ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage:https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe

Simulação da Área de Inundação por meio da Modelagem Hidráulica em Canal Urbano: Estudo de Caso Córrego Jatobá, em Belo Horizonte, Minas Gerais

Thomaz Felipe de Freitas Anchieta[1], Fernando Neves Lima[2], Roberto Cézar de Almeida Monte-Mor[3], Eliane Maria Vieira[4]

[1]Graduado em Engenharia Ambiental pelo Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, da Universidade Federal de Itajubá, Itabira, CEP: 35903-087, Minas Gerais, Brasil, e-mail: thomaz.felipe94@gmail.com. [2]Professor Adjunto do Instituto de Engenharias Integradas, da Universidade Federal de Itajubá, Itabira, Minas Gerais, Brasil, e-mail: lima.fernando@unifei.edu.br. [3]Professor Adjunto do Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, da Universidade Federal de Itajubá, Itabira, Minas Gerais, Brasil, e-mail: rmontemor@unifei.edu.br. [4]Professora Adjunta do Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, da Universidade Federal de Itajubá, Itabira, Minas Gerais, Brasil, e-mail: elianevieira@unifei.edu.br.

Artigo recebido em 12/12/2019 e aceito em 07/06/2020

R E S U M O

Devido à ausência de sistemas de drenagem eficientes e aos altos índices pluviométricos em determinados períodos do ano, eventos de inundação no mundo e no Brasil, e, principalmente, em Belo Horizonte, Minas Gerais, tem sido observados com muita frequência. À vista disso, este trabalho teve como objetivo desenvolver a modelagem hidráulica de um canal em meio urbano visando a discussão sobre a sua capacidade de drenagem e a minimização de incertezas, relacionadas ao escoamento de água no canal em eventos extremos. Para a elaboração dos mapas e delineamento do canal foi utilizado o software *Arc*GIS, com suas extensões *ArcHydro Tools* e HEC-*Geo*RAS. Além disso, para aplicação dos dados geométricos e hidráulicos das seções, e simulações hidráulicas, foi empregado o software HEC-RAS. Como resultado do estudo, teve-se a comprovação, quantitativa, da influência do coeficiente de *Manning* no escoamento do canal e pôde-se também, determinar, por meio de um conjunto de vazões críticas, trechos do curso de água mais susceptíveis à inundação. Observou-se que, quanto menores os valores dos coeficientes de *Manning* das seções, maiores são suas vazões críticas, ou seja, para corpos hídricos canalizados por obras com revestimento e com acabamento, as vazões necessárias para as seções inundar possuem valores mais altos, justamente, pelo menor atrito do material de revestimento com o fluxo de água; enquanto para canais naturais, as vazões determinantes para a ocorrência de inundação das seções, são menores, pela maior potencialidade da vegetação e do solo em resistir ao escoamento.

Palavras-chave: modelagem hidráulica, HEC-RAS, inundações urbanas.

Flooding Area Simulation through Hydraulic Modeling in the Urban Channel: Case Study Jatobá Stream, in Belo Horizonte, Minas Gerais

A B S T R A C T

Due to the absence of efficient drainage systems and high rainfall rates at certain times of the year, flood events in the world and in Brazil, and especially in Belo Horizonte, Minas Gerais, have been observed very frequently. In view of this, this work aimed to develop the hydraulic modeling of an urban canal in order to discuss its drainage capacity and minimize uncertainties related to water runoff in extreme events.For the maps elaboration and the channel drawing was used the ArcGIS software with its extensions ArcHydro Tools and HEC-GeoRAS. The HEC-RAS software was used to apply the geometric and hydraulic sections data and for hydraulic simulations. As a result of the study, the influence of the Manning coefficient on the flow of a channel was quantitatively verified. Through a set of critical flows, it was also possible to determine the most susceptible to flooding watercourse stretches. In this case, it was observed that the smaller the values of the Manning coefficients of the sections, the higher their critical flow rates, that is, for water bodies piped by coated and finished works, the flow rates needed to flood the sections have higher values high due to the lower friction of the coating material with water flow; whereas, for natural channels, the water volumes per unit of time, which are determinant for the sections flooding, were smallers, precisely because of the greater capacity of the vegetation and soil to resist runoff.

Keywords: hidraulic modelling, HEC-RAS, urban floods.

Introdução

A crescente urbanização e o aumento da população mundial têm gerado vários desafios sociais, ambientais e econômicos para os governos no mundo todo, porém, dentre todas as dificuldades encontradas pelos países, atualmente, umas das mais preocupantes estão relacionadas aos temas de meio ambiente e sociedade.

Silva et al. (2016) constatam que o aumento da demanda por espaço físico e recursos naturais, devido à urbanização, ao crescimento populacional e à ocupação de Áreas de Preservação Permanente (APP), geram inúmeros prejuízos ao meio urbano e como exemplos, têm-se: inundações, proliferação de doenças por veiculação hídrica, deslizamentos de terra, enchentes, entre outros.

A urbanização resulta em maior tensão pela ocupação e uso da terra, o que, muitas vezes, induz às pessoas à ocuparem regiões de planície de inundação e, portanto, a vulnerabilidade de centros urbanos está diretamente relacionada ao aumento não planejado da população (Hardy et al., 2016; Kashyap e Mahanta, 2018).

Nos dias atuais, o fenômeno de inundação pode ser considerado um dos maiores riscos naturais, pois pode ser letal às vidas da população e causar danos significativos tanto em âmbito econômico, como em termos ambientais e sociais (Serre, 2016). Entretanto, para trabalhar com esse tipo de evento, primeiramente, é fundamental conhecer, compreender e diferenciar o seu conceito tanto para interpretar condições técnicas específicas de ocorrência do fenômeno, como também para saber qual a melhor medida ou ferramenta a ser empregada para a prevenção desses eventos.

Rafiq et al.(2016) definem o processo de inundação, em termos de engenharia, como um nível muito elevado de água em corpos hídricos ou estruturas de drenagem, no qual, somente a partir deste, a água flui sobre as margens e atinge áreas adjacentes. Já Tanaka (2016) conceitua a inundação como um processo de transbordamento de água em um canal, no qual as áreas marginais do mesmo são atingidas e, consequentemente, essas águas geram problemas à saúde da população presente na área de influência do corpo hídrico.

Segundo Surwase e Manjusrre (2019) esses fenômenos podem ser causados por diversos fatores, como: períodos de alta intensidade de precipitação; aumento do volume de água em várzeas; capacidade reduzida ou deficiente de drenagem de águas pluviais em canais naturais ou sistemas de direcionamento de efluentes, e; bloqueio de drenos ou derivações, por despejo e, consequente, acumulação de resíduos indesejados, lançados pela população.

No entanto, essas ocorrências de eventos críticos de cheia podem estar ligadas a outros fatores também, como por exemplo, à retirada da cobertura vegetal e à intensificação da impermeabilização do solo, pois com a eliminação de áreas verdes por ocupação urbana e, implantação de estruturas de concreto e estradas pavimentadas, a velocidade do escoamento superficial aumenta e o risco de inundação em centros urbanos é ainda maior (Zhu et al., 2019).

Souza et al. (2019) também apontam que a inundação é um fenômeno diretamente associado à urbanização e de origem antrópica, pois, geralmente, ocorrem em pequenas bacias urbanas, onde, ao longo dos anos, o solo foi impermeabilizado por meio do calçamento de ruas e estradas, o que dificulta a drenagem da água da chuva e, consequentemente, a estabilidade do escoamento canalizado de rios.

Awakimjan (2015), afirma que, recentemente, as inundações em áreas urbanas se tornaram mais comuns, principalmente, devido à elevação da incidência de chuvas de alta intensidade ocorridas em menores períodos de tempo. Além disso, a tendência do aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos de chuva aumentaram a probabilidade do escoamento superficial exceder a capacidade de drenagem dos canais e das áreas projetadas (Wang et al., 2018).

Para Reis e Schmidt (2017), esta situação ainda se agrava pela ausência de estudos ambientais relacionados às características das bacias ocupadas, porque se esses ambientes fossem observados adequadamente, áreas próximas de rios e córregos efetivariam suas responsabilidades de zonas de amortecimento e absorção de inundações, e poderiam reduzir a ocorrência de desastres por estes eventos.

Sausen e Lacruz (2015), corroboram que a região onde há mais inundações no mundo é a Ásia, que detém aproximadamente 75% desses eventos críticos ocorridos no planeta. No Brasil, os eventos críticos de cheia, em geral, ocorrem de norte ao sul

do país e, desta forma, muitos municípios são, anualmente, atingidos negativamente por estes acontecimentos, principalmente, em períodos do ano com maiores índices pluviométricos. Estima-se que mais de 70% dos desastres naturais analisados no Brasil entre 2006 a 2016 são inundações (EM-DAT, 2017).

Sob essa perspectiva, Sousa e Gonçalves (2018) apontam que o município de Belo Horizonte, em Minas Gerais (MG), tem sofrido muito com a ocorrência de inundações nos últimos anos e como principais contribuintes desta situação pode-se citar a urbanização desordenada e a falta de políticas eficientes de planejamento urbano.

Por conseguinte, compreende-se que, globalmente, a questão de eventos críticos causados pelo aumento do volume de água em rios e canais, e a falta de sistemas de drenagem adequados nas cidades, está longe de ser resolvida. Contudo, Momo (2015) afirma que tanto medidas estruturais como não estruturais tenham sido tomadas para mitigação dos danos e malefícios ocasionados por inundações nos últimos anos.

As medidas estruturais são correspondentes às obras de engenharia e podem ser caracterizadas como medidas intensivas e extensivas. As medidas intensivas devem ser tomadas de acordo com o problema e podem ser: a aceleração do escoamento (canalização e obras correlatas); o retardamento do fluxo (reservatórios e bacias de detenção ou retenção) e a restauração das calhas naturais; o desvio do escoamento (canais de desvio e túneis de derivação); e ações individuais, visando implantar edificações que contenham ou reduzam as enchentes. Diferentemente das anteriores, as medidas extensivas correspondem: aos pequenos armazenamentos construídos na bacia, à recomposição da cobertura vegetal e ao controle da erosão do solo ao longo da bacia (Canholi, 2015).

As medidas não estruturais, por sua vez, podem ser caracterizadas como ações preventivas, pois são providências que abordam conceitos de preservação ambiental, manutenção de áreas permeáveis, tratamento adequado aos resíduos domésticos, elaboração de mapas de inundação para o zoneamento urbano e, entre outros (Miguez et al., 2015).

