

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA MAPEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO QUANTO ÀS INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Jean Carlos Santos Guimarães¹ ; Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira ² ; Marconi de Arruda Pereira³ & Andrés Velástegui Montoya⁴

Abstract: This work presents a computational tool developed to identify urban roads with higher sensitivity to flooding, through the integration of geoprocessing and hydrological modeling. Using QGIS and the SWMM model, the tool was developed in PyQGIS, capable of processing spatial data and automatically generating the input files required by SWMM, including information on subcatchments, conduits, junctions, and hydrological parameters. Land use and land cover classification was performed using the Dzetsaka plugin and the Random Forest algorithm, with seven classes associated with runoff coefficients and Manning roughness values. The methodology was applied to neighborhoods in the central region of Belo Horizonte, Brazil, and the simulation was based on a 100-year return period design storm. The results showed good agreement between the most hydraulically compromised roads and previously mapped flood-prone areas, indicating the efficiency of the proposed approach. The tool proved to be effective in supporting urban planning and flood risk management and can be easily adapted to other urban areas.

Keywords - flood prediction; hydraulic modeling; GIS.

Resumo: Este trabalho apresenta uma ferramenta computacional desenvolvida para identificação de logradouros urbanos com maior sensibilidade a alagamentos, por meio da integração entre geoprocessamento e modelagem hidrológica. A ferramenta foi desenvolvida em PyQGIS, possibilitando a integração de dados processados no QGIS e um modelo de drenagem no SWMM. Assim é possível processar dados espaciais e gerar automaticamente os arquivos de entrada exigidos pelo SWMM, incluindo informações de sub-bacias, trechos, nós e parâmetros hidrológicos. A classificação do uso e cobertura do solo foi feita com o plugin Dzetsaka, utilizando o algoritmo Random Forest, com sete classes associadas a coeficientes de escoamento e de rugosidade de Manning. A metodologia foi aplicada em bairros da região central de Belo Horizonte/MG e a simulação utilizou uma chuva de projeto com tempo de recorrência de 100 anos. Os resultados demonstraram boa concordância entre os logradouros mais comprometidos hidraulicamente e as manchas de inundação previamente mapeadas, indicando a eficiência da abordagem proposta. A ferramenta mostrou-se útil para apoiar o planejamento urbano e a gestão do risco hidrológico, sendo facilmente adaptável a outras áreas urbanas.

Palavras-Chave – Previsão de inundações; Modelagem Hidráulica; Inteligência Artificial; SIG.

1 Universidade Federal de Viçosa – UFV, Av. Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, Viçosa, MG, Brasil, jean.guimaraes@ufv.br

2 Universidade Federal de Viçosa – UFV, Av. Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, Viçosa, MG, Brasil, emmanuel.teixeira@ufv.br

3 Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ, Campus Alto Paraopeba, MG443, KM7, Ouro Branco, MG, Brasil, marconi@ufsj.edu.br

4 Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT) - ESPOL Polytechnic University Guayaquil/Guayas, Ecuador, dvelaste@espol.edu.ec

INTRODUÇÃO

O aumento da urbanização e as mudanças climáticas intensificaram, ao longo dos anos, os desafios relacionados aos alagamentos urbanos em escala global. O rápido crescimento das áreas urbanas ocasionou um aumento das superfícies impermeáveis, como estradas e edifícios, reduzindo a capacidade de infiltração da água no solo. Como consequência, observou-se um incremento no volume e na velocidade do escoamento superficial. Esse fenômeno, somado à crescente frequência e intensidade de chuvas extremas, impulsionadas pelas mudanças climáticas, sobrecarregou os sistemas de drenagem existentes, resultando em alagamentos urbanos mais frequentes e severos (Da Silva et al. 2021).

Diante desse cenário, torna-se crucial o desenvolvimento e a aplicação de ferramentas eficazes para a análise e gestão do risco de alagamento urbano. O *Storm Water Management Model* (SWMM), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), emergiu como uma das ferramentas mais utilizadas para a análise de sistemas de drenagem urbana. Sua ampla adoção e desenvolvimento contínuo ao longo de décadas solidificaram sua posição como uma ferramenta robusta e confiável para simular sistemas hídricos urbanos (Nascimento et al., 2023). A natureza de código aberto do SWMM possibilita o desenvolvimento de inúmeras extensões e integrações, ampliando ainda mais sua versatilidade.

