

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MODELO HAND E A ANÁLISE MULTICRITERIAL NO MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÕES EM JUIZ DE FORA (MG)

Armando Moreno Neto¹; Marcos Paulo Santos da Silva² & Celso Bandeira de Melo Ribeiro³

Abstract: The increasing frequency of extreme weather events has exposed the vulnerability of poorly planned urban areas, especially in peripheral regions prone to flooding. This study aims to compare two methodologies for mapping flood-prone areas in the Ipiranga Creek Basin, in Juiz de Fora (MG, Brazil): Multicriteria Analysis and the HAND Model (Height Above the Nearest Drainage). The methodology involved elevation data obtained by remote sensing (PALSAR/ALOS and SRTM), processed in a GIS environment using QGIS software. In the multicriteria analysis, three main criteria were considered: slope, flow accumulation, and land use/cover, weighted using the AHP method. The HAND model, in turn, was applied based on the relative height of terrain in relation to the drainage network, with a threshold calibrated from local flood records. Results show that both methods effectively identified critical areas, especially along the creek and in commercial regions with high soil impermeability. The HAND model proved simpler and faster to apply, although it tended to overestimate flood-prone areas—possibly due to limitations in defining the flood height threshold. It is concluded that both approaches are useful for supporting urban planning and flood risk management, and the choice between them should consider the specific goals and technical resources available in each context.

Resumo: O aumento da frequência de eventos climáticos extremos tem evidenciado a vulnerabilidade de áreas urbanas mal planejadas, especialmente em regiões periféricas sujeitas a inundações. Este estudo tem como objetivo comparar duas metodologias para o mapeamento de áreas suscetíveis a inundações na Bacia do Córrego Ipiranga, em Juiz de Fora (MG): a Análise Multicriterial e o Modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage). A metodologia envolveu o uso de dados de elevação obtidos por sensoriamento remoto (PALSAR/ALOS e SRTM), processados em ambiente SIG, por meio do software QGIS. Na análise multicriterial, foram considerados três critérios principais: declividade, fluxo acumulado e uso e cobertura do solo, ponderados com base no método AHP. Já o modelo HAND foi aplicado com base na altura relativa dos terrenos em relação à rede de drenagem, considerando um limiar calibrado com base em registros locais de cheia. Os resultados indicam que ambas as metodologias foram eficazes na identificação de áreas críticas, especialmente nas margens do córrego e em regiões comerciais com alta impermeabilização do solo. O modelo HAND demonstrou maior simplicidade e agilidade de aplicação, embora tenha apresentado tendência à superestimação das áreas de risco, possivelmente devido à limitação na definição do limiar de cheia. Conclui-se que ambas as abordagens são úteis para subsidiar o planejamento urbano e a gestão de riscos hídricos, sendo recomendada a escolha da metodologia conforme os objetivos e os recursos técnicos disponíveis em cada contexto.

¹) Graduando da Universidade Federal de Juiz de Fora, armandomoreno.eng@gmail.com

²) Graduando da Universidade Federal de Juiz de Fora, engenhariamarcos.silva@gmail.com

³) Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFJF (DESA/UFJF), celso.bandeira@ufjf.br

Palavras-Chave – suscetibilidade a inundações, modelagem SIG, planejamento urbano

INTRODUÇÃO

Por diversas vezes na história, eventos climáticos extremos impactaram a sociedade e transformaram a maneira como o ser humano se relaciona com a natureza. Entretanto, é possível visualizar uma crescente frequência nesses episódios, tema que vem sendo debatido em diversas esferas do conhecimento para formulação de novas políticas públicas, desenvolvimento de novas tecnologias e organização do território. O Brasil já foi palco de cenários como estes ao longo dos anos, como a grande cheia de Tubarão (SC) em 1974, a qual gerou duas centenas de mortos (FRASSON, 2012) e a grande enchente da Lagoa dos Patos, no Rio Grande do Sul, ocasionadas por um intenso volume de chuvas no mês de maio de 1941 (TORRES, 2012). Novamente, em maio de 2024, o Estado Rio Grande do Sul vivenciou uma série de enchentes e alagamentos provocados por uma concentração de chuva nunca registrada no estado anteriormente, a qual deixou 600 mil pessoas desabrigadas e se tornou um dos maiores debates atuais da engenharia das cidades e estudos dos recursos hídricos no Brasil (CORRADI, 2024).