Todavia, ter êxito em problemas relacionados às inundações urbanas requer a solução de vários desafios direcionados às áreas de engenharia, ambientais e socio-políticas, o que, sem dúvidas, envolve o estudo de incertezas associadas aos eventos climáticos extremos e aos efeitos de uma urbanização cada vez mais acelerada (Fener et al., 2019). Tendo em vista este cenário atual, Batista e Boldrin (2018) determinam que os sistemas de drenagem necessitam de avaliações hidrológicas e hidráulicas e, que somente desse modo é possível adquirir informações a respeito da capacidade hidráulica dos condutos e canais, e dos locais onde ocorrem as sobrecargas e os transbordamentos.

Assim sendo, deduz-se que o dimensionamento e a modelagem hidráulica de canais de drenagem urbana são fundamentais para a redução de riscos e proteção da população aos eventos de inundação. Esses eventos podem se tornar ainda mais críticos nos países em desenvolvimento devido à escassez de estudos locais específicos e pouco entendimento do processo. (Nkwunonwo et al., 2020). Portanto, a modelagem hidráulica em uma gestão de risco integrada se torna uma ferramenta fundamental na criação e simulação de cenários futuros.

Cavalcante et al. (2018) ressaltam que a modelagem hidráulica em canais artificiais é essencial para um projeto adequado de drenagem urbana, pois, geralmente, os problemas dimensionais e de operação associados às más condições dos canais são inúmeros e apresentam potencial para causar tanto prejuízos socioeconômicos, como ambientais. Além disso, Paquier et al. (2015) afirmam que a modelagem hidráulica é uma ferramenta muito importante no estudo de cheias, pois a mesma pode fornecer dados importantes e mais precisos de parâmetros, como a profundidade e a velocidade dos fluxos de água em determinado local.

Neste arcabouço lógico, este estudo centra-se em um modelo computacional em face de diferentes condicionantes hidráulicas de um canal urbano. Apesar de uma vasta discussão na literatura sobre os desafios impostos de uma modelagem em meio urbano, há uma lacuna a ser preenchida pela simulação, devido à falta de dados observados em campo (velocidades de escoamento, vazões e regimes de escoamento).

Portanto, o objetivo desse trabalho é efetuar e analisar a modelagem hidráulica, em regime permanente, do canal córrego Jatobá, situado, em sua maior parte, na região do Barreiro, em Belo Horizonte, com os intuitos de determinar as seções do canal com menor capacidade de drenagem e reduzir as incertezas relacionadas ao

coeficiente de rugosidade (*Manning*) em eventos extremos, definindo diferentes condições de transbordamento para trechos distintos do canal em meio urbano e identificando as regiões com as seções mais propícias a inundar em um menor intervalo de tempo, caso ocorra um evento de alta intensidade de precipitação.

Material e métodos

A área de estudo da sub-bacia do córrego Jatobá está localizada no interior da bacia do ribeirão Arrudas, na região sul de Belo Horizonte, tendo como principais bairros: Independência, Vila Petrópolis, Vale do Jatobá e Barreiro. Além disso, a sub-bacia do canal está identificada próxima aos limites municipais de Ibirité e Contagem, ambos no estado de Minas Gerais.

A sub-bacia do córrego Jatobá possui uma área de aproximadamente 23,14 km², na qual o canal percorre 8,36 km até seu encontro com o córrego Olaria, onde após a confluência das águas seguem para o ribeirão Arrudas. É importante salientar que a região da bacia estudada está situada em uma área de grande urbanização, com apenas alguns contornos do curso de água identificados com vegetação e, por isso, a elaboração de um mapa de uso e ocupação do solo não se fez necessária.

Vale destacar que o sistema de projeção de coordenadas planas utilizado para criação dos mapas no *Arc*GIS foi o DATUM WGS 1984 UTM Zona 23 S, pois alguns *shapes* utilizados já possuíam essa projeção.

No Quadro 1, apresentam-se as etapas, organizadas em ordem numérica, executadas para a criação do mapa de localização da sub-bacia do córrego Jatobá, a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido por meio da plataforma de satélite *Alaska Satellite Facility* – ASF (2019) e pelas redes de drenagem da região da sub-bacia adquiridas no portal de Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – IDE-Sisema (2019).

Em sequência, na Figura 1, identifica-se o mapa de localização com os limites territoriais da sub-bacia do córrego.

Quadro 1. Ordem de etapas para elaboração do mapa de localização e limites territoriais da sub-bacia do córrego Jatobá.

Etapa	Processo
1	Aquisição do MDE pela plataforma de satélite da ASF (2019);
2	Aquisição das redes de drenagem da região da sub-bacia por meio do portal IDE-Sisema (2019);
3	Processamento do MDE por meio da extensão *ArcHydro Tools*, do software *Arc*GIS;
4	Criação dos *shapes* relativos às áreas e redes de drenagem das bacias de interesse.

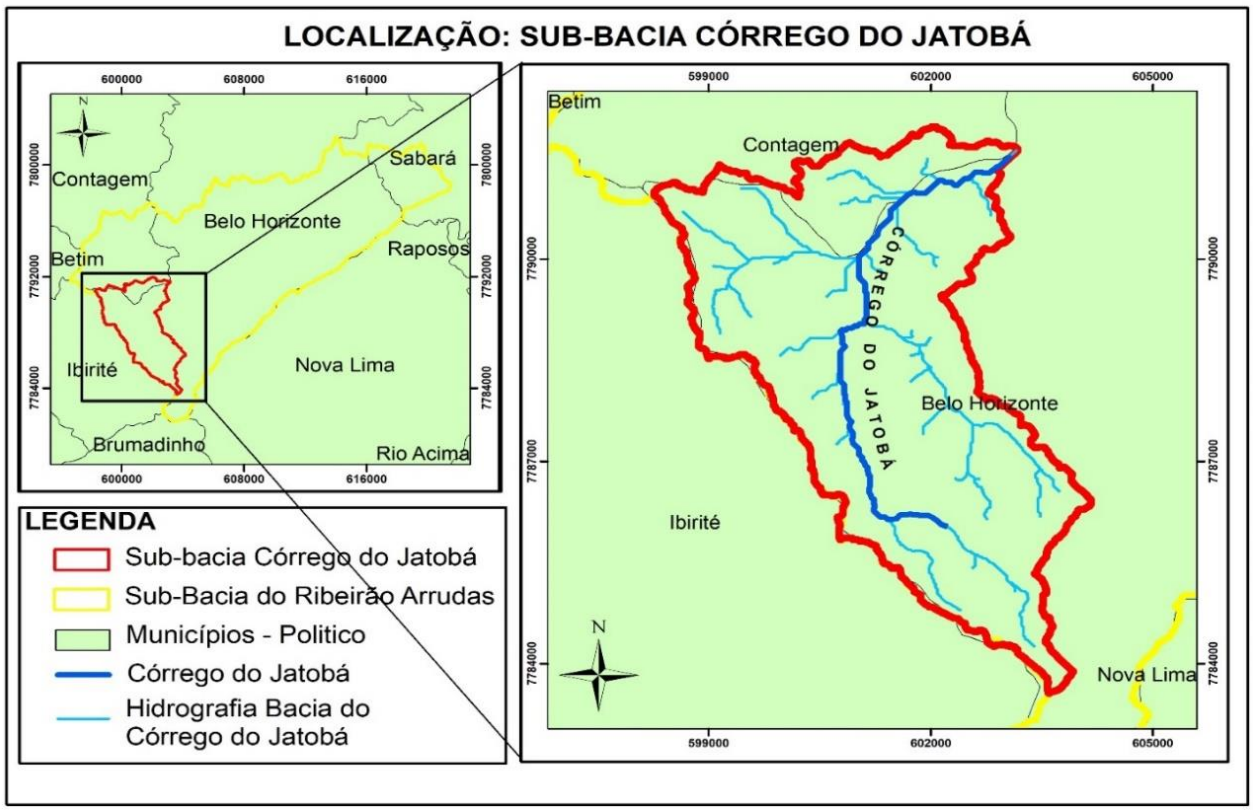

Figura 1. Localização e limites territoriais da sub-bacia do córrego Jatobá.

Para a delimitação do canal córrego Jatobá foi utilizado o HEC-*Geo*RAS (extensão do *ArcMap*), contido no *Arc*GIS 10.3.1, e foi necessária a elaboração do MDE com base em imagens do *Advanced Land Observing Satelite*-1 (ALOS) selecionado na plataforma da ASF (2019), de resolução 12,5 x 12,5 metros, no formato vetorial *Triangulated Irregular Network* (TIN), a partir da análise e interpretação dos dados do mapa gerado para a determinação de limites territoriais da sub-bacia do córrego Jatobá.

Conforme Ezz (2018), o MDE é fundamental para delimitar e sobrepôr características topográficas essenciais à delimitação das bacias hidrográficas, como declives, comprimentos e formato da bacia; e também para estimar os parâmetros hidrológicos, como direção de fluxo, acumulação de fluxo, redes de correntes, maior comprimento de fluxo e alinhamento da rede de drenagem.

A seguir, na Figura 2, como pode ser observado pelo TIN gerado, a sub-bacia do córrego Jatobá é relativamente íngreme, com altitudes variando de 910 a 1390 metros.

