ESTUDO TÉCNICO HIDROLÓGICO

1. IDENTIFICAÇÃO DO REQUERENTE

Razão social: Município de Dona Francisca

CNPJ n°: 87.488.938/0001-80

Endereço: Rua do Comércio, 619, Centro, Dona Francisca/RS

Contato: (55) 3268-1578

2. IDENTIFICAÇÃO DO SERVIÇO

Razão Social: Município de Dona Francisca

CNPJ n°: 87.488.938/0001-80

Endereço: Arroio Moinho e Trombudo

Contato: (55) 3268-1578

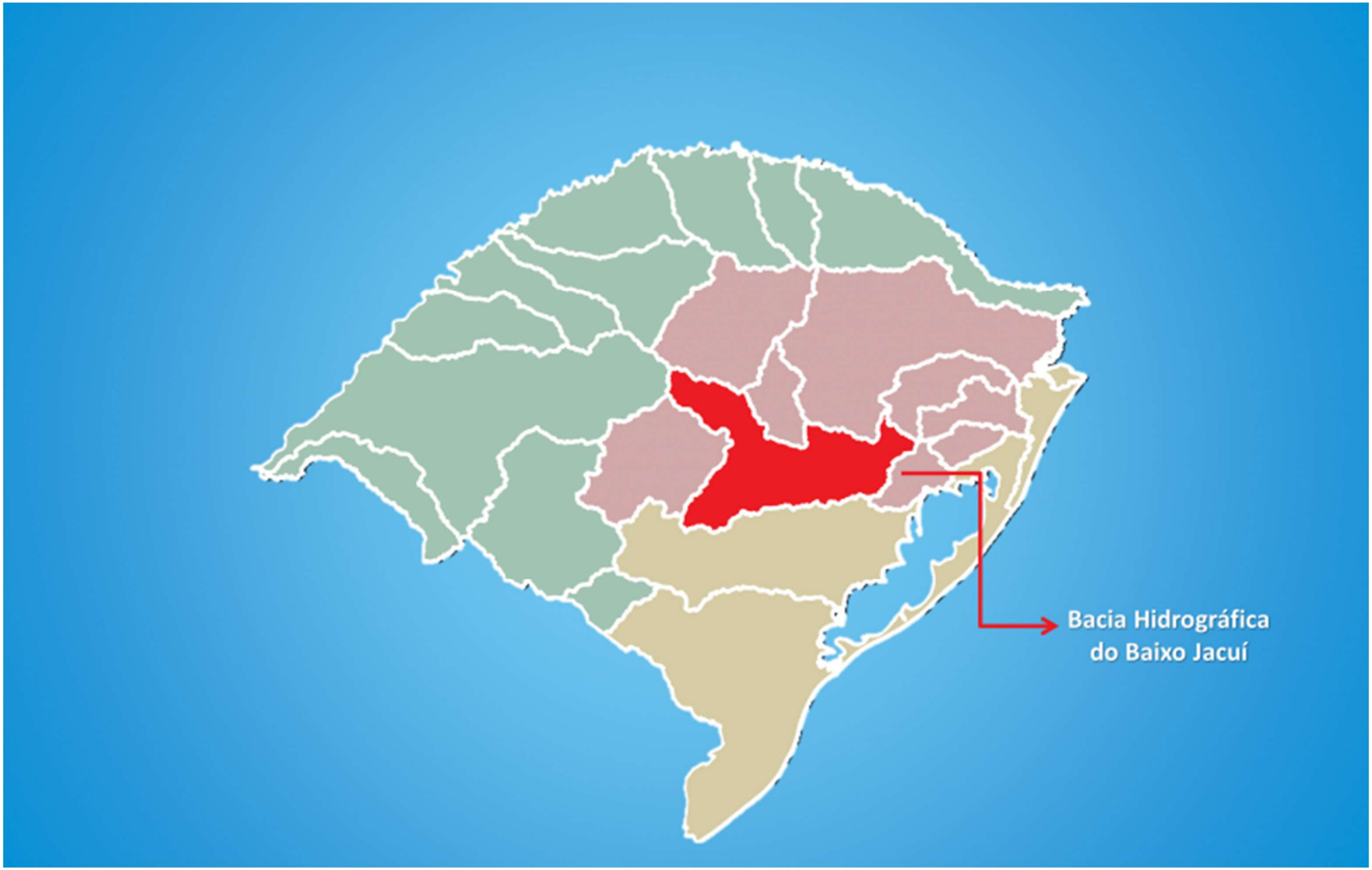
3. RESPONSÁVEL TÉCNICO

Nome: Alan Minussi Pasini

Reg. Prof.:CREA RS194591

Profissão: Eng. Civil

ART n°: 14523915


Bacia Hidrográfica
do Baixo Jacuí

4. INTRODUÇÃO

Nos anos recentes, o Rio Grande do Sul tem enfrentado uma intensificação notável nos eventos hidrológicos extremos. A ocorrência mais frequente de chuvas intensas e inundações vem gerando impactos sociais, econômicos e ambientais expressivos em praticamente todas as regiões do Estado, revelando a vulnerabilidade das áreas urbanas diante de precipitações cada vez mais severas e irregulares.

Em Dona Francisca, município localizado na região central do Estado, essa realidade se manifesta de forma recorrente. Episódios recentes de precipitação intensa têm provocado o transbordamento de arroios e a inundação de trechos urbanos, resultando em danos materiais, desalojamento de famílias e interrupções de serviços essenciais. A repetição desses eventos demonstra a gravidade da situação e reforça a necessidade de compreender os processos hidrológicos que os originam.

Com base nesse contexto, o presente estudo tem como propósito aprofundar a análise hidrológica da bacia principal que drena o município, da qual fazem parte afluentes anteriormente avaliados. A caracterização das chuvas extremas e das vazões correspondentes permitirá subsidiar o planejamento de obras e medidas de mitigação, apoiando a formulação de alternativas técnicas e sustentáveis para reduzir o risco de inundações e aumentar a resiliência da cidade frente às mudanças climáticas.

4.1. Objetivo

O presente estudo tem por objetivo analisar as máximas precipitações e estimar as vazões de pico dos Arroios Moinho e Trombudo. A avaliação abrange a bacia hidrográfica como um todo.

A partir da caracterização hidrológica integrada da bacia e da determinação das vazões máximas associadas a diferentes tempos de retorno, busca-se fornecer subsídios técnicos para o planejamento e a proposição de medidas estruturais e não estruturais voltadas à mitigação das inundações recorrentes no perímetro urbano, contribuindo para o aumento da segurança e da resiliência hídrica do município.

5. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada de modo a integrar as análises hidrológicas, hidráulicas e hidrodinâmicas aplicadas à bacia do Rio Jacuí e ao seu principal afluente.

Os procedimentos metodológicos seguem as recomendações de órgãos técnicos nacionais e internacionais, como o DNIT (2005), o Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE (1980), o U.S. Army Corps of Engineers – USACE (2016) e a Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH (TUCCI, 2012).

De forma geral, a sequência de trabalho compreendeu as seguintes etapas:

1. Levantamento e sistematização de dados pluviométricos, topográficos e de uso e cobertura do solo;
2. Análises hidrológicas com definição de equações intensidade–duração–frequência (I-D-F) e estimativa das vazões máximas por diferentes métodos empíricos e conceituais (SCS-CN, I-Pai-Wu e Racional);
3. Modelagem hidrodinâmica bidimensional (HEC-RAS 2D) para simulação do escoamento superficial e delimitação das manchas de inundação;
4. Avaliação comparativa dos resultados e elaboração de discussões e recomendações técnicas.

As descrições detalhadas dos procedimentos e dos parâmetros utilizados em cada etapa encontram-se distribuídas ao longo dos capítulos específicos do laudo, com a devida referência às bases de dados e fontes consultadas.

