

ANDRÉ LUÍS TONIN

**Automatização da análise de incerteza no HEC-RAS
1D em python. Estudo de caso sobre o efeito da
dragagem em inundações urbanas.**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil. Optou-se pela escrita em formato de artigo, com publicação na modalidade de nota técnica.

Orientador: Rodrigo Cauduro Dias de Paiva

Porto Alegre, 18 de janeiro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família e namorada, alicerce para todos os momentos, seja de vitória ou derrota.

Agradeço ao meu orientador, Rodrigo, pela maestria com a ciência, orientação e inspiração.

Givin' up yourself won't set
you free.

Dream Theater

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. MOTIVAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	9
3. METODOLOGIA	11
4. MODELO HIDROLÓGICO	12
5. MODELO HIDRODINÂMICO	17
5.1. Geometria do modelo	18
5.2. Condições de contorno	21
5.3. Parâmetros computacionais	22
6. AUTOMATIZAÇÃO E RASCONTROLLER	22
7. RESULTADOS	25
8. CONCLUSÃO	32
9. REFERÊNCIAS	33

SIGLAS

API: Application Programming Interface

CN: Curve Number

DMAE: Departamento Municipal de Água e Esgoto

SIG: Sistema de Informações Geográficas

USDA: United States Department of Agriculture

Automatização da análise de incerteza no HEC-RAS 1D em python. Estudo de caso sobre o efeito da dragagem em inundações urbanas.

Autor: André Luís Tonin

RESUMO: A elaboração de modelos hidrodinâmicos exige sensibilidade do modelador no processo de escolha de parâmetros que melhor representem a realidade de determinado recurso hídrico. No entanto, cenários onde as fontes de calibração são escassas, ou até ausentes, inviabilizam a aferição destes, tornando a escolha dos valores apenas intuitiva, arbitrária e no melhor dos casos, baseados em referências bibliográficas consagradas na área. A análise de incerteza tem como premissa avaliar a sensibilidade destes parâmetros, demonstrando a influência dos valores escolhidos no resultado das simulações. O HEC-RAS possui um API, denominado RASController, que fornece sub-rotinas do programa a um script externo, possibilitando automatização de processos de simulações até então manuais. Este trabalho abordou automatizar o processo de análise de incerteza com um programa desenvolvido em linguagem de programação Python, através da interação com o RASController em um modelo HEC-RAS 1D. O estudo de caso avaliado foi a efetividade da dragagem do arroio Passo das Pedras em Porto Alegre, Brasil, no combate a inundações crônicas. Não há fontes de validação para este recurso hídrico, motivando a análise de incerteza automatizada por um script em python e convergência probabilística por Monte Carlo. Ao final das simulações, foi possível extrair conclusões através de grupos de resultados atrelados a probabilidades de ocorrência oriundos da análise de incerteza.

ABSTRACT: Hydrodynamics models require correct interpretation of a certain water body to choose the best parameters to represent its reality. However, calibration sources can be lacking, making parameter choosing rather arbitrary because the chosen values can't be validated. Uncertainty analyses' main purpose is to acknowledge how sensitive the simulation results are to these parameters. HEC-RAS has an API, called RASController, which can allow external control of some of its subroutines by a script. An application of controlling HEC-RAS via script is automating simulations parameters otherwise manually. This study automated uncertain analysis with an external program written in Python by interacting with RASController in a 1D HEC-RAS model. The case study used was the Passo das Pedras dredging, an urban stream located in Porto Alegre, Brazil, to contain chronic inundations. There are no calibration sources available to this stream, motivating uncertainty analyses by Monte Carlo and statistical convergence. By the end of simulations, the results were shown in probabilistic groups, linked to the uncertainty analyses.

Palavras-chave: HEC-RAS, Python, análise de incerteza, Monte Carlo.

1. INTRODUÇÃO

A modelagem hidrodinâmica tem como principal motivação a representatividade em ambiente computacional, com maior acurácia possível, dos diversos fenômenos físicos que regem os escoamentos em canais, cursos d'água naturais, obras hidráulicas, condutos, dentre outras entidades hídricas das mais diversas escalas, variando de pequenos bueiros até barragens de grande porte (POPESCU, 2014).

A ampla utilização de softwares capazes de executar modelos hidrodinâmicos se justifica pela capacidade destes em resolver equações hidráulicas complexas, como as de Saint-Venant através de métodos numéricos (SZYMKIEWICZ, 1991), de forma eficiente, reduzindo em grande escala a complexidade matemática de um projeto de engenharia acerca de recursos hídricos. O programa HEC-RAS (USACE, 2022b) apresenta esta capacidade de resolução de equações hidráulicas complexas em 1D e 2D, além de fornecer ao usuário as ferramentas para modelar diversas estruturas hidráulicas e interpretar modelos digitais de elevação, culminando na possibilidade de representação da calha, planícies e obras hidráulicas de um recurso hídrico em fase de diagnóstico e prognóstico. O HEC-RAS é gratuito e disponibiliza seus manuais de boas práticas e referências hidráulicas abertamente (USACE, 2022a).

Embora seja um facilitador, a correta utilização de modelos hidrodinâmicos ainda é balizada pelo usuário do programa, no qual lhe cabe a responsabilidade de garantir a estabilidade da simulação, representação correta dos dados, parametrização acurada e análise crítica dos resultados. O modelador hidráulico deve também conhecer as limitações de seu modelo em representar um fenômeno físico complexo, levando em conta suas abstrações e incertezas (ANEES et. al., 2017).

Processos de calibração podem ser efetuados para reduzir as incertezas de um determinado modelo hidrodinâmico quando dados estão disponíveis, aperfeiçoando a escolha de parâmetros. Entende-se por calibração de um modelo qualquer forma de demonstrar a representatividade de fenômenos hidráulicos reais acerca de um determinado recurso hídrico através da comparação entre resultados obtidos em ambiente computacional e dado medido in loco. Frequentemente, dados usados para calibração de modelos podem ser obtidos, mas não somente, de réguas linimétricas, marcas de inundações históricas, redes telemétricas, vazões medidas e até relatos da população local.

Um dos parâmetros mais sensíveis e fundamentais de um modelo hidrodinâmico é o valor atribuído para a rugosidade da interface de contato com água, sendo este o ‘n’ de Manning. Valores altos resultam em maior perda de carga, desacelerando o escoamento e aumentando a cota d’água para uma dada vazão, o efeito é inverso para valores baixos de rugosidade.

Na ausência de fontes de calibração, os valores ‘n’ de Manning são escolhidos através de sugestões contidas na literatura (CHOW, 1959), em intervalos. Diante disto, cria-se um patamar de incerteza na modelagem, atrelado a escolha intuitiva dos valores de rugosidade. A análise de incerteza é motivada em cenários como este, onde é de grande interesse do modelador entender as consequências de sua escolha e as ramificações que outras parametrizações descartadas desencadeariam em seus resultados.

Uma abordagem direta e sistemática para se obter grupos de resultados acompanhados de convergência estatística é através da metodologia de Monte Carlo (KROESE et. al., 2014). No caso de simulações hidráulicas, pode-se incorporar Monte Carlo na análise de incerteza dos valores para o coeficiente de rugosidade (TEIXEIRA et. al., 2018).

Diante da alta complexidade que viria a ser a inserção manual de valores de rugosidade em cada seção, para a calha e margens, além de rodar o modelo e coletar resultados, faz-se necessária automatizar o processo. O RASController é um API que faz parte do pacote de download padrão do HEC-RAS e permite a interação de scripts externos com sub-rotinas do programa (GOODELL, 2014).

Trabalhos inovadores vêm aplicando a automatização do HEC-RAS com scripts em Python (PYTHON, 2022) para finalidades diversas, exemplos de OLIVEIRA, (2021); PHILLIPPUS et. al., (2020) e DYSARZ, (2018). Um programa disponível gratuitamente, como um pacote para automatizar algumas análises de sensibilidade e análise de incertezas no HEC-RAS é o AHYDRA (VLADYMAN, 2011), dispensando o modelador hidráulico de precisar programar suas ferramentas. O controle externo ao HEC-RAS, utilizando o RASController, também possibilitou aplicações no que tange o ajuste de modelos em tempo real, com a finalidade de prever vazões, conforme modelo feito para o baixo Iguaçu por SIQUEIRA et. al. (2016). Devido à proficiência do autor, foi desenvolvido um script em Python para o estudo de caso da dragagem do arroio Passo das Pedras e seu papel em inundações urbanas.

2. MOTIVAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Localizado na zona norte de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, o arroio Passo das Pedras é um sistema de macrodrenagem com mais de 20 km² de área de contribuição e aproximadamente 10 km de extensão (Figura 1). Não há nenhuma fonte de calibração em toda sua extensão, justificando sua escolha como estudo de caso para a análise de incerteza. Inundações deste recurso hídrico são frequentes, acarretando transtorno a moradores nas áreas circundantes. Serviços de dragagem tiveram ordem de início ao final de 2021, contemplando os últimos 5 km deste arroio, na tentativa de remediar inundações crônicas. Este estudo buscou quantificar as melhorias na capacidade de escoamento resultante desta intervenção através de simulações hidrodinâmicas 1D no HEC-RAS, juntamente com análise de incerteza.