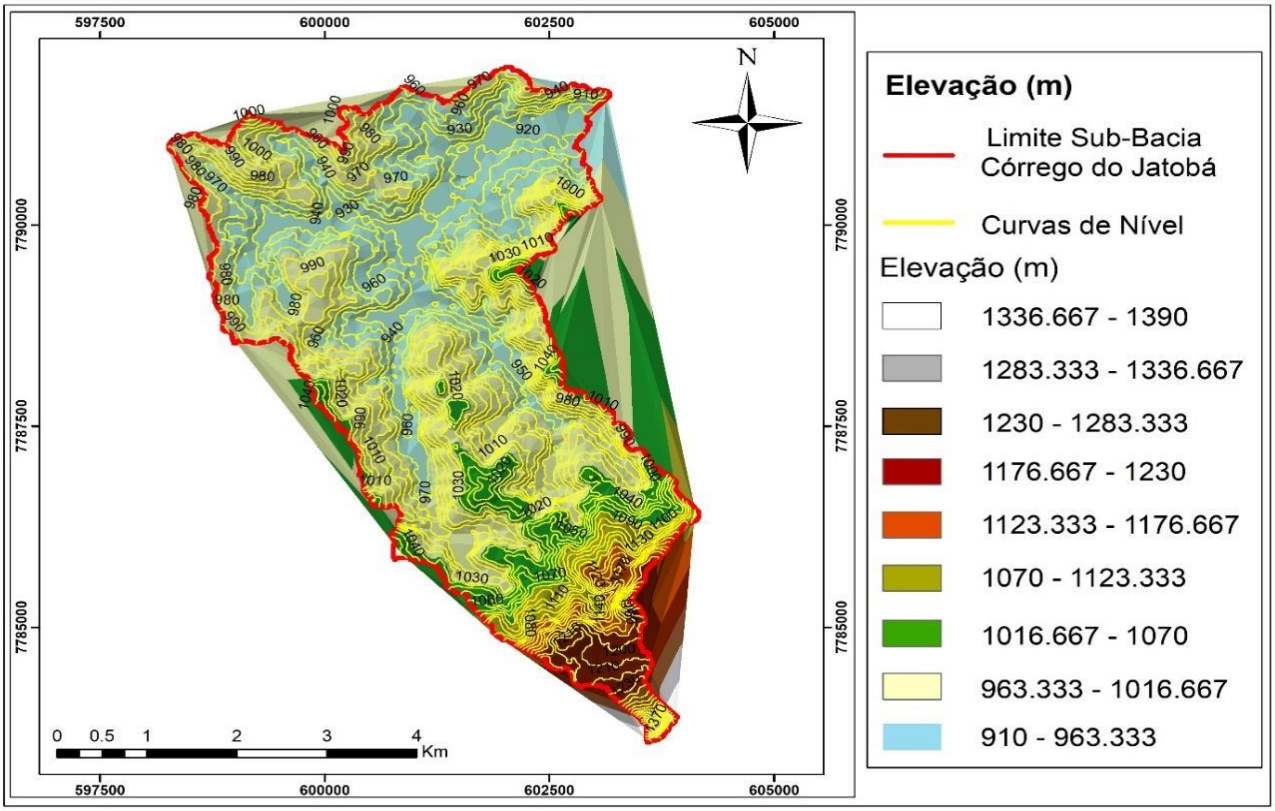

Figura 2. TIN da sub-bacia do córrego Jatobá.

Após o desenvolvimento do TIN, criou-se a base de dados no *Arc*GIS, a partir da extensão HEC-*Geo*RAS. De acordo com Gholami et al. (2016), o emprego de modelos hidráulicos com o auxílio de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) podem ser eficientes na estruturação de condições físicas e, em análises de parâmetros de fluxos de inundação em programas computacionais, pois o uso do GIS pode fornecer maior velocidade e precisão na simulação da geometria do terreno.

As seções projetadas sob o modelo TIN foram identificadas e nomeadas por suas cores e, algumas delas, também por algarismos romanos (I, II, III, IV, V, VI, VII e VIII), para melhor especificação e ordenação, no sentido de montante a jusante, do canal córrego Jatobá.

É importante citar que para maior precisão das localizações das seções do canal a serem traçadas, foi descarregada a base de imagens de ruas da região da sub-bacia, por meio das seguintes seleções de ferramentas do próprio *Arc*GIS: "Adicionar Dados → Mapa Base → Ruas". Sendo possível, nesse caso, a observação dos nomes de ruas e avenidas, e facilitando a identificação das informações disponibilizadas pelo Atlas dos Diagramas dos Canais Revestidos do Sistema de Macrodrenagem da Bacia do Ribeirão Arrudas, segundo a Prefeitura Municipal de Belo Horizonte – PMBH (2002).

A seguir, na Figura 3, apresenta-se um fluxograma com as operações, ordenadas numericamente, realizadas para delineamento do canal na extensão HEC-*Geo*RAS.

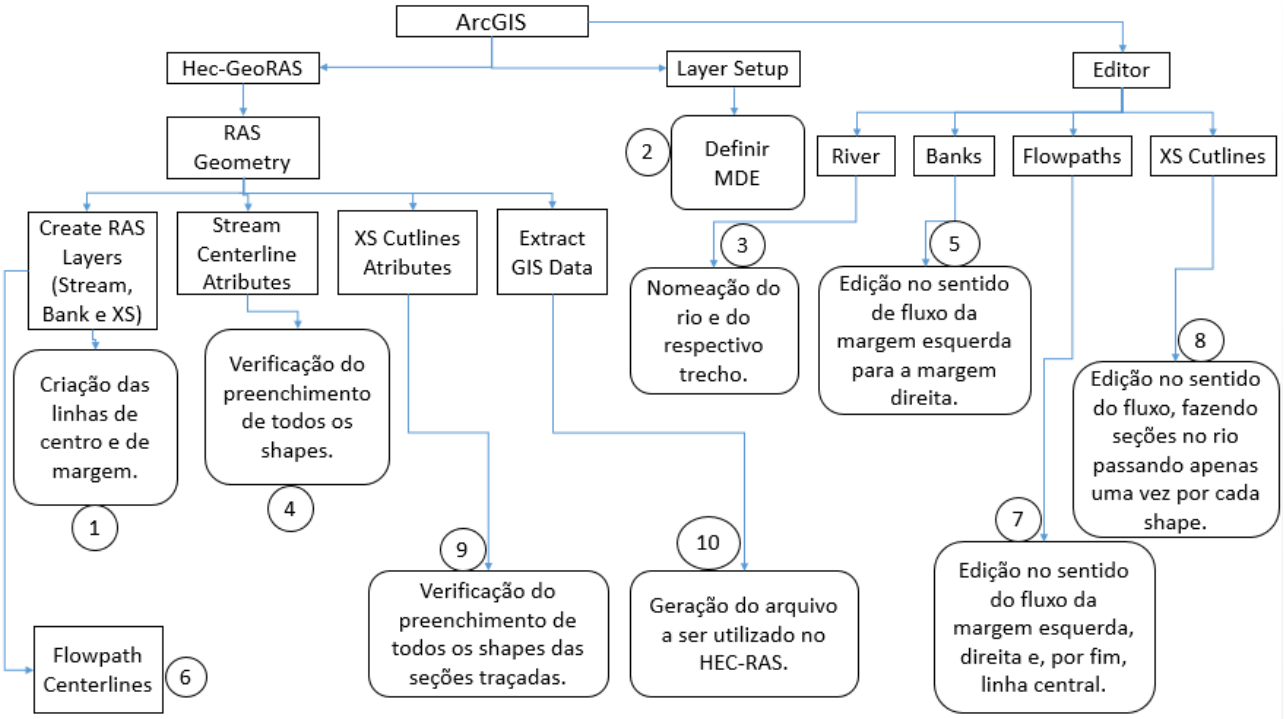

Figura 3. Operações realizadas para delineamento do canal córrego Jatobá.

Para a etapa seguinte da modelagem foi utilizado o HEC-RAS, pois é um modelo hidráulico capaz de resolver equações relacionadas às inundações geradas por transbordamento dos córregos ou canais em áreas urbanas (Surwase e Manjusree, 2019).

Segundo Monte et al. (2015), além deste modelo simular e calcular hidraulicamente escoamentos em regime permanente, o mesmo necessita de informações relacionadas às condições de contorno, dados topo-batimétricos e coeficientes de rugosidade para cada seção transversal, para ser executado, isto é, o software supriu toda a demanda de dados requerida para a construção do modelo.

Em relação à visualização dos dados de simulação, além das tabelas com resultados hidráulicos por seções transversais, o HEC-RAS possibilita a geração de diferentes relatórios gráficos ou tabulares, que fornecem suporte para a operação de uma análise hidráulica mais precisa. Dentre os tipos de gráficos que podem ser elaborados no software, estão: gráfico de níveis de água por seções transversais; perfis longitudinais de superfície de água; e gráficos de variação de parâmetros hidráulicos (velocidade, número de *Froude*, tensão de cisalhamento, etc) da seção em análise (Rincón et al., 2017).

No total, no HEC-RAS foram criadas 106 seções. As seções entre a ala de lançamento da seção azul I e a ala de captação da seção mostarda não estão apontadas no Atlas, no entanto, foram reconhecidas a partir do *Google Earth Pro*.

Vale destacar que também no Atlas da PMBH (2002), o valor da diferença entre a cota de topo (m) e a cota de fundo (m) das seções, muitas vezes não era igual ao valor especificado na formatação geométrica das seções, pois era maior e, por isso, nesses casos, considerou-se, como profundidade total do canal, apenas a subtração dos valores entre a cota de topo e a cota de fundo da seções, determinando que o valor excedente da profundidade especificada nas seções desenhadas seria a porção não revestida da altura do canal.

Nas Figuras 4 e 5, são apresentados os dados geométricos e topográficos das principais seções do canal córrego Jatobá, utilizados para esse estudo, segundo o Atlas da PMBH (2002).

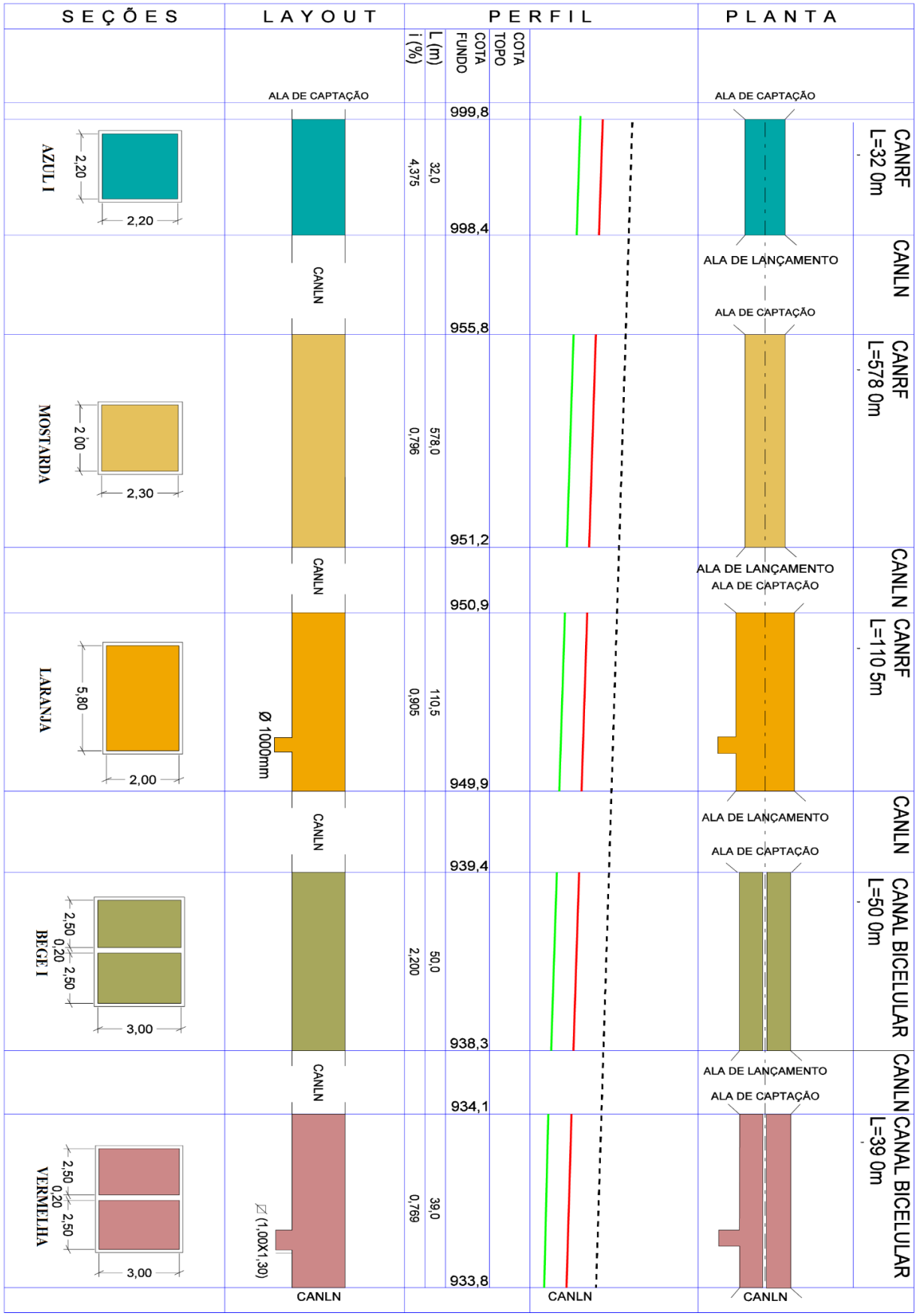

Figura 4. Dados das seções do canal córrego Jatobá (1ª parte).

