XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/105

Mapeamento de Inundações com HEC-RAS no Rio São Francisco: trecho Pirapora–Buritizeiro (MG) e aplicações ao Planejamento Urbano

Marcus Vinícius Ramos de Souza
Discente em Engenharia Civil , IFNMG, Pirapora - MG, Brasil, marcusramosdesouza@gmail.com

Breno Alcântara Silva
Docente em Engenharia Civil, IFNMG, Pirapora - MG, Brasil, breno.silva@ifnmg.edu.br

RESUMO: Em 2024, o aumento das temperaturas intensificou a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, com destaque para inundações urbanas influenciadas por fatores físicos e antrópicos. Este trabalho tem como objetivo simular e mapear áreas suscetíveis a inundações urbanas nos municípios de Pirapora e Buritizeiro (MG), utilizando modelagem hidrológica e hidráulica integrada a sistemas de informações geográficas. A metodologia compreendeu a estimativa de vazões máximas para diferentes períodos de retorno por meio de métodos estatísticos de valores extremos, com base em séries históricas fluviométricas. As vazões estimadas foram empregadas na modelagem hidráulica bidimensional no software HEC-RAS, considerando coeficientes de rugosidade de Manning e modelo digital de elevação em ambiente SIG. Foram gerados cenários de inundação para distintos tempos de retorno, resultando em mapas de manchas de inundação. Os resultados indicam maior extensão das áreas inundáveis no município de Pirapora em comparação a Buritizeiro, com ambos apresentando impactos significativos em bairros situados próximos ao leito do rio São Francisco. As análises evidenciam a influência da ocupação da planície fluvial na ampliação da vulnerabilidade urbana e reforçam a necessidade de integrar medidas estruturais e não estruturais ao planejamento territorial, visando à mitigação de riscos e ao aumento da resiliência urbana.

PALAVRAS-CHAVE: Hec-Ras, Inundação, Simulação, Modelagem, Pirapora, Buritizeiro.

ABSTRACT: In 2024, rising temperatures intensified the occurrence of extreme hydrological events, particularly urban flooding influenced by physical and anthropogenic factors. This study aims to simulate and map areas susceptible to urban flooding in the municipalities of Pirapora and Buritizeiro (MG), using hydrological and hydraulic modeling integrated with geographic information systems. The methodology involved estimating peak discharges for different return periods using extreme-value statistical methods based on historical fluviometric series. The estimated flows were applied in two-dimensional hydraulic modeling using HEC-RAS, considering Manning's roughness coefficients and a digital elevation model within a GIS environment. Flood scenarios were generated for multiple return periods, resulting in flood inundation maps. The results indicate a greater spatial extent of flood-prone areas in Pirapora compared to Buritizeiro, with both municipalities experiencing significant impacts in neighborhoods located near the main river channel of the São Francisco River. The analyses highlight the influence of floodplain occupation on increased urban vulnerability and emphasize the need to integrate structural and non-structural measures into territorial planning aimed at risk mitigation and enhanced urban resilience.

KEYWORDS: Hec-Ras, Flooding, Simulation, Modeling, Pirapora, Buritizeiro

1 INTRODUÇÃO

O ano de 2024 foi marcado por recordes de temperatura e pela intensificação de eventos hidrológicos extremos. Estima-se que as anomalias climáticas tenham provocado mais de 8.700 mortes, deslocado cerca de 40 milhões de pessoas e gerado prejuízos superiores a 550 bilhões de dólares. Entre os principais desastres,

destacaram-se as inundações, os deslizamentos de terra e os ciclones tropicais, fenômenos agravados pelo aumento das temperaturas globais, pelas mudanças no regime de chuvas e pela maior frequência de precipitações intensas. Esse quadro torna-se ainda mais crítico em regiões com infraestrutura deficiente e em áreas urbanas em expansão, onde o crescimento desordenado amplia os problemas de drenagem e a vulnerabilidade socioambiental, especialmente em países em desenvolvimento (Silva, 2018; Dijk, 2025).

A simulação hidrodinâmica integra fatores topográficos, hidrológicos e hidráulicos, permitindo representar o escoamento em múltiplas direções. Para isso, recomenda-se o uso de modelos bidimensionais ou tridimensionais, já que os unidimensionais apresentam limitações. O mapeamento de inundações pode ser feito a partir de registros diretos durante o evento, como medições, fotos e relatos, embora esse método seja restrito e não permita a definição de períodos de retorno. Outra alternativa é a modelagem hidrodinâmica, que utiliza modelos físicos ou matemáticos e deve ser calibrada com dados reais. A qualidade dos mapas está ligada à precisão do modelo digital de terreno e influencia diretamente os mapas de perigo (Giglio, Kobiyama, 2011; Monteiro, Kobiyama, 2013).