O planejamento urbano precário, abordado com ausência de interdisciplinaridade e antecipação das possibilidades de crescimento e desenvolvimento na cidade, é um dos principais causadores de problemas como alagamentos e enchentes nos municípios brasileiros. A ocupação inadequada do espaço urbano, principalmente nas áreas de margem aos cursos d'água, onde se há uma tendência de acumulação de fluxo, bem como a impermeabilização do solo alteram o escoamento e infiltração natural das águas da bacia, comprometendo a drenagem e maximizando os efeitos dos eventos extremos perante os fenômenos tratados (TUCCI, 2001).

Dessa forma, a maioria dos pequenos municípios possuem regiões de baixada que experimentam ocorrências de menor escala, entretanto não tão distantes dos eventos traumáticos do sul do país. A região da Bacia do Córrego Ipiranga, na cidade de Juiz de Fora (MG), vem registrado cheias e alagamentos, as quais, ano após ano, gera impactos na população residente, cuja maioria é de baixa renda, como prejuízos aos pequenos estabelecimentos, carros e ônibus ilhados, bem como bloqueio de uma das principais vias para acesso à região do centro da cidade, local de trabalho e estudo da maioria dos habitantes (FLORIANO E BERNADETE, 2023).

Nos casos citados acima há o fator comum da falta de incorporação da drenagem para o planejamento das cidades, como bem estabelecido por Canholi (2015) que ressalta a importância dos estudos hidrológicos estarem alinhados aos estudos urbanos, isto é, atrelados a ferramentas de monitoramento, modelagem e verificação das condições de suscetibilidade à inundações das grandes cidades para planejamentos e gestões futuras.

Existem hoje diversas metodologias para compreensão da relação das bacias hidrográficas, topografia, uso e ocupação do solo, entre outros fatores com as atividades pluviométricas. O uso do geoprocessamento e de Softwares GIS, isto é, de Sistema de Informação Geográfica, capazes de manipular informações georreferenciadas, vem sendo amplamente empregados para as investigações de suscetibilidade à inundações. Na pesquisa de Koráh e López (2015), por exemplo, é desenvolvida uma metodologia de análise multicriterial através do software QGIS, a qual leva em conta os dados de topografia do terreno bem como de uso e ocupação para mapeamento das áreas de risco em uma região de Quetzaltenango, na Guatemala. Uma outra metodologia de fácil e intuitiva aplicação à grandes áreas para determinação das áreas de risco é o modelo Height Above

the Nearest Drainage (HAND model), idealizado por Nobre et al (2011), para uma região da Bacia do Rio Negro, na Amazônia, e que pode ser empregado em diversas regiões do país conforme os procedimentos técnicos detalhados pelos autores.

Dessarte, o presente artigo busca compreender e comparar as duas metodologias citadas acima no mapeamento das áreas de risco à inundaçāo da Bacia do Córrego Ipiranga, em Juiz de Fora (MG), bem como suas aplicabilidade para os estudos hidrológicos no planejamento de cidades.

REFERENCIAL TEÓRICO

O PRINCÍPIO POR TRÁS DA ANÁLISE MULTICRITERIAL EM INUNDAÇÕES

Existem diversos estudos na literatura que abordam a análise multicriterial como metodologia para compreender a situação das áreas quanto a fatores levantados e suas relações com os critérios de investigação estabelecidos. Além de Koráh e López (2015), o mesmo modelo de pesquisa empregado ao geoprocessamento de áreas com base no uso de softwares GIS também foi explorado para determinação de áreas passíveis a alagamentos na região metropolitana de Toronto, no Canadá (RINCÓN ET AL, 2018) assim como para os casos de inundaçāo de Tubarão (SC), conforme estudo de Miguel (2016).

