



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE



AMANDA ALVES QUEIROGA

**ANÁLISE DAS ÁREAS PROPENSAS A INUNDAÇÃO E A EXPANSÃO
URBANA NO MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA, PARAÍBA, BRASIL**

JOÃO PESSOA – PB
MARÇO – 2021

AMANDA ALVES QUEIROGA

**ANÁLISE DAS ÁREAS PROPENSAS A INUNDAÇÃO E A EXPANSÃO
URBANA NO MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA, PARAÍBA, BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentado
ao Programa de Pós-Graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente, da
Universidade Federal da Paraíba, para
exame de qualificação.

Orientador: Prof. Dr. Hamilcar José
Almeida Filgueira

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Camila
Cunico

JOÃO PESSOA – PB

MARÇO – 2021

Q3a Queiroga, Amanda Alves.

Análise das áreas propensas a inundação e a expansão urbana no município de João Pessoa, Paraíba, Brasil / Amanda Alves Queiroga. - João Pessoa, 2021.

103 f. : il.

Orientação: Hamilcar José Almeida Filgueira.

Coorientação: Camila Cunico.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CCEN.

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Desastres. 3. Gestão territorial. 4. Vulnerabilidade. I. Filgueira, Hamilcar José Almeida. II. Cunico, Camila. III. Título.

UFPB/BC

CDU 502.131.1(043)

AMANDA ALVES QUEIROGA

**ANÁLISE DAS ÁREAS PROPENSAS A INUNDAÇÃO E A EXPANSÃO
URBANA NO MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA, PARAÍBA, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA – da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Trabalho Aprovado. João Pessoa, 19 de março de 2021.

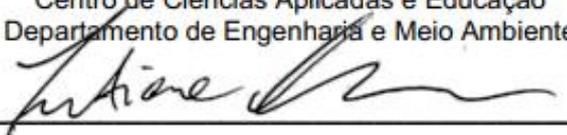
BANCA EXAMINADORA



HAMILCAR JOSÉ ALMEIDA FILGUEIRA
(Orientador)
Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental



JOEL SILVA DOS SANTOS
(Membro Interno)
Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Aplicadas e Educação
Departamento de Engenharia e Meio Ambiente



LUTIANE QUEIROZ DE ALMEIDA
(Membro externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes
Departamento de Geografia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **Deus**, pela força e esperança que se renova todos os dias, mesmo em meio àqueles em que não consigo enxergar. Por me proporcionar conseguir terminar e realizar o trabalho como eu quis, mesmo em meio a uma pandemia.

Aos **meus pais**, Patricia Gigliola e Luciel Alves, por todo o apoio e cuidado sempre.

Ao meu irmão **Thiago**, pela escuta paciente durante esse período e em todos os outros.

À minha prima **Ana Rita**, por estar sempre presente em minha vida, inclusive compartilhando suas experiências na pós-graduação.

À **Wanessa Vasconcelos, Karoline Ferreira, Lucas Alves, Ingrid Lima, Lucio Alves** e todos os meus amigos da minha comunidade de fé **Igreja Betesda João Pessoa** por toda a leveza, esperança e apoio em todos os momentos da minha vida.

À **Bruna Candeia, Leonardo Crispim e Nathalia Oliveira** pela amizade e por sempre estarem dispostos a me ajudar na parte de geoprocessamento, sanando dúvidas que surgiram.

À **Maiane Barbalho** pela imensa parceria e amizade durante esse tempo, seja durante no intervalo das nossas aulas, conversas sobre nossos trabalhos, passeios divertidos ou seu ombro amigo em momentos difíceis.

À **Rafaella Gouveia, Carlos Adilson, Arthur e Maria Luísa Palitot** pela ajuda em todas as etapas desse trabalho.

À **Genival Quirino**, da COMPDEC, por ter me acompanhando de forma tão solícita durante as visitas em campo.

Aos professores **Joel Santos, André Queiroga, Fátima Camarotti, George Miranda, Gustavo Lima, Denise Dias, Bartolomeu de Souza, Reinaldo Lucena, Cristina Crispim** e toda a equipe do **PRODEMA-UFPB** que transformaram o modo que hoje vejo minha profissão e propósito de vida.

Aos **colegas da minha turma do PRODEMA** que me proporcionaram o acesso a visões complementares e igualmente importantes, cada um dentro da sua especificidade, mas com um único objetivo: construir um mundo melhor.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. Hamilcar José Almeida Filgueira**, por compartilhar comigo sua vasta experiência e conhecimentos e por contribuir com a construção desse trabalho.

À minha coorientadora, **Prof. Dr^a Camila Cunico**, por mais esse trabalho realizado em conjunto e por tamanho comprometimento em tudo o que faz.

Ao **Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl** pela prontidão e gentileza em me tirar dúvidas quando precisei.

À **Joel da Silva Santos** e **Lutiane Queiroz de Almeida** por aceitarem compor a minha banca e por todas as contribuições para esse trabalho.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)**, pela bolsa concedida.

À todos que contribuíram de forma direta e indireta para esse trabalho.

RESUMO

Os desastres relacionados com fenômenos naturais, devido ao aumento da sua intensidade e frequência, têm ganhado espaço nas discussões científicas a nível mundial. A urbanização e as inundações nas cidades desempenham um papel cíclico na construção do risco a desastres, por isso o objetivo geral dessa pesquisa foi identificar as áreas propensas a risco de desastre por inundação e sua inter-relação com o processo de evolução da mancha urbana no município de João Pessoa, Paraíba. A metodologia se dividiu em duas etapas. A primeira foi identificar as áreas suscetíveis a inundação por meio do Modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND), utilizando diferentes resoluções de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e diferentes recortes espaciais. Posteriormente, as áreas mapeadas foram classificadas de acordo com uma ordem de prioridade de ações de redução do risco (muito baixa a muito alta). A segunda etapa consistiu em analisar a expansão urbana no município durante o período de 1990 e 2018. Os resultados mais robustos apareceram ao utilizar um MDE de 5 m x 5 m de resolução e uma abordagem espacial voltada para as bacias hidrográficas de João Pessoa. A validação do modelo se deu a partir de atividades de campo. As bacias hidrográficas que apresentaram uma maior porcentagem das suas áreas com “muito alta” ordem de priorização de ações de redução do risco a inundação foram Marés-Sanhauá, Jaguaribe e Gramame. Avaliando esses dados frente a uma estimativa de população exposta verificou-se que houve uma concentração maior de bairros com maiores porcentagens de população exposta (acima de 20,1%) nas bacias do Marés-Sanhauá e Jaguaribe. Ao analisar o período de 1990 a 2018, a bacia do Cuiá apresentou maior expansão urbana. Em 2018, as bacias hidrográficas mais urbanizadas foram Jaguaribe, Marés-Sanhauá e Cuiá. Analisando de forma integrada com as áreas mapeadas pelo HAND, Jaguaribe e Marés-Sanhauá são aquelas com maior sobreposição de áreas urbanizadas e áreas com muito alto grau de prioridade de ações de redução do risco. Assim, diante do cenário encontrado, recomenda-se ações preventivas e adaptativas nas áreas mais prioritárias das bacias de Jaguaribe, Marés-Sanhauá e Cuiá.

Palavras-chave: Vulnerabilidade. Desenvolvimento Sustentável; Desastres; Gestão Territorial.

ABSTRACT

Disasters caused by natural phenomena have gained space in the sciences worldwide due to the increase in their intensity and frequency. Urbanization and flooding in cities play a cyclical role in construction of disaster risk, so the general objective of this research was to identify areas prone to flood risk and their connection with the process of evolution of the urban spot in the city of João Pessoa, Paraíba. The methodology was divided into two stages. In the first, areas susceptible to flooding were identified using the Height Above the Nearest Drainage Model (HAND) with Digital Elevation Models (DEM) of three spatial resolutions and different spatial approaches. Subsequently, mapped areas were classified according to an order of priority of risk reduction (very low to very high). The second stage consisted in analyzing the urban expansion in the city during the period from 1990 to 2018. The best results appeared when using a 5 m x 5 m DEM resolution and a spatial approach considering the João Pessoa hydrographic basins. The model was validated based on local visits. The hydrographic basins that presented a higher percentage of their areas with “very high” order to prioritize actions to reduce flood risk were Marés-Sanhauá, Jaguaribe and Gramame river basins. Evaluating these data and the exposed population estimate, which was calculated considering a proportion between the area of each basin and the mapped area, it was found that there was a greater concentration of neighborhoods with higher percentages of exposed population (above 20.1%) in the Marés-Sanhauá and Jaguaribe river basins. However, better infrastructure conditions in some neighborhoods provide greater adaptation and coping than others. When analyzing the period from 1990 to 2018, the Cuiá river basin showed prominent urban expansion. In 2018, Jaguaribe, Marés-Sanhauá and Cuiá were the most urbanized river basins. Analyzing in an integrated way, the Jaguaribe and Marés-Sanhauá river basins were those with the greatest overlap of urbanized areas and areas with a very high degree of priority for risk reduction actions. Thus, preventive and adaptive actions are recommended in the most priority areas of the Jaguaribe, Marés-Sanhauá and Cuiá river basins.

Key-words: Vulnerability. Sustainable Development. Disasters. Territorial Management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Comparação das ocorrências de desastres entre os períodos de 2008-2017 e 2018, separados por tipo.....	27
Figura 2 - Elevação das águas do rio, demonstrando a diferença entre enchente e inundação	28
Figura 3 - Processo de impacto do uso e cobertura do solo na drenagem urbana	30
Figura 4 - Alterações hidrológicas por causa da urbanização	31
Figura 5 - Impactos no escoamento superficial causados pelo aumento da urbanização	31
Figura 6 - Visão integrada da gestão hídrica na cidade.....	34
Figura 7 - Obtenção de imagens por sensoriamento remoto	39
Figura 8 - Delimitação da área de estudo: o município de João Pessoa - PB..	45
Figura 9 - Bacias hidrográficas de João Pessoa - PB	46
Figura 10 - Declividade do município de João Pessoa - PB.....	48
Figura 11 - Hipsometria do município de João Pessoa - PB.....	49
Figura 12 - Distribuição da pluviosidade em João Pessoa - PB.....	50
Figura 13 - Pluviograma mensal do município de João Pessoa - PB no período de 1995 a 2014.	51
Figura 14 - Etapas do Modelo HAND	54
Figura 15 - Direção de fluxo identificada a partir do Método D8.....	55
Figura 16 - Procedimento para gerar a matriz de Direção da Drenagem Local (DDL)	56
Figura 17 - Matriz da área acumulada construída a partir da matriz DDL	56
Figura 18 - Comparação entre dois limiares de drenagem.....	57
Figura 19 - Normalização do MDE.....	58
Figura 20 - Esquema explicativo da proporção da população vulnerável.....	60
Figura 21 - Drenagens geradas a partir de MDEs de diferentes resoluções espaciais	62
Figura 22 - HAND gerado a partir de diferentes resoluções espaciais.....	63
Figura 23 - Drenagens com destaque para o rio Jacarapé	64
Figura 24 - Comparação das alturas de 1 e 2 metros geradas no HAND a partir de MDEs com resolução espacial de 30 m x 30 m e de 90 m x 90 m, com destaque para o rio Jacarapé	65
Figura 25 - Comparação das porcentagens das áreas mapeadas com MDEs com resolução espacial de 30 m x 30 m e de 90 m x 90 m	65
Figura 26 - Comparação do HAND obtido por meio da análise do município e das bacias hidrográficas.....	67
Figura 27 - Comparação das classes frente às diferentes abordagens espaciais	68
Figura 28 - Comparação das drenagens geradas a partir de diferentes resoluções espaciais (5 m x 5 m, 30 m x 30 m e 90 m x 90 m)	69
Figura 29 - Comparação do HAND gerado a partir de diferentes resoluções espaciais (5 m x 5 m, 30 m x 30 m e 90 m x 90 m) aplicado a bacia hidrográfica do rio Cabelo	70
Figura 30 - Comparação do HAND gerado a partir de MDEs com resolução espacial de 5 m x 5 m e de 30 m x 30 m aplicado nas bacias hidrográficas de João Pessoa.....	71

Figura 31 - Comparação das classes ao utilizar MDEs com resolução espacial de de 5 m x 5 m e de 30 m x 30 m	72
Figura 32 - Porcentagem da distribuição das classes mapeadas pelo HAND em cada bacia hidrográfica do município de João Pessoa - PB	74
Figura 33 - Porcentagem das áreas suscetíveis a inundações nas bacias hidrográficas de João Pessoa - PB.....	74
Figura 34 - Pontos de inundação segundo Paraíba (2015).....	76
Figura 35 - Pontos que foram visitados, em destaque na cor laranja, em conjunto com a COMPDEC-JP.....	77
Figura 36 - Imagens da visita de campo à comunidade Nossa Senhora das Neves.....	78
Figura 37 - Notícia de inundação na ponte do rio Cuiá, em João Pessoa - PB, em 31 de agosto de 2013	79
Figura 38 - Marca da altura da água na parede da residência, decorrente de inundações anteriores na comunidade Tito Silva, em João Pessoa - PB.....	80
Figura 39 - Notícia do dia 14/06/2019 sobre inundação na comunidade São Rafael.....	81
Figura 40 - Registros feitos na comunidade São Rafael, João Pessoa - PB: ...	82
Figura 41 - Proporção da população vulnerável em áreas com Ordem de prioridade “Muito Alta” de ações de Redução do Risco	83
Figura 42 - Inundação no bairro São José em junho de 2019.	85
Figura 43 - População exposta nas maiores classes dentro das bacias hidrográficas de João Pessoa - PB.....	86
Figura 44 – Sobreposição da Área com 1 m HAND e área urbana de João Pessoa em 2018.....	89
Figura 45 - Expansão da área urbana em João Pessoa entre 1990 e 2018	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Condicionantes naturais e antrópicos que provocam inundações..	28
Quadro 2 - Causas e impactos causados em rios urbanos devido à urbanização	32
Quadro 3 - Pontos de inundação na área urbana de João Pessoa de acordo com o Paraíba (2015)	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limiões de drenagem adotados para cada bacia hidrográfica e suas respectivas áreas mínimas de contribuição	66
Tabela 2 - Classificação da suscetibilidade a inundação.....	73
Tabela 3 - Bairros com os valores mais altos de população vulnerável.....	87
Tabela 4 - Área urbana em cada bacia hidrográfica em 2018	88
Tabela 5 - Porcentagem da expansão urbana em João Pessoa de 1990 a 2018	90
Tabela 6 - Áreas mapeadas pelo HAND e áreas urbanizadas por bacia hidrográfica	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APP	Área de Preservação Permanente
BHRG	Bacia Hidrográfica do Rio Gramame
BHRJ	Bacia Hidrográfica do Rio Jaguaribe
BHRMS	Bacia Hidrográfica do Rio Marés-Sanhauá
CAGEPA	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
CAU	Conselho de Arquitetura e Urbanismo
CEPED UFSC	Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil da Universidade de Santa Catarina
COMPDEC-JP	Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil de João Pessoa
CRED	<i>Centre of Research on the Epidemiology of Disasters</i>
DDL	Direção da Drenagem Local
ECP	Estado de Calamidade Pública
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
GEE	Gases de Efeito Estufa
HABITAT III	<i>The United Nations Conference on Housing and Sustainable Urban Development</i>
HAND	<i>Height Above the Nearest Drainage</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LANDSAT	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
NAU	Nova Agenda Urbana
OCHA	<i>United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PDU	Plano de Desenvolvimento Urbano
PMSB-JP	Plano Municipal de Saneamento Básico de João Pessoa

PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
RRD	Redução de Risco de Desastres
SE	Situação de Emergência
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNDRR (<i>UNDRR</i>)	<i>The United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i>
UNISDR	<i>United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	18
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1.	Desastres relacionados com fenômenos naturais.....	22
2.2.	Inundação e Urbanização.....	26
2.3.	A Redução de Riscos de Desastres (RRD).....	35
2.4.	Geotecnologias e a Identificação de Áreas Suscetíveis a Inundação.....	38
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	44
3.1.	Área de estudo.....	44
3.2.	Mapeamento das áreas suscetíveis a inundação.....	53
3.2.1.	Procedimentos do modelo HAND	53
i.	Correção do MDE.....	55
ii.	Definição da direção das drenagens locais.....	55
iii.	Definição da Área Acumulada	56
iv.	Construção da rede de drenagem	57
v.	Matriz HAND.....	58
3.3.	Processamento das imagens	58
3.3.1.	Comparação dos recortes espaciais - o município de João Pessoa e as bacias hidrográficas.....	59

3.3.2. Comparação das drenagens – MDEs com resoluções espaciais de 90 m x 90 m, 30 m x 30 m e 5 m x 5 m.....	59
3.3.3. Análise multitemporal da mancha urbana: seleção e classificação das imagens de satélite.....	59
3.4. População exposta estimada	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1. Suscetibilidade à inundação.....	61
4.1.1. Primeira aplicação do modelo HAND	61
4.1.2. Segunda aplicação do modelo HAND	66
4.1.3. Terceira aplicação do modelo HAND.....	68
4.1.4. Validação do modelo	75
4.1.5. População exposta.....	83
4.2. A expansão urbana e a suscetibilidade a inundações.....	88
4.3. Recomendações	93
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
REFERÊNCIAS	97

1. INTRODUÇÃO

Os desastres relacionados com fenômenos naturais têm ganhado espaço nas discussões científicas no cenário mundial, no que se refere às mudanças climáticas e o desenvolvimento sustentável. Tema este que foi o foco de conferências que resultaram em documentos vigentes importantes como o Marco de Ação de Sendai (2015-2030).

A atenção dada aos desastres tem sido devido a sua maior frequência e intensidade, resultando em diversos danos, sejam eles humanos, ambientais ou econômicos. Segundo Cohen e Werker (2008), desde o ano de 1900 até pouco antes da publicação desse trabalho, mais de 62 milhões de pessoas morreram no mundo em decorrência dos desastres. Esse número é, aproximadamente, a mesma quantidade de mortos nas duas guerras mundiais.

O vínculo indissociável entre as ameaças proporcionadas pelas mudanças climáticas e a vulnerabilidade de determinados grupos sociais faz com que a comunidade global se preocupe cada vez mais com o tema, juntando esforços para mitigar os impactos causados. As perdas impedem as cidades e países de alcançarem o desenvolvimento sustentável, fato que propicia a Redução de Risco de Desastres (RRD) fazer parte dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) elaborados pela Organização das Nações Unidas (ONU). Ainda, por sua relação intrínseca com as mudanças climáticas, a RRD também está presente em relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, da sigla em inglês), como o “Relatório de 1,5 °C” publicado em 2019.

As cidades desempenham um importante papel na agenda mundial frente às mudanças climáticas e, conseqüentemente, na RRD. Mais da metade da população mundial reside em áreas urbanas e a expectativa é que esse valor duplique até 2050, criando mais desafios para a sustentabilidade nas cidades (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2017). A relevância das cidades para a RRD é tanta que a gestão para redução do risco de desastres é citada na “Nova Agenda Urbana”, documento elaborado em 2016 pela ONU que vislumbra o desenvolvimento sustentável no ambiente urbano (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2017).

As mudanças no uso e cobertura da terra ocasionadas pela urbanização, quando ocorre sem diretrizes e de forma desordenada, provocam um grande impacto no ciclo hidrológico, aumentando o escoamento superficial e reduzindo a infiltração. Entre os vários fatores que afetam o ciclo hidrológico nas cidades, têm-se: o aumento de áreas impermeáveis, a disposição inadequada de resíduos sólidos, retificação de cursos d'água, remoção da vegetação, entre outros.

Ainda, a urbanização também trouxe consigo o aumento da vulnerabilidade socioeconômica que, associada ao planejamento deficiente e ao descumprimento da legislação ambiental, propiciou a habitação de áreas suscetíveis aos desastres, colocando a população em situação de risco.

Diante disso, os gestores urbanos enfrentam problemas multifacetados quando se deparam com mudanças nos padrões de precipitação. Quando as chuvas intensas ocorrem nesse espaço cercado de problemas, desastres hidrometeorológicos como enchentes, inundações, alagamentos e movimentos de massa acabam se materializando, sendo as inundações um dos mais preocupantes. Por isso, diversos estudos relacionando as inundações e a expansão urbana têm sido realizados (NOBRE, 2011; MENEZES FILHO; AMARAL, 2013; MUIS *et al.*, 2015; MENGUE *et al.*, 2017).

As inundações, segundo a Estratégia Internacional para a Redução de Desastres das Nações Unidas (UNISDR¹, da sigla em inglês), atingiram cerca de 60 milhões de pessoas no ano de 2018. Somente nesse ano, 35,5 milhões de pessoas foram atingidas em todo o mundo em decorrência dos desastres relacionados com inundações (UNISDR, 2019). Em 2019, as inundações foram os desastres mais frequentes e que causaram maiores perdas econômicas em termos globais, gerando danos de U\$ 82 bilhões (AON, 2020).

No estudo *Latin America and the Caribbean: Natural Disasters 2000-2019*, desenvolvido pelo escritório da ONU para os assuntos humanitários (OCHA), o Brasil ficou entre os 15 países no mundo com a maior população exposta a inundações. O documento traz que no período avaliado, o Brasil foi o país da América Latina mais afetado por inundações, sendo contabilizados 70 eventos afetando mais de 70 milhões de pessoas (OCHA, 2020).

¹ Atualmente é denominado *The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR)*

Moura *et al.* (2016) fizeram um levantamento dos reconhecimentos de Situação de Emergência (SE) e Estado de Calamidade Pública (ECP) na região Nordeste do Brasil e verificaram que foram registrados, no período de 2003 a 2015, 14.817 desastres relacionados com fenômenos naturais. Desses os desastres hidrometeorológicos do tipo inundação brusca ou enxurrada foram os mais frequente na região.

Já no estado da Paraíba, durante o período de 1991 a 2010, com relação as inundações bruscas, constatou-se uma quantidade de 325.963 pessoas afetadas. Além dos danos humanos, as inundações bruscas podem agravar o quadro de doenças de veiculação hídrica, o desabastecimento e racionamento de água e energia, de gêneros alimentícios (devido à perda da safra agrícola e a dificuldade do escoamento da produção) e dos medicamentos (UFSC, 2011).

A população de João Pessoa, capital do estado da Paraíba, vem enfrentando diversos problemas de vulnerabilidades no que se refere aos eventos pluviométricos extremos. Como exemplo, fortes chuvas ocorreram na capital durante o mês de junho do presente ano. Segundo a Coordenadoria de Proteção e Defesa Civil de João Pessoa (COMPDEC-JP), foram registrados 460 mm, correspondendo ao maior volume concentrado de chuvas em 96 horas nos últimos 30 anos, ocasionando diversos danos à população, provocando alagamentos, inundações e deslizamentos de terra. O Conselho de Arquitetura e Urbanismo (CAU) alertou que os problemas são fruto da falta de planejamento urbano, ressaltando que, com as mudanças climáticas, fortes chuvas serão cada vez mais frequentes, sendo urgente o fortalecimento do planejamento e elaboração de ações preventivas para mitigar os impactos (CAU/PB, 2019). É importante ressaltar que além dos problemas técnicos de planejamento e fiscalização, há antes um problema socioeconômico de falta de acesso à moradia popular e políticas públicas nessa direção.

Essa preocupação com o planejamento integrado, mostra uma urgente necessidade de mudanças em relação ao crescimento da cidade, envolvendo vários setores. João Pessoa apresentou, no início da década de 2010, uma taxa de urbanização de 99% (IBGE, 2010) que mostra uma grande relevância para discussão da relação entre crescimento e impactos causados pelos desastres relacionados com os fenômenos naturais. É de suma importância que nesse planejamento haja uma identificação das áreas que estão mais suscetíveis à

inundação, garantindo intervenções prévias e eficazes, bem como o controle preventivo de uso e ocupação da terra.

Modelos hidrodinâmicos tradicionais utilizados para a identificação de áreas suscetíveis à inundação necessitam de dados históricos e dependem de calibração, o que pode dificultar o mapeamento. Por isso, modelos simples e intuitivos que utilizam poucos dados tem se destacado, como é o caso do descritor de terreno *Height Above the Nearest Drainage* (HAND), um modelo inteiramente gratuito e que necessita apenas de um dado de entrada.

O HAND foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Rennó *et al.*, 2008), tendo alcançado visibilidade internacional, como por exemplos na Itália (MANFREDA *et al.*, 2014), nos Estados Unidos da América (LIU *et al.*, 2016) e no Canadá (McGRATH *et al.*, 2018). No Brasil, o HAND também foi utilizado para estimar a trajetória da lama no rompimento da barragem de rejeitos em Brumadinho, no início de 2019, identificando as áreas inundadas em um limite de 10 metros a partir do nível do rio (OBT, 2019). No entanto, mesmo com todo esse alcance e versatilidade, há necessidade de desenvolver pesquisas mais aprofundadas, principalmente em escala municipal da região Nordeste do Brasil.

As hipóteses em que esta pesquisa se baseia são:

- A porção da cidade de João Pessoa mais urbanizada e com áreas mais suscetíveis a inundações corresponde a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe (BHRJ).
- A Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá é mais suscetível a inundação do que a Bacia Hidrográfica do Rio Gramame.

O objetivo geral desta pesquisa consiste em identificar as áreas propensas a risco de desastre por inundação e sua inter-relação com o processo de evolução da mancha urbana no município de João Pessoa, Paraíba. Os objetivos específicos foram: avaliar as alterações nos mapas HAND quando são utilizados Modelos Digitais de Elevação (MDE) com resoluções espaciais distintas; hierarquizar as áreas com populações vulneráveis a risco de desastres por inundação; avaliar a evolução espacial da mancha urbana no município de João Pessoa no período de 1990 a 2018 e relacioná-la as áreas com muito alto risco a inundação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. *Desastres relacionados com fenômenos naturais*

O desastre é uma perturbação no meio que resulta em perdas e diversos impactos (humanos, materiais, sociais e ambientais) que excedem a capacidade da população local atingida de se recuperar com os recursos próprios (UNISDR, 2009).

A AON Benfield, uma corretora multinacional, em seu estudo relatório intitulado “*Weather, Climate & Catastrophe Insight: 2019 Annual Report*”, considerou o período de 2010 a 2019 como “a década mais cara do mundo”. De acordo com essa corretora, esses dez anos apresentaram o maior valor em perdas diretas relacionadas aos desastres, somando US\$ 98 trilhões, US\$ 1 trilhão a mais do que a última década. Só no ano de 2019, as perdas causadas por desastres relacionados com fenômenos naturais chegaram a US\$ 232 bilhões (AON, 2020).

O crescente impacto causado pelos desastres no mundo trata-se de uma preocupação mundial, principalmente por dificultar que os países alcancem o desenvolvimento sustentável. Assim, nas últimas décadas ocorreram três conferências mundiais sobre a redução do risco promovidas pela ONU: a Conferência de Yokohoma, em 1994; a Conferência de Hyogo, em 2005; e a Conferência de Sendai (2015), que representa hoje um importante papel na Agenda 2015-2030 em busca do desenvolvimento sustentável.

O termo “desastre natural” é normalmente utilizado para se referir a desastres que possuem alguma relação com fenômenos naturais. O tema, por conter a palavra “natural” no termo, acaba sendo entendido tomando como verdade que os desastres são causados pela natureza (KELMAN, 2010).

Além disso, muito ressalta-se as perdas humanas, como infraestruturas destruídas, estragos feitos por forças naturais (BLAIKIE *et al.*, 2014), o que difunde a ideia de que os seres humanos são acometidos por fenômenos naturais que causam vários prejuízos econômicos, e que não possuem nenhum controle ou participação nesses eventos.

A discussão acerca da problemática e restrição do termo “desastre natural”, substituindo o termo correto que seria “desastres relacionados com fenômenos naturais”, tem ocupado a pauta de diversos autores.

Autores como Romero e Maskrey (1993) apontam que o tema traz consigo várias interpretações, muitas das quais contribuem para a difusão de ideias errôneas acerca do assunto. Como exemplo dessas deformações, pode-se citar a suposição de que os desastres são produzidos por “forças naturais ou sobrenaturais que atuam contra os seres humanos”. Antes vistos como “castigo de Deus”, passaram a ser vistos como “castigo da Natureza”. Diante disso, muitas vezes se utiliza o termo “fenômenos naturais” como sinônimo de “desastres naturais”.

Marandola Júnior (2008) relaciona essa visão mística dos desastres com o medo que as pessoas sentiam diante da incerteza dos acontecimentos da Natureza. A imprevisibilidade de perigos naturais fazia com que se lidasse com esses acontecimentos de forma ritualística em busca de segurança. Na Antiguidade, a presença de magos ou de profetas na narrativa era muito comum frente a esse cenário, de forma que a responsabilidade de estabelecer ou retomar o controle da situação caía sobre essa figura. Com o surgimento das cidades e o aumento populacional, novas situações surgiram, assim como o modo como a sociedade era atingida pelos desastres também mudou. Então, na Modernidade, a figura do mago ou profeta que confortava e proporcionava segurança diante dessas incertezas foi substituída pela Ciência. Caberia à Ciência definir quando, onde e como irromperiam tais eventos; o objetivo era, portanto, controlar e intervir na Natureza, impedindo os eventos que causavam medo.

Em 1976, O’Keefe e colaboradores abordaram o assunto no artigo intitulado *“Taking the ‘naturalness’ out of natural disasters”*. Os autores defenderam a ideia de que o aumento de desastres estava mais relacionado ao crescimento da vulnerabilidade da população a eventos extremos do que apenas às mudanças do clima (O’KEEFE *et al.*, 1976).

Assim, antes de seguir adiante é necessário entender a diferença de fenômeno natural e de desastres relacionados com fenômenos naturais, fazendo-o sob a luz da conceituação dos dois termos. É importante entender que fenômeno natural é toda manifestação da natureza, podendo ser previsível ou não; e não necessariamente desencadeia um desastre. O desastre é provocado quando há uma interação entre um fenômeno natural com potencial extremo e as condições de vulnerabilidade diversas da sociedade (ROMERO; MASKREY,

1993; BLAIKIE *et al.*, 2014). Ora, é certo que um evento físico é necessário para que ocorra um desastre, um fator que funciona como gatilho, um pré-requisito, mas não é suficiente para que o mesmo se materialize. Para que ocorra é imprescindível estar presente o fator humano (O'KEEFE *et al.*, 1976; LAVELL, 2005).