6. CARACTERIZAÇÃO

6.1. Área de estudo

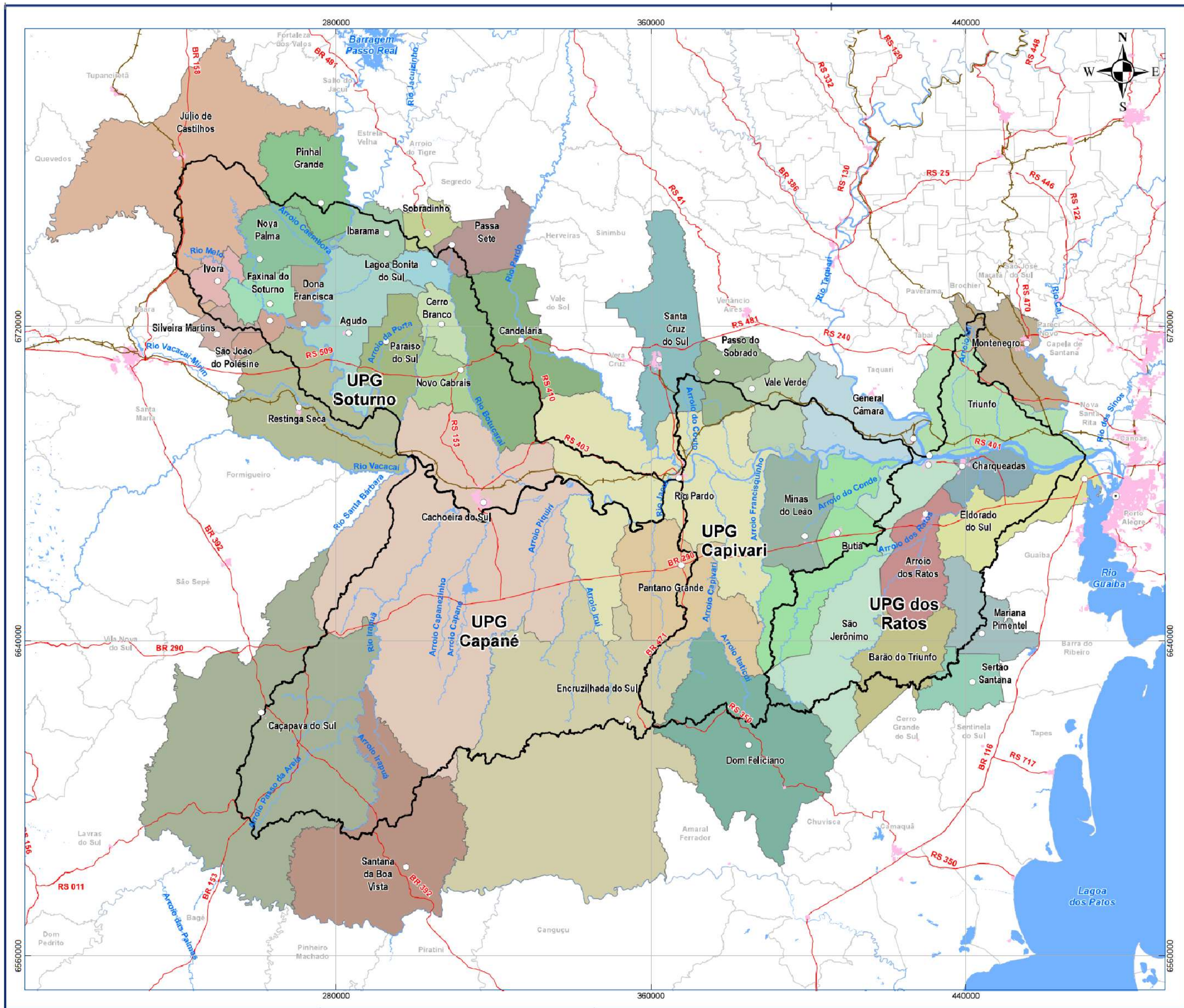
A área de estudos encontra-se inserida no município de Dona Francisca - RS. O local de avaliação encontra-se na área urbana e rual do município. Será realizada uma análise integrada, avaliando os Arroios Moinho e Trombudo.

Sendo este afluente direto da Bacia hidrográfica do Baixo Jacuí, localizada na Região hidrográfica da Bacia do Guaíba, possui área de 17.359 km² e população estimada de 365.764 habitantes (2020), sendo 262.910 habitantes em áreas urbanas e 102.854 habitantes em áreas rurais, representando 6,15% do total da área territorial do Rio Grande do Sul.

Para reconhecimento e caracterização das condições da área e ponto de avaliação, foi realizada uma vistoria no dia 27 de abril de 2026. O ponto de avaliação foi vistoriado na parte da manhã, e as porções a montante foram vistoriadas na parte da tarde. O tempo encontrava- se com céu limpo e temperatura na casa dos 14 °C. Não ocorreram precipitações nas últimas 48h que antecederam a vistoria de campo. O rio apresentava fluxo contínuo, sem estimativa de vazão no ponto de avaliação.

Conforme informações repassadas pela Prefeitura, as águas dos arroios transbordam em períodos de precipitação intensa. A bacia do rio é pequena e as águas são rapidamente escoadas, sendo que em alguns eventos ocorre o transbordamento para fora da calha do arroio. Esse transbordamento, cada vez mais frequente em função das alterações climáticas, tem causado inúmeros transtornos a população do município. Já o arroio Moinho extravasa com menor frequência, mas interfere diretamente na dinâmica do escoamento. Desta forma, é urgente tratar com seriedade técnica este problema visando encontrar soluções social, econômica e ambientalmente viáveis. Abaixo, o ponto de avaliação para definição de estratégias.

Mapa 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí.



Localização das Regiões e Bacias Hidrográficas



Legenda

- Capital
- Sede Municipal
- Rodovia
- Ferrovia
- Cursos d'água
- Mancha Urbana
- Divisa Municipal
- Unidades de Planejamento e Gestão

Municipio	Sede Municipal inserida na Bacia	Área Municipal (km²)		% da Área do Município na Bacia	População Total (hab) 2010	População inserida na Bacia (hab.) 2010		
		Total	Bacia G070			Total	Urbana	Rural
Agudo	Sim	536,30	536,30	100,00%	16722	6889	9833	16722
Arroio dos Ratos	Sim	425.64	425.64	100.00%	13606	12956	650	13606
Barão do Triunfo	Sim	436,11	324,07	74,31%	7018	697	4697	5394
Butiá	Sim	751.82	751.82	100.00%	20406	19330	1076	20406
Caçapava do Sul	Parcialmente	3048,93	1250,54	41,02%	33690	9945	3396	13341
Cachoeira do Sul	Sim	3735.57	3394.78	90.88%	83827	71251	11021	82272
Candelária	Não	943.91	445,29	47,17%	30171	2043	6820	8863
Cerro Branco	Sim	158,78	158,78	100,00%	4454	1274	3180	4454
Charqueadas	Sim	216.35	216.35	100.00%	35320	34490	830	35320
Dom Feliciano	Não	1355,53	387,80	28,61%	14380	-	3160	3160
Dona Francisca	Sim	114.40	114.40	100.00%	3401	2146	1255	3401
Eldorado do Sul	Não	509,35	361,69	71,01%	34343	14158	2516	16674
Encruzilhada do Sul	Parcialmente	3347.78	1348.31	40.27%	24534	10834	2986	13820
Faxinal do Soturno	Sim	170,01	170,01	100,00%	6672	4175	2497	6672
General Câmara	Não	509.70	228.75	44.88%	8447	588	1562	2150
Ibarama	Sim	193,17	154,90	80,19%	4371	1053	2661	3714
Ivorá	Sim	123.02	122.21	99.34%	2156	705	1441	2146
Júlio de Castilhos	Não	1931.01	457.96	23.72%	19579	1833	824	2657
Lagoa Bonita do Sul	Sim	108.52	107.51	99.07%	2662	384	2257	2641
Mariana Pimentel	Não	337.55	175.43	51.97%	3768	-	1627	1627
Minas do Leão	Sim	424.11	424.11	100.00%	7631	7340	291	7631
Montenegro	Não	423.70	22.26	5.25%	59415	-	304	304
Nova Palma	Sim	313.68	313.68	100.00%	6342	3083	3259	6342
Novo Cabrais	Sim	192.31	192.31	100.00%	3855	545	3310	3855
Pantano Grande	Sim	840.92	840.92	100.00%	9895	8314	1581	9895
Paraíso do Sul	Sim	337.92	337.82	99.97%	7336	2852	4483	7335
Passa Sete	Parcialmente	304.54	30.94	10.16%	5154	107	467	575
Passo do Sobrado	Não	264.99	98.20	37.06%	6011	-	1698	1698
Pinhal Grande	Parcialmente	477.35	108.97	22.83%	4471	820	588	1408
Restinga Seca	Não	956.50	221.83	23.19%	15849	-	1593	1593
Rio Pardo	Parcialmente	2049.93	1571.16	76.64%	37591	16733	9180	25913
Santa Cruz do Sul	Não	733.16	55.15	7.52%	118374	9028	992	10020
Santana da Boa Vista	Não	1421.00	317.02	22.31%	8242	-	1008	1008
São Jerônimo	Sim	935.81	808.00	86.34%	22134	16952	4385	21337
São João do Polêsine	Sim	85.22	42.58	49.97%	2635	892	640	1532
Sertão Santana	Não	251.67	22.10	8.78%	5850	-	401	401
Silveira Martins	Não	118.51	37.95	32.03%	2449	-	435	435
Sobradinho	Não	130.41	13.04	10.00%	14283	-	294	294
Triunfo	Parcialmente	818.21	568.23	69.45%	25793	7426	6206	13632
Vale Verde	Não	329.56	172.99	52.49%	3253	147	1245	1391
Total	-	**30362.9**	**17331.8**	-	**736090**	**268990**	**106647**	**375637**

Referências Cartográficas:
- Limite da Bacia - G070: delimitada de acordo com dados hipsométricos na escala 1:50.000 - Engeplus, 2013;
- Hidrografia e Sistema Viário: DSG (atualizado pelo Centro de Ecologia da UFRGS), 2010;
- Limites Estaduais, Municipais e Sedes Municipais: escala 1:250.000 - IBGE, 2013;
- Limite internacional: IBGE, 2006;
- População Inserida: com base nos setores censitários do IBGE e Censo Demográfico do RS (IBGE, 2010), Engeplus, 2013.
- Regiões Hidrográficas: DRH, 2011;
- UPGs: Engeplus,2013

*Nota: UPGs - divisão e limites propostas por Engeplus, aprovadas na Comissão de Acompanhamento e pela plenária do Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica.
Para a estimativa da população inserida na Bacia G070 foram considerados os limites dos setores censitários do IBGE, a porcentagem da área do município na bacia e o Censo Demográfico do RS (IBGE, 2010).