Vários são os aspectos que influenciam no comportamento hidrodinâmico do escoamento pluvial dentro de bacias urbanas: o tipo de cobertura do solo, que influencia tanto na velocidade de escoamento como no percentual do volume que infiltra (Xu et al., 2020); as declividades das sub-bacias e, principalmente, dos logradouros que compõem a área de estudo; a proximidade de rios e córregos; e as condições do sistema de microdrenagem da localidade (Wang et al., 2023). Nesse sentido, o uso de ferramentas para manipulação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) é importante para compreender quando e como cada uma dessas propriedades afetam a resposta hidrológica das áreas urbanas (Hermas; Gaber; Bastawesy, 2021).

Assim, o presente estudo buscou desenvolver uma ferramenta para realizar o geoprocessamento automático, classificação com uso de inteligência artificial (IA) – particularmente *Random Forest*, tratamento dos dados de entrada requeridos. A partir dessas informações, mapear áreas susceptíveis às inundações e alagamentos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Dados de entrada

Inicialmente, foram reunidas informações utilizadas na predição dos logradouros com maior sensibilidade a eventos pluviométricos extremos. A primeira camada vetorial definida foi a área de interesse, utilizada para recortar as demais camadas que extrapolavam seus limites.

Um dos principais fatores que indicam áreas sensíveis ao alagamento é a declividade do terreno (Al-Juaidi, 2023). Esta pode ser obtida a partir de um MDE, acessado em muitas fontes de dados espaciais disponíveis na rede. Neste trabalho foi utilizado o MDE com resolução de 12,5 m ALOS PALSAR, que apresenta melhor acurácia quando comparado com os principais modelos disponíveis, como da NASA, SRTM e TanDEM-X (Adiri et al., 2022; Shawky et al., 2019).

Para o geoprocessamento foi necessária também uma camada vetorial que identificasse o eixo dos logradouros que compõem a área estudada. Essa camada foi fundamental, pois, a partir dela, foram identificados os nós e os trechos, bem como suas respectivas informações, que serviram de base para a elaboração do arquivo de entrada no *software* SWMM. Dos nós, foram extraídas suas coordenadas projetadas em UTM e suas elevações, enquanto dos trechos, foram extraídos os nós que

o conectam (de montante e jusante) e seu comprimento. Essa camada pode ser obtida a partir de um plugin do QGIS, chamado QuickOSM. Esse plugin fornece dados sobre a infraestrutura das regiões, como rodovias, sinalização, edificações, entre outros. Contudo, foi necessário realizar um pré-processamento nessa camada, verificando trechos duplicados ou sem conexão com o restante da rede. Essa etapa foi importante, pois reduz a demanda de processamento em todas as etapas.

Por fim, foi necessária de uma camada que identificasse o tipo de cobertura do solo, subsídio para a obtenção dos parâmetros hidrológicos de cada sub-bacia. Esse procedimento foi realizado com o plugin Dzetsaka. Trata-se de um classificador de uso e ocupação do solo com uso de Inteligência Artificial (IA), a partir de imagens de satélite e um modelo treinado. Esse modelo pode ser desenvolvido com uma camada vetorial de amostras de cada uma das classes, e sua respectiva imagem de satélite. O plugin possibilita a construção de modelos a partir dos seguintes algoritmos: *Gaussian Mixture Model* (GMM); *Random Forest* (RF); *Support Vector Machines* (SVM); e *K-Nearest Neighbors* (KNN).

Neste estudo, foi empregado o modelo Random Forest, visto que vem sendo amplamente utilizado na classificação de uso e cobertura do solo, apresentando melhor eficiência, mais alta acurácia, e um menor custo computacional quando comparado aos demais mencionados, como apresentado por Amini et al. (2022).

O processo para geração das imagens classificadas demanda duas etapas: a geração do modelo de classificação RF; e a classificação das imagens de satélite que abrangem as áreas de interesse. As amostras dos tipos de cobertura utilizadas no modelo foram agrupadas em sete classes, onde cada uma é identificada a partir de sua assinatura espectral, e possui valores de Coeficiente de Escoamento Superficial (CES) e Coeficiente de Rugosidade de Manning (CRM) associado (Tabela 1). Esses valores foram utilizados na obtenção do CRM das parcelas permeável e impermeável de cada sub-bacia, assim como seu percentual impermeável da área, a serem atribuídos na construção do TXT de entrada no SWMM.