Em contraponto ao paradigma naturalista dos desastres, o qual foca no evento físico, o paradigma social foi ganhando força nas últimas décadas, impulsionados na América Latina por estudos de Caputo *et al.* (1985), Maskrey e Romero (1985), e Wilches Chaux (1989).

Lavell (2005), que também abraça essa abordagem social, afirma que os desastres são o resultado de um desequilíbrio e que essa ruptura acontece devido a dois aspectos. O primeiro é formado pela presunção ocidental de tratar a natureza como algo a ser domado, utilizado e explorado, o que contribuiu para a formação da crise ambiental que se instala atualmente. O outro aspecto são as modalidades do “desenvolvimento” econômico, pautado no crescimento desenfreado.

Filgueira (2013) e Ludwig e Mattedi (2017) comentam que os desastres são produtos dos modelos históricos de desenvolvimento adotados. Ou, ainda, podem ser considerados, assim como a vulnerabilidade, uma manifestação de uma lacuna ou falha desse modelo, o qual está enraizado no imediatismo dos ganhos, degradação ambiental e aumento da desigualdade.

Kelman (2010) afirma que todo fenômeno natural pode ocasionar um desastre. A natureza produz os fenômenos, mas esses só são ameaças por causa das escolhas que são feitas pela sociedade. A autora ainda cita um exemplo para ilustrar claramente:

Se a chuva entra pela minha janela e estraga o meu tapete, porque eu decidi não fechar a janela, a ameaça é a chuva ou a minha falta de prevenção e ação? Se eu aprovar o desenvolvimento em uma zona de terremoto já conhecida, sem medidas de resistência, a ameaça é o terremoto ou minha decisão? (KELMAN, 2010, p. 3, tradução livre).

Ted Steinberg, em seu livro *“Acts of God: The Unnatural History of Natural Disasters in America”*, também reforça que a ação humana (ou sua ausência), contribui para aumentar a incidência de desastres. Ainda, afirma que o fato desses afetarem os pobres e as minorias em número desproporcional é apenas

uma prova de que os desastres "naturais" são realmente desastres humanos.

Ele escreveu:

Lembre-se que não há lei de ferro da calamidade, que desastre não é destino e, acima de tudo, que o ato de Deus é – visto da perspectiva da história – apenas mais um exemplo de desumanidade do homem para o homem. (STEINBERG, 2000, p. 201, tradução livre).

O risco condiciona a ocorrência de um desastre. É conceituado como a “combinação da probabilidade de ocorrência de um evento e suas consequências negativas” (UNISDR, 2009). O risco se trata sempre de um componente futuro e relaciona-se com a antecipação, refere-se à indicação de um futuro que precisa ser evitado. Assim, são simultaneamente reais e irreais. Possuem relevância porque se a ameaça fosse concretizada resultaria em destruições de tal proporção que qualquer resposta seria insuficiente. É necessário, desse modo, estar ativo hoje para evitar e mitigar problemas futuros (BECK, 2011).

A UNISDR (2009) define risco de desastre como sendo

As perdas potenciais em vidas, estados de saúde, meios de subsistência, bens e serviços, que podem ocorrer a uma comunidade ou sociedade durante um período de tempo específico (UNISDR, 2009, p. 9, tradução livre).

O risco de desastres existe em função da ameaça e da vulnerabilidade. A ameaça pode ser conceituada como a probabilidade de ocorrência de um evento físico de certa intensidade em determinado lugar, durante um período específico de exposição (CARDONA, 2004). Enquanto a ameaça trata-se do fator externo ao risco, a vulnerabilidade é o fator interno ao risco.

Muitos especialistas, após ser introduzida a vulnerabilidade como componente do risco, passaram a considerar importante analisar a “vulnerabilidade física”, a qual se define como o grau de exposição e a fragilidade ou capacidade dos elementos expostos à ação dos fenômenos. Todavia, considerar a vulnerabilidade física é olhar para o risco sob um viés tecnocrático, a partir apenas das ciências naturais, porque continua visualizando o risco através da ameaça (CARDONA, 1993).

Surgiu então a abordagem da vulnerabilidade sob a luz das ciências sociais, ao passo que especialistas começaram a se interessar sobre o tema. Foi observado que para entender o risco de desastres não é suficiente elencar quais os tipos de ameaças que podem atingir as pessoas, mas sim entender quais os

níveis de vulnerabilidade de diferentes grupos. E tal vulnerabilidade é determinada por vários processos que influenciam como as ameaças irão afetar as pessoas de diversas formas e sob as mais variadas intensidades (WISNER *et al.*, 2003).

A vulnerabilidade pode ser definida como

Um fator de risco interno do sujeito ou sistema que é exposto a uma ameaça e corresponde a predisposição intrínseca de ser afetado ou ser suscetível aos danos. Em outras palavras, vulnerabilidade representa a suscetibilidade ou predisposição física, econômica, política ou social de uma comunidade aos danos no caso de um fenômeno desestabilizador de origem natural ou antrópica (CARDONA, 2003, p. 1, tradução livre).

Segundo Acserald (2006), as condições de vulnerabilidade e de exposição aos riscos não são decorrentes dos fenômenos naturais, mas sim de processos sociais e históricos, cujas dinâmicas sociopolíticas contribuem para tornar vulnerável determinados grupos sociais.

Ainda sobre esses processos:

A ocupação dos espaços urbanos mais susceptíveis a processos naturais é reflexo de uma história marcada pelo interesse especulativo da classe dominante pela terra, pela política habitacional deficiente, técnicas construtivas inadequadas e um crescimento muito rápido das cidades, sem um planejamento adequado (ROBAINA, 2008, p.97).

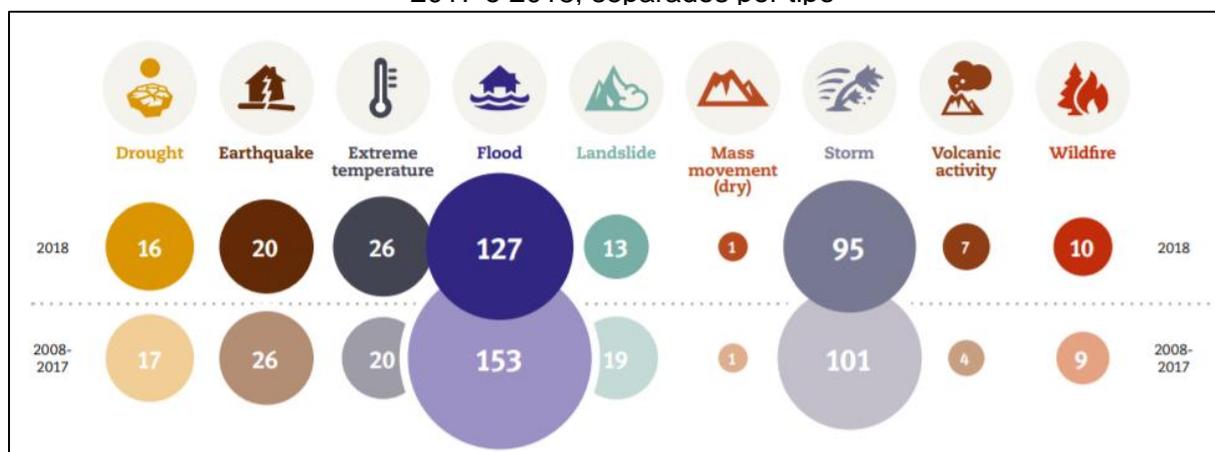
Assim, segundo Wisner *et al.*, (2003) existem vários outros fatores políticos e econômicos que se estão relacionados e implicam na vulnerabilidade, como a forma que diversos recursos socioeconômicos, por exemplo, são distribuídos entre diferentes grupos, contribuindo inclusive em formas diferentes de alocação de “bem-estar e proteção social”.

2.2. Inundação e Urbanização

A inundação é um fenômeno que nos últimos vinte anos tem crescido significativamente, resultando em intensa devastação, danos econômicos e perdas de vidas (JHA; BLOCH; LAMOND; 2012). Uma pesquisa feita pelo Centro de Pesquisa de Epidemiologia dos Desastres (*Centre of Research on the Epidemiology of Disasters – CRED*, em inglês) comparou a quantidade de desastres ocorridos de 2008 a 2017 com a quantidade ocorrida apenas no ano de 2018. Como resultado, obteve-se que enquanto no primeiro período foram

registrados 348 desastres, somente em 2018 houveram 315. As inundações aparecem nesse levantamento como o desastre mais frequente (Figura 1).

Figura 1 - Comparação das ocorrências de desastres entre os períodos de 2008-2017 e 2018, separados por tipo

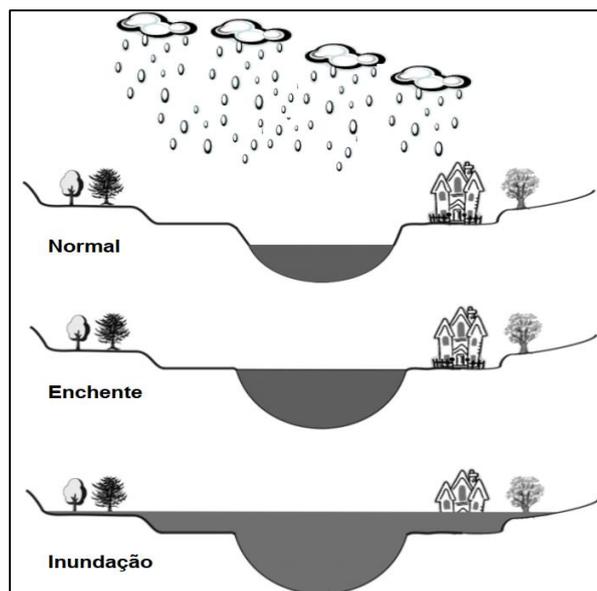


Fonte: CRED (2019).

Segundo o Relatório de Danos Materiais e Prejuízos decorrentes de Desastres Naturais no Brasil entre 1995 e 2014, formulado pelo Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED UFSC), com apoio do Banco Mundial, os danos e prejuízos oriundos de desastres hidrometeorológicos resultou em R\$ 8.757.508.990 durante esse período (CEPED UFSC, 2016).

Muito se confunde os conceitos de enchentes e inundações em razão de traduções e adaptações mal elaboradas oriundas de línguas estrangeiras. Esse fato proporcionou o estudo realizado por Goerl e Kobiyama (2005) onde os autores se dedicaram a diferenciar esses termos. Segundo os autores, cheia e enchente são sinônimos e se referem a elevação das águas dos rios até altura das suas margens, porém, sem haver transbordamento delas nas áreas adjacentes. Quando se dá o transbordamento, há inundação (Figura 2). Enquanto a enchente ou cheia é de origem natural, os problemas decorrentes com as inundações ocorrem devido à ocupação humana em áreas inadequadas.

Figura 2 - Elevação das águas do rio, demonstrando a diferença entre enchente e inundação



Fonte: Goerl e Kobiyama (2005).

Segundo Tucci (2003, p.45),

A inundação ocorre quando as águas dos rios, riachos, galerias pluviais saem do leito de escoamento devido à falta de capacidade de transporte de um destes sistemas e ocupa áreas onde a população utiliza para moradia, transporte (ruas, rodovias e passeios), recreação, comércio, indústria, entre outros (TUCCI, 2006, p. 45).

O autor supracitado ainda afirma que as inundações ocorrem quando a precipitação é intensa e o solo não é capaz de infiltrar, prejudicando a capacidade natural de escoamento. Isso faz com que “o excesso de volume que não consegue ser drenado” ocupe a várzea e inunde os locais próximos aos rios com topografia favoráveis (TUCCI, 2003).

Amaral e Ribeiro (2009) afirmam que existem alguns condicionantes naturais e antrópicos que, quando combinados, são responsáveis pela ocorrência de inundações (Quadro 1).

Quadro 1 - Condicionantes naturais e antrópicos que provocam inundações

Condicionante natural	Condicionante antrópico
Formas de relevo	Uso e ocupação irregular nas planícies e margens de cursos d'água
Características de rede de drenagem da bacia hidrográfica	Disposição irregular de lixo nas proximidades dos cursos d'água

Intensidade, quantidade, distribuição e frequência das chuvas	Alterações nas características da bacia hidrográfica e dos cursos d'água (vazão, retificação e canalização de cursos d'água, impermeabilização do solo, entre outras)
Características do solo e o teor de umidade Presença ou ausência da cobertura vegetal	Intenso processo de erosão dos solos e de assoreamento dos cursos d'água

Fonte: adaptado de Amaral e Ribeiro (2009).

O estudo das condições naturais das bacias hidrográficas possibilita a compreensão da dinâmica do escoamento das águas precipitadas nessas. Outro estudo importante é a cobertura vegetal das bacias hidrográficas. A vegetação contribui para a retenção da água no solo e reduz a velocidade de escoamento superficial (AMARAL; RIBEIRO, 2009).

Tanto as inundações quanto as enchentes são eventos naturais que podem ocorrer tanto por precipitações pluviométricas torrenciais ou intensas de longa duração, quanto por degelo nas montanhas e outros eventos climáticos extremos, a exemplo de ciclones, furacões e tornados. Porém, as atividades do homem e suas alterações no ambiente, como “impermeabilização do solo, retificação dos cursos d'água e redução no escoamento dos canais devido a obras ou por assoreamento”, causam “alterações no balanço entre as taxas de infiltração e as taxas de escoamento superficial, potencializando os efeitos desses eventos” (MARQUES; MAGALHÃES JUNIOR, 2014).

Assim, muitos problemas que potencializam a inundação começam a partir de mudanças não planejadas no uso e cobertura do solo proporcionadas por um intenso processo de urbanização nas cidades, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Processo de impacto do uso e cobertura do solo na drenagem urbana



Fonte: Barbosa (2006), adaptado de Sudersha (2002).

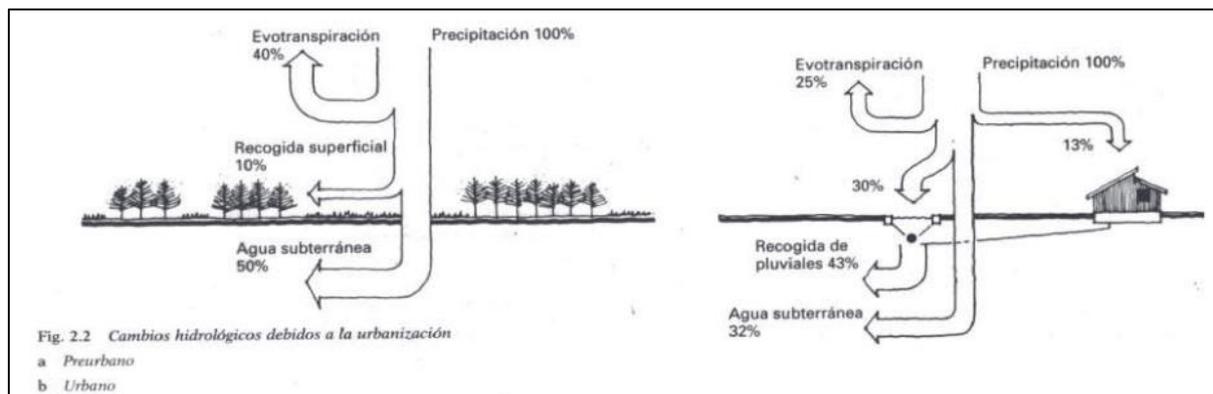
Diante disso, é importante observar que a ocorrência de desastres em áreas urbanas, como as inundações, cresce à medida que a urbanização acelera. Nesse caso, as mudanças climáticas e a urbanização são dois fenômenos que se associam e se reforçam mutuamente (JATOBÁ, 2011).

A urbanização no Brasil foi impulsionada a partir da década de 1940, sendo associada a um período de industrialização no país. Trabalhadores rurais migraram para as cidades em busca de empregos nas indústrias. No entanto, normalmente os mesmos não tinham condições financeiras para adquirir moradias, sendo então obrigados a se instalarem em construções precárias, fora das normas de engenharia. Estabelecendo-se em áreas impróprias para habitação, como, por exemplo, em Áreas de Preservação Permanente (APP). Associado a isso, o próprio processo de crescimento das cidades foi acompanhado por políticas excludentes que, ao estabelecerem as normas de uso e ocupação do solo, desconsideravam a população mais pobre, configurando um planejamento urbanístico elitista. Isso contribuiu fortemente para a ocupação de áreas suscetíveis a desastres (SERRANO JUNIOR, 2012).

Com a urbanização, há o aumento das áreas impermeáveis, afetando em duas questões importantes: o desequilíbrio térmico, formando “ilhas de calor” nas cidades; e altera também o ciclo hidrológico, pois essa redução da

permeabilidade dificulta o processo de infiltração e aumenta, conseqüentemente, tanto a velocidade quanto o volume do escoamento superficial, reduzindo também o tempo de concentração na bacia hidrográfica (DA SILVA; SANTIAGO, 2007). Existem mudanças básicas de características hidrológicas que ocorrem devido à urbanização, as quais podem ser observadas na Figura 4.

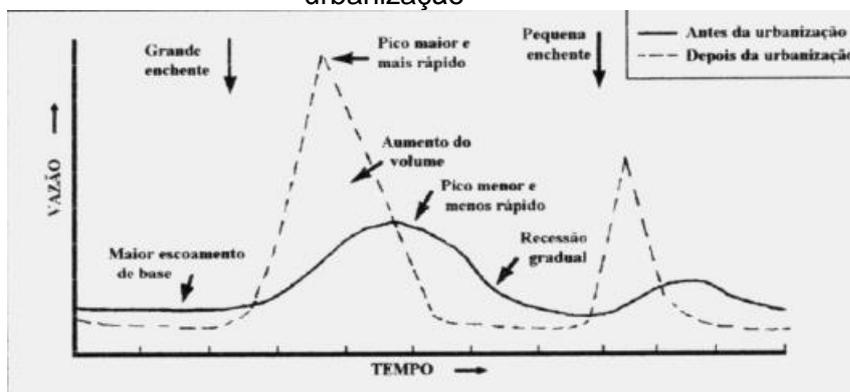
Figura 4 - Alterações hidrológicas por causa da urbanização



Fonte: Hough (1998).

Segundo Tucci (2003), a impermeabilização do solo por meio de telhados, ruas, calçadas e pátios, faz com que a água que antes infiltrava passa agora a escoar pelos condutos, aumentando o escoamento superficial. O volume de água que ficava retido na vegetação, e com a sua supressão, passa a escoar no canal. A comparação entre os picos de escoamento durante essa mudança causada pela urbanização pode ser vista na Figura 5.

Figura 5 - Impactos no escoamento superficial causados pelo aumento da urbanização



Fonte: Schueler (1987) *apud* Tucci (2003).

Muito se fala que o aumento de desastres e os impactos cada vez mais severos estão associados com as mudanças climáticas. Contudo, essa abordagem incita um pensamento de que apenas o fato físico é responsável pelos prejuízos e perdas gerados, quando há uma relação existente entre o próprio papel das cidades, as mudanças climáticas e os desastres. Braga (2012) aponta que as cidades são as mais sensíveis às mudanças climáticas e simultaneamente a maior fonte de causas antrópica das mesmas.

Grande parte da população mundial vive nas cidades – cerca de 54% residem em áreas urbanas e a estimativa até 2030 é que esse número aumente para 66% (UN, 2015a). Ainda, as cidades consomem uma grande parte – entre 60% e 80% – da produção de energia em todo o mundo. Assim, as atividades humanas que emitem gases de efeito estufa (GEE) visam atender às demandas desta população, o que faz com que o planejamento urbano e gestão das cidades seja cada vez mais protagonista nos cenários futuros de mudanças climáticas (OECD, 2010; KLUG *et al.*, 2016).

Voltando às inundações, no que se refere ao impacto de diversos efeitos da urbanização na ocorrência de desastres, cita-se o aumento da geração de resíduos sólidos causados também pelo aumento populacional nas cidades. Quando destinados de modo inadequado, podem obstruir a entrada dos condutos dos sistemas de microdrenagem e macrodrenagem, sendo um complicador para o escoamento pluvial, contribuindo para o aumento de inundações (SILVA; SANTIAGO, 2007). A questão da geração de resíduos é só um dos problemas. Bollmann (2004) elenca mais causas e impactos da urbanização sobre os rios urbanos, como é mostrado a Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 - Causas e impactos causados em rios urbanos devido à urbanização

Causa	Impacto
Impermeabilização	Maiores picos de cheia e vazões em rios
Redes de drenagem	Maiores picos de cheia a jusante
Resíduos Sólidos	Degradação da qualidade da água
	Entupimento de bueiros e galerias pluviais
Redes de esgotos sanitários deficientes	Degradação da qualidade da água
	Doenças de veiculação hídrica

Desmatamento e desenvolvimento indisciplinado	Maiores picos de cheia e volumes escoados Maior erosão Assoreamento em canais e galerias
Ocupação de várzeas	Maiores prejuízos ao patrimônio por enchentes Maiores picos de cheias Maiores custos de utilidades públicas

Fonte: adaptado de Bollman (2004).

Segundo Tucci (2003), as medidas para controle de inundações podem ser estruturais e não-estruturais. As estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial por meio de obras de engenharia para reduzir o risco, podendo-se elencar: controle da cobertura vegetal, controle da erosão do solo, reservatórios, barragens, diques ou polders e modificações no rio.

Segundo o mesmo autor, as medidas não-estruturais são aquelas em que os danos são reduzidos mediante uma melhor convivência e adaptação da população com as inundações, apresentando um custo menor do que as estruturais. Essas medidas podem ser agrupadas em: zoneamento de áreas inundáveis por meio de regulamentação de uso da terra, construções resilientes a inundações, seguro de inundações e sistemas de previsão e alerta.

Tucci (2004) aponta para a necessidade de um gerenciamento integrado das inundações urbanas, criticando que ao se elaborar planos setoriais, planejados dentro de cada uma das suas disciplinas, certamente os mesmos resultarão em prejuízos para a sociedade. O autor defende que os diversos temas relacionados com a água precisam interagir para que haja eficiência no planejamento e essa relação pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 - Visão integrada da gestão hídrica na cidade



Fonte: adaptado de Tucci (2004).

Carneiro *et al.* (2010, p. 34) endossam a crítica apresentada por Tucci ao afirmar que “o que se observa no país é a desarticulação entre os instrumentos de gerenciamento dos recursos hídricos e os de planejamento do uso do solo”. A dificuldade de implementação de um planejamento integrado se dá pela limitada capacidade institucional das cidades enfrentarem seus desafios sob uma ótica interdisciplinar e complexa.

No que concerne à legislação, o Código Florestal estabelece faixas preservadas, baseadas na largura do leito do rio, denominadas Áreas de Preservação Permanente (APP), as quais não podem ser ocupadas.

Art. 4º Considera-se Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, para os efeitos desta Lei:

I - as faixas marginais de qualquer curso d’água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de: (Incluído pela Lei nº 12.727, de 2012).

a) 30 (trinta) metros, para os cursos d’água de menos de 10 (dez) metros de largura;

b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d’água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;

c) 100 (cem) metros, para os cursos d’água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura;

d) 200 (duzentos) metros, para os cursos d’água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura;

e) 500 (quinhentos) metros, para os cursos d’água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros (BRASIL, 2012a).

A Lei Federal nº 10.257, de 10 de julho de 2001, denominada Estatuto da Cidade, dispõe de diretrizes que regulam o uso da propriedade urbana em prol do bem coletivo, da segurança, do bem-estar da população e do equilíbrio ambiental. Ela institui o Plano Diretor, sendo este o instrumento básico da política de desenvolvimento e expansão urbana, parte integrante do planejamento municipal. Em relação ao risco, o tema foi incluído de forma direta nessa lei por meio da Lei nº 12.608/2012 que incluiu no Estatuto da Cidade, no Art. 2º, capítulo VI, letra h, a ordenação e controle do solo a fim de evitar a exposição da população a riscos de desastres (BRASIL, 2001).

A Lei Federal nº 12.608, de 10 de abril de 2012, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), ocupa o protagonismo em relação ao estabelecimento de medidas preventivas e mitigadoras do risco no país. Nela são elencados diretrizes e objetivos referentes às etapas de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação voltadas à proteção e defesa civil. Um fato importante é que essa lei afirma que deve ser integrada a políticas de ordenamento territorial, desenvolvimento urbano, saúde, meio ambiente, mudanças climáticas, gestão de recursos hídricos, geologia, infraestrutura, educação, ciência e tecnologia e outras políticas setoriais (BRASIL, 2012b). Assim, destaca a importância da abordagem sistêmica para a Redução do Risco de Desastres (RRD) e sua relação com o desenvolvimento sustentável.

2.3. A Redução de Riscos de Desastres (RRD)

Narváez *et al.* (2009, p. 33) definem Gestão de Risco de Desastres como

Um processo social, cujo último fim é a previsão, redução e controle permanente dos fatores de risco de desastre na sociedade, consoante e integrada com as pautas de desenvolvimento humano, econômico, ambiental e territorial, sustentáveis (NARVÁEZ *et al.*, 2009, p. 33, tradução livre).

A evolução em tratar não a gestão dos desastres, mas sim começar a gerir o risco, foi evidenciada no Marco de Ação de Sendai (2015-2030), onde no Relatório de Avaliação Global sobre Redução do Risco de Desastres, em 2015, foi reconhecido que muitos recursos eram direcionados para a gestão de desastres, mas pouco era investido em aplicar políticas, normas e regulações

para gerir e reduzir o risco (DESSAI *et al.*, 2015). Ao reduzir o risco, foca-se em prevenção e sabe-se que a cada €1 investido em prevenção, €4 são poupados em resposta (EUROPA COMMISSION, 2016).

É importante deixar claro a diferença entre os conceitos de Gestão de Riscos de Desastres e Redução de Riscos de Desastres. A RRD se trata da política de antecipação e redução do risco, enquanto a GRD é a implementação da RRD, responsável por descrever as ações que devem ser tomadas para alcançar essa redução. Ainda, a integração da política da RRD e da prática de GRD também necessita incorporar os objetivos do desenvolvimento sustentável.

Com a mudança de paradigma de que os desastres não são naturais, também emergiu a consciência de que as perdas e os impactos só podem ser aliviados mediante a redução e gestão das condições de risco, exposição e vulnerabilidade. Reduzir o risco só é possível reduzindo a vulnerabilidade, já que não há condições de se controlar uma ameaça. Essa redução passa pela compreensão dos componentes do risco, principalmente aqueles relacionados à pobreza, às práticas e escolhas no desenvolvimento urbano, degradação ambiental e mudanças climáticas. Tais componentes potencializam as condições de risco, exposição e vulnerabilidade, dificultando, portanto, o alcance de um desenvolvimento sustentável. A RRD é parte da busca por alcançar o desenvolvimento sustentável, sendo necessário envolver toda a sociedade. Para isso é necessário buscar uma abordagem centrada nas pessoas e multisetorial, criando uma cultura de prevenção e resiliência (DESSAI *et al.*, 2015).

A relação entre a RRD e o desenvolvimento sustentável se mostra presente de forma muito clara nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), contidos na Agenda 2030. O tema aparece de forma explícita na meta 11.5 do objetivo 11, abrangendo a redução do risco a desastres de modo direto, já que essa meta se refere à busca pela redução das mortes e de pessoas afetadas por desastres, bem como das perdas econômicas. Ainda no mesmo objetivo, na meta 11.b, expõe-se a importância das cidades e assentamentos humanos adotarem e implementarem políticas e planos integrados para o aumento da resiliência a desastres. A mesma ainda cita o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030, de forma a tratar holisticamente o gerenciamento do risco. Pode-se observar a presença da resiliência e adaptação

em várias metas e objetivos do documento, fator que tem ligação intrínseca com a RRD (UN, 2015b).

Um conceito importante a se considerar em termos de RRD é o de resiliência urbana. Trata-se da capacidade de uma cidade de absorver, adaptar e responder a mudanças no ambiente urbano (DESOUZA;FLANERY, 2013). Mehmood (2016) acrescenta que a resiliência urbana é obtida por meio da adoção de uma visão proativa de planejamento, formulação de políticas e direcionamento de estratégias onde as comunidades desempenham um papel vital nessa construção por meio da sua capacidade de aprendizado, inovação e adaptação.

Em 2016, a Nova Agenda Urbana (NAU) foi adotada na Conferência das Nações Unidas sobre Habitação e Desenvolvimento Urbano Sustentável (HABITAT III). A agenda foi idealizada mediante o entendimento de que as cidades, se bem planejadas e administradas, podem contribuir para a criação de soluções para os desafios que existem tanto em países em desenvolvimento como nos desenvolvidos. O tema dos desastres se faz presente em parte do conteúdo do documento ao ser destacado a importância da implementação de políticas de redução e gestão do risco de desastres, redução da vulnerabilidade, desenvolvimento da resiliência e da capacidade de resposta, mitigação e adaptação às mudanças climáticas (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2017).

No documento, os países se comprometem a implementar políticas e planos integrados, alinhados com o Marco de Sendai (2015-2030), adotar um comportamento mais proativo do que reativo diante dos desastres, integrar a RRD ao planejamento urbano e territorial e capacitar autoridades para implementar planos de redução de risco e resposta a desastres (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2017).

As comunidades urbanas que são capazes de integrar o planejamento de uso e cobertura de terra com estratégias de mitigação dos riscos, conseguem construir locais que sejam resilientes aos desastres, capacitados para se recuperar rapidamente desses eventos adversos e se adaptar (BURBY *et al.*, 2000).

