

REFINAMENTO DE TOPOGRAFIA URBANA PARA ANÁLISE DE RISCO DE INSTABILIDADE DE PEDESTRES EM EVENTOS DE CHEIA

João Pedro Oliveira Emerich¹ ; Gustavo Lima de Barros² ; Wesley Marçal Neves³ ; Marcus Nóbrega Gomes Junior⁴ & Eduardo Mario Mendiondo⁵

RESUMO – As inundações urbanas são frequentes em cidades brasileiras e causam perdas humanas e econômicas. A análise detalhada desse processo é limitada pela escassez de dados topográficos de alta resolução. Assim, este trabalho tem como objetivo refinar a representação do terreno urbano em simulações hidrodinâmicas utilizando dados públicos, a fim de analisar o risco de instabilidade de pedestres em escala de rua. A metodologia integra dados topográficos do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo, malha viária do OpenStreetMap e edificações do Open Building, por meio de técnicas como burn-in das ruas e elevação das construções. O terreno refinado foi aplicado em um modelo hidrodinâmico 2D no HEC-RAS, desenvolvido para a bacia hidrográfica da área urbana de São Carlos. Os resultados de profundidade e velocidade do escoamento permitiram calcular o risco de instabilidade de pedestres. Os resultados demonstram que o MDE refinado representa adequadamente o escoamento em nível de rua, possibilitando identificar áreas de risco além dos canais. Destacam-se pontos críticos em vias próximas à rotatória do Cristo, foco principal das análises. A abordagem proposta mostra-se uma alternativa promissora para modelagem de inundações urbanas em regiões sem dados topográficos de alta resolução.

Palavras-Chave – Inundações urbanas; Modelo digital de elevação; Instabilidade de pedestres

ABSTRACT – Urban flooding is a frequent problem in Brazilian cities, causing human and economic losses. Detailed analysis of this process is limited by the scarcity of high-resolution topographic data. Therefore, this study aims to refine the representation of urban terrain in hydrodynamic simulations using public data in order to analyze pedestrian instability risk at the street scale. The methodology integrates topographic data from IGC-SP, road network data from OpenStreetMap, and building data from Open Building through techniques such as street burn-in and building elevation. The refined terrain model was applied in a 2D hydrodynamic model using HEC-RAS for the watershed encompassing the urban area of São Carlos. Depth and flow velocity results were used to calculate pedestrian instability risk. The results demonstrate that the refined DEM adequately represents street-level flow, enabling the identification of risk areas beyond river channels. Critical points were identified on streets near the Cristo roundabout, which was the focus of the analysis. The proposed approach proved to be a viable alternative for urban flood modeling in regions lacking high-resolution topographic data.

Key-words – Urban flooding; Digital elevation model; pedestrian instability

^{1,2,3,5} Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São Carlense, 400 – Centro, São Carlos, 13566-590, São Paulo, Brasil. Emails: joao.emerich@usp.br, gustavo.barros@usp.br, wmneves@usp.br, emm@sc.usp.br

⁴ Stanford University, 450 Jane Stanford Way, Stanford, CA 94305, Estados Unidos. Email: mngomes@stanford.edu

INTRODUÇÃO

As inundações urbanas estão entre os principais problemas enfrentados por cidades brasileiras, sendo resultado da combinação entre eventos de precipitação intensa, impermeabilização do solo e limitações nos sistemas de drenagem. A urbanização modifica o comportamento hidrológico das bacias, aumentando o escoamento superficial e reduzindo a infiltração (TUCCI, 2005). Esse processo, aliado à ocorrência de chuvas intensas e concentradas em curtos intervalos de tempo, contribui para a elevação dos picos de vazão e para a sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana, favorecendo a ocorrência de alagamentos e enchentes (CHOW et al, 1988).

No município de São Carlos são comuns esses processos, com registros recentes de eventos extremos que evidenciam a vulnerabilidade da bacia urbana. Em novembro de 2020, por exemplo, foram registrados cerca de 140 mm de chuva em aproximadamente 40 minutos, valor próximo ao esperado para todo o mês, de 171 mm, resultando em inundações generalizadas, arraste de veículos e prejuízos superiores a R\$ 43 milhões (CNN, 2020). Segundo a Defesa Civil, em fevereiro de 2024, choveu mais de 70 mm em cerca de 15 minutos, aproximadamente um terço da média mensal, com alagamentos em diversas regiões da cidade, como a rotatória do Cristo (Figura 1). E mais recentemente, em fevereiro de 2026, foram observados 130 mm de precipitação em 1 hora e 20 minutos (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS, 2024 e 2026).



