

MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Clívia Dias Coelho¹; Rafael Petruceli Coelho Lima²; Leandro Antônio Roque³; Eduardo Antônio Gomes Marques⁴; Leonardo Andrade de Souza⁵ & Demetrius David da Silva⁶

RESUMO – O crescimento desordenado das cidades e o excesso de impermeabilização são problemáticas dos centros urbanos, tendo como consequência principal a ocorrência de inundações. Nesse contexto, a modelagem hidrodinâmica pode ser uma importante ferramenta para a determinação de áreas inundáveis, permitindo estimar as cotas de inundação para diferentes cenários de tempos de retorno. O presente trabalho buscou avaliar áreas suscetíveis a inundação pelos eventos de vazão máxima associados aos tempos de retorno de 2, 10, 50, 100 e 500 anos, com a utilização do modelo hidrodinâmico HEC-RAS, para a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, entre os municípios de Além Paraíba (MG) e Sapucaia (RJ). Foram obtidos valores de vazão máxima entre 1663,54 m³/s e 3156,57 m³/s para os tempos de retorno de 2 a 500 anos. Foi observado que parte da área urbana dos municípios em estudo sofre recorrentemente com os eventos de inundação do rio Paraíba do Sul. A extensão da inundação para os tempos de retorno entre 2 e 500 anos foi muito similar, devido ao fato de que a vazão correspondente ao período de retorno de 10 anos já é capaz de atingir toda a planície de inundação.

ABSTRACT– The disorderly growth of cities and excessive waterproofing are problems in urban centers, with the main consequence of flooding. In this context, hydrodynamic modeling can be an important tool for the determination of floodable areas, allowing the estimation of flood levels for different scenarios of recurrence times. The present work sought to evaluate areas susceptible to flooding by the maximum flow events associated with the recurrence times of 2, 10, 50, 100 and 500 years, using the hydrodynamic model HEC-RAS, for the Paraíba do Sul River basin, between the municipalities of Além Paraíba (MG) and Sapucaia (RJ). Maximum flow values between 1663.54 m³/s and 3156.57 m³/s were obtained for return times from 2 to 500 years. It was observed that part of the urban area of the municipalities under study suffers recurrently from the flooding events of the Paraíba do Sul River. The extent of the flood for the recurrence times between 2 and 500 years was very similar, due to the fact that the flow corresponding to the 10-year recurrence is already capable of reaching the entire floodplain.

Palavras-Chave – Vazões máximas; Risco de inundação; HEC-RAS.

1) Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900, clivia.coelho@ufv.br

2) Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900, rafael.petruceli@ufv.br

3) Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900, leandroroque1@hotmail.com

4) Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900, emarques@ufv.br

5) Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900, leonardo@zemlya.com.br

6) Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900, demetrius@ufv.br

1. INTRODUÇÃO

As ocupações e o desenvolvimento da maioria das cidades brasileiras ao longo dos corpos hídricos ocasionam diversos problemas que atingem diretamente a sociedade, dentre eles as enchentes e inundações urbanas. Uma das razões para a ocorrência de inundações é o crescimento desordenado das cidades, que nem sempre é acompanhado do desenvolvimento de infraestrutura adequada e que pode prejudicar os sistemas de drenagem locais (Mendes, 2022).

As bases para um trabalho de gestão de inundação devem ter como princípio a geração de mapas de risco, feitos para diversos tempos de retorno, abordando a extensão e profundidade da lâmina d'água (EXCIMAP, 2007). Estas informações são de extrema importância, pois além de permitir a construção de um plano de emergência no caso de uma situação extrema, permitem guiar as futuras expansões urbanas da cidade e o direcionamento de intervenções visando o controle de enchentes (De Moel *et. al*, 2015).

Previsões de inundação de corpos d'água são tipicamente baseadas em um processo de duas etapas: (1) um modelo hidrológico é utilizado para determinar as vazões máximas esperadas no local de interesse; e (2) os picos de vazão dessa análise são, então, tipicamente inseridos em um modelo hidrodinâmico de fluxo permanente para determinar os níveis máximos de inundação correspondentes que seriam esperados ao longo do curso do rio, estendendo-se por áreas urbanizadas (Hicks e Peacock, 2005).