Dessa forma, o planejamento do uso e cobertura do solo é uma importante ferramenta para reduzir as perdas causadas pelos desastres e auxiliar na

formação de cidades sustentáveis. Tal planejamento é uma forma de coletar e analisar informações de áreas expostas a riscos, de maneira que as limitações desses locais sejam compreendidas pela população. O planejamento também proporciona uma base para direcionar ações para reduzir vulnerabilidades e traçar perspectivas futuras. No que concerne as decisões futuras, a partir da identificação das áreas propensas a risco de desastres, o planejamento contribui para evitar problemas associados a ocupação desses ambientes. Os chamados mapas de áreas com populações vulneráveis a risco de desastres, por exemplo, são medidas não estruturais que aparecem como uma ferramenta para identificar locais suscetíveis a desastres e identificar zonas regulatórias, como os mapas de áreas suscetíveis a inundação (BURBY *et al.*, 2000).

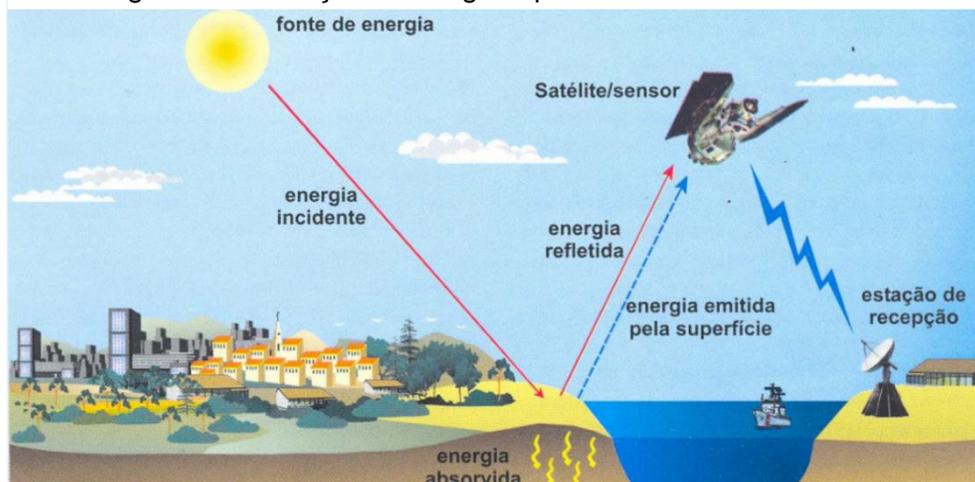
2.4. Geotecnologias e a Identificação de Áreas Suscetíveis a Inundação

Com as rápidas mudanças no ambiente urbano, constantemente uma gama de profissionais e instituições públicas necessitam de informações atualizadas sobre a infraestrutura urbana e dados que auxiliem na formulação de políticas e programas governamentais (JENSEN, 2009; LILESAND, KIEFER; CHIPMAN, 2015). Essas informações podem ser obtidas por meio de dados obtidos por sensoriamento remoto. Segundo Florenzano (2002, p.10)

Sensoriamento remoto é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados, da superfície terrestre, através da captação e do registro de energia refletida ou emitida pela superfície.

A obtenção de imagens se dá como explicada na Figura 7. A energia eletromagnética proveniente do sol é captada e registrada por sensores presentes em satélites artificiais. Essa energia é transformada em sinais elétricos que são registrados e transmitidos para estações de recepção na Terra. Quando enviados, os sinais são transformados em dados e convertidos em gráficos, tabelas e imagens. Assim, mediante a interpretação desses dados, informações sobre a superfície terrestre podem ser obtidas (FLORENZANO, 2002).

Figura 7 - Obtenção de imagens por sensoriamento remoto



Fonte: Florenzano (2002).

Um dos produtos que podem ser gerados a partir da análise de imagens de satélite para fins de planejamento urbano é a expansão urbana. Apoiando-se na interpretação dessas imagens pode-se quantificar a expansão e ainda apontar a direção do crescimento (Norte, Sul, Leste, Oeste).

As geotecnologias não são capazes de prever desastres, mas podem auxiliar comunidades a lidarem com as ameaças quando elas se manifestarem. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG)² são capazes de contribuir na etapa de prevenção e de preparação de um desastre. O conhecimento e mapeamento de áreas com populações vulneráveis a riscos de desastres permite que haja uma priorização nas áreas que apresentam situações mais graves. Coelho (2009) afirma que os SIG podem ser utilizados como instrumento de apoio na elaboração de Planos Diretores das cidades devido a sua eficiência, precisão e qualidade da informação espacializada.

Imagens de satélite e fotografias aéreas com características temporais podem auxiliar na identificação de queimadas, monitorar inundações e analisar situações de riscos de desastres. Modelos Digitais de Elevação (MDE), que são representações da superfície terrestre, podem contribuir para estudos geoambientais dispondo uma base temática para produção de diferentes mapas. Essas informações podem ser dispostas em uma base de dados em um

² Os Sistemas de Informações Geográficas são um conjunto de procedimentos computacionais que, a partir de uma base de dados integrada, permite a execução de análises e a elaboração de mapas (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

ambiente SIG para auxiliar no planejamento e na gestão de desastres (TWUMASI; SHAO; ORHAN, 2019).

A importância dos mapas de áreas com populações vulneráveis a riscos de desastres é exposta inclusive no Marco de Ação de Sendai (2015-2030) em vários tópicos. Em um deles afirma-se que para uma melhor compreensão dos riscos de desastres é fundamental, sob o contexto global e regional, o fortalecimento da modelagem, avaliação, mapeamento e monitoramento dos mesmos. Ainda, incita a integração do mapeamento e da GRD no planejamento por meio da identificação de áreas seguras para o assentamento urbano. Incentiva-se o desenvolvimento, atualização e divulgação periódica de informações sobre o risco em cada local, incluindo as informações expostas por meio de mapas de risco (UNISDR, 2015).

Tecnologias espaciais baseadas em SIG podem ser utilizadas em diferentes etapas da GRD relacionadas às inundações, podendo ser citados o planejamento, redução e preparação. Na fase do planejamento, essas ferramentas podem ser úteis na identificação e localização de potenciais problemas ou áreas suscetíveis aos desastres. Também podem ser empregadas como modelos, visando simular as consequências potenciais de um desastre. Por isso, informações derivadas de sensoriamento remoto e de imagens de satélite podem desempenhar um importante papel na RRD e na prevenção de crises (ADEDEJI; ODUFUWA; ADEBAYO, 2012).

Como exemplo pode-se citar inundações que ocorreram em Houston, Estados Unidos da América, decorrentes do Furacão Harvey. A população residente em muitas das residências afetadas não sabia que estava localizada ou próxima de uma área propensa ao risco de desastres por inundação. Ainda nos Estados Unidos da América, São Diego, na Califórnia, por sua vez, optou por uma abordagem proativa no tocante ao assunto frente a população envolvida, fazendo com que a mesma entendesse o risco e se preparasse. O Condado desenvolveu uma ferramenta chamada *“Know Your Hazards”*, um mapa interativo que, ao informar seu endereço, cada pessoa podia ver o nível do risco diante de terremotos, tsunamis e incêndios (GOVERNMENT TECHNOLOGY, 2017).

O mapeamento de áreas suscetíveis a inundações não é composto por uma única e específica metodologia, pois existem diferentes abordagens,

tratando de características mais ou menos distintas. São normalmente elaborados por organizações governamentais e usados no planejamento (SOUSA, 2012).

Sousa (2012) chama atenção para uma diferença importante entre um mapa de inundação e um mapa de risco a inundação. Enquanto o mapa de inundação trata apenas da amplitude ou profundidade da água relativa a uma inundação, considerando apenas fatores naturais do evento, os mapas de risco à inundação, muito necessários nas etapas de prevenção e controle de desastres, necessitam de mais informações, pois inclui na análise também a vulnerabilidade da população. Ou seja, os mapas de risco à inundação precisam de uma análise mais complexa, levando em conta características dos elementos em risco. Esses elementos podem ser populações, habitações ou construções de engenharia, atividades econômicas e ecossistemas.

Portanto, os mapas de risco à inundação se apresentam como um modo de ajudar comunidades a desenvolver planos que podem auxiliar na elaboração de sistemas de alerta e de resposta, servindo de base também para a produção de planos de contingência de emergência. Ainda, podem auxiliar na redução das vulnerabilidades e no aumento da resiliência, buscando a redução dos danos e perdas.

Desde o século passado, modelos hidrológicos, que têm como seus produtos mapas de inundação, têm melhorado significativamente. Esse fato possibilitou impactos positivos na sociedade e as simulações, objetivando prever e estimar as condições, auxiliam nas tomadas de decisões dos gestores (GODBOUT, 2018).

Muitas pesquisas têm se concentrado em melhorar a habilidade de previsão de enchentes e inundações, dedicando esforços a desenvolver modelos de inundação com o intuito de mitigar os efeitos desses eventos adversos.

Nobre *et al.* (2016) aponta que há vários métodos geralmente utilizados para modelar as áreas suscetíveis a inundação. Os mais utilizados frequentemente são modelos hidrodinâmicos unidimensionais, como o HEC-RAS, e bidimensionais, como o TELEMAC-2D, que utilizam equações de Saint-Venant simplificadas para descrever o movimento da água. Os mais complexos, segundo o autor citado, são modelos tridimensionais, os quais apresentam o

fluxo da água nos três eixos, aproximando-se de uma representação mais dinâmica e realista das áreas inundáveis. Contudo, esses modelos precisam de dados históricos de inundações e de calibrações específicas.

Assim, por mais que os modelos hidrodinâmicos tenham se destacado e auxiliado na elaboração de mapas de inundação, devido ao próprio aumento da capacidade de processamento dos computadores, a utilização dos mesmos na escala municipal tem encontrado entraves em função da demanda computacional e do volume de informações necessárias. Por isso, a falta de dados de inundação e a dependência por calibração acabam dificultando a utilização de modelos hidrodinâmicos tradicionais (GODBOUT, 2018; SPECKHANN, 2018). Como alternativa a isso, modelos que oferecem pouca demanda de dados e que se apresentam com maior praticidade têm ganhado destaque no que concerne à elaboração dos mapas de risco a inundação (GAROUSI-NEJAD *et al.*, 2019).

Os modelos descritores de terreno utilizam atributos hidrogeomorfológicos extraídos de um MDE que se relacionam espacialmente com as áreas inundáveis (GOERL, 2017). Como um dos pioneiros nesse tema, Rodda (2005) realizou operações incorporando informações de MDE e um *grid* de células para calcular a profundidade da inundação e a probabilidade de perdas devido a ela.

Rennó *et al.* (2008) reformulou o conceito de Rodda (2005) e desenvolveu um descritor de terreno denominado *Height Above the Nearest Drainage* (HAND). O modelo HAND, que em português pode ser traduzido como “Altura Acima da Drenagem mais Próxima”, utiliza o Modelo Digital de Elevação (MDE) como dado de entrada, ou seja, dados topográficos, para definir a altura de cada pixel na superfície de um terreno em relação à drenagem a qual esse ponto irá desaguar.

Em sua abordagem, Rennó *et al.* (2008) utilizou o modelo para mapear ambientes na terra-firme da Amazônia, portando como entrada dados obtidos do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM). Nobre *et al.* (2011), por sua vez, aplicou o modelo para identificar o potencial de inundação. Na pesquisa foi demonstrado que o modelo mostra uma alta correlação com a profundidade do lençol freático, fornecendo uma representação espacial precisa dos ambientes hídricos do solo. Os potenciais de drenagem normalizados podem ser

classificados de acordo com as distâncias verticais relativas do fluxo às drenagens mais próximas, definindo classes de ambientes de água no solo.

Posteriormente, várias pesquisas foram desenvolvidas com o HAND, principalmente em áreas urbanas. Como exemplo tem-se o estudo realizado por Nobre *et al.* (2011), agora em áreas urbanas, o projeto Megacidades, onde o modelo foi utilizado para mapear as áreas suscetíveis a inundações e deslizamentos de terra na cidade de São Paulo.

Em Manaus, Rodrigues (2011) realizou um estudo com o HAND utilizando MDE com resoluções espaciais de 30 m por 30 m e de 90 m por 90 m. O estudo demonstrou que o HAND fornece melhores resultados, quando em escala local, com resolução de 30 m, enquanto a resolução de 90 m se mostra mais adequada quando em áreas mais abrangentes.

Em Porto Alegre, Milanese, Quadros e Lahm (2017) utilizaram pontos cotados para se obter um MDE de resolução espacial de 1 m por 1 m e gerar o HAND com cinco classes de suscetibilidade à inundação, variando de muito baixa (1 m) a muito alta (0 m). Para validar o modelo, os autores cruzaram informa es de eventos históricos de inunda o referentes a notícias vinculadas às m dias (jornais e redes sociais de Internet) e quantidade de precipita o que ocorreu nas datas das publica es. Os resultados obtidos foram satisfatórios e os autores ainda enfatizaram o *software* TerraHidro, visto que se trata de uma ferramenta gratuita e desenvolvida em território nacional, pelo INPE, e proporciona aos gestores brasileiros a possibilidade de aplicar o HAND em outras áreas de estudo.

Sousa e Goerl (2018) recorreram ao HAND para os auxiliarem a estimar danos causados por inunda o em áreas urbanas, mais precisamente no município de Timbó, Santa Catarina. Com auxílio do modelo, estimaram as alturas da inunda o e, posteriormente, estimaram os danos causados. Segundo os autores, o trabalho   importante já que busca fornecer um apoio a tomada de decisões, no que se refere   prioriza o da avalia o de planos de prote o a inunda es, para a realiza o da análise custo-benefício.

O modelo HAND ganhou visibilidade internacional, sendo utilizado, por exemplo, no estudo de McGrath *et al.* (2018), no Canadá, onde foi comparado com outros modelos simplificados que proporcionam o mapeamento de áreas suscetíveis   inunda o. Os resultados obtidos pelo HAND mostraram-se

satisfatórios quando comparado aos outros modelos estudados. Os autores definem o modelo como “simples, mas efetivo método de identificação de áreas inundáveis com alto nível de precisão com os eventos históricos”.

Nos Estados Unidos da América, Liu *et al.* (2016) fizeram uso do HAND para gerar um mapa de inundação com resolução espacial de 10 m por 10 m numa escala nacional. No mesmo país, Zheng *et al.* (2018) aplicaram o modelo para os rios Blanco (Texas) e Tar (Carolina do Norte), utilizando também uma resolução espacial de 10 m por 10 m. Como resultado, eles obtiveram que a informação da geometria do rio e as curvas de classificação são compatíveis com os resultados obtidos de modelos hidráulicos e medições de medidores (ZHENG *et al.*, 2018).

Leal (2018) afirma que o HAND se mostra como um método acessível e simples para o mapeamento de áreas vulneráveis a inundações e enchentes, principalmente em áreas que o pesquisador ou profissional não pode ir a campo, por ser de difícil acesso ou necessitar arcar com vários profissionais.

Diante dos vários estudos, nacionais e internacionais, que demonstram uma satisfatória qualidade nos resultados, é importante utilizar esse modelo como ferramenta de GRD, visando uma RRD também eficaz, facilitando as tomadas de decisão e priorização de áreas com populações vulneráveis a risco de desastres por inundação. O ambiente SIG também permite a integração entre diversas características, assim, analisá-las de forma conjunta permite uma visão mais completa da área estudada, aderindo a uma compreensão complexa. Adedeji, Odufuwa e Adebayo (2012) afirmam que um planejamento espacial baseado em SIG agregado a uma gestão de uso e cobertura da terra se mostra como uma versátil ferramenta capaz de apoiar a RRD no tocante as inundações e também na preparação para garantir o desenvolvimento sustentável.

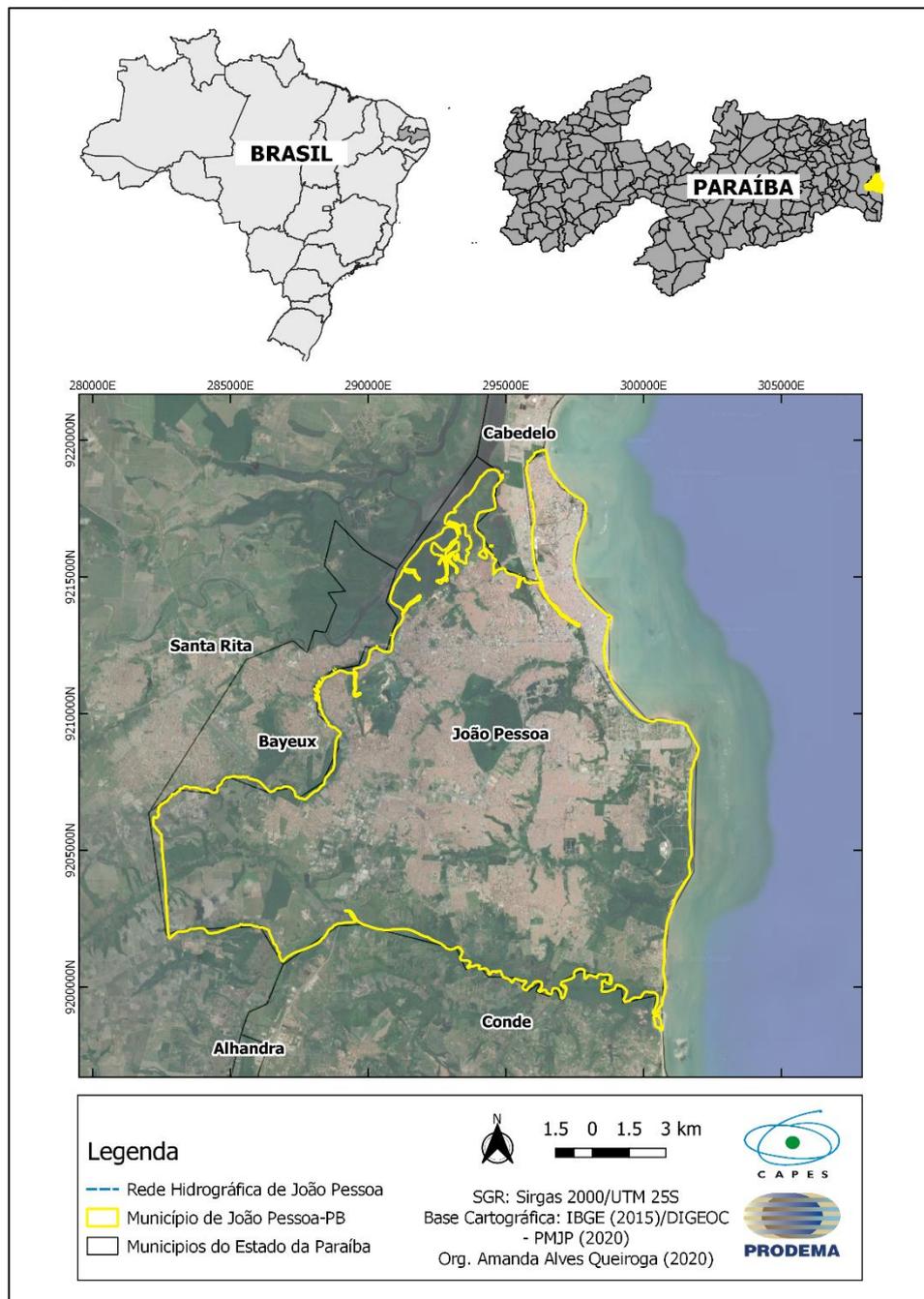
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo consiste na totalidade da área territorial município de João Pessoa, capital do estado da Paraíba. Esta área está localizada entre as coordenadas geográficas 7°02'30" a 07°19'00" de latitude Sul e 34°48'00" a 34°59'00" de longitude Oeste (Figura 8). O município está localizado na Região

Geográfica Intermediária de João Pessoa³, abrange uma área de 210,044 km² e conta com uma população estimada em 809.015 habitantes (IBGE, 2017; 2019). Limita-se ao Norte com os municípios de Santa Rita e Cabedelo; ao Sul, com o Conde e Santa Rita; a Leste, com o Oceano Atlântico; e a Oeste com Santa Rita e Bayeux.

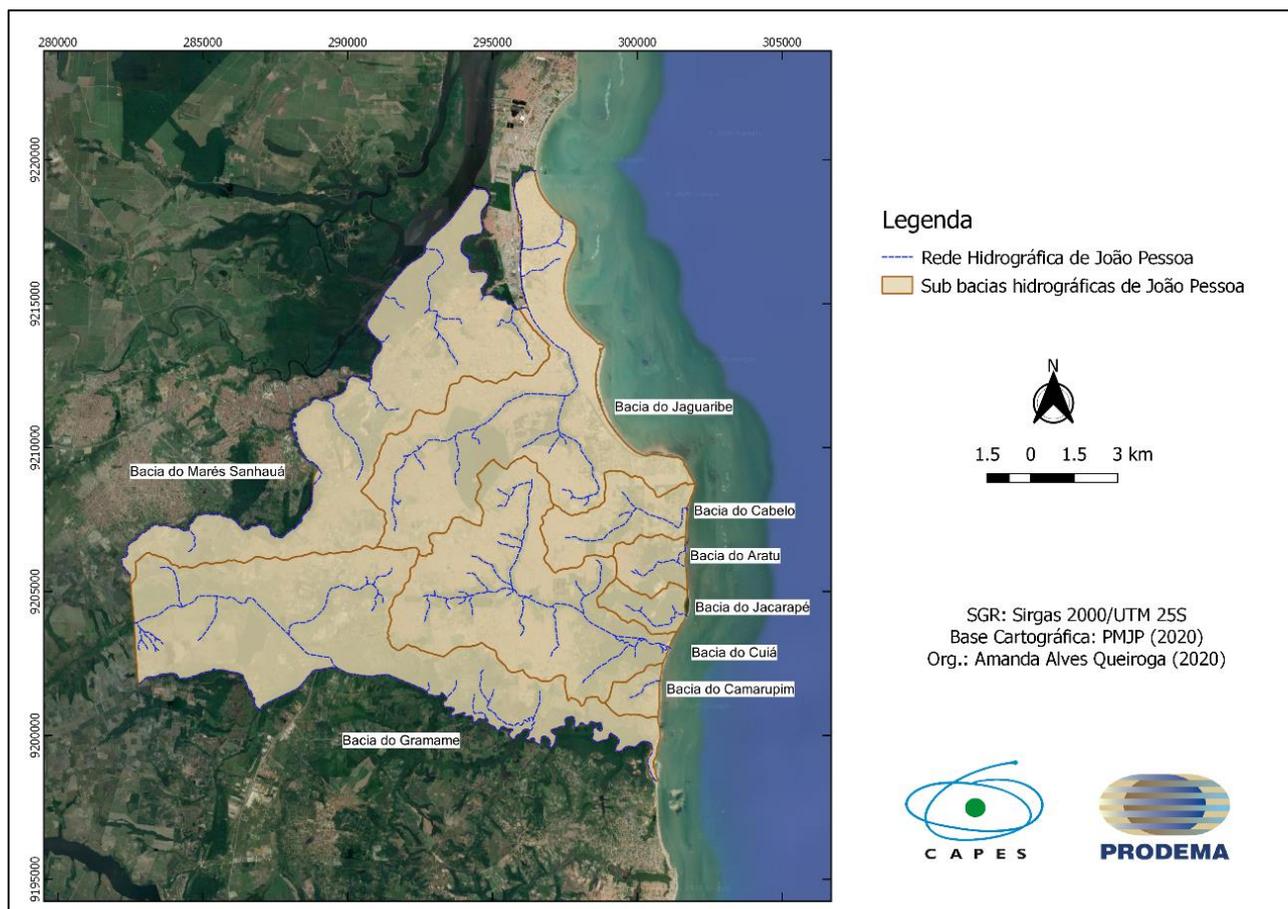
Figura 8 - Delimitação da área de estudo: o município de João Pessoa - PB



³ A Região Geográfica Intermediária de João Pessoa é composta por quatro regiões Imediatas (João Pessoa, Guarabira, Mamanguape, Rio Tinto e Itabaiana) e abrange 63 municípios (IBGE, 2017).

O município conta com sete bacias hidrográficas: Aratu, Cabelo, Camurupim, Cuiá, Jaguaribe, Marés-Sanhauá, Gramame e Jacarapé (Figura 9). Os rios mais presentes são: Paraíba, Sanhauá, Cuiá, Paratibe, Gramame, Camurupim, Timbó, Tambiá, São Bento, Mandacaru, Laranjeiras, Bomba, Cabelo, Mussuré, Jacarapé, Mumbaba, Aratu e Jaguaribe (QUEIROZ, 2009).

Figura 9 - Bacias hidrográficas de João Pessoa - PB



Grande parte dos rios que cruzam o perímetro urbano de João Pessoa sofrem com a degradação provocada por ações antrópicas. A bacia hidrográfica do rio Gramame (BHRG) é a principal responsável pelo abastecimento de água da capital, possuindo o sistema de represamento Gramame-Mamuaba com capacidade de 56.937.000 m³. Essa bacia hidrográfica promove o abastecimento de, aproximadamente, 70% da população da grande João Pessoa (PARAÍBA, 2015).

Em relação a geologia, o município é inserido no domínio da Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba e ocupa uma faixa de cerca de 9.000 km² ao longo do litoral entre os estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. Estendendo-se ainda por 24.000 km² pela plataforma continental, sendo a bacia sedimentar mais setentrional da costa brasileira. A geomorfologia é caracterizada pelos domínios dos Tabuleiros Litorâneos e da Baixada Litorânea (PARAÍBA, 2015; SILVA, 2014).

São importantes também se destacar a declividade (Figura 10) e hipsometria (Figura 11) do município. É importante identificar o comportamento do terreno, já que as partes mais altas são onde a água ganha energia para percolar e as mais planas onde há acumulação. Ou seja, esses dois parâmetros influenciam no fluxo, direção e sentido do escoamento superficial rumo ao canal fluvial. O município apresenta 43,3% da sua totalidade composta por declividades que variam de 0-3%. Com relação à hipsometria, percebe-se que a parte Oeste do município apresenta uma maior altitude e, ao Norte, Sul e Leste, são áreas com menores altitudes.

