



Universidade Federal do Rio Grande
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Modelagem hidrológica de drenagem
urbana da bacia hidrográfica do arroio
Vieira em Rio Grande - RS

Dissertação de:
Daiane Brum Peixoto

Orientador:
Elizaldo Domingues dos Santos

Coorientador:
Ana Paula Gomes

Novembro de 2025

Dissertação - PPGeo – FURG

Daiane Brum Peixoto

Mestre em Engenharia Oceânica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGeo) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Documento assinado digitalmente
 **ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS**
Data: 16/12/2025 23:37:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Elizaldo Domingues dos Santos
Coordenador do PPGeo

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS**
Data: 16/12/2025 23:38:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Orientador — FURG/PPGeo

Documento assinado digitalmente
 **ANA PAULA GOMES**
Data: 18/12/2025 15:14:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Ana Paula Gomes
Coorientadora — FURG

Documento assinado digitalmente
 **BIANCA NEVES MACHADO**
Data: 30/01/2026 15:04:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Bianca Neves Machado
Membro Interno — UFRGS/PPGeo

Documento assinado digitalmente
 **NATALIA LEMKE**
Data: 16/01/2026 16:04:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Natália Lemke
Membro Externo — FURG

Documento assinado digitalmente
 **MARIANE KEMPKA**
Data: 26/01/2026 09:51:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Mariane Kempka
Membro Externo — UTFPR

Rio Grande, 28 de novembro de 2025

Ficha Catalográfica

P379m Peixoto, Daiane Brum.

Modelagem hidrológica de drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Vieira em Rio Grande - RS / Daiane Brum Peixoto. – 2025.
92 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2025.

Orientador: Dr. Elizaldo Domingues dos Santos.

Coorientadora: Dra. Ana Paula Gomes.

1. Modelagem hidrológica 2. Hec-Hms 3. Hec-Ras 4. Arroio Vieira
5. Planejamento Urbano I. Santos, Elizaldo Domingues dos II. Gomes, Ana Paula III. Título.

CDU 556(816.5)

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

Cada geração exerce poder sobre seus antecessores; e cada uma, na medida em que modifica o ambiente legado a ela e se rebela contra a tradição, resiste e limita o poder de seus precursores.

C. S. Lewis

Prefácio

Desde 2015 tenho vontade de estudar sobre as cheias e trabalhar para propor soluções aos alagamentos porque não consigo acreditar que exista problema sem solução. Em 2022, durante uma conversa com um professor da Escola de Engenharia, ele viu relevância no que eu falava e me motivou a procurar a professora Ana para propor as ideias que orbitavam em minha mente. A professora Ana já tinha orientado alguns trabalhos de graduação e abraçou a ideia de começarmos a modelar os arroios de nossa cidade, porém ela não era orientadora de nenhum dos programas de pós-graduação da FURG e precisávamos que alguém aceitasse o desafio de orientar. O professor Elizaldo, mesmo sendo da área da mecânica, resolveu abraçar o desafio. Daí nasce este projeto de mestrado. Aquele ideal pulsando foi o propulsor da jornada.

O conhecimento que eu possuía na área de hidrologia era muito raso, mas havia muita vontade de aprender e poder construir um trabalho que devolvesse valor para a sociedade. Vieram os desafios da vida acadêmica, as escritas, os estudos, as buscas por trabalhos na área. As tristezas de estudar outros eventos de cheia no Brasil, a indignação de encontrar nestes estudos eventos de cheia que depois de 100 anos foram feitas as mesmas recomendações que já haviam sido feitas há 100 anos e que ainda não tinham sido executadas. Saber que menos de 17% das cidades brasileiras possuem plano de drenagem urbana, saber que faltam dados de monitoramento de nossos rios. Enfim, as tristezas de saber que muito pouco é feito nesta área e que quem mais sofre são os mais pobres por estarem em regiões mais vulneráveis.

Porém, quando comecei este estudo, jamais imaginaria passar por 2 grandes eventos aqui no meu estado, Rio Grande do Sul. Em setembro de 2023 tivemos um evento extremo de chuvas, sendo que já havíamos passado por um ciclone em junho do mesmo ano. E agora, enquanto escrevo este texto, estamos vivenciando aquela que se desenha a maior tragédia natural ocorrida em nosso estado. No início de maio de 2024, a região do vale do Taquari foi devastada por grandes volumes precipitados. Essa água escoando para o Guaíba que passou dos 5m, superando a cheia histórica de 1941, e esse volume todo escoando para a Lagoa dos Patos, em direção a região Sul, podendo causar alagamentos.

Mais do que entender a importância desse estudo, estou sentindo na minha pele e contemplando com meus olhos a necessidade de estudos hídricos e sua importância para o planejamento e ocupação das cidades e desenvolvimento de sistemas de contenção.

Daiane Brum Peixoto
Rio Grande
Maio de 2024

Agradecimentos

A Deus, que mesmo sabendo o quanto eu iria dar trabalho, decidiu me criar e me dar a maravilhosa oportunidade de viver. Que eu saiba aproveitar cada segundo deste precioso presente chamado tempo. A Jesus, que pagou o preço pela minha vida naquela cruz e me restaurou com o Pai e com os planos d'Ele pra mim. Ao meu amigo, Espírito Santo, o verdadeiro consolador que tem me ensinado todas as coisas, me guiado na verdade e me mostrado que o impossível é apenas uma questão de ponto de vista.

Ao meu pai, Rodney, por me mostrar que todos os problemas têm solução, que é apenas uma questão de olhar de novo e sob vários ângulos, ter paciência e buscar entender o que se quer resolver. À minha mãe, Maria, por sempre acreditar que eu seria capaz de dar o próximo passo e por não medir esforços ao me apoiar. Ao meu irmão, Fernando, e minha cunhada, Roberta, por sempre abraçarem comigo os meus projetos, não importa o quanto eles pareçam insanos.

Às minhas amigas, Roselaine e Priscila, por serem abraço e porto seguro em tempos de tribulação e sempre dispostas a comemorar as pequenas coisas. Vocês são presentes de Deus na minha vida e cumprem a palavra que diz que existem amigos mais chegados que irmãos.

Ao meu orientador, Elizaldo, por aceitar o desafio de uma orientação fora da zona de conforto dele. Obrigada, professor, por acreditar e abraçar a ideia. À minha coorientadora, Ana Paula que desde o início acreditou no projeto e está sempre pronta a contribuir. Vocês dois têm tornado esta jornada mais leve, mesmo que seja longa e densa. E tem me ensinado tanto! Sem vocês, eu não chegaria aqui.

Ao meu colega, João Marcelo, por tantas horas de conversa e com tantas contribuições para este projeto, por partilhar da sua longa experiência de projetista. A todos os meus amigos, familiares e colegas de trabalho que tiveram paciência para me ouvir, torceram por mim e muitas vezes ajustaram as programações para eu que pudesse me encaixar.

Como a maior parte da minha trajetória acadêmica, desde a creche até o mestrado, foi através de instituições públicas, agradeço a cada brasileiro que, com o pagamento de seus impostos, tornou isso tudo possível.

Resumo

Daiane Brum Peixoto

MODELAGEM HIDROLÓGICA DA DRENAGEM URBANA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO VIEIRA EM RIO GRANDE - RS

As alterações climáticas têm intensificado a ocorrência de eventos extremos, como chuvas intensas e estiagens severas, tornando o entendimento do comportamento hidrológico um fator determinante para a segurança urbana. O mapeamento de riscos hidrológicos é fundamental para a elaboração de planos de drenagem e diretores, instrumentos que norteiam o uso do solo e a expansão urbana sustentável. Este trabalho apresenta a modelagem hidrológica e hidrodinâmica de um trecho do Arroio Vieira, no município de Rio Grande (RS), empregando técnicas de geoprocessamento para a caracterização fisiográfica da bacia. O estudo visou determinar as vazões máximas para tempos de retorno (TR) de 10, 50 e 100 anos, além de verificar a capacidade de uma calha proposta para o arroio utilizando os softwares *HEC-HMS* e *HEC-RAS*. Foram executadas 13 simulações hidrológicas, abrangendo quatro cenários distintos de uso do solo combinados aos diferentes TRs. A partir desses resultados, três cenários críticos (TR de 100 anos) foram selecionados para a modelagem hidrodinâmica. Os resultados indicam que a adoção do limite superior do parâmetro *Curve Number* (CN), conforme o Diagnóstico de Saneamento Básico municipal, gerou o cenário de maior criticidade, apresentando as maiores vazões de pico e o menor tempo de concentração.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, Hec-Hms, Hec-Ras, Arroio Vieira. Planejamento Urbano.

Abstract

Daiane Brum Peixoto

HYDROLOGICAL MODELING OF URBAN DRAINAGE IN THE VIEIRA STREAM
WATERSHED IN RIO GRANDE - RS

Climate change has intensified the occurrence of extreme events, such as heavy rainfall and severe droughts, making the understanding of hydrological behavior a decisive factor for urban safety. Mapping hydrological risks is fundamental for developing drainage and master plans, instruments that guide land use and sustainable urban expansion. This study presents the hydrological and hydrodynamic modeling of a section of the Vieira Creek, in the municipality of Rio Grande (RS), employing geoprocessing techniques for the physiographic characterization of the basin. The study aimed to determine the maximum discharge for return periods (RP) of 10, 50, and 100 years, in addition to verifying the capacity of a proposed channel for the creek using the *HEC-HMS* and *HEC-RAS* software. Thirteen hydrological simulations were performed, covering four distinct land-use scenarios combined with different RPs. From these results, three critical scenarios (100-year RP) were selected for hydrodynamic modeling. The results indicate that adopting the upper limit of the Curve Number (CN) parameter, according to the municipal Basic Sanitation Diagnosis, generated the most critical scenario, presenting the highest peak flows and the shortest peak time.

Keywords: Hydrological Modeling. HEC-HMS. HEC-RAS. Vieira Creek. Urban Planning.

Sumário

	Página
Lista de Figuras	X
Lista de Tabelas	XII
Lista de Símbolos	XIV
Lista de Siglas	XV
1 Introdução	1
1.1. Motivação	4
1.2. Estado da arte	7
1.3. Objetivos	12
1.3.1 Objetivos específicos	12
2 Fundamentação teórica	13
2.1. Contextualização	13
2.1.1 Diagnóstico de Saneamento de Rio Grande	18
2.2. Drenagem Urbana	18
2.3. Bacia Hidrográfica	20
2.3.1 Corpos Hídricos do Rio Grande	20
2.3.2 Tempo de Concentração	21
2.3.3 Chuva de projeto	23
2.4. Plano diretor	26
2.5 Modelagem Hidrológica	28
2.5.1 Método SCS	29
2.5.2 Clark	30
2.5.3 Muskingum	30
2.5.4 HEC-HMS	31
2.6 Modelagem Hidrodinâmica HEC-RAS	31
3 Metodologia	33
3.1. Descrição do problema	33
3.2. Determinação das características físicas da bacia hidrográfica	36
3.3. Determinação do uso do solo	40
3.4. Definição da chuva de projeto	43
3.5. Aplicação do modelo HEC-HMS	43
3.6. Aplicação do modelo HEC-RAS	43
4 Resultados e discussões	45
4.1. Delimitação da bacia hidrográfica	45
4.2. Características física obtida da bacia hidrográfica do Arroio Vieira	52
4.3. Resultados obtidos para as chuvas de projeto	53
4.4. Resultados obtidos para o CN da bacia	55
4.5. Resultados obtidos com HEC-HMS	56

4.6. Resultados obtidos com HEC-RAS	66
5 Conclusões e proposta de continuidade	71
Referências	73

Lista de Figuras

	Página
Figura 1.1: Diferença entre Normais Climatológicas no Brasil. Precipitação acumulada (mm). Fonte: INMET (2023).	3
Figura 1.2: Climatologia e histórico de previsão do tempo em Rio Grande. Fonte: Climatempo (Acesso em 18/08/2024).	5
Figura 1.3: Hidrograma de cheia e Urbanização. Fonte: Brito e Costa (2024).	6
Figura 2.1: Bacias e Sub-Bacias do Rio Grande do Sul. Fonte: SEMA	13
Figura 2.2: Bacia hidrográfica atlântico sul. Fonte: Blog Prof. Antônio Guilherme Lima	14
Figura 2.3: Mapa planialtimétrico da cidade do Rio Grande. Fonte: topographic-map.com (2024)	16
Figura 2.4: Cidade do Rio Grande. Fonte: Google Maps (2024)	16
Figura 2.5: Mapa dos arroios urbanos do Rio Grande. Fonte: Bobadilho e Tagliani, 2012.	21
Figura 2.6: Coeficientes IDF para a cidade do Rio Grande. Fonte: Plúvio 2.1	24
Figura 2.7: Localização das estações pluviométricas FURG e Regatas. Fonte: Adaptado de HIDROWEB/ANA.	25
Figura 2.8: Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas, 2022. Fonte: SNIS	27
Figura 3.1: Mapa da bacia hidrográfica Mirim - canal São Gonçalo. Fonte: SEMA	33
Figura 3.2: Trecho do Arroio Vieira que é atravessado pela ERS 734. Fonte: autoria própria (2025)	34
Figura 3.3: Fluxograma da modelagem. Fonte: autoria própria (2024)	35
Figura 3.4: Posição onde Arroio Vieira (azul médio) cruza com a adutora de abastecimento de Rio Grande (azul claro). Fonte: Google Earth Pro® em 22/10/2025.	37
Figura 3.5: Ampliação da figura 3.8. Fonte: Google Earth Pro® em 22/10/2025.	38
Figura 3.6: Comportas que regulam a entrada de água do Arroio Vieira para a adutora. Fonte: autoria própria (2025).	38
Figura 3.7: Extravasor de pedra da adutora. Fonte: autoria própria (2025).	39
Figura 3.8: Trecho do Arroio Vieira desta bacia. Fonte: Google Earth Pro® em 22/10/2025.	40
Figura 3.9: Cobertura do solo. Fonte: Mapbiomas em 24/10/2025.	41
Figura 3.10: Faixa de CN para as bacias do Rio Grande. Fonte: Diagnóstico de saneamento básico. Tomo III, pg 43 (2013).	41
Figura 4.1: Curvas de nível de 50 em 50cm. Fonte: autoria própria (2024)	45
Figura 4.2: MDT gerado com curvas de nível de 50 em 50cm. Fonte: autoria própria (2024)	46
Figura 4.3: Configuração da máquina utilizada pelo autor. Fonte: Windows® (2025)	46
Figura 4.4: Configuração da segunda máquina utilizada pelo autor. Fonte: Windows® (2025)	47
Figura 4.5: Bacia delimitada com MDE Copernicus pelos mosaicos de fluxo no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).	48
Figura 4.6: Delimitação automática da bacia utilizando MDE ALOS World 3D resolução 30m projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).	49

Figura 4.7: Delimitação automática da bacia utilizando MDE ALOS World 3D Elipsoidal resolução 30m projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).	49
Figura 4.8: Delimitação automática da bacia utilizando MDE Copernicus resolução 30m projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).	50
Figura 4.9: Delimitação automática da bacia utilizando MDE Copernicus resolução 90m projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).	50
Figura 4.10: Delimitação automática da bacia utilizando MDE SRTM resolução 30m projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).	51
Figura 4.11: Delimitação automática da bacia utilizando MDE SRTM resolução 90m projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).	51
Figura 4.12: Comparação das bacias geradas nas figuras 3.16 - 3.21 projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).	52
Figura 4.13: Tela do HEC-HMS na aba results mostrando as simulações calculadas. Fonte: autoria própria (2024).	56
Figura 4.14: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VS1 com chuva de TR = 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).	57
Figura 4.15: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VS2 e chuva com TR = 10 anos. Fonte: autoria própria (2025).	58
Figura 4.16: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VS2 e chuva com TR = 50 anos. Fonte: autoria própria (2025).	58
Figura 4.17: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VS2 e chuva com TR = 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).	59
Figura 4.18: Comportamento da sub-bacia 1, cenário MDE e chuva com TR = 10 anos. Fonte: autoria própria (2025).	60
Figura 4.19: Comportamento da sub-bacia 1, cenário MDE e TR 50 anos. Fonte: autoria própria (2025).	60
Figura 4.20: Comportamento da sub-bacia 1, cenário MDE e chuva com TR = 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).	61
Figura 4.21: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VSS150% e chuva com TR = 10 anos. Fonte: autoria própria (2025).	62
Figura 4.22: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VSS150% e chuva com TR = 50 anos. Fonte: autoria própria (2025).	62
Figura 4.23: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VSS150% e chuva com TR = 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).	63
Figura 4.24: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VSDSRG e chuva com TR = 10 anos. Fonte: autoria própria (2025).	64
Figura 4.25: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VSDSRG e chuva com TR = 50 anos. Fonte: autoria própria (2025).	64
Figura 4.26: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VSDSRG e chuva com TR = 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).	65
Figura 4.27: Comparação das vazões de pico para os 4 cenários simulados. Fonte: autoria própria (2025).	66
Figura 4.28: Visualização XYZ para simulação BAVS2 no HEC-RAS com TR 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).	67
Figura 4.29: Visualização seção 0 para simulação BAVS2 no HEC-RAS com TR 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).	68
Figura 4.30: Visualização XYZ para simulação BAV50 no HEC-RAS com TR 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).	68

Figura 4.31: Visualização seção 0 para simulação BVVSS150% no HEC-RAS com TR 100 anos. Fonte: autoria própria (2025). 69

Figura 4.32: Visualização XYZ para simulação BAVDSRG no HEC-RAS com TR 100 anos. Fonte: autoria própria (2025). 69

Figura 4.33: Visualização seção 0 para simulação BAVDSRG no HEC-RAS com TR 100 anos. Fonte: autoria própria (2025). 70

Lista de Tabelas

	Página
Tabela 1.1: Resumo sobre alguns softwares utilizados para modelagem hidráulica, hidrológica e hidrodinâmica (continua).	10
Tabela 1.1: Resumo sobre alguns softwares utilizados para modelagem hidráulica, hidrológica e hidrodinâmica (conclusão).	11
Tabela 2.1: Tempo de concentração - equações empíricas	22
Tabela 3.1: Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas	41
Tabela 3.2: Valores do coeficiente de Manning	43
Tabela 4.1: Áreas das bacias segundo MDE e resolução	52
Tabela 4.2: Dados das bacias 1 e 2	53
Tabela 4.3: Distribuição temporal para TR= 10 anos	53
Tabela 4.3: Distribuição temporal para TR= 50 anos	54
Tabela 4.4: Distribuição temporal para TR= 100 anos	54
Tabela 4.5: Valores dos CNs adotados	55
Tabela 4.6: Resumo das vazões e tempos de pico para os cenários VS1 e VS2.	59
Tabela 4.7: Resumo das vazões e tempos de pico para o cenário MDE.	61
Tabela 4.8: Resumo das vazões e tempos de pico para o cenário VSS150%.	63
Tabela 4.9: Resumo das vazões e tempos de pico para o cenário VSDSRG.	65

Lista de Símbolos

Símbolos Romanos

A	Área da seção transversal [m ²]
F	Infiltração [mm]
g	Aceleração do campo gravitacional [m/s ²]
I	Intensidade da chuva [mm/h]
P	Precipitação [mm]
Q	Escoamento superficial, fluxo (vazão) [m ³ /s]
qt	Fluxo lateral por unidade de comprimento [m ³ /m.s]
R	Raio hidráulico [m]
S	Máxima infiltração acumulada potencial [mm]
Sf	Declividade da linha de energia por resistência
t	Tempo [s].
tc	Tempo de concentração [h]
td	Tempo de duração da chuva [h]
TR	Tempo de Retorno [anos]
V	Velocidade [m/s]
x	Distância da seção transversal [m]
Z_s	Altura da seção transversal [m]

Símbolos Gregos

η	Coeficiente de Manning
Δ	Diferença entre dois valores

Subscritos e Sobrescritos

I_a	Perdas iniciais
-------	-----------------

Lista de Siglas

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
CN	<i>Curve Number</i>
DMAPU	Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ENS	Eficiência Nash-Sutcliffe
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
GAM-IDF	Metodologia de Algoritmos Genéticos para IDF
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center-River Analysis System</i>
HEC-ResSim	<i>Hydrologic Engineering Center-Reservoir System Simulation</i>
HSPF	<i>Hydrologic Simulation Program-Fortran</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade - Duração - Frequência
INMET	Instituto Nacional de meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MAPBIOMAS	Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
ONU	Organização das Nações Unidas
PLANASA	Plano Nacional de Saneamento Básico
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWAT	<i>Soil & Water Assessment Tool</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TR	Tempo de retorno
UFPeI	Universidade Federal de Pelotas
USEPA	<i>U. S. Environmental Protection Agency's</i>
WEAP	<i>Water Evaluation and Planning</i>
WMS	<i>Watershed Modeling System</i>

1 | Introdução

A ocorrência de eventos extremos tem sido mais comum nas últimas décadas e muitos atribuem estes fatos às mudanças climáticas ocorridas pela degradação da camada de ozônio, acelerada pela liberação de gases do efeito estufa, e aquecimento global. A preocupação com estas alterações levou a criação do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 13 da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU)¹. A elevação de extremos climáticos está diretamente ligada à variação climática, tornando mais frequentes os desastres naturais como: grandes variações de temperatura com algumas regiões sofrendo com calor insuportável e outras com frio intenso inclusive precipitação de neve e granizo, aumento do volume precipitado em algumas regiões e secas em outros, deslizamentos em virtude da saturação do solo em regiões elevadas, ciclones e tornados (Amaral, 2015).

Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)², o relatório da Organização Mundial de Meteorologia (OMM) sobre o ano de 2023 apontou uma elevação de 1,45°C (margem de incerteza de $\pm 0,12^\circ\text{C}$) da temperatura média global próxima à superfície em relação à linha de base pré-industrial. Desta forma, 2023 foi o ano mais quente já registrado, sendo que a última década também foi a mais quente já registrada. O mesmo relatório ainda aponta um aumento no nível dos gases do efeito estufa, aumento de temperatura superficial dos oceanos e acidificação, aumento do nível do mar, redução da cobertura do gelo marinho na Antártida e recuo dos glaciares de forma que todos estes bateram recordes no ano de 2023.

Embora a natureza possa existir sem a existência humana, a humanidade não pode existir sem a natureza. Para que o homem possa viver e desfrutar de uma boa qualidade de vida, ele precisa estar integrado à natureza, conhecer como ela funciona e respeitar a maneira como ela se autorregula. A natureza tem seus próprios ciclos e formas de ação. E embora o homem tenha aprendido a prever os eventos climáticos com uma certa limitação, ele não os domina. Por isso é necessário que estes eventos sejam estudados, aprendidos e que soluções integradas com a natureza sejam desenvolvidas para que haja equilíbrio entre a natureza e o homem. Encontrar o menor impacto antropológico com a natureza pode ser a chave para a obtenção de uma melhor qualidade de vida e mais próspera, saber utilizar os recursos sem destruí-los, estar adaptado à natureza, pois as mudanças climáticas podem amplificar fatores que levam a pobreza como escassez de água, aumento da temperatura da superfície da terra, tempestades mais severas e inundações (ONU³).

¹ <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

² <https://portal.inmet.gov.br/noticias/ano-de-2023-%C3%A9-o-mais-quente-da-hist%C3%B3ria-confirma-relat%C3%B3rio-da-omm>

³ <https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change>

A água é essencial para as atividades humanas como dessedentação, cocção de alimentos, higiene pessoal, limpeza dos locais habitáveis, irrigação, transporte, além de recreação e produção industrial. Assim como a escassez desse recurso é problemática, o excesso de água também causa transtornos como alagamentos, enchentes e deslizamentos de encostas. O excesso de volume de água acumulado nas vias interrompe o trânsito, destrói equipamentos públicos, carrega lixo e outros sedimentos que são nocivos à saúde, invade residências e outras edificações transmitindo doenças, causando perdas materiais e de vidas sejam elas humanas ou animais.

Segundo o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2024) em uma publicação de 19 de janeiro de 2024, no ano de 2023 o número de ocorrências de desastres hidrológicos e geo-hidrológicos no Brasil bateu um recorde. O impacto registrado destes eventos foi de 132 óbitos, 9.263 pessoas feridas ou enfermas, 74 mil desabrigados e 524 mil pessoas desalojadas. Ainda segundo o CEMADEN, o sistema aponta para mais de R\$5 bilhões em prejuízos referentes aos danos causados por esses desastres naturais em obras de infraestrutura, instalações públicas e unidades habitacionais. Os prejuízos econômicos informados pelo sistema se aproximam de R\$25 bilhões, somadas as áreas pública e privada. Conforme publicação do CEMADEN em 01/02/2024, o número de eventos foi atualizado para 1.341. Dos quais, 81% ocorreram nas regiões Sul e Sudeste sendo que destes 12% foram eventos de médio e grande porte. A região Sul totalizou 10 eventos de grande porte.

E, segundo o INMET, o Brasil registrou eventos extremos em todos os meses do ano de 2023 e nos 3 primeiros meses de 2024⁴. No final de abril e início de maio de 2024, o Rio Grande do Sul foi devastado por um grande volume de chuvas principalmente nas regiões dos Vales, Serra e Central do estado. O relatório preliminar da Confederação Nacional de Municípios, publicado no dia 22/07/2024⁵ aponta um prejuízo econômico de R\$12,8 bilhões, salientando que apenas 176 municípios, dos 478 afetados, detalharam os danos e prejuízos. O mesmo relatório traz os seguintes dados humanos: 182 mortos; 31 desaparecidos; 98,5 mil desabrigados; 701,1 mil desalojados; 11,4 mil feridos e enfermos; 4,3 milhões de pessoas afetadas.

Segundo dados disponíveis no site do INMET, houve uma grande alteração do regime de chuvas no Brasil nos últimos 60 anos por causa das alterações climáticas resultando em ondas de calor, seca e inundações, além de um possível aumento na frequência, intensidade e/ou duração destes eventos. As diferenças das normais climatológicas do Brasil resultantes da comparação entre os dois períodos de 30 anos são apresentadas na figura 1.1.

⁴ <https://portal.inmet.gov.br/noticias>

⁵ <https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/cnm-atualiza-prejuizos-dos-municipios-com-as-chuvas-no-rs-impacto-e-de-r-12-8-bilhoes>

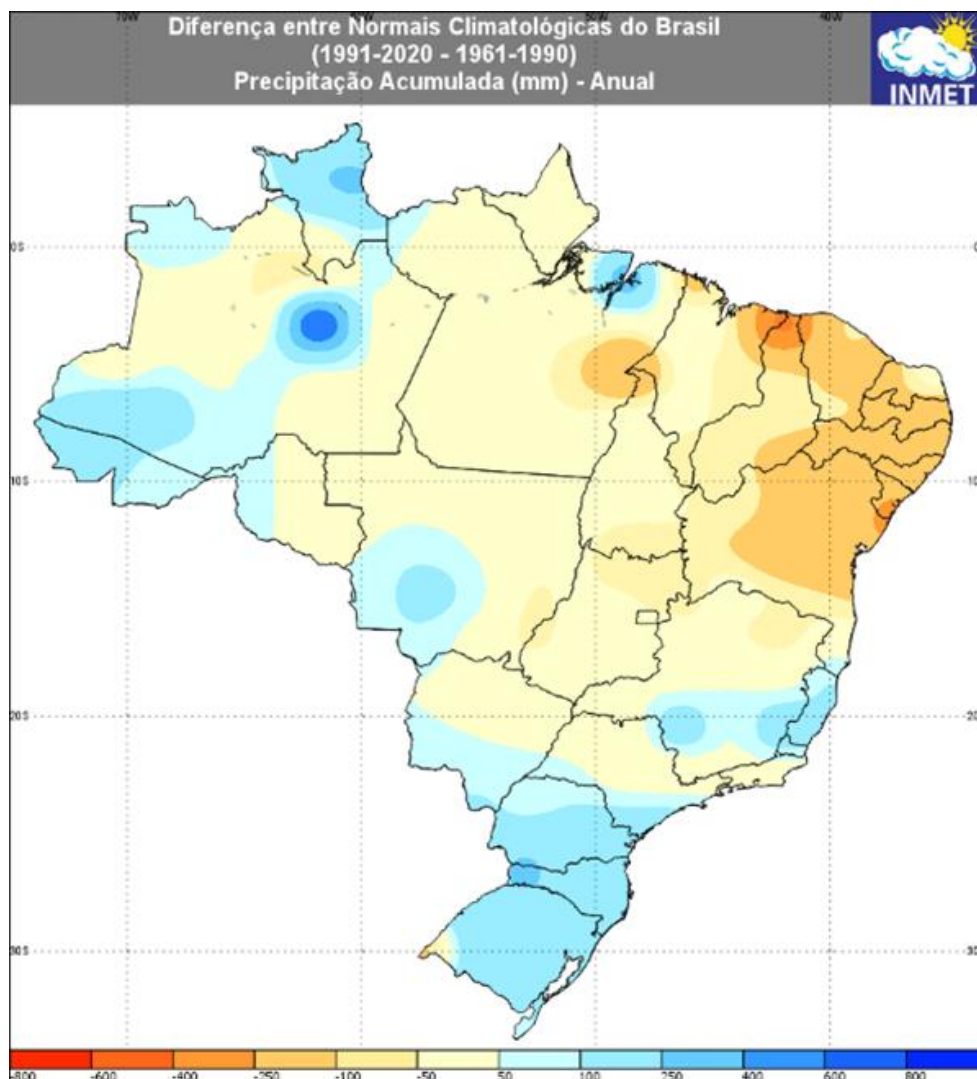


Figura 1.1: Diferença entre Normais Climatológicas no Brasil. Precipitação acumulada (mm). Fonte: INMET (2023).