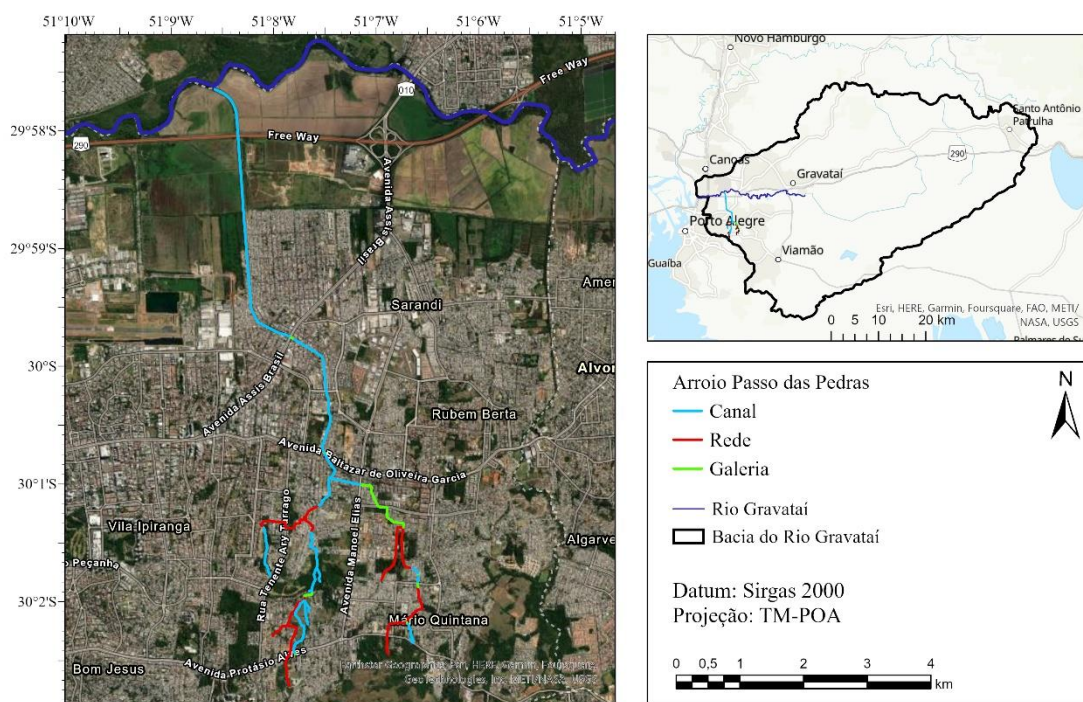


Figura 1 – Localização do arroio Passo das Pedras e sua contextualização na bacia do rio Gravataí.

O devido controle e manejo de sistemas de macrodrenagem são importantes para garantir o direcionamento adequado do escoamento, principalmente durante chuvas intensas (TUCCI et. al., 2015). Dependendo do aporte de sedimentos específico de cada sistema hidrológico, juntamente com a energia do escoamento presente nos canais, processos erosivos ou de assoreamento podem ser desencadeados (JULIEN, 2018). Em

casos em que sistemas de drenagem tendem a assorear, dragagens periódicas podem ser realizadas com a finalidade de reduzir a perda de seção hidráulica e consequentemente capacidade de escoamento.

Ao final de 2021, três licitações foram realizadas pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), consolidando contratações de serviços de dragagem para arroios e valas urbanas nas zonas norte, leste e sul de Porto Alegre. O contrato da zona norte engloba o arroio Passo das Pedras e o lista como prioritário para receber os serviços de dragagem devido a sua alta frequência de transbordo, com incidências anuais em pontos críticos (DMAE, 2021a). A demanda da quantidade de material a ser dragada foi levantada pelos engenheiros do DMAE durante escolta visual pelas margens do arroio e contempla estimativas de volume e rebaixamento da calha, sendo especificados por trecho (DMAE, 2021b). Com objetivo de recuperar sua área hidráulica conforme apresentado em seu plano diretor de bacia (IPH, 2002), estimou-se que 47 mil m³ de material deverão ser removidos do arroio Passo das Pedras, pareado com o rebaixamento de 30 centímetros a 1 metro de sua calha (Tabela 1).

Trecho	Profundidade a ser dragada (m)	Volume a ser dragado (m³)
Foz Rio Gravataí até Ponte Condomínio Landell.	1,00	8940,00
Ponte Condomínio Landell até Viaduto BR 290.	1,00	4122,30
Viaduto BR 290 até Casa de bombas 10. Casa de bombas 10 até ponte Av. dos Gaúchos.	1,00	14485,68
Av. dos Gaúchos até Ponte Av. Francisco Pinto da Fontoura.	1,00	12432,96
Av. Francisco Pinto da Fontoura até Ponte Bento Rosa.	1,00	2602,60
Ponte Bento Rosa até Av. Assis Brasil.	1,00	922,09
Av. Assis Brasil até Rua Zeferino Dias.	1,00	1296,12
	0,30	183,84

Rua Zeferino Dias até Rua Ararás.	0,30	275,99
Rua Ararás até Ponte Alameda Gal.		
Raphael Zippin.	0,30	1318,05

Tabela 1 – Quantitativos de dragagem levantados pelo DMAE.

Funcionando a nível operacional, não existe nenhum estudo hidrodinâmico que correlacione os serviços de desassoreamento da calha do arroio Passo das Pedras com melhoria de escoamento de forma quantitativa, motivando o atual estudo a preencher esta lacuna de conhecimento.

3. METODOLOGIA

A abordagem para entender o efeito da dragagem no escoamento do arroio Passo da Pedras começou analisando os mecanismos de deflúvio de sua bacia através de um modelo chuva-vazão. Os hidrogramas de projeto foram gerados para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

A representação dos dados batimétricos do arroio em ambiente computacional procedeu através da impressão das seções levantadas pelo plano diretor de bacias de Porto Alegre (IPH 2002) em um modelo digital de terreno recortado da bacia. No cenário em que o arroio é avaliado no seu estado assoreado, estes dados batimétricos foram tratados conforme a especificação de profundidades a serem dragadas (Tabela 1), sendo as cotas da calha do arroio, referentes ao fundo, elevadas (Figura 2).

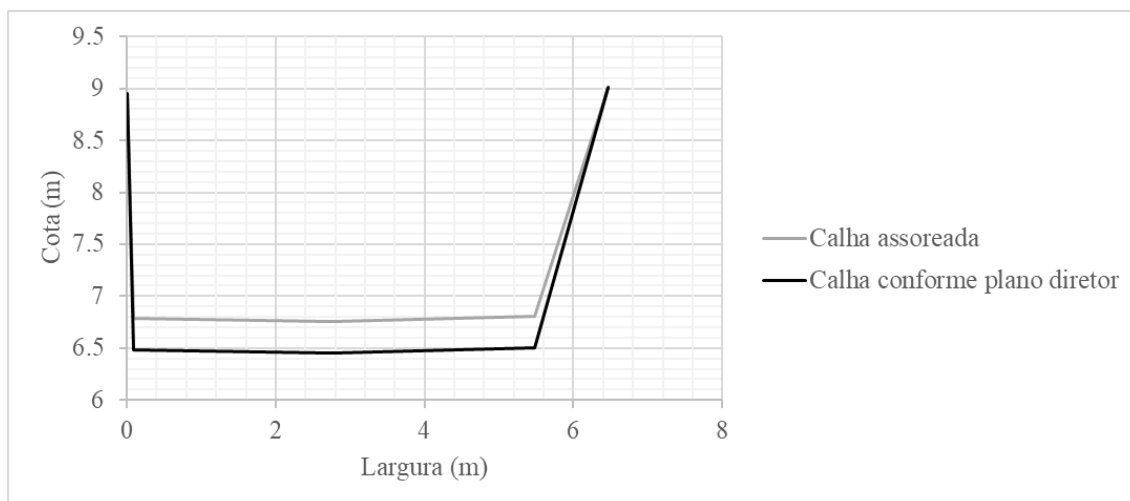


Figura 2 – Metodologia aplicada para elaboração do cenário assoreado. Seção de exemplo encontrada 60 metros a jusante da travessia Raphael Zippin, assoreada em 30 cm.

Inicialmente, os valores de rugosidade ‘n’ de Manning foram especificados no modelo conforme o material do leito da seção, de acordo com recomendações encontradas em CHOW, (1959). A análise de incerteza foi empregada nesse momento, através de perturbações pontuais nesses valores de rugosidade em ciclos de simulações para cada tempo de retorno nos cenários em que o arroio estava assoreado e dragado. Estas perturbações ocorreram dentro de uma faixa de valores para cada ‘n’ de Manning possuindo média, desvio padrão e distribuição normal. As simulações foram controladas externamente ao HEC-RAS por um script escrito na linguagem de programação Python, conectado ao API denominado RASController. O produto desta análise de incerteza foi um grupo de simulações para cada tempo de retorno nos cenários assoreados e dragados.

Os resultados foram avaliados através da comparação entre os cenários de assoreamento e dragado em relação à frequência na qual o nível d’água supera a cota superior das pontes e das margens em regiões consideradas críticas, representando falha na capacidade de drenagem do sistema, acarretando inundações. Outros produtos das simulações como o perfil longitudinal, mapas de inundação e influência das travessias também foram avaliados para a conclusão final, juntamente com o papel desempenhado pela análise de incerteza.

4. MODELO HIDROLÓGICO

A delimitação da bacia hidrográfica do arroio Passo das Pedras foi realizada pelo plano diretor de bacias em 2002 (IPH, 2002). O atual estudo usou esta base de dados,

porém efetuou uma correção na delimitação da bacia que se mostrou necessária devido ao fato de que um afluente de área de drenagem considerável, chamado arroio Passo da Mangueira, deixou de fazer parte da bacia do arroio Passo das Pedras na segunda metade do ano de 2013, sendo desviado para a bacia do arroio Areia devido às obras de ampliação da malha viária circundante. A base de dados utilizada nessa nova delimitação de bacia foi da Copernicus (ESA, 2014), em ambiente SIG, culminando na identificação da antiga contribuição da bacia do arroio Passo da Mangueira e separando-a da bacia do arroio Passo das Pedras (Figura 3), agora com 20,25 km² de área.

