



Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação aplicando diferentes modelos digitais de elevação no modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND)

Flood susceptibility mapping using different digital elevation models in the Height Above the Nearest Drainage (HAND) model

Amanda Alves Queiroga^{*1} , Rafaella Gouveia Loureiro Oliveira² , Hamilcar José Almeida Filgueira³ ,
Camila Cunico⁴ 

¹ Doutoranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Centro de Ciências Exatas e da Natureza (CCEN), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil.

Recebido (Received): 28/09/2021

Aceito (Accepted): 16/05/2022

² Mestranda em Water and Geological Risk Engineering, Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova, Itália.

³ Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil.

⁴ Departamento de Geociências, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil.

E-mail: rafaellaglo@gmail.com (RGLO); hfilgueira@gmail.com (HJAF);

camilacunico@yahoo.com.br (CC)

*E-mail para correspondência: amandaaqueiroga@gmail.com

Resumo: Em todo o mundo, nações enfrentam desastres relacionados com fenômenos naturais, os quais provocam perdas diversas. Nesse sentido, é fundamental a elaboração de ações de Redução dos Riscos de Desastres (RRD), dentre as quais pode-se citar a estimativa de áreas suscetíveis a risco de desastres por inundação. O objetivo deste trabalho foi avaliar os mapeamentos de áreas passíveis de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguaribe (BHRJ), em João Pessoa, Paraíba, Brasil, gerados a partir do modelo descritor do terreno *Height Above the Nearest Drainage* (HAND). Como dados de entrada, foram utilizados modelos digitais de elevação (MDEs) com resoluções espaciais de: 90 m x 90 m; 30 m x 30 m; e de 5 m x 5 m. Para validação do modelo, utilizaram-se informações apresentadas no Plano Municipal de Saneamento Básico de João Pessoa (PMSB-JP), e pontos de inundação coletados em campo. Embora haja interferências do tecido urbano, os produtos HAND obtidos se apresentaram promissores para a previsão de inundação em vários pontos da bacia hidrográfica, abrangendo até 80% dos pontos de inundação do PMSB-JP e os pontos visitados em campo, quando utilizado o MDE de maior resolução espacial. Os mecanismos de adaptação a inundações, desenvolvidos de forma precária pela comunidade visitada, evidenciaram a importância da busca pelo aumento da sua resiliência no contexto da RRD.

Palavras-chave: Geotecnologias; Risco ambiental; Desastres; Vulnerabilidade social.

Abstract: *All over the world, nations face disasters related to natural phenomena, which cause several losses. In this sense, Disaster Risk Reduction (DRR) actions are fundamental, among which can be mentioned estimation of flood susceptibility areas. The objective of this research was to evaluate the mapping of flood susceptibility areas in the Jaguaribe River Basin (BHRJ), in João Pessoa, Paraíba, Brazil, generated from the Height Above the Nearest Drainage (HAND) terrain descriptor model. As input data, DEMs with spatial resolutions of 90 m x 90 m, 30 m x 30 m and 5 m x 5 m were used. To validate the model, the information presented in the Municipal Basic Sanitation Plan of João Pessoa (PMSB-JP) and flood points collected in the field were used. Although there are interferences from the urban fabric, the HAND products obtained proved to be promising for flood forecasting in various points of the hydrographic basin, covering up to 80% of the PMSB-JP flooding points and the points visited in the field, when using the DEM of higher spatial resolution. Flood adaptation mechanisms, poorly developed by the visited community, highlighted the importance of increasing their resilience, within the context of DRR.*

Keywords: *Geotechnologies; Environmental risk; Disasters; Social vulnerability.*

1. Introdução

Os desastres relacionados com fenômenos naturais, que vêm se intensificando em decorrência das mudanças climáticas, afetam todas as nações, causando diversas perdas, sejam elas humanas, econômicas e ambientais. A “AON Benfield”, uma empresa do ramo de atividade de seguros, em seu relatório intitulado “Weather, Climate & Catastrophe Insight: 2019 Annual Report”, considerou o período de 2010 a 2019 como “a década mais cara do mundo”, apresentando o maior valor em perdas diretas relacionadas aos desastres, somando US\$ 98 trilhões, ou seja, US\$1 trilhão a mais do que a década anterior (AON, 2020).

Ainda segundo o relatório, no ano de 2019, os países mais afetados economicamente no que se refere a perdas ocasionadas pelos desastres foram o Japão (US\$ 15 bilhões) e os Estados Unidos da América (US\$ 6,5 bilhões). Enquanto o Japão sofreu essas perdas econômicas por causa de tufões, os Estados Unidos da América foram mais afetados por inundações. 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).

A inundação é um fenômeno que ocorre com o transbordamento da água da calha principal do rio, ocupando as áreas marginais denominadas planícies de inundação. No entanto, a ocupação dessas áreas, por parte da parcela mais vulnerável economicamente da população, atribui um risco ambiental a essa categoria, intensificado devido a fatores como, segundo Tucci (2003): estrangulamento da seção do rio devido a aterros e pilares de pontes, estradas, aterros para aproveitamento da área, assoreamento do leito do rio e lixo.

Assim, enchentes e inundações que ocorrem nas bacias hidrográficas, comumente estão relacionadas com ações antrópicas sobre esse espaço, podendo-se citar: impermeabilização do solo, ocupação irregular, remoção da vegetação ao longo das margens fluviais, disposição inadequada de resíduos sólidos, entre outros fatores. Diante disso, ações e medidas de Redução de Risco de Desastres (RRD) são necessárias, de modo a minimizar a ocorrência de desastres nesses locais.

De acordo com a UFSC (2016), durante o período de 1995 a 2014, com relação à desastres hidrológicos, constatou-se 268 registros e um prejuízo de R\$ 989 milhões causados ao estado da Paraíba. Silva (2014) observou, a partir de uma análise de eventos pluviométricos em João Pessoa/PB, que o número de eventos extremos aumentou conforme o crescimento populacional e expansão urbana na cidade.

Assim, ações e medidas estruturais e não-estruturais têm sido efetuadas visando a RRD no que se refere a inundações. Como uma medida não-estrutural, tem-se o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação, que se apresenta como um modo de auxiliar comunidades para o desenvolvimento de sistemas de alerta eficientes e de resposta eficazes, servindo de base também para a elaboração de planos de contingência de emergências. Ainda, podem auxiliar na redução das vulnerabilidades e no aumento da resiliência, buscando a redução dos danos e perdas.

Modelos computacionais hidrodinâmicos se destacam na elaboração de mapas de inundação. No entanto, necessitam de um grande volume de dados de entrada que nem sempre são encontrados com facilidade em determinadas regiões. Além disso, as suas complexidades matemáticas, a falta de dados históricos de inundação e a dependência por calibração normalmente dificultam a sua utilização. Como alternativa, os modelos descritores de terreno vêm se sobressaindo devido a uma maior praticidade de aplicação, pois demandam poucos dados (*i.e.* apenas o Modelo Digital de Elevação).

O modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) é um modelo descritor de terreno desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cujo produto final consiste em um Modelo Digital de Elevação (MDE) normalizado em relação aos canais de drenagem. A sua principal aplicação consiste na identificação de áreas propensas à inundação, podendo ser empregado como ferramenta de auxílio ao planejamento em diferentes escalas, seja em análises municipais ou em bacias hidrográficas de grande abrangência. O modelo HAND foi inicialmente proposto por Rennó *et al.* (2008) e já alcançou visibilidade internacional.

Nos Estados Unidos da América, esse modelo foi aplicado em escala nacional para definir áreas propensas a inundação (LIU *et al.*, 2016). No Canadá, teve sua aplicação comparada a outros modelos conceituais simplificados, apresentando os melhores resultados (MCGRATH *et al.*, 2018). Ainda, a finalidade do modelo não se restringe a estudos vinculados a mapeamento de riscos de desastres de inundações, mas é adaptável a outras pesquisas como fez Hamdani e Baali (2019), que o utilizaram no mapeamento de áreas de recarga de aquífero no Marrocos. Cabe citar também o estudo realizado por Mengue

e Fontana (2015), que utilizaram o HAND para auxiliar no mapeamento dos principais cultivos de verão no Rio Grande do Sul.

Diante disso, considerando a importância do mapeamento de áreas inundáveis como ferramenta auxiliar de planejamento, sobretudo no contexto da RRD, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do modelo HAND no mapeamento de áreas inundáveis na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguaribe (BHRJ), em função de dados de entrada com diferentes resoluções espaciais. Além disso, como objetivo secundário tem-se a apresentação de ferramentas de adaptação a eventos extremos de inundação desenvolvidas por uma comunidade frequentemente atingida por eventos de inundação na BHRJ, em João Pessoa, Paraíba, Brasil.

2. Materiais e métodos

2.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Jaguaribe (BHRJ) está localizada no Centro-leste do município de João Pessoa, entre as coordenadas UTM 9216000mN/299000mE e 9206000mN/287000mE. O clima da região é classificado como quente e úmido, e o município atinge valores de precipitação pluviométrica anual entre 1.330 e 1.890 mm (SILVA *et al.*, 2017).

A BHRJ possui uma área de, cerca de, 46 km² e limita-se ao Norte, com o município de Cabedelo; ao Sul, com as bacias hidrográficas dos rios Cuiá, Gramame e Cabelo; a Oeste, com a bacia hidrográfica do rio Marés Sanhauá; e a Leste, com o Oceano Atlântico (**Figura 1**). É importante mencionar que a BHRJ possui o principal rio urbano do município de João Pessoa e apresenta várias porções com intensa influência antrópica, que vem descaracterizando seus atributos naturais e provocando impactos socioambientais negativos ao longo dos anos.

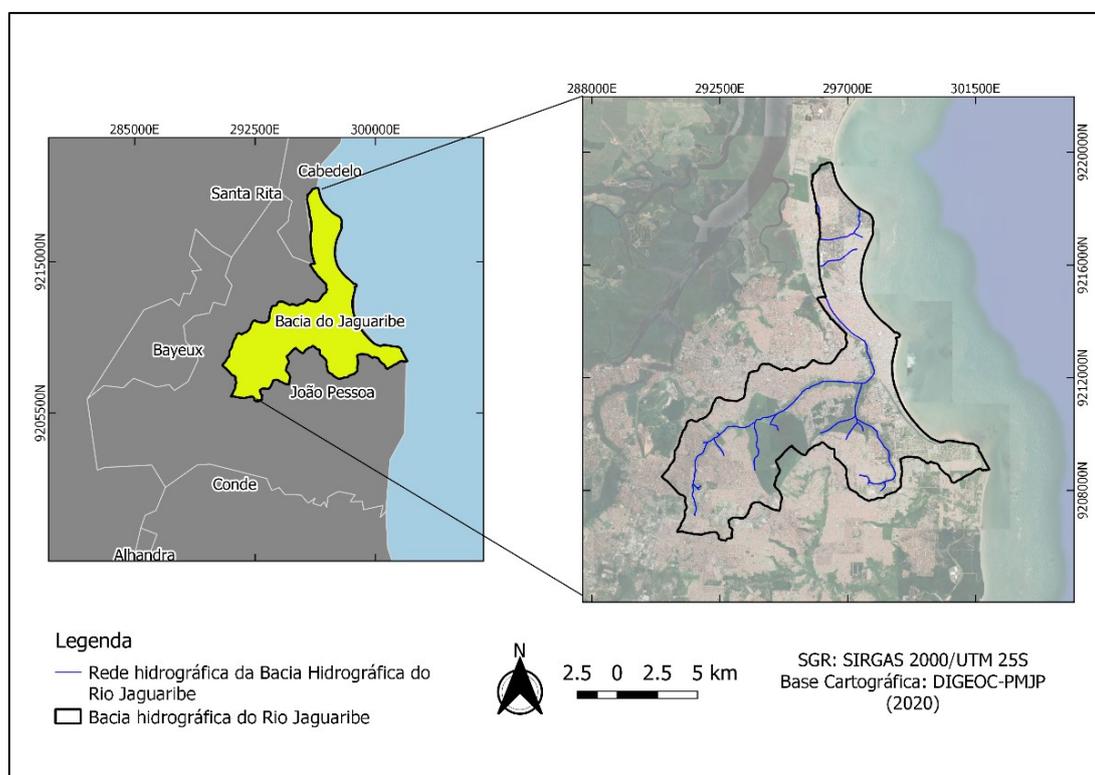


Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Jaguaribe.

Trata-se de uma bacia hidrográfica predominantemente urbana, dado que está inserida majoritariamente na Zona Leste do município, cuja área é 71% ocupada pelo tecido urbano (PARAÍBA, 2015). Na década de 1930, o curso do Rio Jaguaribe, que antes desaguava na praia do Bessa, foi direcionado para o Rio Mandacaru, desaguando no estuário do Rio Paraíba (SANTOS *et al.*, 2015), evidenciando o nível de interferência antrópica a qual essa bacia hidrográfica foi submetida.

A BHRJ abrange 28 bairros do município, sendo 10 por completo (Bessa, Jardim Oceania, Aeroclube, Manaíra, Tambaú, Cabo Branco, São José, Altiplano Cabo Branco, Castelo Branco e Varjão) e 18 parcialmente (Brisamar, Miramar, Tambauzinho, Expedicionários, Torre, Jaguaribe, Cruz das Armas, Oitizeiro, Ernani Sátiro, João Paulo II, Cristo Redentor, Bancários, Jardim Cidade Universitária, Anatólia,

Jardim São Paulo, Mangabeira, Portal do Sol e Ponta do Seixas). Nela residem cerca de 123.390 habitantes, conforme o último censo demográfico realizado em 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), considerando apenas os bairros que estão inteiramente nos limites da bacia hidrográfica (PARAÍBA, 2015).

Um estudo realizado por Santos (2016) revelou que, apesar da caracterização física da BHRJ denotar que a mesma possui baixa probabilidade de ocorrência de enchentes e inundações, a urbanização e ações antrópicas relacionadas estão associadas a ocorrência de desastres. Quando ocorrem eventos pluviométricos de elevada magnitude, associados a alterações antrópicas no ambiente, o relevo relativamente plano, a presença de solos espessos e com camadas argilosas pouco permeáveis e a baixa energia de fluxo em toda a extensão do canal fluvial, ocorrem episódios de enchentes e inundações na bacia hidrográfica.