Tabela 1: Classes de uso e cobertura do solo utilizadas

Código	Descrição	CES	n
1	Asfalto	0,90	0,011
2	Concreto	0,80	0,013
3	Telhado	0,85	0,015
4	Sombra	0,80	0,013
5	Solo exposto	0,40	0,050
6	Vegetação	0,25	0,200
7	Floresta	0,18	0,600

Geoprocessamento e modelagem hidráulica e hidrológica

A manipulação das camadas de entrada objetiva a construção de cinco arquivos CSV: (i) contém os dados qualitativos sobre cada uma das sub-bacias criadas automaticamente pelo algoritmo; (ii) contém dados de coordenadas projetadas dos pontos que serão utilizadas para criar o desenho das sub-bacias; (iii) possui dados dos trechos, com seus nós de montante e jusante e seu comprimento; (iv) possui dados relacionados aos nós que interligam os trechos (logradouros); (v) possui a referência de qual nó receberá a contribuição de cada sub-bacia.

A partir do MDE foi possível gerar uma camada vetorial de sub-bacias dentro da região de interesse, delimitada em função das declividades. Desta, subtraiu-se a camada do eixo das ruas, após ser realizado um buffer de 5,0 m, representando a largura média da faixa de rolamento. Assim, obtém-se as sub-bacias com suas respectivas áreas, que podem ser entendidas como parcelas dos quarteirões

subdivididas em função da inclinação e direção de escoamento. Esse resultado foi também utilizado para geração do arquivo que contém a ordem dos pontos (vértices de polígono) para desenhar a sub-bacia no SWMM.

Em cada sub-bacia, as células foram agrupadas de acordo com o tipo de cobertura do solo, sendo calculada a área total correspondente a cada classe. Para cada uma delas, também foi determinada a declividade média. No SWMM, é necessário informar o percentual de área impermeável das sub-bacias, parâmetro que influencia diretamente no volume de escoamento gerado. Esse valor foi estimado por meio de uma média ponderada, considerando as áreas de cada classe de uso e seus respectivos coeficientes de escoamento superficial (Tabela 1). A Equação 1 ilustra esse procedimento.

$$I = \frac{\sum_{i=1}^7 A_i \cdot C_i}{A_0} \quad (1)$$

Em que:

I é o percentual impermeável;

A_i é a área de cada classe;

C_i é o coeficiente de escoamento superficial (*runoff*) de cada classe;

A_0 é a área total da sub-bacia.

Em se tratando do CRM, foi empregado um procedimento análogo ao anterior, contudo, foram divididos em dois grupos: tipos de cobertura impermeável e tipo de cobertura permeável. Essa divisão não indica, evidentemente, que qualquer área pertencente a um dos grupos é integralmente suscetível à infiltração ou o oposto disso. Trata-se de um agrupamento de modo a se obter o comportamento predominante daquela área, visto que o SWMM demanda o CRM das parcelas permeável e impermeável para cada sub-bacia. A Tabela 2 apresenta a divisão proposta.

Tabela 2: Agrupamento das classes de uso e cobertura do solo em função da permeabilidade

Código	Descrição	Grupo
1	Asfalto	Impermeável
2	Concreto	
3	Telhado	
4	Sombra	
5	Solo exposto	Permeável
6	Vegetação	
7	Floresta	

As expressões utilizadas para o cálculo do CRM são equivalentes da área (Equações 2 e 3).

$$n_{imp} = \frac{\sum_{i=1}^4 A_i \cdot n_i}{A_{0,imp}} \quad (2)$$

$$n_{perm} = \frac{\sum_{i=5}^7 A_i \cdot n_i}{A_{0,perm}} \quad (3)$$

Em que:

n_{imp} é o Coeficiente de Manning da parcela impermeável;

n_{perm} é o Coeficiente de Manning da parcela permeável;

n_i é o Coeficiente de Manning referente à cada classe;

$A_{0,imp}$ é a soma das áreas das classes consideradas impermeáveis dentro de cada sub-bacia (de 1 até 4);

$A_{0,perm}$ é a soma das áreas das classes consideradas permeáveis dentro de cada sub-bacia (de 5 até 7).

A camada de eixo das ruas, utilizada para delimitação dos quarteirões com as sub-bacias, também foi empregada para definição dos trechos entre nós. Esse arquivo contém as coordenadas dos nós inicial e final, assim como o comprimento do respectivo trecho. Essa camada também foi utilizada para gerar o arquivo com os IDs dos nós, com suas respectivas coordenadas projetadas e elevações, dados mandatórios para definição de novas junções no SWMM.