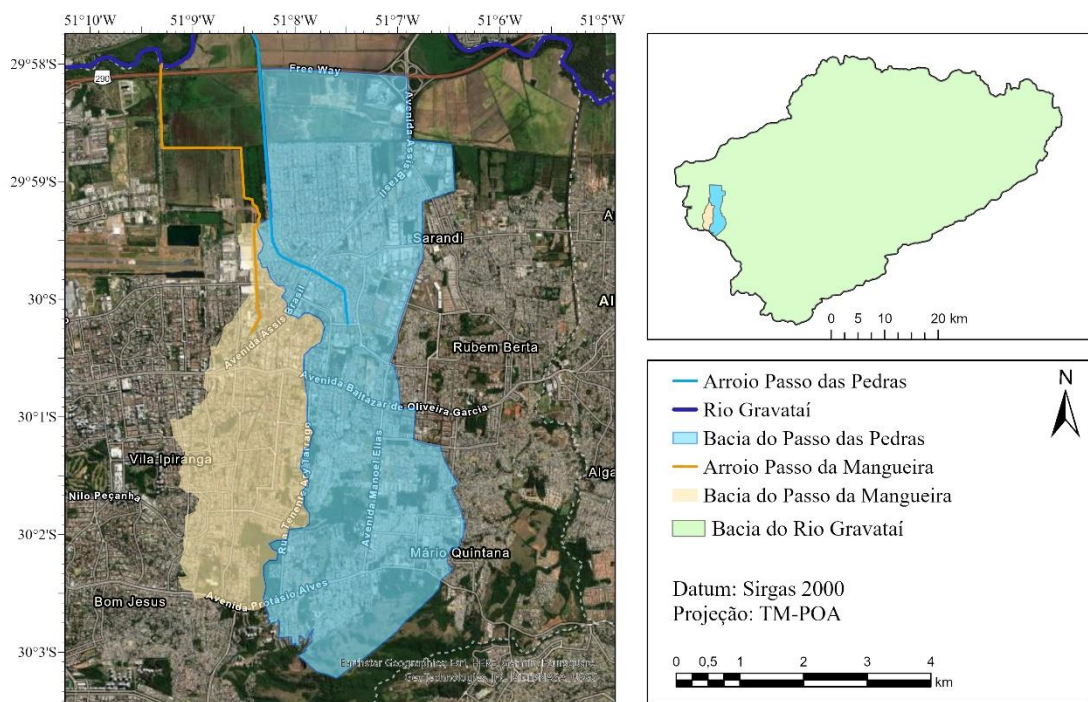


Figura 3 – Delimitação da bacia do arroio Passo das Pedras e atualização de seu perímetro.

Uma bacia hidrográfica pode ser compreendida como um operador de chuvas, separando a precipitação em escoamentos que infiltram, escoam superficialmente e depositam. A importância da compreensão destes processos particularizados para cada bacia reside na necessidade do manejo correto dos recursos hídricos e convívio harmonioso com estes. Uma metodologia amplamente difundida e usada para descrever os mecanismos de deflúvio de bacias hidrográficas é o modelo hidrológico sintético da SCS (Soil Conservation Service) (SCS, 1971). Este modelo foi previamente usado para a

elaboração do plano diretor da bacia arroio Passo das Pedras (IPH, 2002) e foi usado novamente no escopo do atual estudo.

A separação do volume precipitado entre parcela infiltrante e superficial é realizada através de um parâmetro CN. Este valor representa a impermeabilidade do solo, sendo valores mais altos utilizados para representar solos com baixa capacidade de infiltração. A metodologia do SCS disponibiliza recomendações contidas em sua literatura clássica para a escolha de valores de CN. Este estudo utilizou a TR-55 da USDA (SCS, 1986) para a seleção de valores representativos de CN.

Estudos hidrológicos prévios realizados para a bacia do rio Gravataí (METROPLAN, 2017) levantaram dados das características do solo na região. O presente estudo dispõe destes dados em formato propício de serem trabalhados em ambiente SIG, sendo possível a discretização da área de cada tipo de solo e seu uso contido na bacia do arroio Passo das Pedras

Uso do solo	Tipo de solo	Área (ha)	Ponderação*	CN**
Área Urbana	C	1131,09	56,60%	90
Campo	C	415,22	20,78%	79
Lavoura	C	10,89	0,54%	80
Mata	C	64,62	3,23%	70
Solo	C	19,77	0,99%	91
Área Urbana	D	100,78	5,04%	92
Campo	D	3,43	0,17%	84
Lavoura	D	205,56	10,29%	84
Mata	D	2,25	0,11%	77
Solo	D	44,61	2,23%	94
*Ponderação realizada conforme a área.			CN Final:	86,57

**Conforme recomendações de TR-55 USDA.

Tabela 2 – Resumo da análise de CN para a bacia do arroio Passo das Pedras.

O tempo de concentração é o intervalo temporal em que toda área da bacia está contribuindo para a vazão no exutório. Outra maneira de interpretar o tempo de

concentração é através do tempo em que o escoamento superficial mais distante do exutório da bacia leva para chegar até este (TUCCI, 1993).

O cálculo do tempo de concentração para a bacia do Passo das Pedras usou a fórmula de Carter (Equação 1). Esta fórmula foi selecionada por possuir melhor desempenho para bacias urbanas em relação a outras fórmulas de tempo de concentração (SILVEIRA, 2005).

$$Tc = 5,96 \cdot \frac{L^{0,6}}{S^{0,3}} \quad \text{Equação (1) – Tempo de concentração por Carter.}$$

Onde Tc é o tempo de concentração em minutos, L é o comprimento do curso d'água principal em km e S é a declividade adimensional do curso d'água principal.

O tempo de concentração foi calculado em 113 minutos para a bacia do arroio Paso das Pedras.

A metodologia do SCS para transformar precipitação em escoamento superficial requer um hietograma de projeto onde os blocos de chuva são organizados de maneira alternada, possuindo o maior incremento de chuva durante a metade do evento de tormenta. A forma padrão de se obter esse hietograma é através de estudos regionais que analisam os dados de postos pluviométricos locais estatisticamente. O tratamento estatístico dos dados resulta em uma equação I-D-F (Intensidade Duração Frequência) (Equação 2) particularizada para o entorno do posto analisado, capaz de relacionar a duração e tempo de retorno da tormenta com uma intensidade de chuva.

$$I = \frac{a \cdot Tr^b}{(td+c)^d} \quad \text{Equação (2) – I-D-F.}$$

Onde I é a intensidade de chuva em mm/hora, Tr é o tempo de retorno em anos, td é a duração da chuva em minutos e 'a', 'b', 'c' e 'd' são coeficientes de ajuste calculados para o perfil de chuva específico de uma região.

Para a bacia do arroio Passo das Pedras, percebe-se a proximidade de dois postos pluviométricos com equações I-D-F ajustadas, sendo estas as equações do aeroporto Salgado Filho e do IPH (Agronomia) (DEP, 2005). Para determinar a influência de cada posto na bacia do arroio, polígonos de Thiessen (TUCCI, 1993) foram gerados com a finalidade de identificar a área de abrangência de cada equação I-D-F. Prosseguindo o estudo de chuva, foi necessário determinar a duração do evento de tormenta que ocasiona o maior pico de vazão para a bacia do arroio Passo das Pedras. Sabe-se que a escolha desta duração deve ser no mínimo o tempo de concentração da bacia, podendo ser relativamente maior (TUCCI, 1998).

A escolha das durações totais dos eventos de chuva para cada tempo de retorno foi aquela que resultou no maior escoamento superficial, constituída por blocos incrementais de chuva com um quinto da duração total do evento (TUCCI, 1998). Em seguida, os eventos foram ponderados pela área de influência de cada posto, conforme os polígonos de Thiessen. O resultado é uma compilação (Tabela 3) de durações totais de eventos de chuva que maximizam a vazão de pico para cada tempo de retorno utilizado.

TR (anos)	Duração total (min)	Duração de cada bloco (min)	Vazão máxima (m³/s)
2	190	38	35,03
5	180	36	46,23
10	170	34	56,56
25	160	32	73,09
50	150	30	88,10
100	150	30	105,63

Tabela 3 – Síntese das durações totais e por intervalos das chuvas de projeto para cada tempo de retorno.

Observa-se que a distribuição de chuva não é equivalente em termos de intensidade em toda a área em que ocorre precipitação, sendo mais intensa em um núcleo e decaindo radialmente conforme se afasta deste núcleo. Este fenômeno não é impactante para bacias de menor áreas, normalmente inferiores à 25 km² (TUCCI, 1998), como é o caso da bacia do arroio Passo das Pedras.

Os hidrogramas resultantes do estudo hidrológico (Figura 4) foram usados nas simulações hidrodinâmicas como base para condições de contorno de montante.

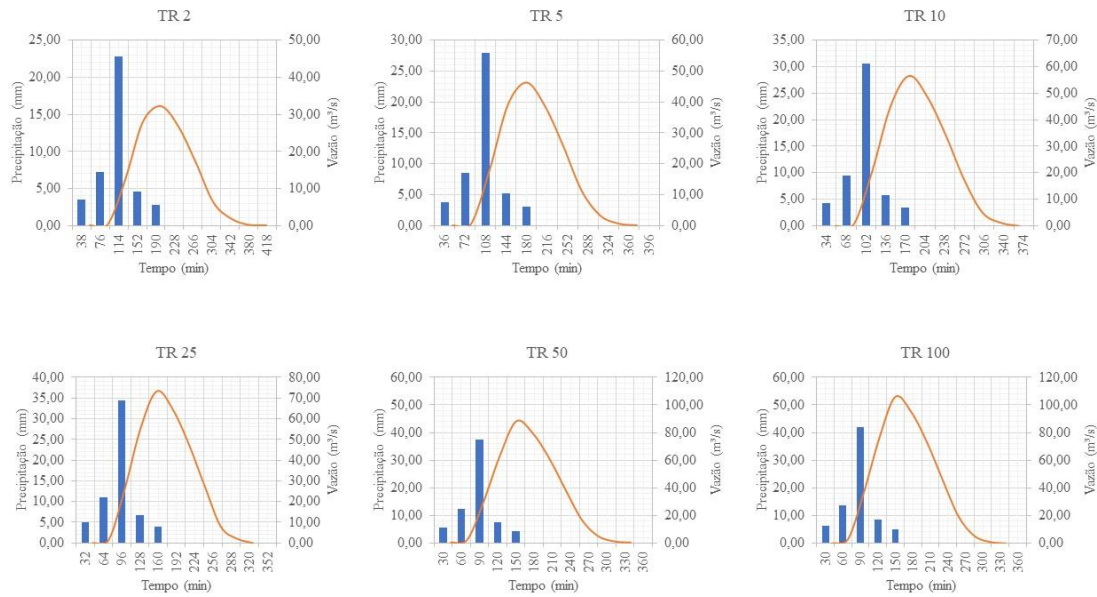


Figura 4 – Hietogramas e hidrogramas de projeto para cada tempo de retorno.