Segundo Paraíba (2015), a BHRJ se encontra em elevado estado de degradação, sobretudo devido ao lançamento de esgotos brutos, adensamento residencial e a drenagem pluvial superficial que, via de regra, transporta rejeitos existentes nos logradouros. Além disso, a BHRJ possui 28 comunidades subnormais que ocupam irregularmente áreas suscetíveis a risco de desastres relacionados com fenômenos naturais.

A habitação dessas comunidades em áreas suscetíveis às inundações proporciona alterações antrópicas que potencializam o risco de desastres. São exemplos dessas alterações: a retirada da mata ciliar, a disposição inadequada de resíduos sólidos e a impermeabilização do solo. A ocupação dessas áreas frágeis ambientalmente, exposta a ameaças, faz com que a população se coloque em situação de vulnerabilidade.

2.2. Procedimentos do modelo HAND

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é a uma matriz onde cada *pixel* corresponde a valores altimétricos, sendo, portanto, uma representação tridimensional do relevo (VALERIANO, 2008), e é o único dado necessário para gerar o mapa de suscetibilidade à inundação por meio do modelo HAND. Neste trabalho, foram utilizados três MDEs de fontes e resoluções espaciais distintas, um de 90 m x 90 m, da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), obtido no *site* da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); outro de 30 m x 30 m, também SRTM, obtido por meio do projeto TOPODATA, desenvolvido pelo INPE; e um com 5 m x 5 m, do sensor remoto *Light Detection And Ranging* (LiDAR), cedido pela Prefeitura Municipal de João Pessoa (PMJP). O recorte da BHRJ em todos os MDEs foi realizado por meio do *software* livre Quantum Gis (QGIS) 3.4.10.

O modelo HAND foi executado pelo *software* livre TerraView, desenvolvido pelo INPE, por meio do *plugin* TerraHidro. Esse modelo tem o objetivo de normalizar o MDE em relação ao ponto mais próximo da rede de drenagem, onde ele irá desaguar, e não em relação ao nível do mar. Assim, é calculada a variação altimétrica de cada *pixel*, gerando classes de suscetibilidade à inundação. Vale ressaltar que os atributos do MDE são de fundamental importância para a acurácia dos resultados dos mapas HAND, e que produtos gerados de baixa qualidade podem levar a análises superficiais, subestimando os problemas.

O modelo HAND é executado em cinco etapas (**Figura 2**) (NOBRE *et al.*, 2016; NOBRE *et al.*, 2011). A primeira se trata da correção hidrológica do MDE, onde são eliminadas as incoerências altimétricas. Na segunda, são identificadas as direções do fluxo de drenagem (DFD) (ou *Local Drain Direction* - LDD, em inglês) para cada *pixel* da grade. Para essa conexão altimétrica, o algoritmo utiliza o método *Deterministic Eight-Neighbor* (D8), o qual considera os oito vizinhos de cada ponto e identifica a maior declividade para atribuir a direção do fluxo (NOBRE *et al.*, 2016; NOBRE *et al.*, 2011).

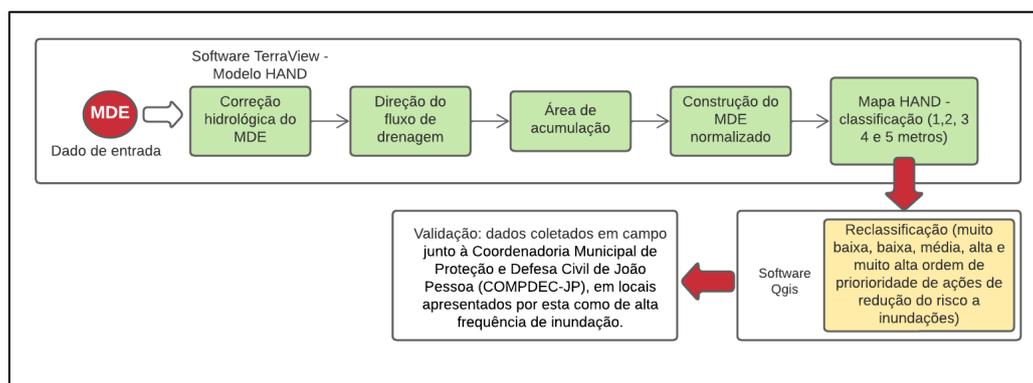


Figura 2: Fluxograma das etapas da metodologia.

Na terceira etapa, a área de acumulação é gerada, estabelecida a partir de um limiar mínimo de drenagem. O limiar de drenagem é o único parâmetro ajustável do modelo, onde quanto maior o limiar, menos densa é a rede de drenagem. A escolha do limiar de drenagem foi feita a partir do ajuste manual utilizando diversos valores, de forma que a rede de drenagem gerada fosse a mais próxima possível à rede hidrográfica real, disponibilizada pela PMJP. Para cada MDE foi escolhido um limiar diferente, em função da resolução espacial (**Tabela 1**). A quarta etapa do processamento consiste na construção do MDE normalizado, de modo que cada ponto tem sua altimetria referenciada a partir da rede de drenagem. Atribuiu-se aos pontos da rede de drenagem o valor zero, enquanto os demais receberam valores iguais à diferença calculada.

Tabela 1: Limiares de drenagem adotados em função dos diferentes MDEs.

Resolução espacial do MDE	Limiar de drenagem (<i>pixels</i>)
5 m x 5 m	20.000
30 m x 30 m	600
90 m x 90 m	200

O mapa gerado a partir do modelo HAND (quinta etapa) foi exportado para o QGIS, onde foi realizada uma reclassificação, com o intuito de representar diferentes graus de suscetibilidade à inundação. Foram escolhidas cinco classes, compostas por diferentes ordens de prioridade de ações de redução do risco a inundação - muito baixa (5 metros HAND), baixa (4 metros HAND), média (3 metros HAND), alta (2 metros HAND) e muito alta (1 metro HAND). Todo o processo foi repetido para cada MDE, visando avaliar as diferenças relativas às diferentes resoluções espaciais utilizadas.

Semelhantemente ao trabalho realizado por Goerl *et al.* (2017), para validação do mapeamento obtido por meio do modelo HAND foram utilizados os pontos de alagamento e inundação apresentados no “Plano Municipal de Saneamento Básico de João Pessoa (PMSB-JP)” (PARAÍBA, 2015), como também dados coletados em campo junto à Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil de João Pessoa (COMPDEC-JP), em locais apresentados por essa como de alta frequência de inundação.

3. Resultados e discussão

3.1. Mapeamento de Áreas Suscetíveis à Inundação

Os primeiros produtos analisados foram as redes de drenagem (**Figura 3**) da BHRJ geradas no *software* TerraView, de acordo a resolução espacial de cada MDE, com o intuito de avaliar qual resultado se aproximou ao máximo à drenagem real.

Observou-se que, dentre às três redes de drenagem geradas, aquela proveniente do MDE de 5 m x 5 m, além de apresentar maior suavidade, assemelhou-se mais à drenagem de referência, enquanto a drenagem decorrente do MDE de 90 m x 90 m revelou uma maior distorção. Ao analisar o produto final do modelo HAND, observa-se que o MDE de maior resolução espacial apresenta feições mais uniformes, enquanto o de menor resolução apresenta dados com *pixels* mais marcados, com classes indefinidas, de transição pouco suave.