A modelagem hidrodinâmica pode ser realizada em diversos programas computacionais, sendo o mais difundido o HEC-RAS, que é um software livre, desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (Hydrologic Engineer Center) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers). Esse software é, atualmente, capaz de realizar cálculos de perfis

unidimensionais e bidimensionais de superfície de água em situações de fluxo permanente ou transiente, em regimes de fluxo subcrítico, supercrítico e misto (USACE, 2021).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi a avaliação de áreas suscetíveis a inundação pelos eventos de vazão máxima associados à diferentes períodos de retorno, com a utilização do modelo hidrodinâmico HEC-RAS, para a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, entre os municípios de Além Paraíba (MG) e Sapucaia (RJ).

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

O estudo foi realizado em parte da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, situada entre os municípios de Além Paraíba (MG) e Sapucaia (RJ), em uma faixa de aproximadamente 45 km de extensão, em que na margem esquerda do rio Paraíba do Sul está o município mineiro e na margem direita o município fluminense. (Figura 1).

Além Paraíba está localizada na região sudeste de Minas Gerais, mesorregião da Zona da Mata, entre os meridianos 21° 51' 49'' e 42° 40' 8''. A sede administrativa dista, por rodovia, 380 Km da capital Belo Horizonte. Possui altitude média de 140 m e área total de 511 Km², divididos em dois distritos, Além Paraíba (sede) e Angustura.

Sapucaia está localizada na mesorregião sul do Estado do Rio de Janeiro, entre os meridianos 21° 59' 42'' e 42° 54' 50'', distante 145 Km da capital fluminense, via BR116. Situa-se a 221 m de altitude e possui área territorial de aproximadamente 540 Km², dividida em 5 distritos, sendo eles: Sapucaia (sede), Jamapar, Anta, Aparecida e Volta do Pião.