5. MODELO HIDRODINÂMICO

A simulação do escoamento no arroio Passo das Pedras aconteceu de maneira unidimensional no programa HEC-RAS (USACE, 2022b). O conjunto de equações (Equações 3 e 4) utilizado pelo HEC-RAS em simulações unidimensionais em regime não permanente foi elaborado primeiramente por Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant (SAINT-VENANT, 1871).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Equação (3) – Continuidade.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f$$

Equação (4) – Conservação de momento.

Onde $\frac{\partial A}{\partial t}$ é a variação do armazenamento, $\frac{\partial Q}{\partial x}$ é a variação na vazão, q é a contribuição lateral, $\frac{\partial Q}{\partial t}$ é a variação da vazão no tempo, $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)$ é o fluxo advectivo, $gA \frac{\partial h}{\partial x}$ é o termo de pressão, gAS_0 é o termo de gravidade e gAS_f representa o atrito.

Dentre as metodologias de modelagem para estruturas hidráulicas disponíveis no HEC-RAS, a escolhida neste estudo para representar as pontes foi a *energy step*, metodologia padrão do programa. A solução numérica é alcançada por um balanço de energia da equação de Bernoulli (NETTO & FERNANDEZ, 2015).

5.1. Geometria do modelo

O HEC-RAS interpreta dados de relevo, batimetria e rugosidade através de uma geometria desenvolvida pelo usuário. Esta geometria é constituída de linhas que representam o eixo do recurso hídrico analisado, suas margens, estruturas hidráulicas, sentidos de fluxo e seções transversais no caso de modelos unidimensionais.

O terreno utilizado como base é um modelo digital de superfície (MDS) com 2,5 metros de resolução para todo estado do Rio Grande do Sul, desenvolvido pela Infraestrutura Estadual de Dados Espaciais (IEDE, 2021). Os dados de batimetria do arroio foram inseridos em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) neste terreno, originários das seções encontradas no plano diretor de bacias de Porto Alegre para a bacia do arroio Passo das Pedras.

No caso deste estudo a respeito do arroio Passo das Pedras, a montagem da geometria abrange unicamente os trechos selecionados como prioritários para a dragagem, tendo início a jusante da ponte da Avenida Raphael Zippin e término em sua foz, na confluência com o rio Gravataí (Figura 5).

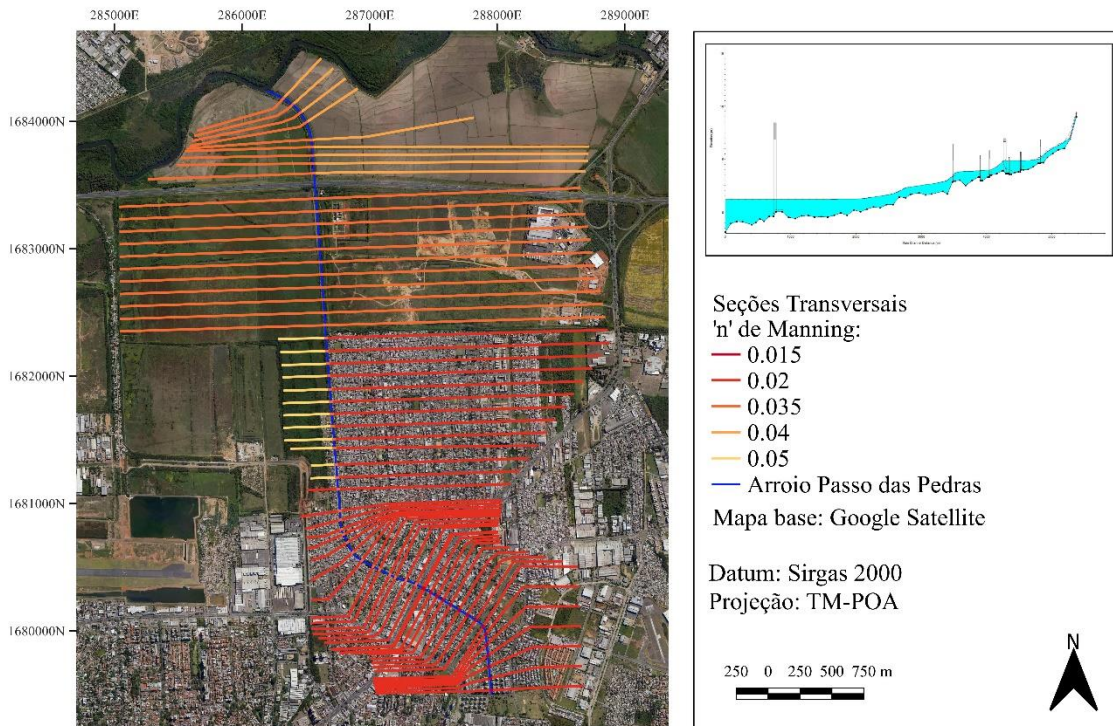


Figura 5 – Geometria do modelo HEC-RAS 1D. Representação das seções e do perfil longitudinal.

Os valores para a rugosidade ‘n’ de Manning foram selecionados conforme o material do leito (Tabela 4), sendo esta escolha balizada pelas boas práticas de modelagem hidráulica encontradas em literaturas consolidadas nesta área (CHOW, 1959).

Característica do terreno	Valor 'n' de Manning
Calha do canal natural.	0,035
Canal canalizado em concreto.	0,015
Plantação de arroz (estágio de colheita).	0,04
Planície com grama alta.	0,035
Planície mais densa com vegetação de médio porte e árvores esparsas.	0,05
Zonas urbanizadas englobando estradas e calçadas.	0,02

Tabela 4 – Escolha inicial dos valores para ‘n’ de Manning conforme o material do fundo.

Além dos dados de terreno e batimetria discutidos até então, oito pontes que atravessam diretamente o arroio Passo das Pedras no trecho de estudo foram inseridas na geometria do modelo (Figura 6). A representação de pontes é importante para garantir a qualidade do modelo hidrodinâmico, uma vez que participam do sistema de escoamento gerando remansos e possíveis pontos de estrangulamento, principalmente quando o arroio está em situação de transbordo eminente e a água começa a interagir com o tabuleiro (ATABAY & SECKIN, 2011). Os dados cadastrais (Tabela 5) destas pontes foram adquiridos juntamente com os de batimetria do arroio Passo das Pedras no mesmo levantamento realizado para embasar o plano diretor de sua bacia.

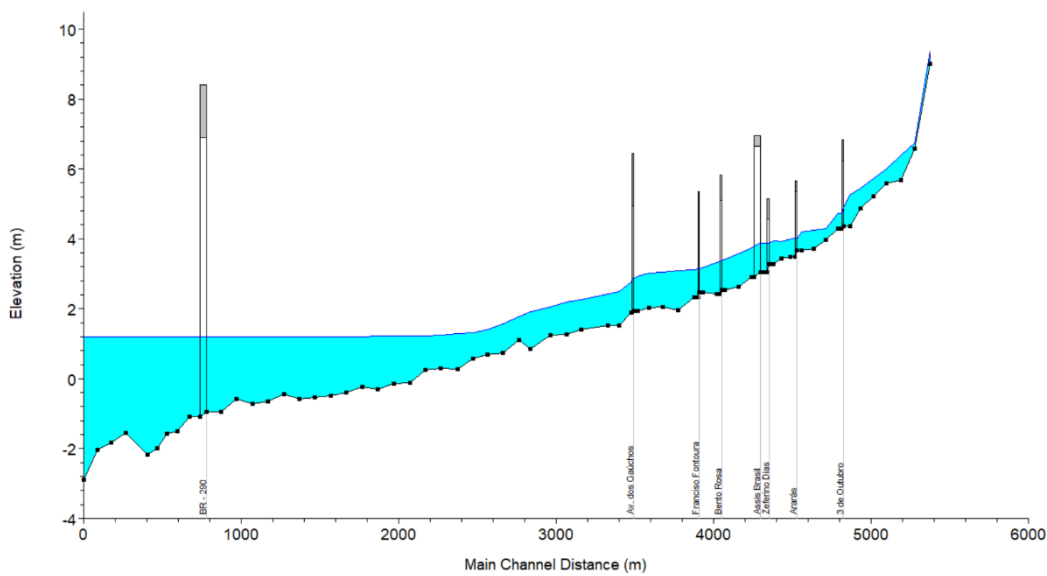


Figura 6 – Perfil longitudinal do arroio Passo da Pedras com as pontes modeladas. Vazão exemplo de 2 m³/s.

Rua/Avenida da Ponte	Largura (m)	Cota de topo (m)	Cota de base (m)	Largura do Vão (m)
Três de Outubro	10,6	7,01	6,41	6,89
Ararás	13,1	5,65	5,35	7,68
Zeferino Dias	17,3	5,16	4,56	8,51
Assis Brasil	41,1	6,94	6,64	8,20
Bento Rosa	12,2	5,81	5,11	10,00
Francisco da Fontoura dos Gaúchos	10,0	5,36	5,06	5,15
BR - 290	7,6	6,45	4,95	8,14
	40,6	8,41	6,91	23,00

Tabela 5 – Resumo dos dados cadastrais de cada ponte inserida no modelo.

O espaçamento entre as seções transversais seguiu uma média de 100 metros, com exceções sendo encontradas em trechos onde ocorre mudanças na forma do leito em poucos metros e nas proximidades de pontes.

5.2. Condições de contorno

No mínimo duas condições de contorno devem ser fornecidas ao modelo computacional para viabilizar a simulação hidrodinâmica. No caso do modelo hidráulico realizado para o arroio Passo das Pedras, a bacia de contribuição da primeira seção do modelo (seção mais a montante) representa 53% da área de drenagem total da bacia, portanto cada hidrograma de projeto oriundo do estudo hidrológico foi ponderado por esta fração antes de ser inserido como condição de contorno de montante. Seis condições de contorno adicionais foram criadas no modelo, possuindo espaçamento relativamente uniforme entre si, para receber valores incrementais de vazão que, quando acumulados com a condição de montante, representam o deflúvio total da bacia do arroio Passo das Pedras.