Ao gerar o mapeamento HAND, a diferença entre as resoluções espaciais utilizadas também ficou evidente (**Figura 4**). A diferença no uso de diferentes resoluções espaciais também foi observada por Rodrigues *et al.* (2011), ao comparar o uso de MDE de 90 m x 90 m e de 30 m x 30 m. Identificou-se no trabalho desses autores que o mapeamento HAND por meio da utilização de SRTM de 30 m x 30 m de resolução espacial apresenta melhor detalhamento das feições do que o de mapeamento realizado a partir do SRTM de 90 m x 90 m. Por isso, os autores indicam uma melhor resolução para estudos locais, como também observado na presente pesquisa.

Verificou-se também a ocorrência de manchas de inundação em locais onde não há a presença da rede de drenagem real. Isso provavelmente ocorreu porque o modelo HAND considerou vias urbanas como trechos de drenagem que, no entanto, se tratam de regiões mais baixas da circunvizinhança, para onde a água tende a escoar.

Essa afirmação é corroborada pela abrangência de pontos de alagamento, também apresentados no PMSB-JP, nos três mapeamentos de áreas suscetíveis a inundação (**Figura 5**) e cujo motivo associado consiste na existência de depressão na via pública, propiciando o acúmulo de água pluvial.

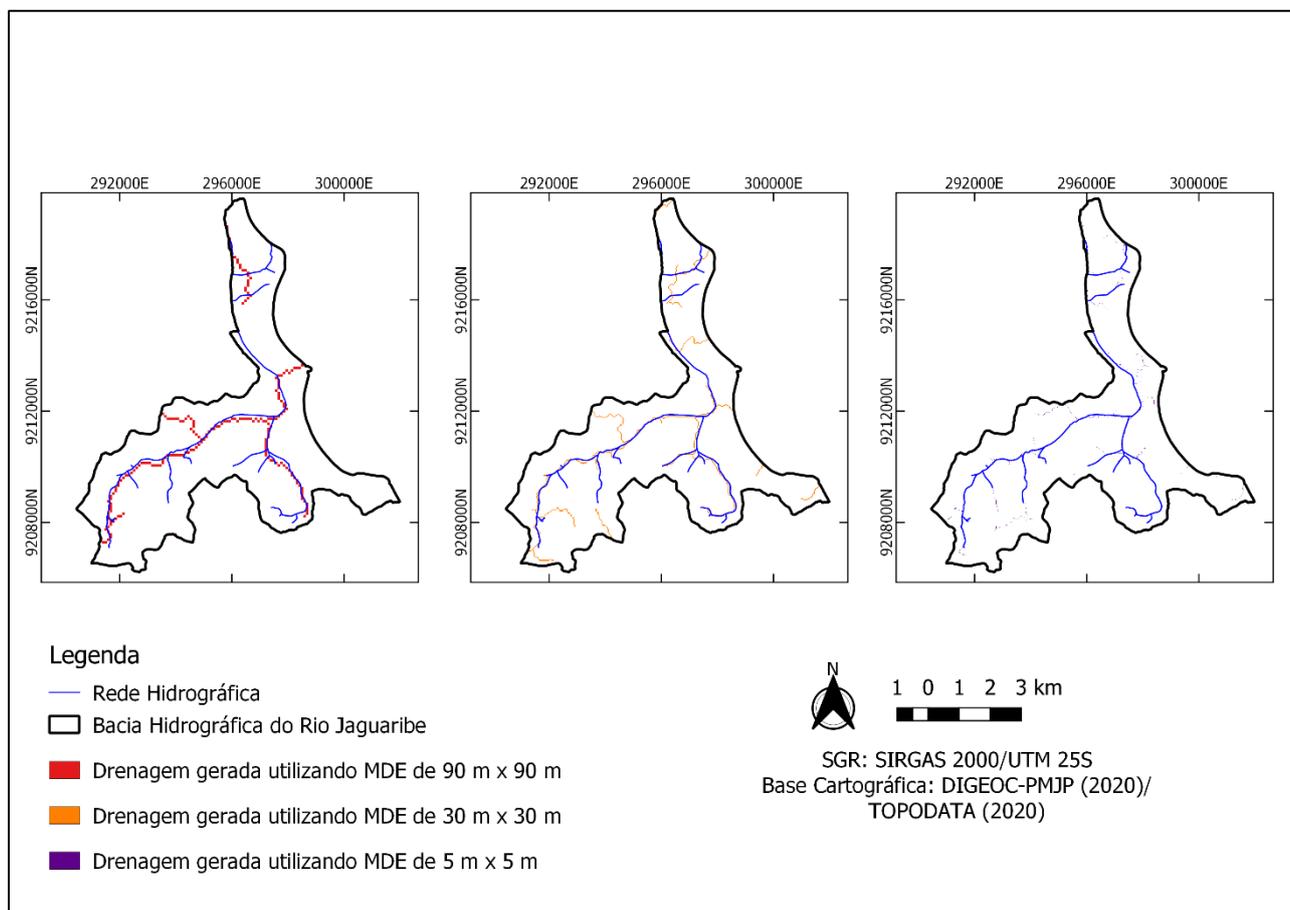


Figura 3: Drenagem gerada a partir de MDEs de diferentes resoluções espaciais.