1:1.000.000

0 10 20 30 40 km

Universal Transversa de Mercator
Fuso: 22S
Datum: SIRGAS 2000

Planejamento da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí, Fases A, B e C

Especificação: Localização, abrangência municipal e Unidades de Planejamento e Gestão da Bacia G070

Figura Nº: 1.1

Engeplus engenharia e consultoria ltda.

6.2. Bacia hidrográfica

Para realização do estudo da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí está localizada na porção centro-leste do Estado do Rio Grande do Sul, nas províncias geomorfológicas do Planalto Meridional, Depressão Central, Escudo Uruguaio-Sul-Rio-grandense e Planície Costeira (Interior), entre as coordenadas geográficas 53°41'48" W a 51°18'27" W e 29°13'51" S a 30°48'03" S.

A Bacia G070 abrange total ou parcialmente 40 municípios e ocupa uma área territorial de 17.332,9 km², representando 6,15% do total da área territorial do Rio Grande do Sul1 . De acordo com a divisão do Sistema Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul (SERH-RS) esta bacia pertence à Região Hidrográfica do Guaíba e limita-se a nordeste-leste com a Bacia do Caí (G030), a nordeste com a Bacia do Taquari-Antas (G040), a norte com a Bacia do Rio Pardo (G090), a noroeste com a Bacia do Alto Jacuí (G050), a noroeste-oeste com a Bacia do Rio Ibicuí (U050), a oeste com a Bacia do Vacacaí-Vacacaí Mirim (G060), a sul com a Bacia do Camaquã (L030) e a sudoeste com a Bacia do Lago Guaíba (G080).

No que tange aos principais acessos, estão representados pela BR-290, que atravessa a bacia no sentido longitudinal; a BR-471 no sentido transversal; a BR-153 e a BR-392, sendo servida ainda por rodovias estaduais e municipais.

Em função da extensão territorial e diferenças nos aspectos físico-ambientais, políticoadministrativo e referências da população da bacia, os quais produzem impactos diferenciados nas demandas e disponibilidades quali-quantitativas de água, foram individualizadas Unidades de Planejamento e Gestão - UPGs, consideradas as particularidades de cada unidade. Os limites das UPGs foram submetidos à Comissão de Acompanhamento - CA e à Plenária do Comitê, que definiu as nomenclaturas, conforme relacionado a seguir e ilustrado no Mapa da Figura 1.1.

– Soturno: a UPG contempla, além da sub-bacia do rio Soturno, todos os afluentes da margem esquerda do rio Jacuí, entre o início da Bacia do Baixo Jacuí junto à confluência dos rios Jacuí e Jacuizinho até cerca de 5 km a montante da confluência com o rio Pardo. As principais sub-bacias são a dos arroios Corupá, da Porta, Barriga e dos

rios Soturno e Botucaraí. Contribuem para esta UPG as Bacias do Alto Jacuí e Vacacaí-Mirim;

7. RELATÓRIO TÉCNICO

Para a determinação das vazões máximas dos Arroios Moinho e Trombudo e de seus principais afluentes, buscou-se inicialmente identificar registros históricos de vazão na região. No entanto, por se tratar de cursos d'água de grande porte, não há medições sistemáticas nem séries históricas de vazões disponíveis. Foram consultadas bases de dados hidrológicos estaduais e federais, sem identificação de registros consistentes e representativos para o trecho em análise.

Diante da inexistência de dados observados, as estimativas de vazão foram obtidas por meio de métodos indiretos, baseados na relação entre precipitação e escoamento superficial (métodos chuva–vazão). Assim, procedeu-se à análise das precipitações intensas regionais e à definição de uma equação intensidade–duração–frequência (I-D-F) representativa, a partir da qual foram determinadas as vazões máximas de pico para diferentes tempos de retorno.

Essa abordagem segue as recomendações de Paiva et al.[3] (2024), que indicam a adoção de critérios mais conservadores na avaliação hidrológica, considerando o aumento da frequência e magnitude dos eventos extremos associados às mudanças climáticas. A aplicação de métodos chuva–vazão permite, portanto, representar adequadamente as condições atuais e projetar cenários de maior segurança hídrica para o planejamento das ações de mitigação e adaptação do município.

7.1. Precipitações intensas

O desenvolvimento dos métodos mencionados requer diversos dados de entrada. Desta forma, neste item serão tratados aqui para evitar repeti-los nos itens na sequência.

Os métodos indiretos são empregados em caso de escassez ou inexistência de registros

de vazões no local desejado. Consistem na transformação da precipitação ocorrente sobre uma bacia em vazão. Esta transformação pode ser feita através de modelos puramente empíricos, no qual as relações matemáticas não possuem relação com o comportamento físico dos processos, ou por modelos físicos ou conceituais. No presente caso, não se tem registros de vazões para a região de estudo e proximidades. Sendo que, a precipitação se constitui na causa direta do hidrograma de projeto, portanto, utilizou-se dados de precipitação para determinação das vazões máximas.

As chuvas intensas, também chamadas de chuvas ou precipitação de projeto, caracterizam-se pela variabilidade temporal associada a uma determinada probabilidade de ocorrência. Geralmente, quanto mais intensas, mais raras sãos as chuvas. As precipitações de curta duração e de alta intensidade são o tipo que mais contribui para vazões significativas em bacias de drenagens puramente urbanas e, frequentemente, pequenas. Conhecer a relação de Intensidade (I), duração (D) e frequência (F) é imprescindível para projetos de drenagem urbana. Assim, com base nos eventos ocorridos no passado, é possível estimar a intensidade máxima de uma determinada chuva, com determinada duração e com certo tempo de retorno.

Trata-se das relações I-D-F ou curva I-D-F ou equação I-D-F. Abaixo a equação I-D-F genérica.

$$I = \frac{a\ x\ Tr^{b}}{(t+c)^{d}} \quad (1)$$

Em que: I = intensidade da precipitação em mm.h/dia; Tr é o tempo de retorno em anos; t é a duração em minutos; a, b, c e d são parâmetros ajustados para cada localidade ou estação de medição.

Foram utilizados dois métodos para definição da equação i-d-f para a área de estudos.

7.1.1. Método 1

O Método 1 foi o estudo de RODRIGUES *et al.*, 2023[4], que definiu os coeficientes da equação IDF no Rio Grande do Sul. Os valores dos parâmetros ajustados foram, a – 1.007,985 sendo a média de (993,525+1.006,49+1.010,5+1.001,22+1.010,38+1.015,13+1.018,65), b – 0,166 sendo a média de (0,167584+0,166225+0,165695+0,166055+0,164946+0,165302+0,1653), c – 9,791, d – 0,7294.

$$I = \frac{1.007{,}985\ x\ TR^{0{,}166}}{(\ t\ +\ 9{,}791)^{0{,}7294}} \quad (2)$$

Tendo como base a equação I-D-F do método 1, calculou-se a intensidade da precipitação para diferentes tempos de retorno e duração. Os resultados encontram-se apresentados na,

Tabela 1. Valores de intensidade de chuva para diferentes durações e tempos de retorno, tendo como base a equação i-d-f definida por RODRIGUES et al., 2023.

[4] RODRIGUES, A. A.; SIQUEIRA, T. M.; BESKOW, T. L. C.; BESKOW, S; TIMM, L. C, Mapas dos Coeficientes da Equação Intensidade-Duração-Frequência de chuvas para o Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Pelotas, 2023, 1ª Edição. ISBN: 978-65-00-79691-9