Figura 10 - Declividade do município de João Pessoa - PB

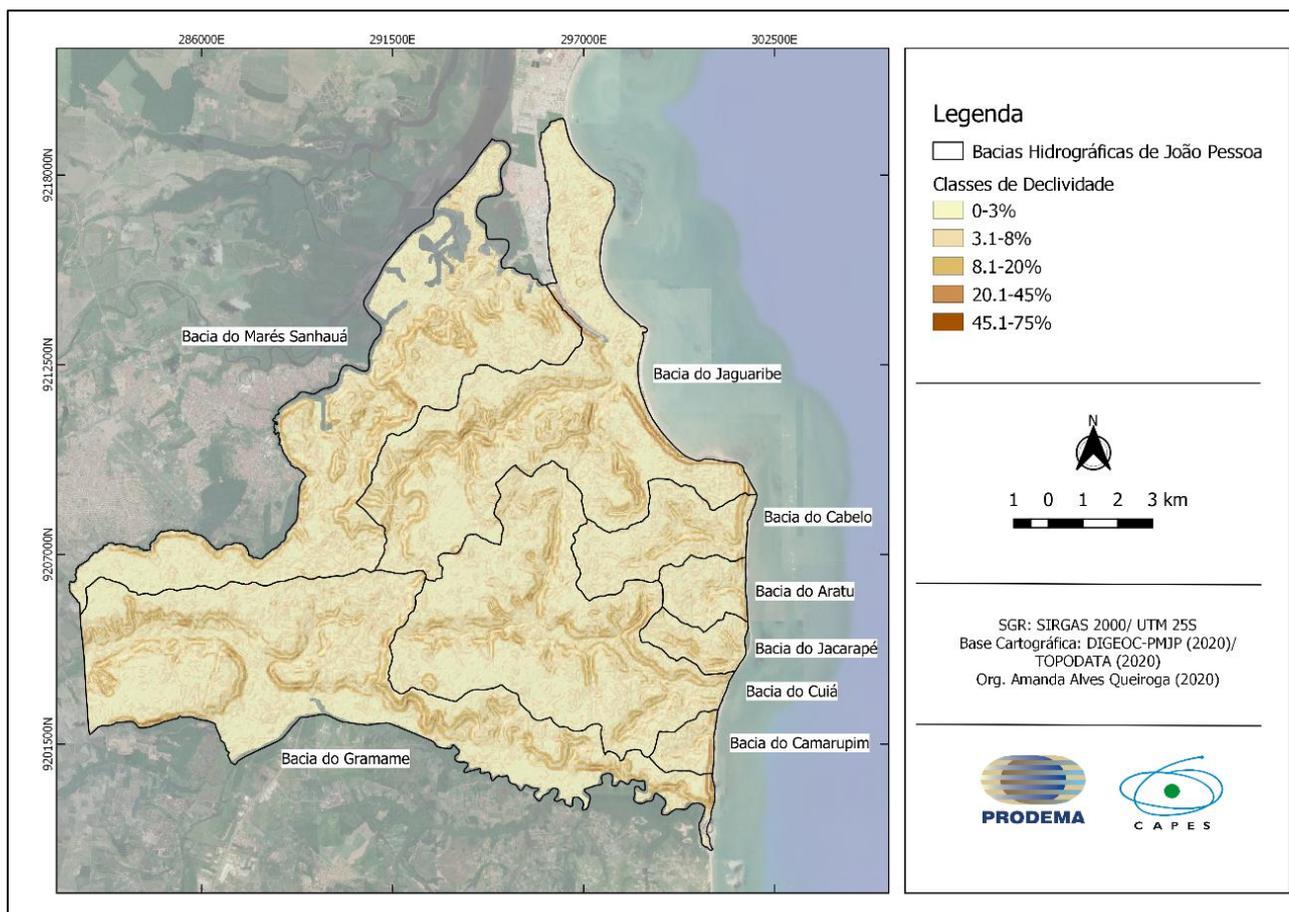
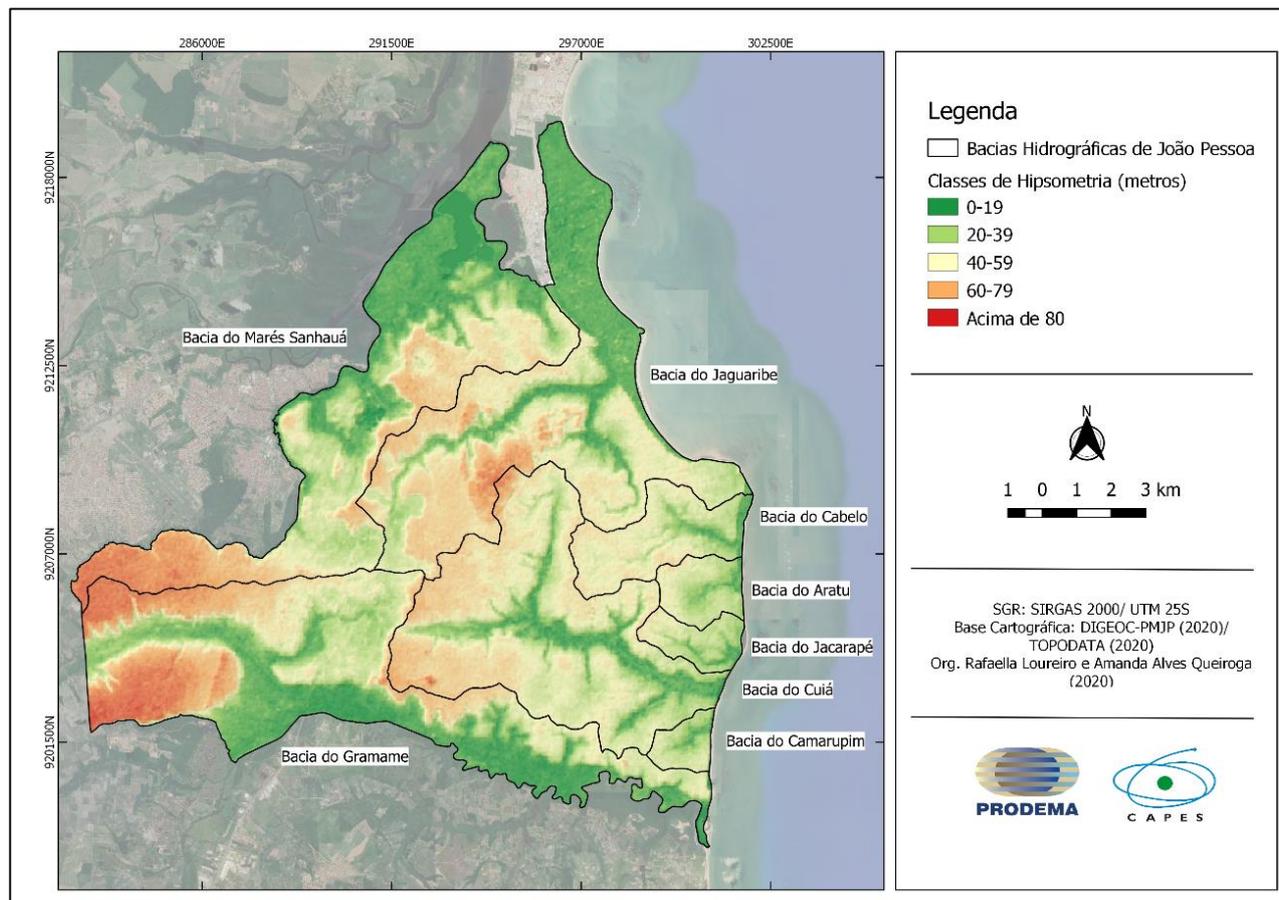


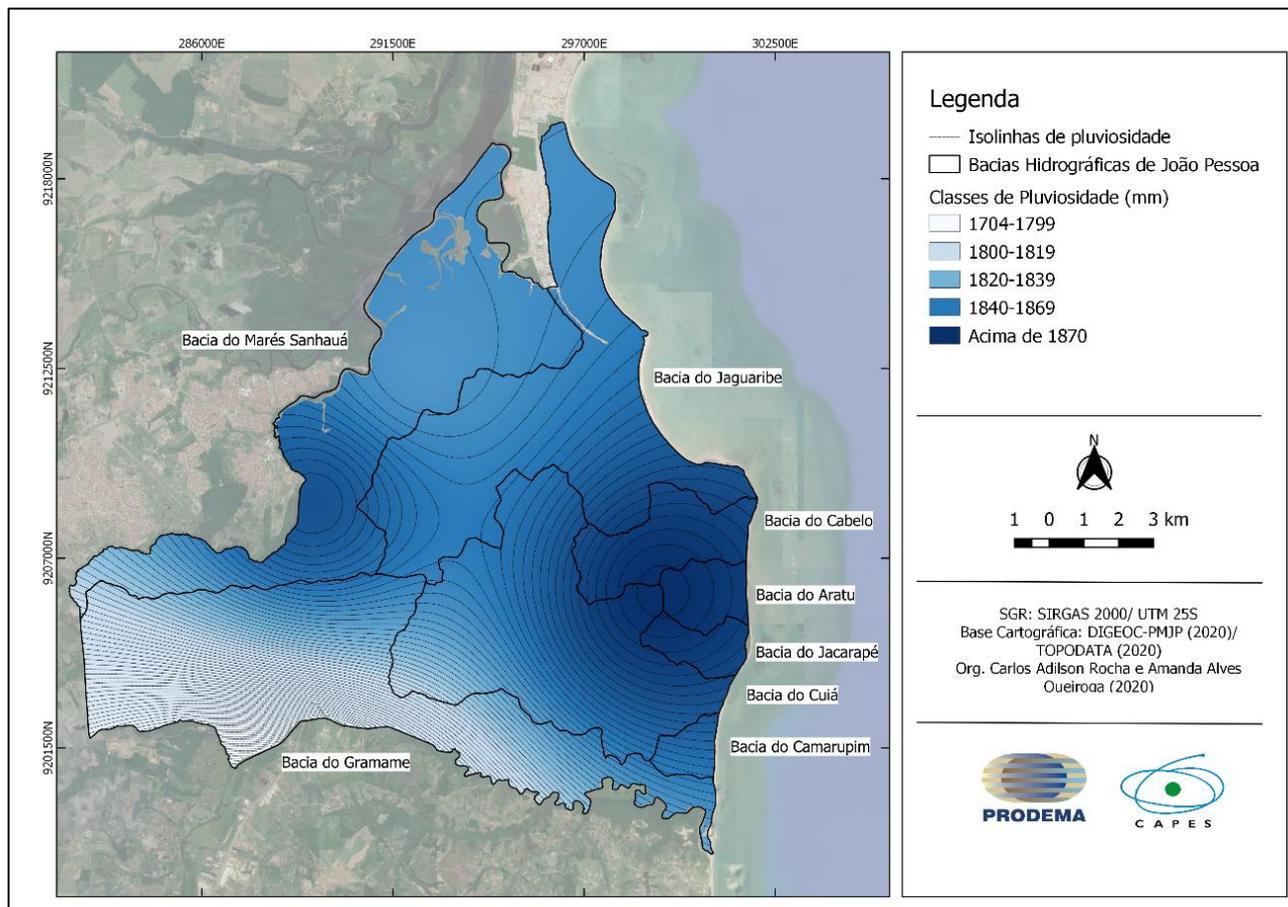
Figura 11 - Hipsometria do município de João Pessoa - PB



A localização geográfica do município tem como atuantes os sistemas atmosféricos oriundos do Oceano Atlântico e que dão origem a um tipo climático classificado por Mendonça e Danni-Oliveira (2007) como Clima Tropical Litorâneo do Nordeste Oriental. Caracteriza-se como um clima úmido e quente, diferente dos climas mais secos no interior da região. A temperatura média anual é 26,4 °C e a precipitação pluviométrica, 1.919,8 mm. Os meses mais secos são novembro e dezembro, enquanto os mais chuvosos são junho e julho (EMBRAPA, 2017).

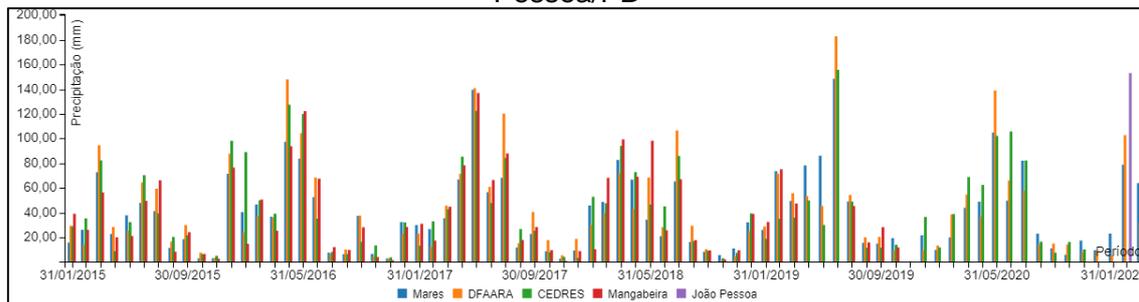
Em relação a espacialidade da pluviosidade, observa-se na Figura 12 que as chuvas se concentram mais na parte sudoeste do município, contemplando as bacias hidrográficas dos rios Cabelo, Aratu, Cuiá e Jacarapé. Valores mais altos também são observados ao leste, na BH dos rios Marés-Sanhauá. A parte sudeste do município é onde tem menores valores, ao Sul da bacia hidrográfica do rio Gramame.

Figura 12 - Distribuição da pluviosidade em João Pessoa - PB



Segundo Silva *et al.* (2017), há uma variabilidade média da pluviosidade de 1.330 mm a 1.890 mm por ano. O período chuvoso vai de abril a julho e o mais seco corresponde aos meses de setembro a fevereiro (PEREIRA *et al.*, 2012). A Figura 13 apresenta as precipitações que ocorreram no período de 2015 a 2021, segundo dados da Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs).

Figura 13 - Precipitação de 2015-2021 nos postos pluviométricos de João Pessoa/PB



Fonte: AESA (2021).

Sabendo dos parâmetros físicos-naturais que se destacam, também é importante avaliar a dinâmica de urbanização que ocorreu no município. Entender como se deu a expansão e qual o sentido do crescimento é de suma importância para o planejamento urbano, associando isso aos seus aspectos físico-naturais.

Com relação ao seu processo de crescimento, João Pessoa nasceu às margens do rio Sanhauá e na década de 1920, iniciou-se a implantação de equipamentos urbanos, tornando essa década um marco no início da modernização. A partir das décadas de 1940 e 1950, O município passou a se expandir de forma mais intensa. A abertura da Avenida Epitácio Pessoa, prolongamento da Av. Pedro II e a abertura da Av. Cruz das Armas, juntamente com a construção de conjuntos habitacionais, direcionou o crescimento da cidade para a parte Leste, Sudeste e Sul (MAIA, 2001).

O processo de expansão urbana se intensificou na década de 1970 e, como em muitas cidades do Brasil, apresentou um crescimento desordenado e sem planejamento. Um dos grandes propulsores desse crescimento foi à ligação centro-orla marítima. Com a expansão da cidade em direção ao mar, o local da ocupação primária foi sendo abandonado não só pelos moradores com maior poder aquisitivo, como também pelo Estado, que passou a investir nas zonas costeiras mediante a implantação de melhor infraestrutura e serviços (PITA, 2012).

Em 1974, a Prefeitura Municipal de João Pessoa elaborou o Plano de Desenvolvimento Urbano (PDU), o qual contribuiu para a elaboração do Código de Urbanismo. Esse documento instituiu as normas ordenadoras e

disciplinadoras referentes ao planejamento urbano de João Pessoa, induzindo o crescimento para a Zona Sul, Cidade Universitária e para a Orla. Isso contribuiu para a aprovação de loteamentos e infraestrutura básica pelo loteador, mas não houve preocupação no que se referia a drenagem urbana (PARAÍBA, 2015).

A população de alto poder aquisitivo inicialmente estava instalada nos bairros de Tambiá e Trincheiras, mas depois dessa expansão, passou a residir em áreas com ampla infraestrutura como nos bairros dos Estados, Expedicionários, Miramar, Tambaú, Cabo Branco e outros, enquanto a população mais pobre se localizava em sítios mais baixos, como no Baixo Roger, Centro, Mandacarú, Varadouro e Ilha do Bispo. A ocupação de áreas baixas e inundáveis nos vales dos rios Jaguaribe e Sanhauá foi uma alternativa encontrada pela população à margem do mercado habitacional (PARAÍBA, 2015; SANTOS, 2015; PITA, 2012).

Assim, na década de 1980 intensificou-se o processo de favelização. A parcela mais pobre da população, desprovida de recursos financeiros, passou a ocupar áreas com baixa especulação imobiliária e ambientalmente frágeis (como encostas e planícies de inundação), contribuindo para uma exposição dessa população aos riscos de desastres (SANTOS, 2007).

O crescimento em direção à Zona Sul proporcionou um adensamento populacional acelerado nos conjuntos habitacionais. Ao passo que se construía esses conjuntos, redes de drenagem iam sendo implantadas (PARAÍBA, 2015).

A população do município vem crescendo muito nas últimas décadas e, segundo o Plano de Governo da Cidade de João Pessoa do ano de 2013, a população cresceu de 597.937 para 723.515 habitantes, entre 2000 e 2010, com uma taxa de crescimento de 21%, uma das maiores entre as capitais do Nordeste. Esse crescimento demanda também de avanços de serviços essenciais (educação, saúde, habitação, mobilidade, emprego, coleta de resíduos sólidos, saneamento, entre outros). Contudo, João Pessoa chegou a 2010 com condições de vida de sua população entre as mais insuficientes das capitais nordestinas (terceira menor posição em relação a renda per capita; quarta maior posição em relação à taxa de analfabetismo; quinta posição no ranking dos Índices de Desenvolvimento Humano – IDH) (PARAÍBA, 2015).

Um estudo realizado por Rafael *et al.* (2009) analisou transformações que ocorreram no espaço urbano na capital entre os anos 1990 e 2001 e de 2001 a

2006, por meio da observação de imagens de satélites. No primeiro período, notou-se uma taxa de crescimento da área urbana de 1,85%; no segundo período, 0,66%. O primeiro período foi marcado por um crescimento mais espalhado, ocupando espaço nas áreas livres, com vetores de expansão concentrados no litoral norte e centro sul do município. No segundo, o crescimento foi mais lento, mas a evolução do setor do imobiliário não seguiu esse ritmo. Houve, portanto, uma substituição de um padrão horizontal de moradias por um vertical, podendo citar como exemplo de bairros que passaram por essa verticalização, Tambaú, Bessa, Manaíra e Bancários.

3.2. Mapeamento das áreas suscetíveis a inundação

3.2.1. Procedimentos do modelo HAND

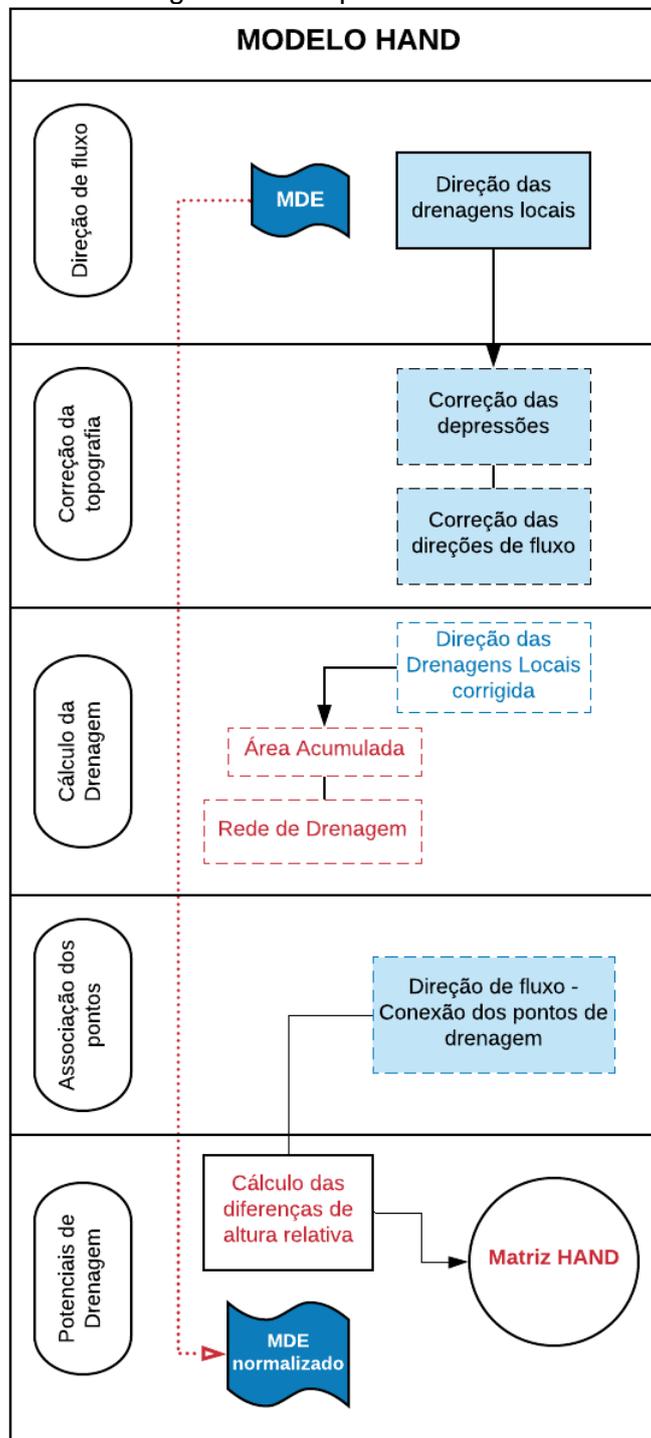
O modelo HAND é um descritor de terreno cuja aplicação permite a identificação de áreas suscetíveis a inundação. O único dado de entrada necessário para gerar o modelo HAND é o Modelo Digital de Elevação (MDE). Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) tem sido largamente utilizados para análises ambientais, já que os mesmos possuem diversas informações relacionadas ao terreno que podem auxiliar no planejamento, como: drenagens, curvas de nível, direção e acumulação de fluxo, declividade, entre outros.

O único dado de saída gerado pelo HAND é um MDE normalizado em relação a drenagem – enquanto o MDE inicial toma como referência absoluta o nível do mar, o produto do HAND tem como referência o canal de drenagem mais próximo ao *pixel* avaliado. A classificação distribuída da área acontece da seguinte forma: menores valores de distância vertical indicam maior suscetibilidade à inundação, enquanto maiores valores significam menor suscetibilidade (NOBRE *et al.*, 2011; LEAL, 2018). Por exemplo, se um ponto está a 1 metro HAND em relação ao rio, o mesmo possuirá maiores chances de ser atingido por uma inundação do que outro ponto que está a 3 metros HAND referente ao mesmo rio.

O HAND, inicialmente proposto por Rennó *et al.* (2008), é gerado em cinco etapas (Figura 14), que serão descritas a seguir de forma detalhada. As etapas até gerar a matriz HAND foram realizadas no *software* livre TerraView 4.2, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por meio do

plugin TerraHidro. Para gerar o modelo são realizadas etapas na ferramenta *Hydrological Tools*.

Figura 14 - Etapas do Modelo HAND



Fonte: adaptado de Rennó *et al.* (2008).

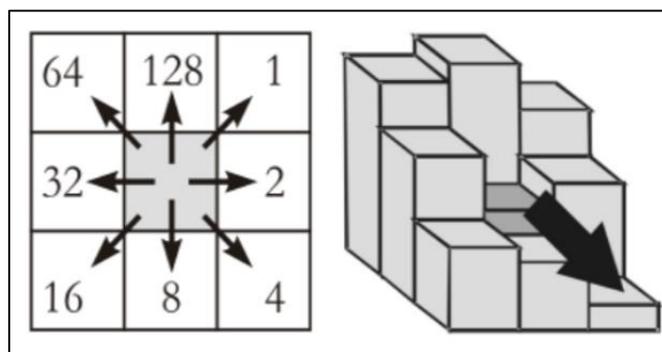
i. *Correção do MDE*

A qualidade do produto final gerado pelo modelo HAND depende muito da qualidade do MDE, já que esse é o único dado de entrada. O MDE precisa ser corrigido inicialmente, devido a inconsistências que possam existir. Por exemplo, áreas com cobertura vegetal densa podem apresentar certo grau de mascaramento do relevo real. Por isso, as falhas de depressão, ou *sinks*, devem ser preenchidas e as falhas de superestimação, cortadas. A eliminação dos *sinks* possibilitará que a propagação de fluxo ocorra em todas as células do MDE (RENNÓ *et al.*,2008).

ii. *Definição da direção das drenagens locais*

Corrigido o MDE a etapa que se segue é a definição da Direção - da Drenagem Local (DDL) (em inglês *Local Drain Directions – LDD*). Aqui, a direção do fluxo de drenagem é delineada para cada ponto. A conexão hidrológica de cada *pixel* é definida por meio da comparação deste com seus os oito *pixels* vizinhos, onde têm-se oito opções de direção de escoamento (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW). O Método D8 (*Deterministic Eight-Neighbors*), proposto por O'Callaghan e Mark (1994), compara os 8 vizinhos daquele ponto, considerando a declividade. Assim, o fluxo ocorrerá em direção daquele que apresentar a maior declividade, conectando hidrológicamente os pontos (Figura 15). Se o ponto estiver na borda da grade, o valor atribuído a ele será nulo.

Figura 15 - Direção de fluxo identificada a partir do Método D8

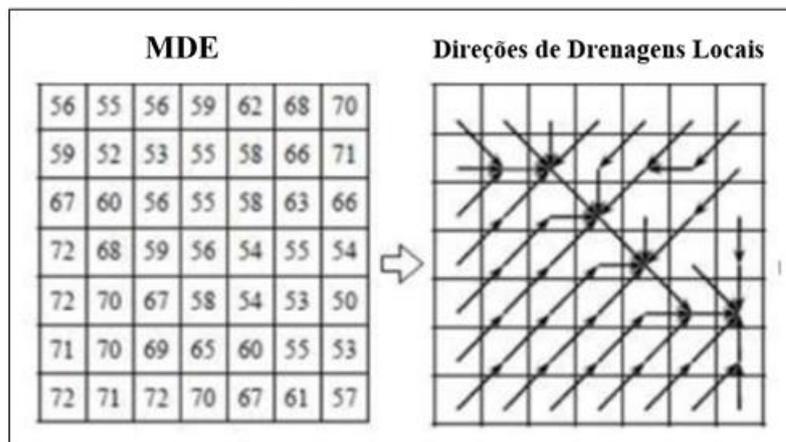


Fonte: Buarque (2009).

Então, essa etapa resulta em uma matriz DDL (Figura 16), onde a direção do escoamento superficial ocorre por meio da conexão hidrológica dos pontos

com base na força gravitacional, sempre em direção ao ponto mais baixo (NOBRE *et al.*, 2011).

Figura 16 - Procedimento para gerar a matriz de Direção da Drenagem Local (DDL)

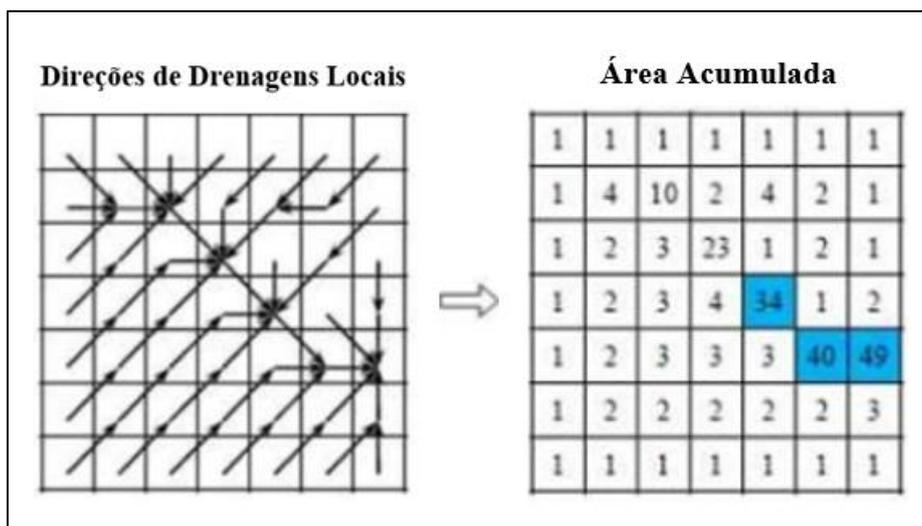


Fonte: adaptado de Milanesi, Quadros e Lahm (2017).

iii. Definição da Área Acumulada

Após a definição da matriz DDL, é possível construir o *grid* de área acumulada (Figura 17). O valor de cada ponto é atribuído com base no número de *pixels* da matriz DDL cuja trajetória de escoamento converge para o ponto considerado (RENNÓ *et al.*, 2008; NOBRE *et al.*, 2011).

Figura 17 - Matriz da área acumulada construída a partir da matriz DDL



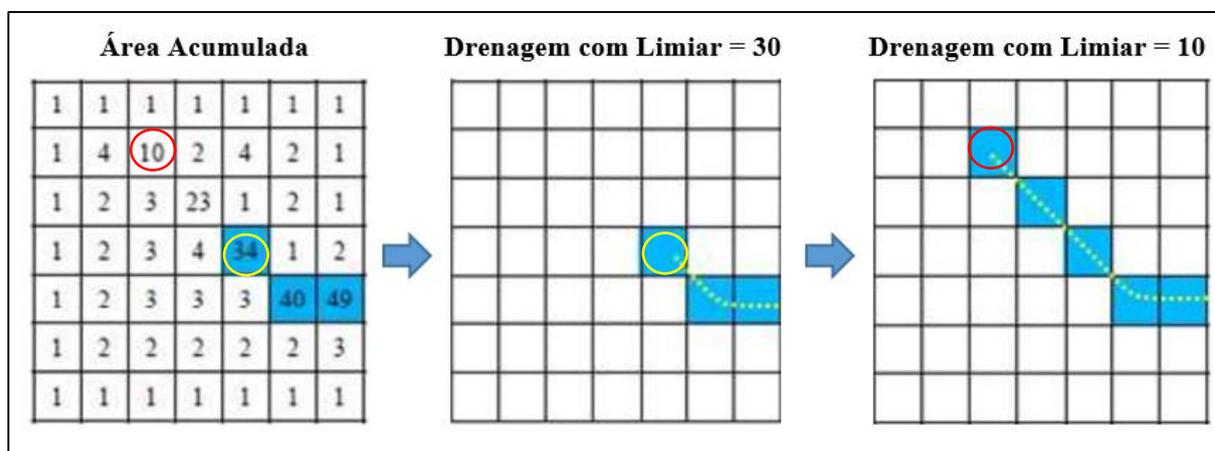
Fonte: adaptado de Milanesi, Quadros e Lahm (2017).

iv. *Construção da rede de drenagem*

Depois de construída a matriz de área acumulada, é definido um limiar mínimo para as células do *grid* onde se inicia o canal principal de drenagem (*headwater*). Essa abordagem, inicialmente proposta por O'Callaghan e Mark (1984), faz com que a rede de drenagem seja definida pelos pontos que possuem uma área de contribuição maior que o limiar mínimo considerado (RENNÓ *et al.*, 2008; MOMO, 2014).

Quanto maior o limiar, menos pontos serão considerados e menos densa será a drenagem (MOMO, 2014). Na Figura 18 é possível observar que o limiar igual a 10 apresenta uma rede de drenagem mais densa do que quando escolhido o limiar 30. Quando escolhido o limiar 10, o canal começa na célula com o valor acumulado igual a 10, já quando escolhido o limiar 30, o canal se inicia no ponto com valor acumulado 34. Milanesi *et al.* (2017, p. 679) afirmam que “o limiar define o nível de detalhamento da rede de drenagem, ou seja, o acúmulo acima desse limiar é considerado drenagem”.

Figura 18 - Comparação entre dois limiares de drenagem



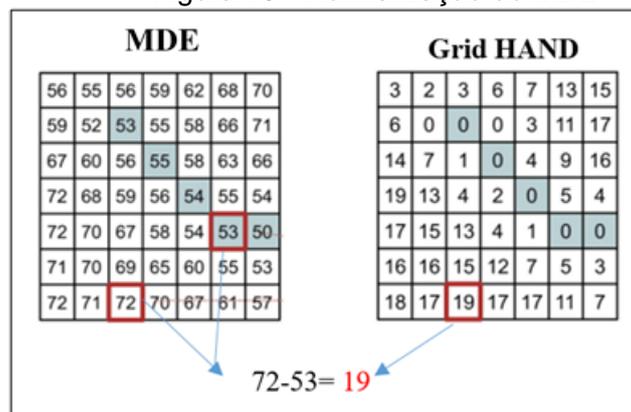
Fonte: adaptado de Milanesi, Quadros e Lahm (2017).

O limiar de drenagem é o único parâmetro ajustável durante todo o processo para gerar o produto final. É necessário que valores sejam atribuídos até que a rede de drenagem gerada represente de maneira fiel à rede de drenagem real (RENNÓ *et al.*, 2008).

v. *Matriz HAND*

A última etapa é a construção do MDE normalizado, em que cada ponto tem sua altimetria referenciada a partir da rede de drenagem. É calculada a diferença entre os valores do MDE original e do MDE normalizado. Então, atribui-se aos pontos que compõem a rede de drenagem o valor zero, enquanto os demais recebem valores iguais a diferença calculada (Figura 19).

Figura 19 - Normalização do MDE



Fonte: adaptado de Rennó *et al.* (2008).

A imagem gerada foi dividida em 5 classes, com base no grau de suscetibilidade a inundação. Sabe-se que muitas vezes os recursos são limitados, sendo necessário priorizar algumas áreas em detrimento de outras. Por isso, visando auxiliar na tomada de decisão, foi estipulada uma ordem de prioridade para ações de redução do risco: muito baixa (5 metros), baixa (4 metros), média (3 metros), alta (2 metros) e muito alta (1 metro). Para elaboração do mapa HAND, a imagem foi importada do *software* TerraView para o *software* livre Qgis 3.10.5.

Para validar o modelo, foram utilizados dados do Plano Municipal de Saneamento Básico de João Pessoa (PMSB-JP), produzido em 2015 (PARAÍBA, 2015). O Plano possui o mapeamento de pontos de alagamento e inundação no município, sendo 98 de alagamento e 15 de inundação. Ainda, foram feitas visitas em campo com a presença de um agente da COMPDEC-JP em pontos com histórico recorrente de inundação.