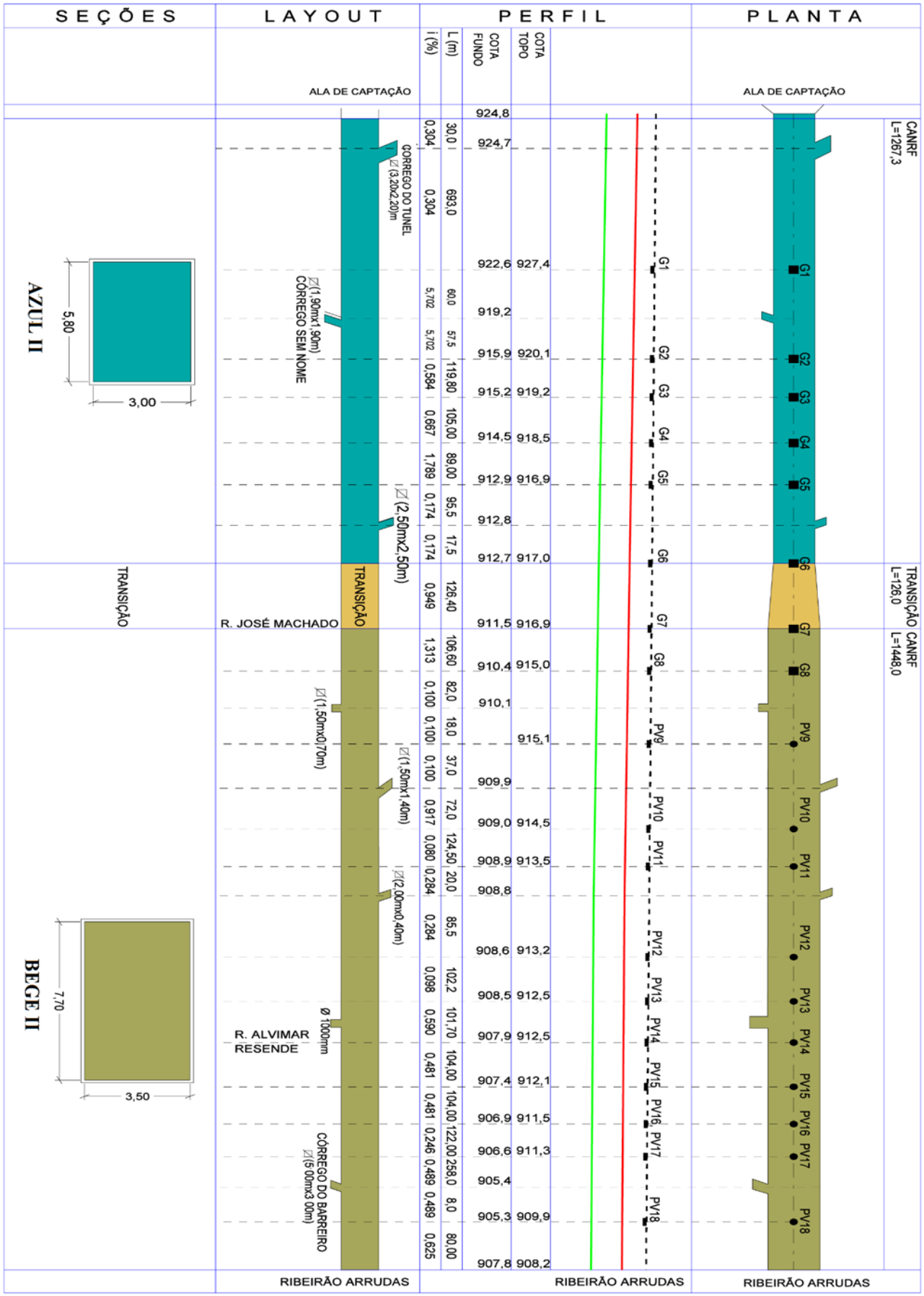

Figura 5. Dados das seções do canal córrego Jatobá (2ª parte).

Na Tabela 1, apresentam-se as coordenadas de referência de todas as seções do canal córrego Jatobá, baseadas no sistema de coordenadas *Universal Transverse Mercator* (UTM), zona 23 K e adquiridas por meio do *Google Earth Pro*.

Tabela 1. Coordenadas de referência das seções do canal córrego Jatobá.

Seção	Longitude (X)	Latitude (Y)
Início do Córrego Jatobá	602266,64 m E	7786010,12 m S
Azul I (Captação)	602206,51 m E	7786047,51 m S
Azul I (Lançamento)	602176,00 m E	7786037,00 m S
Término Azul I (0) – Abertura Canal Fechado I	602079,56 m E	7786120,19 m S
Término Canal Fechado I – Abertura Azul I (I)	602075,99 m E	7786131,34 m S
Término Azul I (I) – Abertura Canal Fechado II	602018,13 m E	7786164,10 m S
Término Canal Fechado II – Abertura Azul I (II)	602008,55 m E	7786169,34 m S
Término Azul I (II) – Abertura Canal Fechado III	601920,76 m E	7786152,77 m S
Término Canal Fechado III – Abertura Azul I (III)	601577,29 m E	7786167,59 m S
Término Azul I (III) – Abertura Canal Fechado IV	601501,60 m E	7786142,90 m S
Término Canal Fechado IV – Abertura Azul I (IV)	601444,61 m E	7786129,73 m S
Término Azul I (IV) – Abertura Canal Fechado V	601191,81 m E	7786555,54 m S
Término Canal Fechado V – Abertura Azul I (V)	601189,10 m E	7786566,37 m S
Término Azul I (V) – Abertura Canal Fechado VI	601179,53 m E	7786602,48 m S
Término Canal Fechado VI – Abertura Azul I (VI)	601174,47 m E	7786617,04 m S
Término Azul I (VI) – Abertura Canal Fechado VII	601124,84 m E	7786739,30 m S
Término Canal Fechado VII – Abertura Azul I (VII)	601119,54 m E	7786759,81 m S
Término Azul I (VII) – Abertura Canal Fechado VIII	601100,08 m E	7786823,38 m S
Término Canal Fechado VIII– Abertura Azul I (VIII)	601094,12 m E	7786841,15 m S
Mostarda (Captação)	601060,14 m E	7786966,16 m S
Mostarda (Lançamento)	600882,00 m E	7787508,00 m S
Laranja (Captação)	600876,00 m E	7787571,00 m S
Laranja (Lançamento)	600852,00 m E	7787677,00 m S
Bege I (Captação)	600808,00 m E	7788694,00 m S
Bege I (Lançamento)	600796,00 m E	7788743,00 m S
Vermelha (Captação)	600954,00 m E	7789049,00 m S
Vermelha (Lançamento)	600796,00 m E	7788743,00 m S
Azul II (Captação)	601088,64 m E	7789940,99 m S
Término Azul II	601847,00 m E	7791039,00 m S
Início Bege II	601922,18 m E	7791125,53 m S
Final do Córrego Jatobá	603057,00 m E	7791498,00 m S

Por meio do auxílio do Atlas da PMBH (2002) e do *Google Earth Pro*, os comprimentos dos canais entre as alas de captação e lançamento, do canal córrego Jatobá, foram medidos. Como o Atlas da PMBH (2002) não oferece dados de comprimento dos trechos entre as alas de captação e as alas de lançamento das seções, e também não concede informações referentes às características de cobertura dos canais, isto é, se as seções apresentam sua cobertura fechada ou aberta, empregou-se o *Google Earth Pro* para visualização e definição destas especificações requeridas. Sendo assim, as distâncias entre as alas de lançamento e captação foram determinadas por meio da ferramenta do *Google Earth Pro* de medir o comprimento (metros) dos caminhos traçados, ao longo do curso de água mapeado; enquanto a tipificação das coberturas das seções foram

definidas por mapeamento espacial e pelo recurso *Google Street View* da própria plataforma. Em sequência, na Tabela 2, apresentam-se os valores encontrados dos comprimentos dos trechos entre as alas de captação e lançamento das seções do canal córrego Jatobá.

Tabela 2. Comprimentos das seções do canal córrego Jatobá.