O último arquivo gerado é aquele que identifica os nós que receberão as contribuições das sub-bacias. Dentro de cada uma delas são obtidas as elevações de todos os vértices de seu perímetro, a partir do MDE. O ponto que apresenta a menor elevação, naturalmente, será o ponto de escoamento daquela delimitação. Tendo identificado este ponto de menor cota, foi então verificado o nó do eixo das ruas que apresentou a menor distância, atribuindo a este o papel de exutório dessa área.

A Figura 1 apresenta um fluxograma simplificado, de modo a ilustrar o procedimento descrito de construção dos cinco arquivos CSV.

A última etapa do processo envolve a compilação dos dados obtidos. O SWMM possibilita a criação manual de sub-bacias, nós e trechos, ou a inserção a partir de um arquivo de TXT. Esse arquivo tem um formato padronizado, e é organizado em seções, onde cada uma começa com o título escrito entre colchetes. É possível a inserção de dados sobre: pluviômetros, hidrogramas, séries temporais, temperatura, evapotranspiração, sub-bacias, infiltração, nós, exutórios, condutos, bombas, vertedores, qualidade da água pluvial, entre outros parâmetros. Cada seção possui dados referentes a cada unidade (trecho, sub-bacia ou nó) em cada linha.

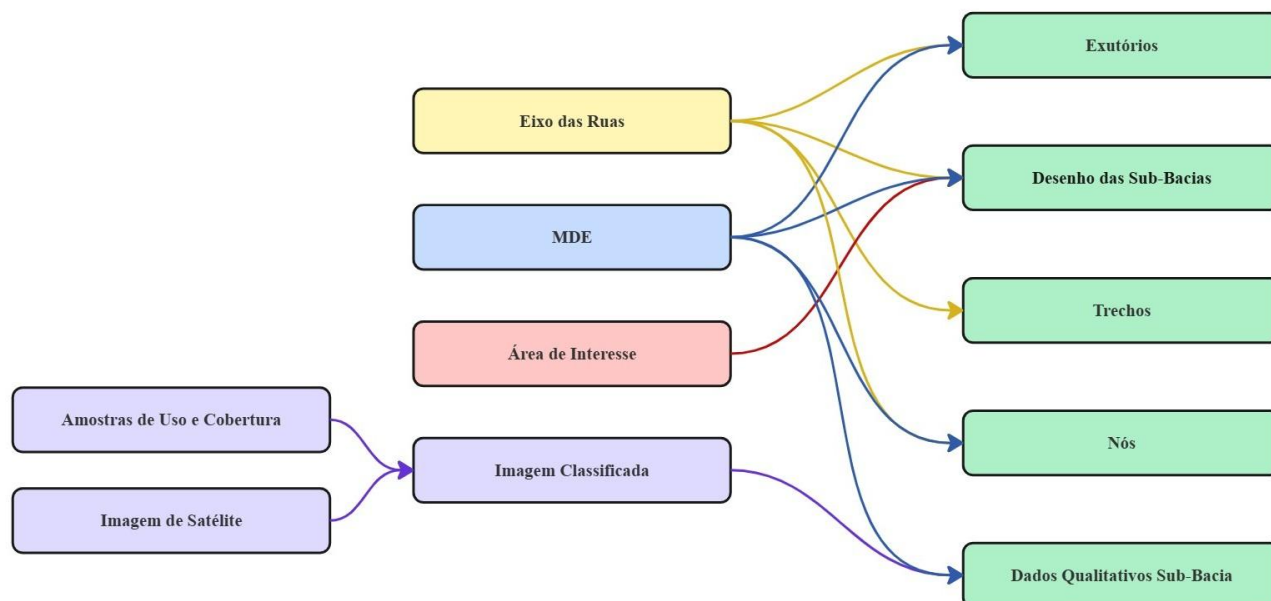
O procedimento proposto constrói um arquivo com as seções de sub-bacias, sub-áreas (seção relacionada às parcelas permeável e impermeável de cada sub-bacia), infiltração, condutos, seções e nós. Esse processo é realizado a partir de um script rodado em IDE externa ao QGIS.