3.3. *Processamento das imagens*

Como mencionado anteriormente, o MDE é o único dado de entrada necessário e, portanto, a sua qualidade interfere na qualidade do produto final.

Por isso, foram utilizados três MDEs, apresentando três resoluções espaciais e fontes distintas, a fim de comparação. O de 90 m x 90 m foi adquirido no *site* da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); o de 30 m x 30 m no *site* do projeto TOPODATA, a partir de dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM); e o de 5 m x 5 m foi cedido pela Diretoria de Geoprocessamento e Cadastro (DIGEOC), da Prefeitura Municipal de João Pessoa (PMJP). Também se optou por comparar diferentes recortes espaciais, a fim de observar qual unidade de análise seria mais adequada.

3.3.1. Comparação dos recortes espaciais - o município de João Pessoa e as bacias hidrográficas

A primeira análise foi feita usando o MDE de 30 m x 30 m de resolução espacial, adquirido no *site* do projeto TOPODATA, e com o recorte do município de João Pessoa. Posteriormente, partindo do mesmo MDE, foi realizada a análise com o recorte com todas as bacias hidrográficas do município, visando observar qual recorte seria utilizado.

3.3.2. Comparação das drenagens – MDEs com resoluções espaciais de 90 m x 90 m, 30 m x 30 m e 5 m x 5 m

Foram utilizados MDE com resoluções espaciais distintas para comparar a similaridade das redes de drenagem geradas na etapa “*Construção da rede de drenagem*” e as drenagens reais, disponibilizadas pela DIGEOC, PMJP.

3.3.3. Análise multitemporal da mancha urbana: seleção e classificação das imagens de satélite

Para a análise multitemporal da expansão urbana foi necessário obter as imagens de satélites da série *Land Remote Sensing Satellite (Landsat)* no *site* da *United States Geological Survey (USGS)*, disponíveis gratuitamente.

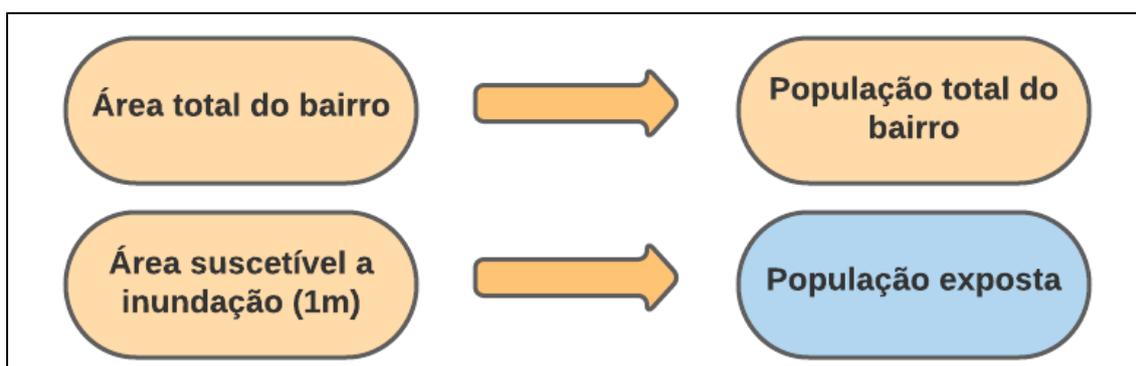
Foram escolhidas duas imagens: uma do dia 27 de junho de 1990 (Landsat 5) e outra do dia 28 de setembro de 2018 (Landsat 8). A escolha seguiu o critério de encontrar imagens com pouca cobertura nebulosa.

A classificação foi feita mediante interpretação visual diretamente em tela. Criou-se um *layer* para a mancha urbana de 1990 e outro para a de 2018. Posteriormente, formou-se polígonos por meio de recursos de edição, em uma escala de trabalho de 1:125.000 em tela, agrupando-os em camadas do tipo *shapefile*. Após identificadas e quantificadas, as manchas foram sobrepostas a fim de verificar os locais de expansão. Em seguida, foi feita uma nova sobreposição das manchas da imagem mais recente (2018) com as áreas com “muito alta ordem de priorização de ações de redução de risco”, mapeadas pelo HAND.

3.4. População exposta estimada

Para saber a estimativa da população exposta ao risco às inundações nas áreas mapeadas pelo HAND, considerou-se a área da classe de 1 metro HAND. Foi construída uma relação entre a área total e população de cada bairro do município e a área dessa classe (1 m HAND) e a população correspondente a essa proporção (Figura 20). Para isso, a quantidade de habitantes por bairro foi obtida por meio de dados presentes no Censo de 2010⁴, elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2010). A área total de cada bairro foi calculada no Qgis a partir do *shapefile* disponibilizado pela Prefeitura Municipal de João Pessoa.

Figura 20 - Esquema explicativo da proporção da população vulnerável



Como exemplo, supõe-se que o bairro analisado seja o do Miramar. A área total é de 1,334 km² e a sua população total é de 9.500 habitantes. A

⁴ Os dados foram coletados do Censo Demográfico de 2010 pois a pandemia da COVID-19 impediu que o Censo Brasileiro de 2020 fosse realizado no referido ano. Até abril de 2021 ainda não havia previsão para a elaboração do censo mais atualizado devido à gravidade da pandemia no país.

área propensa a risco de desastres por inundação muito alto é de 0,297 km². Portanto, por meio de uma regra de três simples obtêm-se que a população exposta é de 2.114 (22,5%).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Suscetibilidade à inundação

4.1.1. Primeira aplicação do modelo HAND

O primeiro teste de aplicação do modelo HAND foi feito comparando os MDEs com resoluções espaciais de 90 m x 90 m e 30 m x 30 m, tomando o município de João Pessoa como análise (Figuras 21 e 22). O limiar de drenagem adotado para o MDE de 30 m x 30 m foi de 1.000 e para o de 90 m x 90 m o limiar adotado foi de 200. É preciso enfatizar que o limiar de drenagem foi ajustado tomando como referência a rede hidrográfica real do município, disponibilizada pela DIGEOC da PMJP. Os valores foram ajustados até que a drenagem se aproximasse visualmente ao máximo da rede oficial. O mapa HAND foi gerado considerando cinco classes, variando à altura de 1 metro a 5 metros acima da drenagem mais próxima.

Foi possível observar que a variação dos resultados existiu em função da diferença de resoluções espaciais dos MDE e, conseqüentemente, do limiar de drenagem escolhido para cada um deles. No mapa gerado a partir do MDE de resolução de 90 m x 90 m, percebe-se a generalização de algumas informações, distorcendo a drenagem gerada pelo *software* TerraView e a rede hidrográfica real, como está apresentado na Figura 22, o que influencia diretamente nos resultados do mapa HAND.

Figura 21 - Drenagens geradas a partir de MDEs de diferentes resoluções espaciais

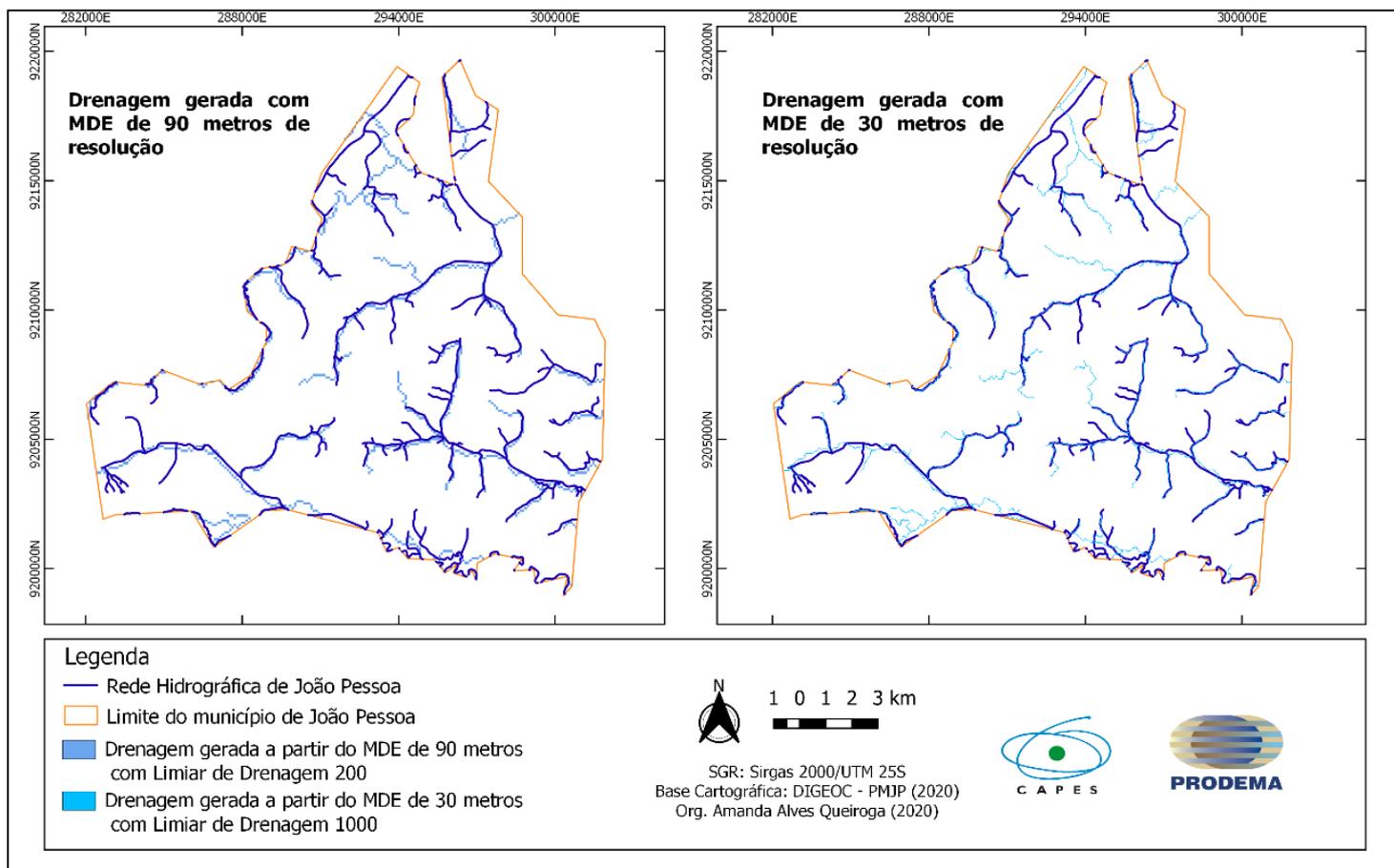
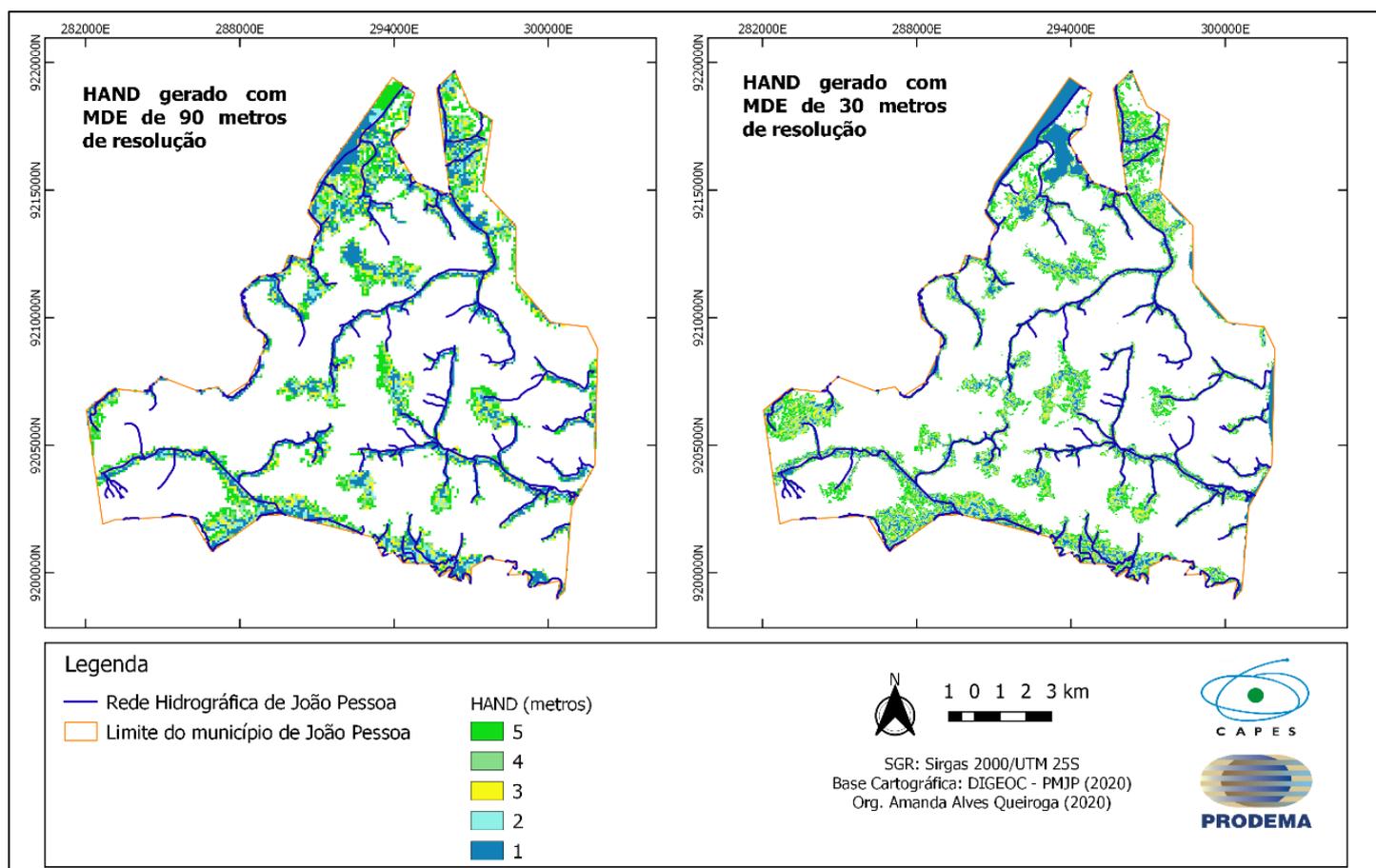


Figura 22 - HAND gerado a partir de diferentes resoluções espaciais



A Figura 23 propicia uma melhor visualização nas distorções ao destacar o rio Jacarapé. Na Figura 24, ainda tomando como exemplo o rio Jacarapé, considerou-se as classes 1 e 2 (1 metro HAND e 2 metros HAND) a fim de comparação. Percebe-se uma maior continuidade no HAND gerado a partir do MDE de 30 m x 30 m do que no de 90 m x 90 m, quando consideradas as classes mais altas de suscetibilidade a inundação.

Figura 23 - Drenagens com destaque para o rio Jacarapé

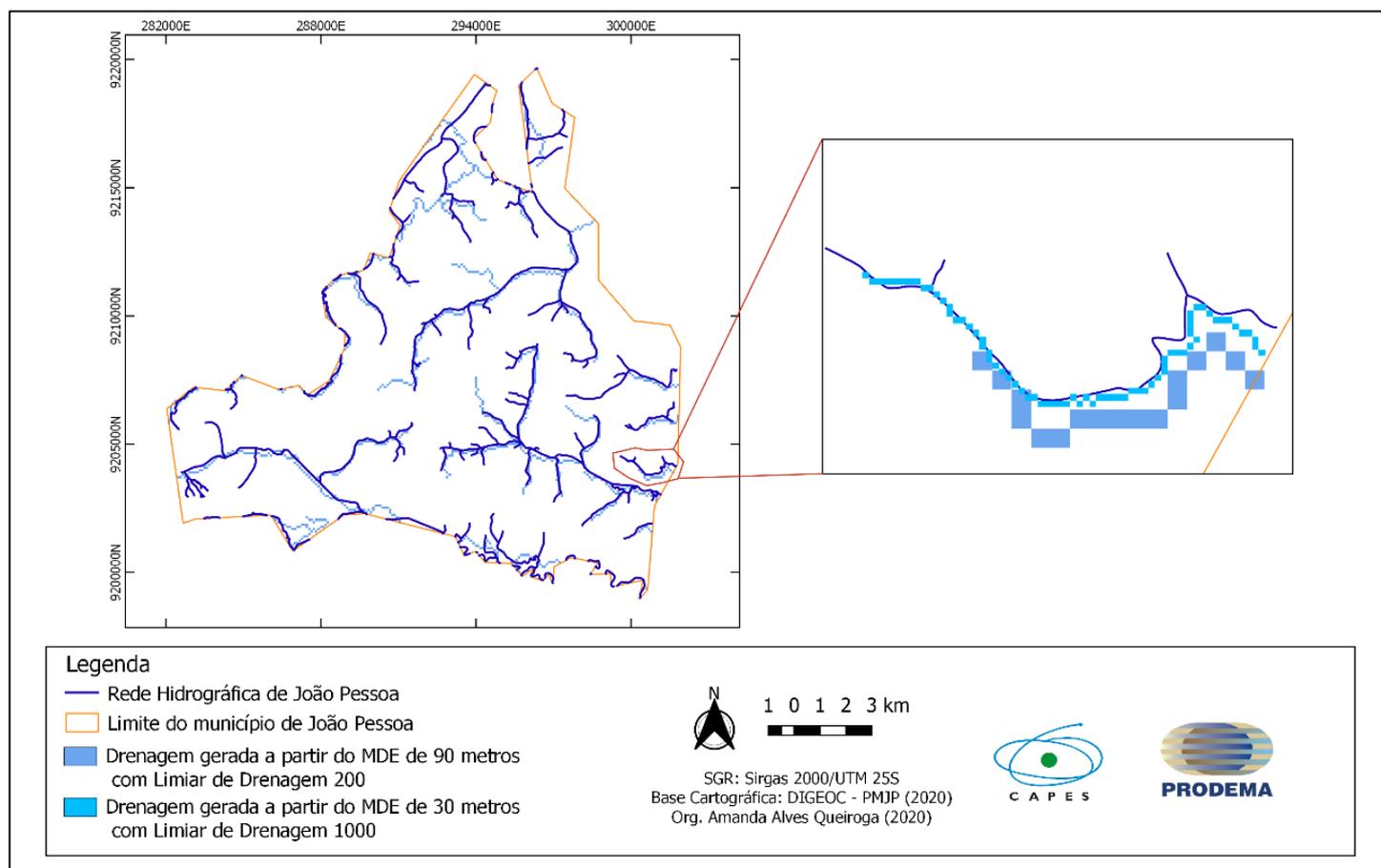
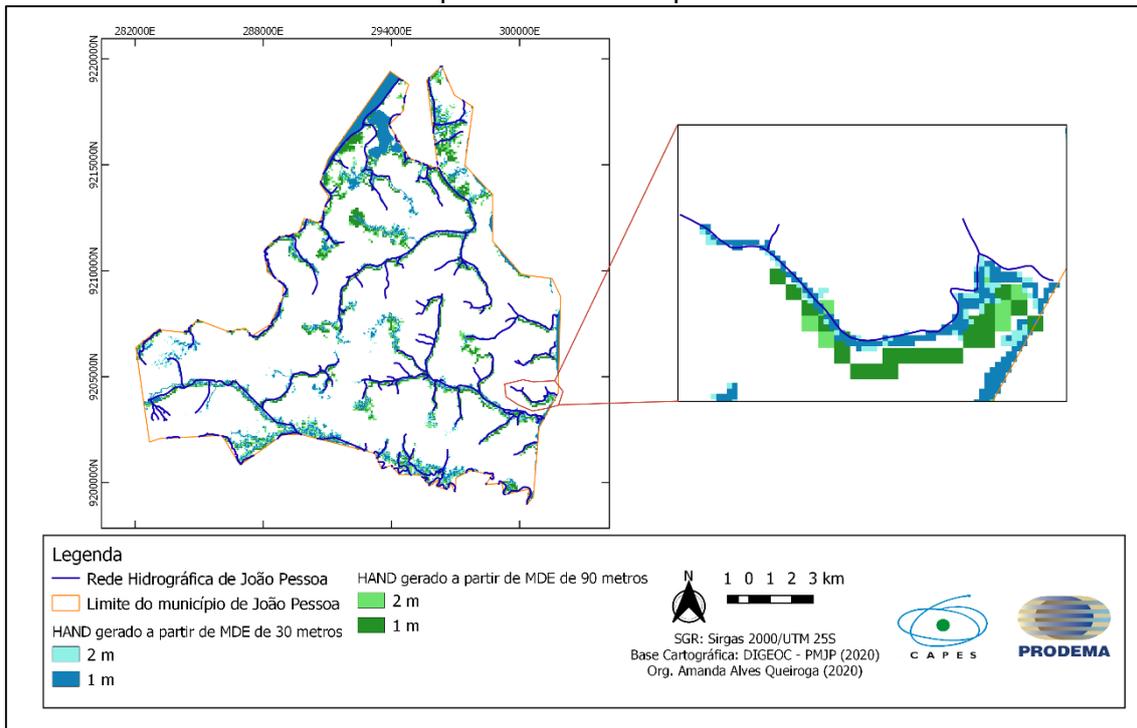
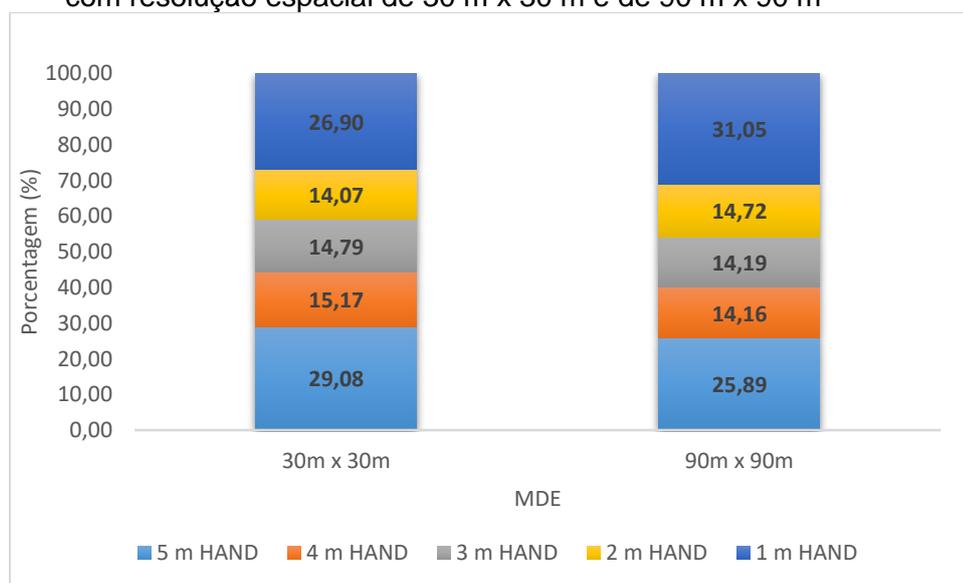


Figura 24 - Comparação das alturas de 1 e 2 metros geradas no HAND a partir de MDEs com resolução espacial de 30 m x 30 m e de 90 m x 90 m com destaque para o Rio Jacarapé



No gráfico apresentado na Figura 25, nota-se que quando utilizados *pixels* de 30 m x 30 m, há um aumento de 3,18% na porcentagem de áreas da classe 5 metros HAND e uma redução de 4,14% nas da classe 1 metro HAND quando comparado ao de 90 m x 90 m.

Figura 25 - Comparação das porcentagens das áreas mapeadas com MDEs com resolução espacial de 30 m x 30 m e de 90 m x 90 m



Fonte: elaboração própria (2020)

Com os resultados obtidos, vislumbrou-se que ao considerar todo o município na análise ocorre a sub e superestimação de algumas informações. Isso se dá porque, como o limiar de drenagem é o único parâmetro ajustável do modelo, é preciso que se estabeleça um valor para todo o município, forçando uma generalização da drenagem e, conseqüentemente, do HAND. Por isso, a segunda etapa foi avaliar as diferenças apresentadas ao levar em conta outro recorte espacial.

4.1.2. Segunda aplicação do modelo HAND

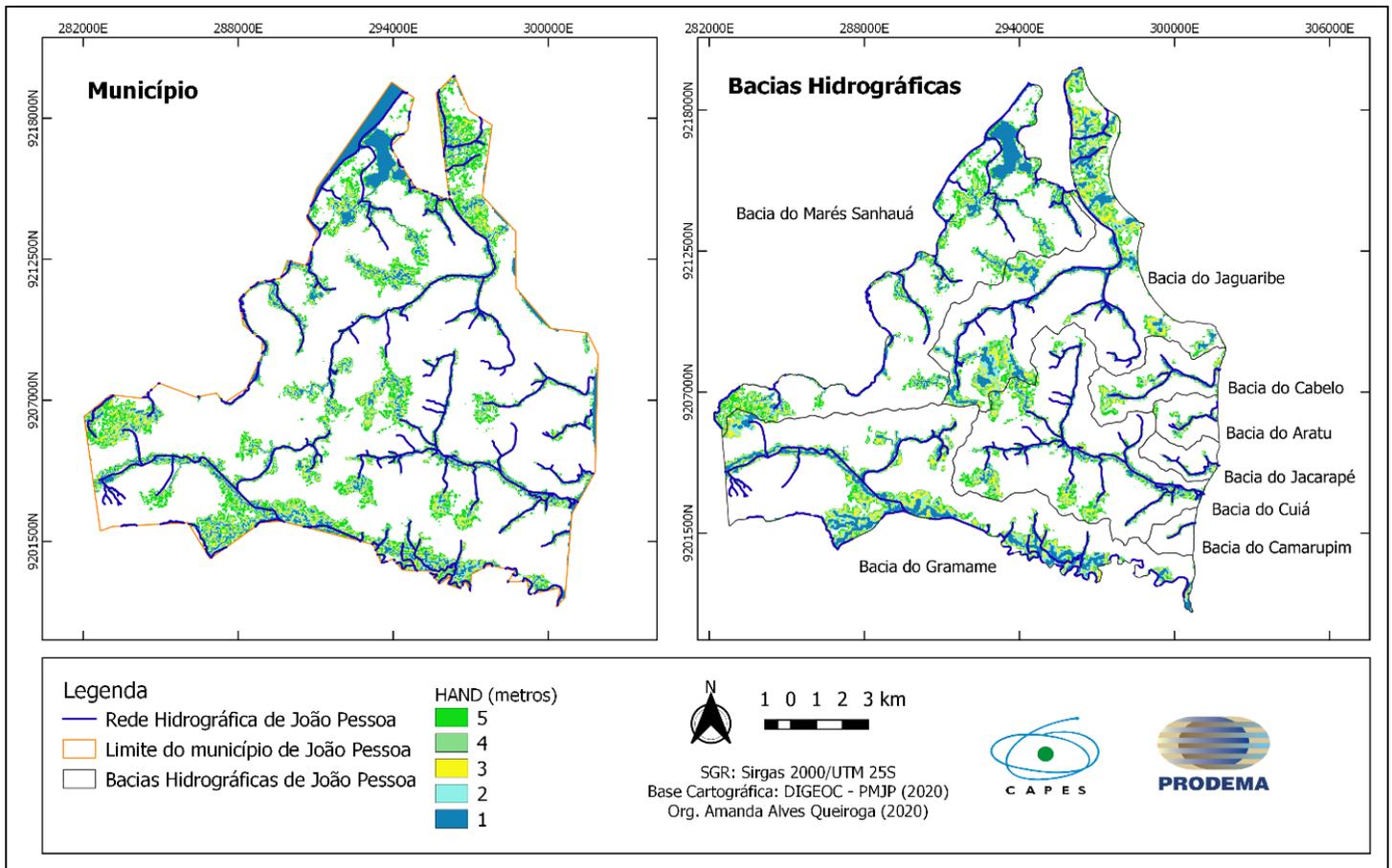
Levando em conta que o MDE com resolução espacial de 30 m x 30 m apresentou resultados mais satisfatórios, este foi escolhido para que se pudesse realizar a segunda aplicação do modelo. Nesta, foram utilizadas diferentes abordagens espaciais (Figura 26). Na primeira abordagem, o HAND foi aplicado considerando todo o município de João Pessoa. Na segunda, o HAND foi aplicado a cada bacia hidrográfica (Aratu, Cabelo, Camurupim, Cuiá, Jaguaribe, Marés-Sanhauá, Gramame e Jacarapé) e depois foi realizado um mosaico, juntando todas as informações. O limiar de drenagem adotado para João Pessoa continuou o mesmo valor adotado anteriormente ao ser utilizado o MDE de 30 m x 30 m (1.000). Porém, os limiares de drenagem adotados para cada bacia hidrográfica foram distintos, como mostrado na Tabela 1. Os valores foram ajustados para cada bacia hidrográfica, separadamente, até que a drenagem gerada pelo *software* TerraView se assemelhasse ao máximo da drenagem real.