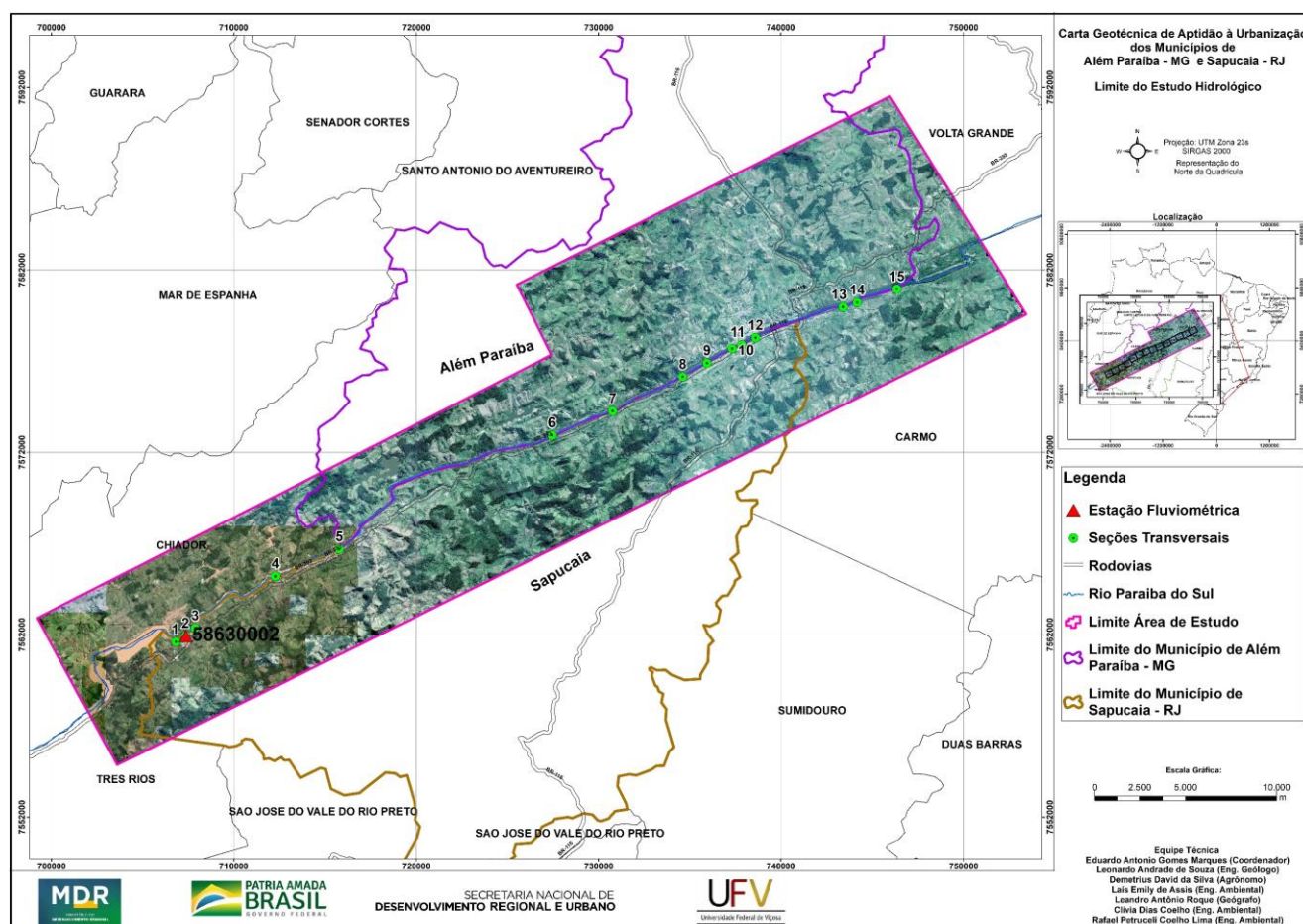


Figura 1 - Limite do estudo hidrológico para fins de mapeamento da suscetibilidade à inundação.

2.2. Seções Batimétricas

Os dados de geometria das seções transversais ao longo do canal são de extrema importância para a modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS. Esses dados foram obtidos através de análise batimétrica utilizando um ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) modelo Sontek RiverSurveyor® M9 em seções específicas do rio Paraíba do Sul. As seções foram previamente escolhidas em escritório e posteriormente avaliadas em campo, em uma visita preliminar. Foram selecionadas 15 seções transversais ao longo do trecho do rio Paraíba do Sul (Figura 1), cujas informações gerais podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações gerais das seções transversais ao longo do canal

Seção	Margem	Latitude (°)	Longitude (°)	Largura da seção (m)	Profundidade máxima (m)
1	Direita	-22,03797	-42,99612	194,11	11,90
2	Direita	-22,03490	-42,99087	118,85	9,85
3	Direita	-22,03110	-42,98577	119,89	7,56
4	Direita	-22,00496	-42,94379	71,50	8,50
5	Direita	-21,99094	-42,90975	21,98	6,94
6	Direita	-21,93311	-42,79766	18,96	6,41
7	Direita	-21,92078	-42,76603	115,81	10,43
8	Direita	-21,90354	-42,72966	239,03	6,15
9	Direita	-21,89646	-42,71648	229,36	5,56
10	Direita	-21,88913	-42,70315	142,29	8,07
11	Direita	-21,88701	-42,69812	162,91	11,10
12	Direita	-21,88341	-42,69091	178,33	6,24
13	Direita	-21,86761	-42,64469	249,00	7,95
14	Direita	-21,86549	-42,63761	223,36	8,31
15	Direita	-21,85823	-42,61626	389,91	8,72

2.3. Modelo Digital de Elevação

O mapeamento das áreas de inundação no HEC-RAS é baseado no Modelo Digital de Elevação (MDE) das áreas subjacentes ao curso d'água em análise. No presente estudo foi utilizado o MDE obtido da plataforma ALOS PALSAR (JAXA, 2011), com resolução de 12,5 m (Figura 2). Como o MDE não fornece informações abaixo da superfície da água, foi feita a sua adequação por meio da inserção das seções batimétricas da calha do rio Paraíba do Sul, apresentadas no item 2.2. As seções batimétricas medidas em campo foram interpoladas no HEC-RAS, gerando um “rebaixamento” da calha do rio no MDE original.