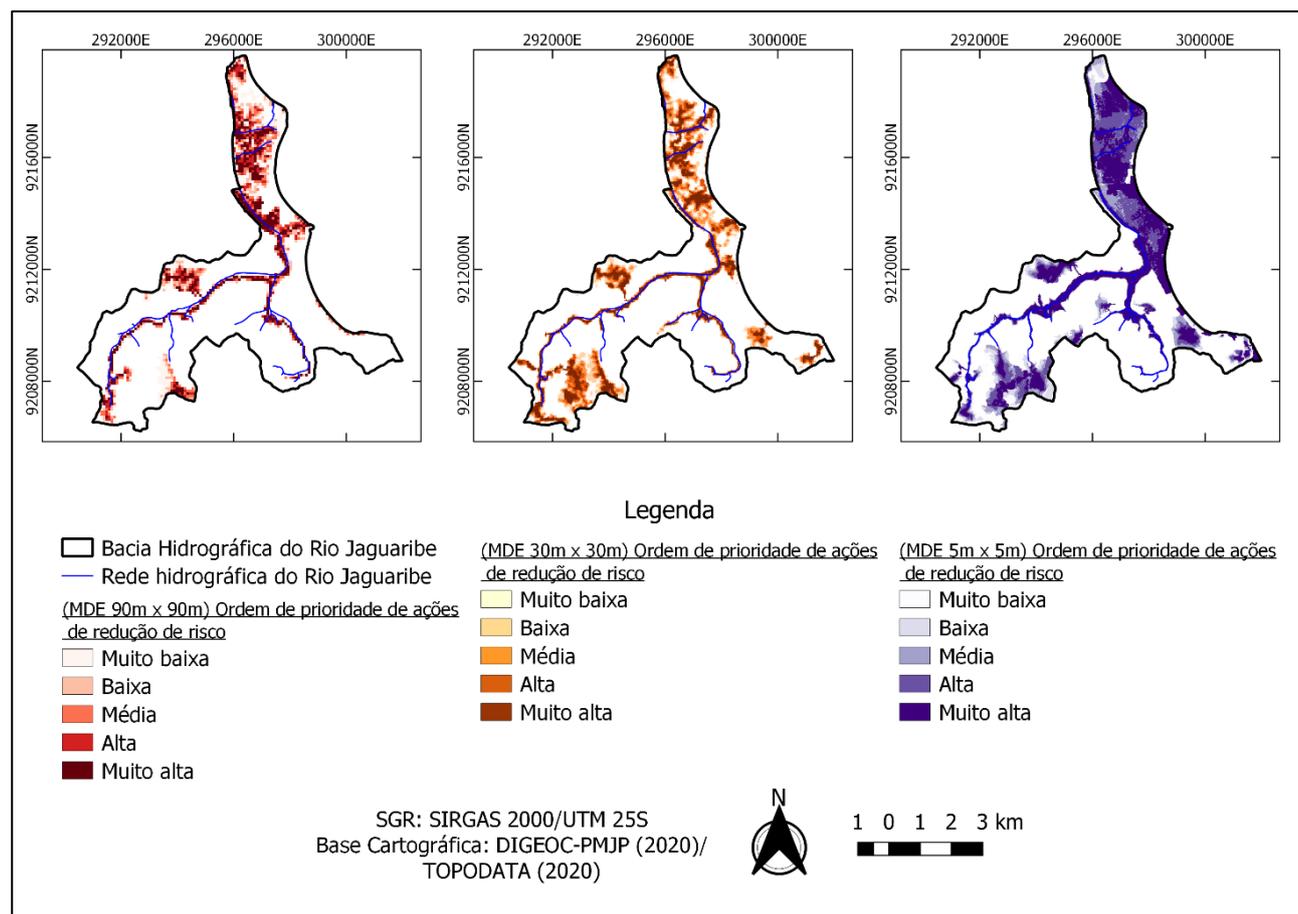


Figura 4: Mapeamento HAND gerado a partir de MDEs de diferentes resoluções.

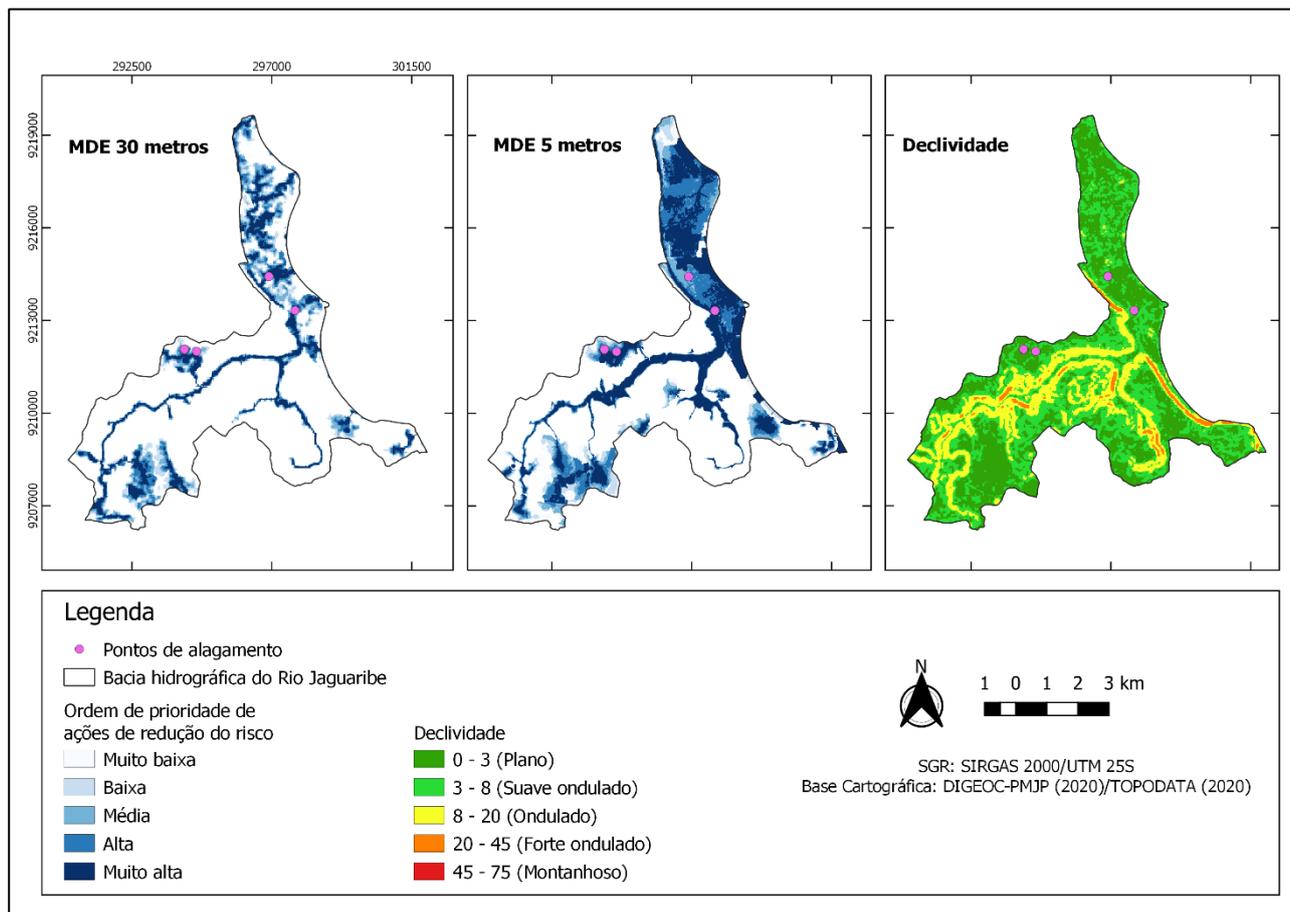


Figura 5: Pontos de alagamento repetidamente abarcados pelas áreas mapeadas; e declividade da bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe.

A partir do mapeamento gerado pelo HAND foi possível extrair as porcentagens correspondentes as classes (**Tabela 2 e Figura 6**). Quando observamos a classe mais alta de risco à inundação, verifica-se que o MDE de 5 m x 5 m de resolução espacial apresentou a maior porcentagem (44,6%), enquanto o MDE de 90 m x 90 m, apresentou a menor (29,7%). O de 30 m x 30 m apresentou 28,7% de área mapeada nessa classe.