Tabela 1 - Limiares de drenagem adotados para cada bacia hidrográfica e suas respectivas áreas mínimas de contribuição

Bacia hidrográfica	Limiar de drenagem	Área mínima de contribuição (km²)
Aratu	400	0,36
Cabelo	1.000	0,90
Camurupim	800	0,72
Cuiá	900	0,81
Gramame	1.000	0,90
Jacarapé	400	0,36

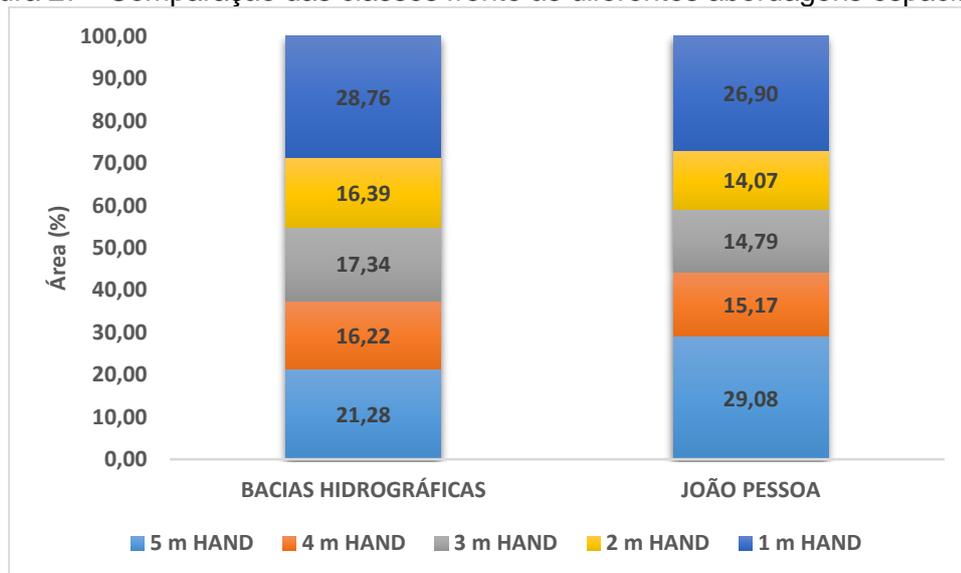
Jagaribe	600	0,54
Marés-Sanhauá	800	0,72

Figura 26 - Comparação do HAND obtido por meio da análise do município e das bacias hidrográficas



Ao comparar as duas abordagens, utilizando uma resolução espacial de 30 m x 30 m, houve um aumento da porcentagem das classes de 4 metros HAND, 3 metros HAND, 2 metros HAND e 1 metro HAND ao realizar a análise por bacia hidrográfica (Figura 27). Observou-se ainda uma maior continuidade nas informações, com uma separação mais visível das classes.

Figura 27 - Comparação das classes frente às diferentes abordagens espaciais

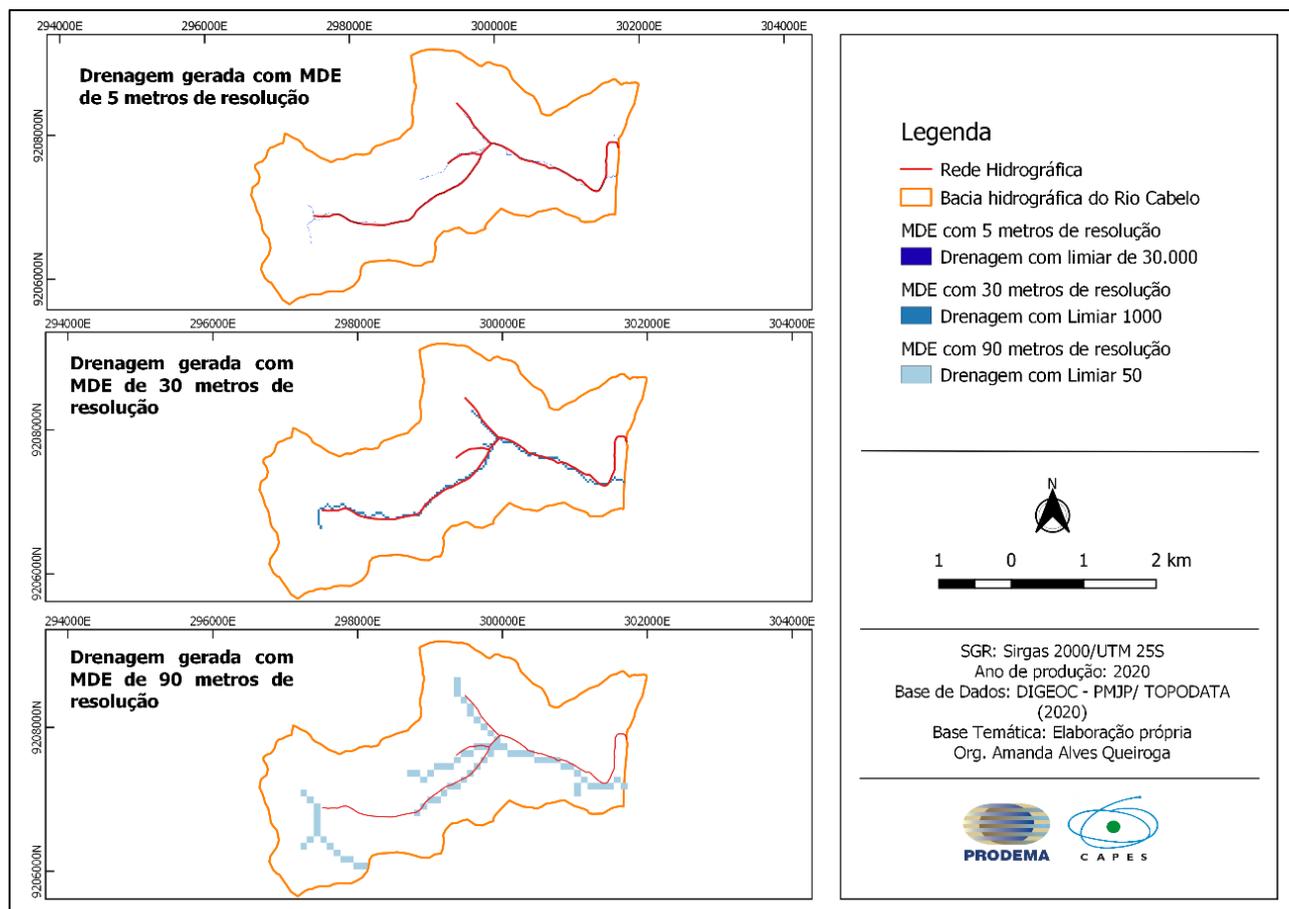


Fonte: elaboração própria (2020).

4.1.3. Terceira aplicação do modelo HAND

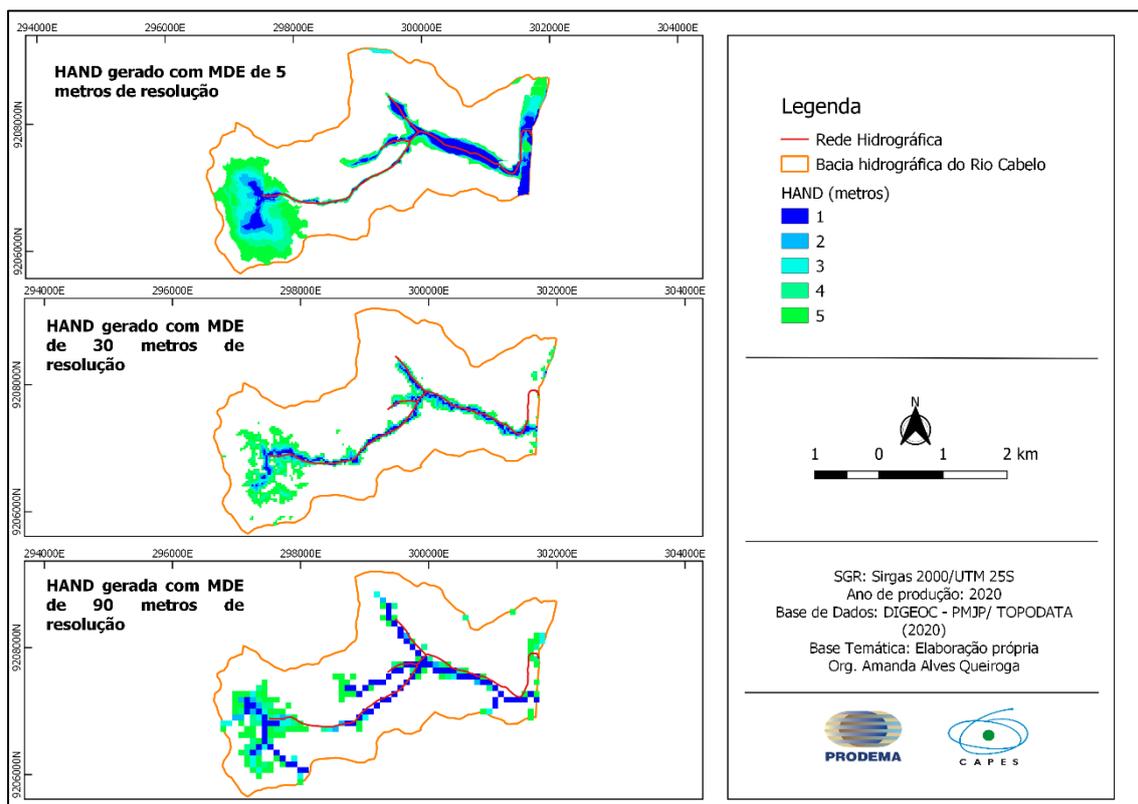
A terceira aplicação do modelo HAND foi feita considerando o recorte espacial das bacias hidrográficas, variando a resolução espacial. No decorrer da pesquisa, foi obtido um MDE de resolução de 5 m x 5 m, assim, buscou-se comparar os resultados obtidos a partir dele com os resultados anteriores. Foi realizada inicialmente uma comparação entre as drenagens obtidas com os três MDE (5 m x 5 m, 30 m x 30 m e 90 m x 90 m), utilizando como exemplo a bacia hidrográfica do rio Cabelo, como apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Comparação das drenagens geradas a partir de diferentes resoluções espaciais (5 m x 5 m, 30 m x 30 m e 90 m x 90 m)



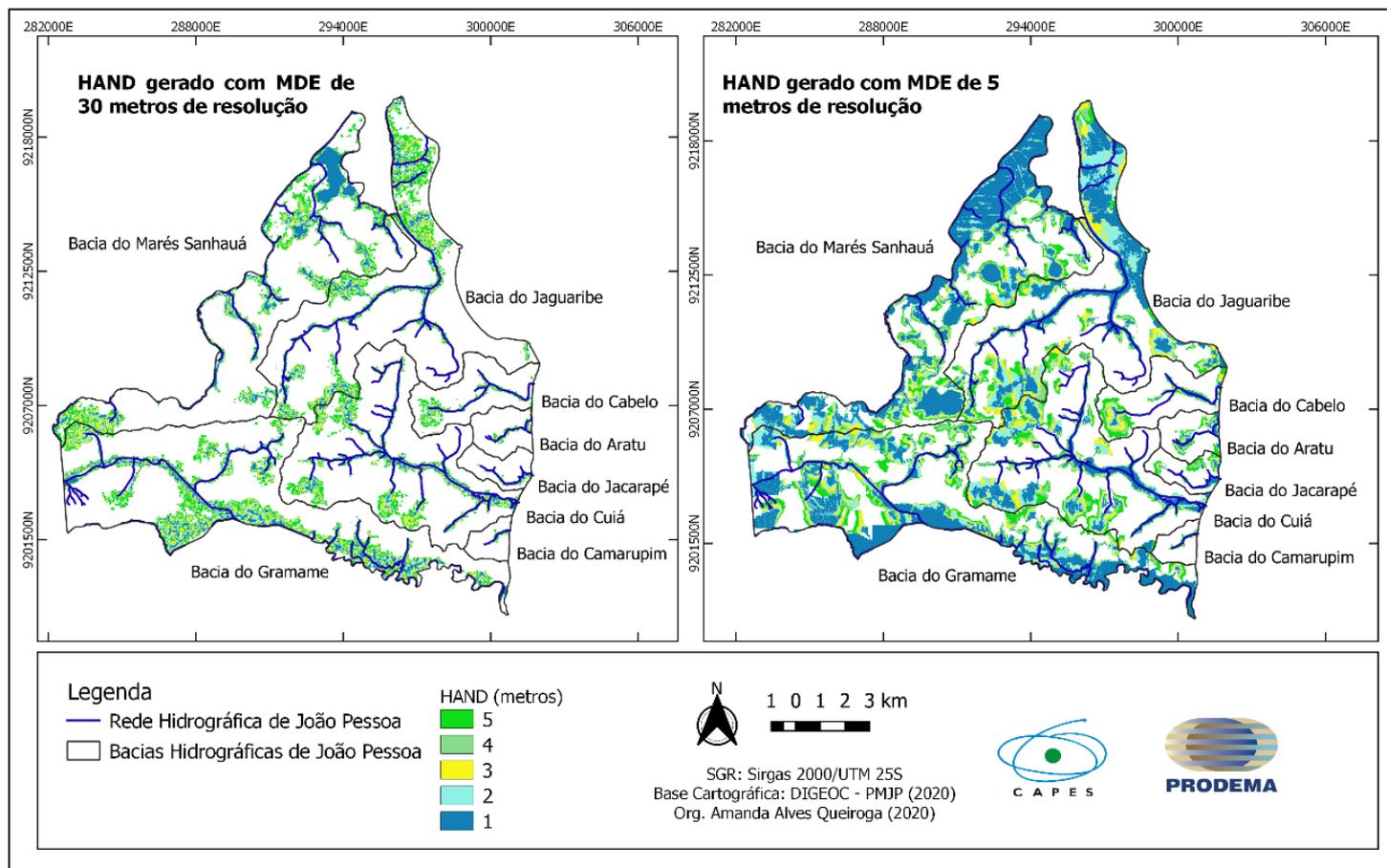
Na Figura 28 é possível verificar uma melhor definição na drenagem quando utilizado o MDE de 5 m x 5 m de resolução espacial, dado que a mesma se apresenta de maneira mais uniforme, aproximando-se mais da drenagem real. A Figura 29 enfoca a comparação do modelo HAND na bacia hidrográfica do rio Cabelo. Ao utilizar um MDE de melhor resolução espacial, visivelmente a mancha de inundação se manifesta uniformemente, acompanhando a rede hidrográfica real. Quando considerado o MDE de 90 m x 90 m, percebe-se uma mancha mais robusta, com *pixels* marcados, generalizando as informações. A mancha de inundação gerada a partir do MDE de 5 m x 5 m, mostra uma maior suavização e melhor definição das classes.

Figura 29 - Comparação do HAND gerado a partir de diferentes resoluções espaciais (5 m x 5 m, 30 m x 30 m e 90 m x 90 m) aplicado a bacia hidrográfica do rio Cabelo



Na Figura 30, é apresentada a comparação do HAND obtido utilizando o MDEs de 5 m x 5 m e de 30 m x 30 m, agora abrangendo todas as bacia hidrográfica. É importante ressaltar que o tempo de processamento para cada bacia hidrográfica foi extenso, muitas vezes durando mais de 8 horas, o que não aconteceu ao utilizar MDEs de 30 m x 30 m e de 90 m x 90 m.

Figura 30 - Comparação do HAND gerado a partir de MDEs com resolução espacial de 5 m x 5 m e de 30 m x 30 m aplicado nas bacias hidrográficas de João



A Figura 31 apresenta um gráfico da quantificação das classes e a comparação quanto ao uso de diferentes resoluções espaciais. Nota-se um aumento de 18,28% na classe de 1 metro HAND, sendo essa classe composta por áreas mais suscetíveis a inundação, enquanto ocorre uma redução de 7,33% na classe de 5 metros HAND, formada pelas áreas menos suscetíveis, quando utilizado o MDE de 5 m x 5 m.

Figura 31 - Comparação das classes ao utilizar MDEs de resolução espacial de 5 m x 5 m de de 30 m x 30 m



Fonte: elaboração própria (2020).

A diferença nos resultados diante do uso de diferentes resoluções espaciais foi alvo de estudo feito por Rodrigues *et al.* (2011) ao comparar o HAND elaborado com MDEs de 30 m x 30 m e 90 m x 90 m. Foi notado pelos autores que o dado SRTM de 30 m x 30 m possuía melhor detalhamento das feições em contraste ao MDE de 90 m x 90 m, de forma que o uso desse é preferível ao se realizar estudos locais. O uso de resoluções que oferecem um menor detalhamento pode prejudicar a implementação de ações de RRD e, ainda, a alternância abrupta de classes pode causar problemas quando se trata do zoneamento, desvalorizando imóveis ou propiciando uma falsa sensação de segurança aos moradores daquele local.

Muitas vezes os recursos disponibilizados para as ações de RRD são muito limitados, o que necessita uma priorização de áreas que apresentam um maior grau de risco. Diante disso, foi estabelecida uma classificação baseada na ordem de prioridade das ações de redução do risco de inundação a partir dos resultados obtidos ao tomar como referência as bacias hidrográficas. Cinco

classes foram determinadas, variando de “muito baixa prioridade” a “muito alta prioridade” de ações de redução do risco, conforme a Tabela 2.

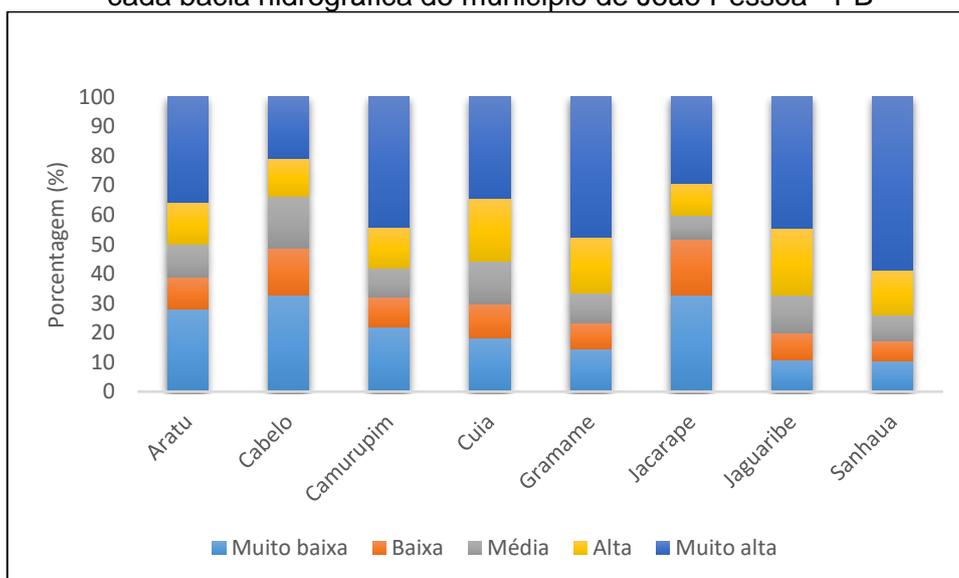
Tabela 2 - Classificação da suscetibilidade a inundação

Ordem de prioridade de redução do risco a inundação	HAND (m)
Muito Baixa	5
Baixa	4
Média	3
Alta	2
Muito Alta	1

Fonte: elaboração própria (2020).

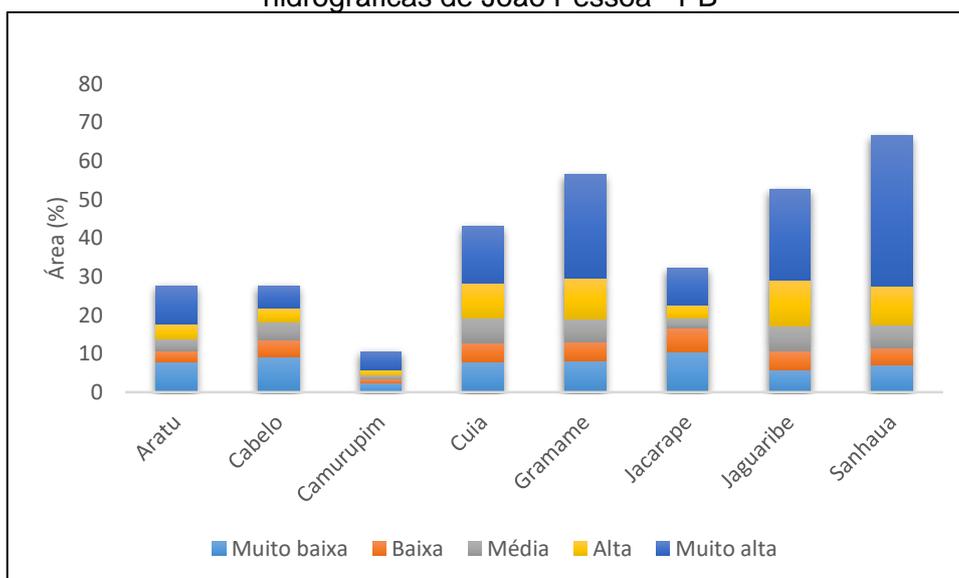
A quantificação das áreas suscetíveis à inundação mapeada pelo HAND pode ser vista na Figura 32, onde faz-se a divisão por bacias hidrográficas, e com a proporção de cada classe no mapeamento total. Observou-se que as bacias hidrográficas Marés-Sanhauá, Gramame, Camurupim e Jaguaribe foram as que manifestaram uma maior porcentagem de áreas que demandam uma maior priorização de ações de redução de risco a inundação, classificadas como “muito alta”. Na Figura 33, mostra-se a porcentagem das áreas totais das bacias hidrográficas mapeadas pelo HAND, ou seja, que estão suscetíveis a inundações.

Figura 32 - Porcentagem da distribuição das classes mapeadas pelo HAND em cada bacia hidrográfica do município de João Pessoa - PB



Fonte: elaboração própria (2020).

Figura 33 - Porcentagem das áreas suscetíveis a inundações nas bacias hidrográficas de João Pessoa - PB



Fonte: elaboração própria (2020).

Quando considerada a área total de cada bacia hidrográfica, as bacias hidrográficas dos rios Marés-Sanhauá, Jaguaribe e Gramame são as que possuem uma maior porcentagem de áreas com “muito alta” ordem de priorização de ações de redução do risco a inundação.

4.1.4. Validação do modelo

Em 2015 foi elaborado o Plano Municipal de Saneamento Básico de João Pessoa (PMSB-JP), onde foram mapeados pontos de inundação no município (PARAÍBA, 2015). Alguns problemas de macrodrenagem identificados no plano associados a inundações foram: acúmulo de vegetação no leito principal do rio, resíduos sólidos dispostos de forma inadequada, edificações ou moradias precárias ao longo do leito principal ou secundário do rio, assoreamento do rio, entre outros.

Os locais identificados são apresentados na Quadro 3.

Quadro 3 - Pontos de inundação na área urbana de João Pessoa de acordo com o Paraíba (2015)

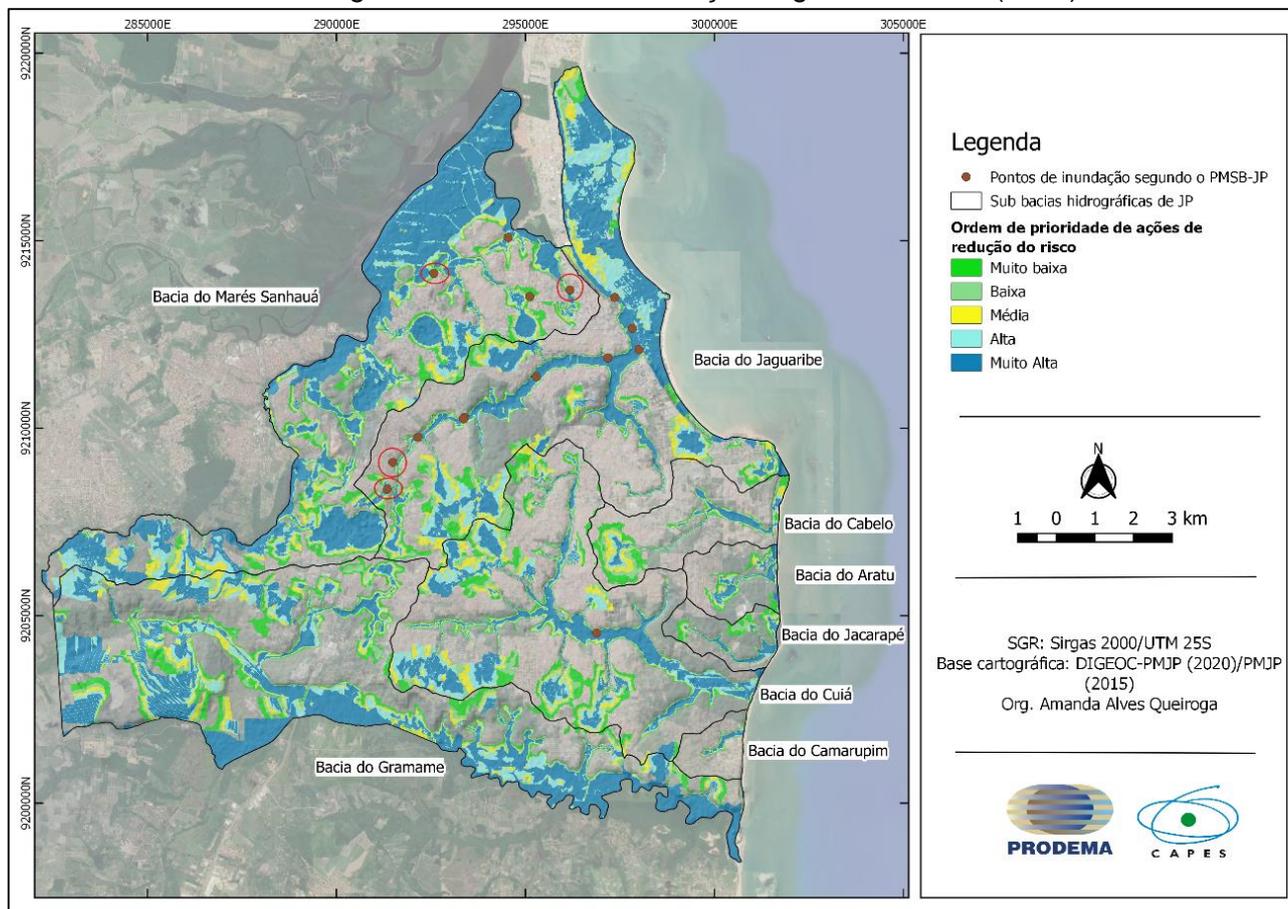
Local	Bairro	Bacia hidrográfica
R. São Geraldo com R. Antônio Silva e Melo (ponte sobre o rio Jaguaribe)	Jaguaribe	Jaguaribe
Av. José Américo de Almeida (próximo ao girador para o bairro Altiplano)	Altiplano Cabo Branco	Jaguaribe
Av. Epitácio Pessoa (ponte sobre o rio Jaguaribe)	Miramar	Jaguaribe
Av. Tito Silva com Av. Castelo Branco (ponte sobre o rio Jaguaribe)	Miramar	Jaguaribe
R. Bancário Francisco Mendes (passagem da água, rua lateral da empresa Promac)	Pedro Gondim	Marés-Sanhauá
R. Edmundo Filho (próximo a Av. Ruy Carneiro)	São José	Jaguaribe
R. Brasilino Alves da Nóbrega (divisa entre Mangabeira e Valentina, trecho da ponte do rio Cuiá)	Valentina	Cuiá
Lagoa Ana Nery	Oitizeiro	Jaguaribe
R. Deputado José Tavares (rio Jaguaribe, bueiro)	Cruz das Armas	Jaguaribe
R. José Gomes da Silva com R. Xavier Junior (rio Jaguaribe, bueiro)	Cristo Redentor	Jaguaribe
Travessa Rodrigues Alves (Beco da Balieira)	Alto do Céu	Marés-Sanhauá
Av. Sergipe com Av. Maranhão	Bairro dos Estados	Marés-Sanhauá
R. Fotógrafo Ernani Augusto de Carvalho	Roger	Marés-Sanhauá

R. Adolfo Cirne (rio Jaguaribe)	Torre	Jaguaribe
R. Osvaldo Lemos e R. Francisco de Sousa Rangel (rio Jaguaribe)	Varjão	Jaguaribe

Fonte: adaptado de Paraíba (2015)

De acordo com o diagnóstico proposto pelo PMSB-JP (PARAÍBA, 2015), os problemas se concentram em sua maioria na parte Oeste do município, destacando-se a BHRJ como a mais afetada. De todos os pontos, apenas quatro não estão dentro da mancha de inundação gerada pelo HAND, circulos de vermelho na Figura 34.

Figura 34 - Pontos de inundação segundo Paraíba (2015)

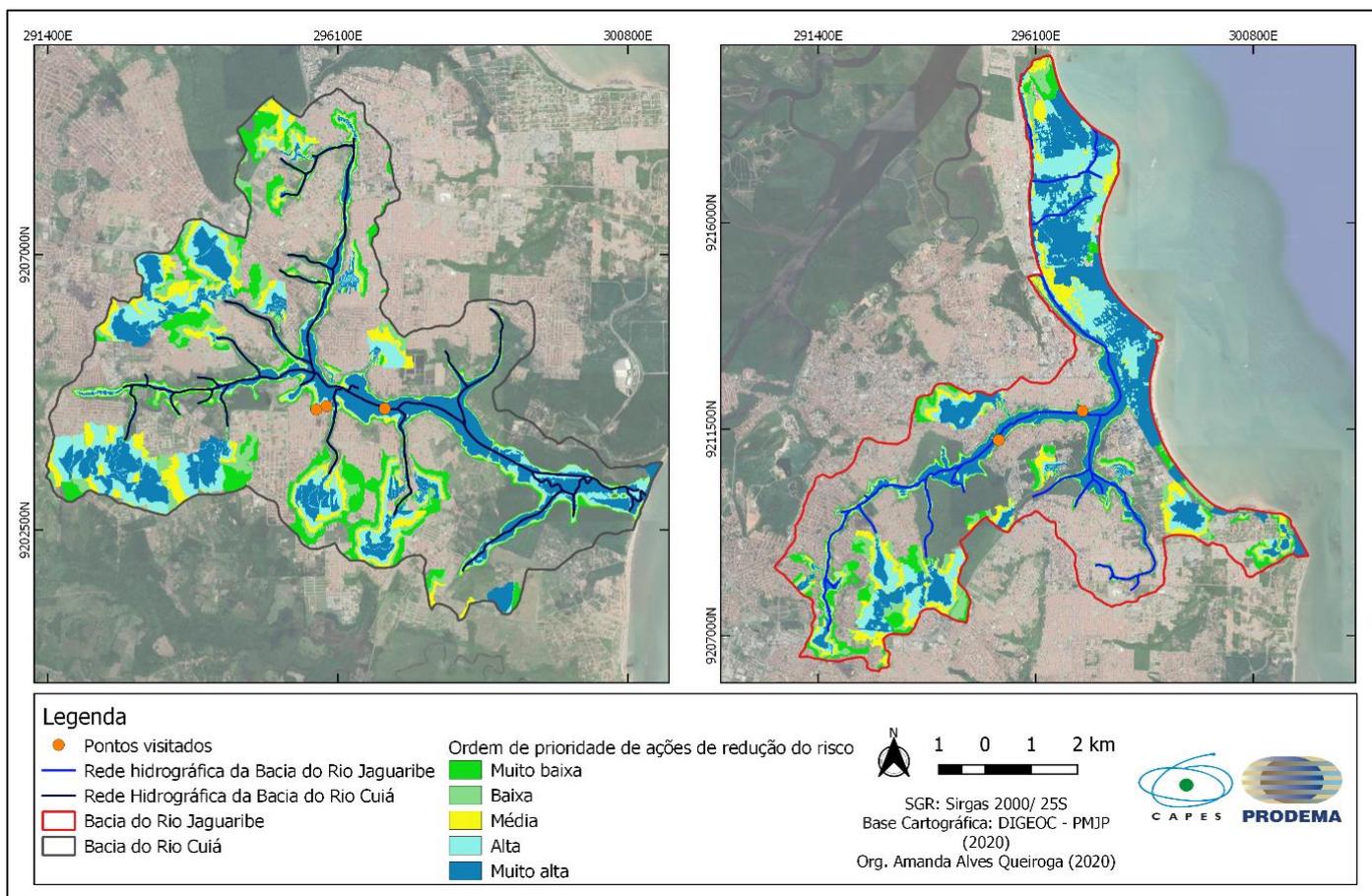


Buscando validar o modelo HAND, foram realizadas visitas a campo com um agente da COMPDEC-JP. Foram planejadas duas visitas, mas devido a pandemia provocada pelo COVID-19, apenas uma visita foi realizada, no dia 23 de junho de 2020, seguindo todas as recomendações da Organização Mundial de Saúde (OMS) para evitar o contágio por este vírus. Os pontos escolhidos

foram em locais na bacia hidrográfica do rio Cuiá e na BHRJ. A escolha desses locais foi embasada nas informações da COMPDEC-JP, no que se refere aos chamados recorrentes quando há inundações.

