remoto, como o NDVI, o NDWI e o Albedo, como ferramentas eficazes para o monitoramento ambiental e planejamento urbano. O NDVI permite

identificar a densidade e a vitalidade da vegetação, sendo amplamente utilizado na detecção de alterações na cobertura vegetal e no acompanhamento da degradação ambiental (Bacalhau et al., 2017; Bezerra et al., 2018.b). Já o NDWI é voltado para a identificação de corpos hídricos e umidade do solo, sendo especialmente útil na análise de áreas urbanas suscetíveis a alagamentos, por possibilitar o mapeamento da umidade superficial e a delimitação de áreas inundáveis (Gao, 1996; Almeida et al., 2021).

O índice de Albedo, por sua vez, representa a fração da radiação solar refletida pela superfície terrestre e está diretamente relacionado à temperatura e ao conforto térmico urbano. Superfícies mais claras, com maior índice de albedo, tendem a refletir mais radiação solar e, conseqüentemente, apresentar temperaturas superficiais mais baixas, o que pode contribuir significativamente para a mitigação de ilhas de calor em ambientes urbanos (LEITE et al., 2020).

Diante disso, o estudo em questão visa analisar o desempenho dos telhados verdes como uma técnica compensatória para os desafios da drenagem urbana e do conforto térmico em Recife. Para isso, serão utilizados os índices espectrais NDVI, NDWI e Albedo, obtidos por sensoriamento remoto, a fim de quantificar os benefícios desta tecnologia e fornecer subsídios para o planejamento urbano sustentável na cidade.

1.1 Justificativa

Nesse contexto, Amorim (2022) destaca que a região metropolitana de Recife se torna um ambiente a ter grandes benefícios com a aplicação dos telhados verdes. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) Recife é a 16ª cidade mais ameaçada pelas mudanças climáticas no globo. Também se encontra em um clima quente, no nordeste do Brasil, e conta com diversos desastres pluviométricos nos últimos anos, fatores estes que causaram graves problemas para a população, a exemplo da morte de dezenas de cidadãos e da destruição de milhares de lares.

Diante desse cenário, torna-se fundamental implementar técnicas que visem mitigar os problemas de drenagem urbana, reduzindo os riscos de inundações e alagamentos e promovendo melhorias significativas na qualidade de vida da população. Nesse contexto, a aplicação de telhados verdes nos centros urbanos surge como uma alternativa promissora para mitigar os impactos negativos da

impermeabilização do solo. Os telhados verdes, como apontado por (Liu *et al.*, 2023), são de fácil aplicação na zona urbana e demonstraram ser eficazes na redução do escoamento superficial das águas pluviais quando comparados com os telhados convencionais, devido à presença de vegetação e solo que promovem a retenção e infiltração da água pluvial.

Um marco significativo no município de Recife, é a promulgação da Lei Municipal nº 18.112 (RECIFE, 2015). Que estabelece diretrizes para aprimorar a qualidade ambiental das edificações, por meio da exigência da instalação de "telhados verdes" e da construção de reservatórios para o gerenciamento das águas pluviais. O primeiro artigo desta lei estabelece a obrigatoriedade dos telhados verdes em edifícios habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não habitacionais com mais de 400 m² de área de cobertura.

O aumento iminente do número de coberturas verdes, em conformidade com essa legislação, sublinha a importância de pesquisas sobre a qualidade da água proveniente da interação entre substrato e vegetação, assim como dos benefícios tangíveis proporcionados por essa tecnologia, como o conforto térmico dos espaços localizados sob os telhados verdes. Esses estudos são essenciais para embasar a implementação eficaz dessa prática e maximizar seus impactos positivos no contexto urbano.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral:

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o impacto da implantação de telhados verdes para a garantia do conforto térmico nas edificações, a partir da utilização de dados medidos *in loco*. Ainda, analisar os locais mais adequados para implementação de telhados verdes a partir da utilização de índices espectrais obtidos por imagens de satélite.

1.2.2 Objetivos Específicos:

- Caracterizar o regime pluviométrico da cidade de Recife;
- Analisar índices espectrais a partir de imagens de satélites;
- Analisar o desempenho térmico dos telhados verdes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto (SR) é uma técnica que permite a aquisição de informações sobre a superfície terrestre e os fenômenos que nela ocorrem sem a necessidade de contato físico direto. Esse processo é realizado por meio da detecção e análise da radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos objetos, utilizando sensores instalados em plataformas aéreas ou orbitais, como satélites e aviões (Mercier et al., 2020).

O SR tem se consolidado como uma ferramenta indispensável no monitoramento e análise de diversas variáveis ambientais e urbanas. Através do uso de SR, é possível identificar áreas onde os níveis acumulados de água são maiores, observar variações nos níveis da superfície terrestre, e quantificar áreas de construção em determinados espaços. Esta técnica também se destaca na detecção de variações na cobertura do solo e na presença de corpos hídricos, utilizando parâmetros biofísicos que proporcionam diagnósticos precisos e auxiliam no gerenciamento socioambiental (Bacalhau et al., 2017).

No contexto da drenagem urbana, o SR é uma ferramenta valiosa. Conforme Vaeza et al. (2010), a partir da análise de imagens de SR, é possível classificar o uso e a ocupação do solo, identificando elementos diversos em áreas urbanas. A alta resolução dessas imagens é crucial para estudos detalhados, permitindo uma compreensão mais profunda das características urbanas e dos desafios relacionados à drenagem. Para a aplicação prática do SR, o *software* gratuito QGIS é amplamente utilizado, possibilitando o processamento de imagens através de índices espectrais específicos.

Dentre os satélites disponíveis, o programa Copernicus disponibiliza a série de satélites Sentinel, com destaque para o Sentinel-2, que opera com os sensores MSI (*MultiSpectral Instrument*). Esse sensor captura imagens em 13 bandas espectrais, com resoluções espaciais de 10 m, 20 m e 60 m, permitindo uma análise aprimorada do meio urbano. A alta frequência de revisita do Sentinel-2, de aproximadamente 5 dias, garante uma maior disponibilidade de imagens atualizadas, tornando-o uma

ferramenta valiosa para monitoramento contínuo das condições urbanas e dos impactos na drenagem (Engesat, 2015).

Os sistemas de Sensoriamento Remoto fornecem dados periódicos e consistentes da superfície terrestre, sendo fundamentais no monitoramento global e no entendimento dos processos dinâmicos dos ecossistemas, bem como nas respostas às mudanças climáticas (GHOLIZADEH et al., 2018). Uma das técnicas mais utilizadas no processamento de imagens de SR são os índices de vegetação (IVs), que exploram as propriedades espectrais da vegetação com base no comportamento de sua reflectância nas regiões do visível e do infravermelho próximo. Esses índices têm sido aplicados no monitoramento de matas ciliares e no planejamento desses espaços, destacando-se como ferramentas importantes para a conservação ambiental (ZHANG et al., 2019; YANG et al., 2018).

2.2 Tipos de telhados

O telhado verde intensivo é caracterizado pela maior espessura de solo entre os diferentes tipos de cobertura verde, permitindo que as plantas atinjam uma profundidade de 15 cm a 90 cm. Esse modelo possibilita o cultivo de plantas de pequeno, médio e grande porte, incluindo espécies de maior porte. Devido ao peso adicional das plantas, do substrato e da água acumulada, esse tipo de telhado exige uma estrutura complexa e robusta para suportá-lo (Schmidt, 2020). A complexidade e o peso resultam em um custo de implantação e manutenção elevados, necessitando de cuidados frequentes para garantir o bom desenvolvimento das plantas. Por essas razões, o telhado verde intensivo é mais comum entre pessoas de maior poder aquisitivo, que podem arcar com os custos e a manutenção exigida por essa cobertura (Screnski, 2015).

O telhado verde extensivo, por outro lado, possui uma camada de substrato mais fina, suficiente apenas para a vegetação de pequeno porte. Este tipo de telhado é revestido por plantas de baixo peso, que são resistentes e capazes de prosperar em condições climáticas adversas, como a falta de chuva, invernos rigorosos e ventos fortes (Schmidt, 2020). Sua estrutura simples e leve torna-o adequado para coberturas com grande inclinação, e o baixo custo, aliado à menor necessidade de manutenção, faz do telhado verde extensivo uma opção atrativa para a maioria da população. Além disso, sua simplicidade não exige cuidados frequentes, facilitando sua aplicação em

diversas situações, especialmente onde os recursos são mais limitados e onde os edifícios não podem suportar cargas adicionais significativas (Screnski, 2015).

O telhado verde semi-intensivo representa um meio-termo entre os modelos intensivo e extensivo. Nele, a espessura do solo e o tamanho das plantas são intermediários, permitindo a inclusão de uma grande variedade de vegetação. No entanto, essa diversidade exige que a manutenção seja realizada de forma mais frequente, e o custo se aproxima do modelo intensivo, mas ainda sendo significativamente menor (Screnski, 2015).

2.3 Desempenho Térmico

A utilização de telhados verdes nas edificações está associada a benefícios térmicos. Krebs (2005) e Susca (2019) afirmam que o emprego do telhado verde é benéfico tanto urbanamente quanto para a própria construção, pois suaviza a temperatura em ambientes aquecidos, principalmente onde existem edificações de grande porte e fluxo urbano intenso.

Rocha (2020) ratifica que a cobertura verde constitui uma alternativa a ser aplicada pelo seu desempenho térmico. Os telhados verdes promovem a dissipação do calor, reduzindo significativamente o fluxo do mesmo para o interior das edificações. Besir e Cuce (2018) destacam que isso acontece devido à perda de calor por radiação de ondas longas, evapotranspiração e fotossíntese.