Trechos	Comprimento (m)
Início do canal córrego do Jatobá – Capt. Seção Azul I	80,7
Azul I (Lançamento) ao Término Azul I (0) – Abertura Canal Fechado I	157,306
Azul I (Lançamento) ao Término Azul I (0) – Abertura Canal Fechado I	157,306
Término Azul I – Abertura Canal Fechado I ao Término Canal Fechado I – Abertura Azul I (I)	15,006
Término Canal Fechado I – Abertura Azul I (I) a Término Azul I (I) – Abertura Canal Fechado II	64,306
Término Azul I (I) – Abertura Canal Fechado II a Término Canal Fechado II – Abertura Azul I (II)	12,506
Término Canal Fechado II – Abertura Azul I (II) ao Término Azul I (II) – Abertura Canal Fechado III	90,006
Término Azul I (II) – Abertura Canal Fechado III ao Término Canal Fechado III – Abertura Azul I (III)	375,306
Término Canal Fechado III – Abertura Azul I (III) ao Término Azul I (III) – Abertura Canal Fechado IV	79,006
Término Azul I (III) – Abertura Canal Fechado IV ao Término Canal Fechado IV – Abertura Azul I (IV)	58,806
Término Canal Fechado IV – Abertura Azul I (IV) ao Término Azul I (IV) – Abertura Canal Fechado V	611,306
Término Azul I (IV) – Abertura Canal Fechado V ao Término Canal Fechado V – Abertura Azul I (V)	12,406
Término Canal Fechado V – Abertura Azul I (V) ao Término Azul I (V) – Abertura Canal Fechado VI	38,206
Término Azul I (V) – Abertura Canal Fechado VI ao Término Canal Fechado VI – Abertura Azul I (VI)	15,506
Término Canal Fechado VI – Abertura Azul I (VI) ao Término Azul I (VI) – Abertura Canal Fechado VII	130,306
Término Azul I (VI) – Abertura Canal Fechado VII ao Término Canal Fechado VII – Abertura Azul I (VII)	20,706
Término Canal Fechado VII – Abertura Azul I (VII) ao Término Azul I (VII) – Abertura Canal Fechado VIII	67,706
Término Azul I (VII) – Abertura Canal Fechado VIII ao Término Canal Fechado VIII – Abertura Azul I (VIII)	20,306
Término Canal Fechado VIII – Abertura ao Mostarda (Captação)	133,306
Lanç. Seção Mostarda – Capt. Seção Laranja	53,7
Lanç. Seção Laranja – Capt. Seção Bege I	1070,0
Lanç. Seção Bege I – Capt. Seção Vermelha	418,0
Lanç. Seção Vermelha – Capt. Seção Azul II	1107,0

É fundamental salientar que o somatório dos valores obtidos das medições dos comprimentos das seções localizadas entre a ala de lançamento da seção azul I e a ala de captação da seção mostarda foi de 1896,8 metros, isto é, 5,2 metros a menos que o comprimento total do trecho seção azul I – seção mostarda. (1902 metros) especificado pelo Atlas da PMBH (2002). Dessa forma, para minimização dos erros de medição, a diferença (5,2 metros) foi dividida pelo número total de trechos (17 trechos) entre as seções analisadas e, posteriormente, o valor encontrado (0,306 metros) foi acrescido a cada comprimento de intervalo entre as seções, resultando assim, no valor de, aproximadamente, 1902 metros. O comprimento adotado entre o fechamento e a abertura das seções no HEC-RAS, em geral, para a maior precisão dos resultados, foi de 1,0 metro.

Outro fator muito significativo para a construção do canal córrego Jatobá foi a seleção dos coeficientes de *Manning* (n) para cada trecho e, neste caso, adotou-se 0,018 para as seções fechadas (tampadas), pois, além dos canais, aparentemente, serem revestidos de concreto, possivelmente, foram implantados há anos e, segundo a Prefeitura do Município de São Paulo – PMSP (1999), esse valor representa uma rugosidade que já considera os desgastes causados pelo transporte de material detrítico pesado em períodos de cheias e as deformações nas juntas do canal, geradas, naturalmente, por fenômenos intempéricos.

Para os trechos sem cobertura, ou seja, seções abertas (sem tampas), adotou-se um valor de *Manning* de 0,030, pois ao visualizar essas porções do canal, em linha do tempo (2012-2019), no *Google Earth Pro*, verificou-se que a maioria dos trechos abertos, provavelmente, são canais naturais e, de acordo com a PMSP (1999), este fator de atrito variando de 0,030 a 0,035 pode caracterizar cursos de água naturais, com acúmulos consideráveis de detritos, porém em condições admissíveis de escoamento.

Os coeficientes de contração e expansão aplicados foram, respectivamente, 0,1 e 0,3, pois, conforme Brunner (2016), estes valores podem representar tanto um curso de água, no qual as mudanças nas seções transversais são pequenas e o fluxo é subcrítico; quanto em transições graduais, nas quais o escoamento é supercrítico.

Destaca-se também que, para as zonas de transição, isto é, trechos com mudança nos valores de largura das seções, os intervalos foram interpolados, no HEC-RAS, em máxima distância de 5 metros, independentemente, do comprimento entre as seções. Como condições de contorno (*boundary conditions*), no HEC-RAS, classificou-se a profundidade do canal como normal (*Normal Depth*) e determinou-se a declividade superior (*upstream*) como 4,375% e a declividade inferior como 0,625% (*downstream*), ambas descritas, respectivamente, nas seções inicial e terminal do canal córrego Jatobá, no Atlas da PMBH (2002).

Khallfalah e Saidi (2018) citam que o estabelecimento das condições limite a montante ou a jusante, dependem do modelo do fluxo do canal e do regime de escoamento estudado. Deste modo, como no canal córrego Jatobá podem ocorrer tanto o regime subcrítico como o supercrítico, as condições limites, no caso, as declividades, foram aplicadas em ambas extremidades, responsabilizando automaticamente o HEC-RAS dos cálculos de declividade média do canal, linha de água e tipo de regime para cada seção, com base no número de *Froude*.

Com as características de contorno selecionadas, foi possível a simulação hidráulica em regime misto, ou seja, considerou-se para a análise, tanto o regime subcrítico, no qual, há maior atuação da energia potencial gravitacional sobre o volume de água escoado; como o supercrítico, em que o escoamento é identificado por apresentar maior energia cinética e menor nível de água, em relação ao subcrítico.

A seleção adequada de condições de contorno contribui muito para o desempenho de uma simulação hidráulica, uma vez que para cada sistema hidráulico existem características específicas do mesmo que devem ser, necessariamente, consideradas, tanto para o processo de construção do sistema, como para a obtenção das informações requeridas. Para a simulação hidráulica, em regime permanente, com os coeficientes de *Manning* adotados, foram empregados os respectivos dados já descritos de todas as seções e foi aplicada uma série de 15 vazões, sendo elas: 2 m³/s, 4 m³/s, 6 m³/s, 8 m³/s, 10 m³/s, 20 m³/s, 40 m³/s, 60 m³/s, 80 m³/s, 100 m³/s, 150 m³/s, 200 m³/s, 250 m³/s, 300 m³/s e 350 m³/s.

A seguir, nas Figuras 6 e 7, as seções de lançamento laranja e bicelular bege I do canal córrego Jatobá, identificadas no HEC-RAS, com suas respectivas geometrias e fotos das áreas de lançamento, adaptadas de Souza e Couto (2016) e do Atlas da PMBH (2002).

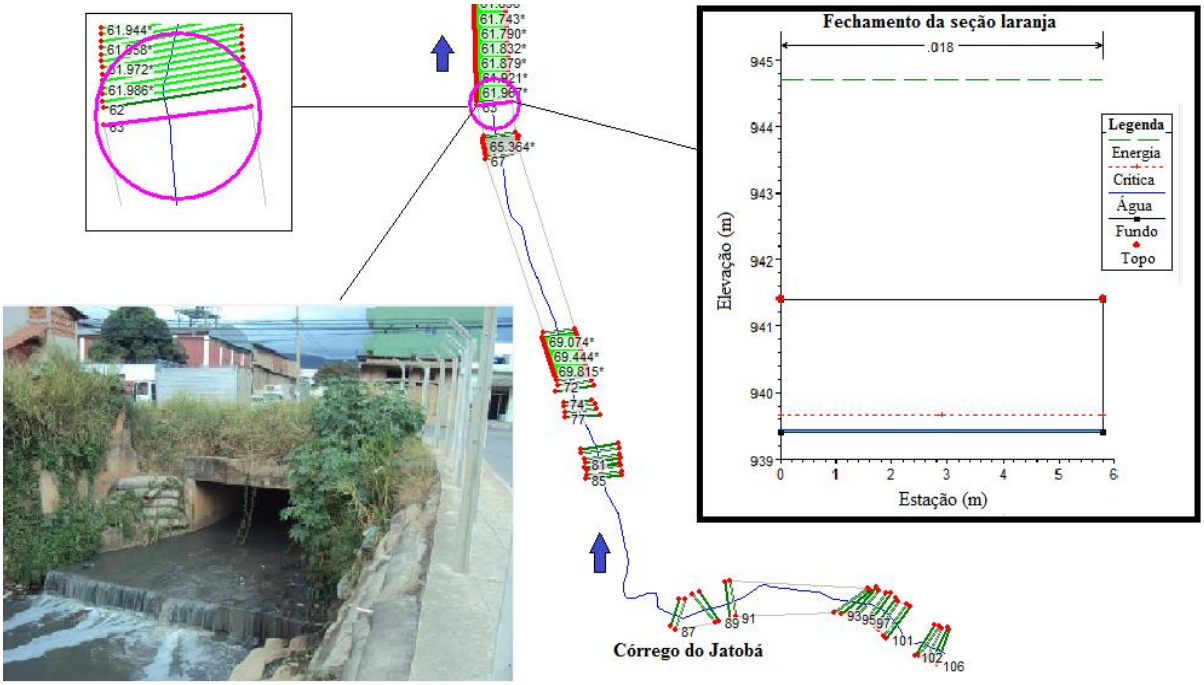

Figura 6. Identificação da seção laranja de lançamento no HEC-RAS.

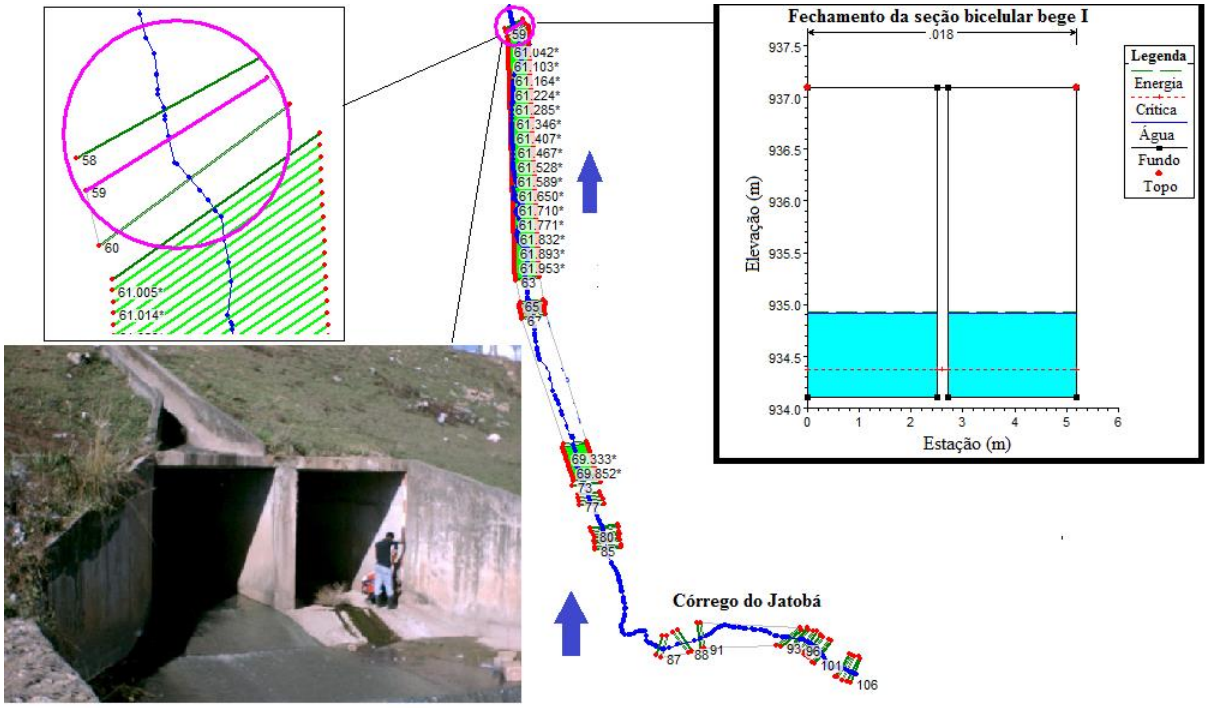

Figura 7. Identificação da seção bicelular bege I de lançamento no HEC-RAS.