Figura 1 – Rotatória do Cristo após evento extremo de chuva em fevereiro de 2024 (São Carlos Agora, 2024)

Diversos estudos já investigaram a dinâmica das inundações na bacia urbana de São Carlos, como Fava et al. (2015), Buarque et al. (2021), Gomes et al, (2024) e Souza et al. (2026). Apesar dos avanços, persistem limitações relacionadas à representação do relevo, especialmente devido ao uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE) com baixa resolução, que não capturam adequadamente elementos urbanos como ruas e edificações. Essa limitação compromete a precisão na estimativa das profundidades e velocidades do escoamento na escala de rua, impedindo análises mais detalhadas das inundações urbanas. Esse problema é comum no contexto brasileiro, em que levantamentos de alta precisão, como o Light Detection and Ranging (LiDAR), estão disponíveis para poucas localidades.

Este trabalho tem como objetivo aprimorar o MDE da bacia urbana de São Carlos a partir da integração de dados públicos, incorporando informações da malha viária e das edificações por meio de técnicas como o burn-in das ruas, que consiste no rebaixamento artificial da rede viária para direcionar o escoamento superficial, e a elevação das estruturas construídas, além de avaliar o risco de instabilidade humana em nível de ruas por meio de modelagem hidrológica-hidrodinâmica 2D.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A área de estudo compreende a bacia urbana do município de São Carlos, com 83,2 km² de extensão, inserida como sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Monjolinho. No contexto urbano, destacam-se três regiões historicamente reconhecidas pela ocorrência de alagamentos e inundações: o Mercado Municipal, a praça do Kartódromo e a rotatória do Cristo. O modelo hidrológico-hidrodinâmico foi desenvolvido para toda a bacia urbana, entretanto, a análise detalhada dos resultados foi concentrada na área destacada na Figura 2, localizada próxima à rotatória do Cristo, escolhida como estudo de caso por representar uma das regiões mais críticas do município. Essa área foi utilizada para a avaliação do escoamento em nível de rua e do risco de instabilidade de pedestres.