Silva, Gomes e Silva (2016) realizaram uma avaliação térmica experimental e numérica de edificações com telhados verdes em Lisboa, Portugal, durante os períodos de aquecimento e arrefecimento do ano de 2013. Os autores destacaram que o emprego de telhados verdes pode resultar em economia no consumo anual de energia de até 70%. Esse resultado corrobora com o evidenciado por Francis e Jensen (2017), que realizaram uma revisão sistemática de estudos sobre o desempenho térmico de telhados verdes. Em 20 dos 41 estudos analisados, a economia de energia gerada pelos telhados chega até 70%.

No contexto dos telhados verdes, ressaltam-se os telhados executados com telhas ecológicas, produzidas a partir da reutilização de resíduos sólidos descartados, como tubos de pasta de dente e embalagens recicláveis. Magalhães (2018) e Misaka (2021) afirmam que, devido ao fato de as telhas ecológicas de embalagens recicláveis

apresentarem alumínio em sua composição, atuam na reflexão solar, deixando o ambiente com a temperatura mais agradável.

2.4 Drenagem Urbana

A drenagem urbana é um sistema fundamental para o manejo das águas pluviais em áreas urbanas, buscando mitigar os impactos negativos do escoamento superficial, como inundações, erosões e poluição de corpos hídricos. Segundo Silva Junior et al. (2020), os sistemas convencionais de drenagem, baseados em redes de tubulações e canalizações, se mostram ineficientes diante do crescente processo de impermeabilização do solo e da maior frequência de eventos climáticos extremos.

Nesse cenário, destacam-se as Soluções Baseadas na Natureza (SbN), como os telhados verdes, que atuam como sistemas de drenagem sustentável, retardando e reduzindo o escoamento superficial. Estudos comprovam que telhados verdes apresentam significativa capacidade de retenção hídrica, como demonstrado por Giacomello e Gaspari (2021) em experimentos com simulação de chuvas intensas. Essa capacidade de retenção contribui para a redução da carga sobre as redes de drenagem tradicionais, minimizando riscos de alagamentos e sobrecarga nos sistemas de tratamento de águas pluviais, conforme evidenciado por Dutra e Silva (2020) em estudo sobre amortecimento de vazões em bacias urbanas.

Além dos telhados verdes, outras técnicas de drenagem urbana sustentável incluem pavimentos permeáveis, jardins de chuva e bacias de infiltração. Conforme destacam Urbonas (1994) e Liu et al. (2015), a implementação integrada dessas soluções apresenta resultados na redução dos picos de vazão e na melhoria da qualidade da água em áreas urbanizadas, funcionando como complemento eficaz aos sistemas tradicionais de canalização e tubulações.

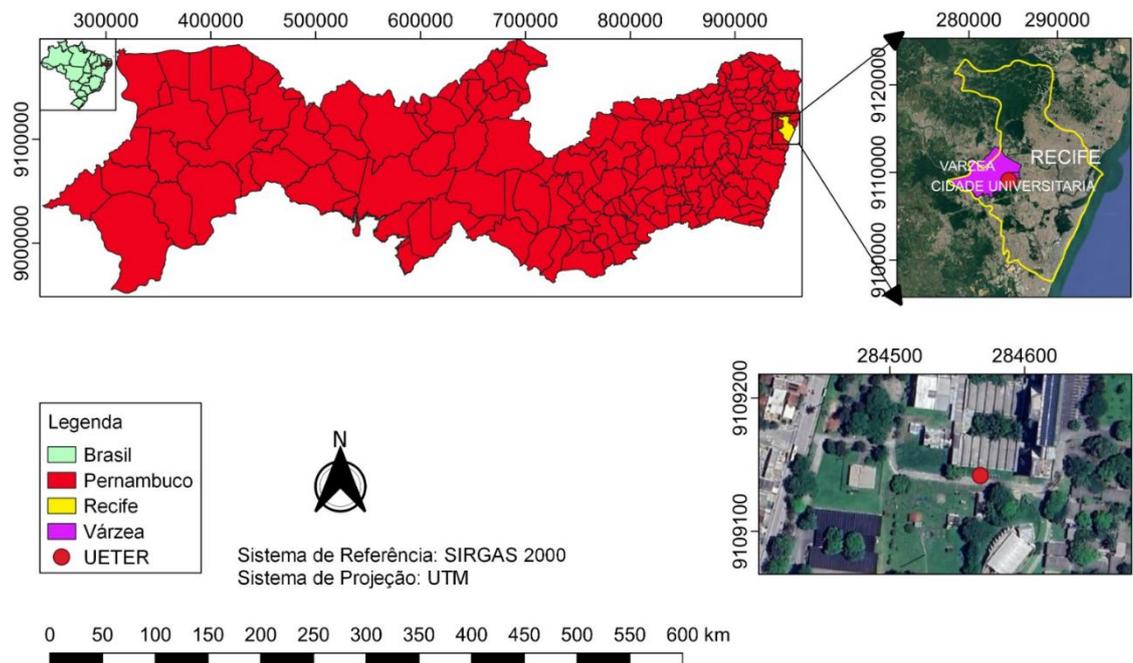
O uso de tecnologias como sensoriamento remoto e modelagem hidrológica tem se tornado essencial para o planejamento e monitoramento da drenagem urbana. Segundo Almeida et al. (2021), imagens de satélite de alta resolução permitem identificar áreas críticas de impermeabilização e avaliar a eficácia de infraestruturas verdes. Leivas et al. (2019) afirmaram que técnicas de processamento digital de imagens têm sido amplamente utilizadas para análise temporal dos parâmetros hidrológicos em áreas urbanas, proporcionando dados precisos para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

A área de estudo corresponde a cidade de Recife, localizada no Estado de Pernambuco, Brasil. A capital pernambucana é uma cidade costeira com clima tropical e um regime de precipitação concentrado principalmente nos meses de inverno. Situada na região Nordeste do Brasil, Recife está aproximadamente entre as coordenadas $8^{\circ}03'14''S$ e $34^{\circ}52'51''W$, conforme apresentado na Figura 1. O clima é caracterizado por uma estação chuvosa bem definida, predominantemente entre março e agosto, conforme dados da prefeitura de Recife (2025). A Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife (UETER) está incluída na área destacada, no campus Recife da UFPE.

Figura 1 - Localização de Recife e da UETER.



Fonte: Autor (2025).

Recife é marcada por uma alta densidade populacional, com áreas urbanizadas e edificações predominantes, além de zonas industriais e comerciais. A cidade possui um sistema de drenagem misto, composto por redes de canais naturais, galerias pluviais e sistemas de bombeamento. Entretanto, a infraestrutura existente

frequentemente se mostra insuficiente para lidar com os volumes de água das chuvas intensas, resultando em frequentes inundações (Silva Junior et al., 2020).

3.2 Apoio nas unidades experimentais

Durante o desenvolvimento do estudo em questão, foram conduzidos experimentos utilizando um simulador de chuvas e a implementação de um modelo de escoamento aplicado a telhados verdes, com o objetivo de avaliá-los como instrumentos de apoio à drenagem urbana. Essa etapa foi desenvolvida nas instalações da Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife (UETER), Figura 2, localizada no Laboratório de Hidrologia Urbana.

A UETER é composta por diferentes telhados, contendo um sistema de captação e armazenamento de água pluvial, sendo instalada no *campus* Recife da UFPE e é monitorada semanalmente para identificar e tratar eventuais problemas na estrutura (como surgimento de fissuras, de infiltração, entre outros).

Figura 2 - Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife (UETER).



Fonte: Autor (2025).

Para este estudo, foram utilizadas as células teste 4 e 5, correspondentes ao telhado convencional (laje) e ao telhado verde, respectivamente (correspondentes às células mais à direita da figura 2). A chuva simulada teve uma intensidade de 120 mm/h, com duração de 10 minutos, permitindo avaliar a capacidade de retenção e escoamento dos diferentes sistemas de cobertura.

3.3 Aquisição de dados

3.3.1 Análise de dados pluviométricos

Foi realizada a análise pluviométrica da série histórica anual da cidade de Recife, utilizou-se os dados pluviométricos mensais para os anos de 1994 a 2021. Embora os dados da série histórica tenham se encerrado em 2021, devido à parada da estação, os dados de 1994 a 2021 ainda são suficientes para uma análise robusta. Os dados obtidos por meio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referem-se a estação meteorológica automática Recife (A301), situada no bairro da Várzea. Para a realização da análise da série histórica os dados foram separados em três blocos de 6 anos e dois blocos de 5 anos.

3.3.2 Aquisição dos dados de temperatura

A coleta dos dados de temperatura interna nos telhados foi realizada utilizando *dataloggers*, conforme a Figura 3, dispositivos programados para medir a temperatura a cada 30 minutos. Foram utilizados três *dataloggers* em cada protótipo de telhado, cada um posicionado em uma parede diferente dos protótipos.

Figura 3 - Escort iMINI MX-IN-S-8-L.



Fonte: Autor (2025).

3.3.3 Aquisição de imagens multiespectrais

Para a análise da cobertura do solo e a identificação de áreas propícias à implantação de telhados verdes, foram utilizadas imagens de satélite Sentinel-2, adquiridas através da plataforma USGS (*United States Geological Survey*). O satélite Sentinel-2, o qual faz parte do programa Copernicus da União Europeia, é equipado com sensores capazes de capturar imagens com alta resolução espacial e temporal, fornecendo dados essenciais para monitoramento ambiental e urbano. As imagens escolhidas foram aquelas com pouca incidência de nuvens, correspondendo aos períodos de estudo. A plataforma USGS oferece acesso a uma vasta gama de dados geoespaciais, incluindo imagens de satélite, que são amplamente utilizadas em pesquisas e análise de mudanças no uso do solo, devido à sua precisão e abrangência global.