A metodologia de avaliação dos logradouros com maior sensibilidade à inundação foi empregada em alguns bairros na região central de Belo Horizonte, onde se conhecem as áreas de maior sensibilidade, como apresentado por (Nascimento et al., 2023). Os bairros analisados estão dentro integralmente ou parcialmente da área analisada são: Gutierrez, Cidade Jardim, Monte São José, Luxemburgo, Coração de Jesus, Santo Antônio, Savassi, Lourdes, Barro Preto, Bonfim, Lagoinha, Carlos Prates, Centro, Colégio Batista e Floresta. Nessa região foi possível identificar uma maior concentração de manchas de inundação, motivo pela qual foi escolhida para a análise.

A simulação com o arquivo TXT gerado foi realizada, no SWMM, com uma chuva de projeto correspondente ao Tempo de Recorrência (TR) de 100 anos, e duração de 120 minutos, conforme apresentado por Nascimento et al. (2023), com precipitação acumulada de 93 mm.

Ainda sobre a modelagem realizada, foi utilizado o método de propagação de fluxo da Onda Dinâmica, sendo este o mais teoricamente acurado. Esse modelo leva em conta condições especiais como remanso, fluxo pressurizado, fluxo inverso, armazenamento em canais, perdas de entrada e saída (Rossman, 2017).

Figura 1: Fluxograma da construção dos arquivos CSV



RESULTADOS E DISCUSSÕES

A execução do procedimento de delimitação da poligonal de estudo, em função da declividade e do contorno dos quarteirões, resultou em 2.737 sub-bacias. Estas estão distribuídas em uma área total de 1.089,8 ha. Na Tabela 3, são apresentados os totais, obtidos automaticamente pela ferramenta desenvolvida, para a área de cada classe, assim como as médias dos valores de percentual impermeável, CRM permeável e CRM impermeável.

Tabela 3: Valores dos parâmetros obtidos a partir do processamento pelo algoritmo de classificação RF de uso e ocupação do solo.

Código	Descrição	Área total (ha)	Grupo	CRM médio (n)	% Impermeável médio
1	Asfalto	90,49	Impermeável	0,013	0,674
2	Concreto	612,12			
3	Telhado	83,63			
4	Sombra	61,69			
5	Solo exposto	66,09	Permeável	0,355	
6	Vegetação	26,98			
7	Floresta	148,77			

A partir dos resultados obtidos, observou-se que 77,81% da área total avaliada era coberta por classes tidas como impermeáveis, enquanto 22,19% eram de classes permeáveis.

A classificação com o algoritmo RF, para uso e ocupação do solo apresentou algumas dificuldades inerentes ao procedimento. Como o processo foi realizado a partir de uma imagem de satélite, houve áreas onde se observou sombras, principalmente das edificações. Essas regiões escuras, comumente se projetam sobre áreas também classificadas como impermeáveis, como regiões asfaltadas, telhados de casas vizinhas, edificações menores ou com algum tipo de pavimento. Dessa

forma, mesmo havendo alguns casos onde se observou a sombra se projetando sobre áreas não edificadas, solo exposto, ou com algum tipo de cobertura vegetal, foi coerente realizar sua consideração como uma região impermeável.

Foi possível observar que há uma área considerável classificada como “Floresta”, mesmo se tratando de uma área extremamente urbanizada, como o centro de Belo Horizonte. Isso pode ser explicado por algumas falhas do procedimento. Em primeiro lugar, em alguns pontos, foi possível observar, mesmo com maior número de amostras no modelo treinado e uma boa acurácia, imprecisões relacionadas às classes de sombra e floresta, visto que possuem assinatura espectral próxima (Classe 7). Outro equívoco recorrente observado, relacionado a proximidade espectral, ocorreu entre as classes de “Telhado” e “Solo exposto”.

Houve, ainda, um erro inerente ao procedimento, relacionado as árvores plantadas em calçadas. As copas dessas árvores induzem o modelo a identificar como área vegetada (Classes 6 ou 7), o que não se reflete no comportamento hidrológico do local, visto que se trata de uma cobertura de concreto. Contudo, os efeitos dessa imprecisão foram minimizados pelo buffer aplicado nos eixos das ruas, que reduz em grande parte a áreas onde essa classificação equivocada ocorreu, visto que é dessa forma que foram delimitados os quarteirões.