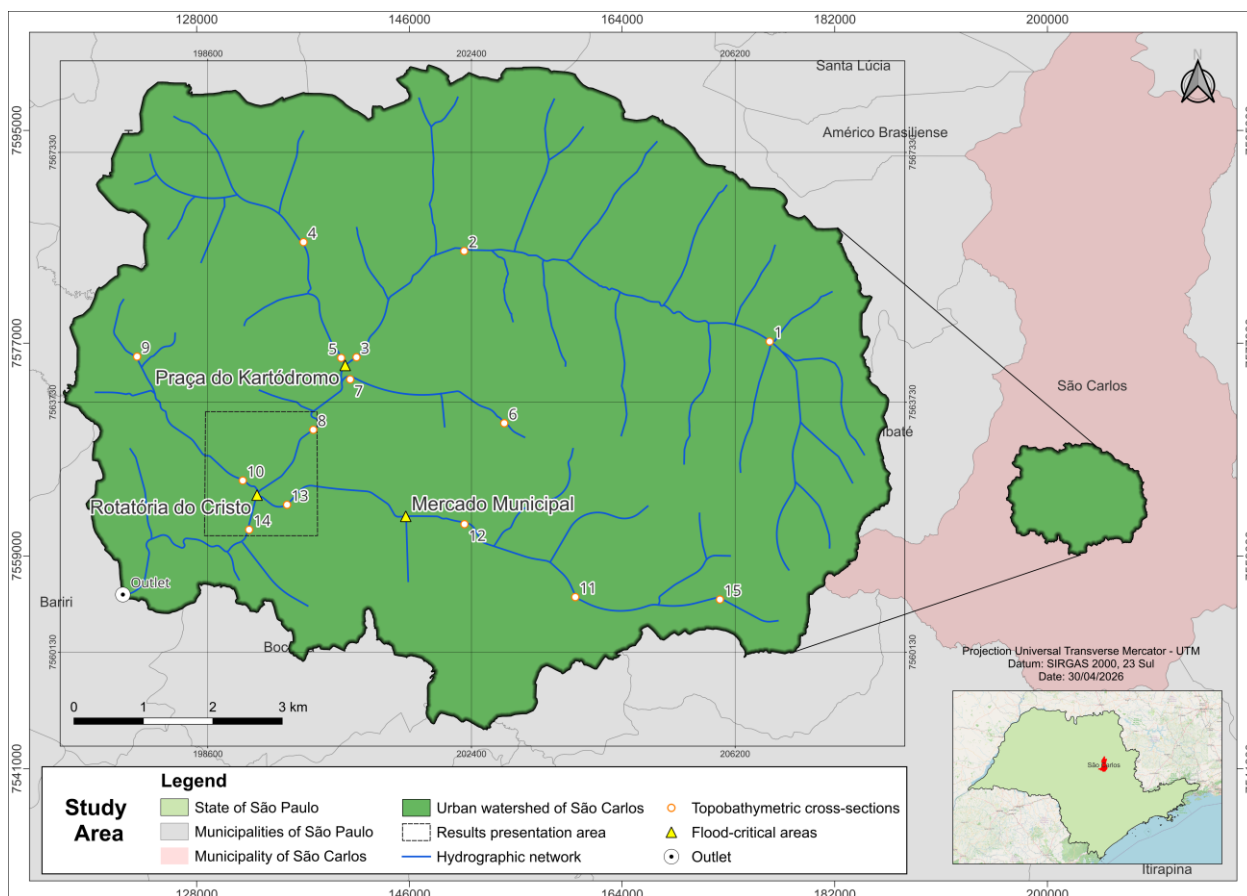


Figura 2 – Área de estudo – Bacia urbana de São Carlos

Aprimoramento do Modelo Digital de Elevação (MDE)

O aprimoramento do MDE teve como objetivo aumentar a representatividade da topografia urbana, condição essencial para a simulação hidrodinâmica em escala de rua. Inicialmente, foram avaliadas diferentes bases altimétricas disponíveis, incluindo o ANADEM (30 m), o FABDEM (30 m) e as cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC-SP) em escala 1:10.000 (IGC, 1970–2000). A partir desta última, as curvas de nível com equidistância de 5 m foram vetorizadas e interpoladas, gerando um MDE com resolução espacial de 3 m. Apesar da melhoria em relação às bases globais gratuitas, verificou-se que a topografia resultante ainda não capturava adequadamente elementos urbanos relevantes, como a geometria das vias e a seção dos canais, exigindo a aplicação de procedimentos adicionais de refinamento.

Para a incorporação da rede hidrográfica, foram utilizadas seções topobatimétricas obtidas a partir do trabalho de Fava (2019), as quais foram integradas ao terreno por meio do software Autodesk Civil 3D, permitindo a interpolação longitudinal e transversal dos canais. Em seguida, a malha viária foi extraída do OpenStreetMap (2026), sendo previamente tratada para remoção de feições não representativas (e.g., pontes e estruturas elevadas). A partir desses dados, foi gerado um buffer correspondente à largura média das vias, posteriormente rasterizado e incorporado ao MDE no software QGIS, por meio da técnica de burn-in, com profundidade de 0,20 m. A escolha desse valor foi baseada em análise de sensibilidade (0,10 m, 0,20 m e 0,30 m), sendo 0,20 m o menor valor capaz de representar o escoamento superficial ao longo das ruas, sendo possível identificar claramente a delimitação entre a rua e o resto do terreno nos resultados de manchas de inundação.

Ademais, para evitar fluxos irreais através de edificações, foram incorporados dados vetoriais de construções provenientes do Open Buildings (GOOGLE RESEARCH, 2026), os quais foram processados para evitar acúmulo de água entre os edifícios dentro de um mesmo quarteirão. Isso foi feito gerando um buffer de 7 m do vetor original, dissolvendo o resultado e removendo os polígonos que avançaram sobre as vias usando o buffer das ruas, gerado anteriormente, como camada de máscara. Logo, o vetor foi convertido em raster e atribuídos ao MDE com altura mínima de 3 m.

Por fim, aplicou-se o algoritmo Breach Depressions, disponível no WhiteboxTools, com o objetivo de eliminar depressões espúrias e garantir a conectividade hidráulica do terreno. As simulações preliminares indicaram que o MDE derivado da base do IGC, após os tratamentos descritos, apresentou melhora na conectividade hidráulica, com redução de depressões artificiais e definição do fluxo nos canais de drenagem e nas vias urbanas. Isso destaca o potencial de técnicas de refinamento de MDE baseadas em dados acessíveis como alternativa viável em contextos em que

levantamentos de alta resolução não estão disponíveis. A Figura 3 apresenta os processos empregados para o refinamento do MDE.