A série de vazões foi definida após pré-testes (simulações) executados para observação da altura do nível de água em relação ao canal, a partir da curva-chave de cada seção, com intuito de visualização das vazões críticas, pois, conforme Mokhtar et al. (2018), o volume de água escoado em determinado tempo é o principal parâmetro para análise da possibilidade de inundação em uma área.

Dimitriadis et al. (2016) destacam ainda que no HEC-RAS, com o emprego de uma condição de fluxo estável e devido às características naturais do regime permanente e da flexibilidade do software em relação à aplicação de

diferentes formatos geométricos para as seções construídas, em toda a simulação à descarga constante, a vazão é distribuída longitudinalmente em toda a seção transversal. Portanto, é muito importante fundamentar corretamente a série de vazões a ser executada na modelagem hidráulica, pois, somente deste modo, os dados de escoamento obtidos, relacionados aos parâmetros físicos e hidráulicos, serão assertivos e, consequentemente, as análises a serem feitas terão valores condizentes com a teoria estudada.

Neste contexto, cabe salientar que as vazões de 2 m³/s, 4 m³/s, 6 m³/s, 8 m³/s, e 10 m³/s foram empregadas para a determinação das vazões críticas das seções do canal com menores dimensões geométricas; as vazões de 10 m³/s, 20 m³/s, 40 m³/s, 60 m³/s, 80 m³/s e 100 m³/s também foram selecionadas, pois a partir da aplicação destes valores em pré-simulações no HEC-RAS, algumas seções com parâmetros geométricos médios inundavam; e, as vazões de 100 m³/s, 150 m³/s, 200 m³/s, 250 m³/s, 300 m³/s e 350 m³/s foram utilizadas para a identificação de vazões críticas de seções com maiores larguras e comprimentos, e também com trechos de grande diferença de declividade.

Após a simulação para obtenção de valores aproximados de vazão crítica para cada seção, identificou-se a cota de topo das seções no eixo de elevação da superfície de água pela análise da curva-chave, ponto esse fundamental na determinação dos valores de vazões críticas e do comportamento do escoamento para as diferentes vazões aplicadas, isto é, na observação da capacidade de drenagem de cada seção e, consequentemente, no valor limite de volume de água de cada trecho, em regime permanente.

No que tange às simulações em regime permanente com a variação dos coeficientes de *Manning*, os mesmos procedimentos foram executados. No entanto, nesta simulação, os valores de n empregados foram 0,010, 0,020, 0,030 e 0,040, pois, fundamentados em Baptista e Coelho (2016), os mesmos podem caracterizar superfícies de aço e concreto liso ou pré-moldado (0,010); concreto projetado ou sem acabamento (0,020); reconhecidas por gabiões ou presença de espécies vegetais (0,030), e; rochas sem revestimentos e canais com vegetação em excesso (0,040). Portanto, trata-se de uma variação dos valores de coeficientes de rugosidade que engloba a maior parte dos tipos de revestimentos aplicados em canais de drenagem.

Tais valores de *Manning* citados anteriormente também foram selecionados, uma vez que, de acordo com a visualização das seções no Atlas da PMBH (2002) e no *Google Street View*, as seções fechadas do canal córrego Jatobá foram implantadas com revestimento de concreto e os trechos abertos são caracterizados por serem cursos de água naturais, podendo os mesmos apresentarem rochas sem revestimento e presença de espécies vegetais.

Nesta etapa do trabalho foram feitas quatro simulações hidráulicas, todas com a mesma série de vazões utilizada para a simulação com os *Manning* adotados, porém, neste caso, empregando-se apenas um mesmo valor de n para as seções abertas e fechadas, em cada simulação.

Resultados e discussão

Os resultados obtidos da simulação realizada com a aplicação dos coeficientes de *Manning* adotados nas seções do canal córrego Jatobá apresentaram que nos trechos a montante do canal, isto é, nos intervalos entre as seções localizadas entre a ala de lançamento da seção azul I e a ala de captação da seção mostarda, o conjunto de vazões críticas obtido foi menor em comparação com o restante do canal. Na Figura 8, apresentam-se os resultados obtidos para as diferentes seções do canal córrego Jatobá, numeradas de montante para jusante.

No entanto, vale destacar que na porção entre a seção de início do canal córrego Jatobá e a ala de captação da seção mostarda, verificou-se que o comprimento, a largura e a profundidade das seções, no geral, são menores, em relação ao restante do canal e, além disso, com exceção das três primeiras seções, a cota de fundo é a mesma ao longo do trecho, o que contribui ainda mais para a redução do valor das vazões críticas, pois, desse modo, o perfil topográfico não possui declive, o escoamento de água apresenta uma menor velocidade e, consequentemente, o nível de água pode aumentar em um menor intervalo de tempo.

Outro detalhe relevante que deve ser considerado é a caracterização do tipo das seções na porção a montante do canal, pois é a região de macrodrenagem que detém a maior parte das seções abertas, ou seja, sem cobertura, o que determina a possibilidade de transbordamento da água sob as calhas.

Ademais, analisando-se a Figura 8 é significativo descrever que as últimas três seções do canal córrego Jatobá, apesar de serem fechadas, também possuem os menores valores de vazões de transbordamento de água da calha, pois suas cotas de topo especificadas no Atlas da PMBH (2002) são apenas 0,4 metros mais elevadas em relação às suas respectivas cotas de fundo. Embora esta medida possa ser considerada um erro de medição técnica, a metodologia empregada na execução deste trabalho especifica as cotas de topo como limites superiores de profundidade do canal, sendo assim, a diferença entre o leito e o topo da seção se torna muito pequena, o que gera uma vazão crítica bem menor e um escoamento de água com muita velocidade, devido à área molhada ser reduzida e a vazão de água de chegada aos trechos finais ser alta em relação às dimensões da seção.

As seções identificadas no HEC-RAS de numeração 62, 61, 58, 57, 54 e 53, com vazões críticas de 17,63 m³/s, 62,03 m³/s, 26, 75 m³/s, 61,81 m³/s, 18,57 m³/s e 83,28 m³/s, respectivamente, também são abertas e, diferentemente das descritas anteriormente, constituem a porção do canal que possui maiores vazões críticas. Apresenta-se na Figura 9, um gráfico para melhor visualização destes dados.

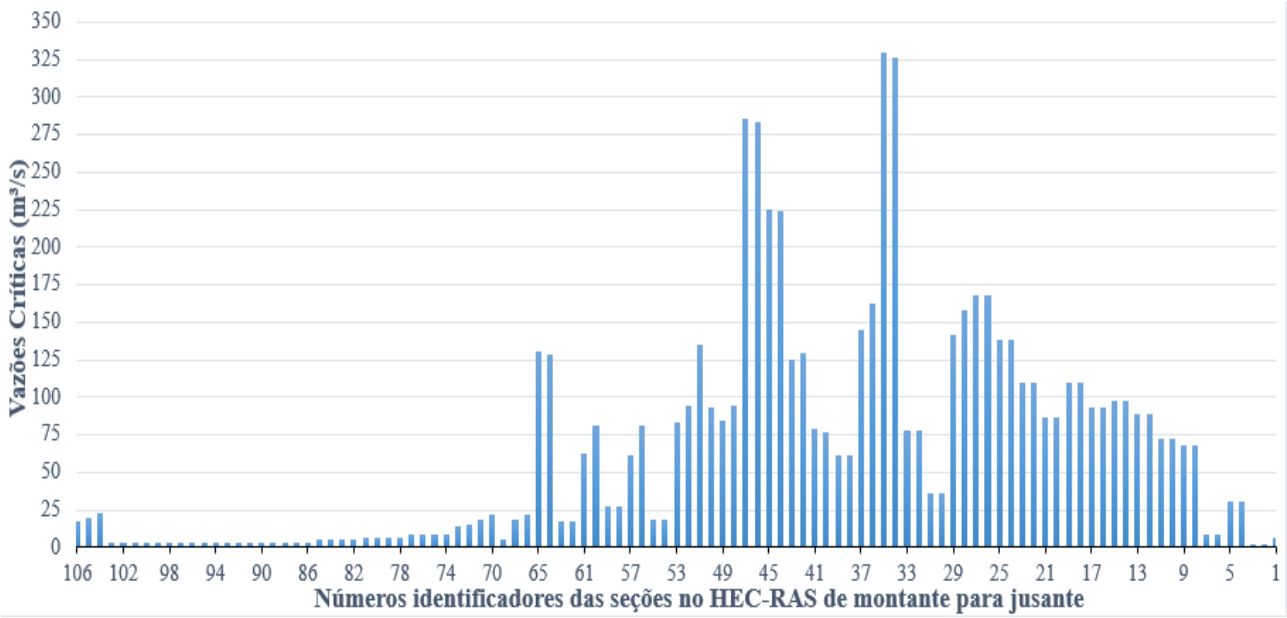

Figura 8. Valores aproximados de vazões críticas das seções entre o início e o término do canal córrego Jatobá.