O SIG constitui uma ferramenta essencial para o mapeamento e a análise de áreas suscetíveis a inundações, permitindo a compreensão da dinâmica das cheias e contribuindo para a mitigação de seus impactos. As inundações figuram entre os desastres naturais de maior relevância socioeconômica, porém seus efeitos podem ser reduzidos por meio da modelagem hidráulica preventiva. Nesse contexto, o uso de algoritmos computacionais associados a softwares como o HEC-RAS possibilita a elaboração de mapas de risco integrados a ambientes SIG, com elevada precisão na identificação das áreas vulneráveis, inclusive em regiões de topografia complexa, sendo amplamente empregado em estudos de risco, previsões e reconstituição de eventos de inundação (Cabral et al., 2016; Huţanu et al., 2020; Peker et al., 2024; Engelhardt, Silva, Nobrega, 2024).

No Brasil, as inundações são recorrentes e frequentemente resultam em calamidades públicas, porém muitos municípios ainda não adotam medidas eficazes de gestão do risco. Mesmo com iniciativas institucionais pontuais, a avaliação dos prejuízos potenciais raramente é incorporada ao planejamento e aos investimentos em controle de cheias (Fadel, Marques, Goldenfum, 2018). Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA) (2002), a bacia do rio São Francisco possui cerca de 639 mil km² de área de drenagem, estendendo-se pelos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Pernambuco, Sergipe e Alagoas, além do Distrito Federal, o que corresponde a aproximadamente 7,5% do território brasileiro. Essa bacia é subdividida em unidades fisiográficas, destacando-se o Alto São Francisco, que se estende da nascente até o município de Pirapora e Buritizeiro, em Minas Gerais, e o Médio São Francisco, responsável por cerca de 55% da área total da bacia (Pereira et al., 2007).

Pirapora e Buritizeiro carecem de estudos que quantifiquem com precisão a magnitude das inundações provocadas por eventos extremos. Diante dessa lacuna, este trabalho tem como objetivo produzir mapas de mancha de inundação para os dois municípios, utilizando geotecnologias e modelos hidrológicos e hidráulicos do HEC-RAS, integrados em ambiente SIG, de modo a identificar regiões propensas a inundações e fornecer subsídios técnicos ao planejamento urbano e à tomada de decisão do Poder Público Municipal.

2 METODOLOGIA

Pesquisa aplicada, de natureza quantitativa, com abordagem descritivo-analítica baseada em modelagem computacional. A metodologia consistiu no levantamento de dados fluviométricos históricos e simulação hidrodinâmica de eventos de inundação por meio do software HEC-RAS.

2.1 Caracterização da região do estudo

A área de estudo compreende os municípios de Pirapora e Buritizeiro, localizados no norte do estado de Minas Gerais, às margens do rio São Francisco. Em conjunto, os dois municípios totalizam uma área territorial de 7.767 km², com população de 79.516 habitantes conforme o último censo, com densidade demográfica média de 10,24 hab/km². Os municípios configuram um conjunto urbano contíguo de relevância regional para o estado. A Figura 1 apresenta a localização geográfica dos municípios abordados.