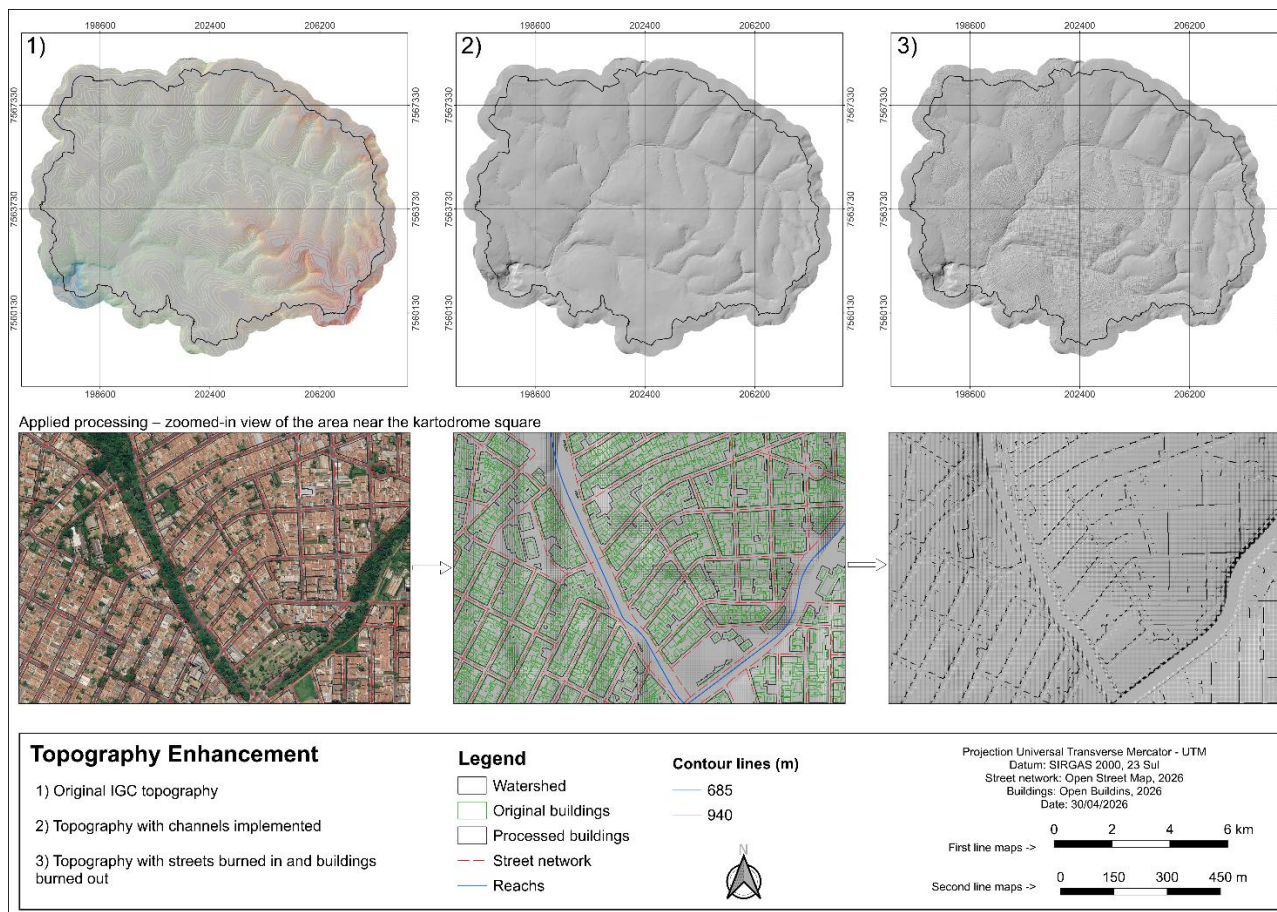


Figura 3 – Processo de refinamento do Modelo Digital de Elevação (MDE)

Modelagem Hidrológica-Hidrodinâmica

A modelagem hidrológica-hidrodinâmica foi desenvolvida no HEC-RAS, por meio de abordagem bidimensional (2D), visando representar o escoamento superficial em ambiente urbano. A infiltração foi simulada pelo método de Green-Ampt, com parâmetros espacialmente distribuídos a partir das classes de textura do solo. A caracterização espacial das variáveis, juntamente com a hipsometria da bacia, está ilustrada na Figura 4.