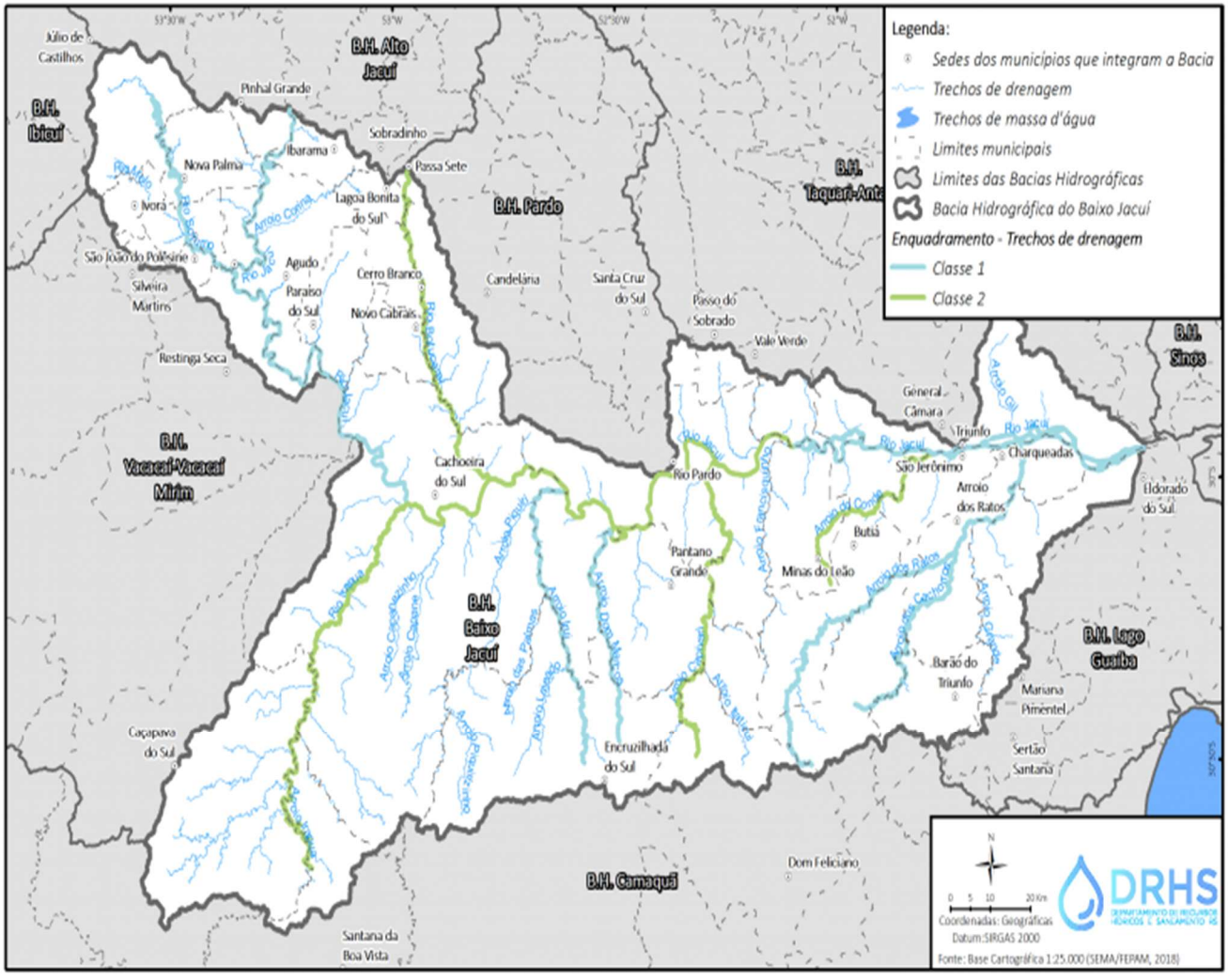
Duração (min)	I (mm/h)					
	3 anos	12 anos	25 anos	50 anos	75 anos	200 anos
1440	5,98	7,53	8,50	9,54	10,20	12,00
360	16,20	20,39	23,03	25,83	27,63	32,51
200	24,50	30,83	34,82	39,06	41,78	49,16
60	54,67	68,80	77,71	87,18	93,24	109,71
30	82,36	103,65	117,07	131,34	140,47	165,29
20	101,72	128,02	144,59	162,21	173,49	204,14
15	116,30	146,37	165,32	185,47	198,37	233,42
10	137,07	172,51	194,85	218,59	233,79	275,10
5	169,51	213,34	240,96	270,32	289,12	340,20

7.1.2. Método 2

O Método 2, utilizou-se os dados hidrometeorológicos básicos existentes para a realização dos estudos, bem como a análise da rede de monitoramento existente está contemplada em continuidade. Os dados climáticos adotados para o estudo climatológico da bacia em questão são oriundos das estações climatológicas de Encruzilhada do Sul (código 83964), Porto Alegre (código 83967) e Santa Maria (código 83936), operadas pelo INMET (2014) 34, cuja localização pode ser verificada na Figura 2. Estas estações dispõem de normais climatológicas para o período de 1961-2014, para alguns dos principais elementos climáticos precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, insolação e evaporação. Estão localizados na Bacia G070 e em seu entorno 10 (dez) postos pluviométricos, sendo que apresentam dados recentes disponíveis e foram utilizados no estudo, conforme pode ser visualizado. Quanto as estações fluviométricas, estão localizados, na bacia de estudos 22 (vinte e dois) postos, sendo que nove apresentam dados de vazão disponível.

A equação I-D-F para o ponto de avaliação foi calculado utilizando dados da precipitação máxima diária anual das estações mencionadas acima. Os registros anuais foram inseridos na ferramenta *Genetic Algorithm Methodology* – GAM for IDF, produzida pelo Grupo de Pesquisa em Hidrologia e modelagem hidrológica em bacias hidrográficas da UFPEL.

A IDF foi gerada utilizando a função automática com melhor ajuste de Função Densidade de Probabilidade – FDP. O ajuste apresentou 0,9994 para Nash – *Sutcliffe*, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor é o ajuste. Os valores dos parâmetros ajustados foram, a – 1.156,449, b –0,176, c – 9,239, d – 0,707. A seguir encontra-se a equação I-D-F para o ponto de avaliação.



$$I = \frac{1.156{,}449\ x\ TR^{0{,}176}}{(t + 9{,}239)^{0{,}707}}$$

Tendo como base a equação I-D-F do método 2, calculou-se a intensidade da precipitação para diferentes tempos de retorno e duração. Os resultados encontram-se apresentados na *Tabela 2*.

Tabela 2. Valores de intensidade de chuva para diferentes durações e tempos de retorno, tendo como base a equação i-d-f utilizando a média ponderada das estações JAGUARI 02954007 e PONTE TOROPI II 02954032.

Duração (min)	**I (mm/h)**					
	3 anos	12 anos	25 anos	50 anos	75 anos	200 anos
1440	8,17	10,43	11,86	13,40	14,39	17,11
360	21,48	27,41	31,19	35,24	37,85	44,98
200	32,09	40,96	46,61	52,66	56,55	67,21
60	70,14	89,52	101,87	115,08	123,60	146,89
30	104,80	133,75	152,20	171,94	184,66	219,46
20	129,02	164,67	187,38	211,69	227,35	270,19
15	147,32	188,02	213,95	241,71	259,59	308,50
10	173,45	221,38	251,91	284,60	305,65	363,24
5	214,58	273,87	311,64	352,08	378,12	449,36

7.1.3. Precipitação utilizada

Percebe-se diferença nos resultados conforme a equação i-d-f utilizada. No entanto, ambos os métodos de definição das equações são válidos e foram realizados seguindo metodologia consagrada. Desta forma, utilizar-se-á a média dos resultados das duas equações. Ainda, conforme a nota técnica de PAIVA et al (2024) do IPH/UFRGS, recomenda-se a adoção de critérios mais restritivos para definição de valores considerando as mudanças climáticas. Desta forma, utilizou-se tempos de retorno mais restritivos para a avaliação das vazões máximas para o PA.

Tabela 3. Valores de intensidade de chuva para diferentes durações e tempos de retorno, sendo destacada a linha de duração de 200 minutos (pouco superior ao tempo de concentração da bacia que será detalhado a seguir).

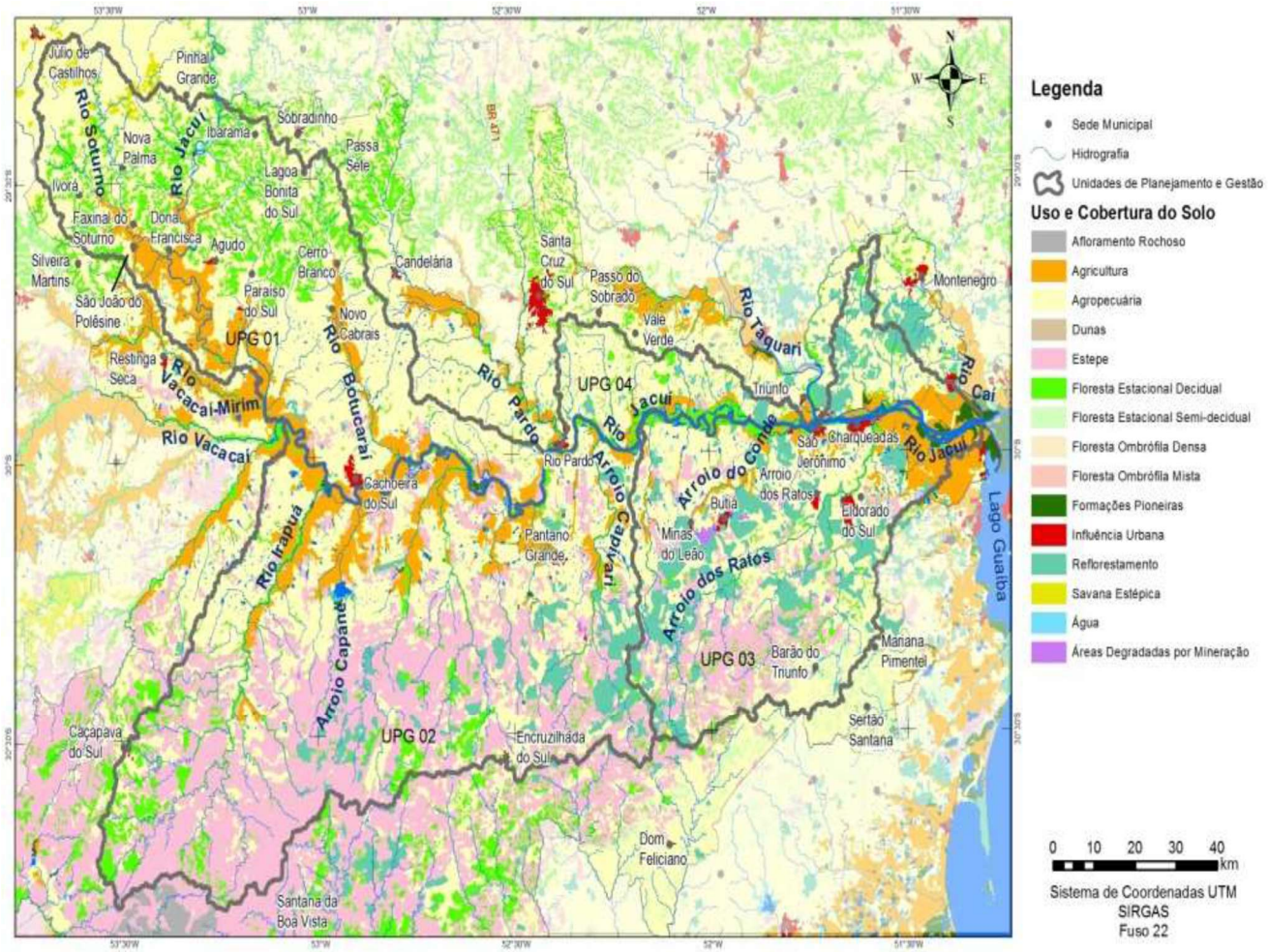
Duração (min)	I (mm/h)					
	3	12	25	50	75	200
1440	7,07	8,98	10,18	11,47	12,30	14,55
360	18,84	23,90	27,11	30,54	32,74	38,75
200	28,29	35,89	40,71	45,86	49,17	58,18
60	62,40	79,16	89,79	101,13	108,42	128,30
30	93,58	118,70	134,63	151,64	162,57	192,37
20	115,37	146,35	165,99	186,95	200,42	237,17
15	131,81	167,20	189,64	213,59	228,98	270,96
10	155,26	196,95	223,38	251,59	269,72	319,17
5	192,05	243,61	276,30	311,20	333,62	394,78