Em relação à condição de jusante, foi utilizado dado de cota de 1,2 metro em todos os cenários. De acordo com o próprio estudo do plano diretor de bacias (IPH, 2002), este trecho do rio Gravataí é fortemente influenciado pelo remanso do lago Guaíba, no qual teve seus dados de cotas analisados, concluindo-se grande inércia do nível d'água para sair de valores de cotas próximos à 1,2 metro. Ressalta-se neste momento que o remanso causado em situações de cheia no rio Gravataí é um fator que deve ser estudado para conhecer propriamente algumas condições críticas que possam vir a dificultar a drenagem

do arroio Passo das Pedras, relacionando hidrogramas de projeto de ambas as bacias mencionadas em diferentes combinações. No entanto, para avaliar a influência da dragagem no escoamento do arroio, seguiu-se a metodologia utilizada no plano de bacias, mantendo a condição de remanso como um controle no lugar de uma variável adicional.

5.3. Parâmetros computacionais

A resolução das equações hidrodinâmicas pelo HEC-RAS acontece em intervalos temporais especificados pelo usuário (USACE, 2022b). Uma forma de garantir melhor estabilidade no modelo, além de evitar redundância computacional, é especificar valores de Courant (CASULLI & CHENG, 1990) máximos e mínimos permitidos durante a simulação. Quando os patamares especificados forem superados, o intervalo computacional é dobrado, no caso em que o valor de Courant é menor que o mínimo ou dividido pela metade quando se encontrar acima do máximo. Este processo ocorre dinamicamente durante a simulação, partindo de um valor base especificado pelo usuário.

Tratando-se das simulações do presente estudo, o valor base para o intervalo computacional foi de 20 segundos, sendo iterado em até 4 vezes nos casos em que os valores de Courant se encontrarem fora do patamar especificado, sendo estes entre 0,3 e 1.

6. AUTOMATIZAÇÃO E RASCONTROLLER

O programa HEC-RAS tem em seu pacote de download um API que permite o usuário se conectar através de programas externos, tendo acesso a algumas sub-rotinas presentes no programa (GOODELL, 2014). Como a convergência estatística por Monte Carlo necessita de muitas simulações para ser alcançada (LERCHE & MUDFORD, 2005), automatizar este processo é de grande utilidade.

O script de automatização foi desenvolvido em Python e começa na coleta de planos presentes no projeto do HEC-RAS, especificado pelo usuário, e finaliza na coleta de resultados das simulações realizadas, automatizando todas as etapas intermediárias (Figura 7 e Figura 8).

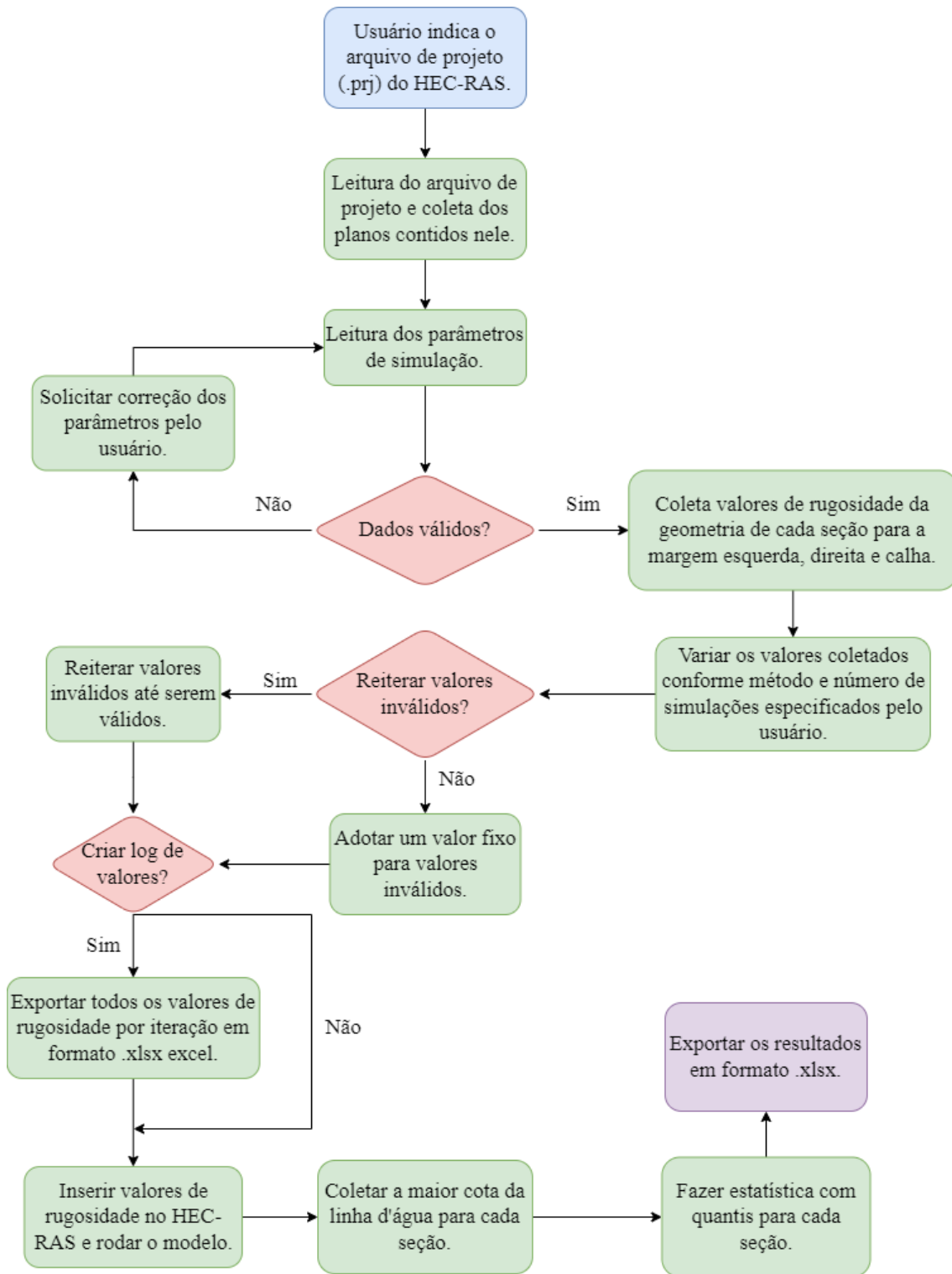


Figura 7 – Algoritmo do script desenvolvido em Python com a finalidade de controlar e automatizar a análise de incerteza de maneira externa ao HEC-RAS.

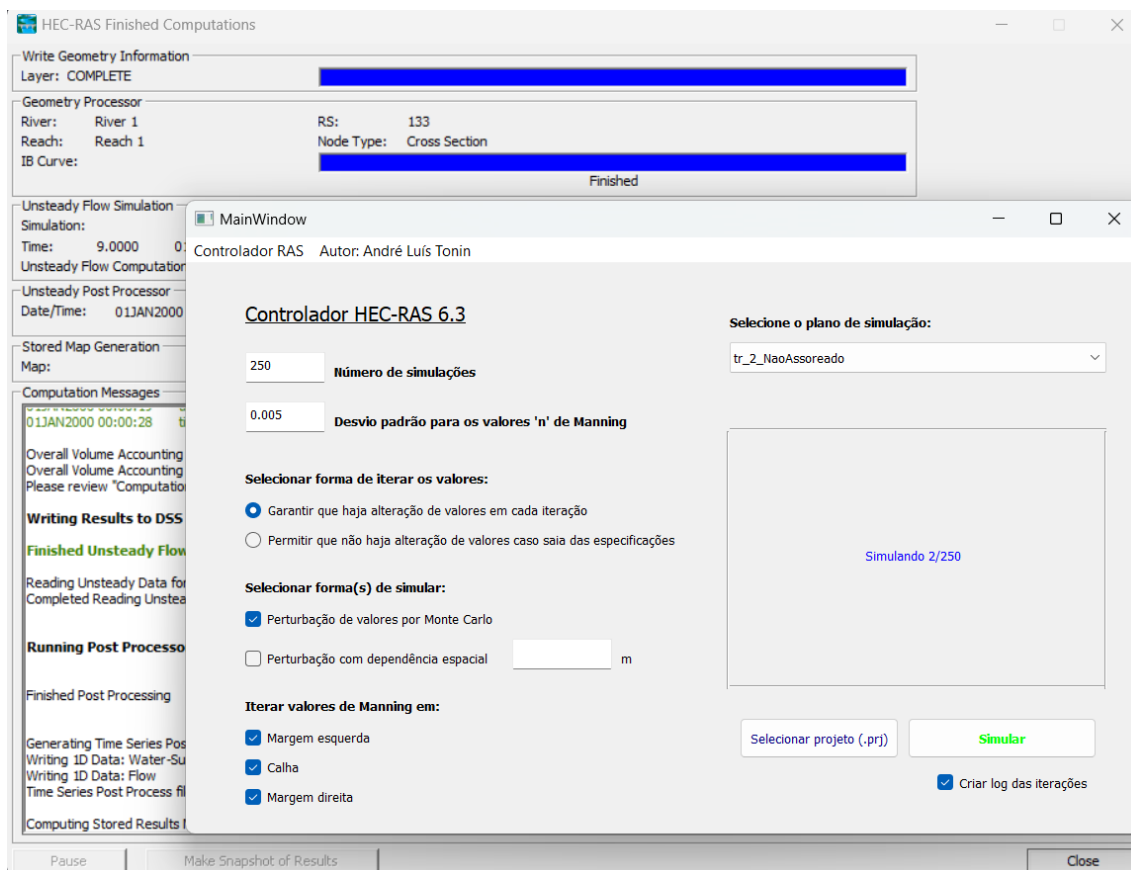


Figura 8 – Interface do programa e janela computacional do HEC-RAS sendo solicitada pelo script.