Em síntese, este tipo de análise se baseia no Processo de Hierarquia Analítica (AHP), pelo qual se estabelece uma forma de realizar medições de propriedades específicas a partir de dados que não possuem a mesma escala. Assim, as variáveis visualizadas são compreendidas em uma escala padrão, em um processo de comparação pareável em que se torna possível combinar os fatores em uma estrutura hierárquica. Dessa forma, é estabelecido uma relação de ordem entre os critérios, em que, para aquelas variáveis com maior relevância a análise, ou maior impacto, é atribuída maior contribuição na escala (SAATY, 1990).

Conforme destacam Rincón et al (2018) e Miguel (2016), a partir do AHP é possível classificar os critérios condicionantes das inundações. Inicialmente, a declividade atua aumentando a velocidade de escoamento da água, sendo que, para menores declividades pressupõe-se terrenos mais planos, os quais apresentam maior probabilidade de acumulação de água, principalmente quando encontrados nos vales das bacias. O fluxo acumulado, por sua vez, dita o principal caminho do escoamento superficial da água pela bacia e já aponta um indicativo para áreas de risco a inundações.

Por fim, como ressaltado por Tucci (2001), a intervenção humana e a transformação do uso e ocupação do solo, comprometendo a permeabilização das camadas superficiais, pode ser um dos critérios analisados quando se é estudado as zonas vulneráveis à alagamentos de centros urbanos, visto seu impacto na infiltração natural e absorção da água pluvial pela bacia, sendo este um dos principais complicadores para os eventos de cheias do mundo contemporâneo. Dessa forma, é possível estabelecer os três principais critérios que serão classificados para análise da área escolhida, sendo eles: a declividade, o fluxo acumulado e o uso e ocupação do solo.

ASPECTOS INICIAIS SOBRE O HAND MODEL

O Modelo HAND é uma metodologia que integra um modelo digital de terreno (MDT) com a rede de drenagem. Ele quantifica o potencial gravitacional relativo do terreno, fornecendo uma representação fisicamente embasada que prediz com coerência processos superficiais relacionados ao movimento, acúmulo, infiltração, armazenamento e drenagem da água.

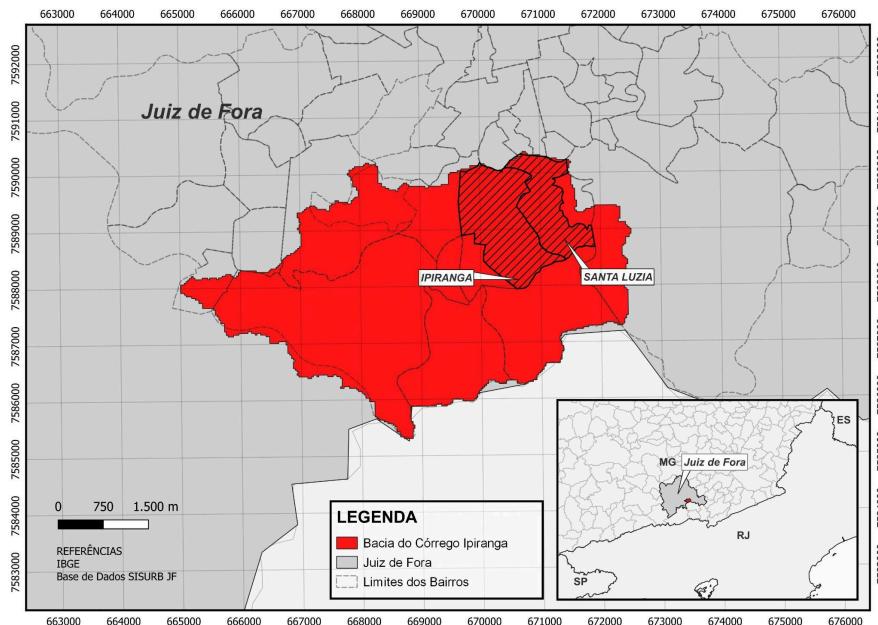
O modelo foi desenvolvido por pesquisadores que trabalharam na primeira bacia hidrográfica em floresta não perturbada, em Igarapé Asu, no Amazonas. Os pesquisadores precisavam representar as propriedades do solo e inferir a dinâmica da água no solo com os dados gerados pelos

instrumentos instalados. Porém, os modelos existentes, baseados em imageamento bidimensional da superfície, eram limitados pelo dossel da floresta amazônica. Por volta de 2005 foram feitos os primeiros testes. Inicialmente pensado para pequenas bacias hidrográficas (13 km^2), o modelo demonstrou também resultados robustos para bacias de maior porte (NOBRE, 2011).

ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo destina-se à análise da região da bacia do Córrego Ipiranga, localizado na cidade de Juiz de Fora (MG), a qual se encontra no intermédio de grandes capitais brasileiras como Rio de Janeiro, São Paulo e Belo Horizonte. Na região da bacia existe um pequeno polo comercial distribuído nos bairros Ipiranga e Santa Luzia, ambos cortados pelas avenidas Ibitiguaiá e Santa Luzia, as quais seguem paralelas ao córrego. Os bairros são relevantes para a cidade tanto pelo seu viés comercial quanto pelo número de habitantes, sendo o bairro Ipiranga um dos mais populosos do município, com 16.478 habitantes (SUDRÉ, 2024) e o bairro Santa Luzia, segundo dados do censo demográfico de 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com 12.980 habitantes. A figura 1 mostra a localização da bacia do Córrego Ipiranga.

Figura 1: Delimitação da Bacia do Córrego Ipiranga. Fonte: Autores.



METODOLOGIA

ANÁLISE MULTICRITERIAL

Inicialmente foi necessário adquirir o Modelo Digital de Elevação do terreno da região da Bacia do Ipiranga, o qual foi obtido a partir das imagens de satélite captadas pelo sensor PALSAR adjunto ao satélite ALOS, disponibilizados pela Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). O modelo foi inserido no software de processamento de dados georreferenciados QGIS, onde passou por um processo de refinamento e recorte para a área escolhida, bem como reprojeção de coordenadas. Em seguida, as ferramentas do programa foram utilizadas também para exportar, a partir das elevações do terreno, a declividade, a drenagem, a divisão das bacias e o fluxo acumulado da região.

Quanto ao uso e cobertura da terra, o Environmental Systems Research Institute (ESRI) disponibiliza os dados mapeados pelo conjunto de satélites Sentinel-2, cuja resolução varia de 10 a

20 metros, utilizados essencialmente para monitoramento ambiental e do uso do solo (VENTER ET AL, 2022). Portanto, utilizou-se da base de dados do ESRI, recortada conforme área de estudo, a qual subsidiou o levantamento dos diferentes tipos de uso do solo na região, com destaque para as áreas urbanas e impermeabilizadas.

Dessa forma, utilizou-se da AHP para classificar os três principais critérios escolhidos para análise: o fluxo acumulado, o uso e cobertura da terra e a declividade. Assim, foi adotada uma escala padrão para quantificação do grau de risco de cada critério de acordo com sua variação numérica e relação com a suscetibilidade a inundações. A Tabela 1 apresenta a escala proposta, a qual baseia-se nas variações numéricas adotadas por Korah e López (2015) para a declividade e o uso e ocupação do solo, sendo o fluxo acumulado definido conforme Vojtek e Vojteková (2019).

Tabela 1 – Escala proposta para Análise Multicriterial

Critério	Variação	Escala	Grau de Risco a Inundação
Declividade (Graus)	0 - 9	4	Alto
	9 - 23	3	Moderado
	23 - 51	2	Baixo
	51 - 85	1	Muito Baixo
Uso e Ocupação do Solo	Área não vegetada/Urbanizada	4	Alto
	Área de Pastagem/Florestal Degrada	3	Moderado
	Área Florestal em Recuperação	2	Baixo
	Área de Vegetação Nativa	1	Muito Baixo
Fluxo Acumulado	Acima de 50.001	4	Alto
	5.001-50.000	3	Moderado
	501-5.000	2	Baixo
	0-500	1	Muito Baixo

As variáveis foram combinadas de acordo com um percentual de impacto do critério à problemática principal estudada, isto é, quanto maior relevância para a suscetibilidade a inundações da área, maior será o seu percentual da variável na combinação. Dessa forma, o critério com maior peso adotado foi o uso e ocupação do solo, com 40% de relevância, seguido pelo fluxo acumulado (35%) e pela declividade (25%) (KORAH & LÓPEZ, 2015).