7.2. Detalhamento da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí está localizada na porção centro-leste do Estado do Rio Grande do Sul, nas províncias geomorfológicas do Planalto Meridional, Depressão Central, Escudo Uruguaio-Sul-Rio-grandense e Planície Costeira (Interior), entre as coordenadas geográficas 53°41’48” W a 51°18’27” W e 29°13’51” S a 30°48’03” S.

- **Soturno:** a UPG contempla, além da sub-bacia do rio Soturno, todos os afluentes da margem esquerda do rio Jacuí, entre o início da Bacia do Baixo Jacuí junto à confluência dos rios Jacuí e Jacuizinho até cerca de 5 km a montante da confluência com o rio Pardo. As principais sub-bacias são a dos arroios Corupá, da Porta, Barriga e dos rios Soturno e Botucaraí. Contribuem para esta UPG as Bacias do Alto Jacuí e Vacacaí-Mirim.

Mapa 3. Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica. Modificado de Uso e Ocupação do Solo para o Brasil, Map Biomas (2024).



Além da área de drenagem, a forma da bacia hidrográfica exerce influência direta sobre o tempo de concentração e o comportamento do escoamento superficial. Bacias de formato mais alongado tendem a apresentar maior tempo de concentração, resultando em escoamento mais distribuído no tempo e menor propensão a cheias súbitas. Por outro lado, bacias arredondadas apresentam resposta hidrológica mais rápida, pois a precipitação atinge praticamente toda a área de drenagem de forma simultânea, favorecendo picos de vazão mais elevados.

A bacia de estudo apresenta formato com tendência a arredondado, com fator de forma igual a 1,9135 e coeficiente de forma de 1,022. Esses valores indicam uma bacia de resposta relativamente rápida, embora não totalmente circular, sugerindo maior suscetibilidade a inundações em função da convergência simultânea do escoamento superficial em direção à foz.

O comprimento do curso hídrico principal é de 19,628 km, com nascentes localizadas nas porções mais elevadas ao norte (cota aproximada de 413,16 m) e ponto de exutório a 105,83 m, resultando em desnível altimétrico de 307,33 m entre as cabeceiras e a foz. O tempo de concentração da bacia (Tc), calculado pelo método de Kirpich que é adequado para bacias rurais[6], foi de 195,63 minutos, indicando resposta hidrológica compatível com bacias de porte médio. A declividade média do talvegue principal foi estimada em 0,0054 m/m, valor característico de cursos d'água de baixa a moderada energia.

Contudo, vale destacar aqui que para os cálculos hidrodinâmicos apresentados nas seções seguintes, optou-se por utilizar a declividade representativa da porção mais a jusante da bacia, onde se concentram as áreas urbanas e as principais restrições hidráulicas. Essa escolha se justifica pelo fato de que as porções a montante apresentam declividades significativamente maiores, o que tenderia a superestimar as velocidades de escoamento e as vazões de pico se utilizado o valor médio global. Assim, o uso da declividade de jusante assegura maior coerência com as condições hidráulicas reais do trecho modelado, reduzindo possíveis erros de representação no contorno inferior do modelo.

Para o cálculo do Curva Número (CN), foram utilizadas informações da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (2022[7]), complementadas por análises regionais de uso e cobertura do solo e tipologia de solos da bacia. Os valores de CN variaram entre 52 e 98, conforme as classes mapeadas. A média ponderada, obtida a partir da proporção de cada tipode uso e solo, resultou em CN = 76,84, representando uma condição de infiltração moderada e escoamento superficial significativo, típica de bacias com presença de áreas agrícolas, pastagens e núcleos urbanos.

Por fim, calculou-se também as perdas iniciais, a máxima infiltração acumulada e o tempo de pico após a precipitação.

7.3. Vazões de projeto

A determinação das vazões máximas para pequenas bacias hidrográficas pode ser realizada através de diferentes metodologias. Conforme Departamento de Águas e Energia

Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE (2005), para a determinação das vazões máximas de bacias com tamanho de até 200 km², podem ser utilizados o Método I Pai Wu e Hidrograma Unitário. O Caderno de Encargos do Departamento de Esgotos Pluviais – DEP de Porto Alegre (2005) indica a utilização do método do Hidrograma Unitário do SCS para bacias com tamanho de até 200 km².

Já o Caderno Instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana[8], da Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro, indica o método de Hidrograma Unitário do SCS para bacias com tamanho superior a 1 km². Este mesmo caderno, indica a utilização do método racional modificado para bacias com até 1 km² de área de drenagem.

O Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais[9] da prefeitura Municipal de São Paulo (2012) indica a utilização do método do Hidrograma Unitário do SCS para bacias com tamanho superior a 3 km².

O ISF – Estudos hidrológicos - Aprovação técnica pelo DNIT[10] (2012) para obras ferroviárias, indica a utilização do método racional modificado para bacias hidrográfica até 10 km² e o método do Hidrograma sintético para bacias com tamanho entre 10 e 20 km². O Manual de Hidrologia básica para estruturas de drenagem – DNIT[11] (2005) indica a utilização dos métodos racional modificado e o Hidrograma Unitário do SCS.

Como é possível observar, não há consenso quanto ao método a ser utilizado quando em virtude do tamanho da bacia hidrográfica de contribuição. Neste estudo, será utilizado o modelo do Hidrograma *Soil Conservation Service* – Hidrograma SCS, que será detalhado no item a seguir. Embora outros métodos tenham sido avaliados, optou-se pelo modelo SCS-CN por permitir a geração de hidrogramas completos e melhor representar o comportamento de bacias de médio porte.

---

[8] Rio de Janeiro. Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro. Instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana. Julho de 2019.

[9] São Paulo (cidade). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos; fundamentos. São Paulo: SMDU, 2012.

[10] Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretoria de Infraestrutura Ferroviária (DIF). ISF – Estudos hidrológicos. Aprovação técnica pelo DNIT - Janeiro de 2012

[11] Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. *Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem* 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2005. 133 p. (Publicação IPR, 715.)

7.3.1. Metodologia do SCS-CN / cálculo das vazões

O modelo da *Soil Conservation Service* (SCS) é amplamente utilizado para a estimativa das vazões máximas e geração de hidrogramas de escoamento superficial em pequenas e médias bacias hidrográficas, geralmente com área de drenagem entre 1 e 200 km² (DNIT, 2005; DAEE, 1980[12]; TUCCI, 2012[13]).

A metodologia aplicada baseia-se na separação do escoamento e determinação da precipitação efetiva por meio do método da Curva Número (CN), seguido da utilização do Hidrograma Unitário Triangular (HUT) para a convolução com o hietograma de projeto e consequente geração do hidrograma de escoamento.

O método SCS-CN fundamenta-se no balanço hídrico aplicado à superfície do solo, considerando a capacidade de armazenamento e infiltração do solo, bem como a umidade antecedente (DORNELLES; COLLISCHONN, 2013[14]). Ele contempla um conjunto de três equações abaixo apresentadas:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (4)$$

$$I_a = 0{,}2\,S \quad (5)$$

$$S = \frac{25.400}{CN} - 245 \quad (6)$$

Em que: Q é a chuva efetiva (mm); P é a precipitação total do evento (mm); I_a representa as perdas iniciais (mm), correspondentes à interceptação, infiltração inicial e depressões no terreno; S é a máxima infiltração acumulada potencial (mm), determinada em função do Curva Número (CN).

[12] DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE); COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Drenagem urbana: manual de projeto. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1980.