O usuário do programa pode selecionar um ou mais métodos encarregados da variação dos coeficientes de rugosidade ‘n’ de Manning, além de especificar se alguma das margens ou calha será excluída da análise.

Maiores detalhes a respeito dos algoritmos e funcionamento do programa estão contidos junto a sua interface, sendo acessíveis ao se clicar nos botões de ‘tutorial’ e ‘sobre’ nas abas superiores.

A metodologia de simulação escolhida foi variar de maneira independente todos os valores de rugosidade de todas as seções nas margens esquerda, direita e calha. A especificação do desvio padrão foi de 0,005 para a perturbação estatística dos valores de rugosidade, valor que normalmente baliza intervalos superiores e inferiores para um determinado material de fundo na literatura (CHOW, 1959). Foi decidido pela reiteração de valores inválidos, sendo estes inferiores a 0,009. Este limiar foi escolhido se baseando no fato de que não ocorre valores inferiores a esse para rugosidade na literatura. A especificação deste patamar inferior também garantiu a estabilidade do modelo,

funcionando como filtro caso o resultado da iteração seja valores baixos ou negativos. Ao todo, 250 simulações foram realizadas para cada tempo de retorno nos cenários assoreados e dragados, buscando convergência estatística (Figura 9).

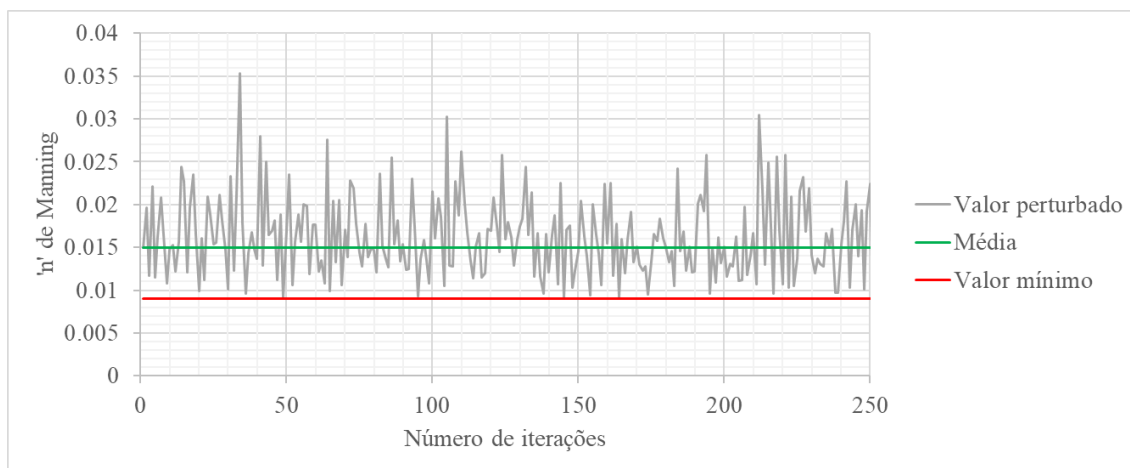


Figura 9 – Variação dos coeficientes de rugosidade ‘n’ de Manning. Exemplo de seção canalizada em concreto.

7. RESULTADOS

A dragagem do arroio Passo das Pedras teve como principal objetivo reduzir a frequência de inundações crônicas que acarretam transtornos anualmente nos entornos deste sistema de macrodrenagem. As localidades com mais deficiência de escoamento, tidas como críticas, situam-se no trecho do arroio delimitado pela Av. Raphael Zippin até a Av. dos Gaúchos.

O primeiro ponto avaliado para quantificar a performance do serviço de dragagem em reduzir inundações crônicas foi comparar os quantis dos valores de cota da linha d’água nos cenários com assoreamento (Tabela 6) e dragado (Tabela 7) no trecho mais crítico, sendo este entre as pontes da rua Zeferino Dias e Ararás (Figura 10 e Figura 11). A cota de transbordo deste ponto é de 5,22 metros.

Quantil	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
1	6,01	6,37	6,43	6,72	6,96	7,22
5	6,06	6,37	6,44	6,73	6,97	7,24
10	6,06	6,38	6,45	6,73	6,98	7,24
25	6,07	6,38	6,46	6,74	6,99	7,25
50	6,07	6,39	6,47	6,76	7,00	7,27
75	6,08	6,39	6,48	6,77	7,02	7,29
90	6,09	6,40	6,49	6,78	7,02	7,30
95	6,09	6,40	6,50	6,78	7,03	7,31
99	6,11	6,41	6,51	6,80	7,06	7,31

Tabela 6 – Cotas em metros de cada quantil para o cenário com assoreamento no trecho mais crítico.

Quantil	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
1	5,64	5,81	6,01	6,32	6,51	6,80
5	5,64	5,81	6,02	6,33	6,53	6,82
10	5,65	5,82	6,03	6,34	6,54	6,83
25	5,65	5,83	6,04	6,35	6,56	6,85
50	5,66	5,84	6,05	6,36	6,58	6,87
75	5,68	5,85	6,06	6,38	6,60	6,90
90	5,69	5,86	6,08	6,39	6,61	6,91
95	5,70	5,86	6,09	6,40	6,62	6,92
99	5,71	5,88	6,10	6,43	6,63	6,93

Tabela 7 – Cotas em metros de cada quantil para o cenário dragado no trecho mais crítico.



Figura 10 – Região com alta incidência de transbordo no arroio Passo das Pedras. Fonte do mapa base: Google Satellite.



Figura 11 – Inundação no trecho crítico em agosto de 2021, vista para a ponte da Zeferino Dias, a jusante. Foto retirada do Jornal do Comércio em novembro de 2022 (JORNAL DO COMÉRCIO, 2021).

Foi possível constatar uma grande deficiência na capacidade de escoamento nos trechos mais vulneráveis do arroio, sendo esta alheia aos serviços de dragagem. A calha do arroio Passo das Pedras é canalizada em concreto no local com maior incidência de transbordo, delimitado pelas pontes Ararás a montante e Zeferino Dias a jusante. Mesmo em situações nas quais foram testados hidrogramas de projeto para tempos de retorno baixos (2 e 5 anos), o sistema de drenagem falha em transportar a parcela superficial na chuva, desencadeando inundações em 100% dos casos.

Outro ponto avaliado foi a incidência de transbordo em cada travessia contida no modelo, excluindo somente a BR-290 pelas elevadas cotas de base e topo, para os cenários de assoreamento (Tabela 8) e dragado (Tabela 9). Estes resultados foram obtidos através da convergência numérica de 250 simulações pela metodologia de Monte Carlo e são exibidos para os diferentes tempos de retorno.

Ponte	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
Três de Outubro	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Ararás	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Zeferino Dias	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Assis Brasil	0%	0%	0%	0%	85%	100%
Bento Rosa	0%	0%	0%	100%	100%	100%
Franciso Pinto Fontoura	0%	0%	100%	100%	100%	100%
dos Gaúchos	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 8 – Incidência de transbordo das travessias no cenário com assoreamento.

Ponte	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
Três de Outubro	0%	100%	100%	100%	100%	100%
Ararás	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Zeferino Dias	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Assis Brasil	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Bento Rosa	0%	0%	0%	0%	100%	100%
Franciso Pinto Fontoura	0%	0%	0%	55%	100%	100%
dos Gaúchos	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 9 – Incidência de transbordo das travessias no cenário dragado.

O desassoreamento do arroio evitou inundações de 2 anos de tempo de retorno na ponte Três de Outubro, porém esta travessia sofre transbordo a partir de 5 anos de tempo de retorno independentemente do desassoreamento da calha. A travessia Franciso Pinto Fontoura deixa de sofrer inundações com 10 anos de tempo de retorno para ter com 25 anos de tempo de retorno após o serviço de dragagem, enquanto a travessia Bento Rosa deixa de inundar com 25 anos de tempo de retorno para começar com 50 anos de tempo de retorno. A travessia dos Gaúchos não sofre inundação em nenhum cenário avaliado.

Outro benefício oriundo dos serviços de dragagem é a proteção da travessia da avenida Assis Brasil, de grande importância para a malha viária de Porto Alegre, contra inundações. O arroio assoreado se demonstrou como um cenário propício para que a linha d'água alcance o pavimento em cheias com tempo de retorno de 50 e 100 anos. Tal evento não se mostrou possível após o desassoreamento do arroio Passo das Pedras.

Além dos resultados numéricos apresentados através das cotas da linha d'água em seções de interesse, foi possível mapear a área de inundação através de zonas probabilísticas, produto das simulações por Monte Carlo (Figura 12).

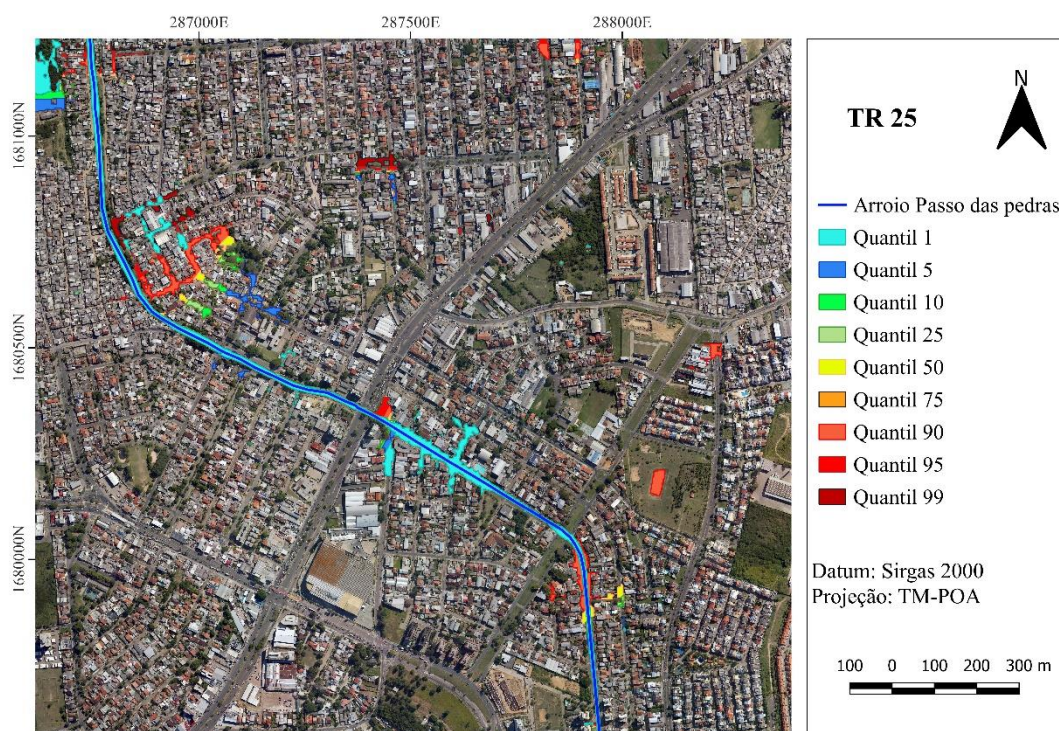


Figura 12 – Zoneamento probabilístico na área inundada para 25 anos de tempo de retorno.