Na figura 1.1 pode-se perceber uma grande redução no volume de chuvas na região nordeste brasileira e um aumento significativo na região sul. O regime de chuvas em todo o Brasil sofreu grande modificação nos últimos 60 anos, se comparamos as normas climatológicas do período de 1961-1990 com as do período de 1991-2020⁶.

De acordo com uma publicação na Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)⁷ escrita por Marcos Pivetta sobre um estudo coordenado por pesquisadores do Imperial College de Londres no Reino Unido, sobre os efeitos do aquecimento global e El Niño sobre as precipitações que ocorreram no Rio

⁶ <https://portal.inmet.gov.br/noticias/ondas-de-calor-s%C3%A3o-resultados-das-altera%C3%A7%C3%B5es-clim%C3%A1ticas-nos-%C3%BAltimos-60-anos>

⁷ https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2024/06/044-045_atribuicao-chuvas_341.pdf

Grande do Sul do meses de abril e maio, os pesquisadores constataram que as mudanças climáticas tiveram um impacto de 6-9% no volume da chuva enquanto o fenômeno climático El Niño impactou entre 3-10%, além de ampliar entre 2 a 5 vezes a probabilidade deste tipo de evento ocorrer. O tempo de retorno deste evento é entre 100 e 250 anos, mas se o aumento da temperatura média global chegar a 2°C o tempo de retorno passará para entre 20 e 30 anos.

O Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), faz um monitoramento do El Niño Oscilação Sul (ENOS) e descreve o fenômeno da seguinte forma⁸:

O El Niño e a La Niña são partes de um mesmo fenômeno acoplado (atmosférico-oceânico) que ocorre no oceano Pacífico Equatorial (e na atmosfera adjacente), denominado de El Niño Oscilação Sul (ENOS). A fase El Niño do fenômeno acoplado ENOS refere-se às situações nas quais o oceano Pacífico Equatorial está mais quente do que a condição média histórica (climatológica), e a fase La Niña refere-se a situação oposta, ou seja, quando o oceano Pacífico Equatorial está mais frio do que a condição média histórica. A mudança na temperatura do oceano Pacífico Equatorial acarreta efeitos globais nos padrões de circulação atmosférica, transporte de umidade, temperatura e precipitação. (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em <http://enos.cptec.inpe.br/#> Acesso em 17/10/2025.

Conforme os dados apresentados, tanto as mudanças climáticas quanto o evento climático El Niño tiveram parcelas de impacto sobre o volume precipitado no Rio Grande do Sul nos meses de abril e maio de 2024.

1.1. Motivação

A cidade de Rio Grande, no Rio Grande do Sul, estado que integra a região Sul do Brasil, por ser parte da planície costeira deste estado, é uma cidade litorânea e costuma sofrer com alagamentos em algumas de suas regiões. Segundo Silva (2019), a precipitação média anual acumulada é de 1.226 mm, e a média mensal de 102,1 mm e desvio padrão de 66,1 mm. Já o Atlas Econômico do Rio Grande do Sul, apresenta um volume médio anual de precipitação para a região de Rio Grande entre 1.400 e 1.500 mm⁹, estes ficam mais próximos aos apresentados pelo INMET para o período de 1981 e 2010¹⁰. A figura 1.2 apresenta uma distribuição média mensal de temperaturas máximas e mínimas e precipitação, segundo o Climatempo¹¹ para a cidade do Rio Grande, para uma série de dados observados de 30 anos.

⁸ <http://enos.cptec.inpe.br/#>

⁹ <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/clima-temperatura-e-precipitacao>

¹⁰ https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao_acumulada_mensal_anual

¹¹ <https://www.climatempo.com.br/climatologia/364/riogrande-rs>

Rio Grande - BR

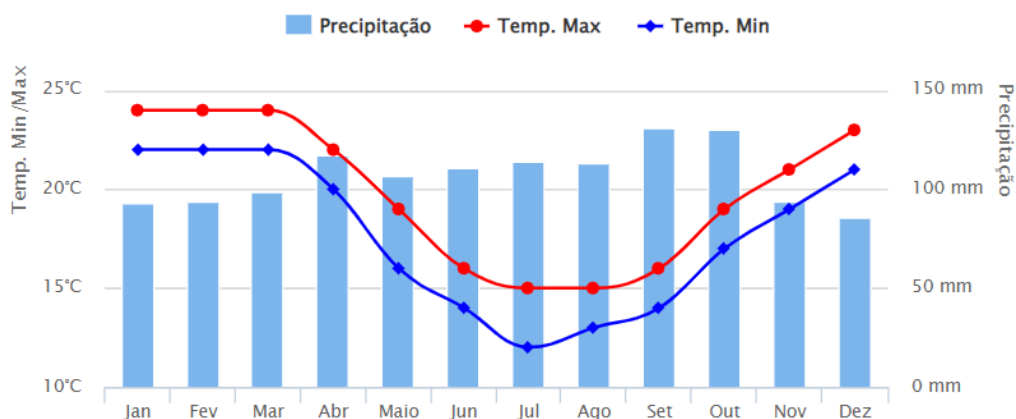


Figura 1.2: Climatologia e histórico de previsão do tempo em Rio Grande. Fonte: Climatempo (Acesso em 18/08/2024).

Conforme pode ser observado na figura 1.2, a região apresenta estações do ano bem definidas, com verões quentes e invernos frios. As precipitações são homogêneas ao longo do ano, semelhante ao que ocorre com os demais municípios ao longo do Rio Grande do Sul, não possuindo períodos chuvosos e nem de estiagem¹².

A urbanização de Rio Grande é permeada por 6 arroios: arroios Bolaxa, Senandes, Cabeças, Barrancas, Martins e Vieira, PIRES (2022). Conforme GARCIA (2005), o aumento da urbanização e das áreas edificadas contribuem para a impermeabilização do solo aumentando o volume e a velocidade do escoamento superficial e, conseqüentemente, aumentando a vazão de pico e reduzindo o tempo deste.

Antes da urbanização, o solo natural permitia a infiltração da parcela precipitada e escoamento superficial acontecia apenas depois da saturação do solo. Conforme a cidade vai se desenvolvendo, edificações vão sendo construídas para atender às demandas da população e essas edificações impermeabilizam o solo impedindo a infiltração e transformando a parcela que infiltraria em escoamento superficial. Quanto mais a cidade cresce, maior é a área impermeabilizada por edificações. Sejam elas residências, comércios, escolas, postos de saúde, canchas de esportes, ruas, avenidas, rodovias, calçadas, enfim, todo o tipo de edificação necessária para o bom funcionamento de nossa sociedade. Essa situação acaba aumentando o risco de transbordamento dos rios, riachos, arroios, ou seja, dos cursos d'água, por alterar o hidrograma de cheia, como a figura 1.3 exemplifica.

¹² <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/clima-temperatura-e-precipitacao>

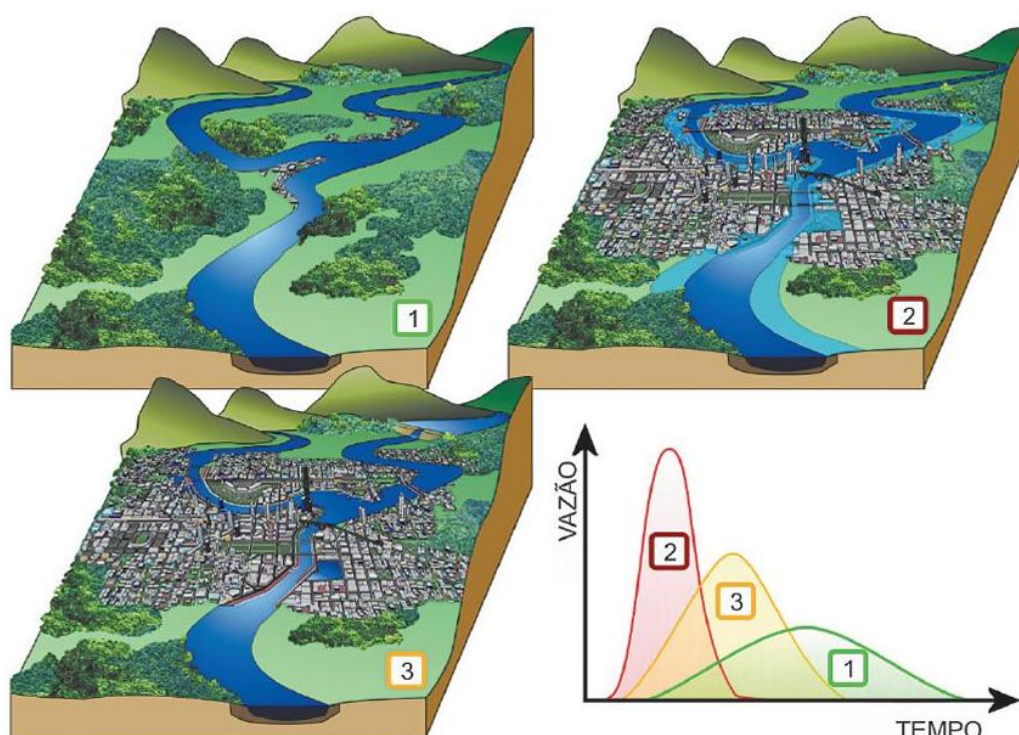


Figura 1.3: Hidrograma de cheia e Urbanização. Fonte: Brito e Costa (2024).

Na figura 1.3, no item 1, é mostrada a situação de não urbanização do solo, o hidrograma é mais largo e mais baixo, ocorrendo a vazão de pico num tempo maior e com um menor volume. O item 2 apresenta a situação urbanizada, como há redução da parcela infiltrada e condução do escoamento pela superfície impermeável, o tempo de pico é reduzido comparado ao hidrograma não urbanizado e o volume da vazão de pico é muito maior. Esse volume precipitado escoando num tempo menor é o potencial causador de cheias e alagamentos. No item 3 é ilustrado a mancha de inundação após a aplicação de algumas soluções para amortecimento de cheias como bacias de acumulação, muros e diques de proteção e barragem de amortecimento com a finalidade de controlar a vazão de água do rio que chega na área urbanizada. Embora o hidrograma não retorne à condição inicial, ele apresenta um equilíbrio entre os estágios 1 e 2, reduzindo os riscos de inundação.

Alagamentos e transbordamentos geram grandes transtornos uma vez que obstruem as rodovias e ruas, invadem residências causando perdas materiais e de vidas. Além de transportar poluentes até os corpos hídricos, conforme GOMES (2008). Essas situações poderiam ser evitadas ou mitigadas caso houvesse um estudo do impacto da urbanização com modelos que pudessem prever o comportamento da bacia hidrográfica permitindo o desenvolvimento de planos de gestão de uso dos solos. A cidade do Rio Grande pode sofrer inundações tanto pela elevação da Lagoa dos Patos quanto pelas precipitações na região.

Conhecendo o comportamento dos corpos hídricos, seria possível antever a situação e assim desenvolver estratégias de engenharia de forma a mitigar o impacto

da urbanização, permitindo um estilo de vida mais saudável. Como demonstração da preocupação com o impacto da urbanização no ambiente, uma das metas do ODS 11 – Cidades e Comunidades sustentáveis da agenda 2030 da ONU, é até 2030, reduzir significativamente o número de mortes e o número de pessoas afetadas por catástrofes e substancialmente diminuir as perdas econômicas diretas causadas por elas em relação ao produto interno bruto global, incluindo os desastres relacionados à água, com o foco em proteger os pobres e as pessoas em situação de vulnerabilidade (ONU, 2023)¹³.

Os estudos hídricos se baseiam em observação de campo, com monitoramento hidrológico, e simulações com auxílios de programas computacionais. Existem vários programas disponíveis para projetos de macro e microdrenagem os quais utilizam métodos empíricos para a previsão de comportamento de uma bacia hidrográfica. Os métodos pioneiros e mais utilizados foram elaborados através de observações de bacias hidrográficas americanas, no entanto, seus parâmetros e coeficientes são geralmente utilizados e aplicados para bacias hidrográficas de vários outros países.

A utilização de parâmetros e coeficientes utilizados de outras regiões climatologicamente diferentes, pode não representar fielmente a realidade do local em estudo, uma vez que no Brasil tem-se uma diversidade muito grande de solos (Santos, 2011) e suas ocupações, gerando diferentes respostas hídricas. Desta forma, é necessário que sejam feitos estudos para conhecer o comportamento das bacias hidrográficas locais, modelando o comportamento destas e estabelecendo coeficientes que sejam representativos da região que permitam uma simulação mais fidedigna.

Para isto é necessário que se tenham dados disponíveis e com qualidade, mas atualmente nenhum dos arroios da cidade de Rio Grande possui monitoramento hidrológico o que impede a simulação de algum evento e a calibração do modelo. Assim, além de não ter estudos e modelagem das condições atuais, não se tem modelagem para simulações de cenários futuros que se tornam cada vez mais importantes com as alterações climáticas evidenciadas nas últimas décadas.

1.2. Estado da arte

Eventos de cheias podem ser bastante perigosos, como, por exemplo, o que ocorreu em 9 de setembro de 2009, no rio Ayamama em Istambul, na Turquia. O rio recebeu uma precipitação de 90mm em apenas 1 hora provocando uma inundação em um espaço de tempo muito curto. Como consequência morreram 32 pessoas e outras 50 ficaram feridas, além de muitos estragos materiais. Esse evento foi escolhido por Gülbaz et al. (2019), para fazer a modelagem de inundação da bacia hidrográfica do rio Ayamama em Istambul, Turquia. Os dados do evento foram utilizados para modelar a bacia hidrográfica do rio Ayamama através dos softwares *Environmental Protection Agency Storm Water Management Model* (EPA SWMM) e

¹³ <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

Watershed Modeling System (WMS), e resulta em mapas de risco que podem ser adotados para prever o comportamento da bacia em situações futuras e orientar o desenvolvimento de planos de gerenciamento da bacia hidrográfica. Conforme o desenvolvimento da urbanização, podem ser propostas recomendações para evitar inundações futuras como restauração de riachos, implementação de lagoas de retenção/detenção, trincheiras de infiltração ou pavimento permeável que são algumas das melhores práticas na gestão de águas pluviais.

Para a modelagem dos eventos de precipitação, existem vários softwares disponíveis e escolher um para modelar os eventos de cheia pode não ser uma tarefa fácil. A escolha envolve uma série de questões como sensibilidade dos parâmetros hidrológicos e os períodos de simulações como diárias ou para eventos de chuva com tempo de retorno em vários anos. Conforme Nayeb Yazdi et al. (2019), embora existam vários programas de modelagem de bacias hidrográficas, as informações disponíveis para orientar a seleção entre eles são limitadas. No intuito de comparar as respostas fornecidas pelos programas para melhor embasar a tomada de decisões, foram escolhidos 2 métodos para comparar bacias hidrográficas urbanas: *Environmental Protection Agency's* (USEPA) *Storm Water Management Model* (SWMM) (USEPA, 2018), e o *Hydrologic Simulation Program-Fortran* (HSPF) (USEPA, 2014). Buscando atender essa necessidade da pesquisa, foram comparados os recursos do HSPF e SWMM avaliando os seguintes termos: 1) parâmetros hidrológicos mais sensíveis na bacia hidrográfica, 2) simulação de vazões diárias e mensais em comparação com dados observados, 3) simulação de vazões de pico, vazões de base e suas respectivas durações e 4) coeficientes de escoamento previstos durante eventos de tempestade com períodos de retorno definidos. Esses resultados foram então usados para comparar os subcomponentes do hidrograma de bacia hidrográfica de longo prazo. Ambos os modelos simularam adequadamente a vazão; no entanto, o HSPF simulou vazão de base melhor que o SWMM, enquanto SWMM simulou vazão de pico melhor que HSPF. A análise de sensibilidade global mostrou que a variabilidade da vazão para SWMM foi maior do que para HSPF, enquanto a variabilidade da vazão de base para o HSPF foi maior que a do SWMM. Além disso, a análise de eventos extremos de tempestade indicou que o coeficiente de escoamento para SWMM foi ligeiramente maior do que HSPF para intervalos de recorrência de 1, 2, 5 e 10 anos; o oposto foi observado para o caso de intervalos de recorrência maiores que 10 anos. Os dados de monitoramento estão disponíveis para que várias análises possam ser feitas através dos variados softwares disponíveis, melhorando a precisão dos modelos. Deste trabalho pode-se inferir que o SWMM trabalha melhor com tempos de retorno menores, ou seja, para dimensionamento de microdrenagem. Para dimensionamento de macrodrenagem que usualmente utilizam tempos de retorno acima de 25 anos, o HSPF simulou melhor.

Buscando avaliar os comportamentos de diferentes softwares, Ibrahim e Dan'azumi (2020) fizeram uma revisão de 5 importantes modelos hidrológicos: *Water Evaluation and Planning* (WEAP), HEC-HMS, SWMM, HEC-RAS e *Hydrologic Engineering Center-Reservoir System Simulation* (HEC-ResSim). Neste trabalho foi

possível perceber que cada modelo tem suas características únicas e aplicações correspondentes. Desta forma é necessário conhecer bem os fatores que estão envolvidos na modelagem da bacia bem como a definição do tipo de aplicação, por exemplo previsão de enchentes, uso do solo, gerenciamento de bacias entre outros para que a escolha do modelo seja a mais representativa permitindo que a resposta seja mais próxima à realidade.

Em Minas Gerais (MG), tem-se dois exemplos de aplicação do método *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT): Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG e Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. Ambos os estudos mediram a acurácia do modelo com base no coeficiente de Nash-Sutcliffe com o primeiro obtendo valores de 0,66 e 0,87 e o segundo de 0,87 e 0,92 para as fases de calibração e validação, respectivamente, o que os qualifica como adequados para simular o comportamento hidrológico das respectivas bacias hidrográficas. Conforme a classificação sugerida por van Liew (2007) apud Pereira (2016) $ENS = 1$ significa ajuste perfeito dos dados preditos pelo modelo; $ENS > 0,75$ (modelo é adequado e bom); $0,36 < ENS < 0,75$ o modelo é considerado satisfatório e $ENS < 0,36$ o modelo não é satisfatório. Assim, apenas o valor 0,66 estaria na faixa de satisfatório e os demais na faixa de adequado e bom. Segundo Viola et al. (2009), a comparação de vazões máximas, mínimas e de referência para outorga obtidas pela série simulada, frente aos valores observados, possibilita a análise de uma aplicação prática do modelo hidrológico como ferramenta na gestão dos recursos hídricos. Posteriormente, Andrade, Melo e Beskow (2013) consideraram o modelo SWAT, como adequado e apto à simulação hidrológica na bacia hidrográfica estudada.

Em São Paulo, Urbani, Graciosa e Valverde (2023) modelaram o córrego do rio Ipiranga utilizando o HEC-HMS 4.2 para modelagem hidrodinâmica e o HEC-RAS 6.1 para gerar a mancha de inundação para os tempos de retorno (TR) de 10, 25 e 100 anos. Os autores consideraram que os resultados foram adequados sobre as áreas de inundação frequente na bacia, mesmo diante da escassez de dados observados disponíveis para realizar a calibração da mancha de inundação.

Em Minas Gerais, foi utilizado o HEC-HMS para fazer a modelagem do Rio Vieiras que fica na cidade de Montes Claros para um TR de 100 anos. Foram identificadas as regiões passíveis de alagamentos com indicação de restrições quanto ao uso e ocupação de algumas áreas por Boitrigo et al. (2023). Os autores também mencionam a falta de dados fluviométricos para bacias urbanas como dificuldade para calibração do modelo.

Na cidade de Curitiba, no Paraná, foram utilizados os modelos HEC-HMS e HEC-RAS para avaliar as medidas de proteção implantadas no Bolsão Audi-União. Cruz et al. (2023) simularam chuvas com TR de 10, 25, 50 e 100 anos e obtiveram como resposta que as obras realizadas, inclusive um dique, amortecem mais de 30% da mancha de inundação para o TR de 100 anos. O estudo também evidenciou que a realocação das famílias, uma das medidas não estruturais realizadas, era necessária visto que a região sofreria alagamentos até mesmo com chuvas com TR de 10 anos

e que a construção dos reservatórios a montante não se mostrou relevante na proteção das cheias.

Existem disponíveis vários softwares para modelagem hidráulica, hidrológica e hidrodinâmica. A tabela 1.1 apresenta um resumo de algumas opções disponíveis citando seus prós e contras.

Tabela 1.1: Resumo sobre alguns softwares utilizados para modelagem hidráulica, hidrológica e hidrodinâmica (continua).

Software	Foco Principal	Prós	Contras
HEC-RAS (<i>Hydrologic Engineering Center - River Analysis System</i>)	Hidráulica Fluvial (Escoamento em rios e canais)	Gratuito (Desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers); Amplamente aceito e utilizado globalmente; Possui capacidades 1D, 2D e acoplamento 1D/2D; Recurso RAS Mapper para visualização em SIG; Bom para análise de planícies de inundação.	Modelagem robusta de esgotos pluviais subterrâneos é limitada (embora a versão futura possa melhorar); Interface gráfica para modelagem 2D pode ter uma curva de aprendizado inicial.
HEC-HMS (<i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System</i>)	Hidrologia de Bacias Hidrográficas (Cálculo de vazões)	Gratuito (Desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers); Muito utilizado para simulação de processos hidrológicos (infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial); Excelente para cálculo de hidrogramas e dimensionamento de reservatórios; Abordagens de análise usuais incluídas.	Focado principalmente na hidrologia, não permite visualização de lâmina d'água e perfis em canais como o HEC-RAS (necessita acoplamento); Requer conhecimento prévio de conceitos hidrológicos.
SWMM (<i>Storm Water Management Model</i>)	Hidrologia e Hidráulica de Drenagem Urbana e Esgotos Pluviais	Gratuito (Desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency - EPA); Completo para simulação de escoamento superficial, transporte em redes de drenagem, e estruturas de controle de escoamento (bueiros, reservatórios, etc.); Usa ondas cinemáticas ou dinâmicas (equações de Saint-Venant) para modelagem hidrodinâmica mais precisa.	A interface pode ser considerada menos intuitiva ou "datada" por alguns usuários em comparação com softwares comerciais; Requer dados detalhados da rede de drenagem e sub-bacias.
OpenFOAM (<i>Open-source Field Operation and Manipulation</i>)	Hidrodinâmica 3D de alta precisão (CFD - Dinâmica dos Fluidos Computacional)	Gratuito e código aberto; Muito robusto para simulações complexas (3D, equações de Navier-Stokes); Flexibilidade para personalizar modelos e solucionadores; Ideal para pesquisa e aplicações avançadas onde 1D/2D são insuficientes.	Requer um conhecimento técnico avançado (CFD, programação) para uso e configuração; Alto tempo de processamento para modelos complexos; Curva de aprendizado íngreme.

Fonte: autor(2025).

Tabela 1.1: Resumo sobre alguns softwares utilizados para modelagem hidráulica, hidrológica e hidrodinâmica (conclusão).

Software	Foco Principal	Prós	Contras
<i>OpenFlows (Bentley Systems) (Ex: WaterGEMS, WaterCAD, StormCAD, FLOOD)</i>	Sistemas de Distribuição de Água, Drenagem e Avaliação de Risco de Inundação	Modelos robustos e abrangentes (distribuição, esgotos, águas pluviais, inundações); Interfaces gráficas amigáveis e integração com GIS/CAD; Possibilidade de análise de transientes hidráulicos (<i>WaterHAMMER</i>); Suporte técnico comercial.	Custo de Licenciamento (Softwares comerciais); Pode ser excessivamente complexo e caro para projetos muito simples.

Fonte: autor (2025).

A tabela 1.1 apresenta algumas opções de softwares disponíveis para modelagem hidráulica, hidrológica e hidrodinâmica contendo alguns prós e contras sobre cada software. Neste trabalho, optou-se pela utilização do HEC-RAS e HEC-HMS pois, além dos fatores apresentados na tabela, atendem aos objetivos e são gratuitos com ampla utilização e metodologia estabelecida. O SWMM não se aplicava nas necessidades deste trabalho, o OpenFOAM além de exigir muito tempo e conhecimento em programação, exige muito processamento e provavelmente excederia o tempo destinado à modelagem e o OpenFlows é pago, o que inviabilizaria este trabalho.

Alguns países já se encontram na fase de discussão sobre eficiência e aplicabilidade de vários softwares e modelos, sendo que alguns modelos foram calibrados por eventos de cheia. Isto contribui para que seus projetistas optem por um modelo mais adequado às necessidades do projeto. O Brasil ainda carece de dados de monitoramento, fato que impossibilita a calibração dos modelos. Além da dificuldade da calibração, poucos são os trabalhos na área de modelagem da drenagem urbana, o que afeta diretamente o conhecimento dos riscos hidrológicos envolvidos. Esse trabalho busca contribuir para preencher um pouco desta lacuna.

1.3. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral realizar a modelagem hidrológica e mapeamento da planície de inundação do Arroio Vieira e verificar o comportamento da calha do arroio.

1.3.1 Objetivos específicos

- Determinar as características físicas da bacia hidrográfica do Arroio Vieira, através de visitas ao local e de técnicas de geoprocessamento;
- Quantificar as vazões máximas, com período de retorno de 10, 50 e 100 anos,

em exutório localizado próximo à BR 392 utilizando o software *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS);

- Analisar o comportamento das vazões máximas, nos cenários avaliados, na calha do arroio com geometria aproximada da real utilizando o software *Hydrologic Engineering Center-River Analysis System* (HEC-RAS) e
- Analisar um horizonte futuro de expansão urbana e seu impacto para o escoamento superficial.

2 | Fundamentação teórica

2.1. Contextualização

A cidade de Rio Grande está situada na Bacia do Atlântico Sul, a qual, segundo a Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul (SEMA)¹⁴, se subdivide em 25 bacias no estado, que estão compreendidas em 3 grandes regiões: Região Hidrográfica da Bacia do Rio Uruguai, Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba e Região Hidrográfica das Bacias Litorâneas. A cidade de Rio Grande está totalmente situada na Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim e Canal São Gonçalo que faz parte da bacia Litorânea como mostra a figura 2.1.

A bacia hidrográfica do Atlântico Sul não se limita ao estado do Rio Grande do Sul. Ela se estende até o estado de São Paulo, passando pelos estados do Paraná e Santa Catarina, conforme a figura 2.2.

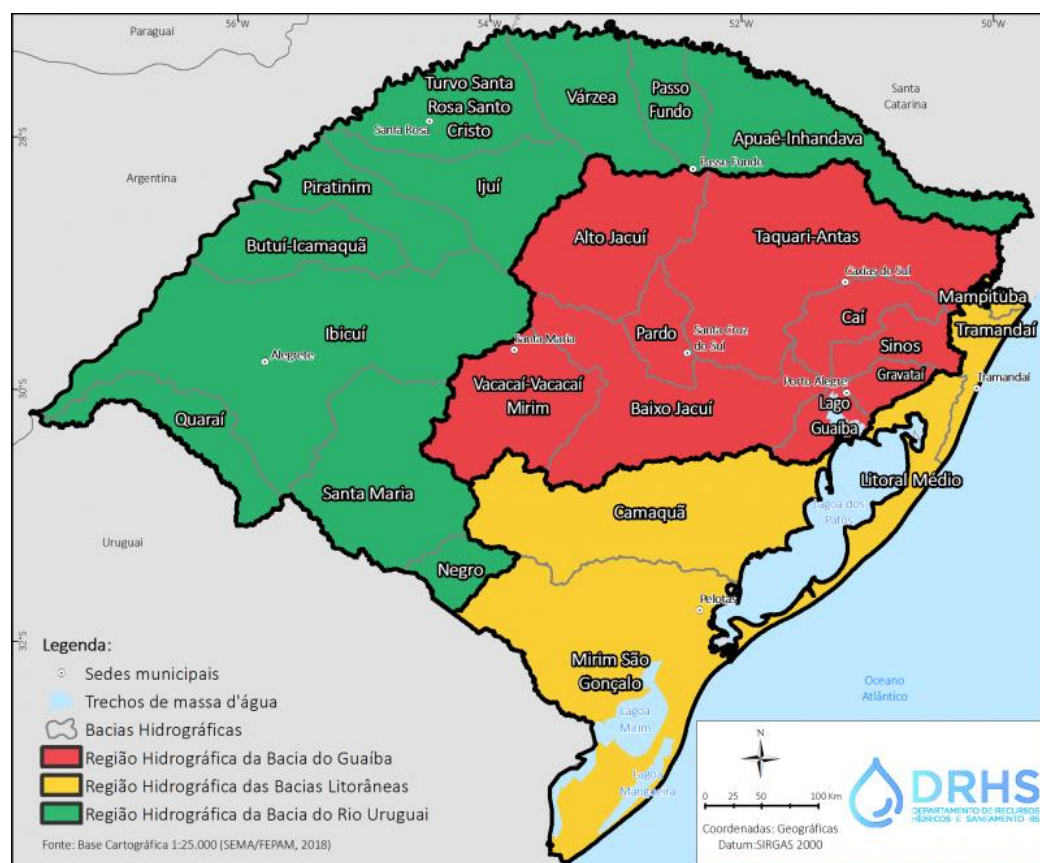


Figura 2.1: Bacias e Sub-Bacias do Rio Grande do Sul. Fonte: SEMA

Na figura 2.1 está identificada a região do Rio Grande do Sul que faz parte da bacia hidrográfica do Rio Uruguai em amarelo sendo as outras duas bacias

¹⁴ <https://www.sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas>

do Rio Grande do Sul¹⁶, sua formação geológica é constituída por depósitos aluviais recentes, classificada como Q4e4. Q4: Era cenozóica; Período: Neógeno; Época: Holoceno. Depósitos relacionados a barreiras-holocênicas. Depósitos Eólicos: Q4e: areia quartzosa fina a média, bem arredondada e selecionada, rara laminação plano-paralela ou estratificação cruzada. Como as atribuições no processo de transportes do Sistema Depositional de Leques Aluviais ainda podem ser observadas, mesmo com menor frequência, este pode ser considerado ativo (Silva, 2019).