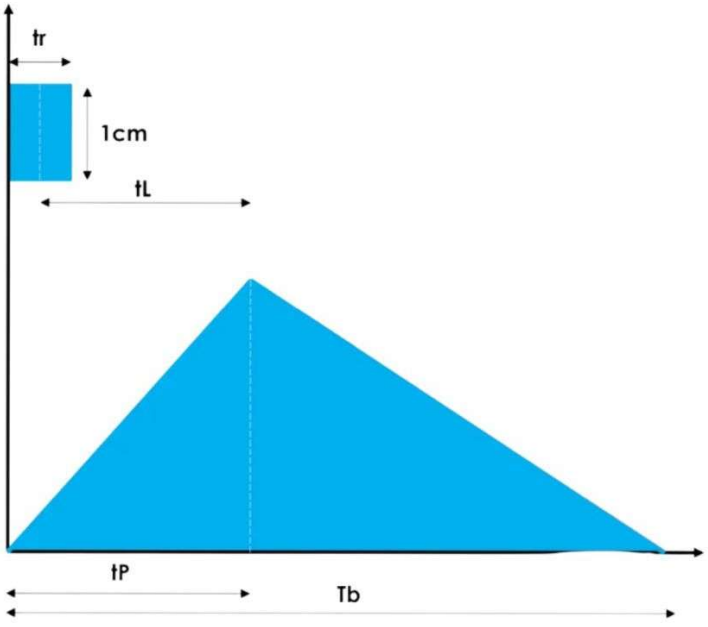
[13] TUCCI, C, E, M, organizador; 2012; Hidrologia: Ciência e Aplicação; 4ª ed, 4ª reimp, Editora da Universidade UFRGS/ABRH; Porto Alegre, 943 p,,

[14] DORNELLES, W, C,; COLLISCHONN, W, Hidrologia para engenharia e Ciências Ambientais. 2ª Edição Revisada e ampliada. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), Porto Alegre, 2015,

De maneira geral, o modelo baseia-se na relação entre a precipitação efetiva (parte da chuva que gera escoamento) e o escoamento superficial direto, considerando as características físicas da bacia, como uso e cobertura do solo, tipo de solo e umidade antecedente. Ou seja. a precipitação incidente, proveniente do hietograma de projeto, reduzida do armazenamento total do solo (S), constitui a precipitação efetiva. Essa precipitação é combinada com o Hidrograma Unitário Triangular - HUT para a geração do escoamento superficial.

O Hidrograma Unitário Triangular (HUT) é um hidrograma sintético utilizado quando dados de vazão observados não estão disponíveis. Ele considera a geração de escoamento a partir de uma precipitação efetiva de 1 mm. Exemplificado na Figura 3, ele é obtido através das equações apresentadas a seguir (Equações 7, 8, 9 e 10), e utiliza como dados de entrada a área da bacia, o tempo de concentração e o intervalo de tempo de cálculo. Após, é realizada a convolução do HUT considerando a precipitação efetiva obtida anteriormente.

Figura 3. Exemplificação do Hidrograma Unitário Triangular – HUT.



O tempo de pico (Tp) representa o intervalo entre o início do evento de precipitação efetiva e o instante em que ocorre a vazão máxima (Qp) no exutório da bacia. Esse parâmetro reflete a resposta hidrológica da bacia e é diretamente influenciado pelo tempo de concentração, formato e uso do solo. No modelo SCS, o Tp é obtido a partir da relação com o tempo de concentração (Tc), conforme equação 7. Assim, para o tempo de concentração de 195,63 minutos, o tempo de pico estimado é de aproximadamente 117,38 minutos, indicando uma resposta hidrológica relativamente rápida, condizente com bacias de médio porte e cobertura predominantemente rural com áreas urbanizadas.

O tempo de base (Tb), apresentado na equação 9, corresponde à duração total do escoamento superficial direto, foi determinado pela relação empírica proposta pelo modelo do Hidrograma Unitário Triangular (HUT), sendo aproximadamente 2,67 vezes o tempo de pico. Dessa forma, o tempo de base calculado foi de cerca de 313,4 minutos, o que representa o período total do hidrograma até o escoamento retornar a níveis de base.

$$t_l = 0{,}6 * t_c \tag{7}$$

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0{,}6\, t_{c'} \tag{8}$$

$$t_b = 2{,}67 * t_p \tag{9}$$

$$Q_p = \frac{2{,}08 * A}{T_p} \tag{10}$$

Em que: tl = Tempo de pico do hidrograma (h); Tp = Tempo de subida do hidrograma (h); Tb = Tempo de base do hidrograma (h); A = área de contribuição (km²); e Qp = Vazão de pico do hidrograma (m³/s/mm).

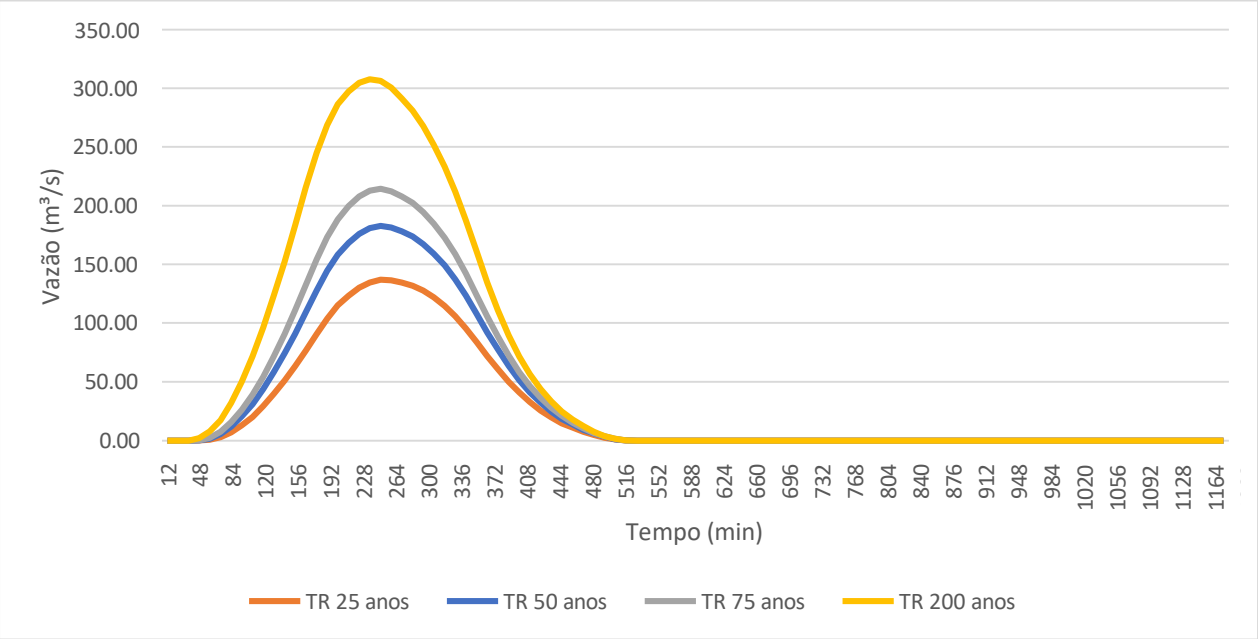
Tendo como base a sequência de cálculos apresentada, procedeu-se com a determinação das vazões máximas para os tempos de retorno de 25, 50, 75 e 200 anos, encontram-se apresentadas na *Tabela 4*.

Tabela 4. Valores das vazões obtidas pelo Modelo SCS para os tempos de retorno de 25, 50, 75 e 200 anos.

Tempo de Retorno (anos)	Vazões SCS (m³/s)
200	307,86
75	214,53
50	182,95
25	137,04

Com base nesses parâmetros, foi gerado o hidrograma completo de projeto para os diferentes tempos de retorno (25, 50, 75 e 200 anos). O hidrograma expressa graficamente a variação temporal da vazão no ponto de controle, permitindo a avaliação dos picos de vazão, do volume escoado e do tempo de resposta da bacia. Esses resultados subsidiam o dimensionamento de estruturas hidráulicas e o planejamento de medidas mitigadoras, como a bacia de retenção proposta, visando reduzir os efeitos das cheias sobre a área urbana. A Figura 4 apresenta os hidrogramas de projeto para a bacia de contribuição do PA do Rio Jacuí para diferentes tempos de retorno.

Figura 4. Hidrograma de projeto para os tempos de retorno de 25, 50, 75 e 200 anos, através do modelo SCS, para o ponto de avaliação do Arroio Poraíma.



7.4. Estudos hidráulicos – modelagem hidrodinâmica

Para o desenvolvimento do estudo hidrodinâmico e a avaliação das condições de escoamento nos diferentes tempos de retorno, foram realizadas simulações computacionais utilizando o software HEC-RAS, versão 6.4.1.

A representação matemática do comportamento da geração (hidrológica) e da propagação (hidrodinâmica) do escoamento superficial é essencial para diversas análises. Ainda, a necessidade e a aplicabilidade dos modelos matemáticos, seja pela agilidade, seja pela confiabilidade no processamento dos fenômenos envolvidos. Os modelos integram formulações hidrológicas e hidrodinâmicas com o Sistema de Informações Geográficas (SIG). Essa integração é ferramenta importante para a criação de ações preventivas, em que os dados da geometria do canal são extraídos por meio de dados de geoprocessamento e sensoriamento remoto. A extração é feita a partir de um Modelo Digital do Terreno (MDT) e a aquisição dos dados geométricos do canal ocorre sem a necessidade de coleta direta e constante em campo, economizando-se tempo e custos financeiros.

A necessidade de maiores detalhamentos em projetos de Engenharia Hidráulica requer modelos com alta precisão altimétrica. Nesses casos, os MDTs podem ser gerados a partir de dados de levantamentos topográficos. No presente caso, utilizou-se o levantamento planialtimétrico realizado em outubro de 2025.

O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) é uma ferramenta desenvolvida pelo *U.S. Army Corps of Engineers* que permite a modelagem hidráulica de escoamentos em canais naturais e canais artificiais, abrangendo regimes permanentes e transientes. O software dispõe de módulos unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D), além de recursos para a simulação de transporte de sedimentos e dispersão de poluentes.