3.4 Procedimentos

O procedimento consistiu em uma série de etapas para a obtenção de imagens binárias a partir de diversos índices espectrais, utilizados na análise da cobertura do solo e das características ambientais. Inicialmente, foram escolhidas imagens pela

plataforma USGS, evitando imagens com grande quantidade de nuvens. Em seguida foram geradas as cartas georreferenciadas, utilizando a ferramenta “Calculadora Raster”, proveniente do *software* QGIS.

Posteriormente, foi calculado o índice NDVI, que identificou as áreas vegetadas, eliminando os pixels com valores menores que zero e mantendo apenas as áreas correspondentes à vegetação.

Em seguida, foi calculado o índice NDWI, pelo método de Gao, com o objetivo de identificar e isolar áreas com maior teor de umidade na vegetação, diferenciando a vegetação saudável da vegetação estressada e do solo exposto.

Foi também calculado o índice NDBI, que contribuiu para identificar áreas urbanas e construídas, isolando os pixels que representavam zonas urbanas e destacando áreas com infraestrutura, como edifícios e ruas.

Por fim, foi calculado o índice de Albedo, que mediu a refletividade das superfícies. A imagem binária gerada a partir desse índice destacou as áreas com maior capacidade de reflexão da radiação solar, indicando regiões com maior potencial para redução do aquecimento urbano (Leite et al., 2020).

Esses índices forneceram uma análise detalhada das características do solo, vegetação, água, áreas urbanas, temperatura e refletividade, auxiliando na identificação das áreas mais adequadas para a implantação de telhados verdes.

De acordo com Zhang et al. (2019), as especificações das bandas do sensor Sentinel-2A, incluindo resolução e comprimento de onda, foram apresentadas de forma concisa na Tabela 1.

Tabela 1 - Banda, resolução e comprimento de onda do sensor do Sentinel-2.

Banda	Resolução (m)	Comprimento de onda (nm)
2 (azul)	10	458-523
3(verde)	10	543-578
4 (vermelho)	10	650-680
8 (IVP)	10	785-900

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2019).

Embora a Tabela 1, apresentada por Zhang et al. (2019), forneça uma visão útil e simplificada das características espectrais das bandas do sensor Sentinel-2A, a Tabela 2, obtida da Engesat (2015), é mais abrangente. Ela complementa e expande

significativamente as informações da Tabela 1, oferecendo um detalhamento maior sobre as capacidades do sensor, incluindo bandas adicionais e combinações úteis para este trabalho.

Tabela 2 - Especificações das Bandas do Sensor Sentinel-2A.

Resolução	Nº da Banda	Nome da Banda	Comprimento de Onda Central (nanômetro)
10 m	B02	Blue (Azul)	490
	B03	Green (Verde)	560
	B04	Red (Vermelho)	665
	B08	NIR (Infravermelho Próximo)	842
20 m	B05	Red Edge 1	705
	B06	Red Edge 2	740
	B07	Red Edge 3	783
	B08A	Red Edge 4	865
	B11	SWIR 1	1610
	B12	SWIR 2	2190
60 m	B01	Aerossol	443
	B09	Water Vapor	940
	B10	Cirrus	1375

Fonte: Adaptado de Engesat (2015).

3.4.1 NDVI

O NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) (Equação 1) tem como função maximizar a reflectância da vegetação na banda do infravermelho próximo e minimizar a reflectância na banda vermelho. Esse índice foi proposto por Tucker (1979), sendo amplamente utilizado para monitorar a vegetação e a cobertura do solo através da combinação das bandas do vermelho e infravermelho próximo. Na equação o termo $\rho(\lambda\text{Vermelho})$ é a reflectância da banda equivalente ao vermelho e $\rho(\lambda\text{IVP})$ é a reflectância da banda equivalente ao infravermelho próximo.

$$NDVI = \frac{\rho(\lambda\text{IVP}) - \rho(\lambda\text{Vermelho})}{\rho(\lambda\text{IVP}) + \rho(\lambda\text{Vermelho})} \quad (1)$$

3.4.2 NDWI

O NDWI (Índice de Água da Diferença Normalizada) foi calculado pela equação de Gao (1996) (Equação 2) e tem como função realçar a presença de água livre ao reduzir a influência da vegetação e do solo. Na equação, o termo $\rho(\lambda_{IVM})$ é a reflectância da banda equivalente ao infravermelho médio e $\rho(\lambda_{IVP})$ é a reflectância da banda equivalente ao infravermelho próximo.

$$NDWI = \frac{\rho(\lambda_{IVP}) - \rho(\lambda_{IVM})}{\rho(\lambda_{IVP}) + \rho(\lambda_{IVM})} \quad (2)$$

3.4.3 NDBI

O NDBI (Índice de Diferença Normalizada de Áreas Urbanas) conforme proposto por Zha et al. (2003), será calculado pela razão entre a diferença e a soma das faixas do infravermelho médio (IVM) e do infravermelho próximo (IVP), conforme a Equação 3. Esse índice é eficaz para identificar áreas urbanizadas, uma vez que maximiza a reflectância das superfícies construídas e minimiza a reflectância das áreas de vegetação. O NDBI, portanto, é uma ferramenta útil para mapear a densidade de construção nas regiões de estudo.

$$NDBI = \frac{\rho(\lambda_{IVM}) - \rho(\lambda_{IVP})}{\rho(\lambda_{IVM}) + \rho(\lambda_{IVP})} \quad (3)$$

3.4.4 Albedo de Superfície

O albedo de superfície, que representa a reflectância total da superfície terrestre, é estimado por meio da Equação 4, conforme mencionado por Leivas et al. (2019). Esse parâmetro é calculado a partir da soma ponderada das reflectâncias em diferentes bandas espectrais, onde cada banda é multiplicada por um coeficiente de peso que indica sua contribuição para a reflectância total.

$$\alpha_p = \sum w_{band} \alpha_{p_{band}} \quad (4)$$

Na equação 4, o termo α_p representa o albedo ponderado, enquanto w_{band} e $\alpha_{p_{band}}$ são, respectivamente, os coeficientes de peso e a reflectância de cada banda espectral considerada. A soma ponderada das reflectâncias das bandas é ajustada pelos coeficientes específicos para cada intervalo espectral. As bandas 2 (azul), 3 (verde), 4 (vermelho) e 8 (infravermelho próximo) do Sentinel 2A, foram usadas para o cômputo do albedo (Teixeira et al., 2014a).

A Tabela 3, conforme Vanino et al. (2021), apresenta os coeficientes de peso (ω_{bi}) para o cálculo do albedo, incluindo informações sobre o centro (λ), a largura espectral ($\Delta\lambda$), a irradiância solar (E_{sun}) e os respectivos pesos para cada banda.

Tabela 3 - Coeficientes de ponderação para o cálculo do albedo usando a Eq. (4).

Banda	λ central (μm)	$\Delta\lambda$ (μm)	E_{sun} (W m^{-2})	ω_{bi} (-)
1	0,443	0,020	1893	-
2	0,490	0,065	1927	0,1324
3	0,560	0,035	1846	0,1269
4	0,665	0,030	1528	0,1051
5	0,705	0,015	1413	0,0971
6	0,740	0,015	1294	0,0890
7	0,783	0,020	1190	0,0818
8	0,842	0,115	1050	0,0722
8a	0,865	0,020	970	-
9	0,945	0,020	831	-
10	1,375	0,030	360	-
11	1,610	0,090	242	0,0167
12	2,190	0,180	3	0,0002

Fonte: Adaptado de Vanino et al. (2021).

3.5 Análise de uso e ocupação do solo

A análise de uso e ocupação do solo foi realizada utilizando a plataforma QGIS, escolhida por ser de livre acesso e amplamente utilizada em pesquisas científicas. Sua versatilidade e capacidade de processar dados geoespaciais com precisão tornam-na uma ferramenta adequada para atender às demandas apresentadas nessa pesquisa. Assim, foram gerados mapas temáticos que indicaram as áreas impermeabilizadas e as áreas verdes existentes.

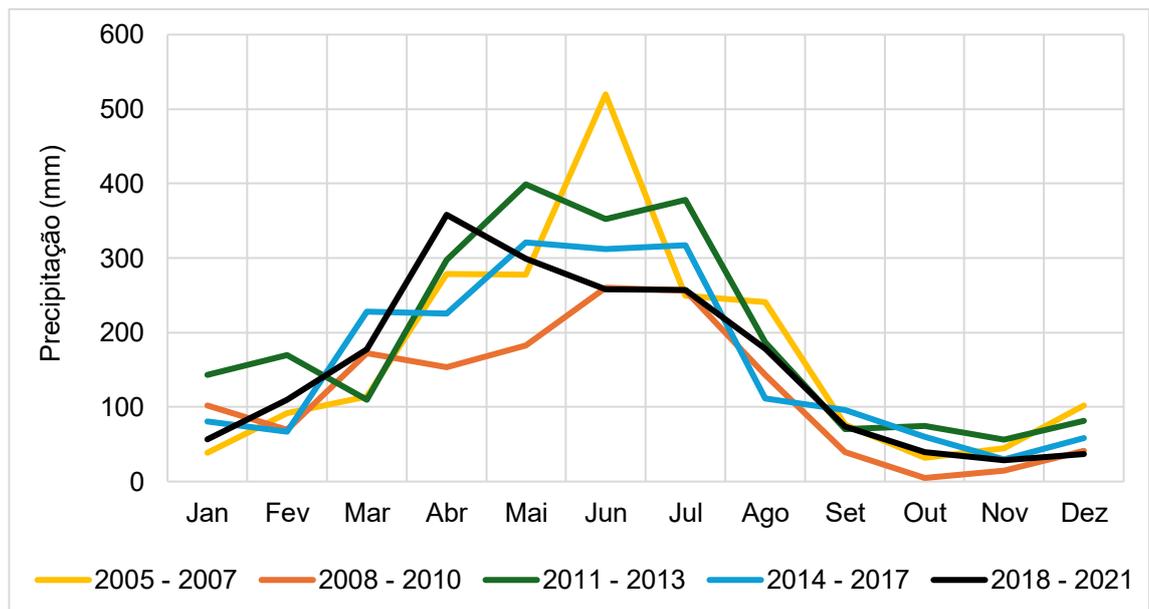
4 RESULTADOS

4.1 Análise de dados pluviométricos

Na Figura 4, observou-se a série histórica dos dados pluviométricos médios mensais referente aos anos de 1994 a 2021 para a cidade de Recife. Evidenciou-se que os anos de 2004 a 2009 apresentaram uma maior precipitação pluviométrica média anual (2314,9 mm), o menor valor foi registrado entre anos de 2016 a 2021 (1886,6 mm). Nos meses de setembro a fevereiro a região metropolitana de Recife apresenta baixos valores pluviométricos.