A cidade de Rio Grande possui quase 2.700 km², a área urbanizada é 64,78 km² conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023)¹⁷, situada entre a Lagoa dos Patos, Lagoa Mirim e Oceano Atlântico, está localizada às margens da desembocadura da Lagoa dos Patos no Oceano Atlântico. Este fator favoreceu a criação do primeiro e único porto marítimo do estado e motivou a expansão da área urbanizada a partir da região portuária. No início do século XX, para atender as necessidades do comércio e atividades portuárias, foram feitas obras pelo governo federal alterando toda a geomorfologia do segmento leste do pontal:

Na verdade, toda uma nova geomorfologia foi implementada, pois lagoas e banhados foram aterrados, ilhas foram edificadas em antigos baixios, canais de drenagem foram retelinizados e o material de dragagem foi lançado, até mesmo, sobre áreas baixas e pantanosas distantes da futura área portuária, aterrando novos locais futuramente utilizados para fixar moradias. (Dumith, Telles e Lucas 2008).

Conforme o mapa planialtimétrico apresentado na figura 2.3 a cidade está aproximadamente no nível do mar (variando entre 1m e 6 m acima no nível do mar), o que pode dificultar a infiltração de chuvas uma vez que seu lençol freático está próximo ao nível da superfície. Os dados disponibilizados pela Embrapa¹⁸ corroboram com estes valores pois apresenta a altitude da cidade em 5m.

¹⁶

https://www.sgb.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_rio_grande_sul.pdf

¹⁷ <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/rio-grande/panorama>

¹⁸ <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/urbanizacao/conteudo/uf/rs.html>

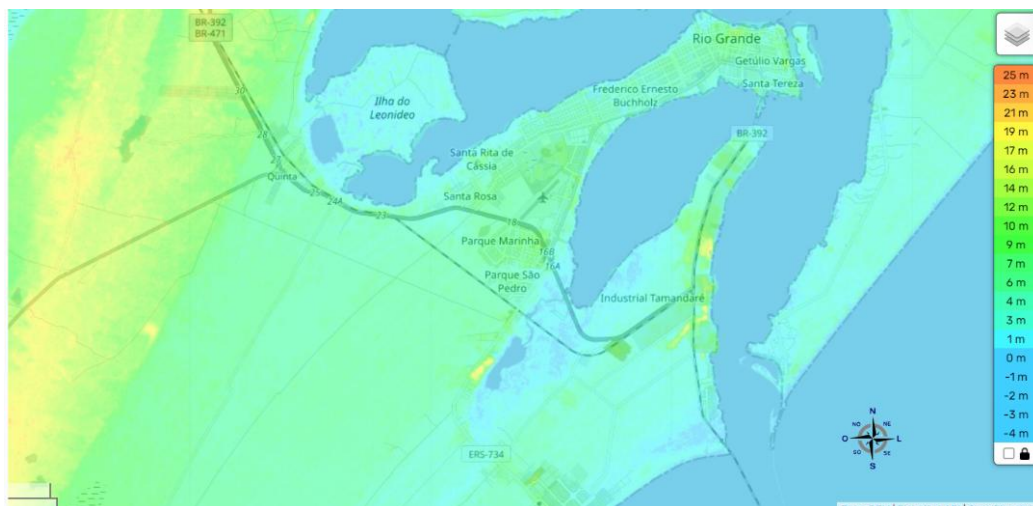


Figura 2.3: Mapa planialtimétrico da cidade do Rio Grande. Fonte: topographic-map.com (2024)

A figura 2.3 apresenta um mapa planialtimétrico da cidade de Rio Grande, no qual pode ser observado que a cidade é bastante plana com altitude média entre 3 e 4 metros.

A urbanização se expandiu em torno do porto marítimo o que resultou no desenvolvimento da cidade concentrado num braço de terra que avança em direção à Lagoa dos Patos, conforme ampliação na figura 2.4. Atualmente a Região do Cassino, que é banhada pelo Oceano Atlântico, está em expansão da sua urbanização também. A posição geográfica que permitiu a implantação do terminal portuário que foi o fator de desenvolvimento da cidade, também é um dos agravantes pelos alagamentos na região uma vez que a Lagoa dos Patos é responsável por drenar grande parte dos volumes precipitados na bacia do atlântico sul através de seus rios afluentes.



Figura 2.4: Cidade do Rio Grande. Fonte: Google Maps (2024)

Embora a cidade de Rio Grande tenha apresentado uma retração no número de habitantes no censo de 2022 em relação ao censo de 2010, conforme dados disponibilizados pelo IBGE, entre estes dois períodos a cidade passou por um crescimento rápido e desordenado em virtude da construção do pólo naval iniciada em 2006 e finalizada no ano 2010. Após finalizadas as atividades construtivas, deu-se início às atividades do estaleiro.

Neste cenário, muitos trabalhadores da construção metal mecânica de outras regiões do Brasil foram atraídos para a cidade com a finalidade de atender às demandas do estaleiro. Esses trabalhadores precisaram se instalar na cidade que rapidamente recebeu um grande número de habitantes e precisou se adequar à nova realidade, sem ter sido projetada para isso (Silva e Gonçalves, 2014).

Essa situação exigiu um aumento na construção de residências e outras estruturas de forma a abrigar esses novos moradores. Como a cidade não recebeu um planejamento para atender esta demanda, o deslocamento interno tornou-se cada vez mais caótico e estimulou a preferência por habitar regiões que estivessem próximas aos locais de trabalho e atividades rotineiras para diminuir o tempo entre os deslocamentos, e o estresse consequente (Silva e Gonçalves, 2014). Com isso, a região que inicialmente já era urbanizada recebeu mais urbanização ocasionado a saturação habitacional de algumas localidades e aumentando, ainda mais, a necessidade de expansão da urbanização, gerando mais impermeabilização do solo. Em alguns locais esta urbanização avançou em direção aos corpos hídricos da cidade. Os arroios de Rio Grande não possuem monitoramento hidrológico e não se tem estudos relatando como estes se comportam. Soma-se ao desconhecimento, às mudanças climáticas que estão ocorrendo em todo o mundo e em especial no Rio Grande do Sul que entre junho de 2023 e maio de 2024 sofreu 4 eventos extremos de precipitação, segundo dados disponíveis no site do INMET. É latente a necessidade de estudos e acompanhamentos dos arroios de forma a planejar a ocupação do solo da cidade a fim de evitar ou mitigar os efeitos de desastres naturais.

Os desastres naturais compreendem eventos de diversas naturezas, como sismos, ciclones e erupções vulcânicas; contudo, as inundações e enchentes são os fenômenos de maior recorrência e impacto social. Tais eventos derivam dos processos de precipitação — que incluem desde o orvalho e a neblina até formas sólidas como o granizo e a neve —, sendo a chuva o principal vetor de alteração na dinâmica hídrica urbana. Nesse cenário, sistemas de drenagem ineficientes resultam em alagamentos, caracterizados pelo acúmulo de água em vias urbanizadas. Paralelamente, o incremento da vazão nos corpos hídricos gera, em um primeiro estágio, a enchente, definida pelo extravasamento dentro do leito natural. Ao persistir o aumento do volume, ocorre a inundação, com a ocupação efetiva das planícies de inundação e áreas de várzea. A delimitação técnica dessas áreas é crucial para o planejamento urbano, visto que a ocupação dessas regiões de alto risco hidrológico deve ser evitada (Tucci, 2002).

2.1.1 Diagnóstico de Saneamento de Rio Grande

Buscando atender as exigências da lei federal 11.445/2007, a prefeitura municipal de Rio Grande elaborou o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) no ano de 2013. Dentre os produtos deste plano está o Diagnóstico de Saneamento Básico que está subdividido em 3 tomos: Tomo I - Diagnóstico do Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário, Tomo II - Diagnóstico da Limpeza Urbana e Manejo dos Resíduos e Tomo III - Diagnóstico da Drenagem Urbana e Manejo de Águas Pluviais. O Tomo III foi elaborado pela empresa Engeplus Engenharia e Consultoria Ltda. Para a confecção do Diagnóstico, foram feitos levantamentos para a determinação das características físicas e condições hidrológicas da área em estudo. A determinação das microbacias com seus respectivos estudos geológicos contribuiu para a elaboração de parâmetros como a determinação do tempo de concentração e *Curve Number* (CN) do solo, que será explicado em 2.5.1. Uma IDF também foi proposta através destes estudos. Uma das sugestões do estudo foi a criação de um programa de monitoramento de níveis, vazões e chuvas em diferentes locais, especialmente nos arroios urbanos, tais como o Cabeças, Martins e Bolaxa.

Para a realização da consulta popular, eram previstas 12 audiências em locais distintos. Porém apenas 8 haviam sido realizadas até a elaboração do plano, totalizando a participação de 281 pessoas de 45 bairros distintos. Segundo a matriz de avaliação setorial, os moradores participantes das audiências relataram que 93% dos bairros avaliados sofriam com alagamentos e 83% não possuíam sistema de drenagem. E ainda 39% apontaram enchentes muito frequentes, mais de 1 vez a cada 2 anos. A população ainda avaliou o sistema de drenagem e 75% consideraram ruim e apenas 10% consideraram bom.

Um dos subprodutos do PMSB é o resumo das ações que apresenta 4 esquemas de proposições para curto, médio e longo prazo. Dentre as proposições para a Drenagem Urbana e Manejo de Águas Pluviais estão listadas: Elaboração de lei municipal para estabelecer o marco legal da drenagem urbana, Elaboração do Plano Diretor de Drenagem Urbana e Obtenção da Base Cartográfica das Áreas Urbanas do Município. Os 3 itens foram alocados para prazo imediato, tempo de conclusão de até 1 ano. Porém, em pesquisa na data de 12/11/2025, nenhum destes itens estava disponível na página da prefeitura e não foram encontrados em buscas pela internet.

2.2. Drenagem Urbana

No início do século XX, o Brasil adotou a abordagem higienista, oriunda da experiência europeia do século XIX, cujo foco era o rápido afastamento das águas pluviais e do esgoto sanitário para jusante, visando o controle de doenças. Essa técnica, embora eficaz localmente, transferia o volume hídrico para áreas a jusante, agravando inundações em outros pontos da bacia. Com a intensa urbanização decorrente do êxodo rural na metade do século passado, esse conceito tornou-se insustentável a partir da década de 1970. Surgiu, então, a necessidade de técnicas

compensatórias, que buscam a recuperação do ciclo hidrológico natural por meio do controle na fonte, utilizando soluções como pavimentos permeáveis e microreservatórios residenciais para reduzir e retardar os picos de cheia (Tucci, 2002).

Conforme Gonçalves e Melo (2009), a partir da década de 1950 pode ser observada uma explosão populacional no Brasil e no final da década de 1970 a maioria da população já se encontrava em zonas urbanas. O crescimento urbano aconteceu de forma rápida e intensa, o que aumentou significativamente as áreas impermeabilizadas trazendo como consequências um aumento no volume escoado e na velocidade deste.

A drenagem urbana é classicamente dividida em dois níveis: microdrenagem e macrodrenagem. A microdrenagem compreende os dispositivos de captação e condução de águas pluviais — como sarjetas, bocas de lobo, poços de visita e galerias — projetados para manejar o escoamento superficial em escala local até um desaguadouro natural. Tais estruturas tornam-se essenciais quando a urbanização e a impermeabilização do solo excedem a capacidade natural de absorção. Já a macrodrenagem abrange o sistema de maior hierarquia, compreendendo desde grandes canais e galerias de grande porte até a bacia hidrográfica em sua totalidade, visando o escoamento final e o controle de cheias em larga escala (Tucci, 2002).

Atualmente está em desenvolvimento a visão sustentável da macrodrenagem que preza por um desenvolvimento integrado de soluções atuando de forma a deter, infiltrar e armazenar temporariamente um determinado volume de chuva. Embora grande parte das soluções utilizadas na visão sustentável tenham origem na drenagem compensatória, o maior foco é a compreensão do processo todo e não apenas na compensação do excesso do volume de chuva. É uma visão mais integrada do ciclo hidrológico atuando em várias frentes simultaneamente e aplicando um conjunto de soluções (Costa, 2024).

Algumas das técnicas compensatórias já consolidadas no controle de cheias urbanas são: micro reservatórios domiciliares, pavimentos permeáveis, bacias de detenção e retenção e trincheiras de infiltração. Os sistemas de micro reservatórios compreendem desde os barris de chuva, que são estruturas simples instaladas juntos às calhas das edificações, até pequenos reservatórios escavados nas propriedades. O tipo de reservatório vai depender da disponibilidade de terreno. Um exemplo de aplicação deste tipo de solução seria um sistema de captação de águas de chuvas instalado em um condomínio. Esse volume de água poderia ser utilizado para irrigação de jardins e até mesmo lavagem de carros e poderia sofrer uma etapa simples de tratamento como cloração. Essa seria uma solução sustentável uma vez que não apenas reduz o impacto de alagamentos, mas também aproveita o que foi coletado.

Os pavimentos permeáveis e as trincheiras de infiltração visam elevar a capacidade de infiltração do solo, mitigando o escoamento superficial. Complementarmente, a cobertura vegetal atua na interceptação da precipitação e na proteção edáfica contra processos erosivos (Tucci, 2002). No que tange ao amortecimento de cheias, as bacias de detenção e retenção operam no armazenamento temporário de volumes hídricos, visando a redução do hidrograma

de pico e evitando o transbordamento dos corpos hídricos. Enquanto as bacias de retenção permanecem secas entre eventos críticos, as de retenção mantêm uma lâmina d'água permanente — como em lagos artificiais — o que favorece o controle de poluentes e impede o desenvolvimento de vegetação indesejada no leito da estrutura (Costa, 2024).

Nesse contexto, a redução da suscetibilidade a riscos hidrológicos demanda um planejamento urbano que antecipe o crescimento populacional a longo prazo. Para que a urbanização não resulte na exacerbação de alagamentos, é imperativo que o Plano Diretor incorpore diretrizes hidrológicas robustas, integradas a ações de conscientização ambiental. Isso se justifica pelo fato de que a obstrução de bocas de lobo por resíduos sólidos permanece como um dos principais agravantes do sistema de drenagem local.

Tais demandas devem ser lideradas pelo poder público, a quem cabe o diagnóstico territorial e o monitoramento hidrológico sistemático para a identificação de áreas de risco. A transparência desses dados e a inclusão de condicionantes hídricas no ordenamento territorial são fundamentais para uma gestão racional do uso do solo. Afinal, a ausência de estudos técnicos e séries históricas inviabiliza decisões fundamentadas, elevando substancialmente a probabilidade de ocupação em áreas vulneráveis.

2.3. Bacia Hidrográfica

2.3.1 Corpos Hídricos do Rio Grande

A cidade do Rio Grande é permeada em sua urbanização por 6 arroios que deságuam na Lagoa dos Patos através dos Sacos da Mangueira e do Martins, conforme mostrado na figura 2.5. Dos 6 arroios, 3 deságuam no saco do Martins e 3 no saco da Mangueira, sendo que um deságua diretamente e dois através da Lagoa Verde. Ambos os sacos, Martins e Mangueira, convergem para a Lagoa dos Patos que desemboca no Oceano Atlântico.

Segundo Bobadillo e Tagliani (2012), ainda não havia comprometimento da situação ambiental destes arroios, mas o estudo também salienta que um dos três principais fatores que impactam o ambiente é a ocupação desordenada que além de aumentar a impermeabilização do solo também aumenta a destinação de efluentes para os corpos hídricos próximos.

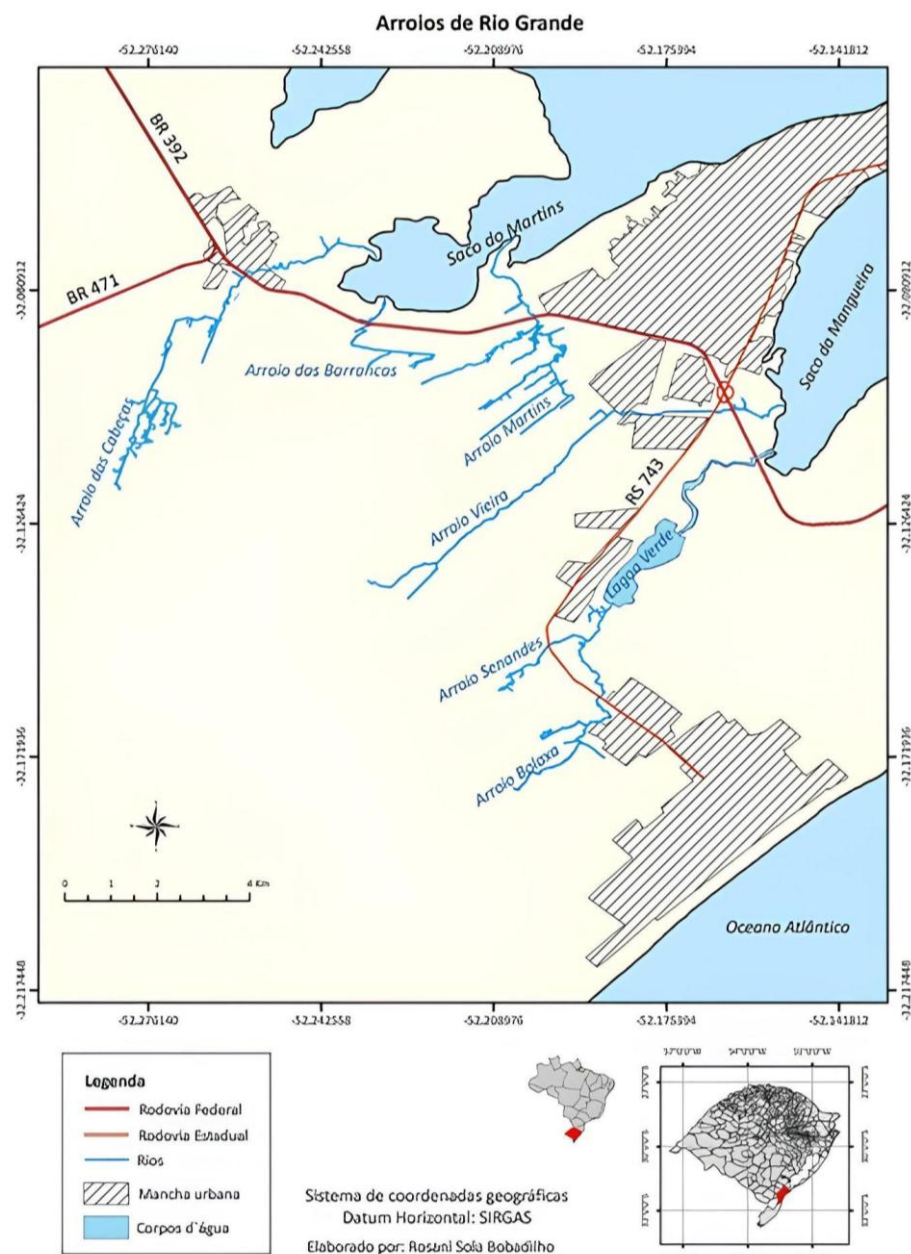


Figura 2.5: Mapa dos arroios urbanos do Rio Grande. Fonte: Bobadilho e Tagliani, 2012.

Na figura 2.5, pode-se ver que o Arroio das Cabeças, o Arroio das Barrancas e o Arroio Martins desaguam no Saco do Martins enquanto os Arroios Senandes e Bolaxa fluem para a Lagoa Verde que juntamente com o Arroio Vieira desaguam no Saco da Mangueira. Estes dois sacos fazem parte do estuário da Lagoa dos Patos que deságua no Oceano Atlântico.

2.3.2 Tempo de Concentração

O tempo de concentração de uma bacia é definido como o intervalo necessário para que a precipitação excedente, originada no ponto hidrológicamente mais remoto, contribua para o escoamento no exutório (Chow et al., 1994). De acordo

com Silveira (2005), esse parâmetro é fundamental para o dimensionamento de obras de drenagem, sendo influenciado diretamente pelas características fisiográficas da bacia. A declividade rege a velocidade do fluxo e a propensão a enxurradas; quanto mais acentuada a inclinação, menor o tempo de resposta (Tucci, 2002). Adicionalmente, a geometria da bacia condiciona a distribuição temporal da vazão: bacias alongadas tendem a apresentar tempos de concentração maiores, enquanto bacias circulares favorecem a convergência simultânea do escoamento, resultando em picos de cheia mais elevados (Chow et al., 1994; Tucci, 2002).

Quanto menor o tempo de concentração, mais rápido a bacia alcança o pico e maior a probabilidade de transbordamento, alagamento. Segundo Collischonn e Dornelles (2013, p. 23) “O curso d’água principal pode ser definida como o mais longo caminho que a água pode percorrer dentro de uma bacia hidrográfica.” Uma das formas de estimar a declividade média da drenagem principal de uma bacia é dividindo a diferença de cota entre a cabeceira e o exutório pelo comprimento do rio principal. Quando o perfil do talvegue sofrer uma alteração brusca na inclinação, é recomendado fazer o cálculo considerando as declividades parciais.

Várias foram as equações desenvolvidas para calcular o tempo de concentração em bacias e a recomendação é adotar uma equação que tenha sido desenvolvida com os mesmos parâmetros da bacia que se pretende estudar. Silveira (2005) fez uma análise de 23 equações e apresentou um estudo sobre o desempenho destas sobre um banco de dados de bacias urbanas e outro de bacias rurais. A equação de Kirpich aparece entre as 4 com melhor desempenho tanto nas bacias urbanas como em bacias rurais. A tabela 2.1 contém um resumo de algumas equações e seus parâmetros.

Tabela 2.1: Tempo de concentração - equações empíricas

Nome	Equação	Parâmetros de uso
Kirpich Tennessee	$tc = 57(L^3/H)^{0,385}$	Bacias rurais com área $\leq 12.000 \text{ km}^2$. Declividade até 10%
Kirpich Pensilvânia	$tc = 12(L^{0,77}/H^{0,35})$	Áreas $\leq 0,5 \text{ km}^2$. Declividade 3% a 10%
Dooge	$tc = 21,88(A^{0,41}/S^{0,17})$	$140 \leq \text{Áreas} \leq 930 \text{ km}^2$.
Watt e Chow	$tc = 7,68 (L/S^{0,5})^{0,79}$	Áreas $\leq 5840 \text{ km}^2$.
Federal Aviation Agency	$tc = 22,73 (1 - C)L^{0,5}S^{-0,33}$	Bacias muito pequenas, dimensionada para escoamento de aeroporto

Fonte: Adaptado de Collischonn e Dornelles (2013).

onde: tc = tempo de concentração (min); L = comprimento do curso d’água (km); H = diferença de altitude da bacia (m); A = área da bacia (km^2); S = declividade da bacia (km/km); C = coeficiente do escoamento superficial (Método Racional).

A tabela 3.1 apresenta equações para o cálculo do tc e os parâmetros de uso. Cada equação tem um melhor ajuste dentro de um conjunto de parâmetros e a escolha da equação é feita segundo as características da bacia a ser analisada.

Outra definição para o tempo de concentração é o tempo que toda a bacia leva para contribuir com a vazão que chega ao exutório. A onda de cheia não se propaga em um tempo linear pois depende das vazões ao longo do percurso. Segundo Costa (2024) quanto maior a vazão, menor será o tempo de concentração, pois a onda será mais veloz. Assim, o tempo de concentração não seria um valor estático, mas um dado que pode sofrer impacto das vazões ao longo do trecho estudado. Como as medidas do trecho de rio e inclinação podem ser impactadas pelos métodos de medição e do operador, cada hidrólogo pode chegar num tempo de concentração diferente. A experiência de campo tanto do profissional que está levantando os dados quanto do estudioso/projetista, é bastante valiosa para detectar inconsistências ou disparidades.

2.3.3 Chuva de projeto

O tempo de retorno (TR) é o tempo que uma dada precipitação poderá ser igualada ou superada, ou seja, para um tempo de retorno de 100 anos espera-se que o evento de precipitação seja igualado ou superado no tempo médio de 100 anos e, assim, a probabilidade de que este evento ocorra em cada ano é de 1%. Este dado é muito importante para a hidrologia pois os equipamentos de drenagem serão dimensionados conforme a sua criticidade levando em consideração o tempo de retorno de determinada chuva. Por exemplo, equipamentos de drenagem que pertencem à microdrenagem como sarjetas e bocas de lobo pode-se considerar um tempo de retorno de 2, 5 ou 10 anos, dependendo do impacto que a falha destes equipamentos pode causar. Já obras como pontes podem considerar um tempo de retorno de 50 ou 100 anos (Collischonn e Dornelles, 2013). Para obras hidráulicas de grande porte, como por exemplo barragens, o tempo de retorno a ser considerado deverá ser bastante elevado, pois o risco de rompimento deverá ser mínimo, assim o tempo de retorno considerado pode ser de 10.000 anos, pois o impacto de seu rompimento é muito grande.

Para o dimensionamento dos equipamentos de infraestrutura de drenagem é importante estimar a chuva de projeto através da Intensidade-Duração-Frequência (IDF). As curvas IDF são baseadas em análises de séries históricas de eventos de precipitação com pelo menos 15 anos de dados consistentes para a análise. No Brasil, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) possui uma rede de monitoramento, de postos pluviométricos e fluviométricos com banco de dados disponíveis para acesso público. A forma da equação IDF mais conhecida, conforme Collischonn e Dornelles (2013) é:

$$I = \frac{aTR^b}{(td+c)^d} \quad (2.1)$$

onde: I = intensidade da chuva em mm/h; TR = tempo de retorno em anos;

td = tempo de duração da chuva em minutos e a , b , c e d são parâmetros característicos da curva IDF de cada local.

Como os coeficientes da equação são baseados na série histórica de anos anteriores, as curvas IDF podem mudar conforme o tamanho do banco de dados utilizado. Assim, é importante saber a origem das curvas e o período de análise dos dados. A construção da curva IDF é baseada na condição de estacionaridade considerando que o passado tende a se repetir no futuro. Mas diante das mudanças climáticas observadas é possível que os volumes precipitados sejam maiores num cenário futuro.

O grupo de pesquisas em hidrologia e modelagem hidrológica em bacias hidrográficas da Universidade Federal de Pelotas (UFPel) disponibiliza uma forma de criação de IDF online através da ferramenta denominada Metodologia de Algoritmos Genéticos para IDF (GAM-IDF) que permite que o usuário importe direto do site da ANA (Hidroweb) os dados de precipitação. Outro software que fornece equações de IDF é o Plúvio, desenvolvido pelo grupo de pesquisa de recursos hídricos da Universidade Federal de Viçosa. A apresentação do Plúvio 2.1 pode ser conferida na figura 2.6.

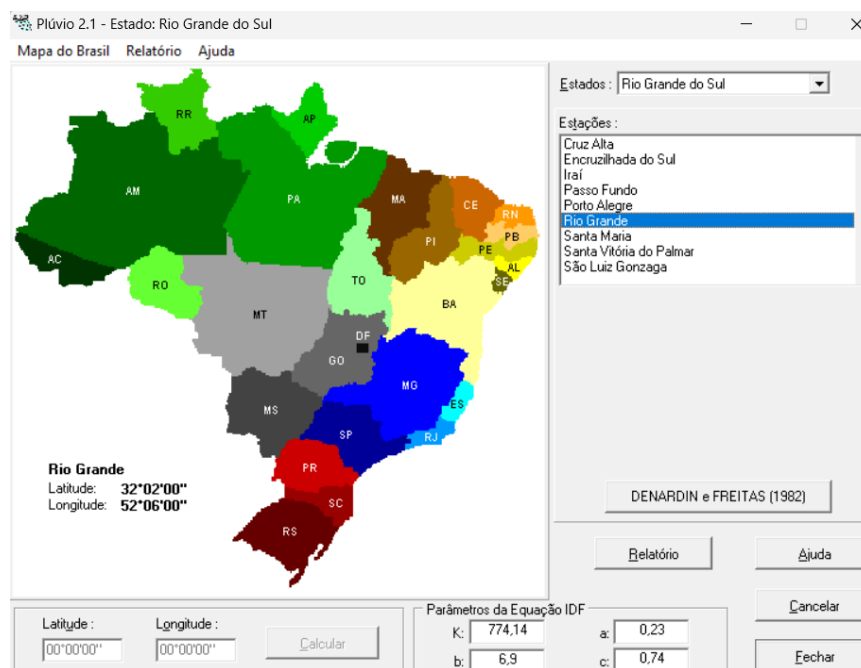


Figura 2.6: Coeficientes IDF para a cidade do Rio Grande. Fonte: Plúvio 2.1

Conforme a figura 2.6, podem ser obtidos os coeficientes da IDF para a cidade de Rio Grande. O Plúvio 2.1 considera a equação da IDF da seguinte forma:

$$I = \frac{K \cdot T R^a}{(t+b)^c} \quad (2.2)$$

nota: a equação 2.2 é igual a 2.1 mudando apenas a notação sendo: $t=td$, $K=a$, $a=b$, $b=c$ e $c=d$

Durante os eventos de chuva, parte da precipitação infiltra no solo até o ponto em que ele fica saturado e não há mais infiltração. A partir deste momento, toda a

precipitação vira escoamento superficial. Não é usual considerar a evapotranspiração no cálculo da vazão para simulação de evento tipo uma precipitação de chuva.