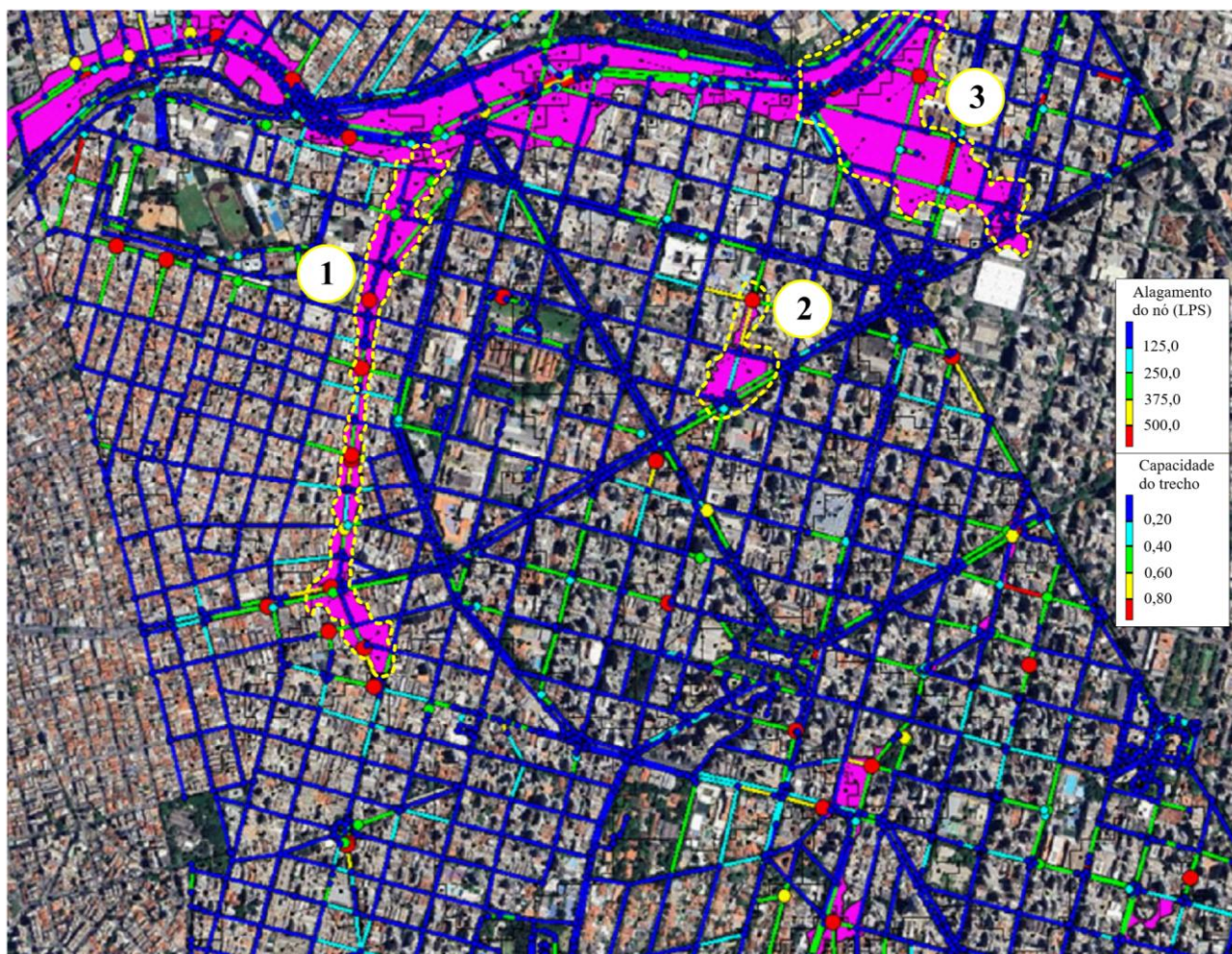
Os logradouros foram considerados dentro do SWMM como canais, com largura de 10,0 m. No programa, a vazão inundada refere-se a todo volume que excede a capacidade da rua e “transborda” do sistema através dos nós. A Figura 2 apresenta a capacidade demandada dos logradouros, no momento de máxima vazão inundada, em uma escala de cor indo de azul (ruas com menor percentual de sua capacidade comprometida) até vermelho (ruas com maior percentual de sua capacidade comprometida), com a envoltória de manchas de inundação para um TR de 100 anos, representada pelas áreas em rosa. Os nós estão em escala de tamanho e cor, partindo da cor vermelha para o azul, representando pontos com maior e menor taxa de inundação, respectivamente.