Na presente aplicação, foi adotada a abordagem bidimensional (2D), a qual permite representar de forma mais realista o comportamento do escoamento sobre a planície de inundação, considerando as variações espaciais da velocidade, da profundidade e da direção do fluxo.

O modelo matemático que fundamenta o HEC-RAS 2D é baseado nas Equações de Águas Rasas (*Shallow Water Equations*), que correspondem à forma bidimensional das Equações de Saint-Venant. Essas equações descrevem a conservação de massa e de momento linear em um plano horizontal, considerando as componentes nos eixos *x* e *y*.

Em aplicações práticas, o software também admite simplificações dessas equações, como o modelo da onda difusiva, obtido pela supressão de determinados termos inerciais das equações completas (USACE, 2016[15]). Essa simplificação é especialmente útil para representar o escoamento em áreas de baixa declividade e velocidades moderadas, comuns em planícies de inundação urbanas.

As Equações de Águas Rasas constituem o núcleo do modelo hidrodinâmico utilizado nas simulações deste estudo e são compostas por uma equação de conservação de massa e duas equações de conservação de momento linear nas direções *x* e *y*. A solução dessas equações é obtida por meio de um método numérico implícito de volumes finitos, que confere ao modelo maior estabilidade e robustez em comparação aos tradicionais métodos de diferenças finitas (USACE, 2016). No HEC-RAS, as configurações de simulação são organizadas em três grupos principais: geometria do modelo (topologia), condições iniciais e de contorno e planos de simulação, os quais serão detalhados nos subitens seguintes, com ênfase nos parâmetros mais relevantes adotados para este estudo. Esses procedimentos foram realizados para duas modelagens distintas, sendo uma modelagem para o Rio Jacuí.

7.4.1. Geometria

A definição da geometria do modelo constitui uma etapa fundamental no desenvolvimento das simulações, pois a qualidade dos resultados e a estabilidade numérica estão diretamente relacionadas às configurações do domínio de cálculo e da malha computacional. O software HEC-RAS (na versão 6.4.1 utilizada) conta com uma ferramenta de SIG integrada, denominada *RAS Mapper*, que possibilita a utilização de elementos típicos de softwares SIG, como a importação de arquivos vetoriais (shapefiles) e matriciais (rasters), para a definição das geometrias do modelo.

[15] US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. California: Hydrologic Engineering Center, 2016.

Por meio do *RAS Mapper* é possível importar Modelos Digitais de Terreno (MDT) que representam o terreno de simulação e servem como base planialtimétrica para os cálculos hidráulicos. A partir dessa base são definidos o domínio de modelagem, a malha computacional e as condições de contorno, parâmetros essenciais para garantir a precisão e a estabilidade do modelo hidrodinâmico.

O terreno utilizado no modelo hidrodinâmico foi construído a partir da integração de duas bases planialtimétricas distintas, combinadas de forma a garantir coerência espacial e precisão altimétrica. A primeira base corresponde ao levantamento aerofotogramétrico detalhado da região de estudo, utilizado como referência principal para a geração do Modelo Digital de Terreno (MDT) de alta resolução. A segunda base é composta por onze seções transversais topobatimétricas obtidas por levantamento de pontos no leito do Arroio Poraíma e do arroio localizado na cidade, abrangendo trechos a montante e a jusante do ponto de avaliação. Ainda se considerou diversos pontos com informações altimétricas de controle para aferir a qualidade do MDE.

O levantamento aerofotogramétrico e as seções topobatimétricas utilizadas neste estudo foram elaborados e disponibilizados em outubro de 2025. A coleta dos perfis topobatimétricos ocorreu entre os dias 6 e 8 de outubro, sob condições meteorológicas estáveis. Durante o trabalho de campo, não foram observadas variações significativas na lâmina d'água nem na vazão dos cursos d'água, garantindo a consistência dos dados obtidos. O período de medição foi deliberadamente escolhido após uma sequência prolongada de baixa pluviosidade, de modo a assegurar a estabilidade hidráulica necessária à aquisição das cotas.

As três fontes de informação planialtimétrica — levantamento aerofotogramétrico, perfis topobatimétricos e pontos de controle com informações altimétricas — foram posteriormente integradas e processadas no módulo RAS Mapper do software HEC-RAS, resultando em um Modelo Digital de Elevação (MDE) unificado, que serviu como base planialtimétrica para assimulações hidrodinâmicas.

Após a definição do MDT a ser utilizado na simulação, faz-se necessário definir o domínio e a malha computacional. O domínio da simulação foi definido de maneira que contemplasse toda a área de estudo, abrangendo as margens do Rio Jacuí.

Dentro do domínio, foi discretizada uma malha com dimensões gerais de 10x10 m, contudo, adotaram-se regiões de refinamento de malha (2x2 m) em zonas de interesse, tal como a calha e margens do arroio na porção central da cidade como a calha e margens do arroio Poraíma. Ainda, foram inseridas *breaklines* em regiões de interesse, a fim de deixar as células de cálculo perpendiculares ao fluxo principal. Apresenta a malha computacional utilizada e a malha computacional detalhada na região da ponte projetada. A malha computacional gerada possui um número de elementos na ordem de 1 x 2.906 elementos.

7.4.2 Condições de Contorno

As condições de contorno adotadas para as simulações dependem do Tempo de Retorno simulado. Para os tempos de retorno foram adotadas duas condições de contorno, sendo uma de montante e uma de jusante. Como Condição de Contorno de Montante (CCM), foram adotados hidrogramas de vazão constante, conforme a vazão de pico calculada no estudo hidrológico para cada um dos tempos de retorno. Já como Condição de Contorno de Jusante (CCJ), adotou-se uma condição de *normal depth*, a qual adota uma declividade da linha de energia pré-estabelecida para as células localizadas no contorno desejado. Como aproximação, adotou-se que a declividade da linha de energia é igual à declividade de fundo do arroio na região onde foi realizado o levantamento topobatimétrico, em que obteve-se um valor de 0,001 m/m. As Condição de Contorno de Montante (CCM) e as Condição de Contorno de Jusante (CCJ) encontram-se apresentadas na tabela 5.

Tabela 5. Condições de contorno utilizadas no presente estudo.

Tempo de Retorno (anos)	**CCM**	**CCJ**
	Vazões (m³/s)	**declividade (m/m)**
200	307,86	0,001
75	214,53	0,001
50	182,95	0,001
25	137,04	0,001

7.4.3 Escoamento

O software HEC-RAS, tanto em seu módulo unidimensional, quanto em seu módulo bidimensional, utiliza como equação de resistência do escoamento a Equação de Manning, a qual é dada por:

$$Q = \frac{1}{n} * A * R_h^{2/3} * S^{1/2} \quad (11)$$

Em que: Q é a vazão (m³/s); n é o coeficiente de Manning (s/m^1/3); A é a área da seção transversal do escoamento (m²); Rh é o raio hidráulico (m) e; S é a declividade (m/m).

Para a identificação dos diferentes coeficientes de Manning da planície de inundação, foram utilizados os dados de uso e ocupação do solo fornecidos pelo MapBiomas, Coleção 9, para o ano de 2024 (MAPBIOMAS, 2025[16]), os quais são dados em SIG em um arquivo matricial. As seguintes classes de uso e ocupação do solo foram obtidas na área de estudo e associadas a diferentes classificações conforme USACE (2016), a fim de atribuir um limite mínimo e máximo de Coeficiente de Manning para a calibração. Na tabela 6 encontram-se apresentadas classes de uso do solo para a bacia e planície de inundação, determinação da área e a porcentagem de cada classe, identificação das classes conforme USACE e dos limites superiores e inferiores dos coeficientes de Manning para cada uma delas e dos valroes adotados. Tendo como base estas informações, determinou-se o valor de manning para a bacia hidrográfica e planície de inundação de forma ponderada, obtendo-se o valor de 0,062.

[16] Projeto MapBiomas – Coleção [versão] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em [outubro de 2025] através do link: [*https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection_10/lulc/coverage/brazil_coverage_2024.tif*]

Tabela 6. Determinação do coeficiente de manning para a bacia hidrográfica e planície de inundação, aprofundando os dados de CN trazidos no subitem 8.2.

Classe MapBiomas 2024	Área (km²)	%	Classe USACE (2016)	Limite inferior (s/m^1/3)	Limite superior (s/m^1/3)	Adotado
Formação Florestal	24.154849	29.22%	Mixed Forest	0.08	0.16	0.08
Floresta Plantada	1.499518	1.81%	Mixed Forest	0.08	0.16	0.08
Campo Alagado e Área Pantanosa	0.003123	0.00%		0.07	0.16	0.07
Formação Campestre	14.483908	17.52%	Grassland/Herbaceous	0.025	0.05	0.05
Pastagem	11.577006	14.00%	Pasture	0.025	0.05	0.05
Mosaico de Agricultura e Pastagem	19.557423	23.66%	Developed, Open Space/Low Intensity	0.03	0.12	0.06
Infraestrutura urbana	1.014083	1.23%	Developed, Low Intensity	0.06	0.12	0.08
Outras Áreas não Vegetadas	0.084309	0.10%	Developed, Open Space	0.03	0.05	0.05
Recursos Hídricos	0.067926	0.08%		0.05	0.05	0.05
Soja	6.34932	7.68%	Cultivated Crops	0.02	0.05	0.05
Arroz	1.046045	1.27%	Cultivated Crops	0.02	0.05	0.05
Outras Lavouras Temporárias	2.828395	3.42%	Cultivated Crops	0.02	0.05	0.05

Por fim, vale mencionar que nas condições de contorno utilizou-se o passo de tempo de 12 minutos para apresentação dos resultados e o cálculo do intervalo computacional foi de 20 segundos. Já o critério de estabilidade utilizado foi de 0,7 (variando de 0,6 a 1, sendo que quanto mais próximo de 0,6 mais estável).