Vassão (2023) fez um estudo sobre os postos pluviográficos de Rio Grande propondo equações IDF para as estações Barra do Rio Grande (3252002), Granja Cerrito (3252006), Granja Santa Maria (3252008), Regatas (3252024) e Rio Grande/Furg (3252020/ A802). A localização das estações Regatas e Rio Grande está na figura 2.7.

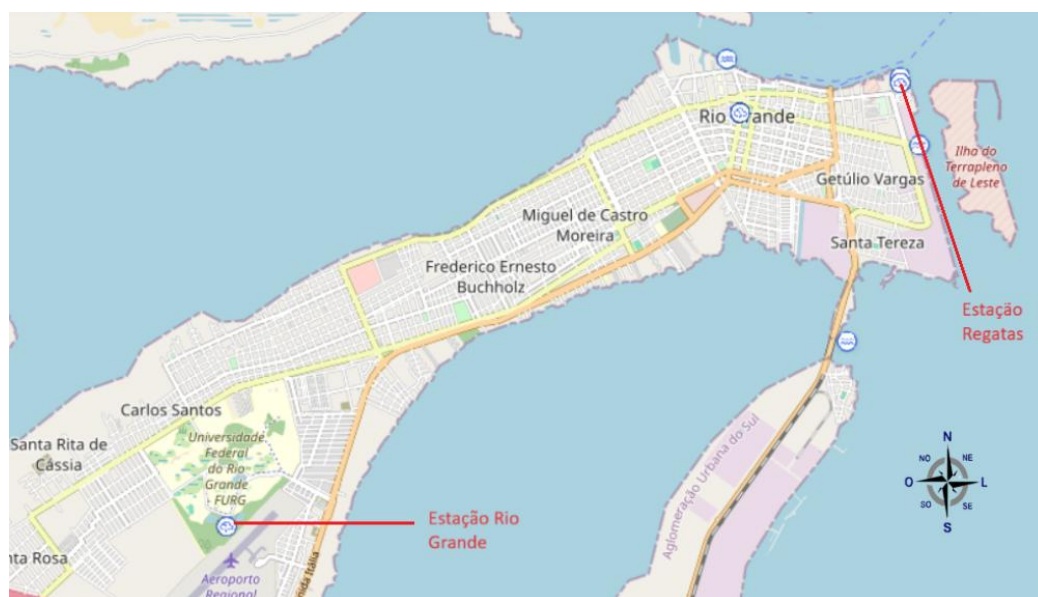


Figura 2.7: Localização das estações pluviométricas FURG e Regatas. Fonte: Adaptado de HIDROWEB/ANA.¹⁹

A figura 2.7 apresenta as localizações das estações Rio Grande e Regatas. A estação Regatas fica próxima ao estuário da Lagoa dos Patos e a estação Rio Grande fica mais próxima da urbanização e do Arroio Vieira, objeto deste estudo.

A seguir estão as equações propostas por Vassão (2023) para os postos Regatas (3252024) e Rio Grande (3252020), respectivamente:

$$I = \frac{798,136TR^{0,193}}{(t+9,791)^{0,724}} \quad (2.3)$$

$$I = \frac{822TR^{0,169}}{(t+9,784)^{0,724}} \quad (2.4)$$

Em 2013, a prefeitura do Rio Grande elaborou o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), o qual será discutido melhor no item 2.4, e um dos documentos desse plano é o Diagnóstico de Saneamento Básico. No tomo III

¹⁹ <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>

referente à Drenagem Urbana e manejo de águas pluviais, é disponibilizada a seguinte IDF que foi construída com base nos dados do posto Regatas (3252024).

$$I = \frac{1.368,2TR^{0,143}}{(t+14,16)^{0,774}} \quad (2.5)$$

2.4. Plano diretor

As ocorrências de desastres ambientais registradas tornam notória a necessidade de um plano que considere as zonas de maior risco de ocorrências destes. A falta de conhecimento destes locais e a urbanização desordenada são fatores que causam bastante impacto diante de situações de risco. Na intenção de planejar o zoneamento de forma a reduzir os impactos, o governo federal já publicou diversas leis federais versando sobre o assunto. Estas leis norteiam os municípios na elaboração de documentos que visam estabelecer um equilíbrio entre o meio ambiente e a urbanização de forma a desenvolver uma cidade sustentável para os habitantes atuais e para as futuras gerações.

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (Constituição Federal de 1988, artigo 225).

Apesar de todo o esforço envolvido para o desenvolvimento de políticas públicas para a drenagem urbana que busca tornar as cidades locais mais seguros para riscos hidrológicos e tornar os ambientes mais saudáveis, através da elaboração de leis no período de 1978 e 2020 que estão retratadas mais adiante, o relatório do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) de 2022 aponta que menos de 17% das cidades possuem um Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas (DMAPU) e quase 70% não possuem mapeamento das áreas de risco, conforme pode ser observado na figura 2.8.

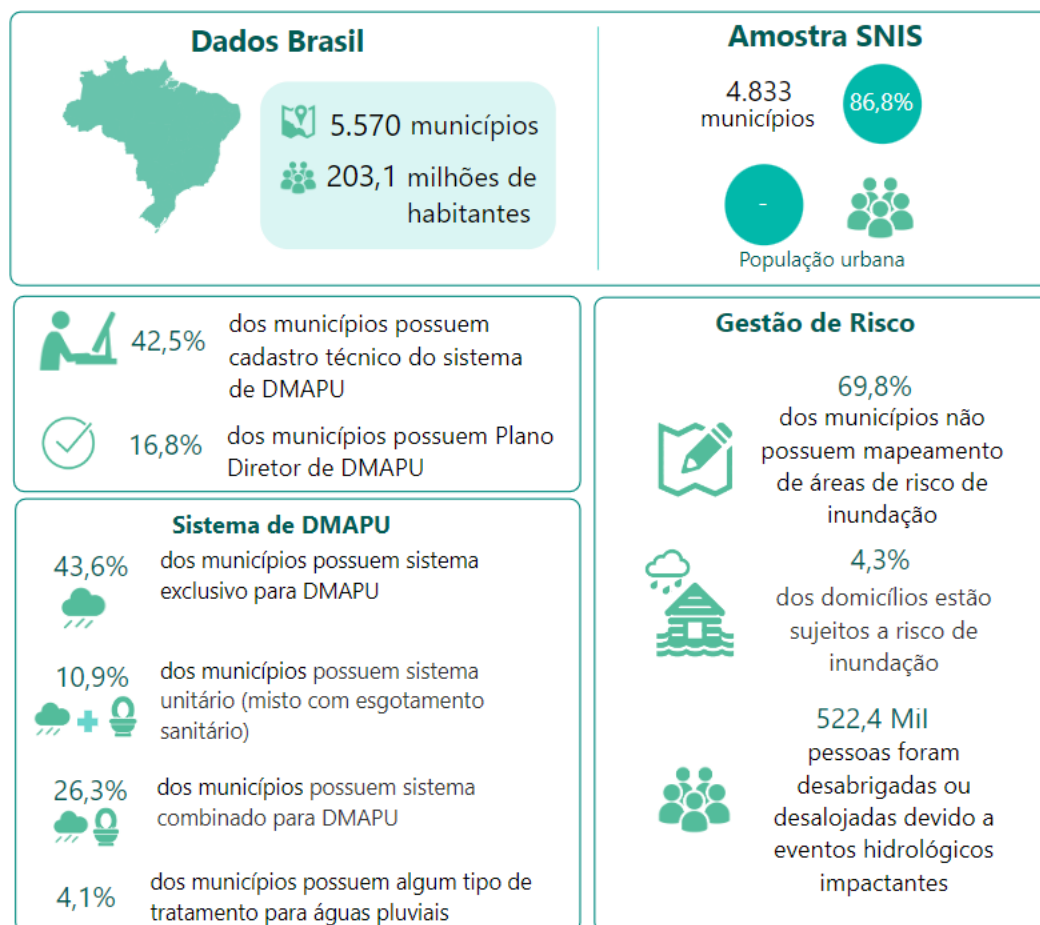


Figura 2.8: Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas, 2022. Fonte: SNIS²⁰

Conforme pode ser observado na figura 2.8, apenas 4,1% dos municípios brasileiros possuem algum tipo de tratamento para as águas pluviais e menos de 17% possuem um plano diretor de drenagem urbana. Ainda se tem que 4,3% dos domicílios estão sujeitos a risco de inundação e menos de 70% dos municípios possuem mapeamento das áreas de risco de inundação. Considerando o cenário atual, ainda há muito a ser feito na questão da drenagem urbana no Brasil. E soma-se a isso o agravante das mudanças climáticas.

A busca da administração pública pela melhoria nas condições de saneamento básico está demonstrada através da criação de leis que tratam do assunto. A lei 6.528/1978, que tratava das tarifas do serviço público de saneamento entre outras providências sobre o serviço público de saneamento básico integradas ao Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANASA), foi revogada pela lei 11.445/2007 que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e cria o comitê interministerial de saneamento básico. Essa lei também alterou a lei 6.766/1979, que trata do parcelamento do solo urbano e que considera abastecimento de água potável, esgotamento sanitário e equipamentos urbanos de escoamento de águas pluviais

²⁰

<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/ap>

como infraestrutura básica dos parcelamentos e que terrenos alagadiços e sujeitos a inundações não devem ter a sua liberação de parcelamento do solo antes de terem essas questões sanadas, de forma a assegurar o escoamento das águas, desde a alteração dada pela lei 9.785/1999.

A lei 9.984/2000 cria a ANA e lhe delega as responsabilidades de instituir normas de referências com a finalidade de regular os serviços públicos de saneamento básico e também a define como entidade federal para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. A lei 14.026/2020 atualiza o marco legal do saneamento básico e altera algumas leis, inclusive a 11.445 que a partir deste momento considera todo o sistema de captação de água pluviais, transporte, retenção ou retenção para amortecimento, tratamento, disposição final e inclusive limpeza e fiscalização preventiva das redes como conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de saneamento básico.

A lei 10.257/2001, denominada Estatuto da Cidade, prevê em seu artigo 43-A algumas condicionantes para a elaboração do plano de drenagem urbana, inclusive impondo aos municípios que conheçam e façam o cadastro das áreas suscetíveis à ocorrência de desastres no cadastro nacional. Estes planos visam prevenir e mitigar o impacto dessas ocorrências. Esta lei trata de vários aspectos do regime urbanístico e ressalta a importância dos equipamentos de abastecimento de água, esgoto e drenagem pluvial. O capítulo III trata sobre o Plano Diretor dos municípios.

2.5 Modelagem Hidrológica

Segundo Tucci (2005, p.18), “o modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas”. O modelo hidrológico busca converter em vazão a precipitação que cai sobre a bacia hidrográfica. De acordo com Almeida e Serra (2017, p. 3), “um modelo hidrológico pode ser representado matematicamente através do fluxo de água e de seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre”. Assim, a entrada no sistema seria a precipitação e as perdas seriam a evapotranspiração e infiltração e o resultado deste balanço é a vazão.

Na hidrologia, a modelagem é uma ferramenta através da qual se obtém compreensão mais aprofundada dos fenômenos físicos envolvidos no balanceamento da bacia hidrográfica e com a qual se busca prever possíveis cenários futuros de forma a planejar ocupações ou ações de mitigação de danos. Os avanços dos esforços computacionais nas últimas décadas permitiram que um maior número de cálculos fosse realizado num menor intervalo de tempo, contribuindo para o aperfeiçoamento dos modelos computacionais (Collischonn e Dornelles, 2013).

Segundo Almeida e Serra (2017), dois grandes grupos de modelos hidrológicos surgiram: estocásticos e determinísticos ou conceituais. Os modelos estocásticos são os que consideram as séries observadas de vazões em determinado ponto gerando modelos de séries temporais a partir de certas hipóteses de comportamento. Os

modelos determinísticos ou conceituais, usualmente denominados chuva-vazão, buscam representar o sistema físico natural (processos do ciclo hidrológico) fornecendo as séries de vazões a partir dos dados de entrada (precipitação, evapotranspiração, infiltração).

O hidrograma unitário desenvolvido a partir das informações de chuva e vazão de uma dada bacia vale apenas para o ponto onde as informações da vazão foram coletadas (Chow, 1994). Para desenvolver hidrogramas unitários para outros pontos ou para bacias próximas que possuam as mesmas características existem procedimentos de hidrograma unitário sintético. Os hidrogramas unitários sintéticos são classificados em 3 tipos:

- 1) Os que relacionam características da bacia com as características do hidrograma (vazão de pico, vazão de base etc.). Exemplo: Snyder, 1938; Gray, 1961;
- 2) Os que se baseiam em hidrogramas unitários adimensionais. Exemplo: Soil Conservation Service, 1972; e
- 3) Os que se baseiam em modelos de armazenamento na bacia (Clark, 1943).

2.5.1 Método SCS

O método é conhecido como SCS-CN por causa do nome da instituição e foi desenvolvido pelo *National Resources Conservation Center* dos EUA, antigo *Soil Conservation Service* - (SCS). Está baseado na equação de balanço hídrico na superfície do solo cuja capacidade de armazenamento é considerada em duas hipóteses adicionais (Collischonn e Dornelles, 2013). É um dos métodos mais simples e bastante utilizado na estimativa de vazões superficiais ou chuva efetiva. A equação de balanço hídrico no solo fica na forma:

$$P=Ia+F+Q \quad (2.6)$$

onde: P : precipitação (mm); Ia : perdas iniciais (mm); F : infiltração acumulada ao longo do evento (mm); Q : escoamento superficial ou chuva efetiva ao longo do evento (mm).

Primeira hipótese:

$$\frac{Q}{P-Ia} = \frac{F}{S} \quad (2.7)$$

Segunda hipótese:

$$Ia=0,2S \quad (2.8)$$

S : máxima infiltração acumulada potencial.

Na década de 1950, nos Estados Unidos, foram analisadas experimentalmente diversas bacias e o valor de S foi correlacionado ao CN (parâmetro adimensional que varia de 0-100).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2.9)$$

O CN é o parâmetro do qual depende todo o método SCS-CN e é determinado em função do tipo de solo e ocupação. A tipologia de solos está dividida em 4, sendo A, B, C e D em função da permeabilidade apresentada segundo a sua composição. O diagnóstico de saneamento básico do Rio Grande apresenta um mapa com as faixas de CN e suas respectivas regiões de validade.

A combinação das equações 2.7 e 2.8 com a equação da continuidade nos conduz às seguintes expressões:

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia+S)} \quad (2.10)$$

ou

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} \quad (2.11)$$

ambas as equações para $P > Ia$

$Q=0$ para $P \leq Ia$

2.5.2 Clark

O método de Clark, também conhecido como método tempo-área, foi desenvolvido em 1943. Está baseado em 3 parâmetros: tempo de concentração, coeficiente de armazenamento (em horas) e curva do tempo-área. São traçadas curvas denominadas isócronas as quais possuem o mesmo tempo de translação, tempo que a gota de chuva leva para percorrer desde o ponto de sua precipitação até o exutório. A área da bacia é dividida em áreas com intervalos de tempo até o tempo de concentração da bacia (Santos, 1998).

O método depende de um coeficiente de armazenamento ou retardo do fluxo dentro da bacia. Este coeficiente deve ser muito menor em bacias urbanas se comparado com bacias rurais e por este motivo muitas vezes é desconsiderado (Valentín, 2004).

2.5.3 Muskingum

O método de Muskingum é um modelo hidrológico de propagação de cheias amplamente consolidado, fundamentado na simplificação das equações de Saint-Venant por meio da desconsideração dos termos dinâmicos da equação de quantidade de movimento. Desenvolvido originalmente na década de 1930 para o rio Muskingum (EUA), o método baseia-se na equação da continuidade e em uma relação de armazenamento que considera o volume acumulado em um trecho do canal como uma função das vazões de entrada e saída. O armazenamento é decomposto em dois componentes: o armazenamento de prisma (trecho paralelo ao leito) e o armazenamento de cunha (diferença entre os perfis de entrada e saída durante a passagem da onda) (CHOW et al., 1994).

O método possui 2 parâmetros, os quais devem ser definidos antes dos cálculos. Um parâmetro é adimensional e refere-se ao amortecimento da onda de cheia variando entre 0,0 (amortecimento nulo) e 0,5 (amortecimento máximo). O outro parâmetro é expresso em unidades de tempo devendo estar nas mesmas unidades de Δt . Pode ser estimado pelo tempo de viagem do pico da onda de cheia do início ao final do trecho de rio. Os tempos de pico na entrada e na saída do trecho do canal estão mais afastados quanto maior for o valor deste último parâmetro (Collischonn, 2013).

2.5.4 HEC-HMS

É um programa de domínio público que foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (US Army Corps of Engineers) fazendo parte da família Hydrologic Engineering Center (HEC). É também chamado de multi modelo uma vez que possui uma variedade de modelos, oferecendo várias opções de equações com as quais é possível modelar os processos hidrológicos de uma bacia (Santos, 2013).

Por ser um software livre, é amplamente utilizado em vários países para simulações hidrológicas possibilitando a simulação de processos de precipitação, infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial e controle de reservatórios. É uma ferramenta muito poderosa para planejamento e gestão de recursos hídricos. As simulações podem ser feitas através da entrada de dados de forma manual ou através de modelos geoprocessados.

2.6 Modelagem Hidrodinâmica HEC-RAS

Os métodos hidráulicos utilizam uma combinação das equações de conservação de massa e quantidade de movimento no rio em regime transiente, bem como as equações de Saint-Venant. O escoamento é considerado unidimensional, ao longo do eixo do rio. Segundo Collischonn e Dornelles (2013), apenas nas últimas décadas, através do avanço computacional e métodos numéricos, se tornou possível resolver equações completas de Saint-Venant, embora ainda não existam soluções analíticas para a maioria das aplicações úteis.

No modelo hidrodinâmico completo, as equações de Saint-Venant são resolvidas sem a omissão de nenhum termo. Nos casos em que algum termo possa ser omitido, os modelos podem ser chamados de simplificados. Os modelos de analogia à equação da difusão desprezam os termos de inércia da equação dinâmica e os modelos de onda cinemática, além da inércia, desprezam os termos de pressão (Souza, 2010).

O modelo Hec-Ras é um dos produtos da Família Hec, sendo seu predecessor o Hec-2 desenvolvido na década de 1970. O programa calcula perfis de água em canais naturais ou artificiais tanto em regimes permanentes quanto em transientes. É bastante utilizado para determinar áreas de risco e planícies alagáveis. Também pode prever o impacto de estruturas hidráulicas ao longo do canal (Bedient et al., 2012).

O manual de referência hidráulica Hec-Ras consultado refere-se à versão 6.5, (USACE, 2024). Conforme descrito no manual, as derivações das equações de continuidade e quantidade de movimento estão baseadas em um artigo de James A. Liggett do livro *Unsteady Flow in Open Channels* (Mahmmod e Yevjevich, 1975).

O modelo considera a solução da equação da continuidade e quantidade de movimento adaptadas, que são definidas por:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = qt \quad (2.12)$$

Equação do balanço e da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z_s}{\partial x} + S_f\right) = 0 \quad (2.13)$$

$$S_f = \frac{Q|Q|\eta^2}{2.208R^{4/3}A^2} \quad (2.14)$$

Q : fluxo;

qt : fluxo lateral por unidade de comprimento.

S_f : declividade da linha de energia;

η : coeficiente de Manning;

R : raio hidráulico;

A : área da seção transversal;

x : distância da seção transversal;

t : tempo;

g : aceleração da gravidade;

z_s : altura da seção transversal;

V : velocidade.

Para as simulações de fluxo unidirecional, são utilizados os métodos de volumes finitos e diferenças finitas. Para as simulações em duas dimensões são utilizados métodos numéricos.

à Lagoa dos Patos, delimitando os municípios de Rio Grande e Pelotas. Os arroios de Rio Grande não mantêm comunicação com outros rios e arroios do estado. Porém, praticamente todos os arroios e rios do estado do Rio Grande do Sul deságuam na Lagoa dos Patos, exceto as regiões localizadas na bacia do rio Uruguai, cuja elevação exerce influência direta sobre o município de Rio Grande.

Um dos trechos do Arroio Vieira passou por processo de canalização na década de 1980, deixando-o retilíneo e diminuindo o trajeto do curso d'água. Atualmente, a área em seu entorno encontra-se em processo de intensificação da urbanização, o que culmina com o aumento da área de solo impermeabilizada. Esses processos podem alterar de forma significativa a resposta hidrológica da bacia, embora na ausência de estudos específicos, não seja possível quantificar essas alterações e compreender o impacto que elas causam.

A expansão da urbanização no entorno do Arroio Vieira compreende a implantação de um novo bairro planejado entre os bairros Jardim do Sol, Parque Marinha e Parque São Pedro, sendo que este último também está em expansão. A rodovia ERS 734 atravessa o Arroio Vieira na divisa entre os bairros Jardim do Sol e Parque São Pedro, conforme ilustrado na figura 3.2.



Figura 3.2: Trecho do Arroio Vieira que é atravessado pela ERS 734. Fonte: autoria própria (2025)

Como pode ser observado na figura 3.2, o Arroio Vieira sofreu intervenções a fim de permitir a continuação da ERS 734 em direção ao Balneário Cassino. Em virtude das obras de ampliação da rodovia, algumas já concluídas e outras em execução, essa região tende a receber novas intervenções com o objetivo de acomodar o aumento do número de faixas de rolamento. Atualmente, o trecho constitui um ponto de estrangulamento viário, gerando congestionamento em horários de grande volume de deslocamento como no início da manhã e fim da tarde, bem como nos domingos de verão ao final do dia, horário que as pessoas estão retornando do Cassino. Esta é uma importante via na cidade por ser uma das duas ligações ao Balneário Cassino. Assim, um transbordamento do Arroio Vieira neste

trecho causaria um grande impacto na mobilidade da cidade, semelhante ao observado na intersecção da mesma rodovia com o Arroio Bolaxa.

Considerando a inexistência sobre modelagem de bacias hidrográficas nesta região, bem como a ausência de monitoramento dos arroios locais, torna-se essencial compreender o comportamento hidrodinâmico do Arroio Vieira, a fim de orientar os poderes públicos na formulação de políticas de uso e ocupação do solo.

Para a execução deste trabalho, seguiram-se as etapas descritas na figura 3.3, que descreve o fluxograma metodológico adotado. Cada etapa do fluxograma representa um conjunto de procedimentos específicos.

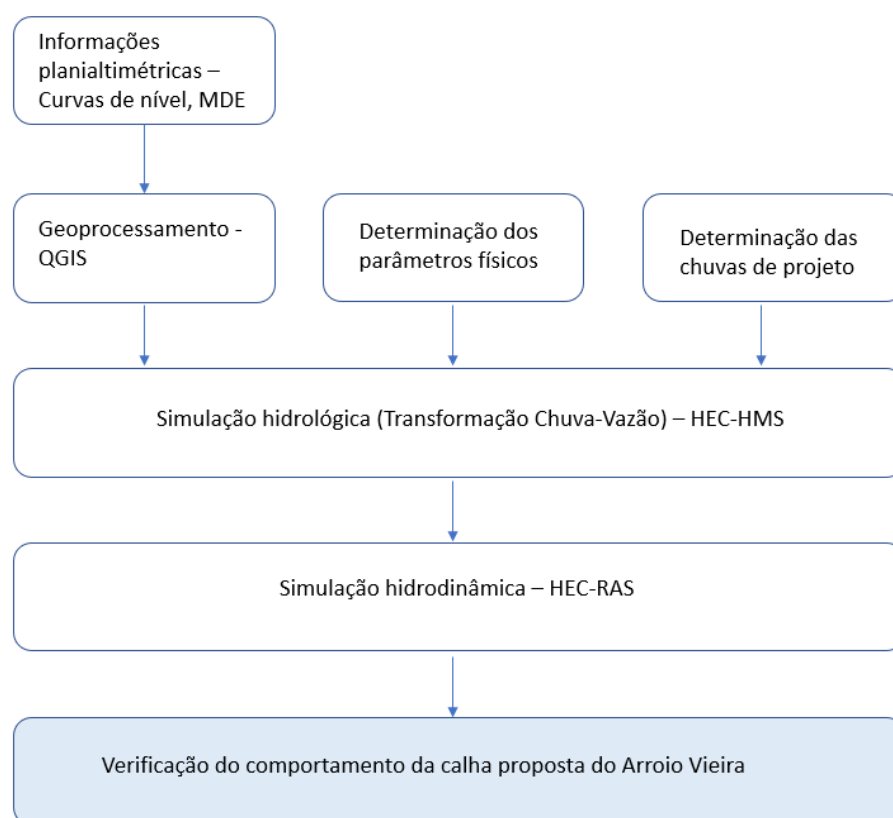


Figura 3.3: Fluxograma da modelagem. Fonte: autoria própria (2024)

A figura 3.3 ilustra as etapas adotadas para execução deste estudo. Na etapa de Geoprocessamento, utilizaram-se informações planialtimétricas que deram origem ao modelo raster (formato de dados geoespaciais com informações geográficas em cada célula ou pixel, como elevação ou uso do solo) ou MDE disponível, para obtenção de dados da bacia hidrográfica que serviram como entrada para a simulação hidrológica. Os dados obtidos nas etapas anteriores juntamente com a IDF foram utilizados para calcular as chuvas de projeto conforme TR.

Para a conversão da chuva em vazão (simulação hidrológica - HEC-HMS), além do raster gerado, foram necessários os parâmetros físicos da bacia e a determinação da chuva de projeto para cada tempo de retorno.

Após a etapa de simulação hidrológica, obtiveram-se as vazões correspondentes aos cenários e tempos de retorno propostos. A última etapa é a simulação hidrodinâmica (HEC-RAS), para a qual foi proposta uma geometria para a calha do Arroio Vieira e simulado o comportamento desta em 3 cenários com TR de 100 anos. Estes cenários foram escolhidos por apresentarem a maior vazão de pico.

O produto resultante da modelagem possibilita identificar os trechos do arroio suscetíveis à inundação e avaliar os impactos decorrentes de cenários de expansão urbana, contribuindo para a definição de áreas de ocupação para o referido arroio a fim de direcionar a expansão urbana de forma condizente com as leis de ocupação do solo que determinam a definição de áreas seguras para riscos hidrológicos.

Cabe salientar que, devido à ausência de medições diretas de vazão no Arroio Vieira, o modelo não foi calibrado. Desta forma, os resultados obtidos devem ser interpretados como um norteador, uma vez que, embora não apresentem precisão absoluta, seguem metodologia amplamente reconhecida e validada na literatura, garantindo nível de confiabilidade adequado. A calibração do modelo através de dados medidos durante eventos de precipitação permitiria aumentar a sua precisão e confiabilidade.

3.2. Determinação das características físicas da bacia hidrográfica

Para a determinação da área da bacia hidrográfica do Arroio Vieira foi utilizado o software QGIS para processamento e análise de dados geoespaciais. O comprimento do curso d'água foi traçado com o auxílio do Google Maps e a declividade foi calculada da seguinte forma: no ponto de início existe um bueiro sob uma estrada e pelas curvas de nível foi possível identificar a cota da estrada. No local, foram medidos a abertura e espessura do bueiro e o cobrimento até a cota da estrada. Com a cota da estrada, foi descontado o cobrimento, a espessura e abertura do bueiro, chegando-se à cota de fundo.

O mesmo procedimento foi executado para o exutório. Com essas duas cotas e o comprimento do rio, foi possível calcular a declividade.

A primeira alternativa foi gerar um Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir das curvas de nível, mas, como será explicado posteriormente, não foi possível. Diante deste fato, foi necessário buscar um MDE disponível para prosseguimento do estudo. Então, buscou-se na literatura qual MDE apresentaria melhor aplicabilidade para este trabalho.

Em um estudo realizado por Bielski et al. (2020), foram avaliados vários MDEs, entre eles o Copernicus, o Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e o Alos Palsar. Dentre os parâmetros analisados pelos autores, o Copernicus apresentou o melhor desempenho e, por este motivo, foi selecionado para utilização nesta pesquisa, com resolução espacial de 30 metros, para gerar a bacia de referência. Embora existam MDEs disponíveis com resoluções menores, até 12,5 metros, a literatura não aconselha sua utilização, pois essas versões são resultantes de interpolações do modelo, podendo apresentar erros significativos nos resultados

pois a finalidade é corrigir o terreno e não apresenta nenhum ganho de qualidade ou na escala do dado do MDE (Valeriano e Rosseti, 2010).

O MDE DiluviumDEM (DUSSEAU, ZOBEL e SCHWALM, 2023) foi desenvolvido a partir do MDE Copernicus, com resolução de 30 metros, para ser utilizado em regiões costeiras o qual obteve resultados com precisão próxima às obtidas por levantamento Lidar (sistema de sensoriamento remoto que mede distâncias através de pulsos de laser, gerando mapas 3D com alta definição) de referência. Embora este MDE fosse o mais apropriado para este estudo, por se tratar de uma bacia costeira, no momento da execução deste trabalho ainda não havia complemento disponível para o QGIS.

Para melhorar a compreensão sobre o ponto em que o Arroio Vieira intercepta a adutora, foram feitas 3 visitas ao local. Após estas visitas, foram geradas as figuras 3.4, 3.5 e 3.6, cujo intuito é demonstrar a interação do Arroio Vieira com a adutora. Paralela à adutora, existe uma estrada de terra tendo sob ela, no ponto em que cruza com o Arroio Vieira, dois bueiros de 1,5 m x 1,5m.