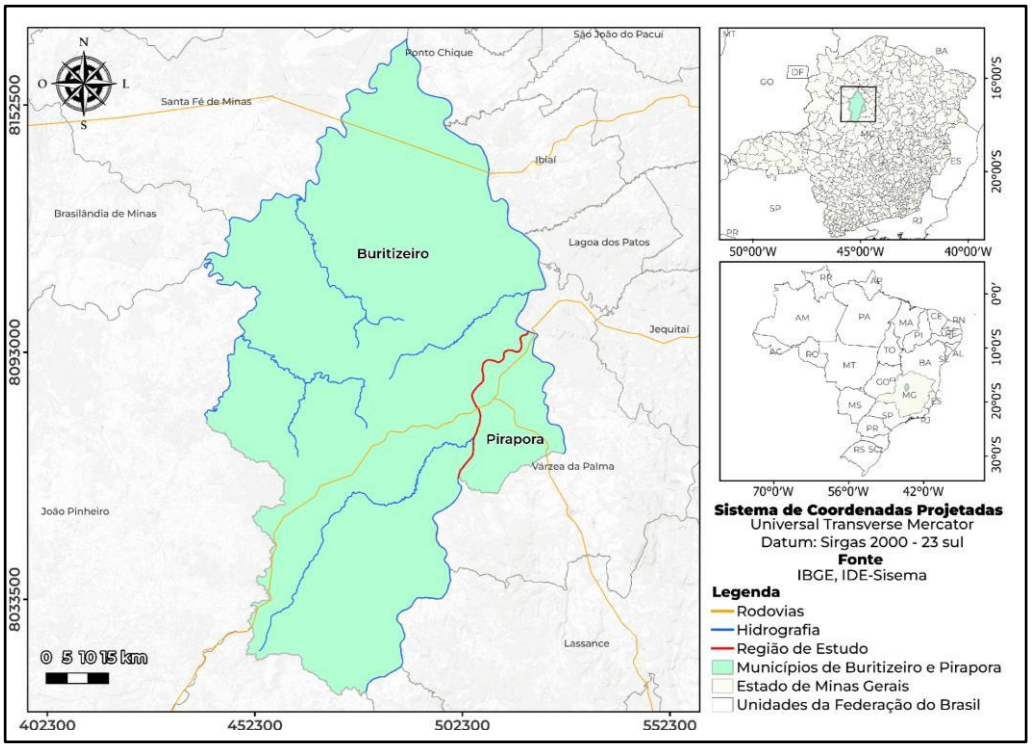


Figura 1. Localização dos municípios abordados no norte de Minas Gerais
Fonte: Autores, 2026

2.2 Levantamento de dados

Os dados de cota e vazão obtidos a partir do banco de dados HidroWeb, registrado pela estação Pirapora Barreiro (41135000), compreendem as vazões máximas anuais e as respectivas cotas fluviométricas observadas no período de 1969 a 2024, com exceção dos anos de 2015 a 2019, por haver meses sem dados de registro de vazões. A Tabela 1 mostra os dados usados para ajustar a curva-chave de cota-vazão.

Tabela 01 - Dados de cota-vazão extraído da Agência Nacional de Águas

Ano	Qmax (m³/s)	Cota (m)	Ano	Qmax (m³/s)	Cota (m)	Ano	Qmax (m³/s)	Cota (m)	Ano	Qmax (m³/s)	Cota (m)
1969	2121,68	292	1982	3815,34	367	1995	1526,02	266	2008	2482,68	319
1970	1743,09	272	1983	5648,92	428	1996	1635,95	273	2009	3357,28	354
1971	1477,66	257	1984	3049,24	337	1997	2569,53	321	2010	2012,79	297
1972	2450,20	305	1985	3550,10	357	1998	1619,99	272	2011	4429,13	390
1973	3540,66	353	1986	3319,83	348	1999	1464,13	259	2012	4301,07	386
1974	2064,83	291	1987	1453,05	258	2000	1987,89	288	2013	1856,55	289
1975	2082,50	292	1988	1656,59	270	2001	2226,17	300	2014	927,05	226
1976	1621,70	268	1989	4118,57	378	2002	2609,86	318	2020	3033,00	269
1977	2565,67	316	1990	1049,15	233	2003	1808,46	291	2021	1168,18	266
1978	3244,85	345	1991	3220,05	344	2004	1772,32	289	2022	3893,07	408
1979	6615,54	456	1992	4581,10	394	2005	3783,64	375	2023	2094,14	330
1980	5037,92	409	1993	2185,48	298	2006	4760,82	406	2024	1175,62	263
1981	2930,18	332	1994	3446,77	353	2007	4932,12	411			

Os dados de cota e vazão obtidos no banco HidroWeb foram organizados e submetidos ao processo de calibração da equação por meio de ajuste de regressão não linear, visando à minimização dos desvios entre os valores observados e estimados. Esse procedimento permitiu a correção de possíveis discrepâncias e a obtenção de uma relação contínua e representativa entre cota e vazão. Como resultado, foi estabelecida a curva-chave final utilizada nas etapas subsequentes de análise e modelagem hidráulica.

As vazões máximas associadas aos períodos de retorno analisados foram estimadas por meio da Distribuição de Valores Extremos do Tipo I (Gumbel), amplamente utilizada na hidrologia para a modelagem de cheias anuais máximas. O método estabelece uma relação linear entre a vazão extrema e os parâmetros estatísticos da série histórica, conforme expresso pela Equação (1), descrita por Subramanya (2008):

$$XT = \overline{x} + K \cdot \sigma n{-}1 \quad (1)$$

em que XT representa a vazão associada ao período de retorno T, $\overline{x}$ é a média da série de vazões máximas anuais, σ o desvio padrão amostral e K o fator de frequência, determinado em função do período de retorno e do tamanho da amostra. As vazões estimadas foram utilizadas como condições hidrológicas na modelagem hidráulica.

