



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BACHARELADO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

DANIEL PIRANGI DA SILVA ALVES

**APLICAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO NA IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS
VULNERÁVEIS DE ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES EM AMBIENTES
URBANOS: UM ESTUDO DE CASO EM CAMPINA GRANDE-PB**

**CAMPINA GRANDE
2024**

DANIEL PIRANGI DA SILVA ALVES

**APLICAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO NA IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS
VULNERÁVEIS DE ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES EM AMBIENTES
URBANOS: UM ESTUDO DE CASO EM CAMPINA GRANDE-PB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Sanitária e
Ambiental da Universidade Estadual da
Paraíba, como requisito parcial à obtenção do
título de Graduado em Engenharia Sanitária e
Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. João Damasceno.

**CAMPINA GRANDE
2024**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

A474a Alves, Daniel Pirangi da Silva.

Aplicação do geoprocessamento na identificação de pontos vulneráveis de alagamentos e inundações em ambientes urbanos [manuscrito] : um estudo de caso em Campina Grande-PB / Daniel Pirangi da Silva Alves. - 2024.

40 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia sanitária e ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

"Orientação : Prof. Dr. Joao Damasceno, Departamento de Geografia - CEDUC".

1. Geoprocessamento. 2. Alagamentos Urbanos. 3. Planejamento Urbano Sustentável. I. Título

21. ed. CDD 628

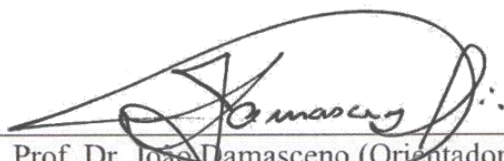
DANIEL PIRANGI DA SILVA ALVES

APLICAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO NA IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS
VULNERÁVEIS DE ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES EM AMBIENTES URBANOS:
UM ESTUDO DE CASO EM CAMPINA GRANDE-PB

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada
ao Departamento de Engenharia Sanitária e
Ambiental da Universidade Estadual da
Paraíba, como requisito parcial à obtenção do
título de Graduado em Engenharia Sanitária e
Ambiental.

Aprovada em: 14/11/2024.

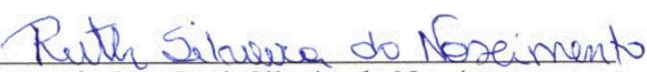
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. João Damasceno (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dra. Maria José de Sousa Cordão
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dra. Ruth Silveira do Nascimento
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

À minha esposa e minha filha, que são meu combustível para nunca desistir e estão sempre ao meu lado, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Elizandra, pela dedicação e companheirismo ao longo destes 10 anos, sendo mais que um cônjuge, mas uma verdadeira amiga e parceira para todos os momentos. Sua presença é sinônimo de amor, carinho, alegria e amizade, e sua força tem sido minha fortaleza. Desde o início desta jornada, estive ao meu lado, incentivando-me, acreditando em mim e vibrando a cada conquista.

À minha filha Helena, por ser luz na minha vida e, que, embora tão pequena, me dá força e me faz feliz até por um simples sorriso. Nela vejo esperança, amor, carinho e paz. Ela me proporciona o melhor cargo da vida, o de pai. Minha pequena grande amiga.

À toda minha família. Em especial para minha mãe, que sempre lutou por mim, me deu educação e me ensinou o valor do respeito. O homem que sou hoje é reflexo de seus ensinamentos e do seu exemplo de vida. Sempre torceu por cada conquista minha e sei que, neste momento, sente orgulho por mais essa realização.

Ao meu amigo Richard, pela amizade, apoio e por todos os momentos de alegria. Um grande parceiro que enfrentou comigo cada etapa da graduação, meu companheiro em todos os trabalhos. Foram inúmeras noites em claro estudando para provas e finalizando projetos, sempre acompanhadas de muitas risadas. Um irmão que conquistei durante essa jornada e que, sem dúvida, levarei para a vida toda.

Aos amigos que conquistei durante a graduação, especialmente, Alessandra Ferreira, Marcos Vinicius, Mikael Silva, Mylenna Souza, Pedro Matheus e Silene Fernandes, pela amizade e pelos momentos alegres que jamais esquecerei. Mesmo que o caminho da graduação tenha sido árduo e nos tenha separado em alguns momentos, sempre serão meus grandes amigos.

Ao professor João Damasceno, por todos os ensinamentos, apoio e dedicação. Durante este período em que estivemos juntos nessa jornada, sempre acreditou no meu trabalho e me ajudou a enxergar minhas próprias capacidades, mesmo quando tive dificuldade em vê-las. Além de tudo, tem sido um grande amigo, alguém que quero levar comigo para a vida toda, e poder compartilhar mais conquistas como esta.

Aos professores do curso, por todos os ensinamentos que contribuíram para minha formação e ajudaram na construção de um profissional. Agradeço especialmente àqueles que, nas horas difíceis, ofereceram palavras de apoio e me incentivaram a seguir em frente.

A toda a família UEPB, que me acolheu e contribuiu de inúmeras formas para minha trajetória como aluno e profissional.

RESUMO

O crescimento urbano desordenado intensifica os problemas de drenagem e alagamentos em cidades brasileiras, especialmente em regiões vulneráveis com infraestrutura inadequada. Este estudo utiliza técnicas de geoprocessamento e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para mapear áreas de risco de alagamento em Campina Grande-PB, uma cidade que enfrenta desafios frequentes devido à sua configuração geográfica e expansão urbana descontrolada. A metodologia combina análise da drenagem com densidade kernel para identificar áreas críticas, modelos digitais de elevação para avaliar o relevo e estudos sobre uso do solo e Áreas de Preservação Permanente (APPs). A pesquisa destaca que a ocupação irregular e a impermeabilização do solo aumentam o escoamento superficial, agravando eventos de alagamento. Os resultados reforçam a importância de políticas públicas voltadas à preservação das APPs e à promoção de infraestrutura verde, como forma de mitigar os impactos das chuvas e melhorar a drenagem urbana. Além disso, o SIG demonstrou ser uma ferramenta essencial para o planejamento urbano, permitindo a identificação de áreas vulneráveis, a projeção de cenários futuros e a criação de estratégias de mitigação. Assim, o estudo concluiu que o uso de técnicas de análise espacial aplicadas ao SIG tem o potencial de transformar a maneira como o planejamento urbano é conduzido, proporcionando uma abordagem mais abrangente e fundamentada na análise de dados para tornar as cidades mais resilientes e adaptadas às condições climáticas adversas.

Palavras-chave: geoprocessamento; alagamentos urbanos; planejamento urbano sustentável.

ABSTRACT

Unplanned urban growth intensifies drainage and flooding problems in Brazilian cities, especially in vulnerable areas with inadequate infrastructure. This study employs geoprocessing techniques and Geographic Information Systems (GIS) to map flood risk areas in Campina Grande-PB, a city facing frequent challenges due to its geographic configuration and uncontrolled urban expansion. The methodology combines drainage analysis with kernel density estimation to identify critical areas, digital elevation models to assess topography, and studies on land use and Permanent Preservation Areas (PPAs). The research highlights that irregular occupation and soil impermeabilization increase surface runoff, worsening flood events. The results emphasize the importance of public policies aimed at preserving PPAs and promoting green infrastructure as a means to mitigate rainfall impacts and improve urban drainage. Furthermore, GIS has proven to be an essential tool for urban planning, enabling the identification of vulnerable areas, the projection of future scenarios, and the development of mitigation strategies. The study concludes that spatial analysis techniques integrated into GIS have the potential to transform urban planning, offering a more comprehensive and data-driven approach to make cities more resilient and better adapted to adverse climatic conditions.

Keywords: geoprocessing; urban flooding; sustainable urban planning.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo Geral.....	10
2.2	Objetivos Específicos.....	10
3	REFERENCIAL TEÓRICO	11
3.1	Alagamentos e Inundações.....	11
3.2	Crescimento Urbano.....	11
3.3	A Importância do Geoprocessamento na Identificação de Áreas Suscetíveis a Inundações.....	12
3.4	Áreas de preservação permanente	12
4	MATERIAIS E METODOS	14
4.1	Caracterização Da Área De Estudo	14
4.2	Precipitação em Campina Grande	14
4.3	Bacias Hidrográficas	15
4.4	Altimetria	17
4.5	Relevo.....	18
4.6	Uso e ocupação do solo	19
4.7	Pontos de alagamentos e inundações frequentes no perímetro urbano.....	20
4.8	Técnicas utilizadas	22
4.8.1	<i>Importação de Dados</i>	<i>23</i>
4.8.2	<i>Aquisição de Imagens de Satélite</i>	<i>24</i>
4.8.3	<i>Reprojeção da Imagem.....</i>	<i>24</i>
4.8.4	<i>Correção do Modelo Digital de Elevação.....</i>	<i>24</i>
4.8.5	<i>Extração de Drenagem.....</i>	<i>25</i>
4.8.6	<i>Análise Espaciais Avançadas</i>	<i>25</i>
4.8.7	<i>Mapeamento Kernel</i>	<i>26</i>
4.8.8	<i>Áreas de Preservação Permanente (APP).....</i>	<i>26</i>
5	RESULTADOS E DISCURSSÃO.....	28
5.1	Extração da Drenagem.....	28
5.2	Análise de Densidade Kernel	30
5.3	Validação dos dados	32
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	34
	REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

Inundações e alagamentos urbanos são problemas recorrentes em cidades brasileiras, caracterizados por sua complexidade e magnitude de impactos sociais, econômicos e ambientais. Esses eventos são frequentemente desencadeados pela combinação de fenômenos climáticos extremos e intervenções humanas, como a ocupação desordenada do solo, a impermeabilização de áreas urbanas e a ausência de planejamento urbano adequado. Tominaga *et al.* (2009) apontam que o rápido processo de urbanização observado nas últimas décadas, especialmente no Brasil, levou ao crescimento das cidades em áreas inadequadas à ocupação, ampliando os riscos de desastres naturais e expondo populações vulneráveis a condições de risco. Tucci (2008, p. 99) ressalta que, "os municípios não possuem estrutura para o planejamento e gerenciamento adequado dos diferentes aspectos da água no meio urbano".

O agravamento desses fenômenos está intimamente relacionado às mudanças climáticas globais, que têm intensificado a frequência e a intensidade de chuvas torrenciais, além de alterar padrões hidrológicos. Eventos como o aumento do nível de precipitação em curtos períodos potencializam a sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana, contribuindo para alagamentos frequentes em áreas densamente povoadas. Essa problemática é amplificada pela urbanização desordenada, que promove a expansão de áreas impermeabilizadas e reduz a capacidade de infiltração do solo, resultando em maiores volumes de escoamento superficial e tempos de resposta hidrológica mais rápidos (Marciano *et al.*, 2024).

Campina Grande, localizada no estado da Paraíba, exemplifica bem essa situação, enfrentando historicamente episódios de inundações em áreas de rios canalizados e alagamentos recorrentes em regiões urbanas. Um caso emblemático ocorre no cruzamento da Avenida Jornalista Assis Chateaubriand com a Avenida Professor Almeida Barreto, área frequentemente impactada pelas limitações da infraestrutura de drenagem. Esses cenários destacam a necessidade urgente de intervenções que priorizem o planejamento urbano sustentável e a mitigação de riscos.