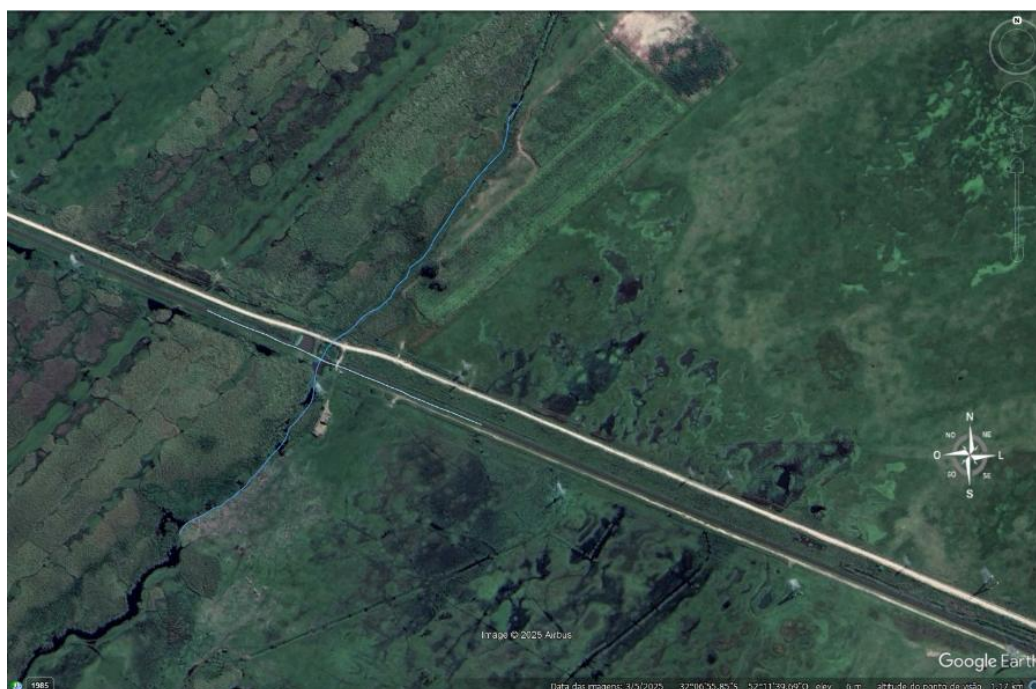


Figura 3.4: Posição onde Arroio Vieira (azul médio) cruza com a adutora de abastecimento de Rio Grande (azul claro). Fonte: Google Earth Pro® em 22/10/2025.

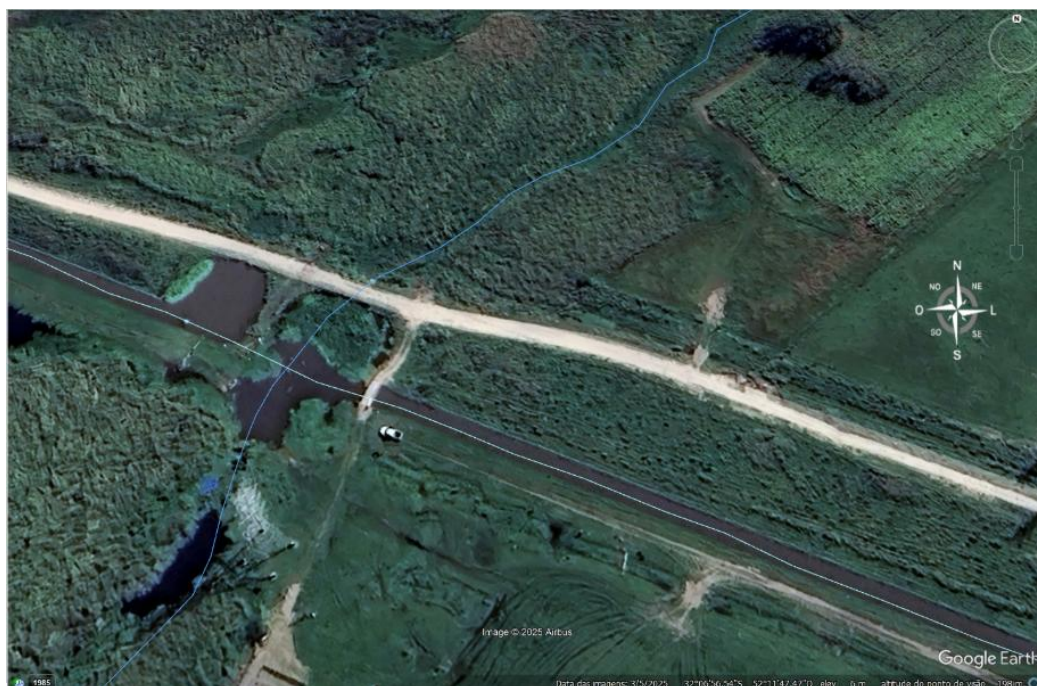


Figura 3.5: Ampliação da figura 3.8. Fonte: Google Earth Pro® em 22/10/2025.

Nas figuras 3.4 e 3.5, é possível visualizar o ponto de interceptação entre o Arroio Vieira e a adutora. As inspeções realizadas in loco, mostraram que neste trecho foi construído um canal de concreto que passa por baixo do Arroio Vieira, bem como de três comportas localizadas próximas à ponte sobre a adutora, utilizadas para desviar parte do fluxo do arroio para a adutora.



Figura 3.6: Comportas que regulam a entrada de água do Arroio Vieira para a adutora.

Fonte: autoria própria (2025).

Em cada uma das três visitas realizadas ao local, havia uma configuração diferente das comportas. Na figura 3.6, observa-se a situação em que todas as comportas estavam abertas, permitindo que parte do fluxo do Arroio Vieira se incorporasse ao fluxo da adutora. A imagem foi registrada após um período bastante chuvoso. A Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) é responsável

pelos serviços de abastecimento de água, recolhimento e tratamento de esgoto na cidade e faz a gestão da adutora.

Após cruzar sobre o canal de concreto, o Arroio Vieira é conduzido por baixo da estrada de terra paralela à adutora através de dois tubos retangulares de concreto medindo 1,5m x 1,5 m de abertura. Na adutora, no ponto anterior ao canal de concreto submerso, verifica-se um acúmulo de água represada, possuindo um extravasor de pedra que pode ser fechado, conforme apresentado na figura 3.7.



Figura 3.7: Extravasor de pedra da adutora. Fonte: autoria própria (2025).

A figura 3.7 apresenta o extravasor de pedra, que pode ser utilizado caso a adutora esteja com um fluxo acima do esperado ou fechado impedindo que um volume de água seja desviado.

O início do trecho do Arroio Vieira considerado neste estudo situa-se neste ponto de intersecção com a adutora e o exutório corresponde ao ponto em que o arroio cruza a ERS 734. Neste local, o Arroio Vieira é canalizado por um bueiro triplo tubular de concreto de 3 m x 3 m, conforme figura 3.2. E na figura 3.8 tem-se o trajeto do Arroio Vieira definido para este estudo.



Figura 3.8: Trecho do Arroio Vieira desta bacia. Fonte: Google Earth Pro® em 22/10/2025.

Na figura 3.8 apresenta-se a delimitação do trecho do Arroio Vieira analisado neste trabalho, na qual é possível observar o desenvolvimento de urbanização em seu entorno e, em alguns pontos, a urbanização invade a área imediatamente adjacente ao curso d'água.

3.3. Determinação do uso do solo

O percentual de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Arroio Vieira foi estimado com base nos dados do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomas), juntamente com a análise de imagens de satélite da área de estudo, figura 3.9. Além disso, a Prefeitura Municipal do Rio Grande disponibiliza uma faixa de valores para obtenção do CN para cada região da cidade, disponível no PMSB de Rio Grande, figura 3.10.

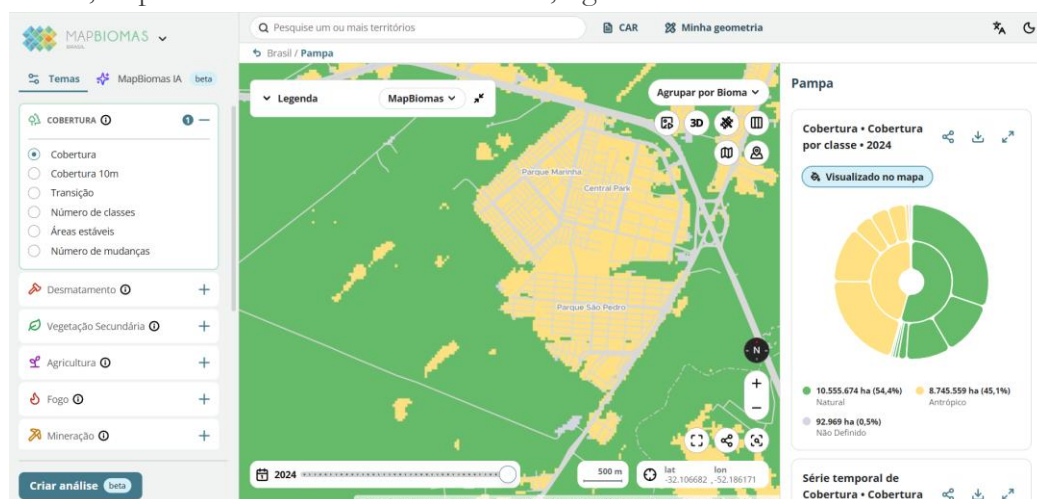


Figura 3.9: Cobertura do solo. Fonte: Mapbiomas em 24/10/2025.²¹

²¹ <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org>

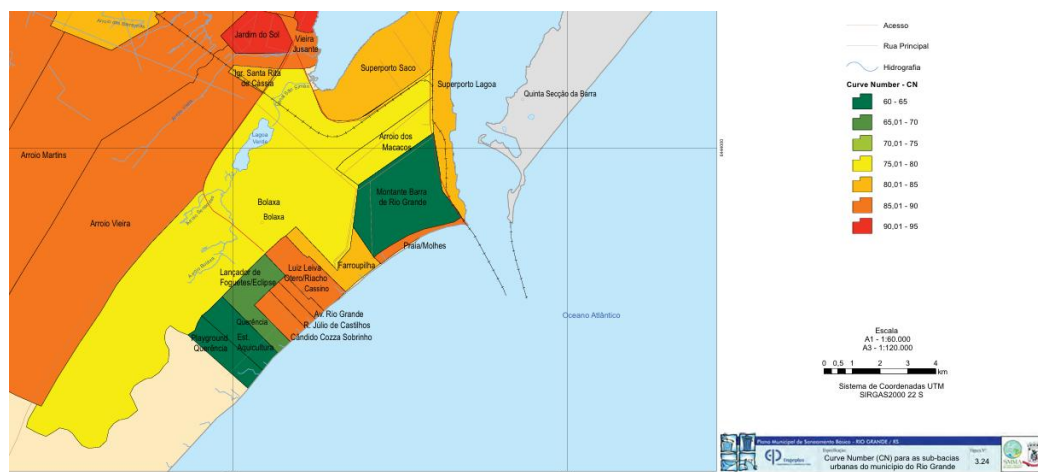


Figura 3.10: Faixa de CN para as bacias do Rio Grande. Fonte: Diagnóstico de saneamento básico. Tomo III, pg 43 (2013).

A figura 3.9 apresenta a cobertura do solo segundo o Mapbiomas, enquanto a figura 3.10 apresenta a faixa de CN para as sub-bacias urbanas no município de Rio Grande, indicando valores entre 80,01 e 85 para a bacia do Arroio Vieira.

Também foi proposto um CN, baseado nas características observadas da bacia. Para a determiná-lo, foram utilizados os dados da tabela 3.1 que apresenta os valores de CN segundo a utilização ou cobertura do solo, segundo o tipo de solo.

Conforme Tucci (2002), os solos são classificados em A, B, C e D, conforme características de permeabilidade e infiltração:

- A: Solos arenosos profundos e com pouco silte
- B: solos arenosos menos profundos que o solo A e com permeabilidade acima da média
- C: solos com porcentagem considerável de argila e pouco profundo, com capacidade de infiltração abaixo da média e escoamento superficial acima da média
- D: solos com argilas expansivas, poucos profundos e baixa capacidade de infiltração

Tabela 3.1: Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas (continua)

Utilização ou cobertura do solo	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78

Fonte: Tucci (2002).

Tabela 3.1: Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas (conclusão)

Utilização ou cobertura do solo	A	B	C	D
Bosque ou zonas florestais: cobertura ruim	45	66	77	83
cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitério				
com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
com relva de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais				
lotes de (m ²) %impermeável				
<500 65	77	85	90	92
1000 38	61	75	83	87
1300 30	57	72	81	86
2000 25	54	70	80	85
4000 20	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc	98	98	98	98
Arruamentos e estradas				
asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
paralelepídeos	76	85	89	91
terra	72	82	87	89

Fonte: Tucci (2002).

A tabela 3.1 apresenta os valores do CN segundo uso e ocupação do solo, bem como em função de sua classificação quanto à permeabilidade e infiltração, segundo as características que o compõem.

O coeficiente de Manning para o curso d'água em estudo também é um dado necessário para as simulações. Para defini-lo, foi utilizada a tabela 3.2 que apresenta valores usuais para o coeficiente de Manning.

Tabela 3.2: Valores do coeficiente de Manning

Cobertura da bacia	n
Asfalto suave	0,012
asfalto ou concreto	0,014
argila compactada	0,030
pouca vegetação	0,035
vegetação densa e floresta	0,040

Fonte: Tucci (2002).

A partir da tabela 3.2, o coeficiente de Manning adotado foi de 0,035, pois durante as visitas foi constatado que a bacia foi considerada com pouca vegetação no fundo do arroio.

3.4. Definição da chuva de projeto

Com os dados da bacia como área, comprimento do rio e declividade, foram calculados o tempo de concentração (t_c), através da equação de Kirpich Tennessee, conforme tabela 2.1, e as chuvas de projeto para os tempos de retorno de 10, 50 e 100. Foi utilizada a equação IDF apresentada na equação 2.4. A distribuição temporal da chuva foi determinada pelo método de blocos alternados, com duração de 150 minutos, estabelecido através do tempo de concentração da bacia.

3.5. Aplicação do modelo HEC-HMS

Os dados de entrada para as simulações para as sub-bacias foram: área, CN , método de perda (*SCS Curve Number*) e método de transformação de chuva em vazão (Hidrograma Unitário). Para o rio, os dados de entrada foram: comprimento do rio, declividade, coeficiente de Manning e a forma geométrica. As chuvas de projeto calculadas na etapa anterior foram as utilizadas para o cálculo das vazões com os tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos.

Foram realizadas 13 simulações, distribuídas nos seguintes cenários:

VS1 (Vieira Simulação 1): considerou apenas a sub-bacia 1 (bacia deste estudo). Foi realizada 1 simulação com TR de 100 anos;

VS2 (Vieira Simulação 2): considerou a sub-bacia 2 contribuindo para a sub-bacia 1. Foram realizadas 3 simulações para os TRs de 10, 50 e 100 anos;

MDE: foi utilizado o MDE Alos World 3D com resolução espacial de 30 m com o processo de delimitação da bacia sendo executado pelo HEC-HMS. Foram realizadas 3 simulações para os TRs de 10, 50 e 100 anos;

VSS150% (Vieira Simulação Sub-bacia 1 50% impermeável): alterou o cenário VS2 considerando que a sub-bacia 1 50% impermeabilizada, parte urbanizada com

pátios e calçadas totalmente impermeáveis. Foram realizadas 3 simulações para os TRs de 10, 50 e 100 anos e

VSDSRG (Vieira Simulação Diagnóstico de Saneamento do Rio Grande): alterou o cenário VS2 atribuindo ao CN o valor de 85, máximo valor na faixa indicada pelo Diagnóstico de Saneamento Básico da prefeitura municipal do Rio Grande. Foram realizadas 3 simulações para os TRs de 10, 50 e 100 anos

3.6. Aplicação do modelo HEC-RAS

O software HEC-RAS foi utilizado para realizar a modelagem hidrodinâmica, fazendo a verificação para as vazões calculadas pelo HEC-HMS segundo uma proposta de calha de rio para o Arroio Vieira. Como não houve a possibilidade de fazer uma batimetria do canal, foi proposta uma geometria com os dados disponíveis. Assim, se assumiu a largura como 10 m (valor medido em vários trechos do rio no Google Earth Pro e no QGIS), a profundidade inicial de 1,5 m (altura do bueiro inicial) e a profundidade final de 3 m (altura do bueiro no exutório). As seções intermediárias foram calculadas pelo próprio software HEC-RAS através da função *XS interpolation*. Foram analisados os seguintes cenários:

BAVS2TR100 (Bacia do Arroio Vieira Simulação 2 TR 100 anos): Simulado o escoamento no Arroio Vieira para a vazão obtida através do cenário de simulação do HEC-HMS VS2 com TR de 100 anos;

BAV50TR100 (Bacia do Arroio Vieira 50% impermeável TR 100 anos): Simulado o escoamento no Arroio Vieira para a vazão obtida através do cenário de simulação do HEC-HMS VSS150% com TR de 100 anos e

BAVDSRGTR100 (Bacia do Arroio Vieira Diagnóstico de Saneamento do Rio Grande TR 100 anos): Simulado o escoamento no Arroio Vieira para a vazão obtida através do cenário de simulação do HEC-HMS VSDSRG com TR de 100 anos.

4 | Resultados e discussões

4.1. Delimitação da bacia hidrográfica

Na primeira etapa, buscou-se gerar um MDT através das curvas de nível, figura 4.1, obtidas por meio de um voo aerofotogramétrico realizado em 2019 que cobriu grande parte da cidade do Rio Grande.

O arquivo em CAD, curvas de nível, apresentava um tamanho excessivo em razão da grande quantidade de informações. Por este motivo, foi necessário recortá-lo para uma área menor abrangendo apenas a bacia do estudo, facilitando a manipulação dos dados, uma vez que exigiria menos processamento ao desprezar os dados desnecessários para este trabalho.

Embora o MDT tenha sido produzido com sucesso, conforme figura 4.2, o software QGIS apresentou falhas recorrentes durante a execução da função de remoção de depressões espúrias, impedindo o avanço para a etapa subsequente, correspondente à delimitação da bacia hidrográfica. Foram realizadas várias tentativas adicionais, mas não se obteve êxito em prosseguir por esse procedimento. As curvas de nível utilizadas apresentavam equidistância vertical de 50 em 50cm e testaram-se resoluções de 1, 2 e 5 metros, selecionadas em função da baixa declividade característica da cidade de Rio Grande.

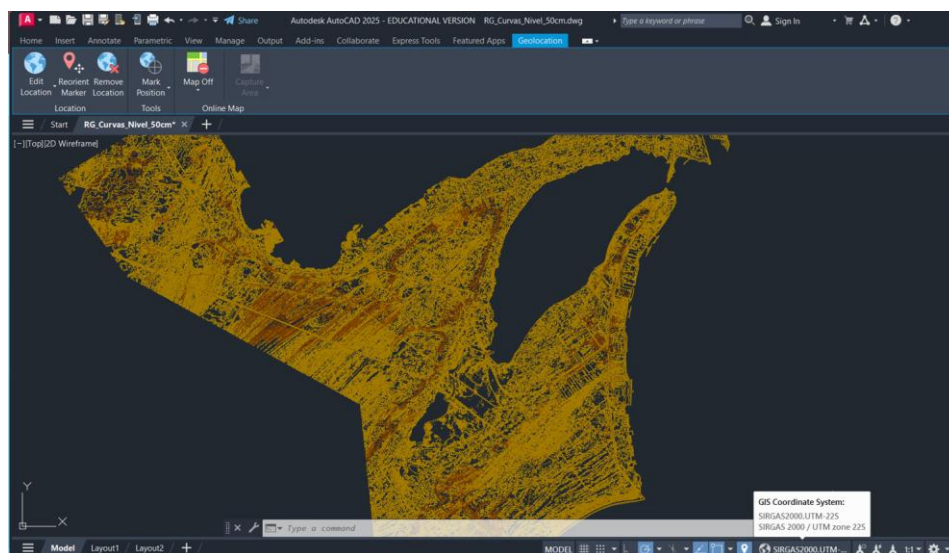


Figura 4.1: Curvas de nível de 50 em 50cm. Fonte: autoria própria (2024)

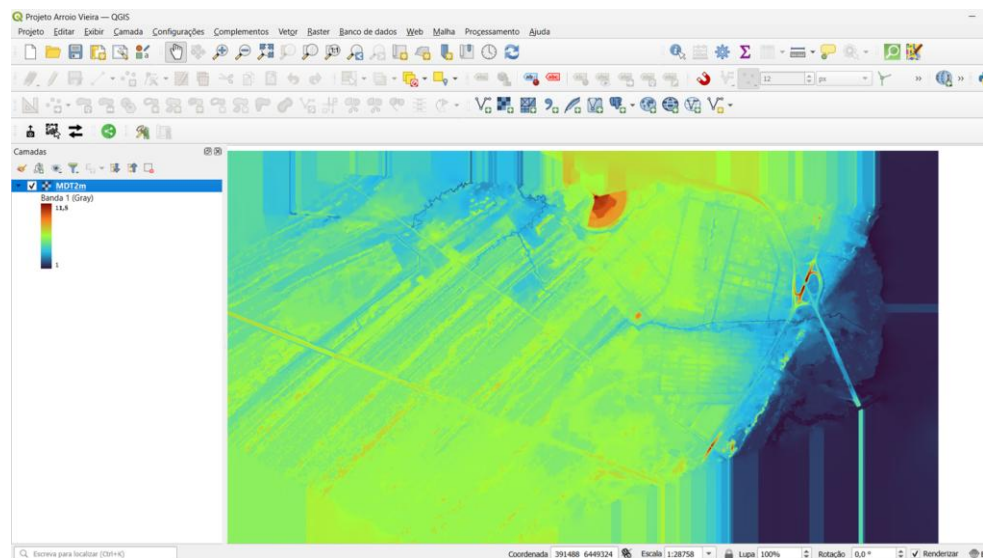


Figura 4.2: MDT gerado com curvas de nível de 50 em 50cm. Fonte: autoria própria (2024)

A figura 4.1 apresenta as curvas de nível com intervalo de 50 centímetros, enquanto a figura 4.2 apresenta o MDT gerado a partir destas curvas. Cada nova geração do MDT demandava mais de 24 horas de processamento, e o sistema invariavelmente apresentava falhas na etapa seguinte, impossibilitando a continuidade da modelagem.

A figura 4.3 mostra as configurações do equipamento computacional utilizado para este trabalho. Após a geração de cada MDT, exemplificado na figura 4.2, realizava-se a etapa de remoção das depressões espúrias, procedimento que demorou vários dias de processamento contínuo.

Entretanto, todas as tentativas resultaram sem sucesso e não foi possível gerar a delimitação da bacia hidrográfica a partir destes modelos. Na sequência, buscou-se refazer a geração de um MDT em um equipamento com desempenho superior, cuja configuração é apresentada na figura 4.4, considerando a hipótese de que o problema pudesse estar relacionado à insuficiência de processamento da máquina inicialmente utilizada. Todavia, os resultados permaneceram insatisfatórios, como os observados nas tentativas anteriores.

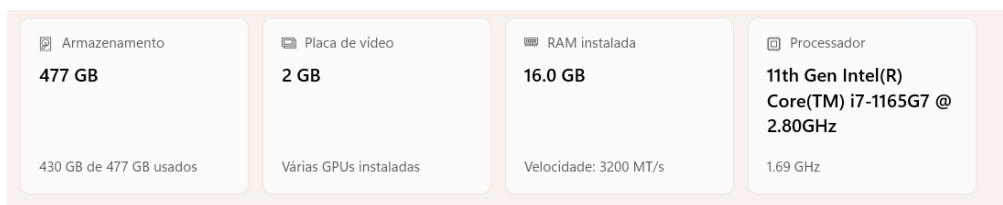


Figura 4.3: Configuração da máquina utilizada pelo autor. Fonte: Windows® (2025)

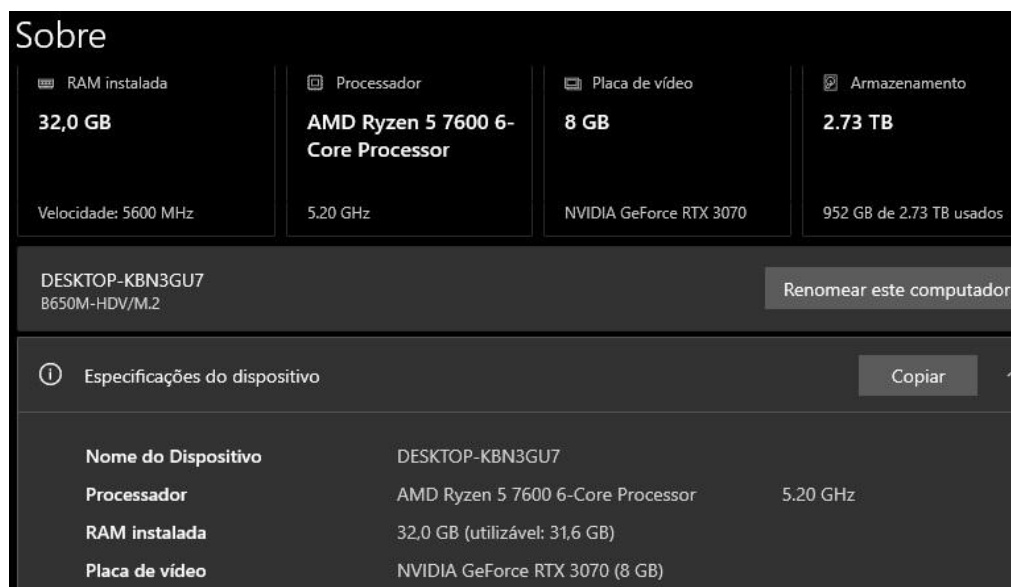


Figura 4.4: Configuração da segunda máquina utilizada pelo autor. Fonte: Windows® (2025)

As figuras 4.3 e 4.4 apresentam as configurações de hardware dos equipamentos utilizados. O primeiro equipamento é um notebook e possui configuração satisfatória para este trabalho, porém o segundo equipamento é desktop para tarefas pesadas. Por este motivo, o segundo apresenta uma capacidade de processamento muito superior. O primeiro possui 16 GB de memória ram DDR4 instalada, placa de vídeo de 2 GB, armazenamento em 477 GB e processador Intel® I7 11ª geração com 4 núcleos reais e 4 virtuais com clock de 2,8 GHz²² e 12 M de cache enquanto o segundo possui 32 GB de memória ram DDR5 instalada, placa de vídeo de 8 GB, armazenamento em 2,73 GB e processador AMD Ryzen™ 5 7600 com 6 núcleos reais e 6 virtuais com clock de 3,8 GHz²³ e 32 M de cache. Como o resultado foi o mesmo para os dois equipamentos computacionais, embora o segundo fosse muito superior ao primeiro, concluiu-se que a questão não estava na configuração do equipamento utilizado, mas alguma questão de geoprocessamento ou mesmo falha do QGIS.

Diante da impossibilidade de utilização do MDT, utilizou-se um MDE baseado no estudo de Bielski et al. (2020), relatado no item 3.2, que demonstra que o Copernicus tem o melhor desempenho entre os MDEs avaliados.

A primeira delimitação da bacia foi realizada no software QGIS com o MDE copernicus resolução espacial de 30 metros, com base nas informações do plano diretor, figura 2.5, de observações no Google Maps e no Google Earth Pro. Como a delimitação gerada automaticamente pelo software era significativamente menor do que a esperada (figura 4.8), utilizaram-se mosaicos de fluxos para ajustar a

²² <https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/products/sku/208662/intel-core-i71165g7-processor-12m-cache-up-to-4-70-ghz/specifications.html>

²³ <https://www.amd.com/en/support/downloads/drivers.html/processors/ryzen/ryzen-7000-series/amd-ryzen-5-7600.html>

delimitação mais próxima da observada em campo. O resultado obtido é apresentado na figura 4.5.

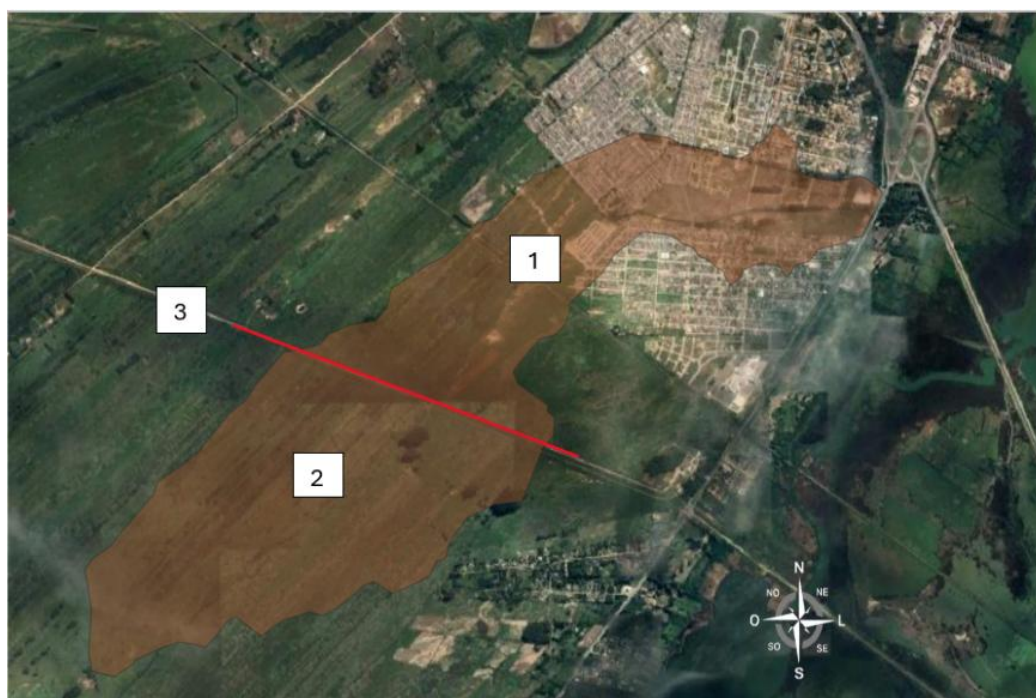


Figura 4.5: Bacia delimitada com MDE Copernicus pelos mosaicos de fluxo no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).