A adoção de intervalos de confiança permitiu avaliar a consistência estatística das vazões estimadas e as incertezas associadas à extrapolação para maiores tempos de retorno. A aplicação do método de Gumbel-Subramanya às séries hidrológicas de Pirapora e Buritizeiro resultou em estimativas mais robustas das vazões máximas anuais, utilizadas como dados de entrada na modelagem hidráulica no HEC-RAS. Essas vazões subsidiaram a simulação dos cenários de cheia e a delimitação das manchas de inundação associadas a cada período de retorno, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Vazões obtidas pela distribuição Gumbel-Subramanya

TR (anos)	Yt	Yn	Sn	k	Xt (Vazão m³/s)	Cota (m)
2	0,367	0,5489	1,1623	-0,1569	2580,81	322,27
5	1,5	0,5489	1,1623	0,8182	3847,71	374,58
10	2,25	0,5489	1,1623	1,4639	4686,51	403,75
15	2,674	0,5489	1,1623	1,8281	5159,76	418,87
20	2,97	0,5489	1,1623	2,0832	5491,11	428,97
30	3,384	0,5489	1,1623	2,4395	5953,98	442,5
35	3,541	0,5489	1,1623	2,5742	6129,01	447,45
40	3,676	0,5489	1,1623	2,6907	6280,31	451,67
45	3,795	0,5489	1,1623	2,7932	6413,55	455,33
50	3,902	0,5489	1,1623	2,8848	6532,58	458,57
60	4,086	0,5489	1,1623	3,0431	6738,27	464,08
70	4,241	0,5489	1,1623	3,1768	6911,92	468,65
80	4,376	0,5489	1,1623	3,2925	7062,18	472,55
90	4,494	0,5489	1,1623	3,3944	7194,62	475,95
100	4,6	0,5489	1,1623	3,4855	7313,02	478,96
110	4,696	0,5489	1,1623	3,5679	7420,06	481,66
120	4,783	0,5489	1,1623	3,6431	7517,75	484,1

2.3 Modelagem computacional

Com base nessas informações, o modelo permitiu a simulação do escoamento ao longo do sistema fluvial e a delimitação das manchas de inundação associadas a cada evento hidrológico, possibilitando a representação espacial das áreas suscetíveis a inundações e a análise da variação da lâmina d'água na planície fluvial. A geometria do sistema fluvial foi definida a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), por meio

do módulo HEC-RAS Mapper, utilizando river lines, bank lines e flow paths para representar, respectivamente, o eixo do curso d'água, às margens do canal e os comprimentos hidráulicos nas áreas de inundação, garantindo uma caracterização geométrica consistente do sistema.

O coeficiente de rugosidade de Manning (n) foi atribuído com base no mapa de uso e ocupação do solo de Pirapora e Buritizeiro, sendo os valores definidos conforme o Manual de Referência Hidráulica do HEC-RAS, Tabela 3.1, de acordo com a cobertura predominante do terreno (Afzal et al., 2022). A Figura 2 apresenta o traçado adotado para o rio São Francisco.