A malha computacional foi definida com resolução base de 20 m, refinada para 3 m nas áreas de maior interesse, permitindo melhor representação do escoamento em nível de rua. Foram inseridas breaklines ao longo dos canais e da malha viária, com o objetivo de orientar adequadamente o fluxo. O escoamento foi resolvido pelo método diffusion wave, enquanto as condições de contorno consistiram na aplicação de precipitação uniformemente distribuída em todo o domínio e profundidade normal no exutório, com declividade da linha de energia igual a 2%.

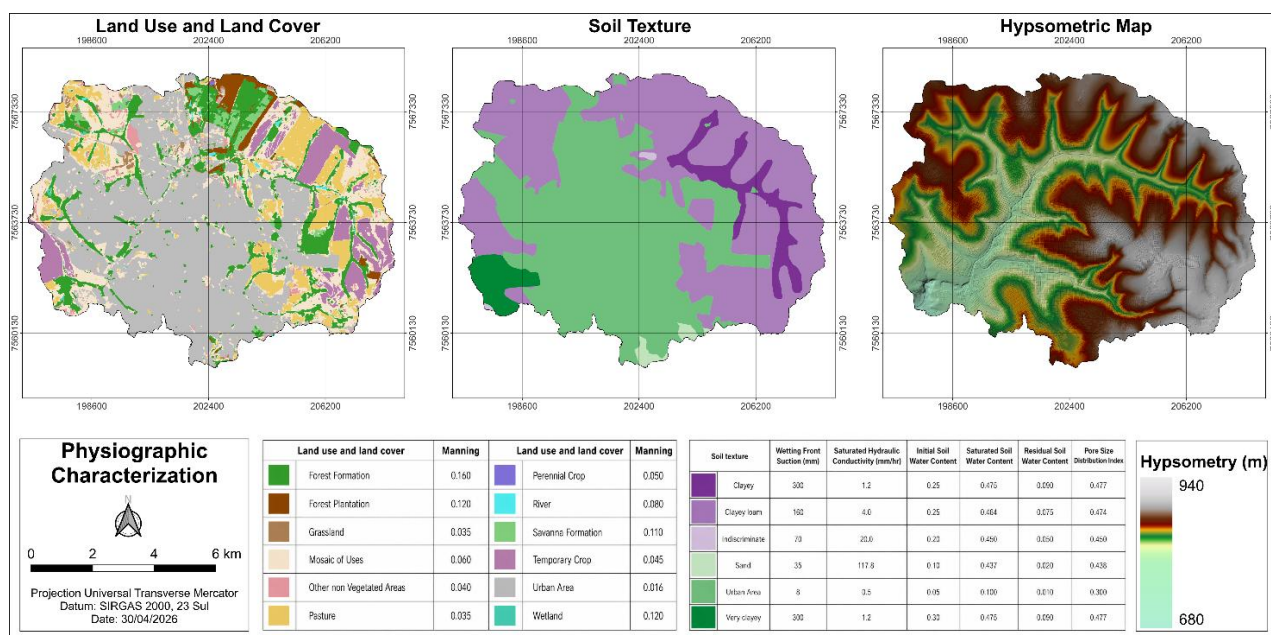


Figura 4 – Caracterização fisiográfica da bacia de contribuição

A precipitação foi definida a partir de curvas intensidade-duração-frequência (IDF) propostas por Junior et al. (2021), adotando-se tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos. Os quantis de precipitação foram discretizados temporalmente em intervalos de 5 minutos através do método dos blocos alternados.

A Tabela 1 exibe uma síntese dos dados que foram utilizados no modelo hidrológico-hidrodinâmico.

Tabela 1 – Síntese dos dados usados no modelo hidrológico-hidrodinâmico

Dado	Descrição	Resolução / Escala	Fonte	Aplicação no modelo
Modelo Digital de Elevação	MDE refinado a partir de carta topográfica com modificações urbanas	3 m	IGC (1992-2000)	Módulo hidrodinâmico (topografia)
Uso e ocupação do solo	Classificação LULC	10 m	MapBiomass – Coleção 2 (2023)	Manning (rugosidade superficial)
Textura do solo	Mapa pedológico do Estado de São Paulo	Escala 1:500.000	Instituto Florestal (2017)	Parâmetros de infiltração (Green-Ampt)
Parâmetros de infiltração	Condutividade hidráulica, sucção e umidade inicial por classe de solo	—	Rawls et al. (1983)	Módulo hidrológico
Coeficiente de Manning	Valores atribuídos conforme uso do solo	—	ASCE (1992); FHWA (2001) e Chow (1959)	Módulo hidrodinâmico
Precipitação (IDF)	Curvas intensidade-duração-frequência. Coeficientes $a = 819,67$; $b = 0,138$; $c = 10,77$ e $d = 0,75$.	—	Junior et al. (2021)	Condição de contorno
Tempo de Concent. (Tc)	Estimado pela equação de Carter. L e S do talvegue principal = 16,96 km e 1,3%.	129 min	Recomendado por Silveira (2005)	Definição da duração da chuva
Malha computacional	Grade 2D com refinamento em áreas de interesse. Breaklines em canais e ruas.	20 m / 3 m	—	Módulo hidrodinâmico
Condições de contorno	Precipitação distribuída e profundidade normal no exutório (2%)	—	—	Hidrologia e hidrodinâmica