A bacia delimitada com base no MDE Copernicus (resolução de 30m) conforme demonstrado na figura 4.5, compreende as regiões descritas como 1 e 2. A linha vermelha (3) representa o ponto no qual a bacia é interceptada pela adutora que abastece a cidade.

O software HEC-HMS dispõe da opção de fazer a identificação automática da bacia a partir do exutório. Como a delimitação da bacia da figura 4.5 não foi automatizada, foi necessário buscar um MDE que gerasse uma bacia próxima para que os valores pudessem ser comparados e assim desenvolvido um cenário de simulações considerando um MDE disponível para gerar uma bacia automatizada no software HEC-HMS.

Foram escolhidos os MDEs ALOS World 3D com resolução espacial de 30 m, ALOS World 3D elipsoidal com resolução espacial de 30 m e os MDEs SRTM e Copernicus nas resoluções espaciais de 30 e 90 m. A projeção utilizada foi WGS 84 / Pseudo-Mercator EPSG: 3857, pois na UTM 22S EPSG: 31982 estava apresentando falhas. As figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam as bacias limitadas com os MDEs ALOS World 3D, SRTM e suas respectivas resoluções. A figura 4.12 apresenta um comparativo entre as bacias delimitadas.



Figura 4.6: Delimitação automática da bacia utilizando MDE ALOS World 3D resolução 30m projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).



Figura 4.7: Delimitação automática da bacia utilizando MDE ALOS World 3D Elipsoidal resolução 30m projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).

As figuras 4.6 e 4.7 apresentam as delimitações resultantes dos MDEs ALOS World 3D e ALOS World 3D Elipsoidal, ambos com resolução espacial de 30 metros. A diferença na área das bacias é bem significativa, pois a primeira tem área de 3,85 km² e a segunda de 7,39 km², deixando evidente a influência do MDE. Na tabela 4.1 apresenta um comparativo das áreas conforme MDE e resolução, após a apresentação das bacias delimitadas.



Figura 4.8: Delimitação automática da bacia utilizando MDE Copernicus resolução 30m projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).



Figura 4.9: Delimitação automática da bacia utilizando MDE Copernicus resolução 90m projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).

As figuras 4.8 e 4.9 apresentam as bacias delimitadas no MDE Copernicus nas resoluções de 30 e 90 m, respectivamente. A primeira delimitou uma área de 2,25 km² e a segunda de 2,52 km². As áreas são bem próximas, não sofrendo muita influência em virtude da resolução. Comparando as bacias delimitadas pelos MDEs ALOS World 3D e Copernicus é possível observar que as diferenças entre as bacias geradas são muito substanciais.



Figura 4.10: Delimitação automática da bacia utilizando MDE SRTM resolução 30m projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).



Figura 4.11: Delimitação automática da bacia utilizando MDE SRTM resolução 90m projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).

As figuras 4.10 e 4.11 apresentam as bacias delimitadas no MDE SRTM nas resoluções de 30 e 90 m, respectivamente. A primeira delimitou uma área de 10,94 km² enquanto a segunda delimitou 0,633 km². Essas duas bacias também apresentaram grande variação na área influenciada pela mudança da resolução espacial, conforme pode ser observado na tabela 4.1.

As figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 mostram as bacias geradas automaticamente desde o mesmo exutório em cada um dos MDEs analisados e a figura 4.12 apresenta um comparativo visual dessas diferenças. A bacia que mais se aproximou da delimitada na figura 4.5 foi a gerada com o MDE ALOS World 3D resolução espacial de 30 m, conforme figura 4.6. Esse MDE foi utilizado para gerar o cenário de simulações denominado MDE.

Tabela 4.1: Áreas das bacias segundo MDE e resolução

MDE	Área da bacia considerando resolução 30 m (km ²)	Área da bacia considerando resolução 90 m (km ²)
ALOS World 3D	3,85	
ALOS World 3D Elipsoidal	7,39	
Copernicus	2,25	2,52
SRTM	10,94	0,633

Fonte: Elaboração própria (2025).

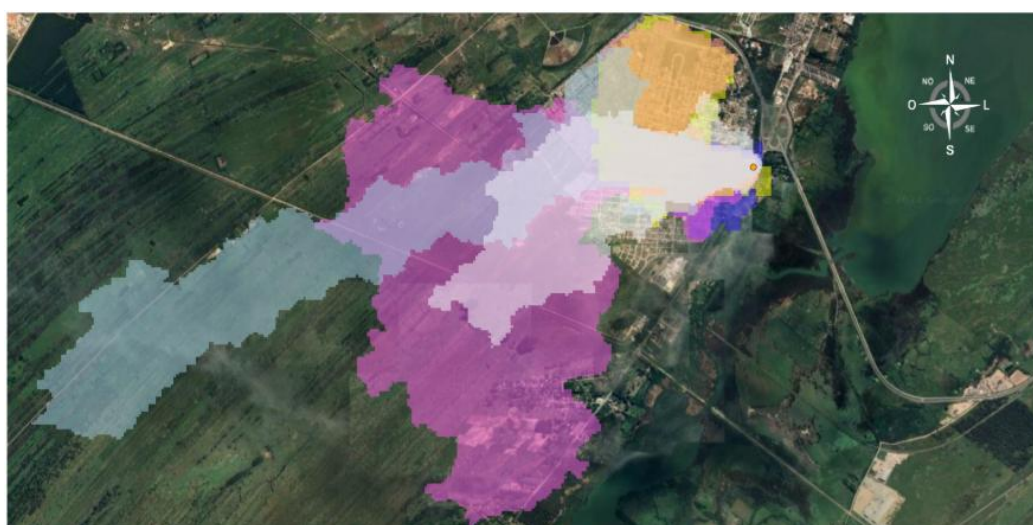


Figura 4.12: Comparação das bacias geradas nas figuras 3.16 - 3.21 projeção 3857 no software QGIS. Fonte: autoria própria (2024).

Na tabela 4.1 e figura 4.12, pode-se observar a discrepância entre as áreas das bacias geradas através dos diferentes MDEs utilizados. A menor área foi gerada pelo SRTM (90m) de 0,633 km² e a maior foi gerada pelo SRTM (30m) de 10,94 km², 17 vezes maior. Essas diferenças podem propagar um erro bastante considerável no modelo. Uma escolha acertada do modelo, que mais se adequa ao comportamento da bacia real, depende muito da experiência do modelador (que precisa ter um bom conhecimento sobre o local), pois provavelmente em virtude da planicidade da bacia, haja tanta variação na delimitação de áreas.

4.2. Características física obtida da bacia hidrográfica do Arroio Vieira

Para ampliar a compreensão das características físicas da bacia, foram realizadas três visitas ao local, nas quais se analisou a interação entre o Arroio Vieira e a adutora. Os dados referentes às áreas das sub-bacias 1 e 2, bem como os comprimentos do curso principal e as diferenças de altitude das bacias 1 e 2 são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dados das bacias 1 e 2

Dados	Sub-bacia 1	Sub-bacia 2
Área (km ²)	3,324	2,780
Comprimento do rio (L) (km)	3,50	2,51
H (diferença de altitude) m	3,78	3,00
t_c : tempo de concentração (min)	145,2	108,1
lag time (0,6 t_c) min	87,00	64,87

Fonte: Elaboração própria (2025).

A partir das características físicas das sub-bacias 1 e 2, foram calculados os tempos de concentração (t_c), através da equação de Kirpich Tennessee, conforme tabela 2.1, bem como o tempo de defasagem (lag time) apresentados na tabela 4.2.

4.3. Resultados obtidos para as chuvas de projeto

Com base nos dados da tabela 4.2, foram calculadas as chuvas de projeto para os tempos de retorno de 10, 50 e 100 através da equação IDF apresentada na equação 2.5. Os resultados para cada TR estão apresentados nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5. A distribuição temporal da chuva foi determinada pelo método de blocos alternados, com duração de 150 minutos, estabelecido através do tempo de concentração da sub-bacia 1.

Tabela 4.3: Distribuição temporal para TR= 10 anos

Duração (min)	I (mm/h)	Pacum (mm)	P desac (mm)	Pord (mm)
15	118,71	29,68	29,68	3,12
30	84,27	42,14	12,46	4,05
45	66,85	50,14	8,00	5,97
60	56,10	56,10	5,97	12,46
75	48,73	60,91	4,81	29,68
90	43,31	64,96	4,05	8,00
105	39,13	68,48	3,52	4,81
120	35,80	71,60	3,12	3,52
135	33,08	74,42	2,82	2,82
150	30,80	76,99	2,57	2,57

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 4.3: Distribuição temporal para TR= 50 anos

Duração (min)	I (mm/h)	Pacum (mm)	P desac (mm)	Pord (mm)
15	155,82	38,95	38,95	4,10
30	110,61	55,31	16,35	5,32
45	87,74	65,81	10,50	7,83
60	73,64	73,64	7,83	16,35
75	63,96	79,95	6,31	38,95
90	56,84	85,26	5,32	10,50
105	51,36	89,88	4,62	6,31
120	46,99	93,98	4,10	4,62
135	43,41	97,68	3,70	3,70
150	40,42	101,06	3,38	3,38

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 4.4: Distribuição temporal para TR= 100 anos

Duração (min)	I (mm/h)	Pacum (mm)	P desac (mm)	Pord (mm)
15	175,18	43,80	43,80	4,61
30	124,36	62,18	18,38	5,98
45	98,65	73,99	11,81	8,81
60	82,79	82,79	8,81	18,38
75	71,91	89,88	7,09	43,80
90	63,91	95,86	5,98	11,81
105	57,75	101,05	5,19	7,09
120	52,83	105,66	4,61	5,19
135	48,81	109,82	4,16	4,16
150	45,45	113,62	3,80	3,80

Fonte: Autoria própria (2025).

Onde: Duração: tempo de duração da chuva (min); I: intensidade da chuva (mm/h); Pacum: precipitação acumulada (mm); Pdesac: precipitação desacumulada (mm); Pord: precipitação ordenada em blocos alternados (mm).

As tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 mostram a distribuição temporal para os TRs de 10, 50 e 100 anos para conversão da chuva em vazão.

4.4. Resultados obtidos para o CN da bacia

Observou-se que a bacia delimitada para este estudo, conforme figura 4.5, difere significativamente da bacia para o Arroio Vieira apresentada no Diagnóstico de Saneamento Básico da prefeitura municipal do Rio Grande (2013), indicada na figura 3.14. Por este motivo, utilizaram-se conjuntamente os dados das figuras 4.5, 3.8 e 3.9 para determinação dos CNs das sub-bacias.

Ambas as sub-bacias do Arroio Vieira foram enquadradas na classe A. A sub-bacia 2 foi classificada como espaço aberto, com mais de 75% de cobertura vegetal, enquanto a sub-bacia 1 conforme as figuras 4.5 e 3.8 foi considerada composta por 50% de áreas equivalentes à sub-bacia 2 e 50% de área urbanizada (zonas residenciais com lotes menores de 500m²). Assim, adotaram-se os valores de CN = 58 para a sub-bacia 1 e CN = 39 para a sub-bacia 2.

Segundo o Diagnóstico de Saneamento Básico da prefeitura municipal do Rio Grande (2013), a faixa de CN para a bacia do Arroio Vieira é 80,01 e 85. Optou-se por considerar o pior cenário, situação mais crítica, e adotar o CN = 85 para as sub-bacias 1 e 2 (ambas as sub-bacias fazem parte da bacia do Arroio Vieira).

Também foi realizada uma simulação considerando a sub-bacia 1 com 50% da área como espaço aberto, com mais de 75% de cobertura vegetal e 50% área urbanizada, porém, altamente impermeabilizada, situação em que tanto os pátios como as calçadas estariam concretados, com CN=98. Nesta situação, o CN adotado para a sub-bacia 1 foi 58, média dos CNs pelas áreas.

A tabela 4.5 apresenta o resumo dos CNs adotados conforme o cenário considerado.

Tabela 4.5: Valores dos CNs adotados

CN adotado	Sub-bacia 1	Sub-bacia 2
Cenário inicial	58	39
Considerando Diagnóstico de Saneamento	85	85
Considerando área urbanizada altamente impermeável	68,5	39

Fonte: Autoria própria (2025).

A tabela 4.5 apresenta um resumo dos CNs adotados conforme o cenário proposto. O menor CN está na sub-bacia 2, na primeira e terceira condição que considera a área não urbanizada. A sub-bacia 1 tem o CN um pouco maior do que a sub-bacia 2 no cenário inicial por ter 50% da sua área urbanizada e aumenta um pouco mais quando esta área é considerada totalmente impermeabilizada. A situação com o maior CN é a que considera o valor máximo da faixa indicada no Diagnóstico de Saneamento Básico do Rio Grande.

4.5. Resultados obtidos com HEC-HMS

Com exceção do cenário denominado MDE, que considerou a bacia delimitada automaticamente pelo HEC-HMS utilizando o MDE ALOS World 3D com resolução espacial de 30m, todas as demais simulações utilizaram a bacia delimitada para este projeto conforme a figura 4.5.

Foram desenvolvidos os seguintes cenários:

VS1 (Vieira Simulação 1): considerou apenas a sub-bacia 1 (bacia deste estudo, figura 4.5). Foi realizada 1 simulação com TR de 100 anos;

VS2 (Vieira Simulação 2): considerou a sub-bacia 2 contribuindo para a sub-bacia 1. Foram realizadas 3 simulações para os TRs de 10, 50 e 100 anos;

MDE: foi utilizado o MDE Alos World 3D com resolução espacial de 30 m com o processo de delimitação da bacia sendo executado pelo HEC-HMS. Foram realizadas 3 simulações para os TRs de 10, 50 e 100 anos;

VSS150% (Vieira Simulação Sub-bacia 1 50% impermeável): alterou o cenário VS2 considerando que a sub-bacia 1 50% impermeabilizada, parte urbanizada com pátios e calçadas totalmente impermeáveis. A figura 4.13 mostra o desenho da bacia para este cenário. Foram realizadas 3 simulações para os TRs de 10, 50 e 100 anos e

VSDSRG (Vieira Simulação Diagnóstico de Saneamento do Rio Grande): alterou o cenário VS2 atribuindo ao CN o valor de 85, máximo valor na faixa indicada pelo Diagnóstico de Saneamento Básico da prefeitura municipal do Rio Grande. Foram realizadas 3 simulações para os TRs de 10, 50 e 100 anos

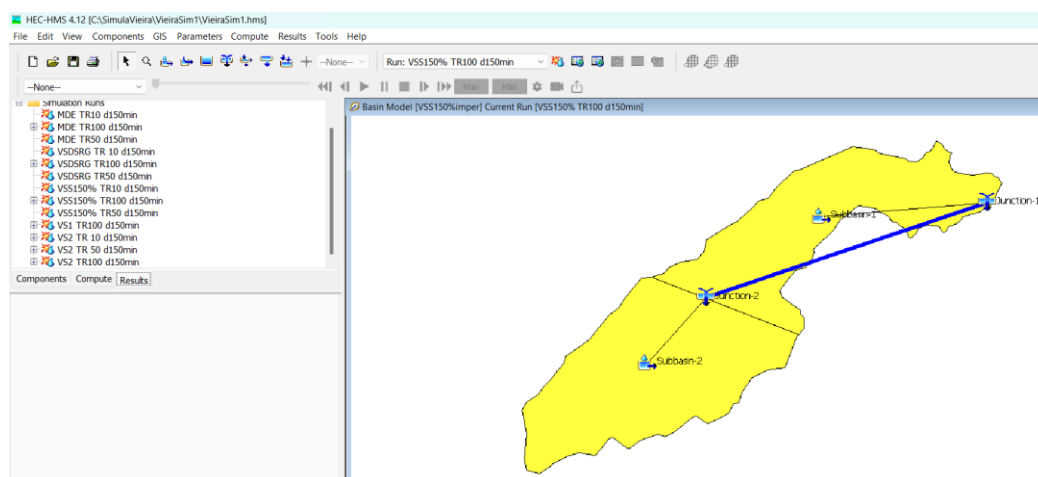


Figura 4.13: Tela do HEC-HMS na aba *results* mostrando as simulações calculadas.

Fonte: autoria própria (2024).

Na figura 4.13 tem a imagem das bacias e seus componentes no lado direito e no lado esquerdo pode ser visto que todas as 13 simulações rodaram sem erro, uma vez que todas aparecem coloridas.

A primeira simulação, VS1, considerou apenas a sub-sub-bacia 1 e foi simulado apenas a chuva com TR de 100 anos, figura 4.14. Após, foi realizada a simulação VS2, que considerou a contribuição de uma sub-bacia a montante, sub-bacia 2. A vazão de pico foi a mesma nas duas simulações com TR = 100 anos, 8,7 m³/s. As figuras 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam os resultados obtidos para o comportamento da sub-bacia 1 no cenário VS2 e a tabela 4.6 apresenta um resumo desses dos resultados dessas simulações.

Optou-se por manter a contribuição da sub-bacia 2 nos três cenários posteriores simulados, sendo eles: o cenário MDE que utilizou o MDE Alos World 3D com resolução espacial de 30 m para a delimitação da sub-bacia 1, cujos resultados são apresentados nas figuras 4.18, 4.19 e 4.20 e resumidos na tabela 4.7; o cenário VSS150%, resultados apresentados nas figuras 4.21, 4.22 e 4.23 e resumidos na tabela 4.8, que considerou que a parcela urbanizada da sub-bacia 1 (50% da área da sub-bacia) havia sido totalmente impermeabilizada (pátios e calçadas totalmente concretados) e; o cenário VSDSRG, resultados apresentados nas figuras 4.24, 4.25 e 4.26 e resumidos na tabela 4.9, que considerou o CN = 85 nas sub-bacias 1 e 2, valor máximo da faixa indicada no Diagnóstico de Saneamento de Rio Grande (2013).

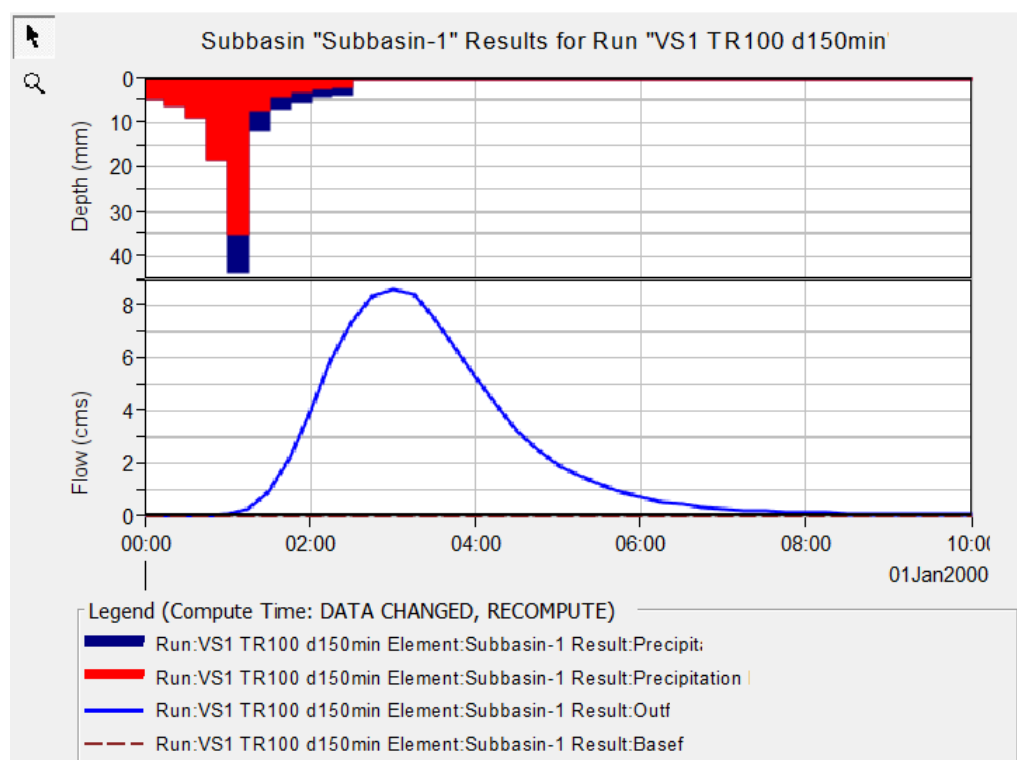


Figura 4.14: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VS1 com chuva de TR = 100 anos.

Fonte: autoria própria (2025).

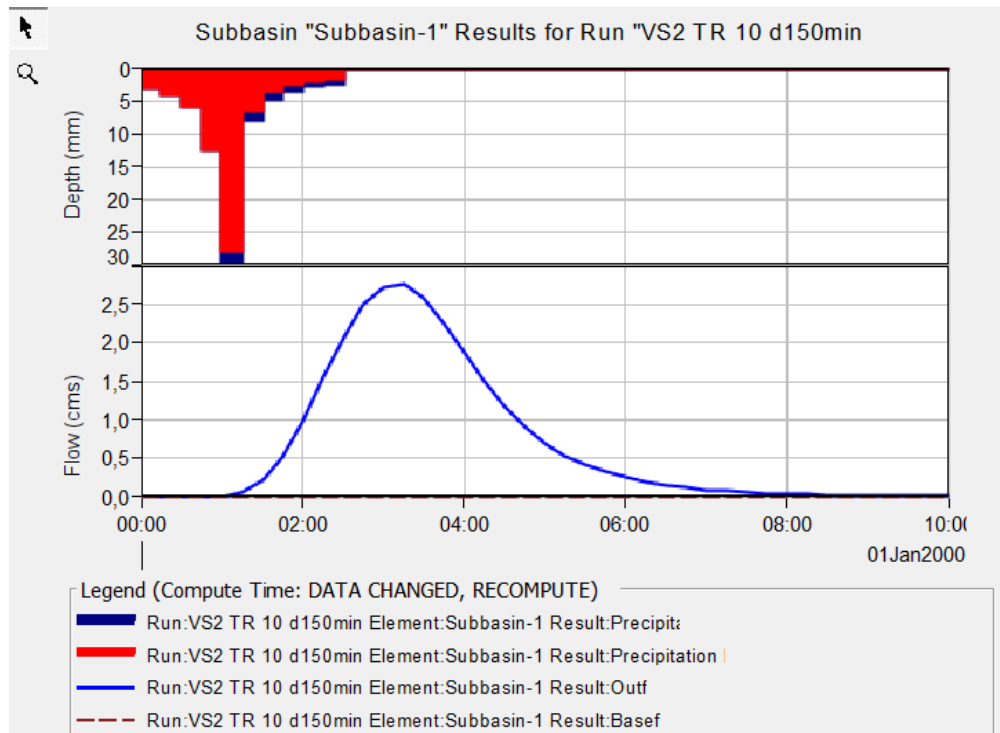


Figura 4.15: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VS2 e chuva com TR = 10 anos.

Fonte: autoria própria (2025).

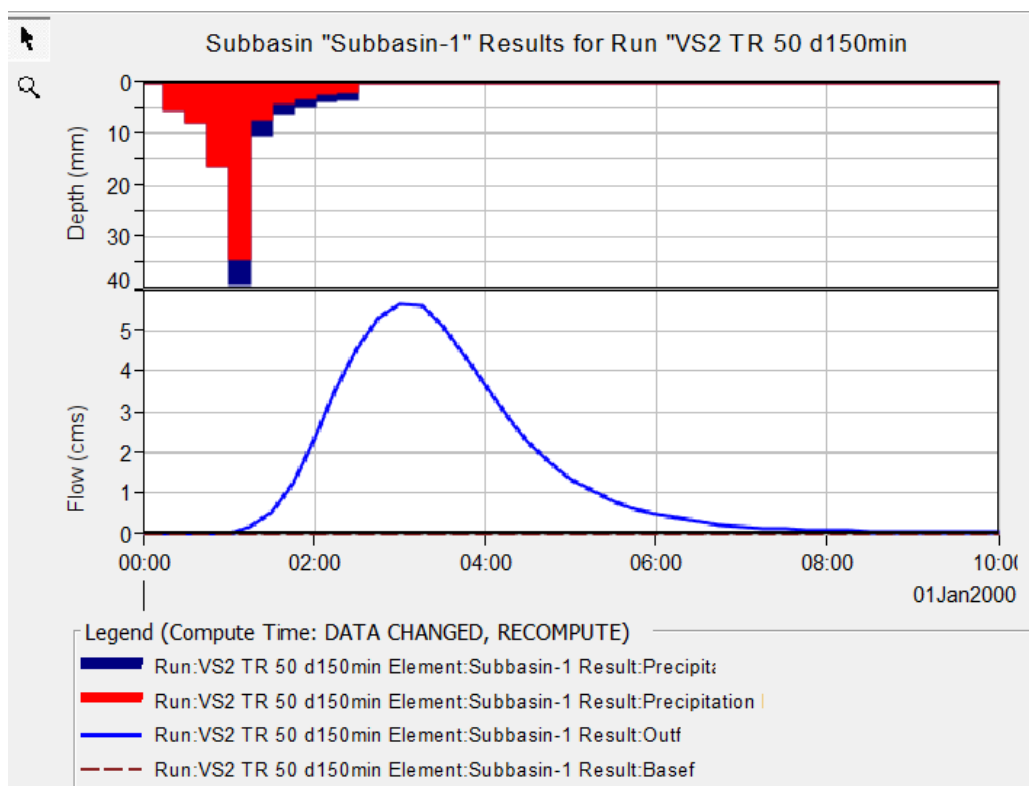


Figura 4.16: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VS2 e chuva com TR = 50 anos.

Fonte: autoria própria (2025).

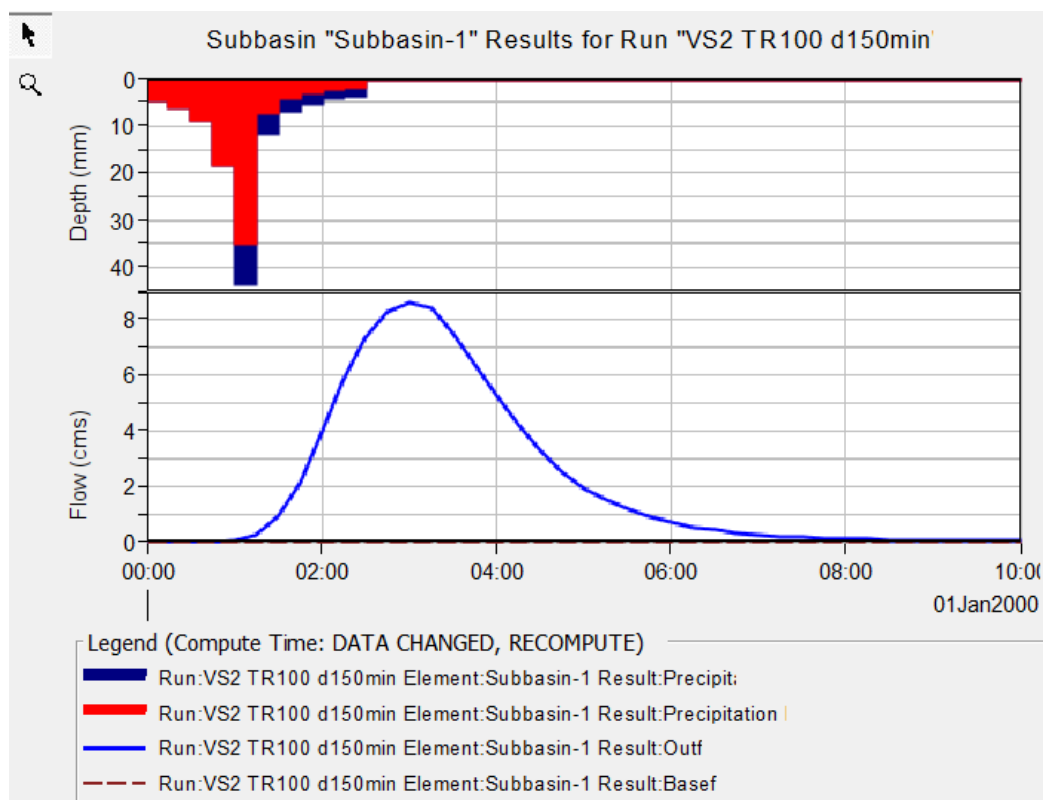


Figura 4.17: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VS2 e chuva com TR = 100 anos.
Fonte: autoria própria (2025).

Nas figuras 4.14 e 4.17 pode ser observado o comportamento da sub-bacia nas simulações VS1 e VS2, respectivamente, para TR = 100 anos. O comportamento é o mesmo para as duas e a vazão no exutório também. O que demonstra que nesta situação, a contribuição da sub-bacia 2 não afeta nem a vazão e nem o tempo de pico, conforme tabela 4.6

Tabela 4.6: Resumo das vazões e tempos de pico para os cenários VS1 e VS2.

Simulação	Vazão de pico (m ³ /s)			Tempo de pico exutório (h)
	Sub-bacia 1	Sub-bacia 2	Exutório	
VS1, TR = 100 anos	8,7	-	8,7	3
VS2, TR = 10 anos	2,8	0	2,8	3,25
VS2, TR = 50 anos	5,6	0,3	5,6	3
VS2, TR = 100 anos	8,7	1,1	8,7	3

Fonte: Autoria própria (2025).