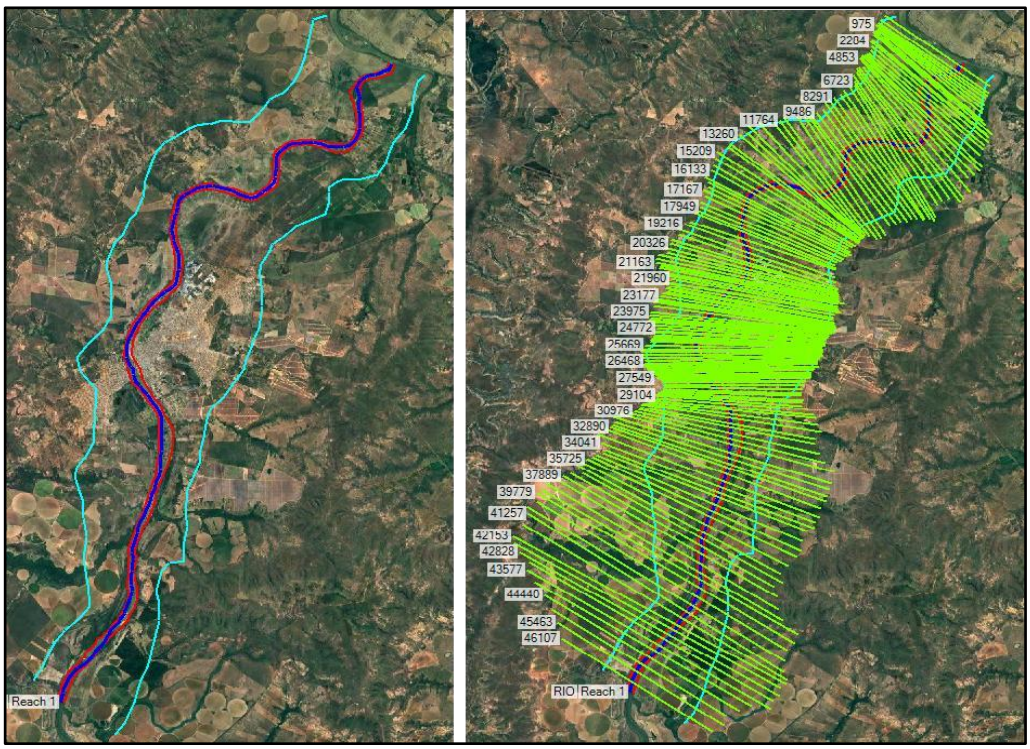


Figura 2. Elementos geométricos do modelo hidráulico no RAS Mapper
Fonte: Autores, 2026

As vazões de projeto foram inseridas no módulo Steady Flow Data do HEC-RAS, adotando-se a hipótese de escoamento permanente. As vazões associadas aos diferentes tempos de retorno foram definidas nos campos Profile Names and Flow Rates, de modo que cada perfil hidráulico representasse um cenário específico de cheia.

Como condições de contorno, adotaram-se, a montante, os níveis d'água correspondentes a cada vazão, e, a jusante, uma curva-chave que relaciona vazão e nível d'água, garantindo coerência hidráulica na propagação do escoamento e na obtenção das superfícies livres d'água utilizadas para a delimitação das áreas inundáveis.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ressalta-se que, do ponto de vista hidrológico, a estação Formoso (41130000) seria a mais indicada por estar a montante, porém a presença de longos períodos com falhas na série histórica inviabilizou sua utilização. Assim, optou-se pela estação Pirapora Barreiro (41135000), que apresentou dados mais completos e contínuos, conferindo maior confiabilidade às simulações hidráulicas. Os coeficientes de Manning foram estabelecidos com base no mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo, seguindo metodologia consolidada na literatura técnica e compatível com o nível de detalhamento adotado. Considera-se que, devido à variabilidade espacial das superfícies e às simplificações associadas à escala dos dados disponíveis, podem ocorrer pequenas variações locais nesses valores.

A delimitação espacial das áreas suscetíveis, associada à estimativa das profundidades da lâmina d'água, permite identificar zonas de maior vulnerabilidade e subsidiar ações de ordenamento urbano, definição de áreas prioritárias para mitigação de impactos e elaboração de planos de contingência para eventos de cheia. A Figura 3 apresenta o mapa da mancha de inundação gerado a partir da modelagem hidráulica, para um tempo de retorno de 120 anos, evidenciando a extensão espacial das áreas alagadas e a variação das profundidades associadas aos diferentes cenários de vazão analisados.