Análise de Risco de Instabilidade de Pedestres

Para a avaliação do risco de instabilidade de pedestres, adotou-se a metodologia utilizada em Rápalo *et al.* (2025). Foram verificadas as condições de escorregamento (sliding, S_{HIFR}), tombamento (toppling, T_{HIFR}) e afogamento (drowning, D_{HIFR}). O Human Instability Flooding Risk (HIFR) pode ser calculado como o máximo entre os valores de S, T e D.

Ressalta-se que há outras variáveis intermediárias para os cálculos, como a área e volume submersos, coordenadas x e y do centro de gravidade, entre outras. A metodologia de cálculo completa pode ser verificada em Milanesi *et al.* (2014).

Observa-se que a maioria das variáveis nas equações anteriores dependem das características físicas de cada pessoa. De modo a analisar o risco específico de cada faixa etária e gênero, Rápalo *et al.* (2025) adotou valores com base no Sistema de Vigilância Alimentar e Nutricional (SISVAN). Ao todo, foram consideradas oito categorias, sendo elas as combinações entre dois gêneros e quatro faixas etárias.

O cálculo também requer a adoção de um valor μ (coeficiente de fricção) e um valor C_c (coeficiente de arraste). Milanesi *et al.* (2014) discute que a literatura estima valores de 0,3 a 0,7 para o primeiro, e 1 a 1,2 para o segundo. Adotou-se um valor médio para ambos, sendo $\mu=0,5$ e $C_c=1,1$.

RESULTADOS

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de vazão e tempo de pico em uma seção a aproximadamente 1 km a montante do exutório da bacia (indicado na Figura 2). E na Figura 5 os resultados de profundidade e velocidade do escoamento e risco de instabilidade de pedestres, na região conhecida como rotatória do Cristo. Tal região é apontada em estudos anteriores como uma das áreas críticas do município em questão de alagamentos. São mostrados os resultados para eventos com TR de 10, 50 e 100 anos, bem como os resultados do risco de instabilidade de pedestres.

Tabela 2 – Vazão e tempo de pico para cada evento

Evento	Vazão de Pico	Tempo de Pico
TR10	225 m ³ /s	2,1 h
TR50	325 m ³ /s	1,9 h
TR100	390 m ³ /s	1,85 h

Primeiramente, observa-se que a principal zona de risco é o próprio canal. Tal resultado é esperado, visto que um pedestre que estivesse dentro da seção do rio se afogaria durante uma enchente. Porém, além da seção, há diversas outras ruas onde o pedestre sofre risco de escorregamento ou tombamento. Por exemplo, na Av. Bruno Ruggiero Filho, na Rua José Nunes, ou a Rua Salesianos do Brasil.