Na tabela 4.6 pode ser observado que a contribuição da sub-bacia 2 não alterou as vazões e tempo de pico no exutório. Para o TR = 10 anos, a vazão foi nula para a

sub-bacia 2. Apenas para o $TR = 10$ anos o tempo de pico foi 3h e 15 min, para os demais foi 3 h.

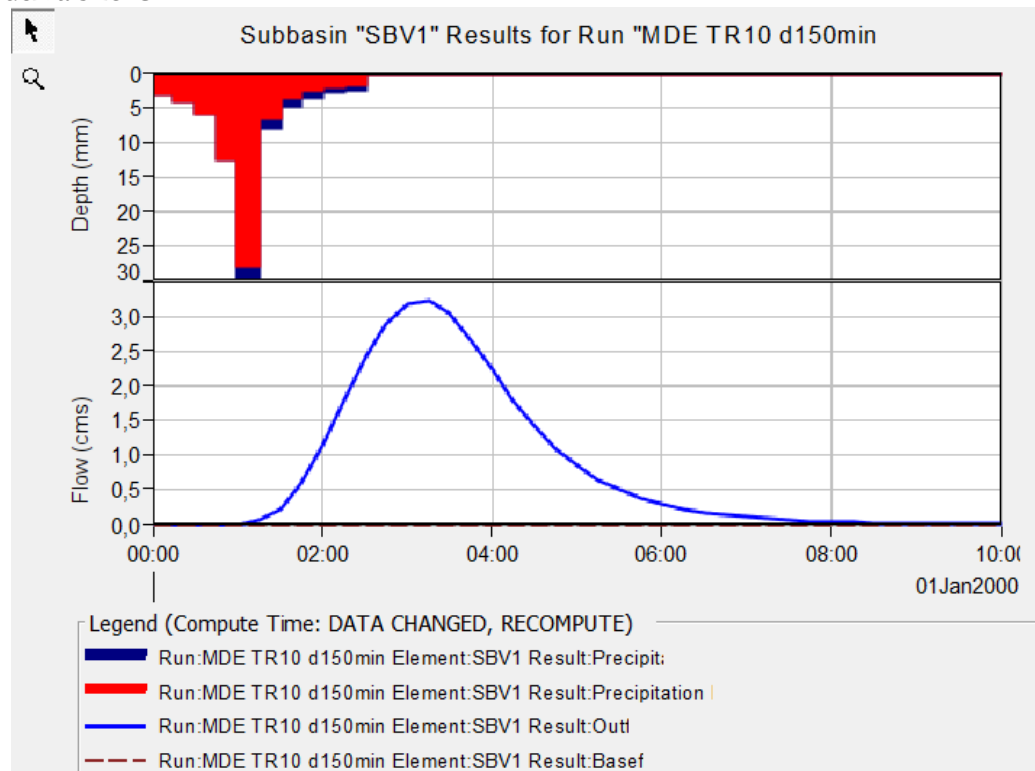


Figura 4.18: Comportamento da sub-bacia 1, cenário MDE e chuva com $TR = 10$ anos.

Fonte: autoria própria (2025).

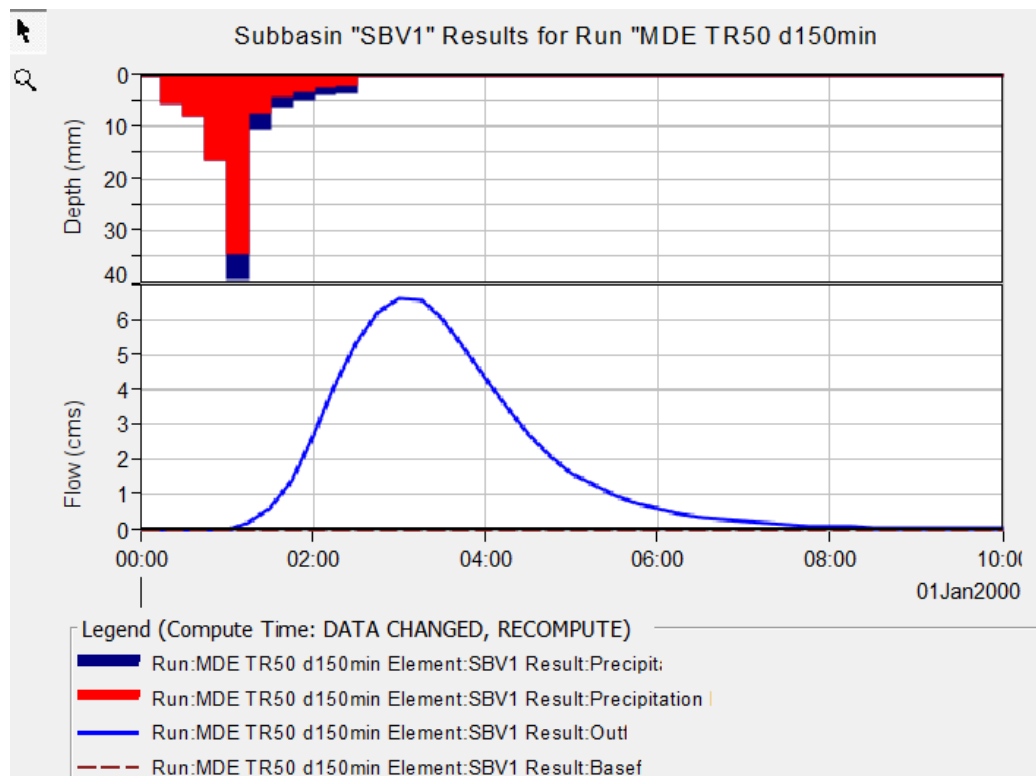


Figura 4.19: Comportamento da sub-bacia 1, cenário MDE e TR 50 anos. Fonte: autoria própria (2025).

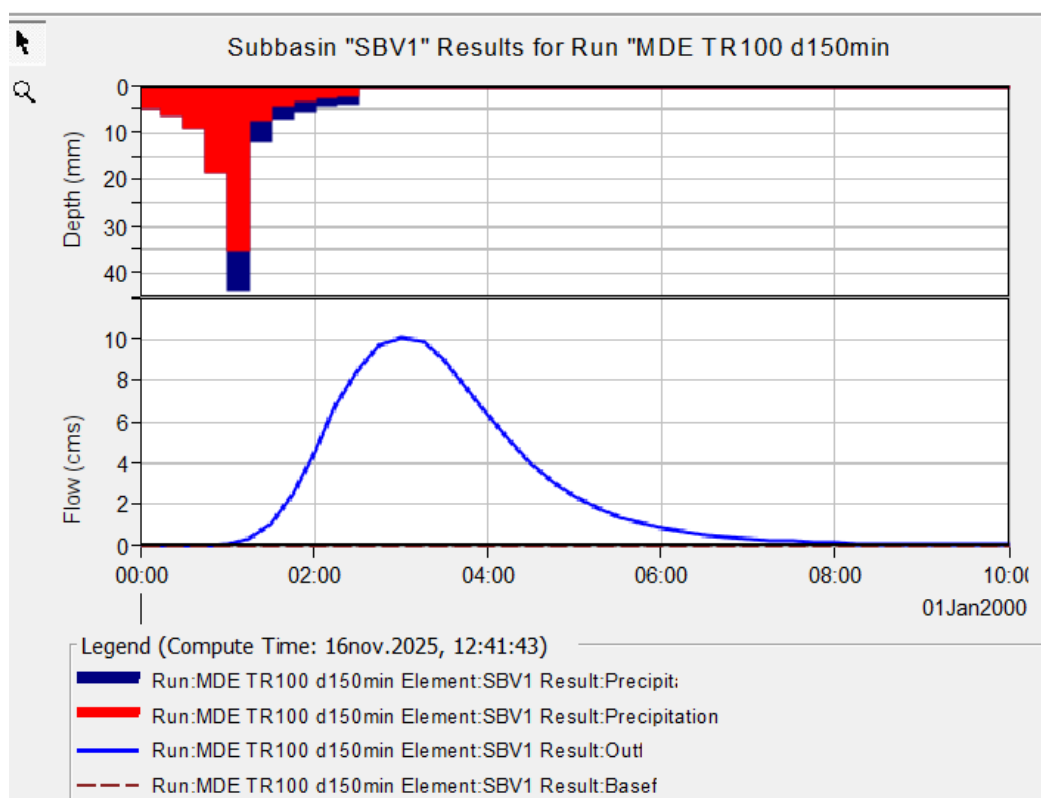


Figura 4.20: Comportamento da sub-bacia 1, cenário MDE e chuva com TR = 100 anos.
Fonte: autoria própria (2025).

Tabela 4.7: Resumo das vazões e tempos de pico para o cenário MDE.

Simulação	Vazão de pico (m ³ /s)			Tempo de pico exutório (h)
	Sub-bacia 1	Sub-bacia 2	Exutório	
MDE, TR = 10 anos	3,2	0	3,2	3,25
MDE, TR = 50 anos	6,6	0,3	6,6	3
MDE, TR = 100 anos	10,1	1,1	10,1	3

Fonte: Autoria própria (2025).

Na tabela 4.7 está apresentado um resumo das vazões e tempo de pico para o cenário MDE. A contribuição da sub-bacia 2 não alterou as vazões e tempo de pico no exutório. Para o TR = 10 anos, a vazão foi nula para a sub-bacia 2. Apenas para o TR = 10 anos o tempo de pico foi 3h e 15 min, para os demais foi 3 h. A resposta no cenário MDE foi bastante próxima da resposta no cenário VS2, diferindo apenas dos valores de vazão que no MDE foram um pouco mais elevados. Isso pode ser explicado pela área da sub-bacia 1 que o programa definiu como 3,92 km², um pouco acima do valor de 3,32 km², conforme tabela 4.2, resultantes da modelagem da sub-bacia 1 conforme figura 4.5.

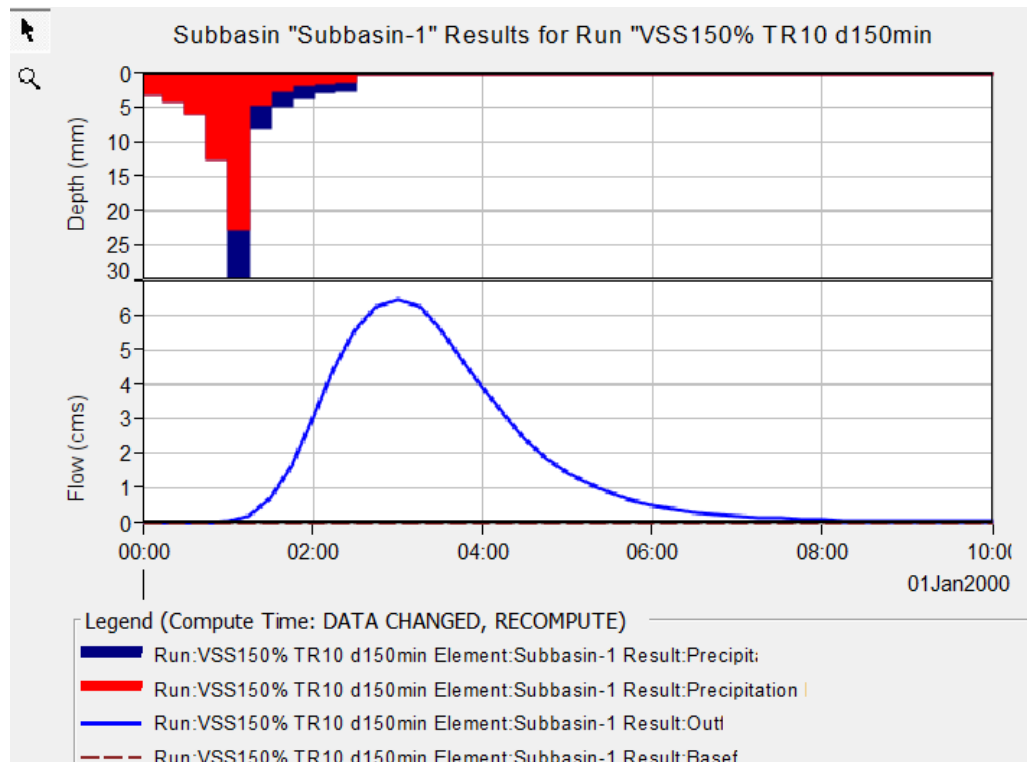


Figura 4.21: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VSS150% e chuva com TR = 10 anos. Fonte: autoria própria (2025).

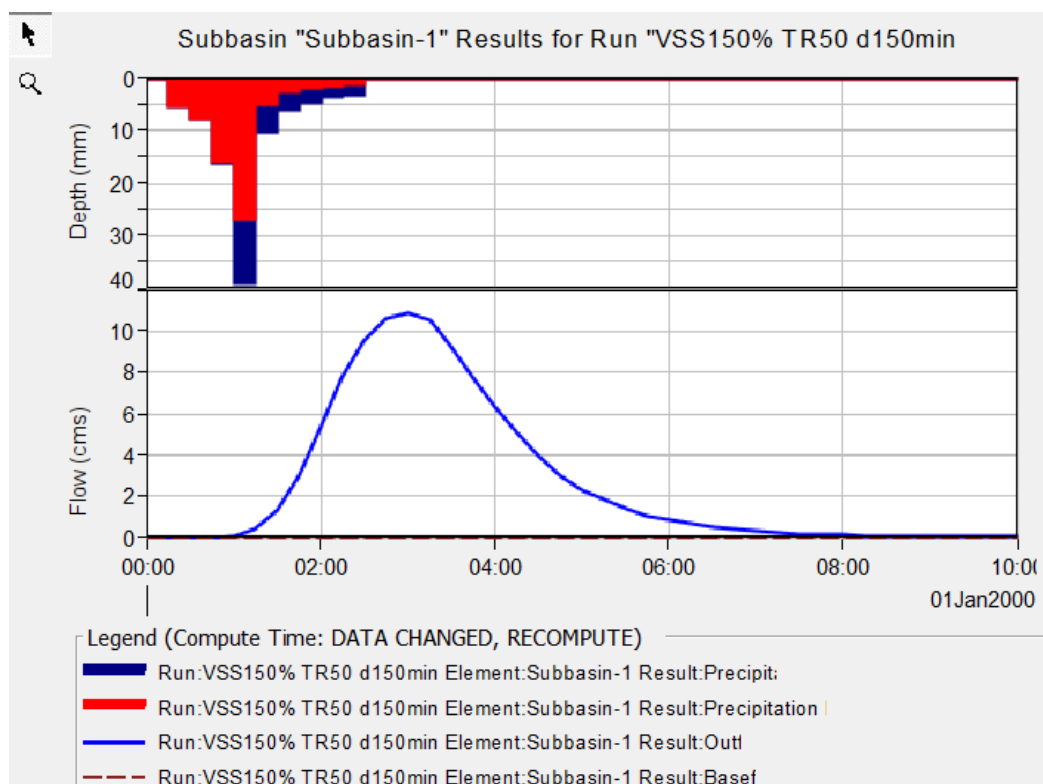


Figura 4.22: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VSS150% e chuva com TR = 50 anos. Fonte: autoria própria (2025).

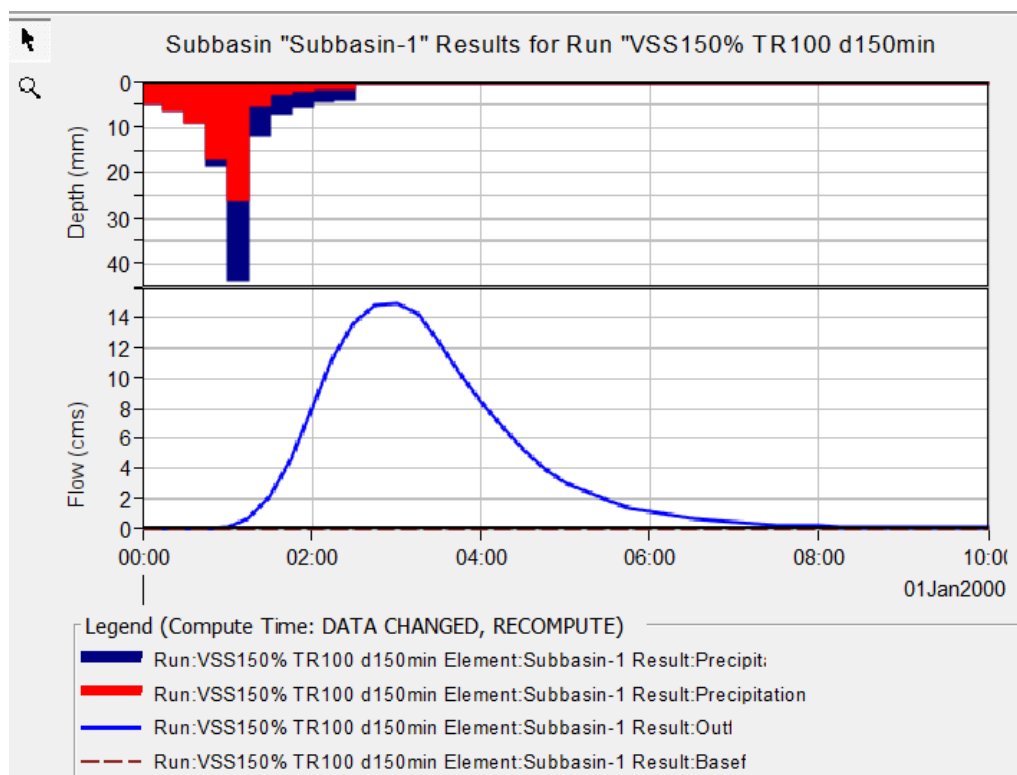


Figura 4.23: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VSS150% e chuva com TR = 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).

Tabela 4.8: Resumo das vazões e tempos de pico para o cenário VSS150%.

Simulação	Vazão de pico (m^3/s)			Tempo de pico exutório (h)
	Sub-bacia 1	Sub-bacia 2	Exutório	
VSS150%, TR = 10 anos	6,5	0	6,5	3
VSS150%, TR = 50 anos	10,9	0,3	10,9	3
VSS150%, TR = 100 anos	15	1,1	15	3

Fonte: Autoria própria (2025).

Na tabela 4.8 está apresentado um resumo das vazões e tempo de pico para o cenário VSS150%. A contribuição da sub-bacia 2 não alterou as vazões e tempo de pico no exutório. Para o TR = 10 anos, a vazão foi nula para a sub-bacia 2. Para todos os TRs simulados o tempo de pico foi 3 h, o que representa um encurtamento de 15 min se comparado aos cenários anteriores. Aumentar a impermeabilização da metade da sub-bacia 1 que já se encontra urbanizada, reduziu em quase 8% o tempo de pico.

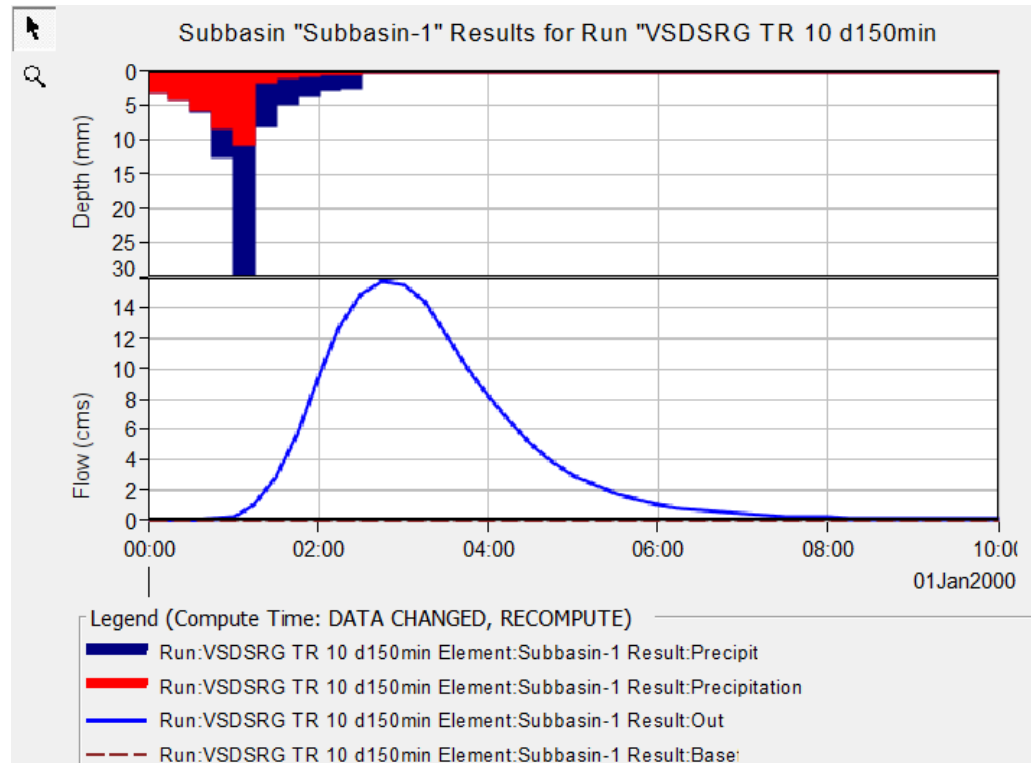


Figura 4.24: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VSDSRG e chuva com TR = 10 anos. Fonte: autoria própria (2025).

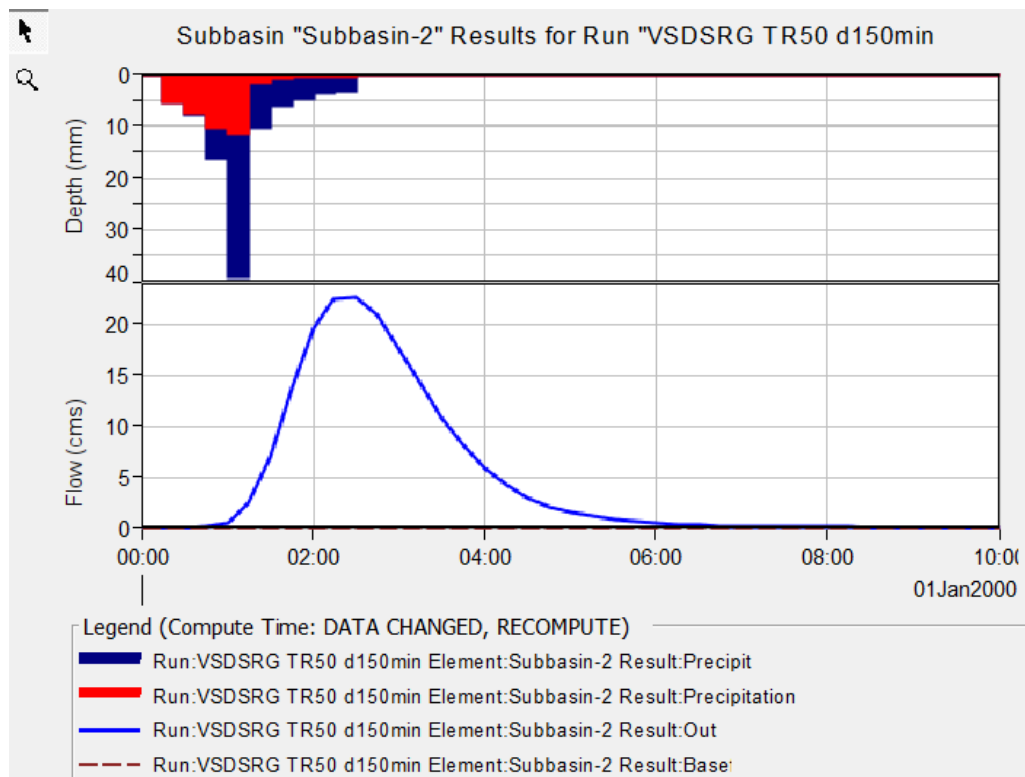


Figura 4.25: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VSDSRG e chuva com TR = 50 anos. Fonte: autoria própria (2025).

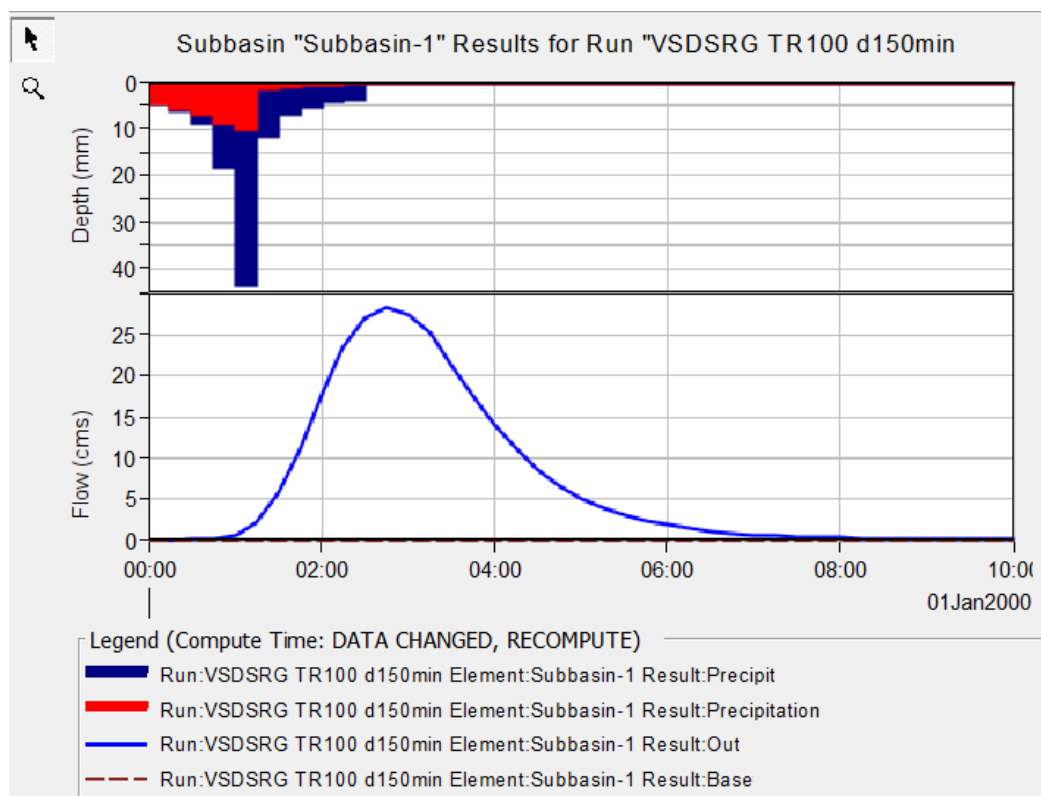


Figura 4.26: Comportamento da sub-bacia 1, cenário VSDSRG e chuva com TR = 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).

Tabela 4.9: Resumo das vazões e tempos de pico para o cenário VSDSRG.

Simulação	Vazão de pico (m ³ /s)			Tempo de pico exutório (h)
	Sub-bacia 1	Sub-bacia 2	Exutório	
VSDSRG, TR = 10 anos	15,8	15,9	31,5	3
VSDSRG, TR = 50 anos	22,5	22,7	44,9	2,75
VSDSRG, TR = 100 anos	28,3	28,5	56,7	2,75

Fonte: Autoria própria (2025).

Na tabela 4.9 está apresentado um resumo das vazões e tempo de pico para o cenário VSDSRG. A contribuição da sub-bacia 2 alterou as vazões e tempo de pico no exutório. Para o TR = 10 anos, o tempo de pico foi 3 h. Para os TRs de 50 e 100 anos foi de 2 h e 45 min o que representa um encurtamento de 15 min se comparado aos cenários anteriores.

A elevação abrupta do CN das sub-bacias, alterou significativamente a resposta hidrológica causando aumento na vazão e diminuição do tempo de pico no exutório. Na figura 4.27 pode ser observado o comportamento da vazão segundos os cenários simulados em função do TR. O cenário VS1 foi desprezado nessa comparação porque não foi simulado para os TRs de 10 e 50 anos e o seu comportamento com TR = 100 anos foi similar ao comportamento do cenário VS2 com mesmo TR.

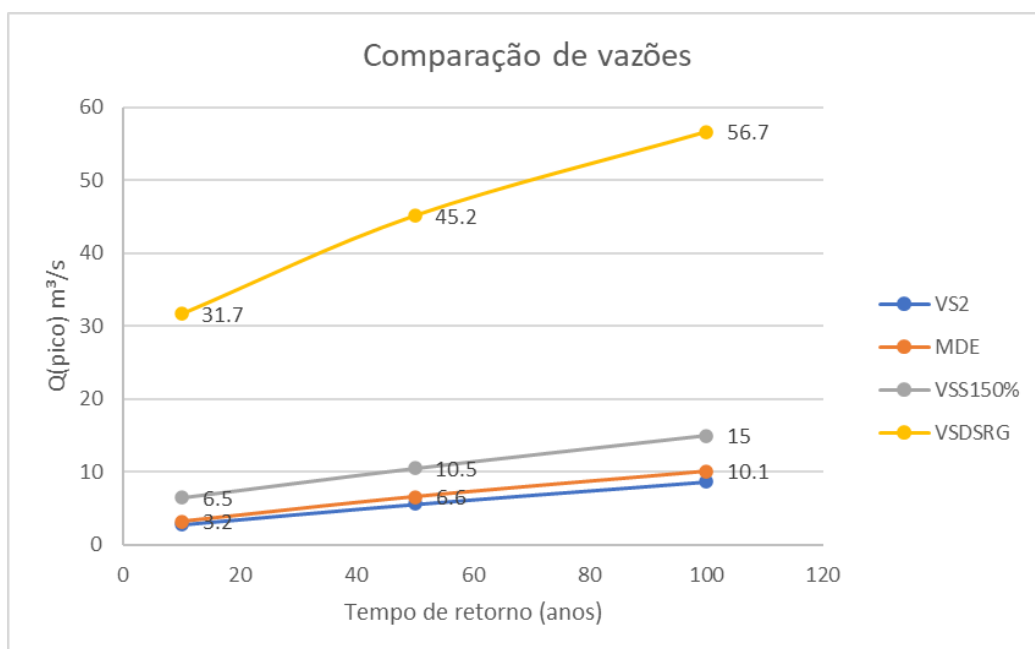


Figura 4.27: Comparação das vazões de pico para os 4 cenários simulados. Fonte: autoria própria (2025).