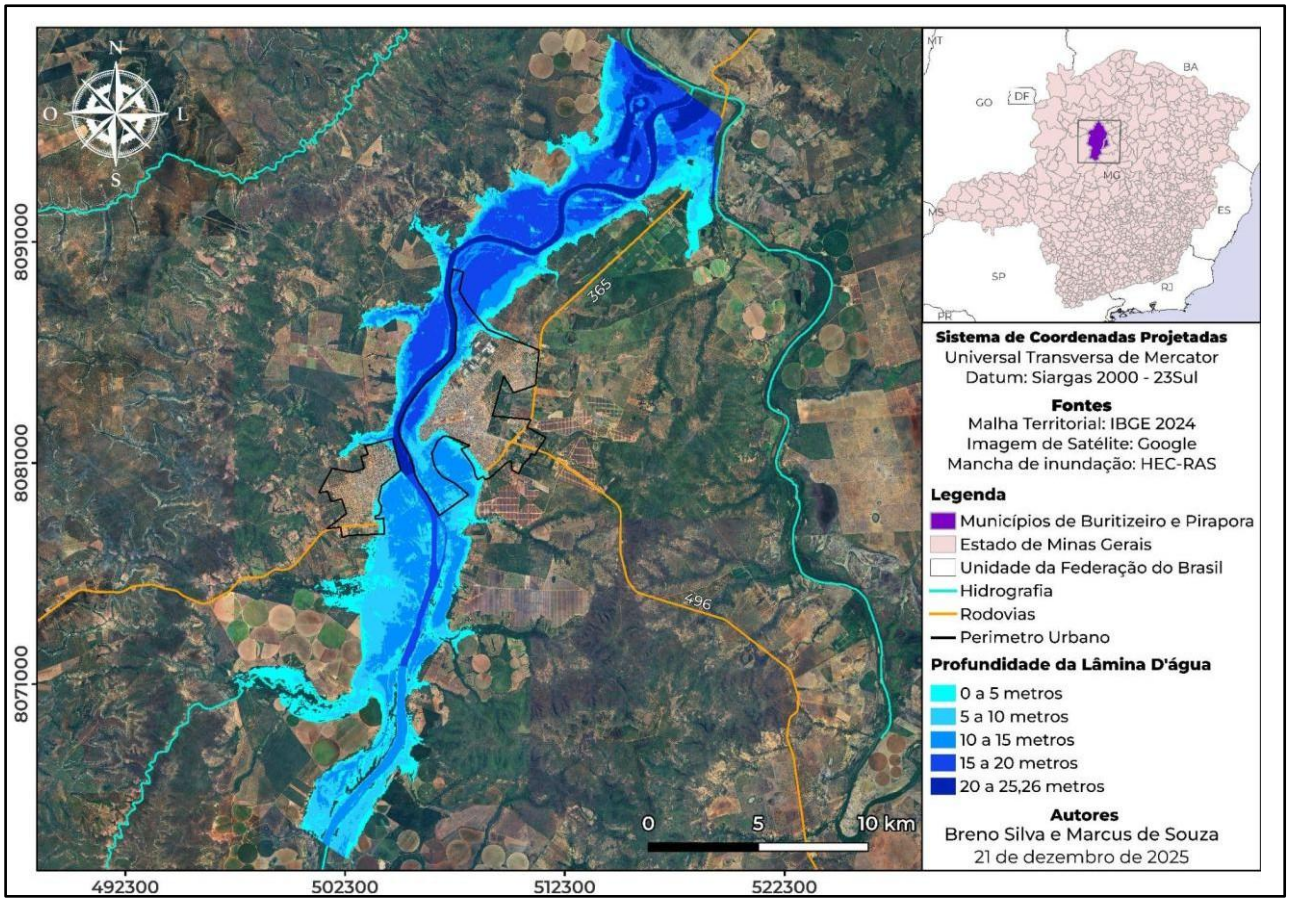


Figura 3. Simulação de Mancha de Inundação: Evento de 120 anos
Fonte: Autores, 2026

Os resultados indicam a formação de manchas de inundação com extensão superior a 3 km ao longo do trecho analisado, realçando a ampla propagação dos eventos de cheia e o potencial impacto sobre moradores urbanos e populações ribeirinhas de Pirapora e Buritizeiro. No município de Pirapora, as áreas potencialmente afetadas concentram-se nos bairros Distrito Industrial, São Francisco, Industrial, Pernambuco, Cinquentenário, Bom Jesus, Centro, Sagrada Família, Cidade Jardim, Nossa Senhora de Fátima e Santo Antônio, abrangendo tanto zonas residenciais quanto áreas com atividades produtivas. Em Buritizeiro, os bairros identificados como suscetíveis à inundação foram Vila Maria, Jardim dos Buritis, Vale do Sol e o Centro do município.

O planejamento urbano no município de Pirapora deve ser orientado por critérios técnicos rigorosos, sobretudo nas áreas localizadas ao norte do território municipal, que apresentam maior propensão à expansão urbana. A análise das manchas de inundação destaca que essa porção do município é majoritariamente composta por áreas com elevada suscetibilidade a eventos de cheia, o que impõe limitações significativas à ocupação antrópica. Nesse contexto, o crescimento urbano deve ser conduzido de forma planejada e cautelosa, priorizando o ordenamento do uso e ocupação do solo e a restrição de atividades incompatíveis com a dinâmica fluvial e hidráulica do sistema analisado. A Figura 4 apresenta os limites da urbanização e as manchas de inundação.