HAND MODEL

Em síntese, a metodologia adotada para análise pelo modelo HAND baseou-se no trabalho de Dantas e Paz (2021), em que, a priori, é coletado o MDT da região, sendo este obtido através dos dados disponibilizados pelo Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA), o qual

oferece modelos digitais de elevação do terreno a partir dos dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

Então, o software foi utilizado para manipulação do MDT conforme etapas sequenciais para obtenção do mapeamento da suscetibilidade a inundações da área. Inicialmente, o MDT foi ajustado pelo programa, a fim de eliminar possíveis elevações imprecisas que poderiam impactar no resultado. Em seguida, a direção de fluxo foi estabelecida por uma análise dos pixels, considerando o pixel seguinte com menor declividade como aquele para onde o fluxo se estabelece. A partir da direção de fluxo e da soma dos pixels que contribuem para que o fluxo siga para o pixel seguinte, foram obtidas as áreas de contribuição acumuladas (Accumulated Contributing Area - ACC). Assim, a rede de drenagem é definida com a combinação das características anteriores e definição de um limiar para cálculo de rede, isto é, uma quantidade de pixels em que se é definido o traçado do fluxo. Por fim, a partir da rede, o software calcula um referencial topográfico das elevações do terreno, gerando o resultado “HAND” (DANTAS & PAZ, 2021).

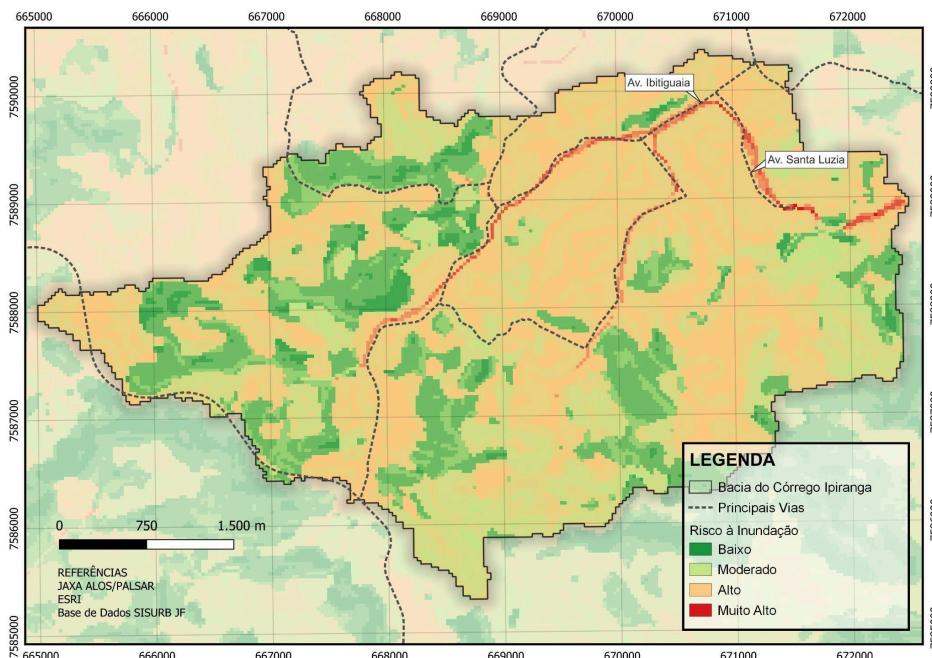
Entretanto, este mapa gerado precisa ser calibrado e classificado conforme a altura de cheia registrada na região de análise para determinação das possíveis áreas de inundaçao. Para a região de estudo, foi observado um evento de alagamento em que a altura de cheia foi suficiente para deixar algumas pessoas ilhadas em proximidade à margem do Córrego Ipiranga (FLORIANO E BERNADETE, 2023). Considerando que o canal do córrego retangular possui altura de 3 metros (SETTI ET AL, 2023) e adotando uma altura de água de aproximadamente 1 metro acima do passeio, foi considerado um limiar de 4 metros para calibrar as alturas de cheia. Por fim, as áreas de risco foram classificadas podendo obter a análise de suscetibilidade a inundações conforme modelo HAND.

RESULTADOS

ANÁLISE MULTICRITERIAL

Após execução da metodologia descrita para a análise multicriterial, o mapeamento das áreas suscetíveis à inundaçao pode ser contemplado conforme a figura 1.