A partir da Figura 2, foi possível observar a proximidade entre as áreas apresentadas pelo modelo do SWMM, com as manchas de inundação propostas por Nascimento et al. (2023). Destaca-se a Av. Francisco Sá (1), o encontro da Rua Araguari com a Av. Amazonas (2) e uma grande mancha entre a Praça Raul Soares e a Av. do Contorno (3), onde em todas as áreas foi possível constatar uma tendência a inundações relevante.

Contudo, é importante salientar que metodologia proposta é consideravelmente afetada pela qualidade do MDE, podendo causar elevações ou depressões espúrias, ou ainda possuírem cotas que se diferem em grande medida das reais. Vale lembrar que o procedimento apresentado fez uso de dados obtidos a partir de satélite, que irão sempre ser de menor qualidade em relação à dados levantados em campo, com uso de tecnologias como LIDAR.

Também há incoerências relacionadas a existência de pontes sobre rodovias. Nessa situação, a rodovia que passa por baixo da ponte tem sua representação no SWMM degradada, visto que no ponto onde há o cruzamento, a cota considerada pelo modelo é a da ponte, o que causa uma elevação no greide que não ocorre na realidade.

Figura 2: Comparação entre a envoltória de mancha de inundação (rosa) e as ruas com maior percentual da sua capacidade comprometida, para uma mesma chuva de projeto. Na imagem: (1) Avenida Francisco Sá; (2) Encontro entre Av. Amazonas e Rua Araguari; (3) Trecho entre Av. do Contorno e Praça Raul Soares.

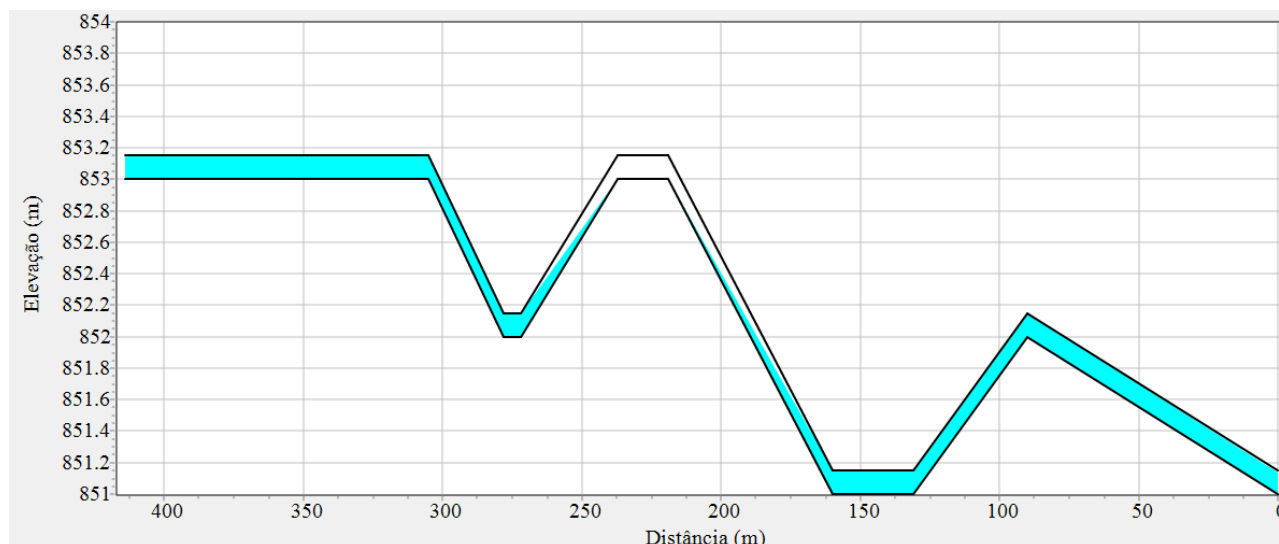


Mesmo tendo sido realizado o pré-processamento da camada de elevações, com uso de algoritmo da biblioteca do QGIS, há regiões onde há uma tendência de acúmulo de água em função da topografia, onde se observam os vales. Isso pode ser observado na Figura 3, que demonstra o perfil da Av. Francisco Sá, em seu trecho mais próximo ao encontro com a Av. do Contorno, sendo essa uma região sensível, de acordo com a carta de inundações. Sob essa avenida, corre o Córrego dos Pintos, afluente do Córrego Arrudas, canalizado dentro de uma galeria.