No meio do ano, meses de março a agosto, ocorre o maior índice de chuvas, com seu ápice nos meses de junho e julho, o maior valor registrado foi no período de 2004 a 2009, no mês de junho (462,02 mm).

Figura 4 - Precipitação pluviométrica média mensal para os anos de 1994 a 2021.



Fonte: Autor (2025).

4.2 Análise dos experimentos na UETER

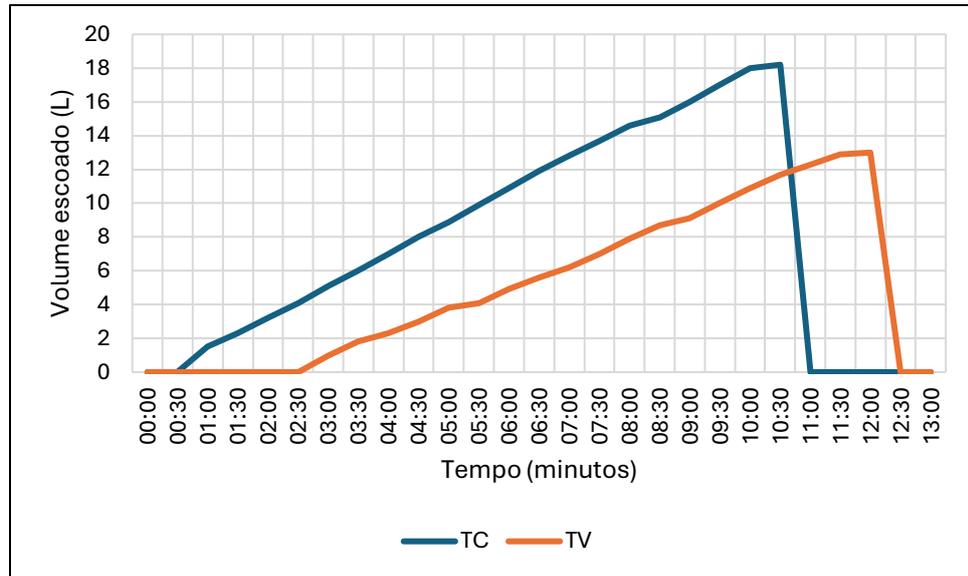
Os dados da Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife (UETER - UFPE) mostraram que o Telhado Verde é mais eficiente que o Telhado Convencional na gestão de águas pluviais.

Como ilustrado pela Figura 5, o Telhado Convencional iniciou o escoamento superficial em 1 minuto, atingindo um pico de 18,2 L aos 10 minutos e 30 segundos, enquanto o Telhado Verde retardou o início do escoamento para aproximadamente 3 minutos, com um pico reduzido de 13 L aos 12 minutos. Isso representa uma redução de 28,6% no pico de escoamento, evidenciando o efeito atenuador do Telhado Verde sobre a vazão gerada.

Além disso, a taxa de escoamento do Telhado Verde foi mais uniforme e progressiva, com aumentos de 0,5 a 0,8 L a cada 30 segundos, em comparação com cerca de 1 L no Telhado Convencional. Após atingir o pico, o escoamento do Telhado Convencional decresceu rapidamente, enquanto o Telhado Verde demonstrou uma drenagem mais gradual, prolongando a liberação da água ao longo do tempo. Esse comportamento está diretamente relacionado à capacidade de retenção e infiltração do substrato do Telhado Verde, que atua como um reservatório temporário antes de liberar a água para o sistema de drenagem.

Os resultados obtidos corroboraram com estudos anteriores que indicam que telhados verdes desempenham um papel fundamental na mitigação do escoamento superficial em áreas urbanas, como demonstrado por Dutra e Silva (2020) em sua análise sobre o amortecimento de vazões de pico em bacias urbanas. A capacidade de retardar o escoamento e reduzir o volume total escoado contribui significativamente para a diminuição do risco de enchentes, além de promover benefícios adicionais, como a melhoria da qualidade da água drenada e a redução da sobrecarga em sistemas de drenagem urbana. Dessa forma, a implementação de telhados verdes surge como uma estratégia eficiente para o controle da drenagem urbana, especialmente em cidades como Recife, sujeitas a eventos de precipitação intensa e rápida.

Figura 5 - Comparação do Escoamento de Água entre o Telhado Convencional (TC) e o Telhado Verde (TV).

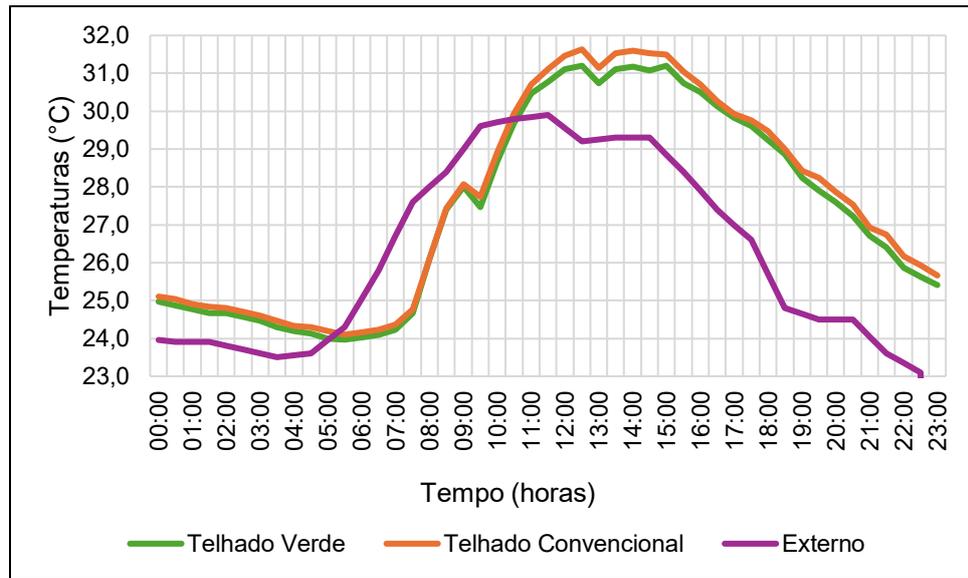


Fonte: Autor (2025).

Partindo para a análise de temperatura, foi escolhido o mês de junho, por coincidir com o mês das imagens de satélites obtidas. A Figura 6 apresenta as temperaturas do dia mais quente de junho (01/06/2024), medidas a cada 30 minutos, das 00:00 às 23:00. A temperatura externa variou de 23,1°C (23:00) a 29,9°C (11:30 e 12:00), com amplitude de 6,8°C.

O Telhado Convencional atingiu um pico de 31,6°C (13:00 e 14:30) e uma mínima de 24,1°C (06:00), com amplitude de 7,5°C, enquanto o Telhado Verde registrou 31,2°C (13:00 e 14:30) e 24,0°C (05:30 e 06:00), com amplitude de 7,2°C. Durante o pico de calor (10:00 às 15:00), o Telhado Convencional foi até 2,3°C mais quente que a temperatura externa, e o Telhado Verde, até 0,5°C mais frio que o Convencional. O Telhado Convencional apresentou temperaturas mais altas devido à maior absorção de radiação solar por materiais tradicionais, enquanto o Telhado Verde mostrou maior estabilidade térmica, beneficiado pelo isolamento e evapotranspiração da vegetação, corroborando os benefícios de telhados verdes apontados por Leonardo (2021).

Figura 6 - Dados de temperatura do dia mais quente (01/06/2024).

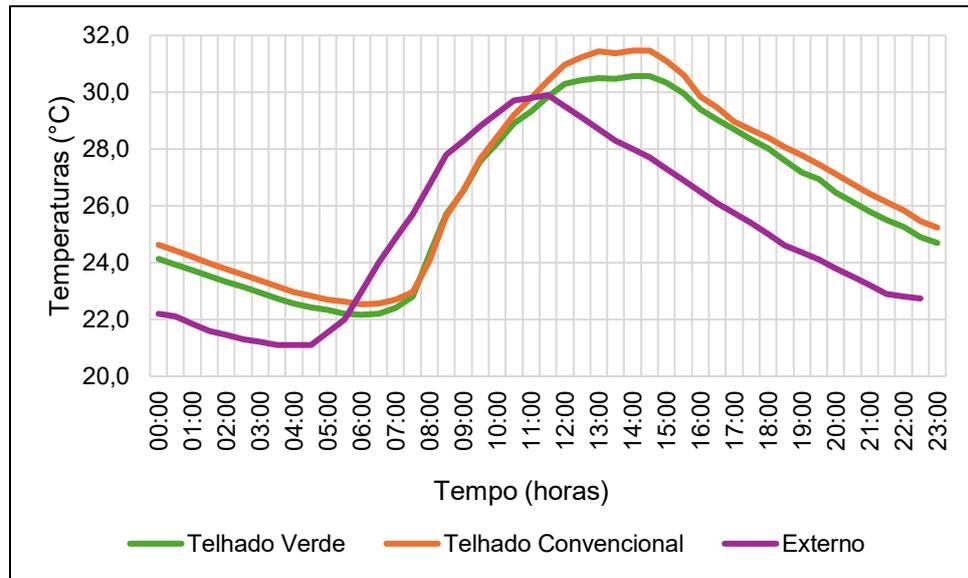


Fonte: Autor (2025).