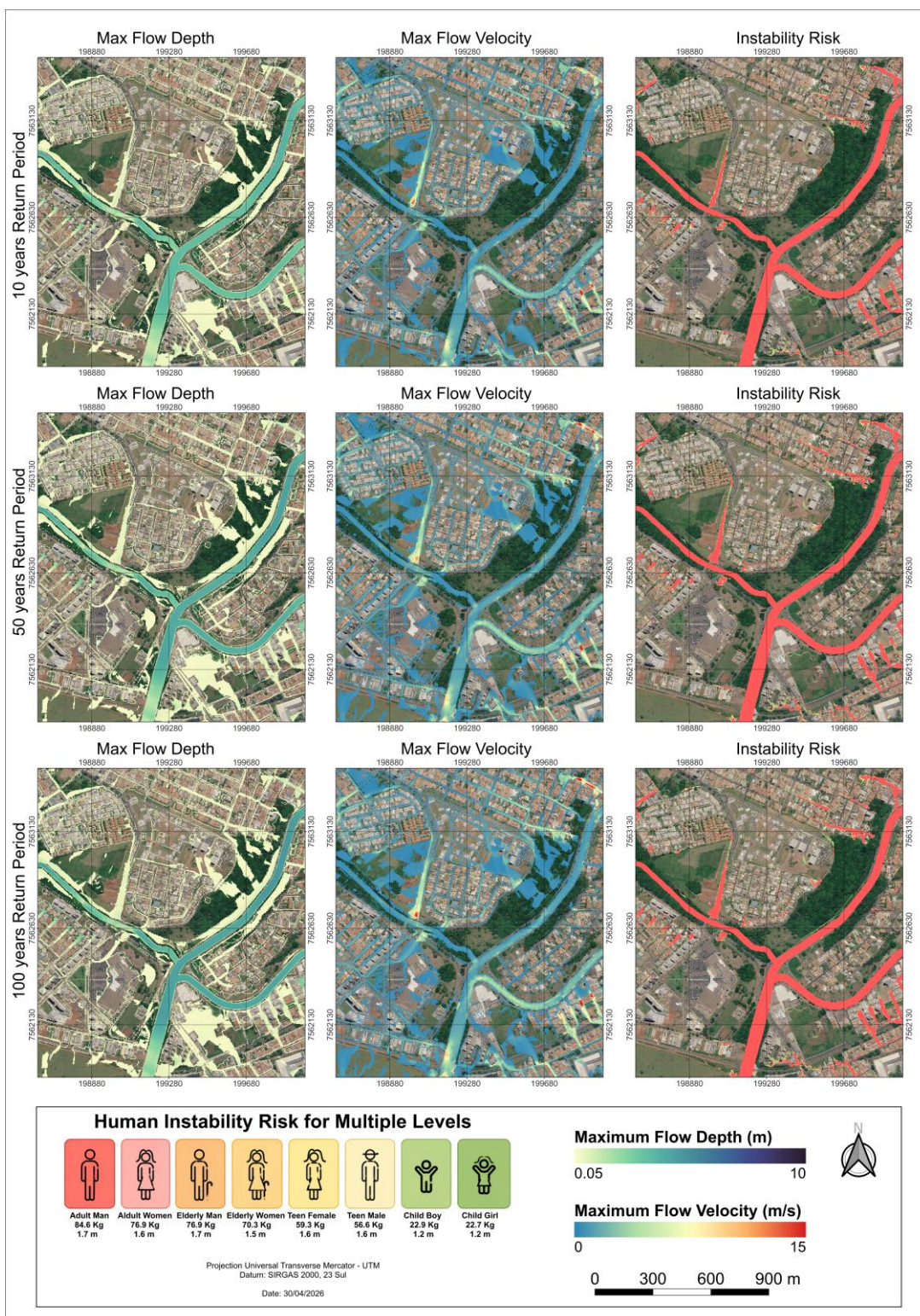


Figura 5 – Resultados do risco de instabilidade de pedestres na região da rotatória do Cristo

Este resultado enfatiza que com as modificações feitas no MDE foi possível representar o escoamento, e consequentemente, o risco de instabilidade a nível de rua. Verifica-se também que a divisão de idade e gênero permite identificar áreas críticas adicionais. Na primeira metade da Rua Salesianos do Brasil, por exemplo, qualquer pedestre está sujeito a tombamento. Porém, na segunda

metade, onde a declividade é menor, somente crianças (de ambos os gêneros) correm risco. Tal risco poderia não ter sido identificado caso se utilizasse valores médios de peso e altura para o cálculo.

Para a região analisada, observa-se que a vazão de pico aumenta cerca de 73% entre os eventos com TR de 10 e 100 anos. Apesar disso, houve pouca variação na mancha de inundação e no risco de instabilidade de pedestres. Acredita-se que isso pode ser o efeito de uma limitação na forma como a seção hidráulica dos canais foi implantada na topografia. Como as batimetrias disponíveis foram interpoladas entre seções de montante e jusante, alguns trechos acabaram sendo representados com larguras diferentes das reais, aumentando artificialmente a capacidade hidráulica do canal e diminuindo a mancha de inundação. Na região da rotatória do Cristo, por exemplo, isso é corroborado pela comparação entre a seção implantada na topografia e imagens de satélite. Destaca-se que o estudo ainda está em desenvolvimento e, em etapas futuras, serão realizados refinamentos na topografia dos canais, buscando representar de forma mais adequada as seções nos pontos sem dados batimétricos disponíveis.