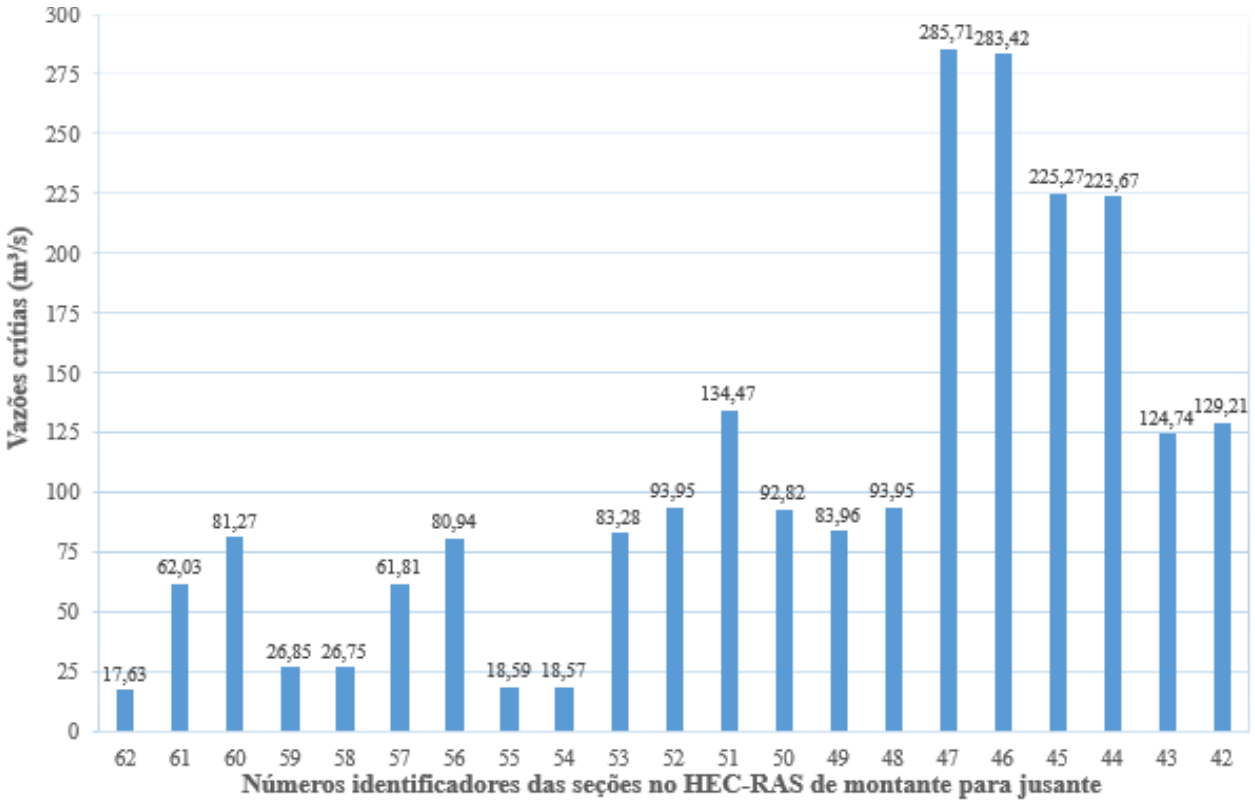

Figura 9. Valores aproximados das vazões críticas das seções entre a ala de lançamento da seção laranja (62) e o início da seção azul II (43-42) para os *Manning* adotados.

Como pode-se observar, as seções entre a ala de lançamento da seção laranja (62) e o início da seção azul II (42-43) possuem vazões para extravasamento do fluxo de água da calha do canal, relativamente, mais baixas, se comparado com as outras seções desta parte do canal, que chegam aos valores de vazões críticas maiores que 280 m³/s. Entretanto, como são trechos de drenagem sem cobertura, dependendo da intensidade e tempo de precipitação pluviométrica ocorrida na área, possuem risco significativo de inundação e, por isso, merecem maior atenção.

Para as seções que apresentam valores mais altos de vazões críticas, as justificativas podem se fundamentar em parâmetros hidráulicos e geométricos do canal, ou seja, valores mais elevados de área molhada, perímetro molhado e comprimento. Cabe ressaltar que nesses trechos há declives (diferença entre cotas de fundo ao longo do canal) acentuados e coeficientes de rugosidade menores e, portanto, todas essas características contribuem para um fluxo de água mais rápido, o que diminui, ainda mais, os riscos de contenção e de elevação do nível de água nestas seções.

Nesta simulação, se faz interessante citar também que as menores vazões críticas em uma seção aberta (sem tampa ou cobertura) são, aproximadamente, 2,66 m³/s (seções 103 e 102) e 2,79 m³/s (seções 101 e 100), com as respectivas seções susceptíveis à inundação localizadas na região a montante do canal córrego Jatobá, iniciando-se na rua Maria Rita Borges e com seu término na rua Pacífico Cardoso de Andrade, ambas dentro do bairro Independência. Além disso, determina-se que o conjunto identificado por possuir as menores vazões críticas de seções abertas varia de, aproximadamente, 2,66 m³/s à 21,77 m³/s, e se localiza em cursos de água retificados ou naturais, ao longo dos bairros Independência e Vila Petrópolis.

Na segunda etapa do trabalho, a variação dos coeficientes de rugosidade permitiu verificar a influência desse parâmetro na simulação hidráulica em face das vazões críticas das seções. Deste modo, na Figura 10, apresenta-se a variação dos valores das vazões críticas para os quatro diferentes n empregados ao longo do canal estudado.

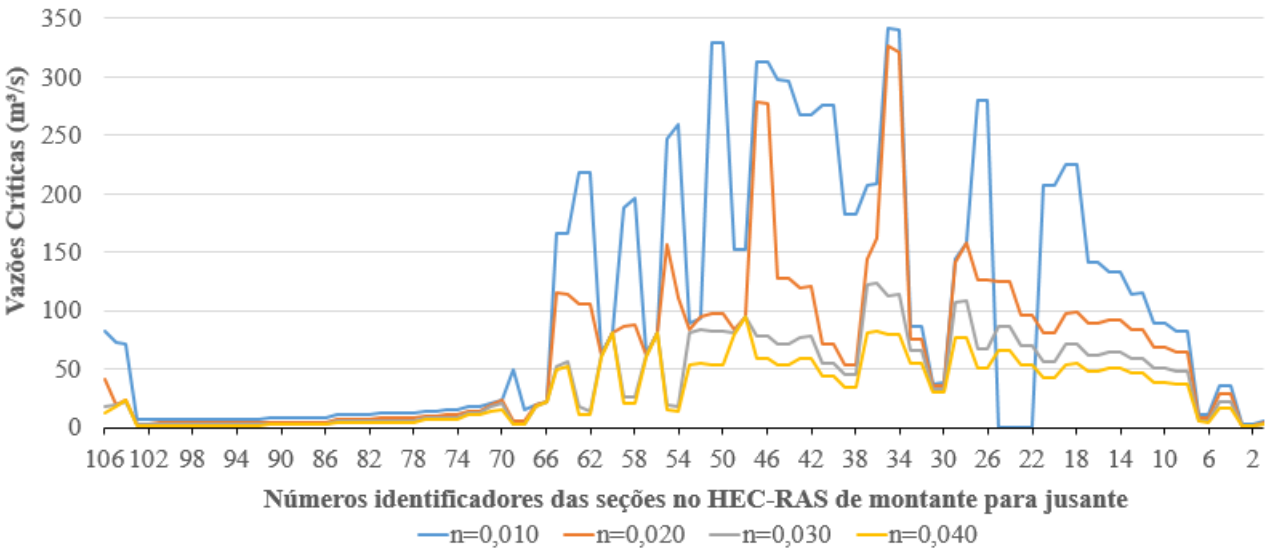

Figura 10. Variação dos valores das vazões críticas para os diferentes coeficientes de *Manning* aplicados ao longo das seções do canal córrego Jatobá.

Esta interferência da rugosidade no fluxo de água de um canal, fisicamente, pode ser justificada pela rugosidade ou atrito da superfície com o fluido, pois, quanto maior, mais brusca é a redução da velocidade de escoamento do mesmo e, consequentemente, maior é a retenção de volume de água por tempo e mais rápida é a elevação do nível da superfície de água no canal. Attari e Hosseini (2019) identificaram esse fator ao calibrar o coeficiente de *Manning* em diferentes trechos de um rio em várias condições. Greco et al. (2014) também verificaram a influência da rugosidade com a profundidade, propondo uma relação de dependência da entropia M (relações de velocidades média e máxima) com a razão de profundidade (quociente entre as profundidades média e máxima).

Em termos de dados, destacaram-se as baixas vazões críticas obtidas para n = 0,040, pois estas variaram de, aproximadamente, 1,84 m³/s a 94,06 m³/s, isto é, valores menores, se relacionados com os demais encontrados para as outras rugosidades utilizadas e, que também podem ser preocupantes, se avaliadas as incertezas geradas pelas medições e adoções das informações para elaboração deste trabalho.

Para n = 0,010, as vazões críticas encontradas foram muito elevadas e, em trechos de seções abertas, tiveram seus valores variando de, aproximadamente, 6,27 m³/s a 258,82 m³/s, devido ao material de revestimento do canal ser, em tese, um concreto liso e pré-moldado, o que otimiza muito a capacidade de escoamento de água do canal de macrodrenagem, diminuindo a chance de aumento do nível de água. E, por último, para n = 0,020 e n = 0,030, o conjunto de vazões críticas adquiridas teve seus valores próximos aos encontrados para os n adotados. A variação no pico do hidrograma foi também objeto de estudo de Kopecki et al. (2017) ao proporem uma nova metodologia para relacionar a profundidade e a rugosidade, e sua influência no pico.

No que tange à avaliação dos resultados com base nas ferramentas que foram imprescindíveis para o trabalho, têm-se que, assim como nos estudos desenvolvidos por Gholami et al. (2016) e, Khalfallah e Saidi (2018), a criação e a manipulação de dados GIS, respectivamente, pelos softwares *Arc*GIS e sua extensão HEC-*Geo*RAS, foram cruciais para a eficiência das etapas de processamento e mapeamento de dados do terreno, pois somente por meio desses programas computacionais foram possíveis a delimitação e a caracterização morfométrica da sub-bacia hidrográfica do córrego Jatobá; e, a determinação das condições das linhas centrais e de margens de fluxo do canal.

Por fim, analisando-se também os resultados em relação ao emprego do HEC-RAS como simulador hidráulico, cabe destacar que do mesmo modo da pesquisa de Khalfallah e Saidi (2018), o modelo atendeu aos objetivos propostos, pois permitiu simular precisamente a variação de parâmetros hidráulicos e gerar resultados essenciais aos objetivos da pesquisa, comprovando-se assim, como citado por Dimitradis et al. (2016), ser uma ferramenta de grande importância para melhor compreensão e

desenvolvimento de estudos em simulações hidráulicas em canais de fluxo constante, em uma dimensão.