Nesse contexto, o uso de tecnologias avançadas, como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), emerge como uma ferramenta essencial para a identificação e análise das áreas mais suscetíveis a inundações. Os SIG permitem integrar informações de natureza espacial e realizar análises complexas por meio da sobreposição de dados topográficos, hidrológicos e de uso do solo, fornecendo subsídios fundamentais para a tomada de decisões. Estudos destacam a eficácia do SIG na visualização e modelagem de áreas críticas,

contribuindo para a formulação de políticas públicas que combinem ocupação racional do solo e preservação ambiental (Carvalho *et al.*, 2007; Sodré *et al.*, 2020).

A presente pesquisa tem como objetivo mapear e analisar áreas vulneráveis a alagamentos em Campina Grande, utilizando técnicas de geoprocessamento e ferramentas SIG. Por meio da análise espacial, busca-se compreender como variáveis como declividade, proximidade de corpos d'água e cobertura do solo influenciam na ocorrência de inundações. Além disso, o estudo considera as Áreas de Preservação Permanente (APPs) como elementos fundamentais para a mitigação de impactos ambientais e a prevenção de riscos.

A relevância deste trabalho reside na contribuição para o planejamento urbano mais resiliente e embasado em dados técnicos, viabilizando a adoção de medidas preventivas e sustentáveis que minimizem os efeitos das inundações. A integração de tecnologias SIG ao processo de gestão territorial destaca-se como uma estratégia indispensável para enfrentar os desafios impostos pela urbanização desordenada e pelas mudanças climáticas nas cidades brasileiras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Identificar e mapear zonas urbanas mais propensas a eventos de alagamento e inundação.

2.2 Objetivos Específicos

- Levantar e organizar dados geoespaciais e ambientais pertinentes para a identificação de áreas vulneráveis a alagamentos e inundações no perímetro urbano de Campina Grande-PB;
- Aplicar técnicas de geoprocessamento e ferramentas de SIG (Sistemas de Informações Geográficas) para realizar a análise espacial e o mapeamento de áreas de risco, contribuindo para a construção de uma base de dados voltada a estudos futuros; e
- Validar os resultados obtidos por meio da análise das Áreas de Preservação Permanente (APPs) e sua relação com eventos recorrentes de alagamentos e inundações registrados na região).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo das áreas vulneráveis a inundações e alagamentos é essencial, dada a crescente urbanização e as mudanças climáticas que impactam a gestão de recursos hídricos nas cidades. O objetivo do referencial teórico é fornecer uma base sólida que fundamenta a pesquisa, apresentando conceitos, teorias e estudos anteriores que contribuem para a compreensão do problema em questão.

3.1 Crescimento Urbano

O acelerado crescimento urbano, especialmente a partir da segunda metade do século XX, impulsionou uma concentração elevada da população em áreas cada vez mais limitadas, o que gerou uma intensa competição pelos recursos naturais, como solo e água (Tucci, 2008). Esse processo de urbanização rápida não só promoveu a exploração desses recursos, mas também ocasionou uma significativa perda da biodiversidade local, comprometendo ecossistemas naturais e sua capacidade de suportar a expansão das cidades.

A expansão urbana intensa tem promovido o aumento significativo da impermeabilização dos solos, o que modifica as condições naturais do ciclo hidrológico e eleva o volume de escoamento superficial, favorecendo, assim, a ocorrência de alagamentos e inundações (Garcia e Alixandrini Júnior, 2022). Essas mudanças no ambiente urbano intensificam a vulnerabilidade de áreas que antes não eram suscetíveis a esses fenômenos.

3.2 Alagamentos e Inundações

Para Tucci (2007), alagamento é caracterizado pelo acúmulo temporário de água em vias urbanas devido à incapacidade do sistema de drenagem de escoar o volume precipitado, enquanto a inundação ocorre pelo transbordamento de rios e canais, afetando áreas adjacentes como várzeas e planícies. Essa diferenciação é essencial para entender os impactos distintos e definir estratégias de prevenção adequadas a cada tipo de evento.

Os eventos de chuvas em excesso podem alterar o escoamento das águas superficiais, resultando em alagamentos e outros desastres associados, o que demonstra a importância de monitorar e gerenciar adequadamente esses fenômenos para minimizar seus impactos negativos (Duarte *et al.*, 2021). Os autores destacam ainda, que essa relação entre o aumento das chuvas e os problemas de escoamento destaca a necessidade de um planejamento urbano mais eficaz e a implementação de infraestrutura adequada para mitigar os riscos.

Garcia e Alixandrini Júnior (2022), afirmam que as inundações em áreas urbanas geralmente ocorrem quando os eventos de precipitação superam a capacidade dos sistemas de drenagem, o que reflete em um problema crescente em áreas urbanizadas onde a infraestrutura não comporta o volume excessivo de água proveniente das chuvas intensas.

3.3 A Importância do Geoprocessamento na Identificação de Áreas Suscetíveis a Inundações

De acordo com o DPI/INPE (2006), um Sistema de Informações Geográficas (SIG) é um sistema projetado para processar dados gráficos e alfanuméricos, com foco em análises espaciais e modelagem de superfícies. Já o geoprocessamento é definido como um conjunto de tecnologias destinadas à coleta e ao tratamento de informações espaciais com um objetivo específico. Essas atividades são realizadas por sistemas específicos, comumente denominados SIG.

O uso do geoprocessamento e a produção de mapas são fundamentais para a análise espacial de áreas suscetíveis a alagamentos, pois proporcionam uma visualização clara dos locais mais vulneráveis e das possíveis rotas de evacuação. Nesse contexto, Marciano *et al.* (2024) afirmam que a elaboração de mapas de áreas inundáveis é uma medida não estrutural que integra técnicas de planejamento urbano, utilizando ferramentas do SIG para obtenção de informações essenciais para a tomada de decisão.

De acordo com Palácio *et. al.* (2021), a análise de susceptibilidade a alagamentos em regiões por meio do uso de SIG constitui um conjunto de técnicas relevante para o poder público, pois oferece suporte ao processo de planejamento urbano, especialmente no que diz respeito ao zoneamento, à delimitação de áreas de risco e à alocação de recursos para ações preventivas e corretivas. Esse tipo de análise permite que as gestões públicas antecipem intervenções em áreas mais vulneráveis, promovendo o desenvolvimento de políticas mais eficazes na redução de desastres naturais e na preservação de áreas suscetíveis a inundações, otimizando o uso dos recursos disponíveis.

3.4 Áreas de preservação permanente

As Áreas de Preservação Permanente (APP), conforme definido na legislação brasileira, são essenciais para a proteção ambiental, mesmo em áreas urbanas. A Lei nº 12.727/2012 estabelece as seguintes faixas marginais ao longo de cursos d'água:

- Rios com largura de até 10m: faixa de proteção de 30m em cada margem.

- Rios com largura entre 10 e 50m: faixa de proteção de 50 metros em cada margem.
- Rios com largura entre 50 e 200 metros: faixa de proteção de 100m em cada margem.
- Rios com largura entre 200 e 600m: faixa de proteção de 200m em cada margem.
- Rios com largura superior a 600m: faixa de proteção de 500m em cada margem.

O processo de urbanização ocorrido no Brasil ao longo do século XX, combinado com o advento do transporte motorizado, as políticas de incentivo ao aterramento de várzeas e áreas alagadas e a crescente implantação de superfícies impermeáveis, como o asfalto, em prol do uso do automóvel, resultou em uma considerável impermeabilização do solo (Ackermann e Samora, 2020). Esses fatores aumentaram a vulnerabilidade a eventos hidrológicos extremos, o que reforça a importância das Áreas de Preservação Permanente (APPs) em zonas urbanas como medida essencial para o manejo sustentável das águas e para a resiliência urbana em face das inundações.

Portanto, considerar as APP é fundamental para compreender o impacto da urbanização nas inundações. Alguns trabalhos mostram o impacto das APP em meio urbano (Maia, 2022; Scottá, et al., 2024) e ressaltam o uso das geotecnologias como ferramentas auxiliares no processo para identificá-las.

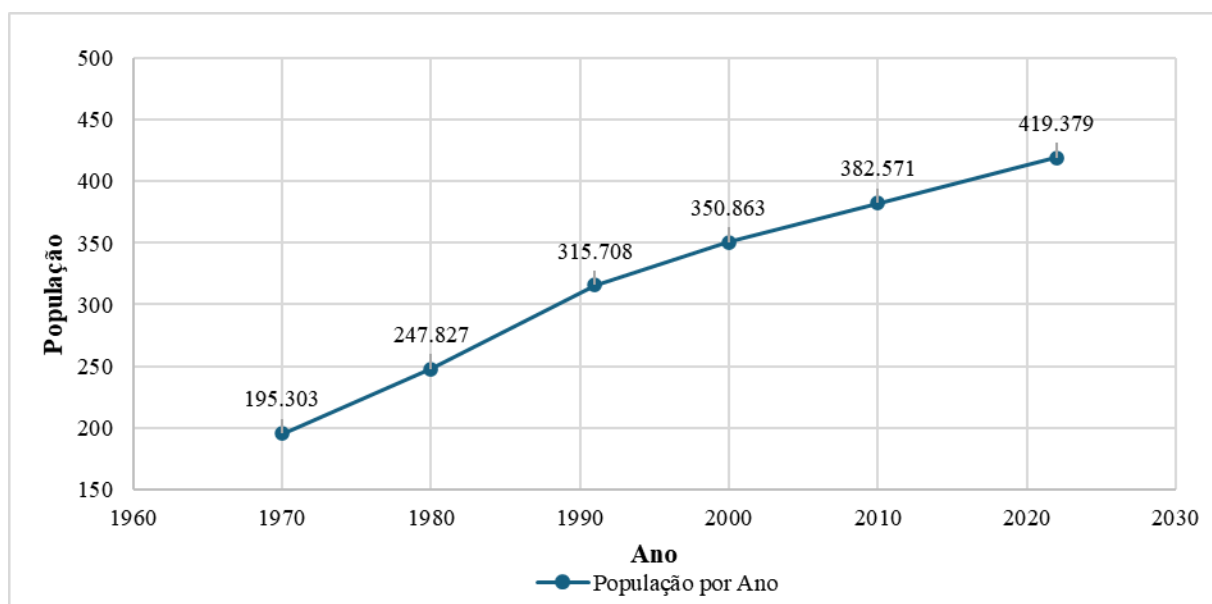
4. MATERIAIS E METODOS

4.1 Caracterização da Área de Estudo

O município de Campina Grande possui uma área de 591,658 km² e está localizado no interior do estado da Paraíba, nordeste brasileiro. A cidade encontra-se a aproximadamente 120 km da capital, João Pessoa. As suas coordenadas geográficas são: latitude 7°13'19.20"S e longitude 35°53'20.40"O.