A figura 4.27 apresenta um gráfico para comparação de vazões nos diferentes cenários segundo os TRs. As vazões para os cenários VS2 e MDE são bastante próximas. A pequena diferença entre elas talvez seja explicada porque o HEC-HMS delimitou uma bacia 1 no MDE um pouco maior do que a delimitada no VS2. Já na situação VSS150%, a vazão dobra no TR de 10 anos, se comparada com os 2 cenários anteriores e tem um acréscimo de 50% no TR de 100 anos. O cenário VSDSRG é o que apresenta uma maior variação se comparado aos demais. A vazão aumenta praticamente 10 vezes no TR de 10 anos e quase 6 vezes no TR de 100 anos.

Como pode ser observado tanto nesta etapa quanto nas anteriores, a modelagem do Arroio Vieira é bastante complexa. Há grande dificuldade desde a delimitação da bacia hidrográfica, como ficou exposto na seção 4.2 até a definição do CN que apresentou um grande impacto nas simulações apresentadas na seção 4.5. Medições de vazões no Arroio Vieira para calibração do modelo são necessárias para um melhor ajuste dos parâmetros.

4.6. Resultados obtidos com HEC-RAS

Na ausência de batimetria do Arroio Vieira, foi proposta uma geometria de calha baseada nas observações de campo. A conexão entre as sub-bacias 1 e 2 é realizada através de dois bueiros de concreto de 1,5 m x 1,5 m. Por esta razão, a calha do rio proposta para as simulações no HEC-RAS começa, na seção denominada 0, com a altura de 1,5m (limite do bueiro, pois acima dele encontra-se uma estrada) e termina, na seção denominada 3500, com altura de 3m (limitada pelo bueiro triplo de 3 m x 3 m no ponto de exutório, sobre o qual está a ERS 734). As seções intermediárias foram

calculadas pelo próprio software HEC-RAS através da função *XS interpolation*. As seções foram definidas a cada um metro, assim a seção 3500 representa o comprimento de 3500 m ou 3,5 km.

Foram definidos os seguintes cenários para simulação e análise:

BAVS2TR100 (Bacia do Arroio Vieira Simulação 2 TR 100 anos): Simulado o escoamento no Arroio Vieira para a vazão obtida através do cenário de simulação do HEC-HMS VS2 com TR de 100 anos e os resultados apresentados nas figuras 4.28 e 4.29;

BAV50TR100 (Bacia do Arroio Vieira 50% impermeável TR 100 anos): Simulado o escoamento no Arroio Vieira para a vazão obtida através do cenário de simulação do HEC-HMS VSS150% com TR de 100 anos e os resultados apresentados nas figuras 4.30 e 4.31 e

BAVDSRGTR100 (Bacia do Arroio Vieira Diagnóstico de Saneamento do Rio Grande TR 100 anos): Simulado o escoamento no Arroio Vieira para a vazão obtida através do cenário de simulação do HEC-HMS VSDSRG com TR de 100 anos e os resultados apresentados nas figuras 4.32 e 4.33.

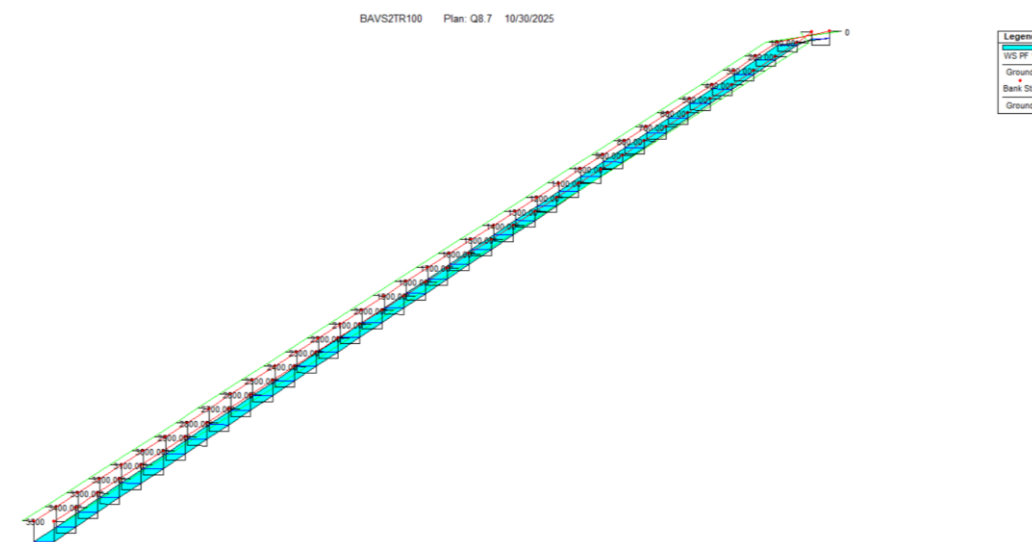


Figura 4.28: Visualização XYZ para simulação BAVS2 no HEC-RAS com TR 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).

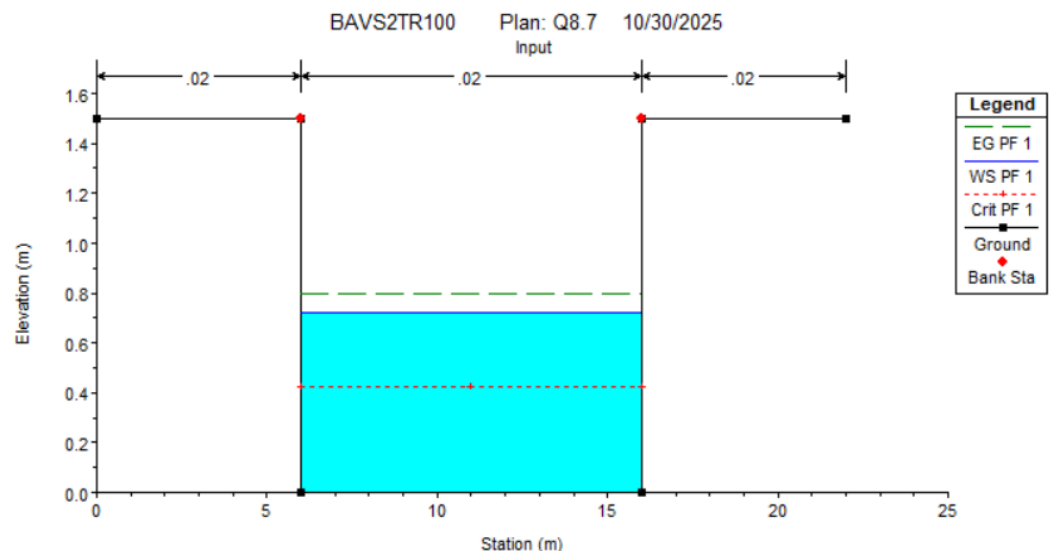


Figura 4.29: Visualização seção 0 para simulação BAVS2 no HEC-RAS com TR 100 anos.
Fonte: autoria própria (2025).

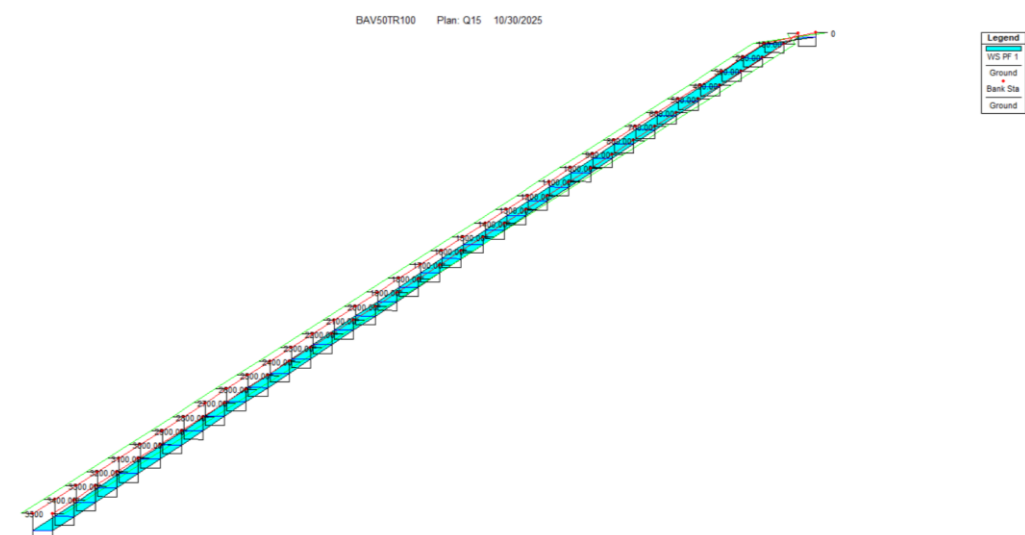


Figura 4.30: Visualização XYZ para simulação BAV50 no HEC-RAS com TR 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).

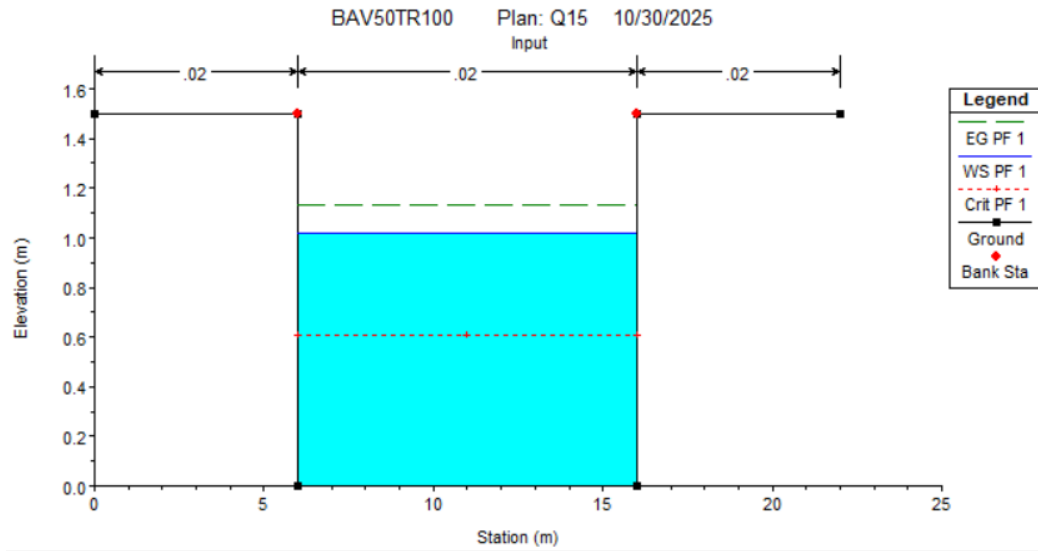


Figura 4.31: Visualização seção 0 para simulação BVVSS150% no HEC-RAS com TR 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).

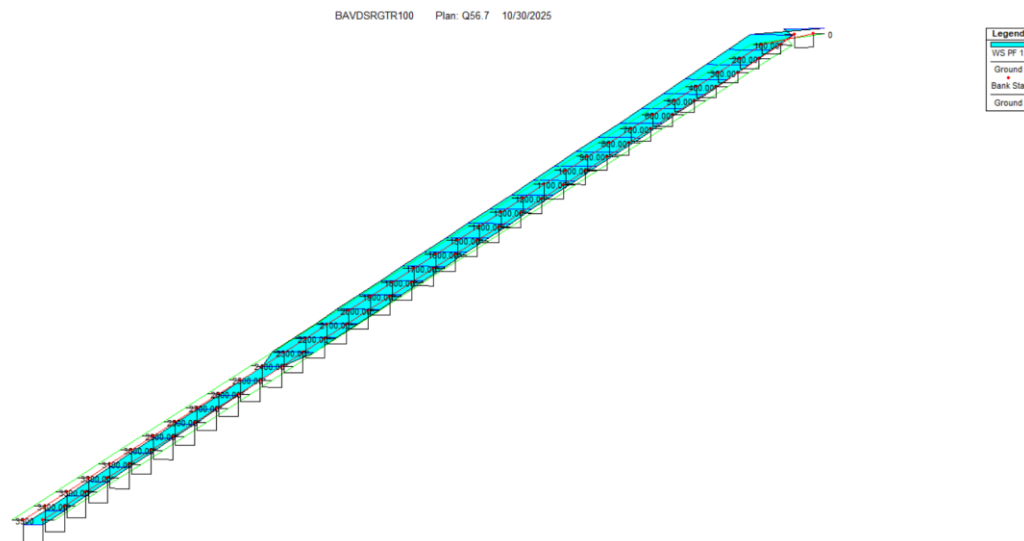


Figura 4.32: Visualização XYZ para simulação BAVDSRG no HEC-RAS com TR 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).

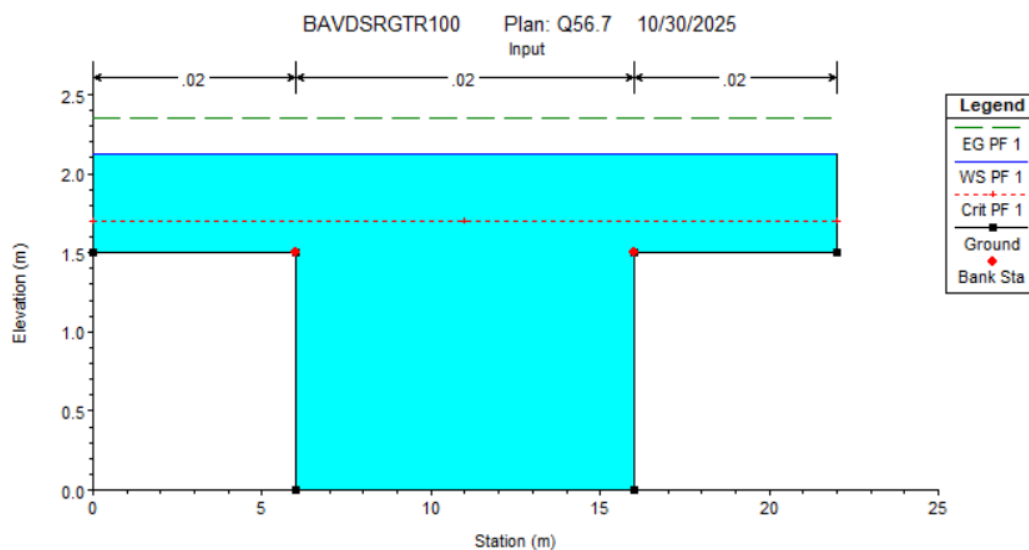


Figura 4.33: Visualização seção 0 para simulação BAVDSRG no HEC-RAS com TR 100 anos. Fonte: autoria própria (2025).

As figuras 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31 mostram que as vazões para o TR de 100 para os cenários BAVS2TR100 e BAV50TR100 não causam transbordamento na calha proposta. Enquanto as figuras 4.32 e 4.33 mostram que a vazão para o cenário BAVDSRGTR100 transborda desde a seção 0 até a seção 2300, sendo acomodada a partir da seção 2400. Como analisado na seção anterior, o cenário VSDSRG (que adota $CN = 85$, maior valor na faixa indicada pelo Diagnóstico de Saneamento Básico de Rio Grande (2013), é o que produz uma vazão muito mais elevada ao ser comparado com outros cenários. Logo, era esperado que este cenário produzisse este tipo de escoamento na calha. Porém, as limitações da simulação devem ser ponderadas. Pois foi adotado que as bordas, tanto direita quanto esquerda, possuem apenas 6 m, embora em campo tenha sido visto a formação de vários reservatórios naturais temporários em ambos os lados direito e esquerdo da adutora por um longo trajeto. Também pode ser observado em imagens, por exemplo figura 3.8, que no ponto definido como início há uma área alagável e alargamento da calha do rio que vai ficar bem caracterizada mais adiante. Esses fatores podem influenciar para que mesmo com uma vazão tão alta, não haja transbordamento no rio.

Embora nos 3 cenários tanto a delimitação das bacias como as chuvas de projeto sejam as mesmas, a mudança de CN causa uma alteração bastante perceptível na resposta das sub-bacias alterando significativamente o comportamento da sub-bacia deste estudo, a sub-bacia 1.

5 | Conclusões e proposta de continuidade

Este trabalho busca contribuir para diminuir a lacuna existente em modelagem hidrológica no Brasil, especialmente no estado do Rio Grande do Sul que tem um longo histórico de enchentes e alagamentos. Para isso, foi modelado o Arroio Vieira e realizadas simulações hidrológicas e hidrodinâmicas desde o ponto em que o arroio intercepta a adutora de abastecimento da cidade até o encontro com a ERS 734 (exutório considerado).

Foram utilizadas técnicas de geoprocessamento combinadas com análises do local de forma a criar um modelo representativo do local. A bacia de referência foi delimitada através dos mosaicos de fluxo no MDE Copernicus com resolução de 30m. Para a simulação que utilizou a opção automatizada no HEC-HMS, foi utilizado o MDE Alos Word 3D com resolução de 30m, pois este delimitou uma bacia muito próxima a bacia de referência. Na modelagem hidrológica, através do HEC-HMS, foram realizadas 13 simulações considerando 4 cenários combinados com 3 tempos de retorno. Destas 13 simulações, 3 foram escolhidas, as que foram consideradas com maior impacto, e foram executadas simulações hidrodinâmicas no HEC-RAS para verificar o comportamento da vazão na calha segundo a geometria proposta.

Foi verificado neste estudo que o CN tem grande impacto na modelagem da bacia refletindo não apenas na vazão de pico como no tempo de retorno. E que, provavelmente em função da planicidade da região, há uma grande dificuldade de delimitação da bacia com os MDEs disponíveis e mais utilizados pois eles forneceram delimitações bastante discrepantes entre si, mesmo quando o mesmo MDE era utilizado, mudando apenas a resolução espacial.

A simulação que adotou o maior CN na faixa indicada pelo DSB da prefeitura municipal do Rio Grande foi a que gerou o cenário mais crítico. Com o menor tempo de pico e maior vazão de pico na simulação hidrológica e na simulação hidrodinâmica transbordou na calha proposta por mais de 2 km. Dos 3,5 km do arroio, 2,4 km não comportavam a vazão causando transbordamento para as bordas.

Embora a ausência de dados precisos sobre o volume desviado para o abastecimento público e o aporte de efluentes domésticos imponha limitações à precisão absoluta do modelo, os resultados sublinham a urgência de um planejamento urbano que considere o impacto da impermeabilização do solo. A negligência desses fatores afeta diretamente a mobilidade e a qualidade de vida da população local.

Para o refino do modelo e a redução das incertezas identificadas, propõem-se as seguintes etapas para pesquisas futuras:

1. Monitoramento de Campo: Realização de campanhas de medição de vazão e levantamento batimétrico detalhado, não apenas no Arroio Vieira, mas também nos sistemas lindeiros (Bolaxa, Senandes e Martins), permitindo análises comparativas e regionais.

2. Caracterização de Solos: Estudos *in situ* para determinação de parâmetros de permeabilidade e percolação, visando uma calibração mais fidedigna dos valores de CN e do coeficiente de rugosidade de Manning.
3. Calibração e Validação: Utilização dos dados pluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA) em conjunto com os dados de vazão medidos para calibrar o modelo hidrológico, ajustando as respostas simuladas aos eventos reais.
4. Integração de Dados de Gestão: Incorporação de dados operacionais da companhia de saneamento sobre a derivação de água na adutora, permitindo que o balanço hídrico do modelo represente fielmente a dinâmica antrópica da bacia.

Referências

- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. *Rev. FAE, Curitiba*, v. 20, n. 1, p. 129 - 137, jan./jun. 2017.
- AMARAL, R. do; GUTJAHR, M. R. Desastres naturais. - São Paulo: IG/SMA, 2015. 3ª ed. Revisada. 100 p. (Série Cadernos de Educação Ambiental, 8) ISBN 978-85-86624-81-0
- ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. D.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 69–76, jan. 2013.
- BEDIENT, P. B; HUBER H. C; VIEUX, E. B. *Hydrology and Floodplain Analysis*, 5th edition. Pearson Education International Edition, 2012. ISBN 978-0-13-256796-1
- BIELSKI, C. et al., "Novel Approach for Ranking DEMs: Copernicus DEM Improves One Arc Second Open Global Topography," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 62, pp. 1-22, 2024, Art no. 4503922, doi: 10.1109/TGRS.2024.3368015.
- BOBADILHO, R e TAGLIANI, C. Caracterização Socioambiental de ambientes fluviais costeiros – Um diagnóstico dos arroios urbanos de Rio Grande/RS. *Anais: Geomorfologia fluvial*, 2012.
- BOITRAGO, S. A.; LIMA, L. F. A.; LIMA, F. A.; LEITE, M. E.; COSTA, L. R. F. Aplicação do Modelo HEC-HMS para Simulação do Escoamento Superficial na Bacia Hidrográfica do Rio Vieiras. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.16, n.04 (2023) 2091-2102.
- BRASIL. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Presidência da República, Disponível em:
< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>
- BRASIL. Lei 6.528, de 11 de maio de 1978. Dispõe sobre as tarifas dos serviços públicos de saneamento básico, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília, DF, 12, Mai. de 1978. Disponível em:
<https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6528.htm>
- BRASIL. Lei 6.766, de 19 de dezembro de 1978. Dispõe sobre o parcelamento do Solo Urbano e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília, DF, 20, Dez. de 1979. Disponível em:
<https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm>
- BRASIL. Lei 9984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional das Águas - ANA - entidade nacional de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília, DF, 18, Jul. de 2000. Disponível em:
<https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9984.htm>
- BRASIL. Lei 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília, DF, 11, Jul. de 2002. Disponível em:
<https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm>

- BRASIL. Lei 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978, e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 6, Jan. de 2007. Disponível em:
<https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>
- BRASIL. Lei 14.026, de 15 de julho de 2020. Novo Marco Legal do Saneamento Básico. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 16, Jul. de 2020. Disponível em:
<https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm>
- BRITO, M. P; COSTA, J. R de C. Drenagem urbana: conceitos de microdrenagem. Jundiaí: Sobre as águas, 2024. p. 34. Pós-graduação em Drenagem Urbana aplicada na infraestrutura. Faculdade Focus.
- CEMADEN; Em 2023, Cemaden registrou maior número de ocorrências de desastres no Brasil; 19/01/2024; <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/01/em-2023-cemaden-registrou-maior-numero-de-ocorrencias-de-desastres-no-brasil>; acesso em 29 mar. 2024 .
- CEMADEN; 81% dos eventos registrados pelo Cemaden em 2023 ocorreram nas regiões Sul e Sudeste do país 01/02/2024; <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/81-dos-eventos-registrados-pelo-cemaden-em-2023-ocorreram-nas-regioes-sul-e-sudeste-do-pais>; acesso em 29/03/2024.
- CHOW, V. T; MAIDMENT, D, R; MAYS, L, W. Hidrologia aplicada. Santafé de Bogotá, Colômbia. MCGRAW-HILL INTERAMERICANA. S.A., 1994. ISBN 0-07-010810-2.
- COLLISCHONN, W; DORNELLES, F. Hidrologia para Engenharia e Ciências ambientais. Porto Alegre. COBRAPE, 2013. ISBN: 978-85-8868-634-2
- COSTA, J. R de C. Macrodrenagem. Jundiaí: Sobre as águas, 2024. p. 94. Pós-graduação em Drenagem Urbana aplicada na infraestrutura. Faculdade Focus.
- CRUZ, L. G. DE A.; ANDRADE, F. O.; PRESTES, M. F.; BEZERRA, S. M. DA C.; POLLI, S. A. Hydrologic and hydraulic modeling to assess the efficiency of structural flood control measures: case study of Audi-União District in the city of Curitiba, Brazil. Rev. Ambient. Água vol. 18, e2894 - Taubaté 2023. doi:10.4136/ambi-agua.2894
- DUMITH, R. DE C.; TELLES, R.M.; LUCAS, L.M.; Breve caracterização geológica do município de Rio Grande. VII Sinageo. Belo Horizonte, 2008.
- DUSSEAU, D.; ZOBEL, Z.; SCHWALM, C. R.; DiluviumDEM: Enhanced accuracy in global coastal digital elevation models, Remote Sensing of Environment, Volume 298, 2023, 113812, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113812>.
- GOMES, A. P. “Acumulação e transporte de sedimentos na microdrenagem: monitoramento e modelagem”. UFSM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 146p. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, 2008.
- GARCIA, J. I. B. “Monitoramento e Modelagem da Bacia Hidrográfica Urbana do Arroio Cancela em Santa Maria-RS”. UFSM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 169p. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, 2005.
- GÜLBAZ, S. et al. “Flood Modeling of Ayamama River Watershed in Istanbul, Turkey”. Journal of hydrologic engineering, v. 24, n. 1, 2019.

- IBRAHIM, U. A.; DAN'AZUMI, S. "An Overview of Some Hydrological Models in Water Resources Engineering Systems". *Arid zone journal of engineering, technology and environment*, v. 16, n. 2, p. 285–292, 1 jun. 2020.
- INMET. Ano de 2023 é o mais quente, confirma relatório da OMM. 27/03/2024 <https://portal.INMET.gov.br/noticias/ano-de-2023-%C3%A9-o-mais-quente-da-hist%C3%B3ria-confirma-relat%C3%B3rio-da-omm>. Acesso em 10/04/2024.
- NAYEB YAZDI, M. et al. "An evaluation of HSPF and SWMM for simulating streamflow regimes in an urban watershed". *Environmental modelling & software : with environment data news*, v. 118, p. 211–225, 2019.
- PEREIRA, D. dos R.; et al. "Desempenho de um modelo hidrológico concentrado e de um semi distribuído na predição de vazões diárias". *Irriga, Botucatu*, v. 21, n. 2, p.409-424, maio-junho, 2016. ISSN 1808-3765.
- PIRES, A. dos A. "Caracterização física e estimativa da vazão máxima nas bacias do arroio Martins e Vieira na cidade do Rio Grande/RS". FURG – Escola de Engenharia. 69p. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil. Rio Grande, 2022.
- RIO GRANDE. Diagnóstico de Saneamento Básico. Tomo III: Drenagem Urbana e Manejo de Água Pluviais, 2013.
- SANTOS, H. G. dos. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2011. 67 p. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627 ; 130)
- SANTOS, K. A. dos. "Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. estudo de caso: bacia do rio mundaú ". UFPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 127p. Dissertação de Mestrado. Recife, 2013.
- SANTOS, R. de J. L. dos. "Hidrogramas de projeto e estimativa de sua incerteza". UFRGS –Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 217p. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, 1998.
- SILVA, R. P.; GONÇALVES, R. R. O polo naval e os preços dos imóveis na cidade do Rio Grande/RS. In: ENCONTRO DE ECONOMIA GAÚCHA, 7., 2014, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: FEE, 2014.
- SILVA, T. D. R. et al. Precipitação em Rio Grande – RS (1913 – 2016): Análise descritiva e da variabilidade. FURG - Programa de Pós Graduação em Geografia. 90p. Dissertação de mestrado. Rio Grande, 2019.
- SILVEIRA, A. L. L. da. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 10 n.1 Jan/Mar 2005, 5-23.
- SOUSA, M. M de. "Comparação entre ferramentas de modelagem unidimensional e quasi-bidimensional, permanente e não-permanente, em planejamento e projetos de engenharia hidráulica". UFRJ – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE. 171p. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, 2010.
- TEIXEIRA, N. N.; ARAÚJO, A. V. S. Gestão municipal de drenagem e manejo de águas pluviais: avaliação dos impactos decorrentes da urbanização na Cidade Nova, Ilhéus-BA. *Revista de Gestão e Secretariado*, [S. l.], v. 14, n. 6, p. 9968–9997, 2023. DOI: 10.7769/gesec.v14i6.2351. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/2351>. Acesso em: 19 nov. 2025.

- TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Organizado por Carlos E. M. Tucci. – 3.ed. - Porto Alegre: Editora da UFRGS / ABRH, 2002.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. 2.ed. – Porto Alegre: Editora da UFRGS: ABRH, 2005.
- USACE. River Analysis System HEC-RAS: Hydraulic Reference Manual. Version 6.5. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, CA 95616, EUA, 2024. 477 p.
- URBANI, G. L., GRACIOSA, M. C. P., & VALVERDE, M. C. . Delimitação de manchas de inundação na Bacia do Córrego do Ipiranga, São Paulo – SP, Brasil, com modelagem hidrológico-hidráulica. Revista de Gestão de Água da América Latina, 20, e13, 2023. <https://doi.org/10.21168/rega.v20e13>
- VALENTÍN, M. G. et al. Curso de Hidrologia Urbana, 5ª ed. Barcelona, Espanha. Universitat Politècnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. 2004.
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. TOPODATA: seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. 74 p. IBI: <8JMKD3MGP7W/37FCGLP>. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.35-RPQ). Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP7W/37FCGLP>>.
- VASSÃO, G. M. “Estudo das chuvas intensas no município de rio grande/rs sob a ótica da equação intensidade - duração - frequência (idf)”. FURG – Escola de Engenharia. 51p. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil. Rio Grande, 2022.
- VIOLA, M. R. et al. “Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, p. 581–590, out. 2009.