Ainda no mesmo mês, a Figura 7 apresenta as temperaturas do dia de maior amplitude térmica (29/06/2024), também medidas a cada 30 minutos, das 00:00 às 23:00, permitindo uma análise complementar do desempenho dos telhados em condições de maior variação climática. A temperatura externa variou de 21,1°C (04:00 e 04:30) a 29,9°C (12:00), com amplitude de 8,8°C. O Telhado Convencional atingiu um pico de 31,5°C (14:30 e 15:00) e uma mínima de 22,5°C (06:30), com amplitude de 9,0°C, enquanto o Telhado Verde registrou 30,6°C (14:30 e 15:00) e 22,2°C (06:00 e 06:30), com amplitude de 8,4°C.

Durante o pico de calor (10:00 às 15:00), o Telhado Convencional foi até 3,1°C mais quente que a temperatura externa, e o Telhado Verde, até 0,9°C mais frio que o Convencional. Assim como no dia mais quente, o Telhado Convencional apresentou temperaturas mais elevadas devido à absorção de radiação solar, enquanto o Telhado Verde demonstrou maior estabilidade térmica, com uma amplitude 0,6°C menor que a do Convencional, reforçando sua capacidade de atenuação térmica em dias de alta variação climática, o que está alinhado com os benefícios de telhados ecológicos destacados por Leonardo (2021).

Figura 7 - Dados de temperatura do dia de maior amplitude térmica (29/06/2024).

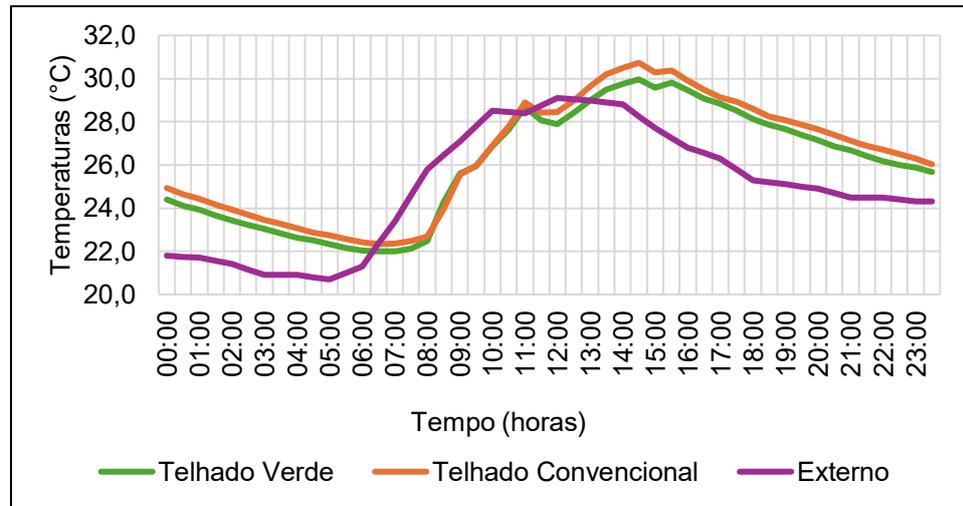


Fonte: Autor (2025).

Por fim, a Figura 8 apresenta as temperaturas do dia menos quente de junho (30/06/2024), medidas a cada 30 minutos, das 00:00 às 23:00, complementando a análise do desempenho térmico dos telhados em condições de temperaturas mais amenas. A temperatura externa variou de 20,7°C (05:00) a 29,1°C (12:00), com amplitude de 8,4°C. O Telhado Convencional atingiu um pico de 30,7°C (14:30) e uma mínima de 22,3°C (06:30), com amplitude de 8,4°C, enquanto o Telhado Verde registrou 30,0°C (14:30) e 22,0°C (06:00, 06:30 e 07:00), com amplitude de 8,0°C.

Durante o pico de calor (10:00 às 15:00), o Telhado Convencional foi até 2,5°C mais quente que a temperatura externa, e o Telhado Verde, até 0,7°C mais frio que o Convencional. Assim como nos dias anteriores, o Telhado Convencional apresentou temperaturas mais elevadas devido à absorção de radiação solar, enquanto o Telhado Verde demonstrou maior estabilidade térmica, com uma amplitude 0,4°C menor que a do Convencional, evidenciando sua capacidade de atenuação térmica mesmo em um dia menos quente, o que está alinhado com os benefícios de telhados ecológicos destacados por Leonardo (2021).

Figura 8 - Dados de temperatura do dia menos quente (30/06/2024).



Fonte: Autor (2025).

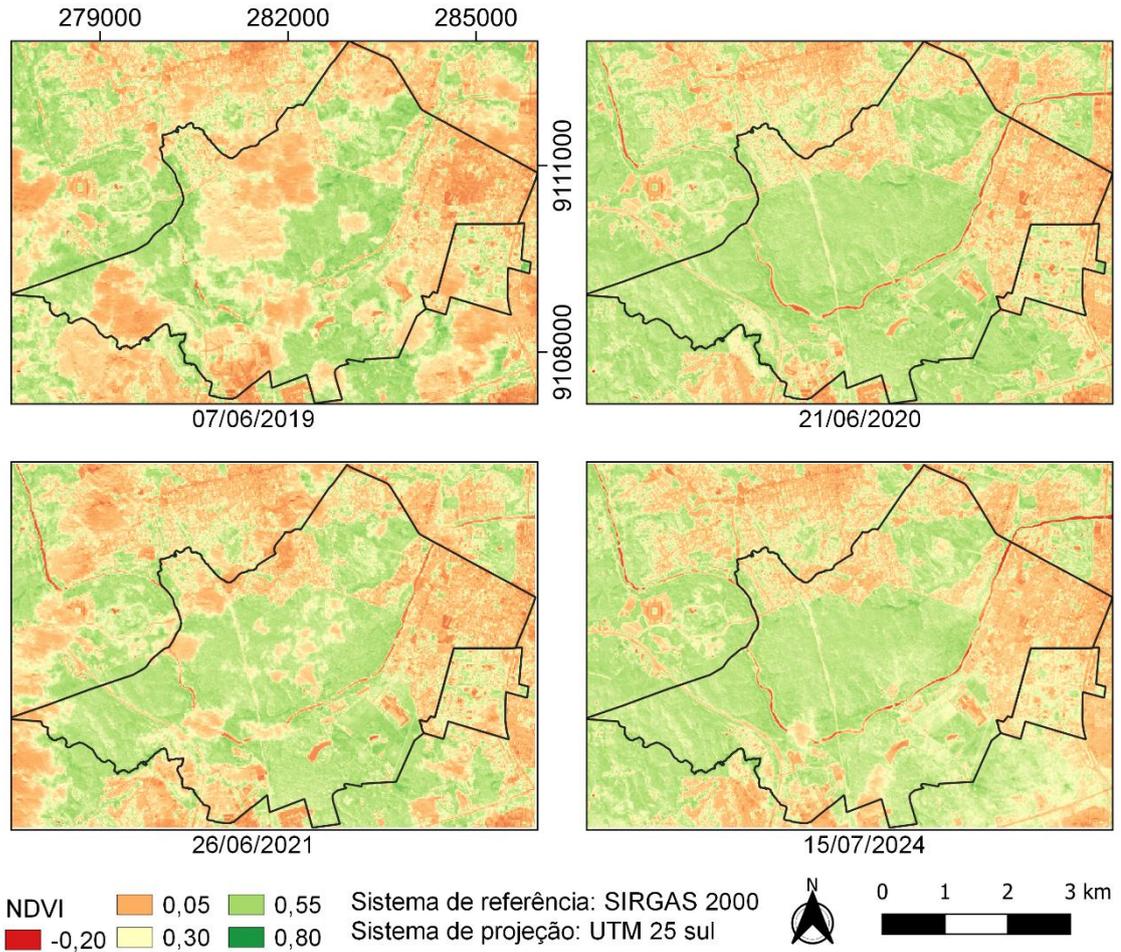
4.3 Índices espectrais

4.3.1 NDVI

Foi realizada a análise dos índices espectrais a partir de imagens de satélites utilizando o satélite Sentinel-2 e o software QGIS, no intuito de identificar locais adequados para a implantação de telhados verdes nos bairros da Várzea e Cidade Universitária. A Figura 9 apresenta as cartas georreferenciadas de NDVI para os anos de 2019, 2020, 2021 e 2024. De acordo com estudos realizados Bezerra et al. (2018.b), valores negativos de NDVI correspondem a corpos d'água, enquanto valores muito baixos (0,1 e abaixo) indicam áreas compostas por material rochoso ou arenoso. Valores moderados (entre 0,2 e 0,3) representam vegetação esparsa, como arbustos e pastagens, enquanto valores altos (0,6 a 0,8) estão associados a vegetação densa e florestas.

A análise das imagens revelou variações espaciais e temporais no NDVI da região estudada, evidenciando possíveis mudanças no uso e cobertura do solo ao longo dos anos. Nota-se que áreas em tons avermelhados, correspondentes a valores baixos de NDVI, se mantêm presentes em todas as datas analisadas, enquanto regiões em tons de verde, representando maior densidade vegetativa, também são visíveis, indicando a preservação de áreas com cobertura vegetal mais densa.

Figura 9 - Cartas georreferenciadas de NDVI dos bairros Várzea e Cidade Universitária.



Fonte: Autor (2025).

Os parâmetros estatísticos do NDVI, variaram de valores negativos, com um mínimo de -0,20, até valores próximos de 0,80. Segundo Almeida et al. (2021), esses dados indicam a presença de vegetação fotossinteticamente ativa, associada à biomassa e ao teor de clorofila da vegetação.