Segundo o IBGE, em 2022, a população de Campina Grande era de 419.379 habitantes com densidade demográfica de 708,82 habitantes por quilômetro quadrado. A cidade é a segunda maior da Paraíba e a maior do interior do estado, ocupando o 55º lugar no ranking populacional do país. Seu crescimento foi de 36.808 habitantes desde o último censo demográfico em 2010, com uma média de crescimento de 13,95% a cada censo (Figura 1)

Figura 1 – Gráfico de Crescimento Populacional



Fonte: Adaptado IBGE - Censo Demográfico (1970 a 2023)

O crescimento populacional intensifica os problemas da urbanização desordenada. Milton (1993) afirma que esse processo no Brasil gera segregação socioespacial, deslocando as populações de baixa renda para áreas de risco sem infraestrutura, perpetuando pobreza e vulnerabilidade. Dados do IBGE (2010) confirmam que 2.721 pessoas viviam em áreas sujeitas a inundações, enxurradas e deslizamentos, evidenciando a desigualdade socioespacial e seus impactos negativos sobre essas comunidades.

4.2 Precipitação em Campina Grande

A análise da precipitação é fundamental para estudar inundações e alagamentos, pois está diretamente relacionada ao escoamento superficial. Bertoni e Tucci (1993, p. 177) destacam que “a determinação da intensidade da precipitação é importante para o controle de inundações e a erosão do solo. Por sua capacidade de produzir escoamento, a chuva é o tipo de precipitação mais relevante para a hidrologia”.

Em Campina Grande, a precipitação ao longo do ano apresenta variações significativas, com um padrão climático característico da região semiárida. Apesar de existir uma concentração de chuvas nos meses de junho a outubro, conforme dados da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA) para o período de 2019 a 2023 (Tabela 1), as mudanças climáticas têm alterado esse comportamento. Chuvas mais intensas e de curta duração vêm se tornando cada vez mais frequentes, superando a capacidade de escoamento dos sistemas de drenagem projetados para um padrão pluviométrico mais estável. Isso evidencia a necessidade de revisões nos planejamentos urbanos para mitigar os impactos das inundações e alagamentos provocados por essa nova dinâmica.

Tabela 1 - Precipitação em milímetros por mês (mm/mês) no município

Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Anual
2019	26.6	59.3	127.2	70.2	58.7	96.7	150	40.5	37.4	29.9	0.2	1	697.7
2020	66.9	101.1	257.8	110.3	50	98	129.8	25.9	21.8	4	25.2	25.1	915.9
2021	5.7	28.3	213.9	66	134.8	35.3	64.2	32.3	5.9	8.4	3.6	136.9	735.3
2022	71.6	18	141.4	97.7	263.7	151.8	131	60	18.3	10.8	50.7	111.5	1126.5
2023	49.7	133.1	110.3	51.8	102.1	181.5	56.2	43.2	38.2	5.1	92	37.3	900.5
Média	44.1	67.96	170.12	79.2	121.86	112.66	106.24	40.38	24.32	11.64	34.34	62.36	875.18

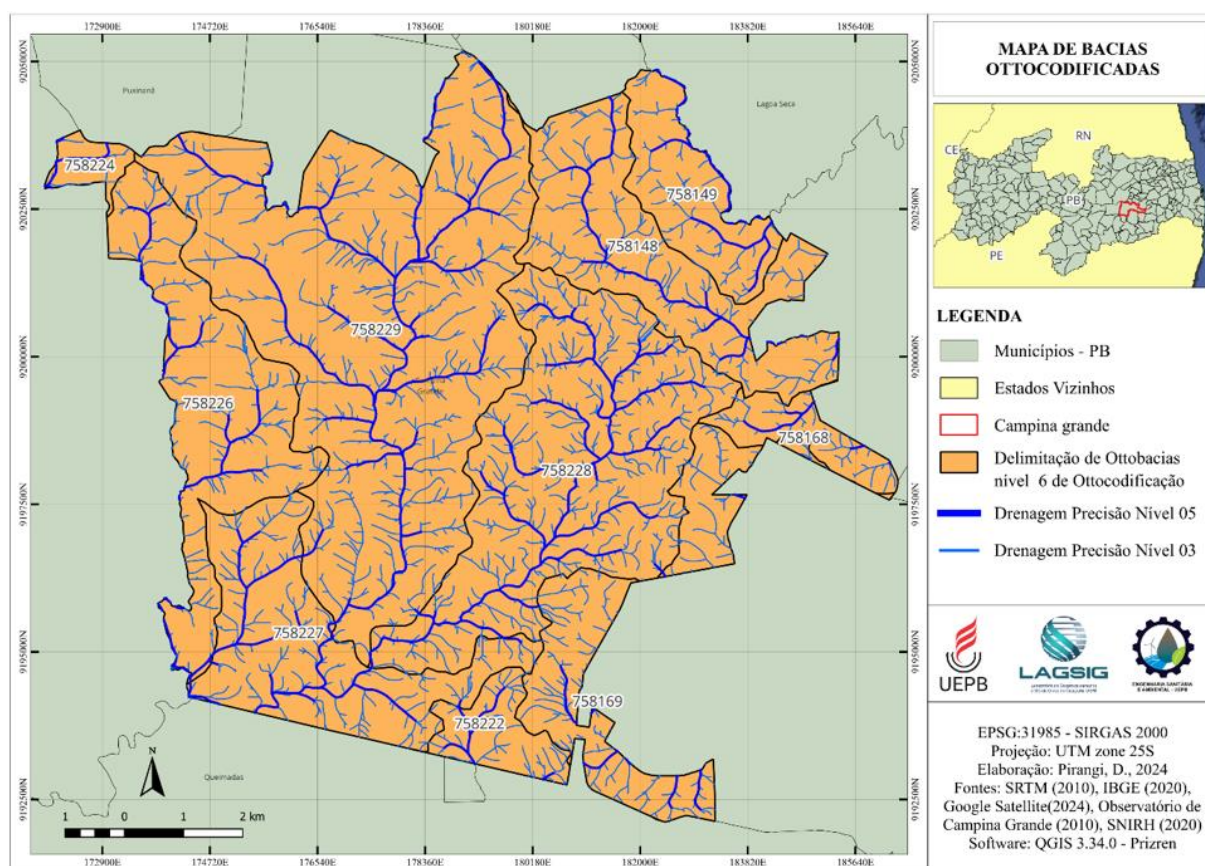
Fonte: Adaptado AESA, Meteorologia – Chuvas (2019 a 2023)

Nos meses de março, maio, junho e julho, ocorrem os maiores índices pluviométricos, enquanto de setembro a novembro os índices são menores. De acordo com o "*Relatório Anual sobre a Situação dos Recursos Hídricos no Estado da Paraíba*" (AESA, 2009), as chuvas no semiárido paraibano se intensificam a partir de fevereiro, devido à influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que regula o regime de precipitação.

4.3 Bacias Hidrográficas

Campina Grande está localizada na bacia hidrográfica do Rio Paraíba, cuja capilaridade é modelada por bacias fluviais formadas pelo rio principal e seus afluentes. Esses cursos d'água, como rios, riachos e córregos, são fundamentais para a drenagem da bacia. Para delimitar as bacias dentro do perímetro urbano, foi aplicado o método de codificação *Pfaffstetter*, adotado pela ANA, é uma técnica padronizada para identificar e hierarquizar bacias hidrográficas. Ele organiza a rede de drenagem utilizando números pares e ímpares para diferenciar sub-bacias em relação ao rio principal, com subdivisões que permitem detalhamento em diferentes escalas. No Brasil, a ANA adaptou o método para facilitar o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, sendo amplamente utilizado em análises hidrológicas e estudos ambientais. No presente trabalho, a codificação foi essencial para identificar as bacias e estruturar a análise da rede de drenagem da área de estudo (Figura 2).

Figura 2 – Bacias hidrográficas com nível de ottocodificação 6 pelo método *Pfaffstetter*



Fonte: elaborado pelo autor, 2024

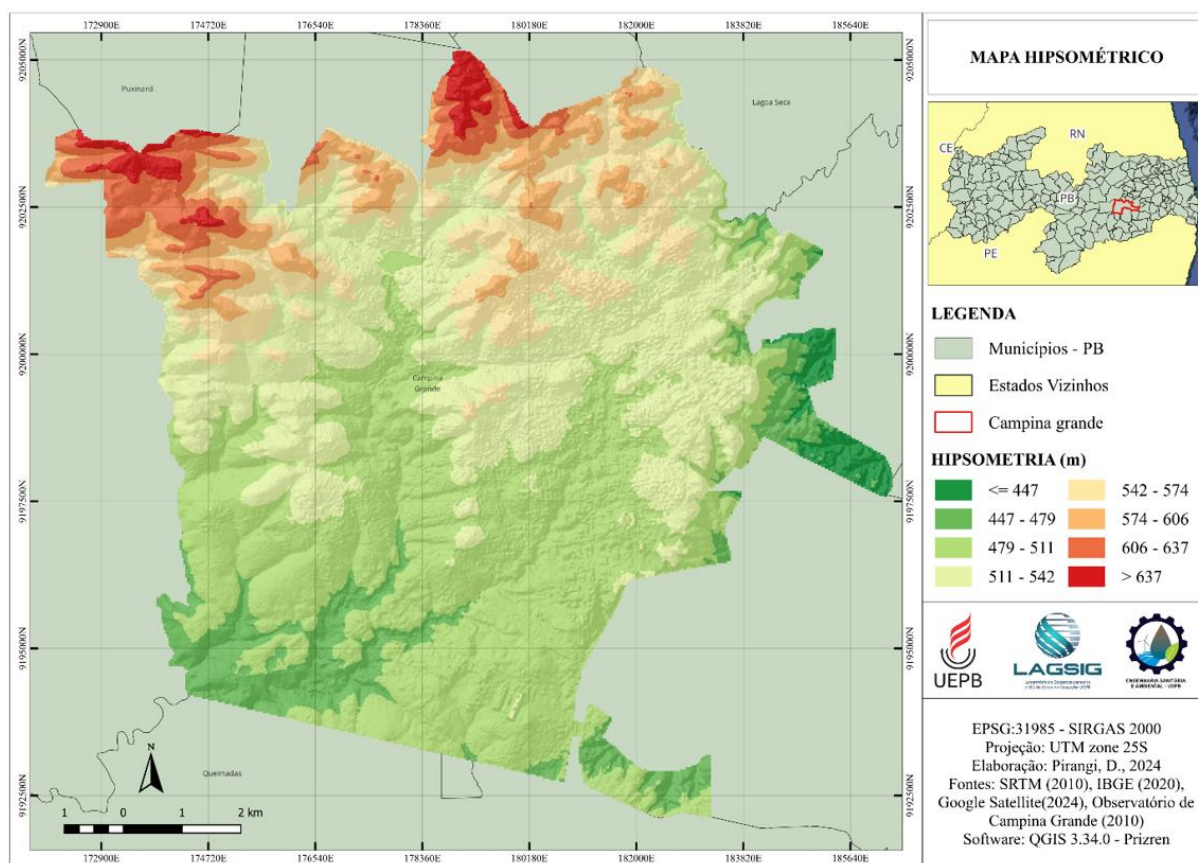
As ottobacias de nível 6, delimitadas pelo método *Pfaffstetter*, correspondem a subdivisões detalhadas das bacias hidrográficas, permitindo identificar unidades menores de drenagem dentro de uma rede hierárquica. Esse nível de detalhamento é fundamental para estudos locais, como a análise de áreas urbanas vulneráveis, oferecendo maior precisão na

identificação de microbacias e seus impactos na dinâmica hídrica. Em Campina Grande, a aplicação do nível 6 auxilia na avaliação das bacias urbanas e na compreensão dos padrões de drenagem, contribuindo para a identificação de áreas críticas sujeitas a alagamentos.