Figura 1: Mapa de suscetibilidade à inundações gerado por Análise Multicriterial. Fonte: Autores.

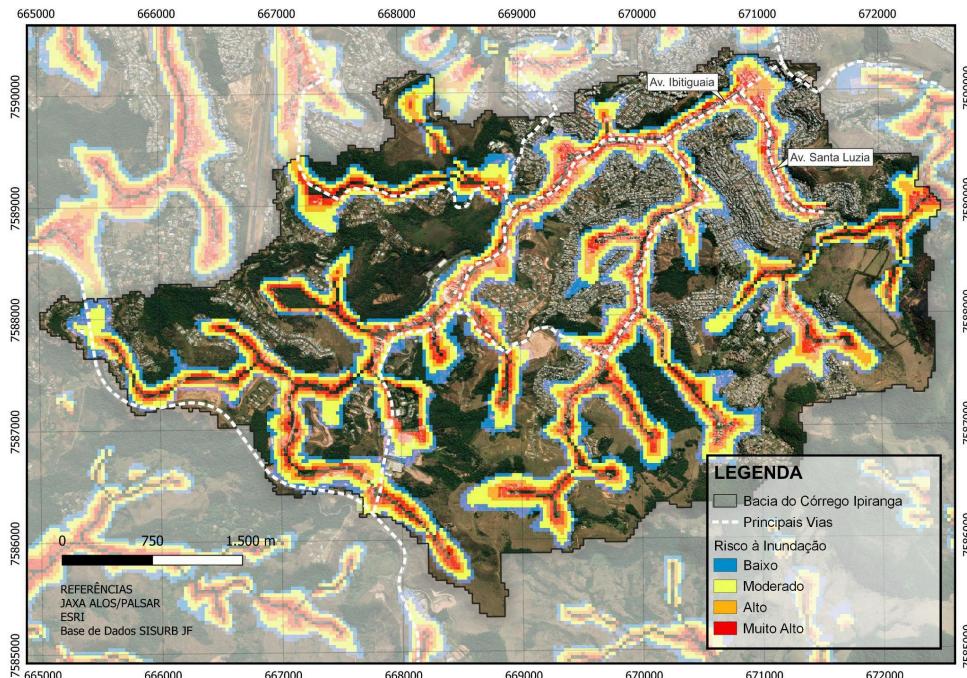


Pelo mapeamento apresentado é possível verificar um risco muito alto na região paralela às avenidas e ao Córrego Ipiranga, o que já se é esperado devido ao fluxo acumulado natural da bacia na região. Além disso, também é destacado um risco alto para as demais áreas impermeabilizadas próximas ao curso d'água. Os riscos baixos e moderados são evidenciados em morros e encostas devido a impossibilidade de acumulação de água pela declividade.

HAND MODEL

Finalizado o conjunto de métodos aplicados ao Hand Model, foi possível obter as áreas suscetíveis a inundação da bacia, conforme classificação de risco, apresentado na figura 2.

Figura 2: Mapa de suscetibilidade à inundações gerado pelo HAND Model. Fonte: Autores.



Para este modelo, as áreas suscetíveis a inundação da bacia se assemelham ao demonstrado no modelo anterior. Entretanto, para este caso, é possível visualizar uma diferença na condição de inundação para a região comercial do bairro Santa Luzia, localizada no cruzamento das avenidas Santa Luzia e Ibitiguaiá, cujo risco passa a ser “Muito Alto”, assim como as proximidades do córrego, tomando destaque aos terrenos com cotas mais baixas.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados é possível verificar que ambas as metodologias de análise se mostraram eficientes para mapeamento das áreas, uma vez que evidenciaram os principais pontos observados em eventos de cheia na região: o centro comercial e a ocupação das margens do córrego. O resultado ressalta a condição de alto risco para as áreas e aponta uma necessidade de planejamento adequado, bem como intervenções para aprimorar a eficiência dos dispositivos de drenagem, visto a alta impermeabilização do solo, a fim de minimizar os fenômenos ocasionados pelas chuvas.