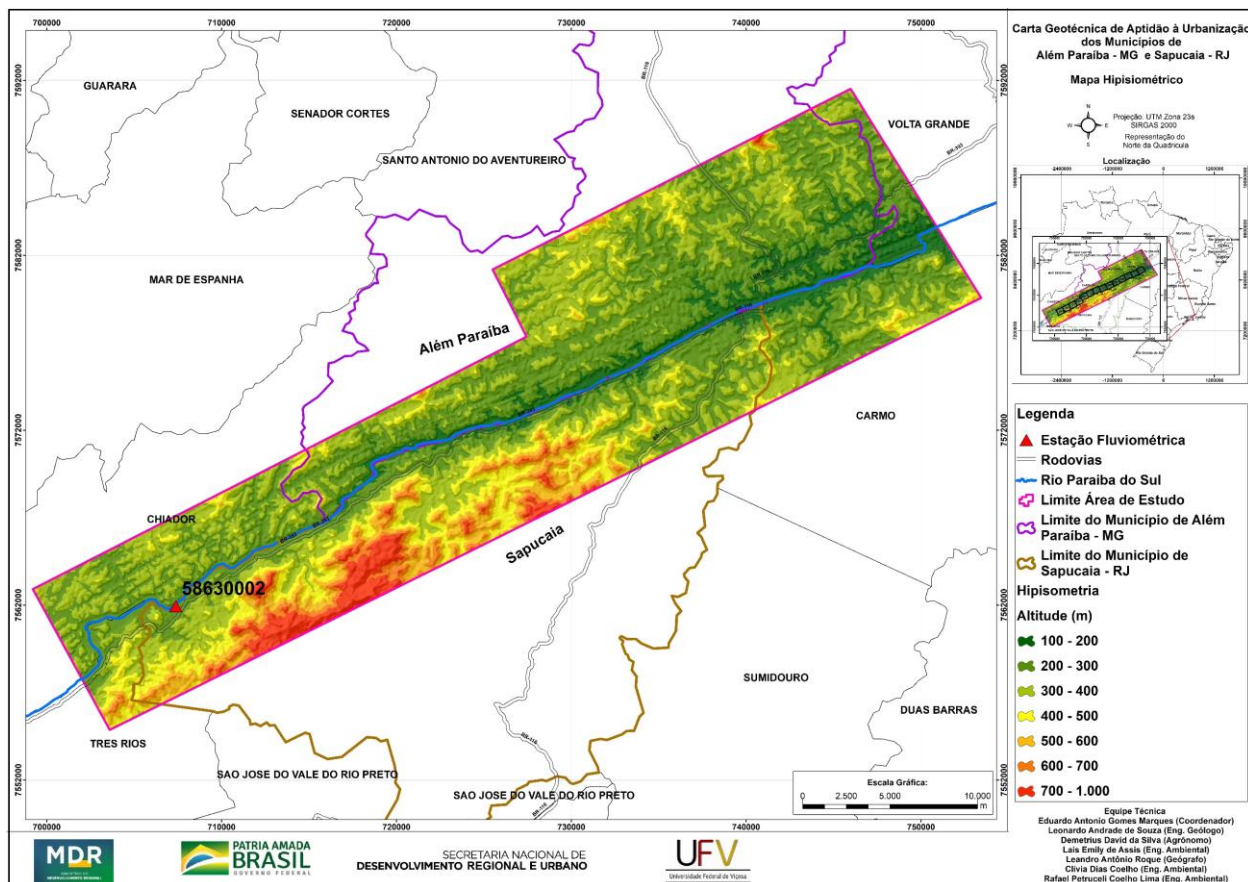


Figura 2 - Modelo digital de elevação e mapa hipsométrico da área de estudo.