Com relação aos pontos onde se pôde observar acúmulo tendência de alagamento, na Figura 3, nestes locais, o SWMM permite a interpretação de duas formas, segundo Rossman, (2017): ou o volume que excede a capacidade da rua, sai do sistema pelos nós de forma definitiva, assim como ocorre nos exutórios; ou o volume pode ser retido, e distribuído dentro de uma área alagada informada pelo usuário, e posteriormente retornar ao sistema quando a rua comportar tal vazão. A consideração da retenção do volume para que este retorne ao sistema faz sentido quando a simulação se refere a galerias, o que não é o caso do presente estudo, onde os canais são justamente as próprias ruas avaliadas.

Apesar de o perfil apresentado na Figura 3 representar o canal como se este fosse fechado, isso não reflete o perfil real empregado nessa simulação.

Figura 3: Perfil da Avenida Francisco Sá, em seu trecho final, área apontada como sensível na Carta de Inundações apresentada por Nascimento et al. (2023)



CONCLUSÕES

O presente estudo propôs e demonstrou uma metodologia eficiente e replicável para a identificação de logradouros urbanos mais suscetíveis à ocorrência de alagamentos, utilizando ferramentas de geoprocessamento no QGIS, IA para classificação com RF, modelagem hidrológica no SWMM. A automatização do processamento de dados espaciais, por meio de um algoritmo desenvolvido em PyQGIS, permitiu a geração sistemática dos arquivos de entrada para o SWMM, integrando dados de uso e ocupação do solo, modelo digital de elevação e rede viária.

A validação da metodologia, realizada com base na comparação entre os resultados da simulação e a carta de inundações da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Arrudas, demonstrou boa concordância, reforçando a aplicabilidade da abordagem proposta na análise de risco hidrológico em áreas urbanas. Os resultados revelaram coerência entre os logradouros com maior percentual de capacidade hidráulica comprometida e as áreas historicamente afetadas por inundações.

Além de contribuir com uma ferramenta prática para o planejamento urbano e a gestão de risco, o estudo destaca o potencial do uso de classificadores de uso e cobertura do solo baseados em inteligência artificial no aprimoramento da modelagem hidrológica urbana. Futuras aplicações podem incluir a calibração com dados de campo e a incorporação de diferentes cenários de uso do solo e mudança climática, ampliando o potencial da ferramenta como instrumento de suporte à tomada de decisão em políticas públicas de drenagem e resiliência urbana.

REFERÊNCIAS

- ADIRI, Zakaria *et al.* Comparison of ASTER GDEM3, SRTM3, NASADEM, TanDEM-X90, AW3D30, and ALOS PALSAR data with TanDEM-X12: a case study of Tagragra of Akka inlier, Moroccan Anti-Atlas. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 15, n. 21, nov. 2022.
- AL-JUAIDI, Ahmed E. M. The interaction of topographic slope with various geo-environmental flood-causing factors on flood prediction and susceptibility mapping. **Springer Nature**, 1 abr. 2023.
- AMINI, Saeid *et al.* Urban Land Use and Land Cover Change Analysis Using Random Forest Classification of Landsat Time Series. **Remote Sensing**, v. 14, n. 11, 1 jun. 2022.

DA SILVA, Alisson Caetano *et al.* IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JIQUIÁ NO RECIFE-PE. **XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 2021.

HERMAS, ElSayed; GABER, Ahmed; BASTAWESY, Mohammed El. Application of remote sensing and GIS for assessing and proposing mitigation measures in flood-affected urban areas, Egypt. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 24, n. 1, 2021.

NASCIMENTO, Nilo de Oliveira *et al.* **Modelagem hidrológica e hidráulica das inundações na bacia do Ribeirão Arrudas**. Belo Horizonte: [S.n.]. 2023.

ROSSMAN, Lewis A. **Storm Water Management Model Reference Manual - Hydraulics**. [S.l.: S.n.]. 2017. Disponível em: <www.epa.gov/water-research>.

SHAWKY, Mohamed *et al.* Pixel-based geometric assessment of channel networks/orders derived from global spaceborne digital elevation models. **Remote Sensing**, v. 11, n. 3, 1 fev. 2019.

WANG, Zijun *et al.* Flood sensitivity assessment of super cities. **Nature**, 2023.

XU, Chao *et al.* Surface runoff in urban areas: The role of residential cover and urban growth form. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, 20 jul. 2020.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo fomento a esta pesquisa.