4.4 Altimetria

A cidade de Campina Grande apresenta uma variação altimétrica considerável dentro de sua área urbana, com altitudes que vão de 447 a 637 metros (Figura 3). Essa diferença de elevação influencia diretamente o comportamento do escoamento superficial e a dinâmica da drenagem, que, quando associados ao crescimento urbano e à impermeabilização do solo, tornam-se fatores agravantes para os alagamentos e inundações. Ao analisar o mapa podemos observar que as áreas mais elevadas tendem a concentrar maior fluxo de água em relação às regiões mais baixas, onde frequentemente ocorrem pontos de acúmulo de água, especialmente em períodos de alta precipitação.

Figura 3 – Hipsometria dentro do perímetro urbano de Campina Grande



Fonte: elaborado pelo autor, 2024

A altimetria da cidade revela um desafio adicional, pois as áreas de baixa altitude tornam-se vulneráveis a alagamentos quando há um grande volume de precipitação. A

interação entre a variação altimétrica e o crescimento urbano desordenado agrava os riscos, exigindo um planejamento mais eficiente da drenagem e controle do uso do solo.

4.5 Relevo

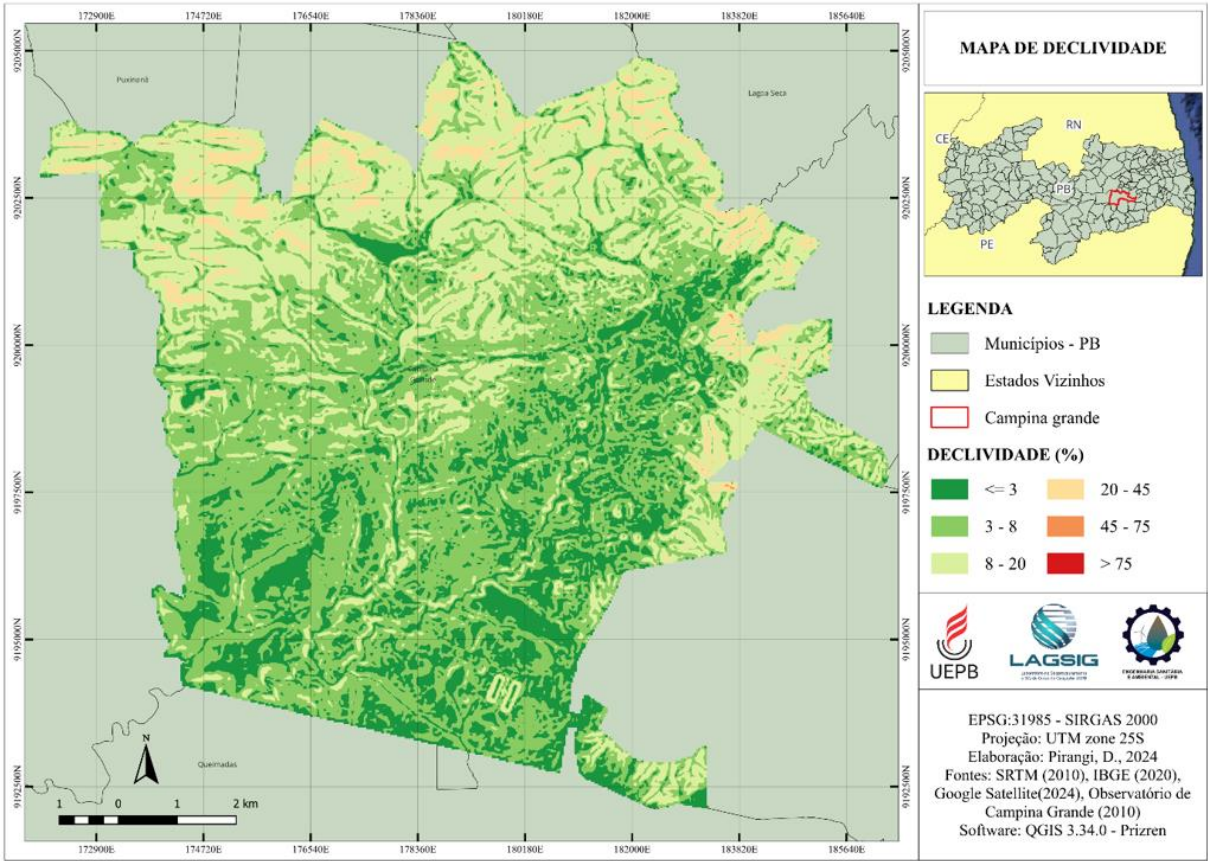
A classificação do relevo pela EMBRAPA (1999), baseada na declividade (Quadro 1), juntamente com o mapa de declividade urbana (Figura 4), indica que a área urbana de Campina Grande está situada em um relevo ondulado, característico do Agreste paraibano. Esse relevo, composto por colinas e vales, influencia a dinâmica de drenagem, formando microbacias e áreas de declives acentuados, o que pode acelerar o escoamento das águas pluviais e, em alguns casos, aumentar o risco de alagamentos e inundações.

Quadro 1 - Classes de relevo de acordo com a declividade

Declividade (%)	Relevo
0 – 3	Plano
3 – 8	Suave-ondulado
8 – 20	Ondulado
20 – 45	Forte-ondulado
45 – 75	Montanhoso
>75	Escarpo

Fonte: Adaptado EMBRAPA, 1999

Figura 4 – Declividade dentro do perímetro urbano de Campina Grande



Fonte: elaborado pelo autor, 2024

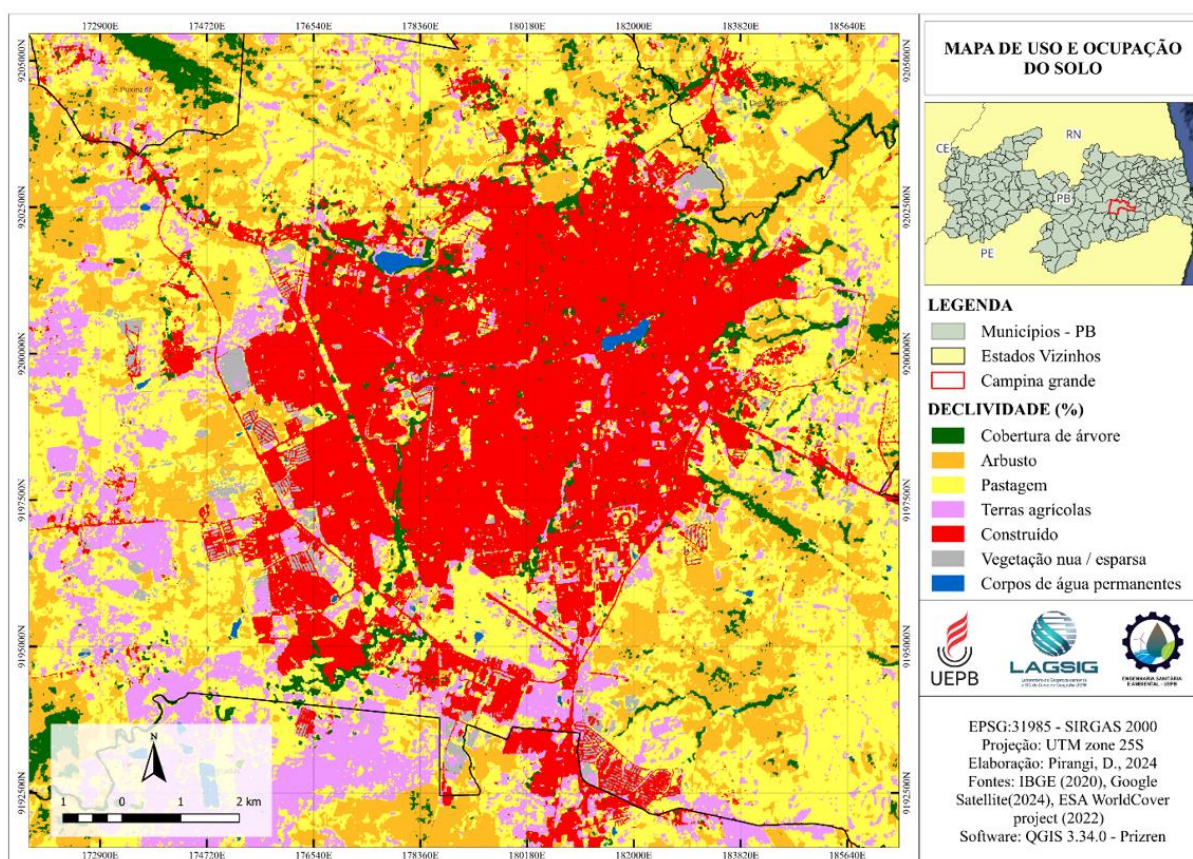
A relação entre relevo e a drenagem urbana é determinante para a ocorrência de alagamentos. As áreas de declividade mais acentuada podem acelerar o escoamento das águas, enquanto as regiões planas tendem a acumular água. Combinado com a impermeabilização crescente do solo, o relevo ondulado apresenta desafios para a gestão hídrica e a infraestrutura de drenagem urbana.

4.6 Uso e ocupação do solo

A análise do uso e ocupação do solo, é necessário para compreender as áreas de maior cobertura e transformações no terreno, permitindo identificar zonas urbanizadas, áreas verdes e regiões de ocupação desordenada. As imagens fornecidas pelo Projeto *ESA WorldCover* (2021), com resolução espacial de 10 metros, são derivadas dos dados dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2, capturados em 2021.

Essas informações permitem a criação de um mapa preciso do uso e ocupação do solo no município de Campina Grande (Figura 5), possibilitando uma avaliação mais detalhada da dinâmica espacial local e dos impactos das atividades humanas sobre o território, contribuindo para o planejamento e a mitigação de áreas suscetíveis a inundações e alagamentos.