2.4. Vazões de Projeto

Os dados de entrada de vazão para as simulações hidrodinâmicas no HEC-RAS foram baseados nos dados históricos da estação fluviométrica de Anta (código: 58630002), localizada no município de Sapucaia - RJ (Figura 1). Os dados diários de vazão foram obtidos no site da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio da plataforma HidroWeb, e a base de dados utilizada contemplou 91 (noventa e um) anos de dados, de 1922 a 2012.

A partir dos dados diários de vazão, foi obtida a série histórica de vazões máximas anuais, a qual foram ajustadas as distribuições probabilísticas de Gumbel, Log-Normal tipo II, Log-Normal tipo III, Pearson tipo III e Log-Pearson III, para a obtenção das vazões máximas com tempos de retorno (TR) de 2, 10, 50, 100 e 500 anos. A distribuição probabilística escolhida para cada tempo de retorno foi aquela que apresentou melhor aderência aos dados, conforme recomendado por Sousa et al. (2009)

2.5. Coeficiente de Manning (n)

A seleção de valores apropriados para o Coeficiente de Manning é essencial para a precisão dos valores calculados de nível d'água no HEC-RAS. O valor do Coeficiente “n” de Manning é altamente variável e depende de uma série de fatores, incluindo: rugosidade da superfície vegetação, irregularidades do canal, alinhamento de canal, limpeza e deposição, obstruções, tamanho e formato do canal, nível d'água e vazão, mudanças sazonais, temperatura e material suspenso e carga básica (Brunner, 2020).

Neste trabalho foi utilizada como referência a extensa compilação de valores de n para cursos d'água e planícies de inundação fornecidas por Chow (1959). De acordo com o mapa de Uso e Ocupação do Solo da área de estudo, desenvolvido pelo MAPBIOMAS (2020), foi atribuído um valor de Coeficiente de Manning para cada uma das classes de uso observadas na área de estudo, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de Manning adotados de acordo com o uso do solo

Uso do solo	Coeficiente de Manning (n)
Vegetação densa	0,070
Vegetação rasteira	0,045
Solo exposto	0,035
Pastagem degradada	0,035
Afloramento rochoso	0,035
Área urbana	0,035
Cursos d'água	0,025

2.6. Modelagem Hidrodinâmica

Para a simulação da propagação de vazões no trecho analisado do rio Paraíba do Sul, adotou-se o modelo hidrodinâmico distribuído representado pelas equações de Saint-Venant incorporadas ao modelo computacional HEC-RAS versão 6.0, considerando as direções potenciais de fluxo correspondentes ao plano bidimensional (USACE, 2020).

Na modelagem 2D no HEC-RAS a superfície da área de estudo é representada por células interconectadas formando uma malha bidimensional no plano horizontal, sobre a qual são efetuados os cálculos. Para propagar os hidrogramas de vazão no HEC-RAS utilizou-se uma malha computacional com resolução espacial de 20 m x 20 m na planície de inundação e 2 m x 2 m na calha do rio Paraíba do Sul.

A condição de contorno de entrada para a simulação hidrodinâmica do trecho analisado consistiu nos hidrogramas de vazão máxima, obtidos através da análise de distribuições probabilísticas. Como condição de contorno de saída para a simulação foi utilizada a profundidade normal, referente a uma declividade média do talvegue natural para o trecho de jusante, correspondente a aproximadamente a 0,002 m/m.

Foram feitas simulações considerando as vazões com tempos de retorno de 2, 10, 50, 100 e 500 anos, apresentadas na Tabela 3. Utilizou-se o módulo de regime de escoamento não permanente do HEC-RAS, porém considerando-se a vazão constante ao longo do tempo. O intervalo computacional utilizado para as simulações variou de 4,0 a 16,0 segundos de forma a atender à condição de Courant (USACE, 2016), enquanto os resultados foram fornecidos em intervalos de 30 minutos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são apresentados os valores das vazões máxima obtidas para os tempos de retorno (TR) de 2, 10, 50, 100 e 500 anos, bem como a distribuição probabilística adotada e o grau de suscetibilidade de inundação atribuído. Observa-se que as vazões variaram entre 1663,54 m³/s para o TR de 2 anos, à qual é atribuída alta suscetibilidade à inundação, e 3667,02 m³/s para o TR de 500 anos, à qual é atribuída baixa suscetibilidade à inundação.