Por fim, avaliou-se o perfil longitudinal do arroio, comparando as cotas das linhas d'água dispostas em quantis nos cenários com assoreamento (Figura 13) e após a dragagem (Figura 14).

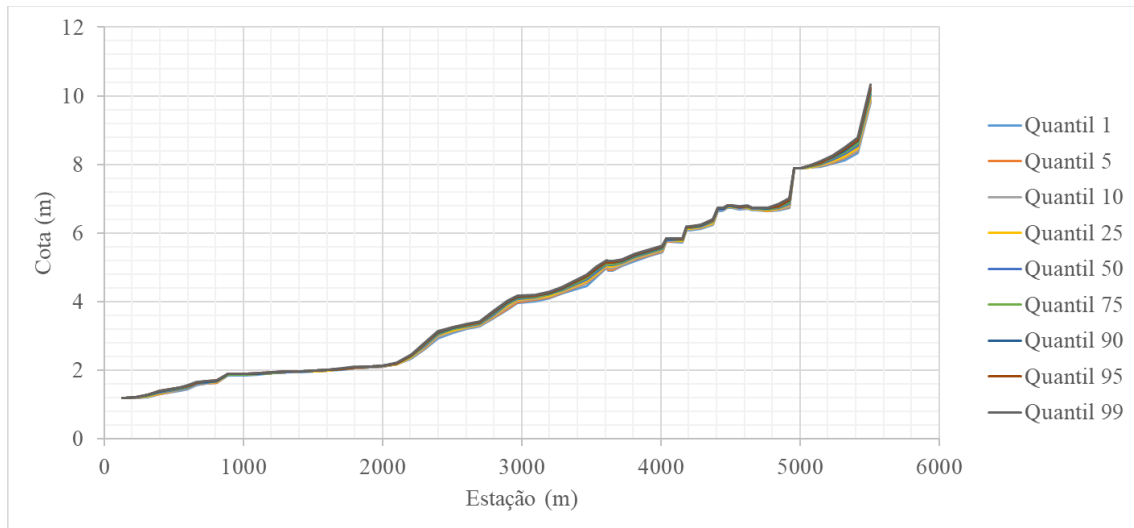


Figura 13 – Perfil longitudinal do arroio para situação de assoreamento. Exemplificando com 25 anos de tempo de retorno.

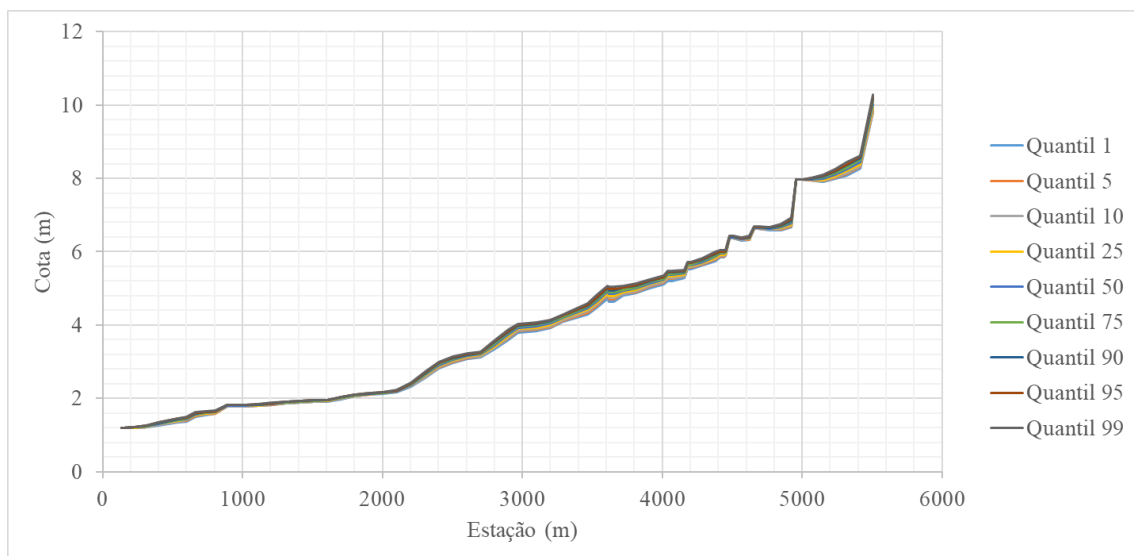


Figura 14 – Perfil longitudinal do arroio para situação dragado. Exemplificando com 25 anos de tempo de retorno.

Observou-se grande influência de remansos causados pelo rio Gravataí e travessias no escoamento do arroio Passo das Pedras. No caso do rio Gravataí, partindo da premissa de cota fixa de 1,2 metro, conforme utilizada neste estudo e em seu plano diretor de bacia, o controle hidráulico é observado nos últimos 2 km do arroio, ditando a

posição da linha d'água nesta região. Baseando-se neste fenômeno, a dragagem deste trecho do arroio Passo das Pedras, em que ocorre grande influência do rio Gravataí, não traz melhorias significativas para o escoamento. Todas as simulações estão contidas em um intervalo de 10 centímetros a 2 km da foz, convergindo sentido jusante.

Tratando-se das pontes, observou-se grande controle hidráulico oriundo destas, principalmente nos trechos mais críticos, com desenvolvimento de remansos. Pontes podem causar efeitos consideráveis no escoamento, podendo variar em intensidade dependendo da sua engenharia estrutural e forma (ATABAY & SECKIN, 2011). Os resultados apontam estrangulamentos do escoamento em série, evidentes pelas perdas de carga e quedas abruptas das cotas da linha d'água na interface dos tabuleiros. Julgou-se necessário evidenciar a influência dessas travessias removendo-as do modelo e comparando com o cenário de projeto, conforme o plano diretor, sem assoreamento (Figura 15 e Figura 16).

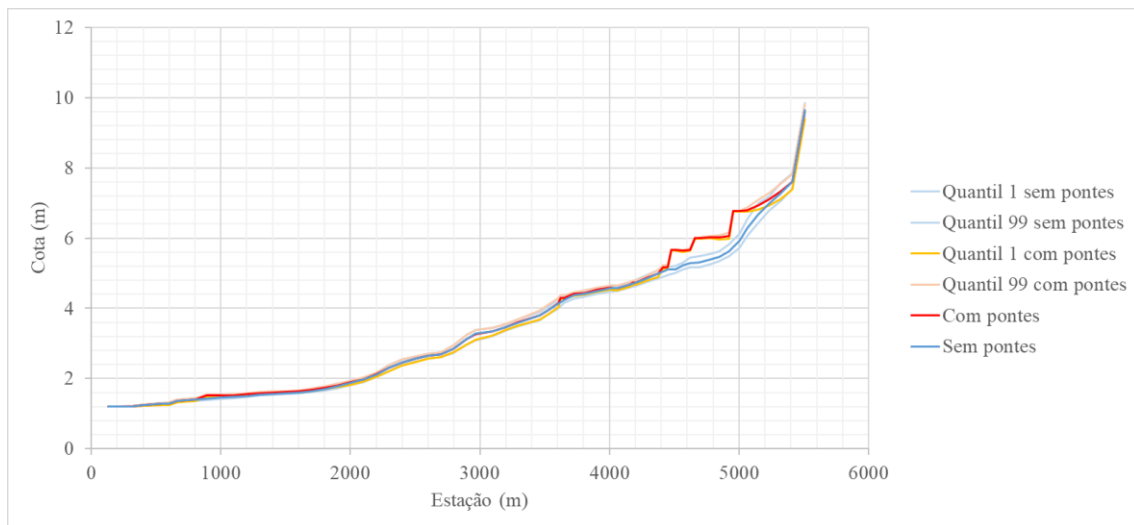


Figura 15 – Comparação dos perfis sem e com pontes para 2 anos de tempo de retorno.

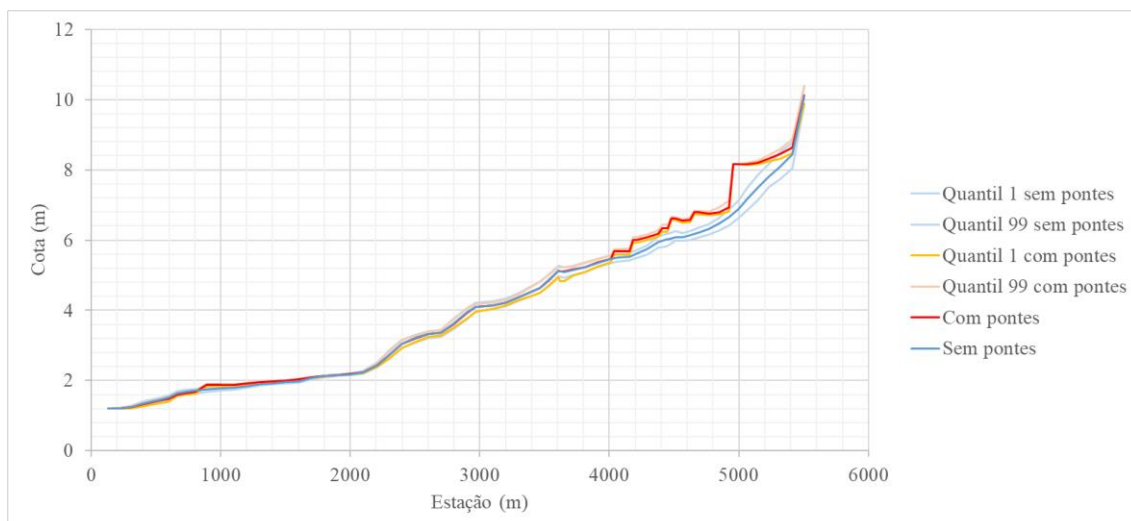


Figura 16 – Comparação dos perfis sem e com pontes para 50 anos de tempo de retorno.