Tabela 2: valores das classes mapeadas de acordo com a resolução do MDE

Área total de estudo	MDE	Área mapeada/classificada	CLASSE				
			1 (5m)	2 (4m)	3 (3m)	4 (2m)	5 (1m)
		Km ² (%)					
46 Km ²	90 x 90	14,2(30,9%)	3,7(25,9%)	2,1(14,7%)	2,1(15%)	2,1(14,7%)	4,2(29,7%)
	30 x 30	17,2(37,3%)	2,5(14,7%)	3,0(17,5%)	3,4(19,9%)	3,3(19,2%)	4,9(28,7%)
	5 x 5	24,3(52,7%)	2,6(10,9%)	2,2(9,2%)	3,1(12,6%)	5,5(22,6%)	10,8(44,6%)

Com relação à porcentagem das áreas mapeadas em relação à área total da BHRJ, o HAND gerado por meio do MDE de 5 m x 5 m abrangeu uma maior área (**Figura 7**). Enquanto esse mapeou 52,7% da área da bacia hidrográfica, o de 30 m x 30 m mapeou 37,3% e o de 90 m x 90 m, 30,9%. Verificou-se também que a classe 5, de maior risco a inundação, aumentou com a resolução espacial, compondo 9,13% no MDE de 90 m x 90 m; 10,67% no de 30 m x 30 m; e 23,49% no de 5 m x 5 m.

As informações apresentadas a partir do uso do MDE de 5 m x 5 m foram mais representativas do que quando se utilizou o MDE de 30 m x 30 m e 90 m x 90 m. Esse resultado corrobora com o estudo de Miceli *et al.* (2011), onde se observou que dados de SRTM podem não oferecer um detalhamento de informações necessários para uma boa representatividade, dependendo da escala.

Assim, ao analisar a porcentagem da área total da bacia hidrográfica comprometida com áreas propensas a inundação, observou-se que a classe com “muito alta ordem de prioridade de ações de redução do risco” apresentou o maior valor, 23,5% (**Figura 8**). Ao todo, têm-se 52,64% da BHRJ apresentando áreas no mapeamento realizado pelo modelo HAND.

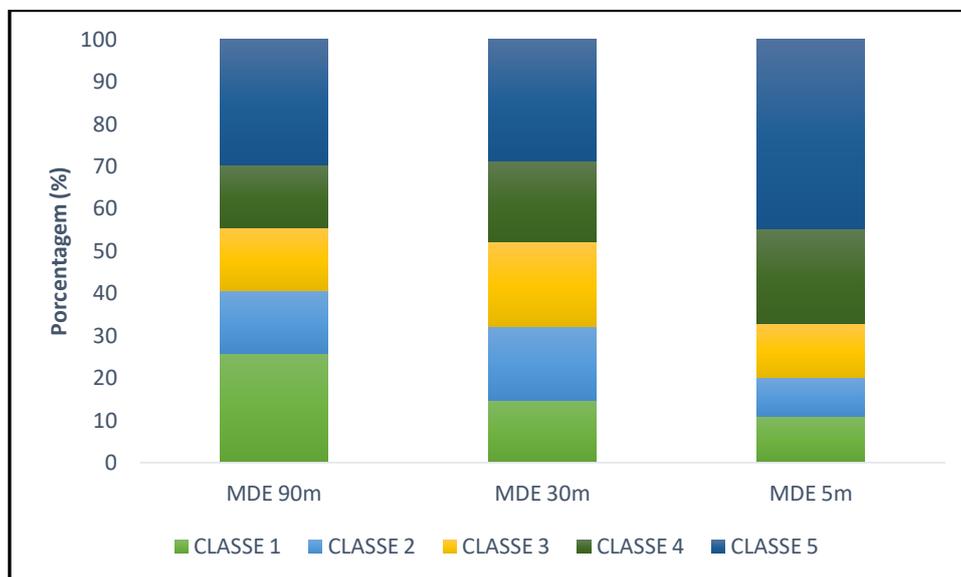


Figura 6: Distribuição das classes no modelo HAND para a bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe.

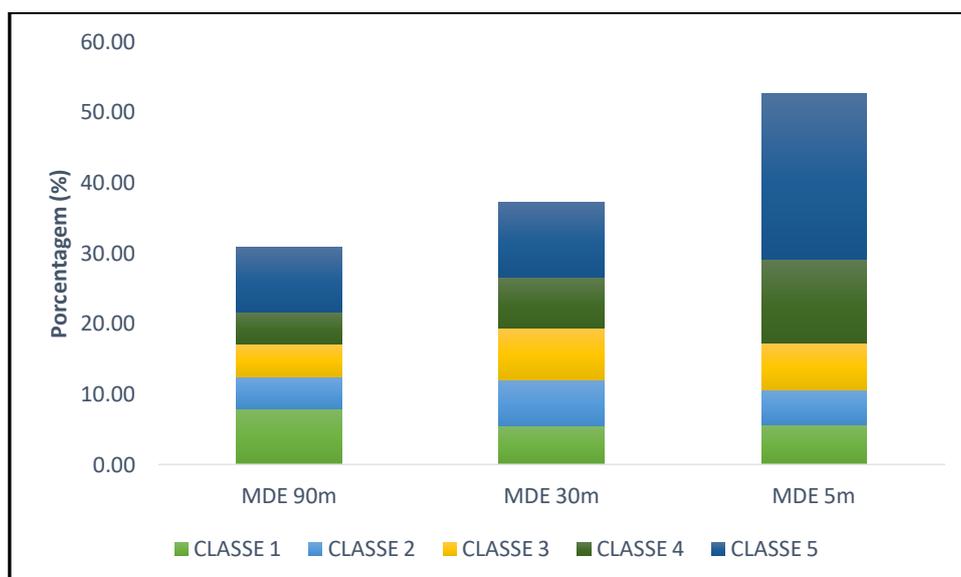


Figura 7: Porcentagem das áreas da bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe mapeadas pelo HAND em diferentes resoluções espaciais.

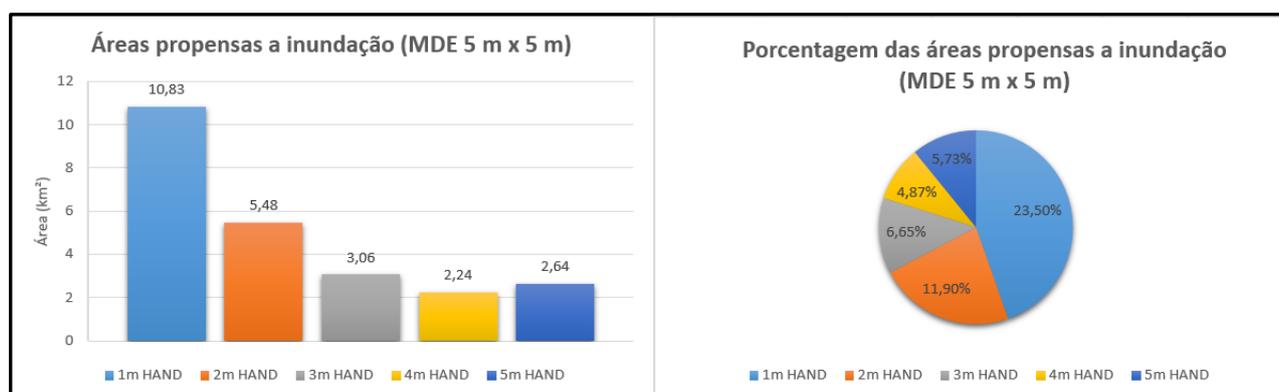


Figura 8: Áreas da bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe classificadas pelo HAND na resolução de 5 m x 5 m.