Figura 5 – Mapa de uso e ocupação predominante do solo (resolução espacial de 30 metros)



Fonte: Adaptado pelo autor; Projeto ESA WorldCover (2021)

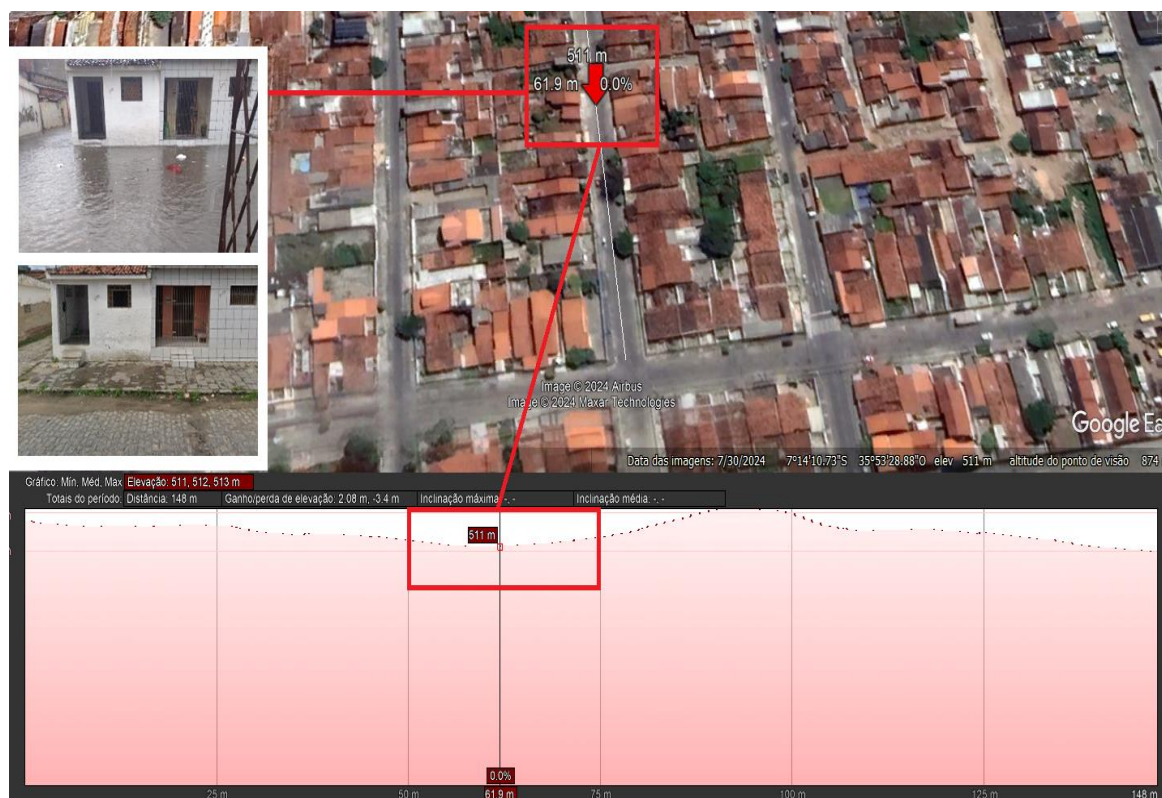
O uso inadequado do solo e a ocupação irregular das áreas urbanas exacerbam os problemas de drenagem e alagamento em Campina Grande. A impermeabilização do solo aumenta a intensidade dos eventos de alagamento, criando um ciclo vicioso de expansão urbana descontrolada e insuficiência das infraestruturas urbanas de drenagem. A integração de planejamento urbano com as áreas de risco é crucial para mitigar os impactos negativos.

4.7 Pontos de alagamentos e inundações frequentes no perímetro urbano

A pavimentação e a construção em áreas urbanas impermeabilizam o solo, dificultando a absorção da água da chuva e causando acúmulo em ruas e terrenos. Em Campina Grande, alagamentos são frequentes, especialmente na estação chuvosa, quando ocorre a maior parte da precipitação anual (Figura 6).

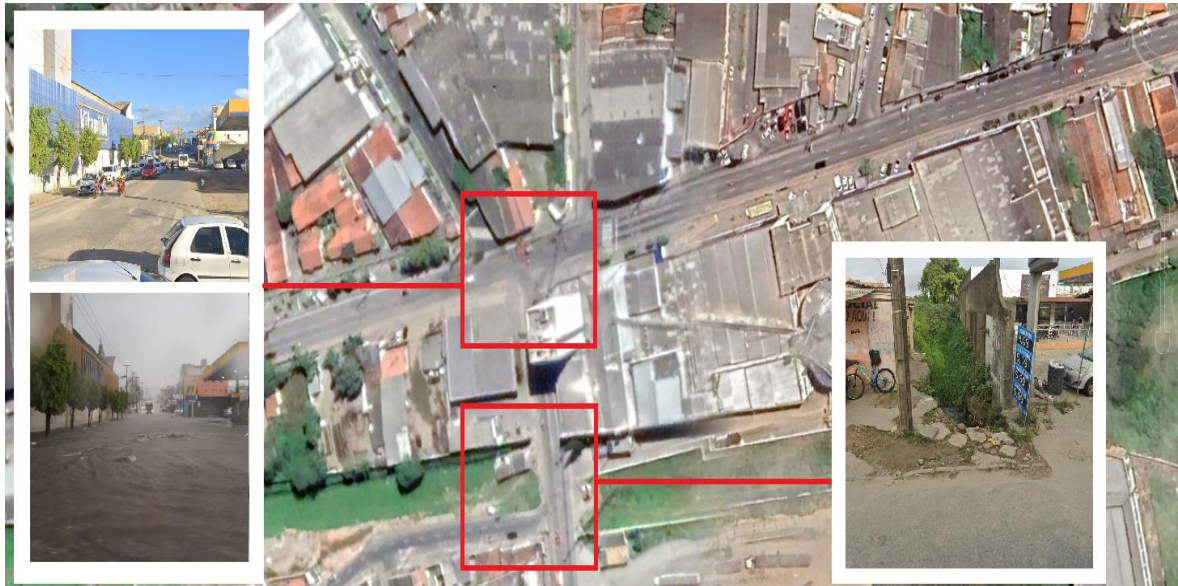
A deficiência da drenagem urbana, junto à falta de infraestrutura adequada, intensifica esses eventos, resultando em inundações localizadas (Figura 7). A topografia do município e o crescimento urbano desordenado aumentam os riscos, principalmente em áreas com alta densidade populacional e infraestrutura precária

Figura 6 – Alagamentos de rua causados por deficiências do sistema de drenagem e agravados pela topografia



Fonte: Adaptado, Google Earth (2024); Paraíba Debate (2022).

Figura 7 – Inundação causada por sobrecarga no sistema de macrodrenagem e ocupações urbanas às margens de córrego



Fonte: Adaptado, Google Earth (2024); Autor desconhecido (2022).

A Defesa Civil forneceu uma lista com ruas e áreas afetadas por alagamentos (Quadro 2) e inundações (Quadro 3), o que contribui para validar os resultados deste estudo. A integração dos dados geoespaciais com as informações do órgão público aprimora a precisão na identificação das áreas de risco, assegurando maior credibilidade nas conclusões. Essa abordagem permite comparar as áreas identificadas nas análises com os dados reais de ocorrências de alagamentos.

Quadro 2 – Áreas de inundações classificadas por nível de risco

ÁREAS DE INUNDAÇÕES			
Nº ID	Localidade	Bairro	Nível do Risco
1	Invasão do Distrito dos Mecânicos	Distrito dos Mecânicos	Risco Alto Inundações
2	Rua Tranquilino Coelho Lemos e adjacências	Dinamérica III	Risco Médio de Inundações
3	Invasão por trás do Galpão da SESUMA	Três Irmãs	Risco Médio
4	Rua Fortaleza e adjacências	Santa Cruz	Risco Médio de Inundações
5	Comunidade Riacho Verde	São Januário	Risco Alto Inundações
6	Comunidade Rosa Mística/Louseiro	Alto Branco	Risco Alto Inundações
7	Vila dos Teimosos	Bodocongó	Risco Alto Inundações
8	Pelourinho	Rosa Cruz	Risco Médio

Fonte: Defesa Civil de Campina Grande, 2024

As áreas de inundações foram classificadas pela Defesa Civil com base no nível de risco, variando entre médio e alto. Esses locais incluem comunidades e bairros vulneráveis onde a infraestrutura de drenagem é insuficiente, agravando os impactos das chuvas intensas. A identificação dessas áreas é crucial para priorizar intervenções e mitigar danos.

Quadro 3 – Áreas pontuais de alagamento frequente

PONTOS DE ALAGAMENTO		
Nº ID	Endereço	Bairro
1	Rua Vitória	Bodogongó
2	Rua Aratuba	Bairro das cidades
3	Rua Tianguá	Bairro das Cidades
4	Rua João Henrique Pereira leite	Malvinas
5	Rua Mauricio de Travassos Moura	Jardim Paulistano
6	Rua Monsenhor Inácio	Jardim Paulistano
7	Rua Ana de Azevedo	Palmeira
8	Travessa Pará	Liberdade
9	Rua Plínio Iemos	Novo Bodogongó
10	Rua Manoel Leonardo Gomes	Jardim Paulistano
11	Av. Jornalista Assis Chateaubriand	São José
12	AV. Professor Almeida Barreto	Liberdade
13	R. Dr. Severino Cruz	Centro
14	R. Vigário Calixto	Catolé
15	Av. Jornalista Assis Chateaubriand	Tambor
16	Av. Juvência Arruda	Universitários
17	Av. Almirante Barroso	Liberdade
18	Av. Pres. Jucelino Kubitschek	Acácio Figueiredo
19	Rua Augusto Severiano	Novo Horizonte

Fonte: Defesa Civil de Campina Grande, 2024

Os pontos de alagamento e inundações frequentes refletem uma combinação de fatores como precipitação excessiva, falta de drenagem eficiente, uso inadequado do solo e topografia desfavorável. Essa interação entre os diferentes fatores exige um esforço coordenado para a melhoria da infraestrutura urbana e o planejamento de áreas de risco, buscando soluções sustentáveis para minimizar os impactos dos alagamentos e inundações na população de Campina Grande.

4.8 Técnicas Utilizadas

As técnicas empregadas na elaboração deste trabalho basearam-se em métodos de geoprocessamento e análises espaciais, com destaque para a aplicação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). A figura 8 apresenta de forma sequencial as etapas metodológicas adotadas, desde a obtenção dos dados iniciais até a análise final dos resultados. As etapas permitiram a construção de uma base de dados espacial que serviu de suporte para a identificação e mapeamento de zonas urbanas vulneráveis a alagamentos e inundações. Essa abordagem sistemática contribuiu para a validação dos resultados e para a elaboração de mapas temáticos precisos e representativos da realidade local.

Figura 8 – Sequência da metodologia aplicada

Fonte: elaborado pelo autor, 2024

4.8.1 Importação de Dados

No desenvolvimento do projeto, a primeira etapa consistiu na importação de dados para o software *QGIS V.3.34.0-Prizren*. A qualidade das informações impacta a precisão da análise subsequente. Entre os conjuntos de dados integrados, destaca-se o perímetro urbano de Campina Grande, obtido por meio do Observatório de Campina Grande, uma plataforma online que fornece informações atualizadas e confiáveis sobre a dinâmica urbana da cidade, sendo datado de 2021. Esse dado reflete as mudanças e expansões recentes na malha urbana, permitindo uma compreensão mais precisa das áreas potencialmente afetadas por inundações.

Além disso, foram incorporados pontos e áreas de inundações, coletados pela Defesa Civil em 2023. Essas informações são úteis para a identificação das áreas mais vulneráveis a eventos hidrológicos, pois revelam onde as inundações ocorreram anteriormente, servindo como indicadores de risco. Para complementar a análise hidrológica, também foram utilizadas as bacias hidrográficas codificadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Essas bacias são identificadas pelo código *numivotto6*, que se refere ao nível 6 de *Otto Pfafstetter*, permitindo uma classificação detalhada e sistemática das bacias da região.

A combinação desses dados diversificados possibilita uma análise integrada e abrangente das condições ambientais e urbanas de Campina Grande, facilitando a identificação de padrões e correlações entre a urbanização e a vulnerabilidade a inundações. Essa abordagem multidimensional é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e planejamento urbano sustentável.