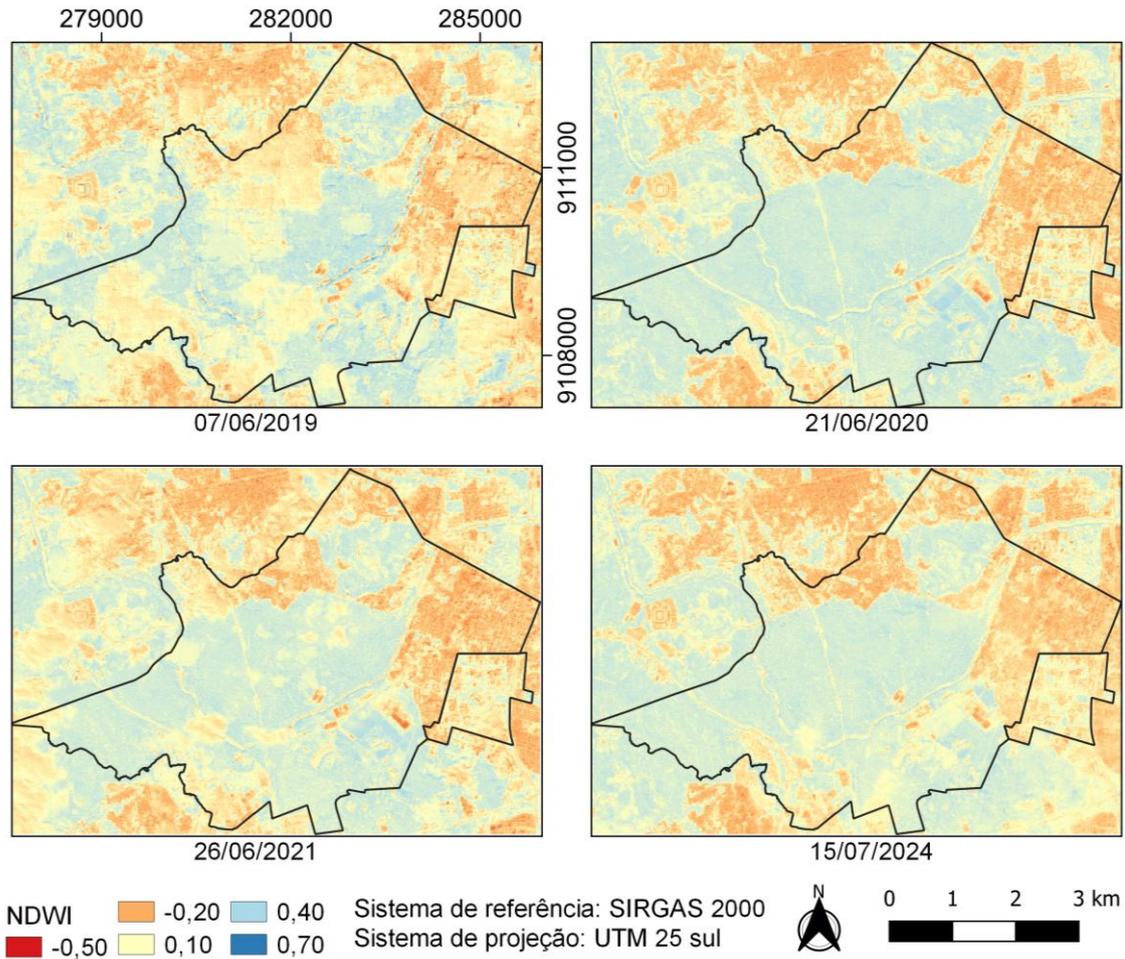
De acordo com os intervalos de classes descritos na legenda, a coloração alaranjada nos mapas indica valores de NDVI próximos a zero, representando áreas rochosas, arenosas ou sem vegetação. Essas áreas estão concentradas principalmente na região nordeste da área de estudo mapeada na Figura 9 (Almeida et al., 2021). Isso indica uma prioridade para a implantação de telhados verdes nessa região, uma vez que essas estruturas podem aumentar a retenção de água e melhorar o microclima em locais com baixa capacidade hídrica natural.

4.3.2 NDWI

O NDWI é um índice amplamente utilizado para detectar a presença de água e umidade em superfícies, sendo eficaz na identificação de corpos hídricos e áreas com alto teor de água no solo ou na vegetação, conforme Almeida (2021) destaca em seu trabalho sobre o uso de índices espectrais para análise ambiental.

A Figura 10 apresenta as cartas georreferenciadas de NDWI para os anos de 2019, 2020, 2021 e 2024. Os valores de NDWI variam de -0,50 a 0,70, representados por uma escala de cores que vai do vermelho (valores negativos, indicando baixa umidade) ao azul (valores positivos, indicando alta umidade ou presença de água). De acordo com Gao (1996), valores positivos de NDWI (acima de 0) indicam áreas com alta umidade ou presença de água, enquanto valores negativos (abaixo de 0) correspondem a áreas com baixa umidade, como solos secos ou superfícies construídas.

Figura 10 - Cartas georreferenciadas de NDWI.



Fonte: Autor (2025).

Os mapas da Figura 10 mostram que, em todos os anos, as regiões centrais e oeste da área de estudo apresentam cores mais azuladas e amareladas (NDWI entre 0,1 e 0,7), indicando maior umidade e presença de água ou vegetação úmida. Já as regiões norte e leste exibem coloração mais avermelhada (NDWI < -0,2), apontando para áreas secas ou com baixa umidade. Comparando os anos, 2019 apresenta mais tons amarelados (NDWI entre -0,2 e 0,2), indicando umidade moderada. Em 2020, há um aumento dos tons azulados (NDWI > 0,4), sugerindo maior umidade superficial. Em 2021, os tons amarelados predominam novamente, indicando uma redução na umidade. Por fim, em 2024, observa-se um aumento dos tons avermelhados (NDWI < -0,2), evidenciando um avanço das áreas secas, especialmente no norte e leste.

Portanto, as regiões centrais e oeste, com maior umidade, são menos necessitadas de telhados verdes, enquanto as áreas secas no norte e leste são

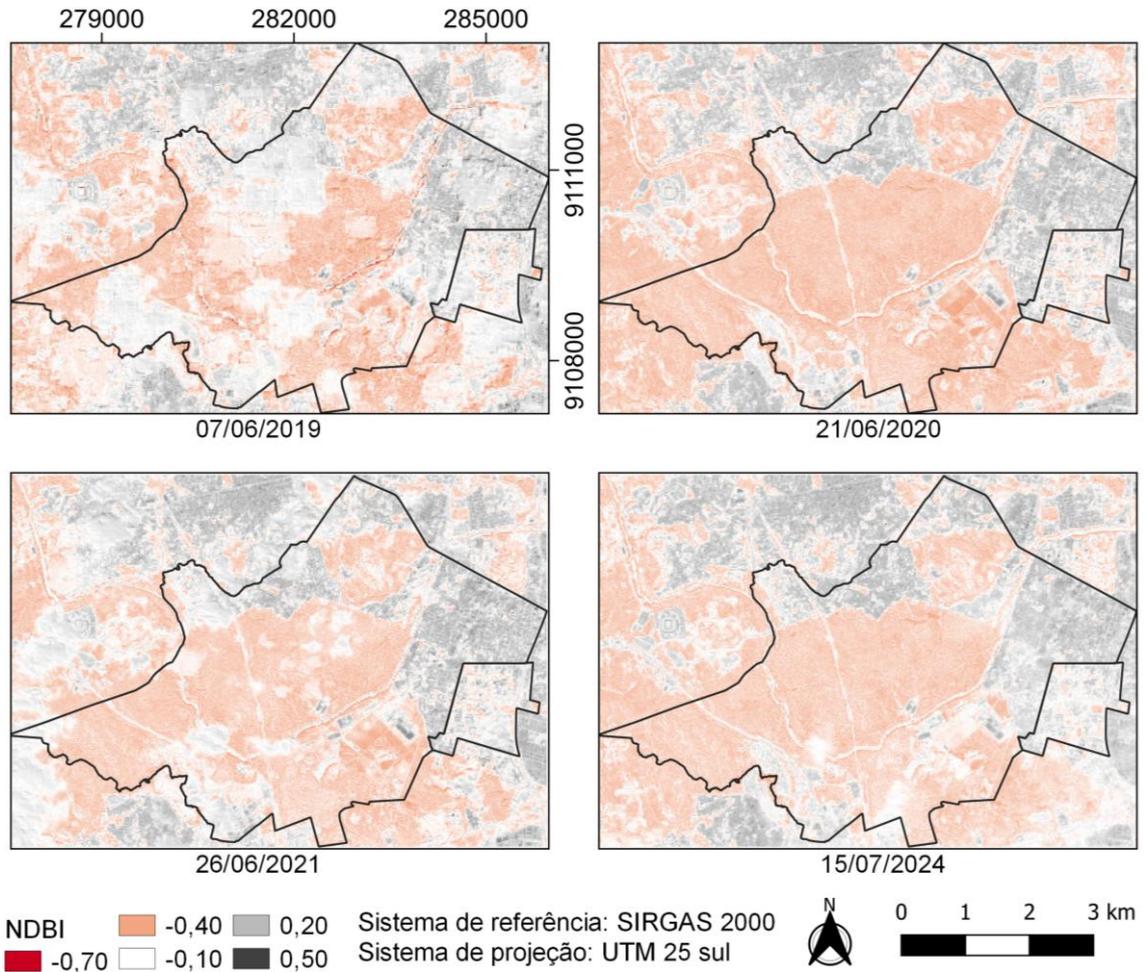
prioritárias para a implantação dessas estruturas, que podem aumentar a retenção de água e reduzir o escoamento superficial, contribuindo para a gestão hídrica sustentável.