Apesar da BHRJ abranger grande parte de João Pessoa, sendo a segunda maior bacia hidrográfica do município em extensão (aproximadamente 46 km²), ainda não é um recorte geográfico suficientemente amplo para utilização de dados mais genéricos. Por isso, a utilização de um MDE de maior resolução

espacial apresentou resultados mais representativos, com informações mais específicas, primordiais para um planejamento mais eficaz.

As classes mais altas de suscetibilidade à inundação, tratando-se de zoneamento, são aquelas que necessitam de maior atenção no que se refere a elaboração e implementação de medidas preventivas e adaptativas. Assim, o uso de um MDE de resoluções espaciais menos detalhadas pode comprometer essa análise, inclusive no estabelecimento de locais prioritários para implantação de sistemas de alerta, por exemplo, ou até mesmo dando uma falsa sensação de segurança, ao subestimar as áreas propensas a inundar.

É nesse sentido que se faz necessária a ampliação de estudos que utilizem o MDE como uma variável temática eficaz para a identificação de possíveis áreas suscetíveis à inundação. A difusão desses estudos em diferentes recortes geográficos possibilita o aprimoramento da técnica, bem como o estabelecimento de possíveis padrões para aumentar a acurácia dos mapeamentos e confiabilidade nos resultados gerados.

3.2. Validação do modelo HAND

Para validar os produtos obtidos com o modelo HAND na BHRJ, foram utilizados os pontos de inundação apresentados na **Figura 9**. Estes são compostos pelos pontos apresentados no PMSB-JP (PARAÍBA, 2015), bem como por pontos coletados por visitas a campo, com um agente da COMPDEC-JP, em duas comunidades frequentemente afetadas por esses eventos.

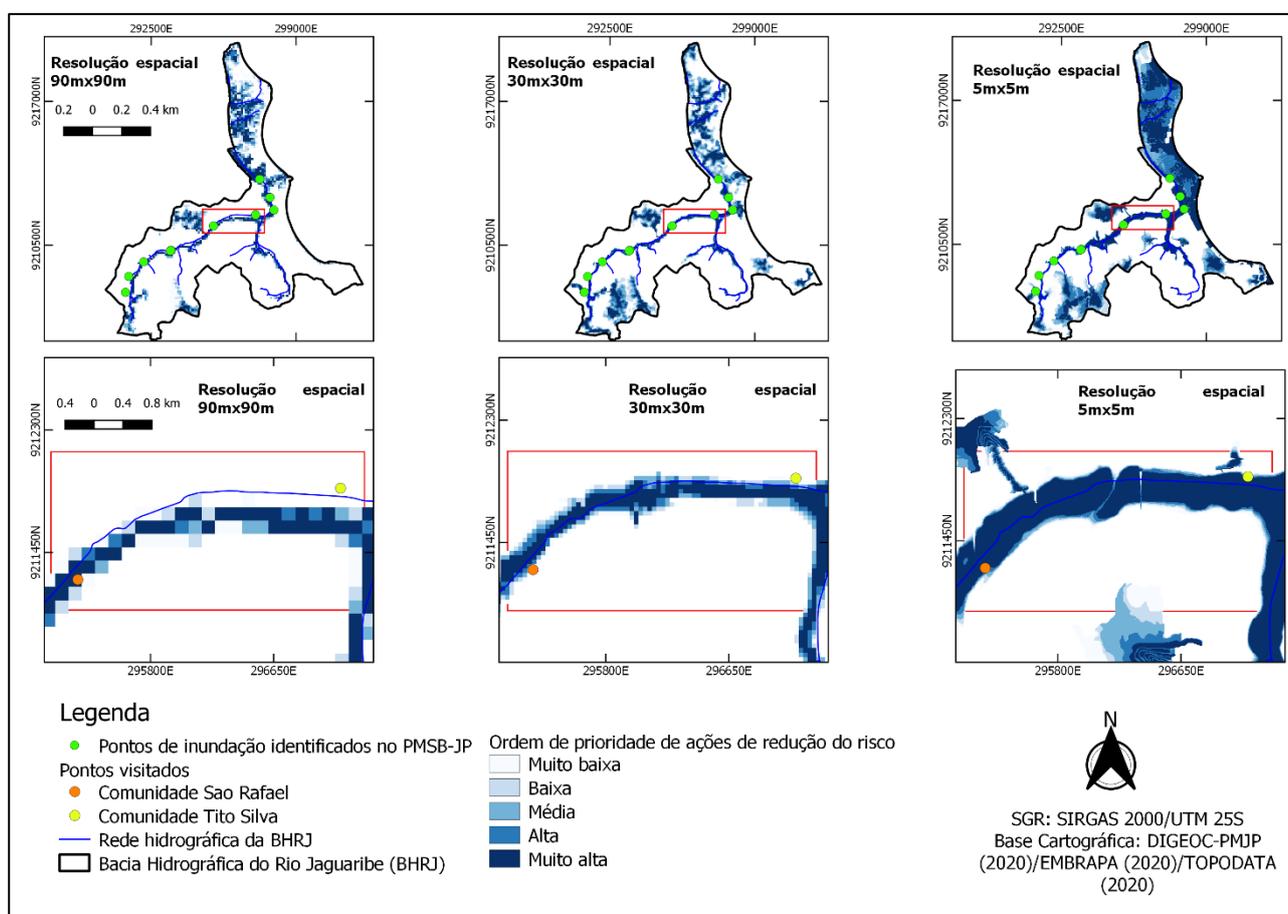


Figura 9: Pontos usados para a validação do modelo HAND.

Com relação aos 10 pontos de inundação do PMSB-JP, os produtos HAND resultantes do MDE de 5 m x 5 m e do MDE de resolução de 30 m x 30 m abrangeram ambos 80% dos pontos, enquanto o de 90 m x 90 m apenas 30%. É importante ressaltar que a representatividade do modelo está intimamente relacionada com a aproximação da rede de drenagem gerada à rede de referência, o que não ocorreu de modo satisfatório quando utilizado o MDE com resolução espacial de 90 m x 90 m.

Os pontos visitados em campo estão especializados sobre os MDEs, de resoluções espaciais distintas. Conforme apresentado na Figura 9, a Comunidade São Rafael está localizada no bairro Castelo Branco e a comunidade de Tito Silva situa-se no bairro do Miramar. Ambas se situam às margens do Rio Jaguaribe e

durante os períodos de chuva são registrados vários casos de movimentos de massa e de inundações nessas comunidades. Inclusive, elas estão incluídas nas 28 comunidades citadas anteriormente como as que ocupam irregularmente áreas suscetíveis a risco de desastres relacionados com fenômenos naturais na BHRJ.

Nos trabalhos de campo realizados, de imediato foram identificadas ações dos moradores e medidas de adaptação, confirmando que naquelas áreas ocorre inundações frequentemente, afetando a população ali residente (**Figura 10 e 11**). Alonso *et al.* (2014) afirmam que a adequação do uso e ocupação do solo ao nível de bacia hidrográfica é normalmente percebido a partir de intervenções locais, como estruturas de contenção, por exemplo, como foi observado na comunidade São Rafael (**Figura 10**).



Figura 10: Escada construída pela moradora da comunidade São Rafael a fim de barrar a entrada de água quando em caso de inundações.