4.8.2 Aquisição de Imagens de Satélite

A etapa de aquisição de imagens de satélite é essencial para o projeto, pois fornece a base espacial necessária para a análise geoespacial e a interpretação das informações. Para esse fim, foi utilizado o plugin "*OpenTopography DEM Downloader*" que foi instalado no próprio *QGIS*, que facilitou significativamente a importação de imagens do projeto Copérnicos, coordenado pela União Europeia, que oferece acesso a uma vasta gama de dados de observação da Terra, permitindo a análise de diferentes variáveis geográficas, como topografia, uso do solo e cobertura vegetal.

As imagens obtidas apresentam uma resolução espacial de 30 metros, considerada adequada para o monitoramento e análise de fenômenos como inundações, ocupação do solo e alterações ambientais ao longo do tempo. Além disso, a utilização de imagens de satélite possibilita uma visualização clara das mudanças no ambiente, o que é crucial para a avaliação dos padrões de drenagem e da ocupação do solo na área de estudo.

Com essas imagens, é possível identificar áreas suscetíveis a inundações e analisar como as intervenções urbanas impactam o ciclo hidrológico local. Essa abordagem, que combina dados de alta resolução e técnicas geoespaciais, enriquece a análise e fornece informações valiosas para a formulação de estratégias de gestão ambiental e planejamento urbano mais eficazes.

4.8.3 Reprojeção da Imagem

Após a aquisição das imagens de satélite, foi realizada a reprojeção dessas imagens para o sistema de referência EPSG:31985, que corresponde ao SIRGAS 2000 / UTM zona 25S. Essa etapa é essencial, pois garante que todos os dados utilizados no projeto estejam alinhados espacialmente, o que permite a integração e sobreposição correta das diferentes camadas de informação no *QGIS*.

A reprodução é uma prática comum em análises geoespaciais, já que conjuntos de dados frequentemente provêm de sistemas de coordenadas distintos. Essa correção e alinhamento são fundamentais para evitar distorções e assegurar a precisão nas análises subsequentes, influenciando diretamente a qualidade dos resultados obtidos e a confiabilidade das conclusões do estudo.

4.8.4 Correção do Modelo Digital de Elevação

A correção do modelo digital de elevação (MDE) foi realizada utilizando o algoritmo *Fill Sinks* (Wang & Liu) disponível no software *SAGA* que está integrado ao *QGIS*. Este algoritmo é projetado para preencher depressões no MDE de maneira hierárquica, assegurando a continuidade do fluxo hídrico. A presença de depressões não tratadas pode levar a interpretações errôneas dos padrões de drenagem e pode afetar a simulação de escoamento. A correção do MDE é uma etapa crítica na modelagem hidrológica, pois um modelo preciso é fundamental para a análise de risco de inundação e para o planejamento urbano, permitindo que as autoridades identifiquem áreas propensas a alagamentos e adotem medidas preventivas adequadas.

4.8.5 Extração de Drenagem

Com a imagem corrigida, foi realizada a extração da rede de drenagem utilizando o algoritmo *SAGA*, especificamente pelo método *Channel Network and Drainage Basins*. Este processo é essencial para identificar as redes de drenagem e suas interseções, possibilitando uma análise detalhada dos cursos d'água existentes na região. A extração de drenagem permite a subdivisão das bacias hidrográficas com base no fluxo acumulado, oferecendo informações valiosas sobre como a água se movimenta através da paisagem. Essas informações são fundamentais para a gestão hídrica, planejamento urbano e para a avaliação de riscos associados a inundações, pois permitem identificar as áreas mais suscetíveis a eventos extremos.

4.8.6 Análise dos Espaciais Avançadas

A análise dos resultados foi conduzida em duas etapas distintas, permitindo uma validação mais robusta da eficácia do método empregado. A primeira etapa envolveu a criação de uma estimativa de densidade *kernel* a partir dos pontos de conexão de drenagem, o que possibilitou a identificação de áreas com maior concentração de eventos de inundação.

A segunda etapa consistiu na associação da drenagem extraída com os pontos de alagamentos conhecidos, permitindo uma validação da eficácia da rede de drenagem identificada. Essa abordagem não apenas verifica a precisão das análises realizadas, mas também fornece insights sobre a relação entre a infraestrutura de drenagem e os eventos de inundação, sendo uma ferramenta importante para as autoridades de planejamento urbano.

4.8.7 Mapeamento Kernel

A técnica de densidade *kernel* foi aplicada para gerar um mapa térmico de densidade dos pontos de conexão de drenagens na cidade de Campina Grande, visando identificar áreas com maior concentração de risco de alagamento. O algoritmo de densidade *kernel* cria um *raster* que representa a densidade dos pontos de entrada, facilitando a identificação de *hotspots* e agrupamentos de eventos críticos, como os alagamentos. Dentro do algoritmo é necessário ajustar os parâmetros:

1. Camada de Ponto: A camada de ponto utilizada foi a conexão de drenagens, pois os pontos de drenagem representam locais estratégicos onde os fluxos de água se concentram e podem ser críticos em casos de alagamentos. A escolha dessa camada foi essencial para o objetivo do estudo, que visa mapear as áreas de risco associadas ao sistema de drenagem da cidade.
2. Raio (Distância de Influência): O valor de 500 metros foi escolhido como raio para a análise de densidade, pois representa uma área de influência razoável para identificar padrões de risco em torno de cada ponto de drenagem. Esse raio foi ajustado com base na escala do estudo urbano e no comportamento esperado dos fluxos hídricos, sendo uma medida suficiente para captar os efeitos da drenagem nas áreas próximas.
3. Kernel Shape (Forma do Kernel): A função *quartica* foi escolhida como a forma do *kernel* devido à sua capacidade de suavizar os dados de maneira eficiente, atribuindo maior peso aos pontos mais próximos e atenuando os efeitos de pontos mais distantes. A função *quartica* é bem adaptada para esse tipo de análise espacial, pois oferece uma transição suave entre as densidades de pontos e é menos propensa a exagerar a influência de pontos isolados.
4. Escala do Valor de Saída: A escala do valor de saída do *raster* foi configurada para representar uma gama de valores contínuos de densidade, com ênfase nas áreas com maior concentração de pontos de drenagem. Esses valores podem ser interpretados como uma representação visual de áreas de maior risco de alagamento, sendo que valores mais elevados indicam concentrações mais altas de drenagens e, conseqüentemente, maior potencial de acúmulo de água durante eventos de chuva intensa. Essa escala permite uma fácil visualização dos *hotspots* e agrupamentos de risco, ajudando na priorização das áreas para intervenções urbanas.

4.8.8 Áreas de Preservação Permanente (APP)

Por último, a consideração das áreas de preservação permanente (APP) é uma parte importante para planejamento urbano e da gestão ambiental. De acordo com a legislação brasileira, as APPs são definidas como faixas de proteção ao longo de cursos d'água, e para rios com largura de até 10 metros, essa faixa é estabelecida em 30 metros.

Essas áreas têm como objetivo a preservação da vegetação ciliar e a regulação do escoamento superficial, sendo fundamentais para a mitigação dos riscos de inundações. Então, aplicamos um buffer de 30 metros para simular onde deveriam ocorrer a faixa de APPS.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

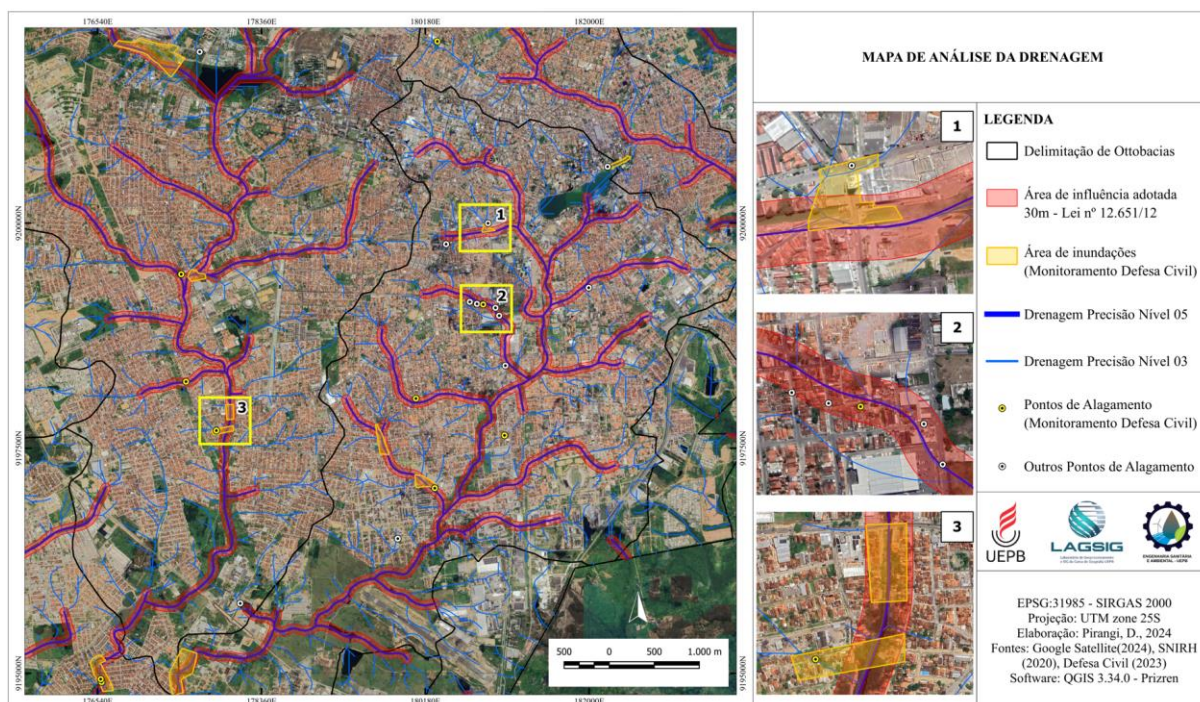
5.1 Extração da Drenagem

A extração de drenagem no contexto urbano enfrenta desafios significativos devido à interferência de modificações humanas, como redes de drenagem artificiais e infraestrutura urbana. A presença de ruas pavimentadas e construções pode ocultar ou alterar o curso das drenagens, dificultando sua identificação nas imagens. Além disso, a qualidade da resolução das imagens e as mudanças nas condições hidrológicas, como chuvas intensas ou secas, também afetam a precisão da extração. A manutenção constante da infraestrutura e as modificações nas redes de drenagem exigem atualizações regulares nos dados para garantir resultados precisos. Esses desafios exigem o uso de imagens de alta resolução e abordagens que considerem a dinâmica urbana e hidrológica.

A extração das drenagens foi realizada em dois níveis de precisão, nível 3 e 5, sendo 3 um nível mais preciso com drenagens menores, e 5 com uma drenagem mais densa, mostrando grandes fluxos, o que permitiu a subdivisão das bacias hidrográficas com base no fluxo acumulado. Revelou também, a configuração dos cursos d'água, incluindo rios, córregos e canais principais, que foram identificados automaticamente a partir das depressões topográficas, assegurando um fluxo hídrico contínuo.

Podemos analisar por meio do mapa gerado (Figura 9) que os pontos de alagamento e áreas de inundações estão predominantemente localizados nas bacias otocodificadas 758228 e 75229 (Figura 2) em trechos de drenagens classificados como nível 5, que são canais principais ou drenagens superficiais de grande volume. Também, foram identificados que os pontos de alagamentos e áreas de inundações dentro da faixa de 30 metros adjacente a essas drenagens (Figura 9).