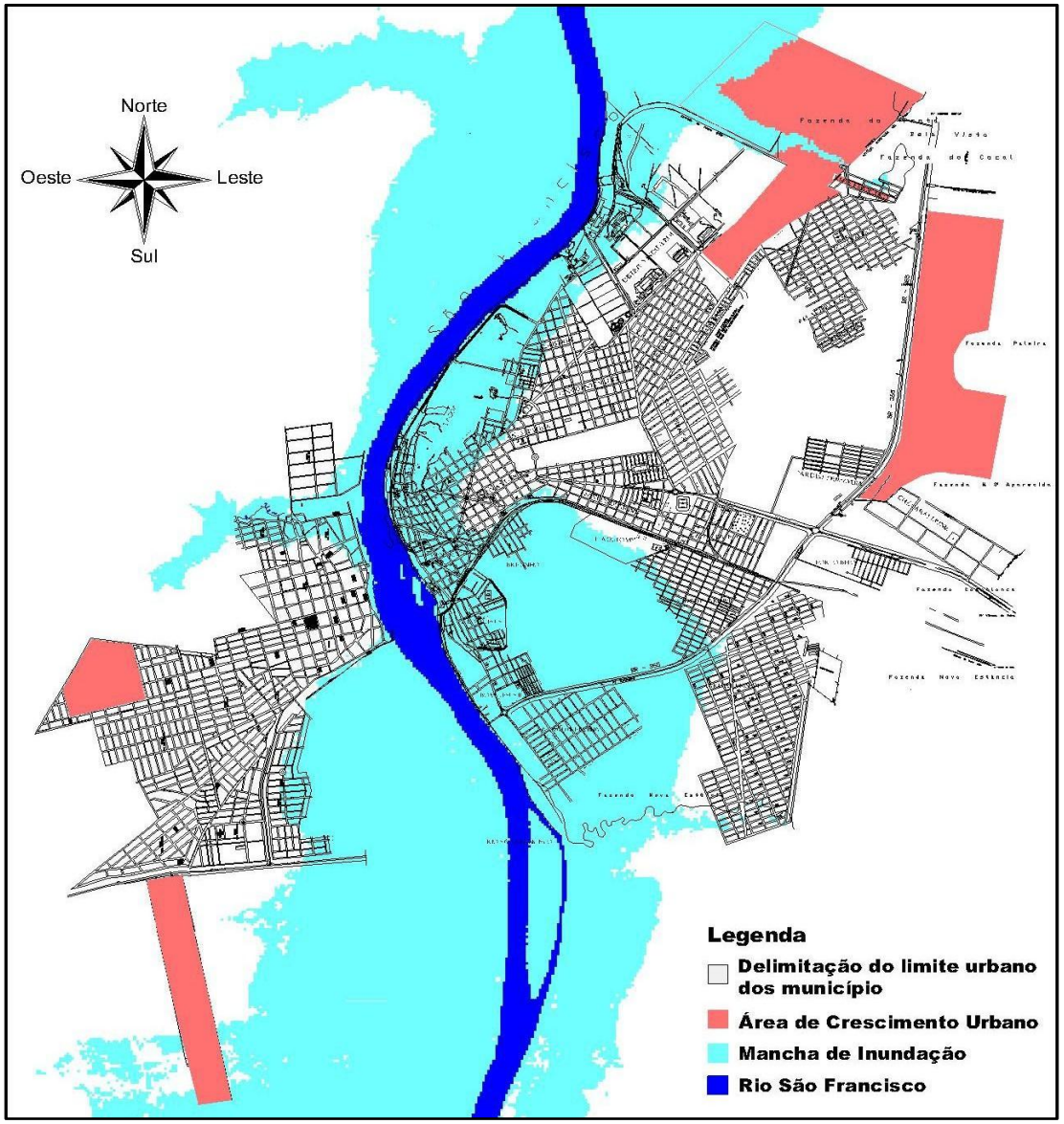


Figura 4. Relação entre a expansão da cidade e as áreas de risco
Fonte: Adaptado de Cardoso (2019); Prefeitura Municipal de Pirapora; Prefeitura Municipal de Buritizeiro.

4 CONCLUSÃO

Em consonância com o objetivo proposto, os mapas de manchas de inundação elaborados para os municípios de Pirapora e Buritizeiro, a partir da integração de geotecnologias e da modelagem hidrológica e hidráulica no HEC-RAS em ambiente SIG, permitiram identificar, de forma técnica e espacialmente detalhada, as áreas mais suscetíveis à ocorrência de inundações, fornecendo subsídios ao planejamento urbano e à tomada de decisão pelo Poder Público.