4.3.3 *NDBI*

Analogamente, foi realizada a análise do índice espectral NDBI, com o objetivo de identificar áreas urbanizadas e superfícies construídas, visando avaliar a distribuição espacial dessas áreas para a implantação de telhados verdes. O NDBI é um índice amplamente utilizado para detectar áreas construídas, sendo eficaz na diferenciação entre superfícies urbanas e áreas naturais, conforme destacado por Zha et al. (2003).

A Figura 11 apresenta as cartas georreferenciadas de NDBI para os anos de 2019, 2020, 2021 e 2024. Os valores de NDBI variam de -0,7000 a 0,5000, representados por uma escala de cores que vai do vermelho escuro (valores negativos, indicando áreas não construídas, como vegetação ou corpos d'água) ao cinza escuro (valores positivos, indicando alta densidade de áreas construídas). De acordo com Zha et al. (2003), valores positivos de NDBI (acima de 0) indicam predominância de superfícies construídas, enquanto valores negativos (abaixo de 0) correspondem a áreas com vegetação ou água.

Figura 11 - Cartas georreferenciadas de NDBI.



Fonte: Autor (2025).

De acordo com a legenda, a coloração cinza escura (NDBI > 0,50) indica áreas com alta densidade de construções, predominantes na região norte e leste, enquanto tons intermediários de cinza claro (NDBI entre -0,10 e 0,20) representam áreas de transição, com menor densidade urbana. Os tons avermelhados (NDBI < -0,40) indicam áreas não construídas, como vegetação ou corpos d'água, mais evidentes nas extremidades oeste e central.

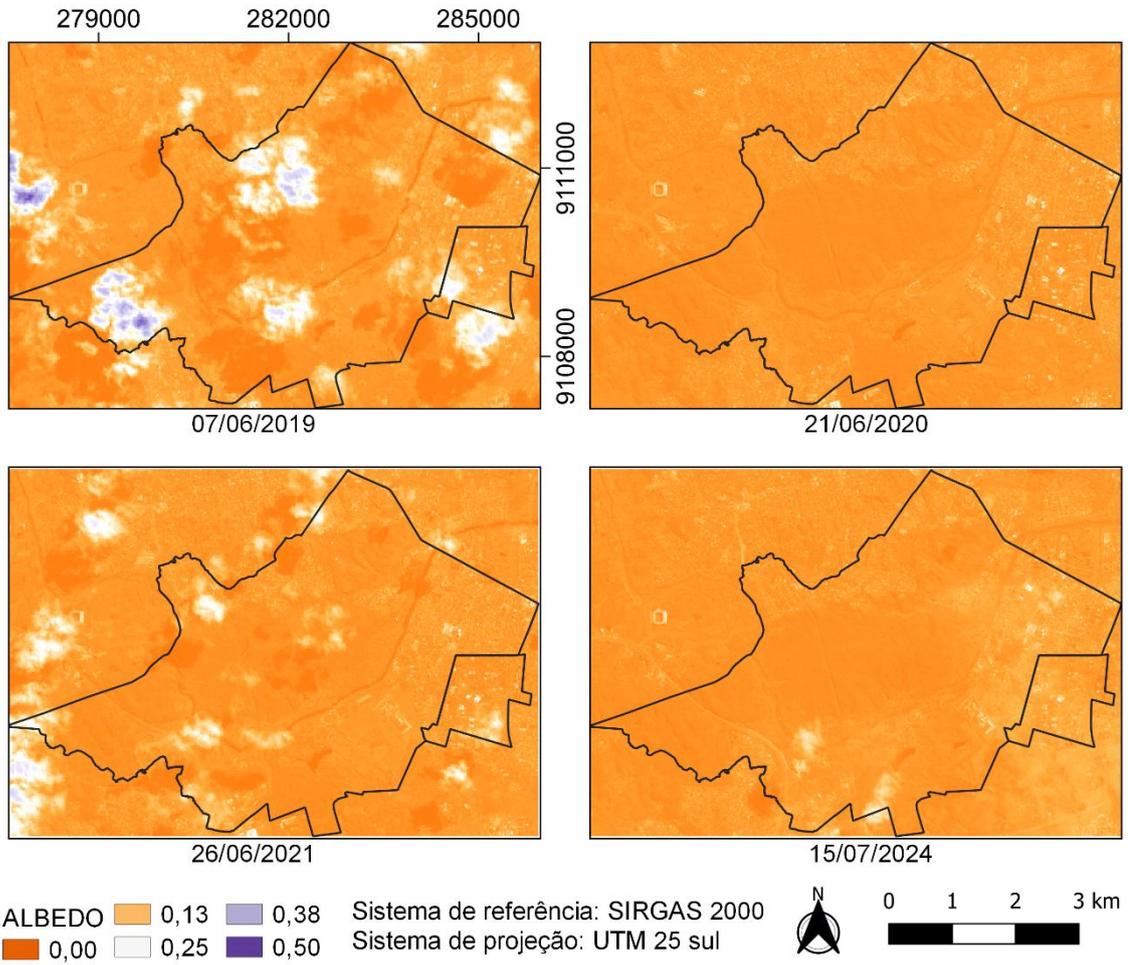
Os valores de NDBI variaram de -0,70 a 0,50, confirmando a predominância de áreas urbanizadas na região nordeste e a presença de áreas naturais no centro. As regiões mais ao norte e leste, com altos valores de NDBI, são prioritárias para a implantação de telhados verdes, pois essas áreas, por serem altamente impermeabilizadas, apresentam maior risco de escoamento superficial e ilhas de calor, conforme Liu et al. (2023).

4.3.4 Albedo de Superfície

Por fim, foram geradas e analisadas as imagens do albedo de superfície. Conforme ilustrado na Figura 12, observa-se uma predominância da coloração laranja em todos os anos analisados, indicando valores de albedo na faixa de 0,12 a 0,25, conforme o intervalo de classes explícito na legenda. Segundo Leite et al. (2020), essa predominância da coloração laranja reflete a baixa reflectância da superfície na região estudada, o que pode ser atribuído às características do tipo de cobertura do solo predominante na área, possivelmente composta por vegetação rala, solos expostos ou áreas agrícolas com baixa densidade de cobertura vegetal. Superfícies com essas características tendem a absorver mais radiação solar, especialmente nas bandas do visível (como vermelho e azul), e a refletir menos, resultando em valores de albedo relativamente baixos.

A consistência dos valores de albedo ao longo dos anos analisados sugere que não houve alterações significativas na cobertura do solo ou nas condições de uso da terra na região durante o período de estudo. No entanto, algumas pequenas variações podem ser observadas, as áreas com tonalidades mais claras (com valores entre 0,25 e 0,50) em 2019 e 2021, resultantes da interferência de nuvens, de acordo com Souza (2022). Em 2024, nota-se uma leve predominância de tons mais escuros (laranja mais intenso, próximo a 0,1250), indicando uma reflectância ainda menor, possivelmente associada a condições mais secas ou a uma redução na cobertura vegetal, fatores que diminuem o albedo.

Figura 12 - Cartas georreferenciadas do Albedo.



Fonte: Autor (2025).

5 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo contribuir para o desenvolvimento do uso de telhados verdes como estratégia eficiente de drenagem urbana e promoção de cidades mais sustentáveis e resilientes às mudanças climáticas. Os resultados obtidos permitiram alcançar os objetivos específicos propostos: (i) caracterizar o regime pluviométrico da cidade de Recife, (ii) analisar índices espectrais a partir de imagens de satélite e (iii) avaliar o desempenho térmico dos telhados verdes.

Os dados demonstraram que os telhados verdes apresentam vantagens significativas em comparação aos telhados convencionais. Em relação à gestão das águas pluviais, observou-se que os telhados verdes retardaram o início do escoamento superficial e reduziram o pico de vazão em 28,6%, comprovando sua eficácia na mitigação de inundações. Além disso, verificou-se que esses sistemas proporcionam maior estabilidade térmica, com menores amplitudes de temperatura, o que pode contribuir para a redução do consumo energético em edificações.

A análise dos índices espectrais (NDVI, NDWI, NDBI e albedo) identificou áreas prioritárias para a implantação de telhados verdes, especialmente em regiões com alta impermeabilização e baixa cobertura vegetal nos bairros da Várzea e Cidade Universitária. Esses locais, que enfrentam problemas como ilhas de calor e escoamento superficial intenso, seriam os mais beneficiados por essa solução.

Conclui-se, portanto, que os telhados verdes representam uma alternativa viável e eficaz para os desafios da drenagem urbana e do conforto térmico em cidades como Recife. Sua implementação, aliada a políticas públicas adequadas, pode promover ambientes urbanos mais sustentáveis e resilientes. Recomenda-se, para estudos futuros: (1) a realização de modelagens hidrológicas em escala urbana utilizando ferramentas como SWMM ou HEC-HMS para simular diferentes cenários de implementação; (2) a avaliação de diferentes configurações de telhados verdes para otimizar seu desempenho; e (3) estudos de viabilidade econômica para implantação em larga escala, considerando os benefícios ambientais e sociais dessa tecnologia.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. N. O. **Geotecnologia como ferramenta para delimitação de corpos hídricos no semiárido do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021. 72 f.

ALMEIDA, D. N. O.; SALGUEIRO, C. O. B.; CHAVES, J. V. B.; SANTOS, S. M.; OLIVEIRA, L. M. M. Spectral indices in the detection of water bodies using images from the MSI - Sentinel 2 sensor. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 125-135, 2021.

AMORIM, R. A questão urbana e as chuvas no Recife. *In*: CARVALHO, Elen. **Brasil de Fato Pernambuco**, [Recife, PE]: Brasil de Fato Pernambuco, 2022. Disponível em: <https://www.brasildefatope.com.br/2022/06/06/a-questao-urbana-e-as-chuvas-no-recife#>.