Figura 9 – Mapa de análise da drenagem



Fonte: elaborado pelo autor, 2024

Nem todos os trechos analisados podem ser caracterizados como rios propriamente ditos, devido à ausência de características hidrológicas típicas, como fluxo perene ou presença de um leito bem definido. Contudo, essas áreas apresentam um potencial expressivo de escoamento superficial, o que se deve à alta conectividade com drenagens de nível inferior, especialmente as de nível 3. Essas drenagens, embora apresentem um fluxo reduzido, atuam como contribuintes para sistemas de drenagem maiores, sendo somadas às drenagens de nível 5. Essa integração entre diferentes níveis de drenagem resulta em um aumento do volume e da velocidade do escoamento, evidenciando a relevância dessas áreas na dinâmica hidrológica do terreno. Consequentemente, as áreas situadas dentro da faixa de 30 metros ao longo dessas drenagens são classificadas como de alta vulnerabilidade a inundações e alagamentos, especialmente considerando as condições frequentemente inadequadas da drenagem urbana. inundações urbanas.

Strahler (1957) argumentou que a análise geomorfológica e a hierarquização dos cursos d'água possibilitam a identificação e o mapeamento automático de drenagens, assegurando um fluxo hídrico contínuo. Apesar de ser um estudo antigo, a relevância de seu trabalho permanece, pois introduz conceitos fundamentais que embasam metodologias

contemporâneas em estudos hidrológicos. Seu estudo pioneiro é amplamente citado na literatura, fornecendo as bases teóricas para técnicas modernas, como o mapeamento automatizado de drenagens e a análise de vulnerabilidade a alagamentos. A contribuição do autor é importante para o entendimento de como a conectividade entre drenagens aumenta o risco de inundações urbanas, sendo um alicerce ainda válido para estudos atuais.

A utilização de abordagens avançadas e automatizadas na extração de redes de drenagem, especialmente em projetos de engenharia urbana, é fundamental para superar as limitações dos métodos tradicionais. Conforme discutido por França *et al.* (2024), essas técnicas oferecem maior precisão na validação das linhas de drenagem e permitem a adaptação a diferentes escalas de projetos urbanos. Além disso, ao incorporar medidas de controle de qualidade, é possível garantir maior confiabilidade e eficácia das redes, promovendo resultados mais adequados às necessidades específicas de cada projeto. No contexto deste estudo, a aplicação de tais métodos na extração de drenagem em Campina Grande-PB revelou-se essencial para identificar áreas críticas e estabelecer uma base de dados espacial robusta para análise hidrológica.

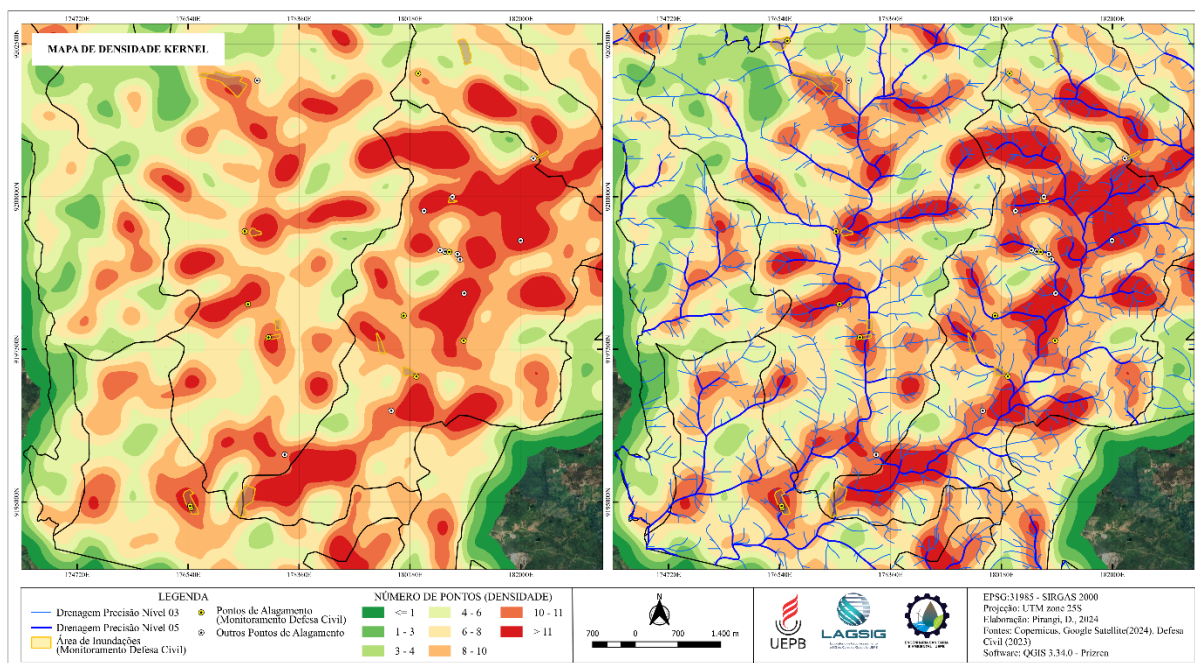
5.2 Análise de Densidade Kernel

A análise de densidade Kernel aplicada aos pontos de conexão de drenagem em Campina Grande fornece uma base sólida para identificar áreas críticas suscetíveis a alagamentos. A técnica, amplamente utilizada para transformar uma distribuição discreta de pontos em uma superfície contínua de densidade, permite calcular e representar graficamente a probabilidade de ocorrência de eventos em função da concentração de dados pontuais. No presente estudo, os pontos de conexão de drenagens foram utilizados como base, com a aplicação de uma função *kernel* de formato Gaussiano e um raio de influência de 500 metros. Isso garantiu a suavização dos dados e a identificação de áreas com maior risco de alagamento.

O mapa resultante, apresentado na Figura 10, utiliza uma rampa de cores que varia de tonalidades mais claras (frias) a tonalidades mais escuras (quentes), destacando áreas críticas nas cores vermelho e laranja escura. Essas áreas representam regiões com elevada concentração de pontos de drenagem e maior intensidade de escoamento superficial. Essa dinâmica ocorre devido à acumulação de drenagens menos intensas (nível 3), que contribuem

para a formação de drenagens de maior intensidade (nível 5). O cruzamento dos pontos de alagamento fornecidos pela Defesa Civil em 2023 com o mapa Kernel confirmou que a maioria desses eventos está concentrada nas áreas críticas destacadas, validando a metodologia como uma ferramenta eficaz na identificação de regiões vulneráveis a alagamentos.

Figura 10 – Mapa de densidade kernel



Fonte: elaborado pelo autor, 2024

Entretanto, a análise dos pontos de alagamento vai além da simples sobreposição espacial. Os registros históricos mostram que os alagamentos em Campina Grande não estão apenas associados à densidade de drenagens, mas também a interferências humanas significativas, como a impermeabilização do solo, a ocupação desordenada e a ausência de sistemas de escoamento adequados. Por exemplo, áreas urbanizadas com alta concentração de edificações e pavimentação tendem a apresentar menor capacidade de infiltração, redirecionando o fluxo hídrico para as regiões de maior intensidade de drenagem identificadas no mapa *kernel*. Essa dinâmica é reforçada pelas características topográficas locais, que influenciam o acúmulo de água em determinados pontos críticos.

O mapa de densidade *kernel* também revelou padrões de transição em áreas de risco, onde as tonalidades variam de laranja escura para vermelho, indicando zonas de intensificação do escoamento. Esses padrões são essenciais para compreender a progressão dos fluxos

hídricos dentro do contexto urbano e apontam para a necessidade de intervenções específicas em áreas de maior concentração de alagamentos. A metodologia utilizada, ao permitir a visualização clara e detalhada dos riscos, se destaca como uma ferramenta valiosa para gestores urbanos priorizarem ações de mitigação, como o aprimoramento da infraestrutura de drenagem e o planejamento de ocupações urbanas.

Dessa forma, a análise de densidade *kernel* demonstra sua relevância ao combinar precisão técnica e representatividade espacial, oferecendo insights sobre as dinâmicas locais de alagamento. Esse enfoque integrado é fundamental para apoiar estratégias de gestão ambiental e planejamento urbano mais eficazes, permitindo intervenções direcionadas nas áreas de maior vulnerabilidade em Campina Grande. Dessa forma, a metodologia contribui significativamente para a formulação de estratégias de gestão ambiental e planejamento urbano mais eficazes em contextos variados (Dias et al., 2021; Faria et al., 2020; Guirra et al., 2024; Nery et al., 2020).

5.3 Validação dos dados

A validação dos dados permitiu correlacionar os pontos de alagamento registrados pela Defesa Civil com as áreas de alta densidade de drenagem identificadas no estudo. Essa interação das informações comprovaram a precisão tanto do método de extração da rede de drenagem quanto da análise de densidade *kernel*, evidenciando as áreas destacadas no mapa de densidade como pontos críticos de vulnerabilidade.

Entretanto, é importante ressaltar que os dados fornecidos pela Defesa Civil apresentam algumas limitações, como a possível subnotificação de eventos de alagamento e a falta de precisão espacial em determinados registros. Esses dados, muitas vezes baseados em relatos de moradores e eventos pontuais, podem não refletir com exatidão a dinâmica completa dos alagamentos em áreas menos monitoradas ou com menor densidade populacional. Essas limitações podem afetar a precisão dos resultados e a identificação de todas as áreas vulneráveis. A interpretação dos dados deve, portanto, ser feita com cautela, considerando essas falhas, e complementada com outras fontes de informação, como o envolvimento da comunidade e o uso de dados temporais mais amplos.

Embora os dados tenham sido suficientes para validar a metodologia, a participação da população no registro de alagamentos e inundações é essencial para enriquecer o banco de dados, ainda carente em algumas regiões. Através da ciência cidadã ocorre o envolvimento comunitário e, por conseguinte, a expansão a base de informações, agregando dados que

aprimoram a precisão das análises e fundamentam medidas preventivas mais eficazes. Esse tipo de colaboração fortalece o planejamento urbano e contribui para a redução de riscos em áreas vulneráveis.

A inclusão das Áreas de Preservação Permanente (APPs) valida o estudo ao destacar regiões suscetíveis a inundações nas faixas de proteção de 30 metros, especialmente nas bacias otocodificadas analisadas. A relação entre os pontos de alagamento e as APPs revela a importância dessas áreas na contenção natural do fluxo hídrico e redução de riscos. Além disso, evidencia locais que, muitas vezes, estão ocupados ou impermeabilizados, aumentando a vulnerabilidade a inundações e dificultando a drenagem natural. Com isso, reforça a necessidade de preservação ambiental para mitigar alagamentos e guiar políticas de planejamento urbano sustentáveis.