Tabela 3 - Vazões máximas e a classificação da suscetibilidade de inundação atribuída para a estação fluviométrica de Anta (código: 58630002).

TR (anos)	Distribuição Probabilística	Vazão (m ³ /s)	Suscetibilidade de Inundação
2	Gumbel	1663,54	Muito Alta
10	Lognormal 3	2371,19	Alta
50	Lognormal 3	2812,55	Média
100	Lognormal 2	3156,57	Baixa
500	Lognormal 2	3667,02	Muito Baixa

O tratamento dos resultados das simulações hidrodinâmicas no HEC-RAS permitiu a delimitação das manchas de inundação na região de interesse, associadas aos tempos de retorno (TR) de 2, 10, 50, 100 e 500 anos. Na Figura 3 e na Figura 4 são apresentadas as envoltórias de inundação para as cheias naturais com TR de 2 anos a 500 anos para as áreas urbanas de Além Paraíba (MG) e Sapucaia (RJ), respectivamente.

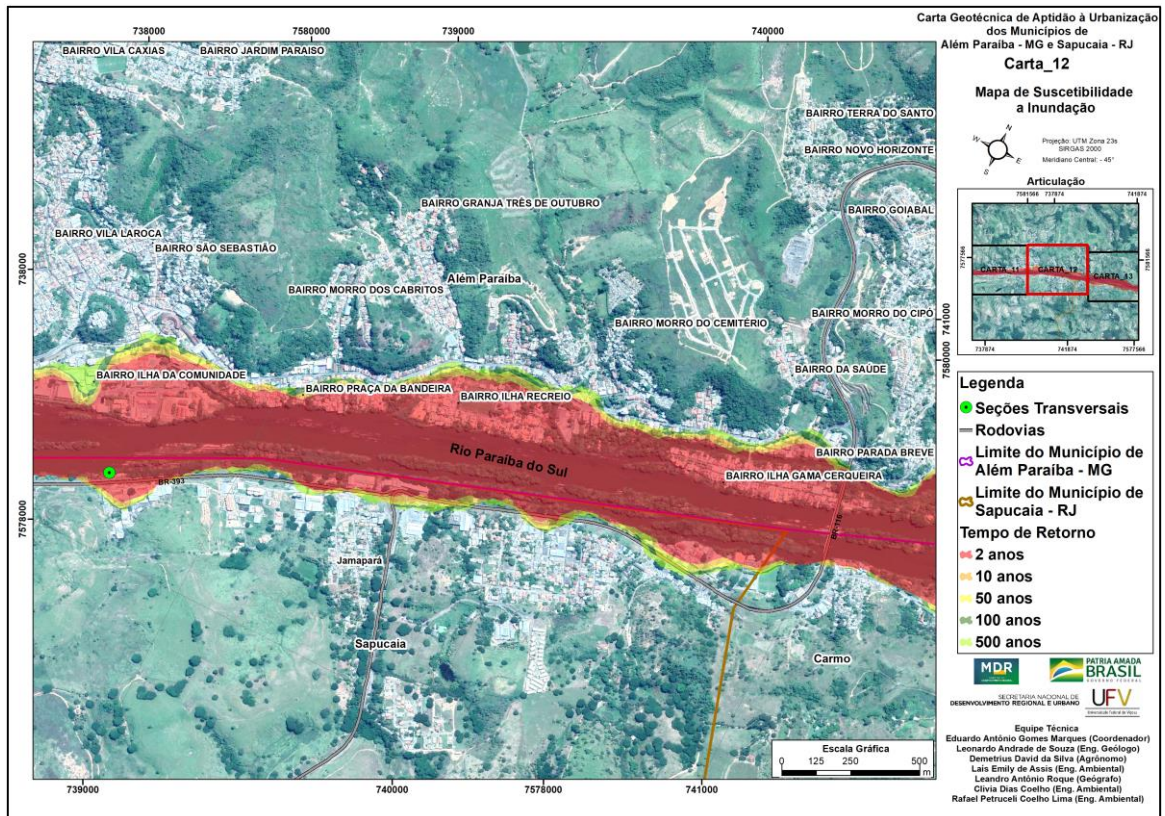


Figura 3 - Mapeamento da inundação no rio Paraíba do Sul na área urbana de Além Paraíba (MG).

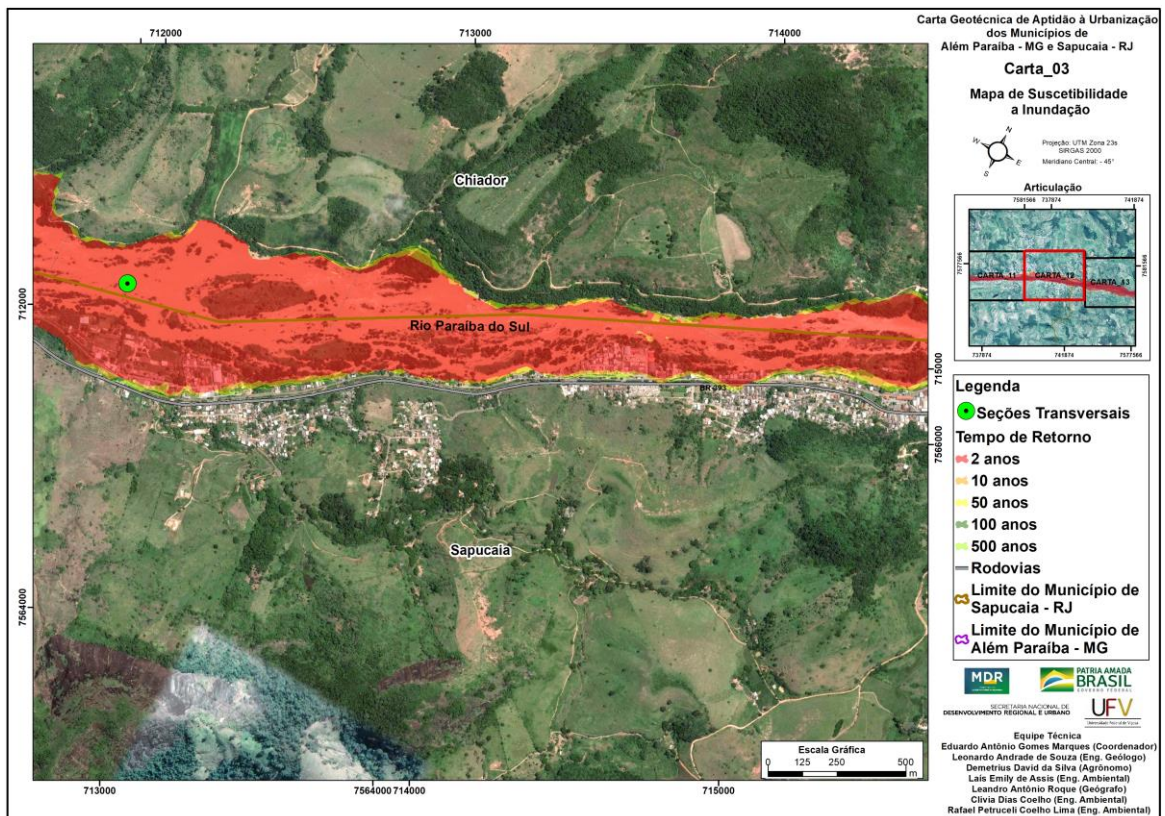


Figura 4 - Mapeamento da inundação no rio Paraíba do Sul na área urbana de Sapucaia (RJ).