Além disso, a facilidade e praticidade para trabalho no software Hand Model, aponta um destaque ao modelo quando comparada a análise multicriterial, que apresenta maior complexidade, levando em conta o número maior de etapas, e necessita de maior compreensão dos conteúdos. Entretanto, notou-se uma superestimação nas áreas de suscetibilidade pelo modelo HAND, o que

pode ser um indicativo de revisão da altura de inundação, ou mesmo uma desvantagem deste método perante a análise multicriterial. Também pode ser interpretado que a metodologia Hand ainda se apresentou mais favorável à segurança uma vez que julgou as áreas que historicamente sofrem com os alagamentos como “risco alto”, destinando a elas maior ênfase para os serviços de planejamento do poder público.

Por fim, pode-se dizer que os modelos tratados são maneiras simplificadas de se estudar e compreender a hidrologia das regiões dos municípios brasileiros, bem como antecipar fenômenos de estresse e desastres a comunidades e famílias, através de um planejamento mais adequado. Com a iminência dos eventos climáticos extremos, a propagação do estudo interdisciplinar do território, considerando aspectos tratados nessa pesquisa, bem como a consciência de ferramentas facilitadoras no processo de aprendizagem e mapeamento, são indispensáveis para o estudo em engenharia e recursos hídricos no Brasil.

REFERÊNCIAS

CANHOLI, Aluísio. *"Drenagem urbana e controle de enchentes"*. Oficina de textos, 2015.

CORRADI, Rodrigo. *"Emergência Climática e Cidades: o caso das cidades do Rio Grande do Sul face à enchente de 2024"*. Diálogos Socioambientais, v. 7, n. 19, p. 18-25, 2024.

DANTAS, Ana Alice Rodrigues; PAZ, Adriano Rolim. *"Use of HAND terrain descriptor for estimating flood-prone areas in river basins"*. Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB), Porto Alegre, v. 56, n. 3, p. 501–516, set. 2021.

FRASSON, Maicon Marques. *"A enchente de 1974 em Tubarão-SC: a construção de um desastre natural"*. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *"Agregados por setores censitários: resultados do universo – nota metodológica n. 06"*. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. 39 p.

KORAH, P.; LÓPEZ, F. *"Mapping Flood Vulnerable Areas in Quetzaltenango, Guatemala using GIS"*. Journal of Environment and Earth Science, v. 5, p. 132-143, 2015.

MIGUEL, Luana Pasini. *"Geoprocessamento e a abordagem multicriterial para delimitação das áreas com suscetibilidade de inundação no município de Tubarão (SC)"*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma, 2016.

NOBRE, Antonio Donato et al. *"Height Above the Nearest Drainage—a hydrologically relevant new terrain model"*. Journal of Hydrology, v. 404, n. 1-2, p. 13-29, 2011.

RINCON, D. R.; KHAN, U.; ARMENAKIS, C. *"Flood Risk Mapping Using GIS and Multi-Criteria Analysis: A Greater Toronto Area Case Study"*. Geosciences, v. 8, p. 275, 2018.

SETTI, Rafael Fabião; PAZ, Igor da Silva Rocha; REIS, Marcelo de Miranda. *"Análise da resposta hidrológica de bacia densamente urbanizada localizada em Juiz de Fora (MG) sob a ótica de prevenção de desastres"*. In: XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (XXV SBRH), 2023, Sergipe. Anais..., Juiz de Fora: ABRHidro, 19 a 24 nov. 2023. Código: XXV-SBRH0325.

SUDRÉ, Luiza. "Benfica, São Mateus e São Pedro: veja os 10 bairros mais populosos de Juiz de Fora, segundo o IBGE". G1 Zona da Mata, 17 nov. 2024.

TORRES, Luiz Henrique. "Águas de maio: a enchente de 1941 em Rio Grande". Historiae, v. 3, n. 3, p. 239-254, 2012.

TUCCI, Carlos E. M. "Aspectos institucionais do controle das inundações urbanas". Avaliação e controle da Drenagem Urbana, v. 2, p. 405-419, 2001.

VOJTEK, Matej; VOJTEKOVÁ, Jana. "Flood susceptibility mapping on a national scale in Slovakia using the analytical hierarchy process". Water, v. 11, n. 2, p. 364, 2019.