Ao chegar em cada ponto (Figura 35), as coordenadas dos locais foram coletadas por meio do aplicativo “*Mobile Topographer*”, instalado em um *smartphone* de sistema operacional *Android*.

Figura 35 - Pontos que foram visitados, em destaque na cor laranja, em conjunto com a COMPDEC-JP



Na bacia hidrográfica do rio Cuiá, três pontos foram visitados, sendo dois deles muito próximos, localizados na comunidade Nossa Senhora das Neves no bairro Valentina de Figueiredo. Ao longo do trajeto percorrido, observou-se uma rua principal com bastante lama. O agente da COMPDEC-JP argumentou que essa rua era conhecida como “Rua da Lama” pelos moradores, por sempre se apresentar dessa forma, inclusive em épocas que não são marcadas por eventos de chuvas intensas. Nessa comunidade há muitos registros de inundação e os moradores estão na expectativa de transferência para algum loteamento popular

em outra área do município, o que ainda não se tem previsão. Foi notada grande quantidade de resíduos dispostos de forma irregular ao longo do caminho percorrido e ligações de esgotamento sanitário (Figura 36).

Figura 36 - Imagens da visita de campo à comunidade Nossa Senhora das Neves



Nota: A) rua sempre com lama; B) disposição inadequada de resíduos; C) ligações de esgotamento sanitário; D) áreas com água nos terrenos das casas

A ponte do rio Cuiá, que liga os bairros de Mangabeira e Valentina de Figueiredo, foi outro ponto visitado na bacia hidrográfica. Esse local é bastante afetado quando ocorrem chuvas intensas ou de longa duração em João Pessoa, sendo frequentemente noticiado em jornais (Figura 37).

Figura 37 - Notícia de inundação na ponte do rio Cuiá, em João Pessoa - PB, em 31 de agosto de 2013



Fonte: Jornal Correio da Paraíba.

Na BHRJ, o primeiro ponto visitado foi na comunidade Tito Silva, no bairro Miramar, às margens do rio Jaguaribe. Durante os períodos de chuva são registrados vários casos de movimentos de massa e de inundações na comunidade. Ao chegar ao local, observou-se que moradores registraram as marcas d'água de inundações anteriores nas paredes das residências (Figura 38), confirmando a recorrência desses eventos.

Figura 38 - Marca da altura da água na parede da residência, decorrente de inundações anteriores na comunidade Tito Silva, em João Pessoa - PB



O segundo ponto visitado na BHRJ foi na comunidade São Rafael, no bairro Castelo Branco. Essa comunidade é constantemente acometida por inundações, estando também sempre presente em notícias veiculadas quando ocorrem chuvas mais prolongadas na cidade (Figura 39).

Figura 39 - Notícia do dia 14/06/2019 sobre inundação na comunidade São Rafael



Fonte: G1 PARAÍBA.

Na comunidade São Rafael havia a presença de algumas medidas de contenção das inundações e adaptações construídas pelos próprios moradores, além de marcas d'água nas casas (Figura 40).

Figura 40 - Registros feitos na comunidade São Rafael, João Pessoa - PB



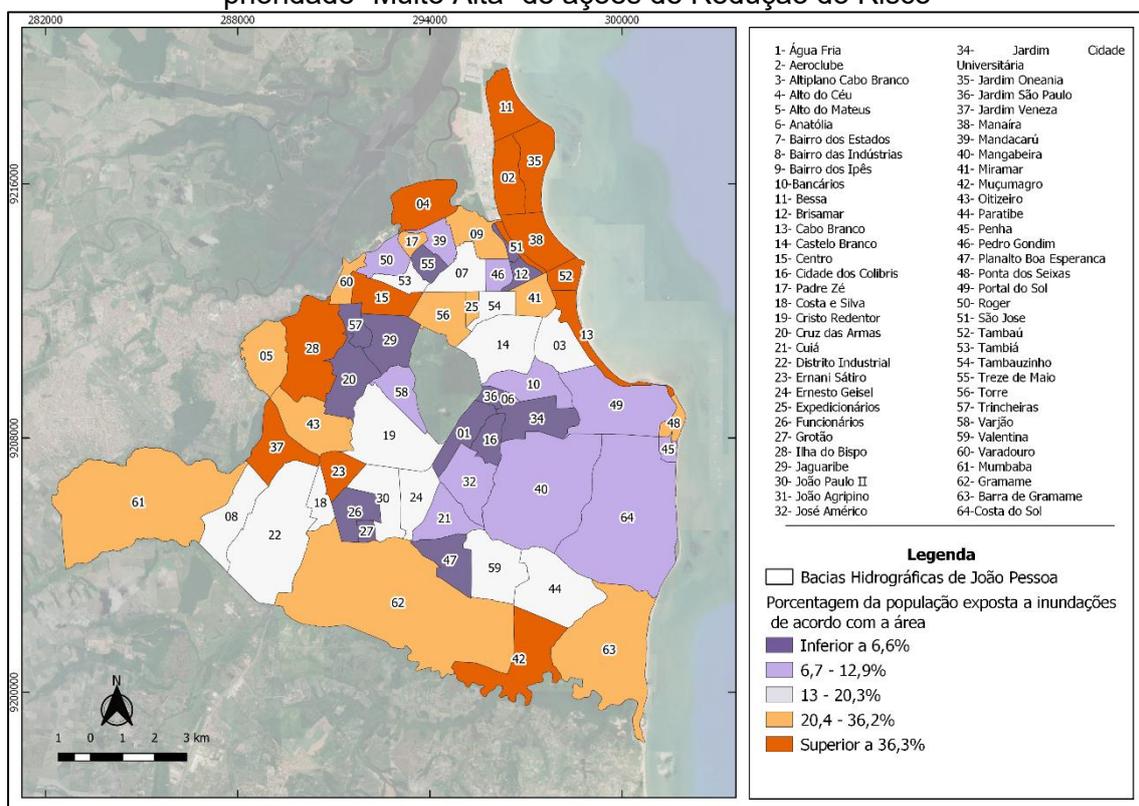
Nota: A) e B) mostram adaptações e contenções feitas para conviver com as inundações frequentes; C) e D) apresentam as marcas d'água nas casas ocasionadas por inundações anteriores.

Todos os pontos sugeridos pelo agente da COMPDEC-JP e que foram visitados (Figura 35) se apresentaram dentro das áreas mapeadas pelo HAND como suscetíveis à inundação. Locais com grande recorrência de inundações, sempre presentes nas notícias veiculadas em caso de eventos de chuvas intensas e/ou de longa duração no município de João Pessoa, como a comunidade São Rafael e a comunidade Tito Silva, localizaram-se nas classes 4 e 5 (“alta” e “muito alta” ordem de priorização de ações de redução de risco à inundação), mostrando o bom desempenho do modelo descritor de terreno usado neste trabalho.

4.1.5. População exposta

Após coletadas as informações da população de cada bairro no Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010), foi calculada a proporção da população vulnerável para cada bairro considerando as áreas mais suscetíveis a inundações (1 m HAND). Posteriormente, as informações foram transferidas para o *software* Qgis e apresentadas no mapa a seguir (Figura 41).

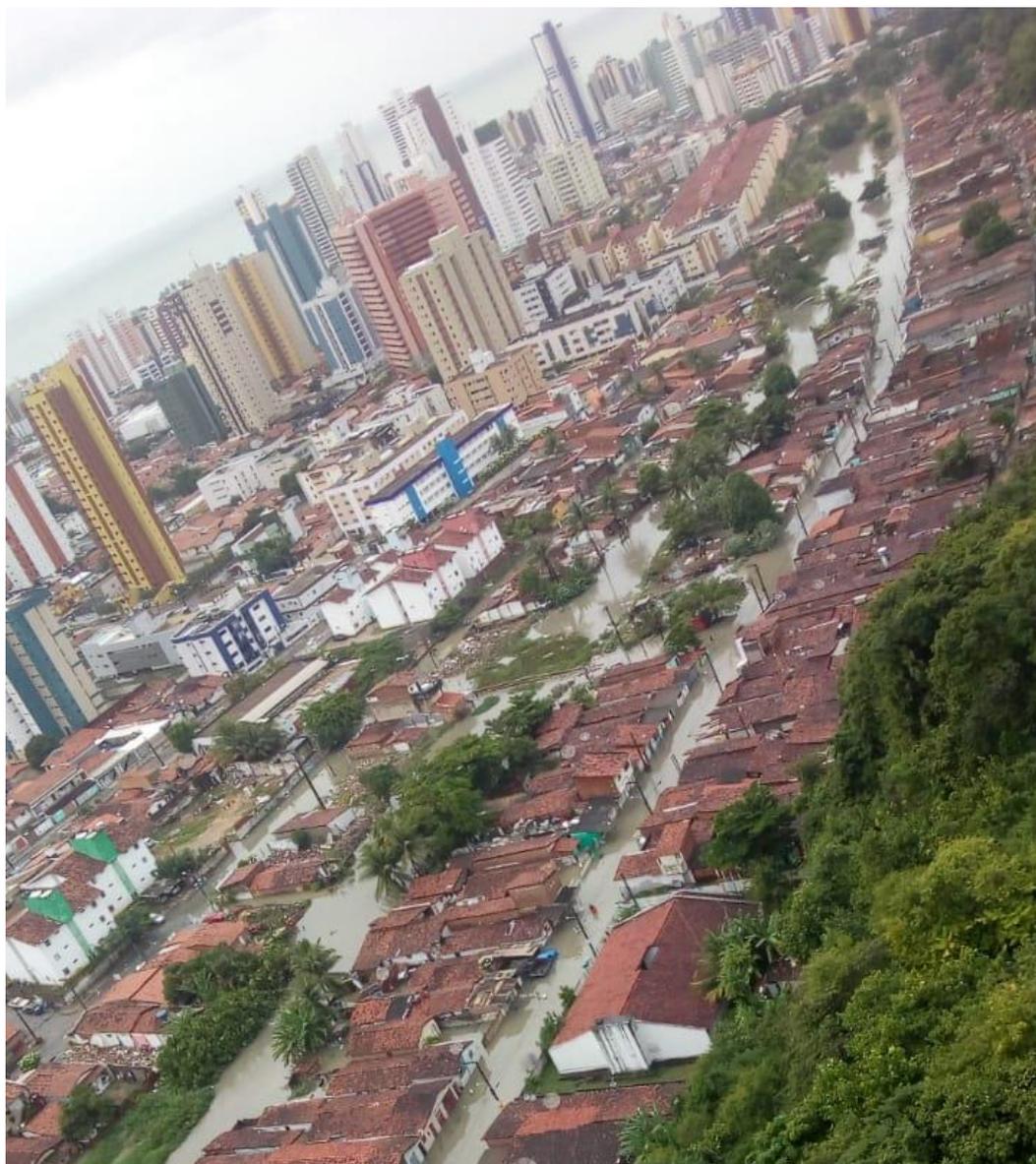
Figura 41 - Proporção da estimativa de população exposta em áreas com Ordem de prioridade “Muito Alta” de ações de Redução do Risco



Verifica-se uma concentração de bairros na última classe (superior a 36,2%) na parte Norte, junto à orla de João Pessoa, sendo eles: Bessa, Cabo Branco, Tambaú, Manaíra, Aeroclube e Jardim Oceania. Contudo, vale salientar que os bairros apontados são considerados bairros nobres da cidade, portando serviços de infraestrutura que contribuem para a RRD.

De acordo com pesquisa realizada por Azevedo (2020), onde foi proposto a elaboração de um Índice de Vulnerabilidade para os bairros de João Pessoa utilizando indicadores de Suscetibilidade, Enfrentamento e Adaptação, os bairros citados anteriormente possuem uma tendência de vulnerabilidade baixa ou muito baixa. Porém, apesar de próximos a esses bairros, São José não acompanha o mesmo perfil socioeconômico, apresentando segundo Azevedo (2020), um Índice de Vulnerabilidade Muito Alto e, segundo o mapa aqui apresentado, possui também 37,29% da população exposta a inundações. O bairro em questão é acometido frequentemente por esse tipo de desastre, como apresentado na Figura 42.

Figura 42 - Inundação no bairro São José em junho de 2019.



Fonte: domínio público (2019).

No caso de Ilha do Bispo, Jardim Veneza, Muçumagro, Alto do Céu e Ernani Sátiro, esses bairros abrigam uma população menos favorecida financeiramente e que enfrentam problemas de infraestrutura, contribuindo para a redução da capacidade de adaptação e resposta. De acordo com o índice estabelecido por Azevedo (2020), eles se encontram nas classes de Alto e Muito Alto Índice de Vulnerabilidade, com exceção de Ernani Sátiro (Índice de Vulnerabilidade Baixo).

Considerando o mapeamento feito pelo HAND, as bacias hidrográficas de Marés-Sanhauá, Jaguaribe e Gramame são as que possuem uma maior porcentagem de áreas com “muito alta” ordem de priorização de ações de redução do risco a inundação. Comparando essa informação com o mapa da Figura 41, pode-se perceber que Jaguaribe e Marés-Sanhauá abrigam um maior número de bairros nas classes com porcentagem maiores no que se refere a população exposta levando em conta a área desses bairros (Figura 43). Na Tabela 3, apresenta-se os bairros do município que apresentaram os valores nas duas classes mais altas no que se refere a estimativa da população exposta.

Figura 43 - População exposta nas maiores classes dentro das bacias hidrográficas de João Pessoa - PB

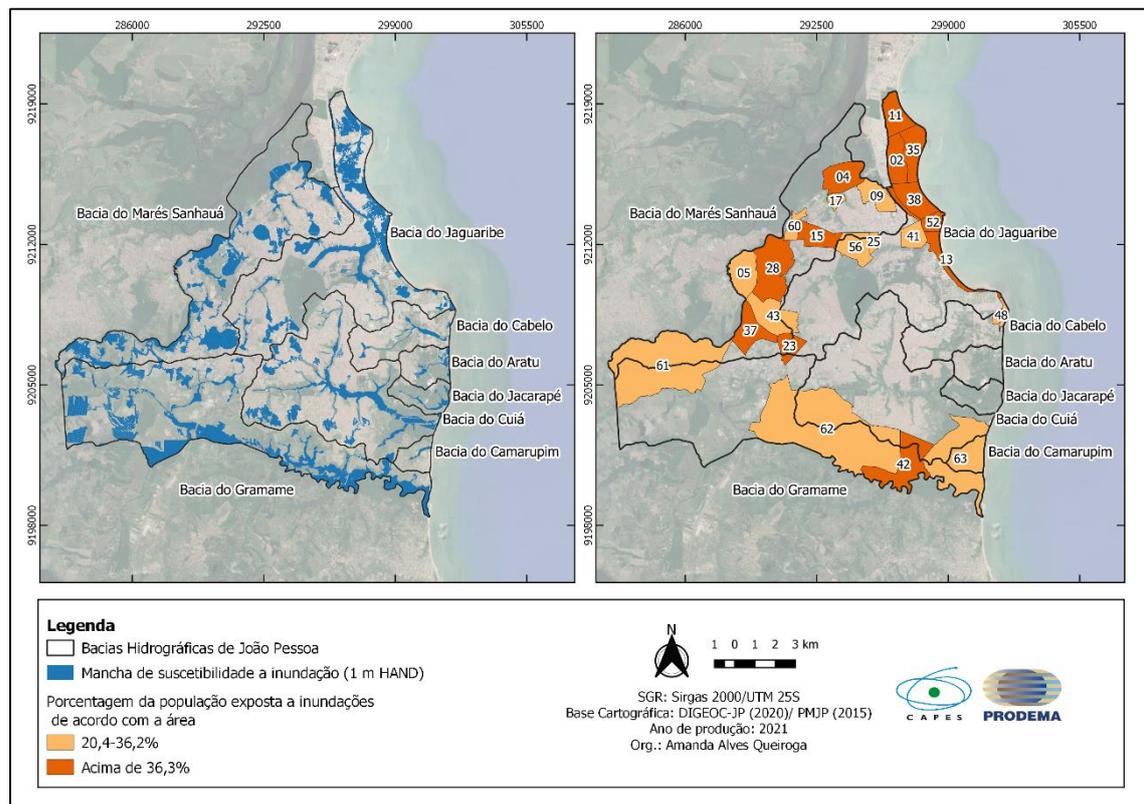


Tabela 3 - Bairros com os valores mais altos de população exposta

Bairro	Estimativa da população exposta (%)
Aeroclube	61,77
Cabo Branco	60,59
Tambaú	60,12
Manaíra	52,50
Bessa	45,79
Jardim Veneza	45,60
Muçumagro	45,02
Alto do Ceu	43,79
Ernani Sátiro	43,45
Centro	40,18
Ilha do Bispo	38,14
Jardim Oceania	37,84
São José	37,29
Varadouro	34,65
Ipês	29,73
Torre	28,43
Mumbaba	28,38
Barra de Gramame	27,29
Alto do Mateus	25,37
Padre Zé	24,80
Gramame	22,93
Ponta do Seixas	22,49
Miramar	22,25
Expedicionários	22,07
Oitizeiro	20,42

Uma pesquisa realizada por Rafael *et al.* (2009) identificou uma tendência de substituição de um padrão horizontal (casas) para um padrão vertical (edifícios) na região da Zona Sul e na zona litorânea de João Pessoa, a partir da análise de imagens de satélite entre 2001 e 2006.

O processo de verticalização quando não é acompanhado de um planejamento prévio causa diversos problemas. Bairros como Manaíra possuem a mesma infraestrutura básica de 30 anos atrás, mas nesse período houve uma grande verticalização. Mesmo sendo 100% saneado, a rede de esgoto continua a mesma a mais de 30 anos.

Considerando um local onde havia apenas algumas casas, hoje se tem uma densidade demográfica muito maior por ter sido construído um prédio nesse local. Ou seja, a infraestrutura não está preparada.

O adensamento aumenta a quantidade de resíduos sólidos e esgoto, implicando na necessidade de um novo redimensionamento e planejamento, que normalmente não há (SALES, 2014). Com relação a drenagem, segundo o PMSB-JP (PARAÍBA, 2015), a zona sul é a área urbana com maiores problemas de microdrenagem. É uma região onde há um grande adensamento populacional na área e muitas artérias urbanas foram criadas sem nenhuma infraestrutura de esgotamento de águas pluviais, o que é típico de uma cidade que cresce sem planejamento.

A verticalização também provoca um aumento da superfície de concreto, reduzindo a evaporação, influenciando na formação de ilhas de calor e também no ciclo hidrológico. Por isso, os problemas ligados a isso também são problemas vinculados a RRD no tocante as inundações.

4.2. A expansão urbana e a suscetibilidade a inundações

A análise da expansão urbana foi realizada considerando os anos de 1990 e 2018, usando como principal critério para a escolha dessas imagens a pouca incidência de nuvens (Figura 44).

Considerando inicialmente o ano de 2018, calculou-se as seguintes porcentagens de área urbana, levando em conta a área de cada bacia hidrográfica (Tabela 3). A partir disso, percebe-se então que as bacias hidrográficas com mais manchas urbanas segundo a análise no referido ano são Jaguaribe, Marés-Sanhauá e Cuiá, marcadas na Tabela 4 em vermelho.

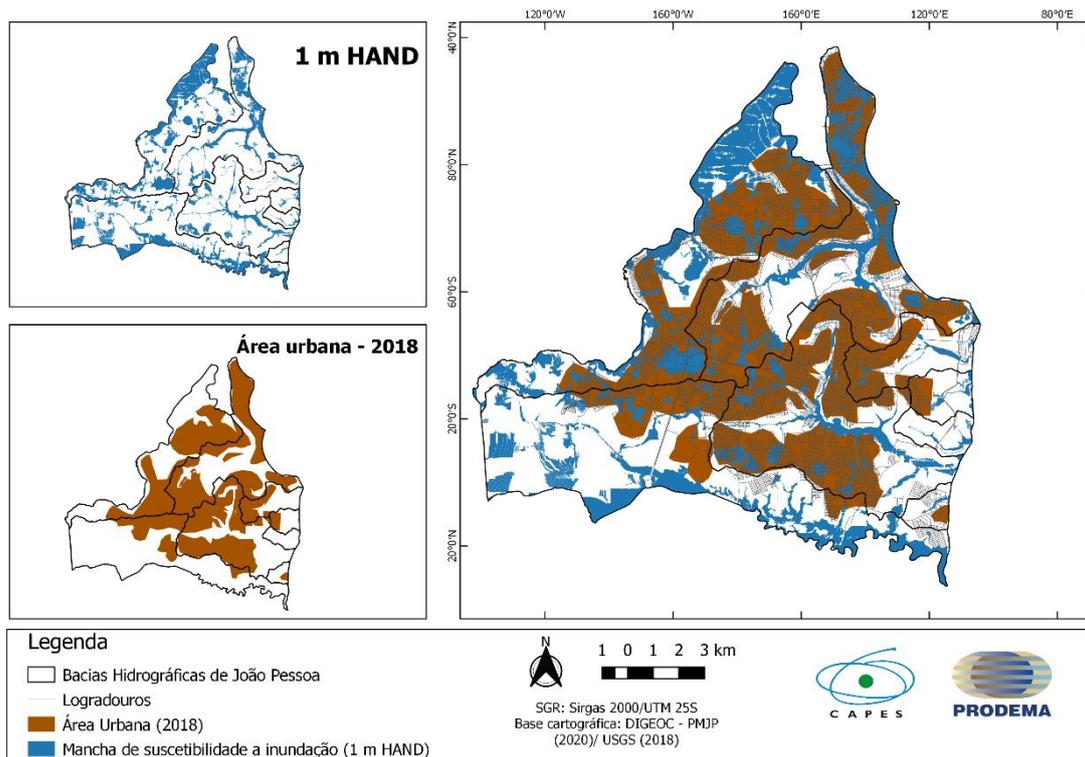
Tabela 4 - Área urbana em cada bacia hidrográfica em 2018

Bacia hidrográfica	Área total (km²)	Área urbana 2018	%
Jaguaribe	46,09	30,22	65,57
Marés-Sanhauá	47,42	24,57	51,82
Cuiá	40,34	25,10	62,24
Aratu	4,27	1,21	28,37
Cabelo	9,79	4,51	46,08
Gramame	53,69	10,61	19,77
Jacarapé	3,63	0,02	0,71
Camarupim	2,43	0,35	14,44

Quando analisado de forma integrada com as áreas com maior suscetibilidade a inundação (1 metro HAND), as bacias hidrográficas que

apresentam maior sobreposição de áreas urbanizadas e de áreas com muito alto grau de prioridade de ações de redução de risco são as bacias hidrográficas dos rios Jaguaribe (32,91% do total sobreposto) e do Marés-Sanhauá (48,04% do total sobreposto).

Figura 44 - Sobreposição da Área com 1 m HAND e área urbana de João Pessoa em 2018



A partir da comparação de 2018 com o ano de 1990 (Figura 45), observou-se que a bacia hidrográfica que apresentou maior crescimento da mancha urbana foi a do rio Cuiá (48,27 %), marcada em vermelho na Tabela 5, seguido pelas bacias hidrográficas dos rios Aratu (22,33 %), Cabelo (18,89 %) e Jaguaribe (16,70 %). Já Camurupim e Jacarapé, que em 1990 não apresentavam áreas construídas, apresentaram em 2018.

Figura 45 - Expansão da área urbana em João Pessoa entre 1990 e 2018

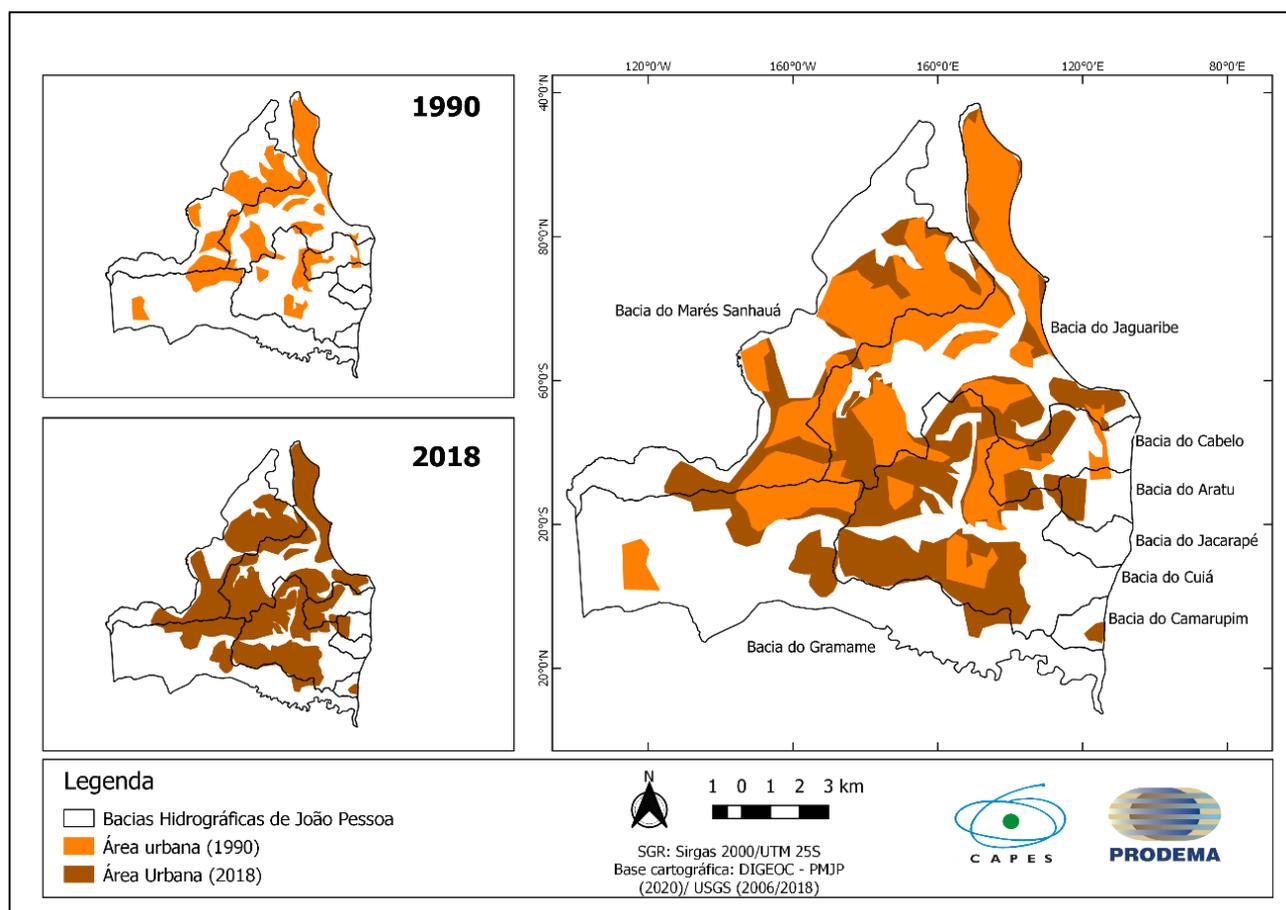


Tabela 5 - Porcentagem da expansão urbana em João Pessoa de 1990 a 2018

Bacias	Área Urbana				Expansão (2018-1990) %
	1990		2018		
	Km ²	%	Km ²	%	
Bacia do Jaguaribe	22,52	48,86	30,22	65,57	16,71
Bacia do Marés Sanhauá	17,02	35,89	24,58	51,82	15,93
Bacia do Cuiá	5,63	13,96	25,11	62,24	48,28
Bacia do Aratu	0,26	6,04	1,21	28,37	22,33
Bacia do Cabelo	2,66	27,19	4,51	46,08	18,89
Bacia do Gramame	4,62	8,60	10,62	19,77	11,17
Bacia do Jacarapé	0,00	0,00	0,03	0,71	0,71
Bacia do Camurupim	0,00	0,00	0,35	14,44	14,44

Em 2018 as bacias hidrográficas dos rios Jaguaribe e Cuiá foram as que apresentaram as maiores porcentagens de áreas como sendo urbanas. Já na Tabela 5, Cuiá se destacou com o maior crescimento quando comparado com o ano de 1990.