Observa-se que boa parte da área urbana dos municípios em estudo sofre recorrentemente com os eventos de inundação do rio Paraíba do Sul, tanto na margem esquerda como na margem direita. Essa constatação fica evidente quando se observa a mancha de cor vermelha, associada ao TR de 2 anos, alcançando vias e edificações em ambos os lados do rio.

Nota-se, também, que a extensão da inundação no rio Paraíba do Sul, entre os municípios de Além Paraíba e Sapucaia, para os tempos de retorno (TR) entre 10 e 500 anos foi muito similar. Isso ocorre devido ao fato de que a vazão correspondente ao TR de 10 anos é capaz de atingir toda a planície de inundação, sendo as vazões maiores barradas pelo limite de altitude, em função das características de incisão da calha, fazendo com que a profundidade da inundação aumente, porém o seu alcance não se modifique muito.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo foi avaliada a aplicabilidade do modelo hidrodinâmico HEC-RAS para o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação por eventos de vazões máximas associadas a diferentes períodos de retorno, na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, entre os municípios de Além Paraíba (MG) e Sapucaia (RJ).

Foi verificado que a área urbana dos dois municípios sofre recorrentemente com os eventos de inundação do rio Paraíba do Sul, sendo observado que a vazão referente ao TR de 2 anos, já é suficiente para atingir parte da área urbanizada. Foi constatado, também, que a extensão da inundação para os TRs entre 10 e 500 anos foi muito similar, devido ao fato de que a vazão correspondente ao TR de 10 anos é capaz de atingir toda a planície de inundação, sendo que para as vazões maiores, ocorre principalmente o aumento da profundidade da inundação.

REFERÊNCIAS

- BRUNNER, G. W. (2020). *HEC-RAS river analysis system. Hydraulic reference manual. Version 6.0*. Hydrologic Engineering Center, Davis (CA).
- CHOW, V.T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York, 680 p.
- DE MOEL, H.; JONGMAN, B.; KREIBICH, H.; MERZ, B.; PENNING-ROUSELL, E.; WARD, P. J. (2015). “*Flood risk assessments at different spatial scales*”. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(6), 865-890.
- EXCIMAP. *Handbook on Good Practices for Flood Mapping in Europe*. Bruxelas (Bélgica): European Exchange Circle on Flood Mapping, 2007.

- HICKS, F. E.; PEACOCK, T. (2005). “*Suitability of HEC-RAS for flood forecasting*”. Canadian water resources journal, 30(2), 159-174.
- JAXA. (2011). ALOS PALSAR. Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency. Japan. Disponível em: < <https://search.asf.alaska.edu/#/>>. Acesso em: 23 jun. 2019.
- LEBEL, T.; TAUPIN, J.D.; D’AMATO, N. (1997). “*Rainfall monitoring during HAPEZ-Sahel. 1. General rainfall conditions and climatology*”. Journal of Hydrology 188-189(1-4), pp. 74 – 95.
- MAPBIOMAS (2020). Projeto MapBiomass – Coleção da Série Anual de Mapas da Cobertura e Uso do Solo do Brasil. Disponível em: < <https://mapbiomas.org/download>>. Acesso em: 5 jan. 2020.
- MENDES, T. A.; SOUSA, M. B. D.; PEREIRA, S. A. D. S.; SANTOS, K. A. D.; FORMIGA, K. T. M. (2022). “*Uso do modelo HEC-RAS com base em informações de LiDAR para avaliação de inundações urbanas*”. Engenharia Sanitária e Ambiental, 27, 141-157.
- SOUSA, H. T.; PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; CECON, P. R.; SOUZA, J. R. C. (2009). *SISCAH 1.0: Sistema computacional para análises hidrológicas*. Brasília, DF: ANA; Viçosa, MG: UFV.
- USACE – US Army Corps of Engineers. (2021) HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User’s Manual, Version 6.0.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao projeto sob o qual esta pesquisa foi realizada.