Concretizando a hipótese que embasou estas simulações extras, foi possível perceber melhorias significativas na linha d'água ao se remover as pontes, principalmente a travessia Zeferino Dias para tempos de retorno baixos e a Três de Outubro para tempos de retorno altos. A melhoria em alguns trechos é de até 1 metro, usando como referência o quantil 50 de cada simulação.

8. CONCLUSÃO

A análise de incerteza através da convergência de resultados probabilísticos por Monte Carlo se mostrou uma ferramenta poderosa na ausência de fontes de calibração, elucidando as ramificações das diversas escolhas para valores de rugosidade, principalmente nos casos em que a linha d'água está muito próxima de constituir transbordo ou não. Percebeu-se também a perda de sensibilidade do 'n' de Manning no modelo quando o controle hidráulico é feito por uma estrutura e/ou remanso e não pela rugosidade.

Como os resultados da análise de incerteza por Monte Carlo são probabilísticos, o fator que passa a balizar a tomada de decisão é a aversão ao risco, passando pela sensibilidade de quem avalia os cenários. A abordagem puramente determinística não possui essa peculiaridade pelo fato de disponibilizar um resultado único, sem análise de incerteza. Exemplificando, uma estrutura hidráulica que apresenta pequena possibilidade de falha para o tempo de retorno no qual foi dimensionada pode ser compreendido como

inaceitável ou plausível, dependendo do grau de leniência do tomador de decisão com o risco de falha simulada.

Estimou-se que a automatização do processo de análise de incerteza, neste estudo, economizou cerca de 100 horas de trabalho manual do modelador, acumuladas na realização das 3000 simulações. Esta estimativa se baseou em uma média de 2 minutos de tarefas manuais dispensadas pela automatização por simulação, como edição constante dos arquivos de geometria, coleta de dados e rodar simulações.

O estudo focou exclusivamente nos valores atribuídos para representar a rugosidade durante a análise de incerteza, não obstante, pode-se empregar esta metodologia para outras fontes de incerteza, envolvendo outras parametrizações necessárias do modelo hidrodinâmico. O presente estudo buscou apresentar possibilidades na modelagem hidrodinâmica até então pouco exploradas e muitas vezes desconhecidas, porém com grande potencial prático.

Outro ponto de ressalva reside no fato de que as estimativas a respeito das alturas de rebaixamento da calha do arroio Passo das Pedras pela dragagem não apresentam nenhuma fonte de validação, partindo apenas da intuição de quem as levantou por análise visual. O presente estudo parte da premissa de que estes levantamentos estão de acordo com a situação de assoreamento deste sistema de macrodrenagem. A conclusão a respeito da melhoria de escoamento só poderia ser comprovada explicitamente com verificações de batimetria antes e depois da realização do serviço de dragagem, comprovando as condições de assoreamento e de rebaixamento após o serviço.

Conclui-se que os serviços de dragagem não geram impacto significativo em evitar inundações recorrentes nos trechos com maior incidência de inundação nas proximidades do arroio, entre a travessia Zeferino Dias e a Três de Outubro, porém podem evitar inundações nas demais travessias para determinados tempos de retorno. A deficiência de drenagem é balizada pelos controles hidráulicos neste arroio, sendo as pontes nos trechos mais críticos e o remanso do rio Gravataí nos últimos 2 km do arroio, além da baixa declividade.

9. REFERÊNCIAS

Anees, M.T., Abdullah, K., Nordin, M.N.M., Rahman, N.N.N.A., Syakir, M.I., Kadir, M.O.A., 2017. One- and Two-Dimensional Hydrological Modelling and Their Uncertainties, in: Flood Risk Management. InTech, pp. 1–30.

ATABAY S., SECKIN G., 2011. Experimental Backwater Analysis Around Bridge Waterways. Canadian Journal of Civil Engineering. DOI: 10.1139/105-048.

Casulli and Cheng, 1990. Stability analysis of Eulerian-Lagrangian methods for the one-dimensional shallow water equations. Appl. Math. Modelling. 1990, Vol. 14.

Chow, V.T., 1959. Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, NY.

Departamento de Esgotos Pluviais (DEP), 2005. Caderno de Encargos. Decreto 14.786, de 30 de dezembro de 2004.

Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), 2021a. EXECUÇÃO DE SERVIÇOS DE DRAGAGEM E DESSASSOREAMENTO DE ARROIOS, VALAS, CANAIS E BACIAS ABERTAS PREFERENCIALMENTE NA ZONA NORTE DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE. Diretoria de gerência e logística. Processo N° 21.10.000004536-6.

Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), 2021b. Quantitativos de Limpeza de Arroios, Bacias de detenção e Valas na Zona Norte de Porto Alegre. Processo N° 21.10.000004536-6.

DYSARZ T., 2018. Application of Python Scripting Techniques for Control and Automation of HEC-RAS Simulations. Advances n Hydraulics and Hydroinformatics. Volume 10, Issue 10, DOI: <https://doi.org/10.3390/w10101382>.

European Space Agency (ESA), 2014. About Copernicus. Disponível em: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>.

Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional (METROPLAN), 2017. Estudo de alternativas e projetos para minimização do efeito das cheias e estiagens na bacia do rio Gravataí. Contrato n° 004/2015.

GOODELL, C., 2014. Breaking the HEC-RAS Code: A User's Guide to Automating HEC-RAS. ISBN: 978-0-9908918-0-2. First Edition.

Infraestrutura Espacial de Dados Espaciais, 2021. Disponível em: <https://iede.rs.gov.br/>.

Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), 2002. PLANO DIRETOR DE DRENAGEM URBANA. Bacia dos Arroios Passo das Pedras e Mangueira. Volume VII.

Jornal do Comércio, 2021. Arroio Passo das Pedras volta a transbordar em Porto Alegre. Disponível em: https://www.jornaldocomercio.com/_conteudo/geral/2021/09/810432-arroio-passo-das-pedras-volta-a-transbordar-em-porto-alegre.html.

JULIEN P. Y., 2018. River Mechanics. Cambridge University Press, 2nd Edition. ISBN 978-1-107-46277-9.

KROESE D. P., BRERETON T., TAIMRE T., BOTEV Z. I., 2014. Why the Monte Carlo Method is so important today. Opinion article. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wics.1314>.

LERCHE I., MUDFORD B. S., 2005. How many Monte Carlo Simulations Does one Need to do. Energy exploration & exploitation, volume 23, number 6, pp. 405-427.

NETTO, J. M. d. A. & Fernández, M. F. (2015). Manual de hidráulica. EESC/USP São Carlos- SP, 632 p.

OLIVEIRA G. M., 2021. Software para análise de incertezas no modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Trabalho de conclusão de curso para graduação em engenharia civil.

PHILLIPPUS D., WOLFAND J., ABDI R., HOGUE T. S., 2020. Raspy-Cal: A Genetic Algorithm-Based Open-Source Python Program for Automatic Calibration of HEC-RAS Hydraulic Models. American Geophysical Union, Fall Meeting 2020. Bibcode: 2020AGUFMH049...02P.

POPESCU I., 2014. Computational Hydraulics Numerical Methods and Modelling. IWA Publishing. ISBN 9781780400457.

Python Software Foundation. Python 3.11.1. Documentação de 2022. Disponível em: <https://docs.python.org/3/index.html>.

Saint-Venant, A.J.C. Barré de (1871), "Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et a l'introduction de marées dans leurs lits", Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 73: 147–154 and 237–240.

SILVEIRA A. L. L., 2005. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Em: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 10 n. 1 Jan/Mar 2005, 05-24.

SIQUEIRA V. A., SORRIBAS M. V., BRAVO J. M., COLLISCHONN W., LISBOA A. M. V., TRINIDAD G. G. V., 2016. Real-time updating of HEC-RAS model for streamflow forecasting using an optimization algorithm. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. DOI: 10.1590/2318-0331.011616086.

Soil Conservation Service (SCS), 1971. *National engineering handbook, Section 4: Hydrology*. USDA, Springfield, VA.

Soil Conservation Service (SCS), 1986. *Urban hydrology for small watersheds, Technical Release 55*. USDA, Springfield, VA.

SZYMKIEWICZ R., 1991. Finite-element method for the solution of the Saint Venant equations in an open channel network. *Journal of Hydrology*, Volume 122, Issues 1-4, Pages 275-287.

TEIXEIRA E. K. C., COELHO M. M. L. P., PINTO E. J. A., DINIZ J. G., SALIBA A. P. M., 2018. Manning's roughness coefficient for the Doce River. *RBRH*, Porto Alegre, v. 23, e52, 2018.

TUCCI C. E. M., 1993. *Hidrologia. Ciências e aplicação*. Porto Alegre. Ed da Universidade. ABRH: EDUSP. 943p.

TUCCI C. E. M., 1998. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH: 680p.

TUCCI C. E. M., PORTO R. L., BASTOS M. T., 2015. *Drenagem Urbana*. Reimpressão da 1ª edição. ABRH. ISBN 978-85-7025-364-4. 428p.

United States Army Corps of Engineers (USACE), 2022a. *Hydraulic Reference Manual*. Version 6.3.

United States Army Corps of Engineers (USACE), 2022b. *User's manual*. Version 6.3.

Vladyman. *Automating Hydraulic Analysis (AHYDRA)* v. 1.0. 2011. Disponível em: <http://ahydra.yolasite.com/>.