Conclusões

Com a elaboração deste trabalho, pôde-se concluir que a modelagem hidráulica de canais de macrodrenagem é de fundamental importância em estudos para a prevenção de eventos de inundação em centros urbanos, pois, com a análise das simulações hidráulicas, em regime permanente, do canal córrego Jatobá, foi possível determinar que, em caso de chuvas mais localizadas, e devido às características físicas e geométricas das seções, os trechos entre a ala de lançamento da seção azul I e a ala de captação da seção mostarda, presentes em sua maioria, nos bairros Independência e Vila Petrópolis, estão mais susceptíveis à inundar do que os trechos mais a jusante, isto é, possuem uma menor capacidade de drenagem em relação aos demais.

Além disso, nesta pesquisa, comprovou-se, quantitativamente, a interferência da variação do coeficiente de *Manning* no escoamento de um canal e, desse modo, constatou-se que os trechos de drenagem de cursos de água naturais, com valores de *Manning* mais elevados, tendem a transbordar mais facilmente do que canais revestidos de concreto (com valores de rugosidade mais baixos), pois em seções revestidas e com acabamento, a capacidade da superfície em reduzir a velocidade do escoamento é menor e, assim sendo, o volume de água, por segundo, necessário para atingir o topo das seções, é maior.

Portanto, o objetivo da pesquisa foi atendido e, espera-se que as informações e conclusões obtidas neste trabalho contribua como base bibliográfica para o avanço de estudos em simulações hidráulicas em meio urbano.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira por ceder os equipamentos e softwares necessários para a execução deste trabalho.

Referências

ASF. Alaska Satellite Facility, 2019. Disponível: https://search.asf.alaska.edu/#/. Acesso: 15 mai. 2019.

Attari, M., Hosseini, S.M., 2019. A simple innovative method for calibration of Manning's roughness coefficient in rivers using a similarity concept. Journal of Hydrology [online] 575. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.083. Acesso: 31 mai. 2020.

Awakimjan, I., 2015. Urban Flood Modelling Recommendations for Ciudad Del Plata. Bachelor Thesis. Enschede, University of Twente.

Baptista, M.B., Coelho, M.M.L. P., 2016. Fundamentos de Engenharia Hidráulica, 4 ed. UFMG, Belo Horizonte.

Batista, J.A.N., Boldrin, A. J., 2018. Avaliação do desempenho hidráulico de um sistema de drenagem de águas pluviais urbanas. Revista Engenharia. Sanitária e Ambiental [online] 23. Disponível: http://www.scielo.br/pdf/esa/v23n2/1809-4457-esa-23-02-263.pdf. Acesso: 20 ago. 2019.

Brunner, G. W., 2016. HEC-RAS: River Analysis System, 5 ed. US Army Corps of Engineers, Davis.

Canholi, A. P., 2015. Drenagem Urbana e Controle de Enchentes, 2 ed. Oficina de Textos, São Paulo.

Cavalcante, F.G., Tavares, P.R.L., Fernandes, R.O., Sá, P.E.F., 2018. Modelagem computacional de ressalto hidráulico em canal urbano. Revista DAE [online] 67. Disponível: https://doi.org/10.4322/dae.2019.028. Acesso: 20 ago. 2019.

Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., Koutsoyiannis, D., Efstratiadis, A., 2016. Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. Journal of Hydrology [online] 534. Disponível: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.020. Acesso: 28 mai. 2020.

EM-DAT. The OFDA/CRED International Disaster Database, 2017. Disponível:

http://www.emdat.be/advanced_search/index.html. Acesso: 19 ago. 2019.

Ezz, H., 2018. Integrating GIS and HEC-RAS to model Assiut plateau runoff. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences [online] 21. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.002. Acesso: 27 mai. 2020.

Fenner, R., O'Donell, E., Ahilan, S., Dawson, D., Kapetas, L., Krivtsov, V., Ncube, S., Vercruysse, K., 2019. Achieving Urban Flood Resilience in an Uncertain Future. Water [online] 11. Disponível: https://doi.org/10.3390/w11051082. Acesso: 27 mai. 2020.

Gholami, V., Asghari, A., Salimi, E.T., 2016. Flood hazard zoning using geographic information system (GIS) and HEC-RAS model (Case study: Rash City). Caspian Journal of Environmental Sciences [online] 14. Disponível: https://cjes.guilan.ac.ir/article_1862.html. Acesso: 27 mai. 2020.

Greco, M., Mirauda, D., Plantamura, A.V., 2014. Manning's Roughness through the Entropy Parameter for Steady Open Channel Flows in Low Submergence. Procedia Engineering [online] 70. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.084. Acesso: 31 mai. 2020.

Hardy, J., Gourley, J.J., Kirsetter, P.E., Hong, Y., Kong, F., Flamig, Z.L., 2016. A method for probabilistic flash flood forescating. Journal of Hydrology [online] 541. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.007. Acesso: 25 mai. 2020.

IDE-Sisema. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2019. Disponível: http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/. Acesso: 20 mai. 2019.

Kashyap, S., Mahanta, R., 2018. Vulnerability Aspects of Urban Flooding: A Review. Indian Journal of Economics and Development [online] 14. Disponível: DOI: 10.5958/2322-0430.2018.00175.0. Acesso: 25 mai. 2020.

Khalfallah, C.B., Saidi, S., 2018. Spatiotemporal floodplain mapping and prediction using HEC-RAS – GIS tools: Case of the Mejerda river, Tunisia. Journal of African Earth Sciences [online] 142. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.03.004. Acesso: 28 mai. 2020.

Kopecki, I., Schneider, M., Tuhtan, J.A., 2017. Depth-dependent hydraulic roughness and its impact on the assessment of hydropeaking. Science of The Total Environment [online] 575. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.110. Acesso: 29 mai. 2020.

Miguez, M.G., Veról, A.P., Resende, O.M., 2015. Drenagem Urbana: Do Projeto Tradicional à Sustentabilidade, 1ed. Elsevier, Rio de Janeiro.

Mokhtar, E.S., Pradhan, B., Ghazali, A.H., Shafri, H.Z.M., 2018. Assessing flood inundation mapping through estimated discharge using GIS and HEC-RAS model. Arabian Journal of Geosciences [online] 11. Disponível: https://doi.org/10.1007/s12517-018-4040-2. Acesso: 28 mai. 2020.

Momo, M.R., Pinheiro, A., Severo, D.L., Cuartas, L.A., Nobre, A.D., 2015. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas susceptíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. Revista Brasileira de Recursos Hídricos [online] 21. Disponível: DOI: 10.21168/rbrh.v21n1.p200-208. Acesso: 20 mai. 2019.

Monte, B.E.O., Costa, D.D., Chaves, M.B., Magalhães, L.O., Uvo, C.B., 2016. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. Revista Brasileira de Recursos Hídricos [online] 21. Disponível: https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p152-167. Acesso: 20 mai. 2019.

Nkwunonwo, U.C., Whitworth, M., Baily, B., 2020. A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. Scientific African [online] 7. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00269. Acesso: 28 mai. 2020.

Paquier, A., Mignot, E., Bazin, P., 2015. From hydraulic modelling to urban flood risk. Procedia Engineering [online] 115. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.352. Acesso: 26 mai. 2020.

PMBH. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, 2002. Atlas dos Diagramas dos Canais

Revestidos do Sistema de Macrodrenagem: Bacia do Ribeirão Arrudas, 1 ed. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, Belo Horizonte.

PMSP. Prefeitura do Município de São Paulo, 1999. Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem no Município de São Paulo, 1 ed. Prefeitura Municipal de São Paulo, São Paulo.

Rafiq, F., Ahmed, S., Ahmad, S., Khan, A.A., 2016. Urban Floods in India. International Journal of Scientific & Engineering Research [online] 7. Disponível: https://www.ijser.org/researchpaper/Urban-Floods-in-India.pdf. Acesso: 26 mai. 2020.

Reis, P.A., Schmidt, M.A.R., 2017. Avaliação dos Modelos HEC-RAS e GRASS na Identificação de Áreas Vulneráveis a Inundações em Áreas Urbanas. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ [online] 40. Disponível: http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_115_126. Acesso: 20 ago. 2019.

Rincón, J.C., Pérez, M., Delfin, G., Freitez, C., Martínez, F., 2017. Análisis Comparativo entre los Modelos HEC-RAS e Iber en la Evaluación Hidráulica de Puentes. Revista Gaceta Técnica [online] 17. Disponível: DOI: 10.13140/RG.2.2.18178.68809. Acesso: 24 mai. 2020.

Sausen, T.M., Lacruz, M.S.P., 2015. Sensoriamento Remoto para Desastres, 1 ed. Oficina de Textos, São Paulo.

Serre, D., 2016. Advanced methodology for risk and vulnerability assessment of interdependency of critical infrastructure in respect to urban floods. E3S Web of Conferences [online] 7. Disponível: DOI: 10.1051/e3sconf/20160707002. Acesso: 23 mai. 2020.

Silva, R.F., Santos, V.A., Galdino, S.M.G., 2016. Análise dos Impactos Ambientais da Urbanização sobre os Recursos Hídricos na Sub-bacia do Córrego Vargem Grande em Montes Claros-MG. Caderno de Geografia [online] 26. Disponível: http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/p.2318-2962.2016v26n47p966/10148. Acesso: 19 ago. 2019.

Sousa, R.E.S., Gonçalves, G.F.G., 2018. Um estudo sobre os impactos decorrentes de inundações no município de Belo Horizonte. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental [online] 7. Disponível: http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/download/6969/4076. Acesso: 19 ago. 2019.

Souza, I.N.P., Couto, T.F., 2016. A urbanização e a percepção do lugar no córrego Jatobá, em Belo Horizonte, Minas Gerais. XVIII Encontro Nacional de Geógrafos, São Luís.

Souza, S.B., Ignácio, C.F., Carvalho, C.G.C., 2019. Área de Riscos: Pontos de Inundações Impactos no Processo de Urbanização em Campinas/SP. XVIII Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional, Natal.

Surwase, T., Manjusree, P., 2019. Urban Flood Simulation - a Case Study of Hyderabad city. National Conference on Flood Early Warning for Disaster Risk Reduction. Hyderabad.

Tanaka, L.C., 2016. Sistemas de Monitoramento e Alerta de Inundação Urbana e seus Efeitos no Desenvolvimento Local: Um Estudo Orientado pela Design Science Research. Dissertação Mestrado em Desenvolvimento Regional. Franca, Centro Universitário Municipal de Franca.

Wang, Y., Chen, A.S., Fu, G., Djordjević, S., Zhang, C., Savić, D.A., 2018. An integrated framework for high-resolution urban flood modelling considering multiple information sources and urban features. Environmental Modelling & Software [online] 107. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.010. Acesso: 02 jun. 2020.

Zhu, H., Mingming, Y., Zhu, J., Lu, H., Cao, R., 2019. Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff. International Journal of Transportation Science and Technology [online] 8. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.12.001. Acesso: 01 jun. 2020.