A aplicação dos métodos de geoprocessamento e Sistema de Informação Geográfica (SIG) mostrou-se relevante para o planejamento urbano, pois, possibilitam uma análise espacial ampla que apoia a tomada de decisões em gestão de riscos. Logo, o uso das ferramentas geoespaciais destacadas neste estudo promove uma base técnica confiável para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e prevenção de desastres naturais, reforçando a importância do SIG na organização territorial e no monitoramento de áreas críticas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma análise aprofundada da aplicação dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) como ferramenta de suporte ao planejamento urbano, evidenciando como os métodos geoespaciais avançados podem ser fundamentais para a gestão territorial eficiente e sustentável. O SIG permite a integração de múltiplos dados espaciais, proporcionando uma visualização detalhada e a análise precisa de informações que são essenciais para compreender fenômenos urbanos complexos. Ao adotar uma abordagem geoespacial na análise dos pontos de alagamento e das redes de drenagem, foi possível identificar áreas de maior risco e potencial vulnerabilidade, o que tem implicações diretas para o planejamento urbano, especialmente nas regiões mais afetadas por eventos de inundação.

Entretanto, apesar da eficácia da metodologia aplicada, é necessário destacar algumas limitações importantes que influenciam a precisão dos resultados, como a qualidade dos dados fornecidos pela Defesa Civil. A base de dados de alagamentos, embora essencial, apresenta lacunas e inconsistências, principalmente nas áreas mais periféricas ou com menos acompanhamento institucional. A precisão da análise de densidade *kernel*, por exemplo, depende fortemente da acuracidade e da atualização dos dados de drenagem e de eventos de alagamento. Isso pode afetar a identificação de áreas vulneráveis e comprometer a definição de intervenções preventivas. Portanto, um aprimoramento contínuo e uma maior diversidade nas fontes de dados são essenciais. A participação ativa da população na coleta e registro de dados de alagamentos pode enriquecer significativamente o banco de informações, contribuindo para a precisão das análises e permitindo um diagnóstico mais preciso e amplo do território.

A aplicação de técnicas como a análise de densidade *kernel*, em conjunto com dados hidrológicos e outros parâmetros ambientais, demonstrou ser eficaz na identificação de *hotspots* e na visualização de áreas de maior risco. Contudo, essa abordagem poderia ser mais robusta se fosse complementada por dados temporais e sazonais mais detalhados, que considerassem variações climáticas e eventos extremos, os quais são particularmente relevantes em áreas sujeitas a inundações urbanas. Nesse sentido, seria interessante desenvolver modelos de predição mais dinâmicos, que incorporassem variáveis como mudanças climáticas e a expansão da impermeabilização do solo, proporcionando uma

previsão mais precisa e adaptativa do comportamento das redes de drenagem. Além disso, as conclusões do estudo reforçam a importância de políticas públicas voltadas para a melhoria da infraestrutura urbana, que contemplem medidas de adaptação ao risco de inundações. A implementação de soluções baseadas na natureza, como a recuperação de áreas verdes e a promoção da permeabilidade do solo, se mostrou fundamental para mitigar os efeitos da impermeabilização.

A criação de zonas de retenção e a adequação das drenagens urbanas para suportar grandes volumes de chuva são algumas das ações preventivas que podem ser implementadas com base nos achados deste estudo. Além disso, as áreas de Preservação Permanente (APPs), frequentemente ocupadas de forma irregular, foram identificadas como locais críticos, o que reforça a necessidade de políticas públicas que visem à proteção e recuperação dessas áreas para reduzir o risco de inundações e melhorar o equilíbrio ecológico.

O avanço na aplicação de SIG nas práticas de planejamento urbano requer a capacitação de profissionais especializados, além da implementação de infraestrutura tecnológica mais robusta, que permita a coleta e o processamento de dados de forma mais eficaz. A ampliação do uso de sensores remotos e a implementação de um sistema de monitoramento em tempo real são algumas das inovações tecnológicas que poderiam ser incorporadas para otimizar as análises de vulnerabilidade e ampliar a capacidade de resposta do poder público frente a desastres naturais.

Para futuras pesquisas, sugere-se a realização de estudos longitudinais que acompanhem a evolução da vulnerabilidade urbana ao longo do tempo, considerando as transformações no uso do solo, o crescimento populacional e as mudanças climáticas. Além disso, seria interessante explorar a integração de outras fontes de dados, como imagens de satélite de alta resolução, e tecnologias emergentes, como a modelagem 3D de redes urbanas, para aprimorar ainda mais a previsão e a gestão dos riscos relacionados a alagamentos.

Em resumo, a utilização de SIG e técnicas de análise espacial avançada, como a análise de densidade *kernel*, representa um avanço significativo no planejamento urbano e na gestão de riscos. Porém, a qualidade dos dados e a continuidade no monitoramento e na atualização das informações são essenciais para garantir a precisão e a eficácia das análises.

O trabalho realizado neste estudo estabelece uma base sólida para futuras pesquisas acadêmicas e práticas, fornecendo um banco de dados geoespacial detalhado que pode ser

amplamente utilizado em estudos posteriores. Além disso, contribui para a formulação de políticas públicas mais eficazes, adaptáveis e sustentáveis, voltadas à mitigação dos riscos de alagamentos e à promoção de um desenvolvimento urbano mais resiliente, alinhado às demandas climáticas e sociais contemporâneas.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- ACKERMANN, M.; SAMORA, P.R. **Área de preservação permanente urbana e o manejo da água: inovação, resiliência e adaptação aos eventos hidrológicos extremos**. *Labor & Eng.*, Campinas, SP, v. 14, p. 1-10, e020007, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/labore.v14i0.8659862>. Acesso em: 25 jul. 2024.
- AESA - AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. **Meteorologia – Chuvas – Gráfico (2019 - 2023)**. Disponível em: http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas-grafico/?id_municipio=51&date_chart_init=2019-01-01&date_chart=2024-01-01&period=personalizado. Acesso em: 24 fev. 2024.
- AESA - AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. **Relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no estado da Paraíba**. João Pessoa. p. 20, 2009.
- BACK, Á. J. **Bacias hidrográficas: classificação e caracterização física (com o programa Hidro Bacias para cálculos)**. Florianópolis: Epagri, 2014.
- BERTONI, J.; TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. v. 4. Porto Alegre: ABRH, 2001.
- BOTELHO, M. H. C. **Campos de águas pluviais: engenharia das águas pluviais nas cidades**. 4. ed. rev. e ampl. São Paulo: Blücher, 2017.
- BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm. Acesso em: 15 jul. 2024.
- CARVALHO, C. S. et al. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens de Rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.
- CONRAD, O. et al. **System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. Modelo Dev. 8, 1991-2007**. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>>. Acesso em: 10 mai. 2024.
- DIAS, L. B. A.; GARCIA, P. da S.; PEREIRA, L. C.; PEREIRA JÚNIOR, A. **Análise multitemporal de desflorestamento e queimadas na sub-bacia do rio Itacaiúnas, Marabá – Pará**. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 3, e34010313255, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13255>.
- DUARTE, T. L. S.; SANTOS, G.; CASTELHANO, F. J. **Eventos de chuvas extremas associados aos riscos de inundações e de alagamentos em Aracaju, Sergipe**. *Geosaberes*, Fortaleza, v. 12, p. 256-273, 2021.

FARIA, R. M. de, *et al.* **Difusão espacial e interiorização da COVID-19 no estado do Rio Grande do Sul.** *Revista da Casa da Geografia de Sobral*, v. 22, n. 2, p. 26-43, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.35701/rcgs.v22n2.686>.

FRANÇA, L. L. S. *et al.* **Aplicação da extração automática de Rede de Drenagem na Engenharia Urbana a partir de dados de alta resolução do PE3D utilizando softwares livres.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 1, p. 349-365, 2024.

GARCIA, F. R.; ALIXANDRINI JÚNIOR, M. J. **Comparação de MDTs a partir do acoplamento de modelo hidrológico e hidrodinâmico aplicado à identificação de áreas de inundações urbanas.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 02, p. 783-803, 2022.

GUIRRA, A. P. M.; PARANHOS FILHO, A. C. **Cavernas do Mato Grosso do Sul: revisão, atributos condicionantes, análise preditiva e autocorrelação espacial.** *Terr@Plural*, v. 18, p. 1-31, e2419454, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5212/TerraPlural.v.18.19454.004>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Campina Grande.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/campina-grande/panorama>. Acesso em: 04 fev. 2024.

MAIA, D. S. **O impacto da urbanização nos problemas ambientais em Área de Preservação Permanente: estudo de caso da faixa marginal da APP do Córrego Samambaia/DF.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 04, p. 1771-1786, 2022.

MARCINO, A. G. M., *et al.* **Análise de eventos de inundação na cidade de Santa Rita do Sapucaí, MG, utilizando SIG.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, Santa Rita do Sapucaí, 17(4), p. 2930-2949, jul. de 2024.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Enchentes.** Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/e/enchentes>. Acesso em: 10 de ago. de 2024.

NERY, L. M.; SIMONETTI, V. C.; MACHADO, L. P.; SILVA, D. C. da C. e. **Geotecnologias aplicadas na análise do risco de contaminação de poços de água no município de Sorocaba, SP.** *Holos Environment*, v. 20, n. 2, p. 214-230, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v20i2.12376>.

OLIVEIRA, U. C.; OLIVEIRA, P. S. **Mapas de Kernel como Subsídio à Gestão Ambiental: Análise dos Focos de Calor na Bacia Hidrográfica do Rio Acaraú, Ceará, nos Anos 2010 a 2015.** Sobral, Ceará: Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará – SEMACE, 2015.

PALÁCIO, O. D. *et al.* **Análise da susceptibilidade a alagamento em Juazeiro do Norte, Ceará.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 14, n. 4, p. 2204-2219, 2021.

PARAÍBA DEBATE. **Moradores da liberdade sofrem com ruas alagadas sem providencias das autoridades.** disponível em: <https://paraibadebate.com.br/moradores-da-liberdade-sofrem-com-ruas-alagadas-sem-providencias-das-autoridades/>. Acesso em: 10 de maio de 2024

PEREIRA, E. S.; CAVALCANTI, N. de B. **Caracterização Hidrológica da Bacia do Rio Paraíba e os Impactos no Abastecimento de Água em Campina Grande-PB**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 8, n. 4, p. 1053-1068, 2015.

SANTOS, Milton. **A Urbanização Brasileira**. São Paulo: Hucitec, 1993.

SCOTTÁ, F. C. *et al.* **Delimitação de Áreas de Preservação Permanente em Cursos d'água para Fins de Gestão no Estado do Rio Grande do Sul: um modelo de regressão com dados hidrológicos e técnicas de geoprocessamento**. Rev. Bras. Cartogr, v. 76, 2024. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv76n0a-69567>.

SILVERMAN, B. W. **Density estimation for statistics and data analysis**. London: Chapman and Hall, 1986. (Monographs on Statistics and Applied Probability, p. 9).

SODRÉ, B. F. *et al.* **As geotecnologias como suporte para análise do uso e ocupação do solo urbano: um estudo em Feira de Santana (Bahia - Brasil)**. Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, n. 12, p. 101144-101161, dec. 2020. ISSN 2525-8761. DOI: 10.34117/bjdv6n12-563. Acesso em: 15 jul. 2024.

STRAHLER, A. N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology**. Transactions, American Geophysical Union, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. p. 20.

TUCCI, C. E. M. **Águas urbanas. Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 99, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: ABRH, 2005.

ZANAGA, D. *et al.* **ESA WorldCover 10 m 2021 v100**. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>. Acesso em: 15 jul. 2024.