Figura 11: Marcas feitas pela moradora da Comunidade Tito Silva na porta da residência (em destaques no círculo em vermelho), a fim de registrar o avanço da altura da água proveniente de inundações.

Ao utilizar o MDE de 90 m x 90 m de resolução espacial, observou-se que apenas o ponto visitado na Comunidade São Rafael está contido na mancha de inundação mapeada pelo HAND. Quanto ao MDE com resolução espacial de 30 m x 30 m, nenhum dos dois pontos se encontra dentro da mancha de inundação. Por

outro lado, ao se utilizar o MDE de 5 m x 5 m, os dois pontos enquadram-se na área identificada pelo HAND como sendo de alta (Comunidade Tito Silva) e muito alta (Comunidade São Rafael) ordem de prioridade de ações de redução de risco (**Figura 9**).

Milanesi, Quadros e Lahm (2017) também obtiveram sucesso ao adotar MDE de alta resolução para mapeamento utilizando o modelo HAND. Quando os autores utilizaram pontos de validação oriundos de eventos históricos de inundação, observaram que 98% dos pontos ficaram nas classificações mais altas de suscetibilidade.

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 inundações e agrava a degradação ambiental nesses locais.

Além disso, o gerenciamento público 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 visitadas para a validação do modelo HAND adotaram medidas estruturais para a contenção de inundações em suas casas.

4. Considerações finais

Os produtos obtidos com o uso do modelo HAND abrangeram até 80% dos pontos de inundação elencados pelo PMSB-JP, bem como ambos os pontos visitados em campo, relatados pela COMPDEC-JP, quando utilizado o MDE com resolução espacial de 5 m x 5 m. Quanto aos MDEs obtidos por meio da EMBRAPA e do banco de dados TOPODATA (90 m x 90 m e 30 m x 30 m, de resoluções espaciais, respectivamente) esses não apresentaram um detalhamento satisfatório do terreno para uma boa representatividade do modelo.

Conforme os resultados encontrados, para garantir uma eficiência significativa na utilização do modelo HAND, é fundamental que sejam utilizados dados de entrada de boa resolução espacial.

No entanto, é importante ressaltar que o modelo HAND apresentou inconsistências em algumas manchas de inundação, que se apresentam isoladas ou com as classes fragmentadas e, ainda, intercalando classes de suscetibilidade alta e muito alta, além de mapear manchas em áreas afastadas da hidrografia. Isso deve ter acontecido, possivelmente, decorrentes de interferências das vias pavimentadas consideradas “erroneamente” como componentes da rede de drenagem. Assim, recomenda-se que sejam realizados estudos futuros que busquem compreender melhor as interferências provocadas sobre o modelo pelo tecido urbano.

Com relação às comunidades visitadas, pôde-se perceber que a população da Comunidade São Rafael desenvolveu mecanismos de adaptação a inundações, ainda que de forma precária, diante das condições de risco às quais estão expostas. Isso evidencia a frequência com a qual essas lidam com eventos de inundação e, principalmente, a importância da busca pelo aumento da sua resiliência, no contexto da RRD.

Notas

Este trabalho faz parte da dissertação de mestrado da primeira autora.

Referências

ALONSO, J. M *et al.* Risco de cheia e inundação: exposição e adaptação na área ribeirinha de Ponte de Lima. **Territorium**, n. 21, p. 33-48, 2014.

AON. **Weather, climate & catastrophe insight** – 2019 Annual Report. 81 p. 2020.

GOERL, R. F.; MICHEL, G. P.; KOBİYAMA, M. Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação com o modelo HAND e a análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 69, v. 1, p. 61-69, 2017.

HAMDANI, N.; BAALI, A. Height Above Nearest Drainage (HAND) model coupled with lineament mapping for delineating groundwater potential areas (GPA). **Groundwater for Sustainable Development**, v. 9, p. 100256, 2019.

LIU, Y. Y.; MAIDMENT, D. R.; TARBOTON, D. G.; ZHENG, X.; YILDIRIM, A.; SAZIB, N. S.; WANG, S.; A CyberGIS approach to generating high-resolution Height Above Nearest Drainage (HAND) raster for national flood mapping. *In: Third International Conference on CyberGIS and Geospatial Data Science, Urbana, Illinois*. 2016. p. 24-26. DOI: [10.13140/RG.2.2.24234.41925/1](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24234.41925/1).

MCGRATH, H.; BOURGON, J. F.; PROULX-BOURQUE, J. S.; NASTEV, M.; EL EZZ, A. A.; A comparison of simplified conceptual models for rapid web-based flood inundation mapping. **Natural Hazards**, v. 93, p. 905-920, 2018. DOI: [10.1007/s11069-018-3331-y](https://doi.org/10.1007/s11069-018-3331-y).

MENGUE, V. P.; FONTANA, D. C. Avaliação da dinâmica espectro-temporal visando o mapeamento dos principais cultivos de verão no Rio Grande do Sul. **Bragantia**, v. 74, p. 331-340, 2015.

MICELI, B. S.; DE MEIRELES, F. D.; SEABRA, F. M.; DOS SANTOS, P. R. A.; DO COUTO, M. F. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 1, v. 63, 2011.

MILANESI, J.; DE QUADROS, E. L. L.; LAHM, R.A. Utilização do modelo HAND no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundações – Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 4, v. 69, 2017.

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

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.

OCHA - UNITED NATIONS OFFICE FOR THE COORDINATION OF HUMANITARIAN AFFAIRS. **Latin America and the Caribbean: Natural Disasters 2000-2019**. OCHA Report. 2020.

PARAÍBA. Prefeitura Municipal de João Pessoa. **Plano Municipal de Saneamento Básico de João Pessoa – PMSB-JP**, 2015. Disponível em: http://antigo.joaopessoa.pb.gov.br/portal/wp-content/uploads/2016/01/2015_1509_Esp-01-100.pdf?479a4c. Acesso em: Out, 2020.

RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: mapping terra firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, n. 9, v. 112, p. 3469-3481, 2008. DOI: [10.1016/j.rse.2008.03.018](https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018).

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.

SANTOS, C. L.; WANDERLEY, L. S.; VITAL, S. R. O.; GIRÃO, O. Análise da suscetibilidade à ocorrência de enchentes e alagamento na bacia do alto/médio curso do rio Jaguaribe, João Pessoa/PB, a partir de características morfométricas extraídas de dados SRTM. **Revista de Geociências do Nordeste**, n. 1, v. 1, p. 37-49, 2015.

SANTOS, C. L. **Análise da suscetibilidade a ocorrência de enchentes e inundações na bacia do rio Jaguaribe - João Pessoa/PB**. Recife, Dissertação (Mestrado em Geografia) - UFPE, 2016.

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

SILVA, N. T. **Precipitações diárias intensas na cidade de João Pessoa, Paraíba**. João Pessoa, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) - UFPB, 2014.

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, p.45-129, 2003.

UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil**. Florianópolis: UFSC/CEPED, 2016.

VALERIANO, M. M. Dados topográficos. *In*: FLORENZANO, T. G. (org). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, p.72-103, 2008.



BY



NC



SA

Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual* (CC BY-NC-SA).