A análise comparativa indicou maior suscetibilidade à inundação em Pirapora, onde se concentram áreas urbanas inseridas na planície fluvial, abrangendo zonas residenciais, industriais e de uso misto. Em Buritizeiro, embora a extensão das áreas afetadas seja menor, foram identificados setores urbanos vulneráveis, especialmente nas proximidades do leito principal do rio, evidenciando a relação entre a ocupação histórica da planície aluvial, a baixa cota altimétrica e a exposição ao risco.

Do ponto de vista do ordenamento territorial, a sobreposição das manchas de inundação com os limites atuais e projetados da expansão urbana, sobretudo em Pirapora, indica a necessidade de revisão das diretrizes de uso e ocupação do solo, uma vez que a manutenção da ocupação em áreas de elevada suscetibilidade tende a intensificar os danos associados a eventos de cheia.

Em síntese, os resultados demonstram que a integração entre geotecnologias e modelagem hidráulica constitui um instrumento eficaz para a identificação de áreas suscetíveis à inundação e para a avaliação da magnitude espacial dos impactos associados a eventos extremos, contribuindo para o planejamento urbano e ambiental e para o fortalecimento da gestão do risco hidrológico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio e Desenvolvimento do Ensino Tecnológico (FADETEC) pelo financiamento da pesquisa e ao Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG), campus Pirapora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afzal, M. A. et al. Flood inundation modeling by integrating HEC–RAS and satellite imagery: a case study of the Indus River Basin. *Water*, v. 14, n. 19, p. 2984, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/w14192984.

ANA – Agência Nacional de Águas. *A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília: ANA, 2002. 64p. Edição comemorativa do dia mundial da água.

Cabral, S. L. et al. Integração do SIG, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana: aplicação à bacia do rio Granjeiro-CE. *Geociências*, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 90-101, 2016. Disponível em: https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/10994. Acesso em: 16 nov. 2025.

Cardoso, J. Layout De Limite Urbano - Pirapora Mg. Arquivo digital (DWG). Pirapora: Prefeitura Municipal de Pirapora, 2019.

Engelhardt, R. C. B.; Silva, A. F. da; Nobrega, S. L. da. Simulação de inundação utilizando software HEC-RAS e modelo de elevação MERIT, análise de situação em Boa Vista, Roraima, Brasil. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, *[S. l.]*, v. 17, n. 4, p. e6101, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.4-105. Disponível em: https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/6101. Acesso em: 22 dez. 2025.

Fadel, A. W.; Marques, G. F.; Goldenfum, J. A. Mapeamento do risco de prejuízo como medida de gestão e adaptação às inundações. *Geociências*, v. 37, n. 1, 2018. DOI: 10.5016/geociencias.v37i1.11822.

Giglio, J. N.; Kobiyama, M. Uso de registros históricos para análise de inundações: estudo de caso do município de Rio Negrinho. *In XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos,* 2011: Maceió Maceió: ABRH, Anais, 17p., 2011.

Gumbel, E. J. *Statistics of extremes*. New York: Columbia University Press, 1958.

Huţanu, E et al. Using 1D HEC-RAS Modeling and LiDAR Data to Improve Flood Hazard Maps Accuracy: A Case Study from Jijia Floodplain (NE Romania). *Water*, v. 12, n. 6, p. 1624, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/w12061624.

Monteiro, L.R.; Kobiyama, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação, Rega 10 (2013) 13–35. Disponível em: https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/wp-content/uploads/2015/04/Monteiro-e-Kobiyama-2013-REGA.pdf

Peker, et al. Integração de HEC-RAS e HEC-HMS com GIS em modelagem de inundações e mapeamento de perigos de inundação. *Sustainability*, v. 16, n. 3, p. 1226, 2024. DOI: 10.3390/su16031226.

Pereira, S. B.; Pruski, F. F.; Silva, D. D. da; Ramos, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 6, p. 615–622, 2007. DOI: 10.1590/S1415-43662007000600010.

Silva, C.. *Vulnerabilidades e desastres: reconstrução e resiliência*. 2018. Tese (Doutorado em Sociologia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018. Disponível em: https://dot.uff.br/wp-content/uploads/sites/476/2023/06/51-TESE-Claudia-THAUMATURGO-2018.pdf. Acesso em: 6 abr. 2025.

Subramanya, K. Engineering hydrology. 3. ed. New Delhi: McGraw-Hil, 2008.

Van Dijk, A., et al. *Global Water Monitor 2024*: Summary Report. Global Water Monitor Consortium, 2 jan. 2025. Disponível em: https://globalwater.online/globalwater/report/index.html. Acesso em: 19 out. 2025.