Um estudo realizado por Anjos *et al.* (2017), onde foi mapeada a expansão urbana da bacia hidrográfica entre 1970 e 2013, apontou o quanto isso influenciou na supressão de áreas verdes e na poluição dos rios. A pesquisa citada constatou que na nascente do rio Cuiá, ao observar o raio de proteção estabelecido pelo Código Florestal (Lei nº 12.651/2012), notou-se a descaracterização da vegetação nativa, presença de vegetação exótica, construção de edificações, utilização da área como pastagem e descarte inadequado de resíduos sólidos. Além disso, diversos impactos ambientais como desmatamento de APP, despejo de efluentes, construção de barragens, intensificação de processos erosivos e compactação do solo.

Reis *et al.* (2017) analisaram o desempenho dos indicadores de Sustentabilidade nas bacias hidrográficas dos rios Cuiá, Cabelo e Jaguaribe. Na análise da BHRJ, destacou-se alterações na qualidade da água, reforçando a relação entre as modificações urbanísticas e a degradação ambiental. Um dos fatores apontados para justificar essas alterações foi o lançamento pela população de esgotos domésticos por meio de ligações clandestinas e até mesmo o esgoto bruto pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), quando as Estações Elevatórias não suportam a vazão do esgoto que deveria ser direcionado para a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE).

Problemas observados nessa bacia hidrográfica, decorrentes do processo de urbanização, que podem ser citados são: enchentes e inundações, processos erosivos acentuados e poluição dos corpos hídricos. No que se refere as inundações, o estudo de Santos *et al.* (2016) comprova o que foi atestado na presente pesquisa, onde a BHRJ está entre as três bacias hidrográficas com maior porcentagem de áreas suscetíveis a inundações.

A implantação de infraestrutura básica pelo poder público, em áreas com construções irregulares nessa bacia hidrográfica, estimula os moradores a investirem recursos próprios em melhorias nas suas casas. A pesquisa da TECHNUM CONSULTORIA SS (2007) aponta que no referido ano, por meio de pesquisas feitas *in loco* nas 28 comunidades da BHRJ, observou-se que 37% das casas eram de alvenaria, por mais que ainda houvesse algumas com estruturas mais frágeis, o que denota um investimento da população ao passar do tempo.

A bacia hidrográfica dos rios Marés-Sanhauá (BHRMS), apesar de não ter apresentado um crescimento expressivo entre 1990 e 2018 quando comparada com Jaguaribe e Cuiá, teve ainda assim 15,931% de crescimento nesse período. Soma-se a isso o fato de que é uma das duas bacias hidrográficas com maior porcentagem de áreas urbanas sobrepostas com manchas de inundação de 1 metro HAND, compondo 48,04% da área total.

Essa bacia hidrográfica, de acordo com a Figura 41, é a que comporta mais bairros categorizados nas duas classes mais altas de população vulnerável a inundações (muito alta ordem de prioridade de ações de redução de risco) de acordo com a área.

Apesar da bacia hidrográfica do rio Gramame (BHRG) ter apresentado apenas 11% de crescimento entre 1990 e 2018, essa apresentou 26,88% da sua área contida na classe de “muito alta ordem de prioridade de ações de redução de risco”. Nos bairros de Muçumagro e Gramame a implantação de novos conjuntos habitacionais e a presença de terrenos vazios são dois fatores que indicam que as ocupações urbanas estão se aproximando das áreas de proteção ambiental, podendo gerar conflitos de uso e ocupação da terra. Sousa (2017) verificou que de 1991 a 2016 houve uma remoção da área vegetada, sendo uma tendência sua substituição por área edificada na bacia hidrográfica.

A falha no planejamento urbano proporciona diversos problemas de cunho socioambiental, como um aprofundamento da desigualdade e a ocupação de áreas ambientalmente vulneráveis. A ausência de uma fiscalização dessas áreas somada a uma deficiência de planejamento que direcione o crescimento da cidade faz com que cada vez mais pessoas fiquem expostas aos desastres relacionados com fenômenos naturais e agrava a degradação ambiental nesses locais.

Além disso, a gestão pública não insere a RRD nas estratégias de enfrentamento, pois medidas preventivas e de adaptação poderiam reduzir o risco em lugares onde comunidades não podem ser realocadas de imediato. Verifica-se, contudo, que as próprias comunidades que foram visitadas para a validação do modelo HAND adotaram medidas estruturais para a contenção de inundações em suas casas.

As BHRJ e BHRMS merecem atenção por parte da gestão municipal. São bacias hidrográficas urbanizadas com histórico de rios já degradados pela

pressão antrópica gerada pela urbanização das áreas próximas a esses corpos hídricos. Além disso, são bacias hidrográficas que abarcam as maiores porcentagens da sua área com manchas de inundação mapeadas pelo HAND e de área urbanizada (Tabela 6).

Tabela 6 - Áreas mapeadas pelo HAND e áreas urbanizadas por bacia hidrográfica

Bacia hidrográfica	Área mapeada pelo HAND (todas as classes) (%)	Área urbanizadas em 2018 (%)	Expansão urbana (1990-2018) (%)
Jaguaribe	52,63	65,57	16,71
Marés-Sanhauá	66,54	51,82	15,93
Cuiá	43,10	62,24	48,28
Aratu	27,60	28,37	22,33
Cabelo	27,63	46,08	18,89
Gramame	56,49	19,77	11,16
Jacarapé	32,20	0,71	0,71
Camurupim	10,54	14,44	14,44

Apesar de Cuiá ter apresentado o maior crescimento das áreas urbanizadas entre 1990 e 2018 (48,27%) e 43,10% da sua área com manchas de inundação, os bairros que compõem essa bacia hidrográfica, em sua maioria, estão nas classes mais baixas de porcentagem de população exposta (Figura 41). Já as BHRJ e BHRMS contém muitos bairros nas classes mais altas de população exposta.

4.3. Recomendações

Sugere-se em futuras pesquisas, uma análise mais direcionada dessas três bacias hidrográficas em termos socioeconômicos, visto que a vulnerabilidade social exerce muita influência na capacidade de adaptação e resiliência.

Um estudo posterior em uma escala mais detalhada e de forma integrada pode proporcionar vislumbrar quais comunidades estão mais expostas, abarcando condições físicas do local e socioeconômicas da população. Nas áreas em que houver maior suscetibilidade a risco de desastres por inundação, deve-se incluir essas comunidades em uma ordem de prioridade de remoção e instalá-las em locais que proporcionem infraestrutura e qualidade de vida.

Com relação ao poder público, ações podem ser executadas a curto prazo visando à preparação para resposta às inundações nas áreas mais suscetíveis, como:

- Instalação de sistemas de alerta;

- Traçar áreas seguras para a remoção temporária da população em uma emergência;
- Promover palestras e treinamentos para capacitar a população com temas sobre preparação, resposta e mitigação frente a inundações;
- Desenvolver e distribuir, de preferência de forma participativa, manuais didáticos para a população que auxilie em casos de ocorrência de inundações, oferecendo informações para prevenção e medidas de segurança;
- Armazenamento de materiais para emergências (alimentos, medicamentos, materiais para abrigo temporário).

A médio prazo pode haver investimentos em telhados verdes, já que esses auxiliam na amortização de cheias em bacias hidrográficas, como foi observado por Guimarães *et al.* (2020), Liu *et al.* (2020) e Mora-Melià *et al.* (2018). A presença da vegetação faz com que a água escoe, podendo então ser direcionada a um local de armazenamento. Essa água armazenada ainda pode ser utilizada para outros fins, como regar plantas, limpar calçadas, quintais, entre outras atividades. Portanto, também é uma alternativa para tentar reduzir a incidência de inundações urbanas.

A médio-longo prazo é necessário o zoneamento das áreas suscetíveis a inundação, a fim de identificar o grau de risco em cada zona e planejar a ocupação dessa área. Em zonas com alto risco, deve ser proibido a ocupação e remanejada a população de acordo com uma ordem de prioridade de acordo com o grau de vulnerabilidade. Planos de Contingência também devem ser elaborados e divulgados para a população, contendo a área de abrangência, as ações previstas em cada fase (prevenção/preparação para enfrentamento, alerta, prontidão e resposta) e cada atribuição dos órgãos envolvidos.

Geotecnologias podem ser muito úteis associadas a uma gestão de uso e ocupação da terra para a RRD, ajudando na formulação de uma agenda regulatória direcionada para a prevenção, adaptação e redução dos desastres.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao ser realizada a comparação entre diferentes resoluções, notou-se um melhor desempenho do modelo HAND ao se utilizar MDEs de melhores resoluções espaciais, apresentando maior detalhamento nas feições e suavização na distribuição das classes. Ainda, ao utilizar recortes espaciais diferentes, o desempenho também mudou, mostrando diferenças na continuidade das drenagens e, conseqüentemente, no produto final dos mapas HAND.

Foram escolhidas bacias hidrográficas como unidades de análise, levando em conta que essas são a unidade mínima de planejamento. Quanto a resolução espacial, foi utilizada a de 5 m x 5 m, ao observar uma melhor resposta frente as de 30 m x 30 m e 90 m x 90 m. Destaca-se que essas resoluções mais baixas estavam disponíveis para *download* de forma acessível e gratuita em *sites* do INPE e EMBRAPA. Contudo, a de 5 m x 5 m foi obtida a partir de contato com a prefeitura. Sugere-se que esse dado também fique disponível com facilidade, para seu uso em pesquisas futuras.

O tempo de processamento dos MDEs também foi distinto de acordo com o dado de entrada utilizado, de forma que quanto maior a resolução, maior o tempo levado para gerar o produto.

O mapeamento originado pelo modelo HAND apresentou bons resultados, visto que áreas acometidas frequentemente por inundações na cidade de João Pessoa se localizaram dentro da área identificada no modelo como suscetível a esse desastre.

Como o desastre só se concretiza com o fator humano, buscou-se fazer uma estimativa da população exposta tomando como base os valores totais da população e da área de cada bacia e comparando-os com o valor da área composta por manchas de inundação de classe com maior risco (1 m HAND). Constatou-se que as bacias hidrográficas dos rios Jaguaribe e Marés-Sanhauá novamente apareceram em destaque, comportando maior quantidade de bairros nas classes mais altas (porcentagens acima de 20%) de população vulnerável.

A análise das áreas urbanizadas no ano de 2018 mostrou que as bacias hidrográficas dos rios Cuiá, Marés-Sanhauá e Jaguaribe possuem uma maior mancha urbana. Sobrepostas essas áreas com as áreas de “muito alto grau de

prioridade de ações de redução do risco” (1 m HAND), verificou-se que as bacias hidrográficas com maior sobreposição foram Jaguaribe e Marés-Sanhauá. Já avaliando a tendência de expansão, durante o período de 1990 a 2018, Cuiá apresentou maior porcentagem de crescimento.

Assim, aponta-se a necessidade de maior atenção nas bacias hidrográficas dos rios Jaguaribe, Marés-Sanhauá e Cuiá. São bacias hidrográficas que apresentam eventos recorrentes ligados a desastres, podendo-se citar o bairro São José e as comunidades Tito Silva e São Rafael, na BHRJ, que enfrentam frequentemente problemas associados a inundações.

Em futuros estudos recomenda-se uma abordagem mais focada em comunidades presentes nessas bacias hidrográficas que apresentam condições de vulnerabilidade social. A precariedade de infraestrutura do local e a baixa renda da população são fatores que influenciam no enfrentamento e na capacidade de adaptação aos desastres.

Por parte do poder público, medidas estruturais e não-estruturais de prevenção e adaptação devem ser executadas nos locais com maior prioridade de ações de RRD. As ações devem incluir a população, de forma a conscientizá-la sobre o que deve ser feito em cada etapa. Planos de Contingência também precisam ser elaborados e apresentados à população, considerando a realidade de cada localidade.

O desenvolvimento sustentável passa pela RRD, por isso a sua presença em metas dos ODS. É preciso que haja um esforço conjunto, da gestão municipal integrada com a população, para que as cidades se desenvolvam e não apenas cresçam sem estrutura e equilíbrio com o meio ambiente. Um planejamento urbano tem que estar associado a uma GRD eficiente, com o intuito de mitigar os impactos causados pelos desastres relacionados com fenômenos naturais, buscando a construção de um ambiente urbano mais sustentável.

REFERÊNCIAS

ACSELRAD, H. **Vulnerabilidade ambiental, processos e relações**. In: Comunicação ao II Encontro Nacional de Produtores e Usuários de Informações Sociais, Econômicas e Territoriais. Rio de Janeiro: FIBGE, 2006.

ADEDEJI, O. H.; ODUFUWA, B. O.; ADEBAYO, O. H. Building capabilities for flood disaster and hazard preparedness and risk reduction in Nigeria: need for spatial planning and land management. **Journal of Sustainable Development in Africa**, v. 14, n. 1, p. 45-58, 2012.

AMARAL, R.; RIBEIRO, R.R. Inundação e enchentes. In: TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. 2009. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo, Instituto Geológico, p. 39-52. 2009.

ANJOS, W. F.; NÓBREGA, W. R.; SILVEIRA, J.A.R.; SILVA, M.D. Urbanização dispersa e a transformação da paisagem natural: estudo de caso sobre a dispersão urbana na bacia do rio Cuiá, na cidade de João Pessoa – PB, Brasil. **Geoambiente On-line**, n.28, p.127-141, 2017.

AON. **Weather, Climate & Catastrophe Insight – 2019 Anual Report**. 81 p. 2020.

AZEVEDO, B. M L. de. **Índice de vulnerabilidade a desastres relacionados com fenômenos naturais no município de João Pessoa, Paraíba, Brasil**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

BARBOSA, F. A. R. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape, PB**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

BECK, U. **Sociedade de risco: rumo a uma outra modernidade**. Editora 34, 2011.

BOLLMANN, H.A. **Relação da densidade populacional sobre variáveis de qualidade físico-química das águas superficiais em microbacias hidrográficas urbanas sem cobertura sanitária em Porto Alegre – RS**. Porto Alegre, 2004. 156p. Tese (Doutorado - Instituto de Pesquisas Hidráulicas). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

BRAGA, R. Mudanças climáticas e planejamento urbano: uma análise do Estatuto da Cidade. In: Encontro Nacional da ANPPAS. Belém, 2012. **Anais...** Belém: ANPPAS, p. 1-15, 2012.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001**. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Brasília, DF, 2001. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm#:~:text=Par%C3%A1grafo%20C3%BAnico.,bem%20como%20do%20equil%C3%ADbrio%20ambiental.. Acesso em abril de 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** Institui o novo código florestal brasileiro. Brasília, DF, 2012a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm#:~:text=Esta%20Lei%20estabelece%20normas%20gerais%20sobre%20a%20prote%C3%A7%C3%A3o%20da%20vegeta%C3%A7%C3%A3o,e%20prev%C3%AA%20instrumentos%20econ%C3%B4micos%20e. Acesso em abril de 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012.** Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Brasília, DF, 2012b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm. Acesso em abril de 2020.

BURBY *et al.* Creating hazard resilient communities through land-use planning. **Natural Hazards Review**, v. 1, n. 2, p. 99-106, 2000.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles geographical information systems**. New York: Oxford university Press. 1998.

CARDONA, O. D. **The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism for effective risk management.** In: BANKOFF, G.; FRERKS, G.; HILHORST, T. (Eds.). Mapping vulnerability: disasters, development and people, v. 17, p. 37-51, 2004.

CARDONA, O. D. **Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo.** In: MASKREY, A. Los desastres no son naturales,. Colombia: LA RED; ITDG, p. 51-74, 1993.

CARNEIRO *et al.* A gestão integrada de recursos hídricos e do uso do solo em bacias urbano-metropolitanas: o controle de inundações na bacia dos rios Iguaçu/Sarapuí, na Baixada Fluminense. **Ambiente & Sociedade**, v. 13, n. 1, p. 29-49, 2010.

CAU/PB (Conselho de Arquitetura e Urbanismo da Paraíba). **Chuvas em João Pessoa – CAU/PB alerta que problemas são fruto da falta de planejamento urbano.** Disponível em: <https://www.caupb.gov.br/?p=12538>. Acesso em 18 de junho de 2019.

UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995-2014.** Florianópolis: UFSC/CEPED, 2016.

COELHO, A. L. N. Sistema de informações geográficas (SIG) como suporte na elaboração de planos diretores municipais. **Caminhos de Geografia**, v. 10, n. 30, 2009.

CRED. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. **Natural disasters in 2018: an opportunity to prepare.** 2019.[Online]. Disponível em: <https://www.cred.be/natural-disasters-2018>. Acesso em janeiro de 2020.

DA SILVA, C, S.; SANTIAGO, A. Urbanização e inundação: conflitos e possibilidades. **Paisagem e Ambiente**, n. 24, p. 327-334, 2007.

DESOUZA, K. C.; FLANERY, T. H. Designing, planning, and managing resilient cities: A conceptual framework. **Cities**, v. 35, p. 89-99, 2013.

DESAI *et al.* **Making development sustainable: The future of disaster risk management.** Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. 2015.

EMBRAPA. **Levantamento pedológico detalhado (escala 1:5.000) e estoque de carbono orgânico do solo da Floresta Nacional Restinga de Cabedelo, municípios Cabedelo e João Pessoa, PB.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

FILGUEIRA, H.J.A. **Os desastres relacionados com fenômenos naturais no contexto dos sistemas organizacionais.** In: GARCIA, J.P.M. (Org.). Desastres na Paraíba: riscos, vulnerabilidade e resiliência. João Pessoa, PB: Editora Universitária da UFPB, p. 53-63, 2013.

EUROPEAN COMMISSION. **Funding opportunities to support disaster risk prevention in the cohesion policy 2014-2020 period,** 2016. Disponível em: http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/informat/factsheet_disaster_risk_prevention_03.pdf. Acesso em março de 2020.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais.** São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades.** João Pessoa – PB. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/joao-pessoa/panorama>>. Acesso em: julho de 2020.

GAROUSI-NEJAD *et al.* Terrain analysis enhancements to the Height Above Nearest Drainage flood inundation mapping method. **American Geophysical Union.** 2019.

GODBOUT, L. D. **Error assessment for Height Above the Nearest Drainage inundation mapping.** Dissertação de mestrado. *The University of Texas, Austin*, 2018.

GOERL, R. F.; KOBAYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 16. João Pessoa, 2005. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2005.

GOERL *et al.* O modelo HAND como ferramenta de mapeamento de áreas propensas a inundar. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20. Florianópolis, 2017. **Anais...** Florianópolis: ABRH, 2017.

GOVERNMENT TECHNOLOGY. **How GIS can help communities prepare for disaster (industry perspective)**. Set. 2017. Disponível em: <https://www.govtech.com/data/How-GIS-Can-Help-Communities-Prepare-for-Disaster.html>. Acesso em março de 2020.

GUIMARÃES *et al.* Uso de telhados verdes na mitigação de cheias de uma bacia hidrográfica urbana com alta frequência de inundações. **Brazilian Journal Development**, v.6, n.12, p. 98235-98254, 2020.

JATOBÁ, S. U. S. Urbanização, meio ambiente e vulnerabilidade social. **Boletim regional, urbano e ambiental**, 2011.

JENSEN, J. **Sensoriamento Remoto do ambiente – Uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

JHA, A. K.; BLOCH, R.; LAMOND, J. **A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century**. Washington DC. USA, 2012.

KELMAN, I. 2010. **Natural disasters do not exist (Natural hazards do not exist either)**, Version 3, 9 July 2010 (Version 1 was 26 July 2007). Disponível em: <http://www.ilankelman.org/miscellany/NaturalDisasters.rtf>

KLUG, L.; MARENGO, J. A.; LUEDEMANN, G. **Mudanças climáticas e os desafios brasileiros para implementação da nova agenda urbana**. 2016.

LAVELL, A. Desastres y desarrollo: hacia un entendimiento de las formas de construcción social de un desastre: el caso del huracán Mitch en Centroamérica. In: A. Fernández (comp.), **Comarcas vulnerables: riesgos y desastres en Centroamérica y el Caribe**, p. 11-44, 2005.

LEAL, T. S. **Análise da suscetibilidade à inundação na bacia hidrográfica do rio João Mendes, Niterói- RJ: planejamento e gestão das águas em áreas urbanas**. 2018. 140f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

LI U *et al.* A CyberGIS approach to generating high-resolution Height Above Nearest Drainage (HAND) raster for national flood mapping. **CyberGIS** 16, Urbana, p. 24-26, Illinois, July 2016.

LIU *et al.* Modeling green roof potential to mitigate urban flooding in a Chinese city. **Water**, v. 12, n. 8, p. 2082, 2020.

LILLESAND, T.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. **Remote sensing and image interpretation**. John Wiley & Sons, 2015.

LUDWIG, L.; MATTEDI, M. A. Dos desastres do desenvolvimento ao desenvolvimento dos desastres: a expressão territorial da vulnerabilidade. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 39, p. 23-42, 2016.

- MAIA, D.S. Notas sobre a urbanização de João Pessoa/PB: do processo e do seu reverso. **Revista Paraibana de Geografia**, v.3, n.1, p. 59-77, 2001.
- MANFREDA, S.; DI LEO, M.; SOLE, A. Detection of flood-prone areas using digital elevation models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, p. 781-790, 2011.
- MARANDOLA JR., E. **Habitar em risco**: mobilidade e vulnerabilidade na experiência metropolitana. 2008. 278 f. Tese (doutorado em Ciências) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- MARQUES, C. P. M.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Artificialização de cursos d'água urbanos e transferência de passivos ambientais entre territórios municipais: reflexões a partir do caso do Ribeirão Arrudas, Região Metropolitana de Belo Horizonte - MG. **Geografias**, Belo Horizonte, v. 10, n. 2, p.100-117, jul./dez. 2014.
- MCGRATH *et al.* A comparison of simplified conceptual models for rapid web-based flood inundation mapping. **Nat Hazards**, v. 93, p. 905-920, 2018
- MEHMOOD, A. Of resilient places: Planning for urban resilience. **European Planning Studies**, v. 24, n. 2, p. 407-419, 2016.
- MENDONÇA, F; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206 p.
- MENEZES FILHO, F. C. M.; AMARAL, D. B. Histórico da expansão urbana e ocorrência de inundações na cidade de Cuiabá-MT. **Soc. e Nat.**, v. 26, n. 1, p. 159-170, 2014.
- MILANESI, J.; DE QUADROS, E.L.L; LAHM, R.A. Utilização do modelo Hand no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação– Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, 2017.
- MOMO, M. R. **Avaliação da aplicação do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis a inundação no município de Blumenau**. 2014. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2014.
- MORA-MELIÀ *et al.* Viability of green roofs as a flood mitigation element in the central region of Chile. **Sustainability**, v.10, n.4, p.1130, 2018.
- MOURA, M.O.; CUNICO, C.; NÓBREGA, R.S.; DUARTE, C.C. Desastres hidrometeorológicos na região Nordeste do Brasil: distribuição espaço-temporal dos reconhecimentos de Estado de Calamidade Pública. **Caderno de Geografia**, v. 26, n.2, p. 259-271, 2016.
- MUIS *et al.* Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: A probabilistic analysis using global data. **Science of the Total Environment**, v. 538, p. 445-457, 2015.

NARVÁEZ *et al.* **La gestión del riesgo de desastres**. 2009.

NOBRE, C. A. **Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: região metropolitana de São Paulo**: relatório final / Carlos A. Nobre, coordenador. – São José dos Campos, SP: INPE, 2011.

NOBRE, A. D. *et al.* HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 2, p. 320-333, 2016.

OBT – Observação da Terra. **Software desenvolvido pelo INPE simula a trajetória da lama no colapso da Barragem em Brumadinho/MG**. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/noticias/software-desenvolvido-pelo-inpe-simula-a-trajetoria-da-lama-no-colapso-da-barragem-em-brumadinho-mg>
Acesso em: maio de 2019.

OCHA - United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. **Latin America and the Caribbean**: Natural Disasters 2000-2019. OCHA Report. 2020.

OECD. **Cities and Climate Change**, OECD Publishing. 2010.

O'CALLAGHAN, J. F; MARK, D. M. *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, 28, p. 323–344, 1984

O'KEEFE *et al.* Taking the naturalness out of natural disasters. **Nature**, v. 260, p. 566-567, 1976.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Habitat III**: nova agenda urbana. 2017. Disponível em:<<https://habitat3.org/about>>. Acesso em: 02 mar. 2020.

PARAÍBA. Prefeitura Municipal de João Pessoa. Plano Municipal de Saneamento Básico de João Pessoa – PMSB-JP. **Semanário Oficial**. Nº 1509 (Especial). João Pessoa, 2015.

PEREIRA, M. D. B; MONTEIRO, D. C. S; SILVA, N. T; MOURA, M. O. Avaliação quantitativa das precipitações diárias intensas na cidade de João Pessoa, Paraíba. **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, V.1, N.5, p.921 – 929, 2012.

PITA, A. L. L. R. **Segregação urbana e organização socioespacial**: um estudo da comunidade do Timbó, em João Pessoa. João Pessoa. 2012. 213 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal da Paraíba, 2012.

RAFAEL, R. A., ARANHA, T.R.B.T., MENESES, L.F., SARAIVA, A.G.S. Caracterização da evolução urbana do município de João Pessoa/PB entre os anos de 1990 a 2006 com base em imagens orbitais de média resolução. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 14, Natal, 2009.

REIS, A. L. Q.; LIMA, E.R.V.; ANDRADE, M.O.; REIS, C.M.M. Avaliação do desempenho do Índice de Sustentabilidade pelo *Dashboard Sustainability* nas Bacias Hidrográficas dos rios Jaguaribe, Cabelo e Cuiá na cidade de João Pessoa (PB). **Gaia Scientia**, v.11, n. 2, p.177-202, 2017.

RENNÓ, C. D *et al.* HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: mapping terra firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p.3469-3481, 2008.

ROBAINA, L. E. S. Espaço urbano: relação com os acidentes e desastres naturais no Brasil. **Ciência e Natura**, v. 30, n. 2, p. 93-105, 2008.

RODDA, H. J. E. The Development and application of a flood risk model for the Czech Republic. **Natural Hazards**, v. 36, n.1, p. 207-220, 2005.

RODRIGUES, G. O.; NOBRE, A. D.; SILVEIRA, A. C.; CUARTAS, L. A. Efeitos da resolução espacial de dados SRTM na descrição de terrenos obtida pelo modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage) – estudo de caso em Manaus/AM, In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, p.5769-5776, 2011.

ROMERO, G; MASKREY, A. **Como entender los desastres naturales**. In: MASKREY (Ed.). Los desastres no son naturales. Colombia: LA RED; ITDG, 1993.

SALES, L.A. **O Processo de verticalização e seus problemas no bairro de Manaíra, João Pessoa-PB**. (Dissertação de Mestrado). João Pessoa – PB: Pós Graduação em Geografia. Universidade Federal da Paraíba – UFPB, 2014.

SANTOS, C.L; SOUZA, A. S.; VITAL, S.R.O.; GIRÃO, O.; WANDERLEY, L. S. A. Impactos da urbanização em bacias hidrográficas: o caso da bacia do rio Jaguaribe, cidade de João Pessoa/PB. **REGNE**, v.2, nº especial, p. 1024-1033, 2016.

SANTOS, J. A. **Análise dos riscos ambientais relacionados às enchentes e deslizamentos na favela São José, João Pessoa – PB**. (Dissertação de Mestrado). João Pessoa – PB: Pós Graduação em Geografia. Universidade Federal da Paraíba – UFPB, 2007.

SILVA, A. L. *et al.* Avaliação da precipitação do município de João Pessoa-PB. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v. 7, p. 123–136, 2017.

SOUSA, L. F. N. M. de. **Metodologia para o mapeamento de cheias em zonas de risco. Aplicação a um trecho de um rio do norte de Portugal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Porto, 2012.

SOUSA, C. A. F. **Impactos ambientais negativos provenientes do *Urban Sprawl* sobre a bacia hidrográfica do rio Gramame, no município de João Pessoa, PB, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

SOUSA, D. P. S.; GOERL, R. F. Proposta metodológica para estimar danos relacionados à inundação em áreas urbanas. In: COBRAC, 13., 2018, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 2018.

SPECKHANN, G. A. **Uma proposta de mapeamento de risco de inundação na bacia do rio Itajaí utilizando descritores de terreno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

STEINBERG, T. **Acts of God: The unnatural history of natural disaster in America**. Oxford University Press, 2006.

TECHNUM CONSULTORIA SS - **Relatório do Diagnóstico Consolidado dos Assentamentos Urbanos Irregulares localizados em João Pessoa e definidos como ZEIS no Plano Diretor do Município, de 1992**. João Pessoa – PB, 2007

TUCCI, C. E. M. **Inundações e drenagem urbana**. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil. **Rega/Global Water Partnership South América**, v. 1, n. 1, p. 59-73, 2004.

TWUMASI, N. Y. D.; SHAO, Z.; ORHAN, A. Remote sensing and GIS methods in urban disaster monitoring and management—An overview. **International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)**, v. 3, n. 4, p. 918-926, 2019.

UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010**: volume Paraíba. Florianópolis: UFSC/CEPED, 2011.

UN. UNITED NATIONS. **16 – Urban ecosystems and resource management**. New York: UN, 2015a. (Habitat III Issue Papers). Disponível em: <http://goo.gl/4kzort>. Acesso em fevereiro de 2020.

UN. UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. Resolution adopted by the General Assembly. 2015b. Disponível em: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E. Acesso em março de 2020.

UNISDR. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. **Terminology on disaster risk reduction**. UNISDR: Suíça, 2009. Disponível em: <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/7817>. Acesso em: julho de 2019.

UNISDR. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. **Sendai framework for disaster risk reduction 2015-2030**. UN world conference on

disaster risk reduction, 2015. March 14–18, Sendai, Japan. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction; 2015. Disponível em: <http://www.wcdrr.org/uploads/Sendai_Framework_for_Disaster_Risk_Reduction_2015-2030.pdf>. Acesso em fevereiro de 2020.

ZHENG *et al.* River channel geometry and rating curve estimation using height above the nearest drainage. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 54, n. 4, p. 785-806, 2018.