No que tange o risco de instabilidade, a variável de declividade do terreno também pode ter sido um fator que influenciou a pouca variação dos resultados. Algumas das ruas são consideravelmente inclinadas, de modo que mesmo uma intensidade relativamente baixa (TR=10 anos) é capaz de colocar os pedestres em risco, enquanto outras regiões não são propensas a velocidades ou lâminas altas, de modo que mesmo uma intensidade alta não gera risco a pedestres.

Por fim, observa-se como o índice de risco é função tanto da lâmina quanto da velocidade do escoamento. A Figura 5 indica diversos pontos alagados, porém só aqueles em que a lâmina é muito alta, ou que uma lâmina baixa é acompanhada de uma velocidade alta, é que apresentam risco para os pedestres.

CONCLUSÕES

A falta de levantamentos topográficos com alta resolução foi um limitante considerável para modelagens hidrológico-hidrodinâmicas anteriores no município de São Carlos. De modo a refinar a análise, utilizou-se a topografia do IGC-SP, acrescentando a seção dos canais, o burn-in das ruas e o burn-out de edificações. A nova topografia permitiu analisar o índice de risco para cada rua, identificando regiões mais críticas para pedestres. Verificou-se que mesmo ruas longe das margens dos rios podem oferecer risco aos pedestres durante enchentes, a depender da lâmina e velocidade do escoamento. Verificou-se também que há regiões onde apenas algumas faixas etárias e gêneros estão em risco, resultado que poderia passar despercebido caso fossem considerados peso e altura padrões.

Os resultados encontrados, com a representação do escoamento e índice de risco nas ruas, mostraram o potencial da metodologia proposta no refinamento da topografia urbana. Tendo em vista

que os vetores da malha viária e das edificações foram obtidos em plataformas gratuitas, a técnica pode ser facilmente replicada em outras regiões. Isso é especialmente interessante no contexto brasileiro, uma vez que a maioria dos municípios do país não possuem um levantamento topográfico de alta precisão. Apesar dos avanços obtidos no presente trabalho, a comparação dos resultados usando um levantamento LiDAR ainda é uma lacuna em aberto e que pode ser explorada em outros estudos para a validação da metodologia desenvolvida.

Ressalta-se que os resultados mostrados nesse estudo são parciais, havendo espaço para mais ajustes na topografia. Futuramente, pode-se fazer a correção na seção do canal nas regiões da rotatória do Cristo, Kartodromo e Mercado, apontadas como críticas em estudos anteriores. Tal correção é necessária pois a interpolação entre as seções com batimetrias disponíveis não convergiu totalmente com o que é observado nas imagens de satélite, estando possivelmente superestimada na região da rotatória do Cristo. Além disso, numa próxima etapa pode-se verificar o comportamento do modelo para diferentes cenários de mudança climática, que tendem a alterar a intensidade das chuvas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Milena Sousa pela disponibilidade em tirar dúvidas sobre o tema do trabalho e ao Cesar Souza pela disponibilização das curvas de nível do IGC-SP já vetorizadas. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

IGC-SP. DataGeo: Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/?ctx=IGC>. Acesso em: 2 abril 2026.

JÚNIOR, M.N.G.; BRAGA, P.H.A.; MENDIONDO, E.M.; REIS, L.F.R. (2021). “Statistical, visual and nonparametric analysis for optimization of IDF curves and design aid charts for hydraulic works: study case in Sao Carlos – SP”. Revista DAE v69, n228, pp. 171-189.

MILANESI, L.; PILOTTI, M.; RANZI, R. (2015). “*A conceptual model of people’s vulnerability to floods*”. Water Resour. Res. 51 (2015) 182–197.

RÁPALO, L. M. C.; JÚNIOR, M.N.G.; MENDIONDO, E.M. (2025). “*Multiple levels of human instability due to urban overland flow within the 21st century: An urban Catchment study case in Brazil*”. International Journal of Disaster Risk Reduction 132.

SOUSA, M.R.; MENDIONDO, E.M.; JÚNIOR, M.N.G. (2026). “*Hydrological-hydrodynamic modeling of climate-induced urban flooding of design storms using HydroPol2D: a case study in São Carlos, Brazil*”. Brazilian Journal of Water Resources v.31, e02, pp. 1-31.

TUCCI, C. E.M. (2005). Gestão de Águas Pluviais Urbanas. Ministério das Cidades. In: Global Water Partnership. Wolrd Bank. Unesco.