BACALHAU, J. R., RIBEIRO NETO, A., OLIVEIRA, L. M. M.. Aplicação de índice de vegetação no monitoramento da seca: açude Algodões no sertão pernambucano. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 2 (3): 283-293, 2017.
BESIR, A. B.; CUCE, E.. Green roofs and facades: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 82 (1): 915-939, 2018.

BEZERRA, U.A., OLIVEIRA, L.M.M., CANDEIAS, A.L.B., SILVA, B.B., LEITE, A.C.S., SILVA, L.T.M.S., 2018.b. Comparativo do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) entre os Sensores OLI - Satélite Landsat-8 e MSI – Satélite Sentinel-2 em Região Semiárida. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ** 41–3, 167-177.

BEZERRA, U.A.; OLIVEIRA, L.M.M.; LEITE, A.C.S.; SALGUEIRO, J.H.P.B.. Análise de índices de umidade no entorno do reservatório de Itaparica – PE. *In*: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 14, 2018, Maceió-AL. **Anais**. Maceió-AL, 2018.a.

CHEN, X. P. HUANG, P.; ZHOU, Z., X.; GAO, C.. A review of green roof performance towards management of roof runoff. **The journal of applied ecology**, v. 26, n. 8, p. 2581-2590, 2015.

DUTRA, J. B. M.; SILVA, T. F. G. Avaliação do desempenho de telhados verdes e reservatórios de lote no amortecimento de vazões de pico em uma bacia urbana. **Revista DAE**, n. 227, 2020. Disponível em: <https://www.revistadae.com.br/site/artigo/1923-Avaliacao-do-desempenho-de-telhados-verdes-e-reservatorios-de-lote-no-amortecimento-de-vazoes-de-pico-em-uma-bacia-urbana>.

ENGESAT. **Landsat 8 – Imagem de Satélite**. Curitiba-PR, 2013. Disponível em: <https://www.engesat.com.br/imagem-de-satelite/landsat-8/>. Acesso em: 15 mar. 2025.

ENGE SAT. **Sentinel-2 – Imagem de Satélite**. Curitiba-PR, 2015. Disponível em: <http://www.engesat.com.br/sentinel-2/>. Acesso em: 15 mar. de 2025.

FARIAS, M.O.; CANDEIAS, A.L.B.; OLIVEIRA, L.M.M.; ALMEIDA, D.N.O.; JUNIOR, J.R.T.. Variabilidade espaço-temporal da cobertura do solo por índices de vegetação e água no Agreste Pernambucano. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**. Recife, v. 7, n. 3, p. 091 – 099, 2017.

FRANCIS, L. F. M.; JENSEN, M. B.. Benefits of green roofs: A systematic review of the evidence for three ecosystem services. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 28, p. 167-176, 2017.

GAO, B. C. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.

GHOLIZADEH, A.; ŽIŽALAA, D.; SABERIOON, M.; BORŮVKA, L. Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging. **Remote Sensing of Environment**, [s.l.], v. 218, p. 89-103, Dec 2018. DOI. 10.1016/j.rse.2018.09.015.

GIACOMELLO, Elena; GASPARI, Jacopo. Hydrologic Performance of an Extensive Green Roof under Intense Rain Events: Results from a Rain-Chamber Simulation. **Sustainability**, v. 13, n. 6, p. 3078, 2021.

KREBS, L. F.. **Coberturas verdes extensivas: Análise da utilização em projetos na região metropolitana de Porto Alegre e Serra Gaúcha**. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 181 f., 2005.

LEITE, M. E.; SILVA, L. A. P.; VELOSO, G. A.; MAGALHÃES FILHO, R. D. Comportamento e influência do albedo e temperatura de superfície no balanço de radiação em áreas de Cerrado. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 21, n. 73, p. 131–147, 2020. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/47387>. Acesso em: 30 mar. 2025.

LEIVAS, J. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; MIRANDA, F.; TAKEMURA, C. M.; GARÇON, E. A. Imagens Sentinel para obtenção de parâmetros agrometeorológicos espectrais, em área de cultivo de coqueiro anão. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 18., 2019, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2019.

LEONARDO, H. R. A. L. (2021). **Desempenho de telhados ecológicos em área urbana**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. 147 pp.

LIU, W.; FENG, Q.; ENGEL, B.A.; ZHANG, X.; Cost-effectiveness analysis of extensive green roofs for urban stormwater control in response to future climate

change scenarios. **Science of the Total Environment**; ISSN: 00489697; DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159127; Volume 85615; January 2023.

LIU, Y., BRALTS, V. F., ENGEL, A. A.. Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model. **Science of the Total Environment** 511, 298–308, 2015.

MAGALHÃES, R. J. **Desempenho térmico de telhas: Um estudo comparativo entre telhas ecológicas e telhas de fibrocimento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, GO, 53 p., 2018.

MERCIER, A.; BETBEDER, J.; BAUDRY, J.; LE ROUX, V.; SPICHER, F.; LACOUX, J.; ROGER, D.; HUBERT-MOY, L. Evaluation of Sentinel-1 & 2 time series for predicting wheat and rapeseed phenological stages. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [s.l.], v. 163, p. 231-256, Mar 2020. DOI. 10.1016/j.isprsjprs.2020.03.009.

MISAKA, B. L. S. **Avaliação do conforto térmico entre os sistemas de telhado verde, ecológico e convencional**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, 87 p., 2021.

NEUPANE, B.; VU, T.M.; MISHRA, A.K.; Evaluation of land-use, climate change, and low-impact development practices on urban flooding. **Hydrological Sciences Journal**; 66:12, 1729-1742, DOI: 10.1080/02626667.2021.1954650; 2021.

PREFEITURA DO RECIFE. **Caracterização do território**. Disponível em: <https://www2.recife.pe.gov.br/pagina/caracterizacao-do-territorio>. Acesso em: 13 mar. 2025.

RECIFE. Lei nº 18.112, de 12 de janeiro de 2015: **Institui sobre a obrigatoriedade de instalação do “telhado verde”, e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais em novas edificações no Recife**. Disponível em: <http://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=280138>.

ROCHA, R. S. T. M. **Desempenho térmico de telhado verde ecológico de baixo custo em clima semiárido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, 134 p., 2020.

SCHMIDT, Matheus. **Influência da composição do substrato no desempenho térmico de telhados verdes**. 2020. 49 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel - PR.

SCRENSKI, A. J. **Viabilidade do telhado verde como instrumento de redução de emissões de carbono**. 2015. 32 f. Tese (Doutorado) - Curso de Curso de Especialização em Projetos Sustentáveis, Mudanças Climáticas e Gestão Corporativa de Carbono, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2015.

SILVA JUNIOR, M.; CABRAL, J.; NETO, G.; SILVA, P.; GUERRA, C.; SILVA, S. Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, p. 302-318, 2020. DOI: 10.24221/jeap.5.3.2020.3025.

SILVA JUNIOR, M.A.B.; SILVA, S.R. Impactos da urbanização e das alterações climáticas no sistema de drenagem do Recife/PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n. 06, 2016.

SILVA, C. M.; GOMES, M. G.; SILVA, M.. Green roofs energy performance in Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 116, p. 318–325, 2016. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.01.012

SOUZA, A. M. de. **Análise do albedo em áreas de caatinga preservada e substituída por pastagem**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/48266>. Acesso em: 30 mar. 2025.

SUSCA, T. Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. **Building and Environment**, v. 162, p. 106273, 2019.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; HERNANDEZ, F.B.T.; ANDRADE, R.G. ; LEIVAS, J.F. ; BOLFE, E. L. **Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil**. Proceedings of SPIE - International Society for Optical Engineering, v. 9239, p. 923900-1-923900-10, 2014a.

TESTA, S.; SOUDANI, K.; BOSCHETTI, L.; MONDINO, B. E. MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**, [s.l.], v. 64, n.1 p.132-144, Aug 2018. DOI.10.1016/j.jag.2017.08.006.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).

URBONAS, B.. Assessment of storm water BMPs and their technology. **Water Science Technololy**, 29 (1–2), 347–353, 1994.

USEPA - US Environmental Protection Agency. **Reducing Stormwater Costs through Low Impact Development (LID) Strategies and Practices**. EPA 841-F-07-006. Nonpoint Source Control Branch, Washington, D.C., 2008.

VAEZA, R. F., FILHO, P. C. O., GONÇALVES, A., DISPERATI, A. A.. Uso e ocupação do solo em bacia hidrográfica urbana a partir de imagens orbitais de alta resolução. **Floresta e Ambiente** 12 (1): 23-29, 2010.

VANINO, S.; NINO, P.; DE MICHELE, C.; BOLOGNESI, S. F.; D'URSO, G.; DI BENEDETTO, C.; PENNELLI, B.; VUOLO, F.; FARINA, R.; PULIGHE, G.; NAPOLI,

R. Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106435, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106435>.

VILARIM, M. B. **Desempenho térmico de telhado verde de baixo custo em região de clima tropical úmido**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

YANG, S.; BAI, J.; ZHAO, C.; LOU, H.; ZHANG, C.; GUAN, Y.; ZHANG, Y.; WANG, Z.; YU, X. The assessment of the changes of biomass and riparian buffer width in the terminal reservoir under the impact of the South-to-North water diversion project in China. **Ecological Indicators**, Coimbra, v. 85, n.1, p.932–943, Feb 2018. DOI. 10.1016/j.ecolind.2017.11.011.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 3, p. 583–594, 2003. DOI: 10.1080/01431160304987. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160304987>. Acesso em: 13 mar. 2025.

ZHANG, J.; LI, S.; DONG, R.; JIANG, C.; NI, M. Influences of land use metrics at multi-spatial scales on seasonal water quality: A case study of river systems in the Three Gorges Reservoir Area, China. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v.206, n.1, p.76–85, Jan 2019. DOI. 10.1016/j.jclepro.2018.09.179.