7.5. Resultados

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas para os pontos de avaliação e em diferentes tempos de retorno. Vale ressaltar que, além dos resultados apresentados abaixo, também são apresentadas as manchas de inundação em forma de anexo no presente relatório.

7.5.1 Resultados simulação curso hídrico da cidade

A simulação das manchas de inundações para diferentes tempos de retorno considerando somente o curso hídrico da cidade.

Conforme verificado em pesquisas nos meios de comunicação, as águas do arroio extravasam com certa facilidade para a planície de inundação. Percebe-se que, com as vazões com tempo de retorno de 25 anos, tem-se lâmina de água com espessura variada no centro da cidade. É possível conferir alguns centímetros em determinados locais, até espessura superior a 2 metros nas margens do arorio. A mancha de inundação para o tempo de retorno de 50 anos ampliou a área inundada da cidade. As manchas de inundação para os tempos de retorno de 75 e 200 anos ampliam ainda mais a área inundada na cidade. Percebe-se que, assim como no TR de 50 anos, ocorre a ampliação.

7.5.2 Resultados da Simulação dos Arroios

A simulação das manchas de inundações para diferentes tempos de retorno considerando os Arrios Moinho e Trombudo.

A exemplo do que aconteceu com as manchas de inundação, agora na simulação completa também ocorre aumento gradativo da área ocupada pelas águas. Na área urbana, a mancha de inundação praticamente repete o que aconteceu com o cenário das águas da cidade. Percebe-se ampliação da área inundável, bem como avanço gradativo das margens conforme aumenta o volume de água com o TR.

A mancha de inundação para o TR de 25 anos é de 55,608 hectares, para o TR de 50 anos é de 62,96 hectares, para o TR de 75 anos a área é de 67,29 hectares e para o TR de 200 anos a área total ocupada pela mancha de inundação é de 78,186 hectares.

7.6. Discussões

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a alta vulnerabilidade frente aos eventos de precipitação intensa e à elevação dos níveis.

Conforme relato, as águas frequentemente extravasam suas margens, ocasionando alagamentos e inundações recorrentes. Essa condição foi confirmada pelas simulações hidrodinâmicas, que demonstraram a capacidade para o escoamento das vazões de pico associadas a eventos intensos. O problema é agravado pela influência, cujo nível elevado provoca o represamento das águas do afluente principal. Em virtude do menor tempo de concentração e, consequentemente, do adiantamento do pico de vazão, o extravasamento tende a ocorrer antes do escoamento das cheias, intensificando os alagamentos.

A análise hidrológica indicou que, mesmo para tempos de retorno relativamente baixos, as vazões de pico são elevadas, condizentes com bacias de resposta rápida e baixa capacidade de infiltração. Esse comportamento está relacionado ao formato aproximadamente circular da bacia, ao tempo de concentração reduzido e ao predomínio de usos do solo que favorecem o escoamento superficial — como áreas agrícolas, pastagens e zonas urbanizadas.

As simulações hidrodinâmicas bidimensionais (2D), realizadas no software HEC-RAS, confirmam a limitação hidráulica da galeria existente, evidenciando extravasamentos frequentes da calha principal e a formação de extensas manchas de inundação na área central. Tais eventos ocorrem a partir de precipitações com baixo tempo de retorno, sendo plenamente comprovados a partir de 25 anos e com ampliação significativa nos cenários de 50, 75 e 200 anos. A topografia suavemente ondulada e o efeito de barramento favorecem o represamento e o acúmulo das águas, intensificando os impactos hidrológicos.

Essas condições refletem não apenas as limitações da infraestrutura hidráulica existente, mas também a ausência de um sistema integrado e de dispositivos de retenção e amortecimento a montante. Além das deficiências estruturais, destaca-se o agravamento das precipitações intensas decorrente das mudanças climáticas, o que tende a aumentar a frequência, duração e magnitude dos eventos de inundação.

A modelagem hidrológica e hidráulica, conduzida com base em metodologias amplamente reconhecidas — SCS-CN e HEC-RAS 2D —, apresentou boa coerência entre os resultados obtidos, demonstrando a robustez e consistência do processo de cálculo. A análise integrada das manchas de inundação permitiu identificar zonas críticas de extravasamento,

subsidiando o planejamento de intervenções estruturais, como a implantação de bacias de retenção a montante da área urbana, com o objetivo de atenuar os picos de vazão e reduzir a pressão sobre a galeria existente.

Adicionalmente, ressalta-se a importância da adoção de medidas não estruturantes, entre as quais destacam-se: a atualização do zoneamento urbano com incorporação das faixas de inundação; o estímulo à infiltração e retenção de águas pluviais em nível de lote; e a implementação de práticas de manejo sustentável do solo e da cobertura vegetal. A combinação de intervenções estruturais e medidas de engenharia natural pode representar uma estratégia eficaz para reduzir a vulnerabilidade hidrológica e aumentar a resiliência do município frente aos impactos das mudanças climáticas.

7.7. Medida Mitigatória

A ocorrência recorrente de inundações causada principalmente pelo rápido escoamento das águas, evidencia a necessidade de adoção de estratégias integradas de gestão das águas pluviais, capazes de reduzir os riscos e aumentar a resiliência urbana frente aos eventos hidrológicos extremos.

Essas estratégias podem ser agrupadas em medidas não estruturantes e medidas estruturantes, que se complementam no enfrentamento dos problemas de drenagem e inundações.

As medidas não estruturantes envolvem ações de gestão, planejamento e educação ambiental, que visam prevenir e reduzir a exposição da população aos riscos, bem como aumentar a capacidade de resposta do município.

As medidas estruturantes envolvem intervenções físicas e obras de engenharia destinadas a modificar as condições de escoamento e armazenamento das águas.

Além do mais, recomenda-se a adoção de medida estruturante com a instalação de bacia de retenção.

A bacia de retenção é uma estrutura hidráulica projetada para armazenar e reter permanentemente um volume de água, funcionando como um pequeno reservatório. Além do volume permanente, possui capacidade adicional para acumular temporariamente o excedente proveniente de chuvas intensas, liberando-o gradualmente após o evento.

Essa característica permite o amortecimento de picos de vazão, reduzindo o risco de inundações.

8. CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu compreender de forma integrada o comportamento hidrológico e hidráulico e de seu principal afluente, evidenciando as principais causas e dinâmicas associadas às inundações recorrentes que afetam a cidade.

A análise das precipitações extremas, com base em duas equações intensidade–duração– frequência (I-D-F) representativas da região, demonstrou que os eventos pluviométricos de curta duração e alta intensidade têm potencial para gerar vazões de pico expressivas, mesmo para tempos de retorno reduzidos. Os resultados obtidos pelos métodos SCS-CN para a bacia maior, I- Pai-Wu e Racional para a bacia menor da adução, apresentaram coerência entre si, confirmando a robustez das estimativas e a adequação das metodologias adotadas para bacias com área inferior a 200 km².

A modelagem hidrodinâmica 2D, desenvolvida no software HEC-RAS (versão 6.4.1), confirmou as limitações hidráulicas, cuja capacidade de escoamento é insuficiente para conduzir as vazões associadas a chuvas com tempo de retorno superior a 10 anos. As simulações indicaram extravasamentos frequentes da calha, formação de manchas de inundação extensas e aumento significativo das lâminas d'água em cenários de maior recorrência.

Cabe destacar que o presente estudo apresenta limitações inerentes ao processo de modelagem hidrológica e hidrodinâmica, principalmente em função da ausência de séries históricas de vazão e nível d'água que possibilitassem a calibração e validação direta dos resultados. Os parâmetros hidrológicos foram definidos a partir de valores de literatura e do uso e cobertura do solo locais, podendo pequenas variações influenciar as estimativas de vazão de pico. No componente hidráulico, embora tenha sido realizada a compatibilização altimétrica entre levantamentos aerofotogramétricos, topobatimétricos e o MDT, discrepâncias locais de resolução e simplificações nas condições de contorno e rugosidade pode introduzir incertezas localizadas, típicas de modelagens em escala municipal. Ainda assim, as metodologias aplicadas — reconhecidas pelo DNIT (2005), USACE (2016) e ABRH (TUCCI, 2012) — são adequadas à escala do estudo e fornecem

resultados consistentes e confiáveis para fins de planejamento e dimensionamento preliminar.

Recomendando-se, para estudos futuros, o aperfeiçoamento das calibrações a partir de dados hidrometeorológicos locais observados.

O estudo também demonstrou que a sincronia desfavorável entre os picos de vazão intensifica o represamento na foz, agravando o risco de inundações e alagamentos. A topografia suavemente ondulada e o efeito de barramento natural e antrópico contribuem para o acúmulo de águas na planície de inundação, aumentando a severidade dos impactos hidrológicos.

A integração das informações hidrológicas, hidráulicas e geométricas permitiu identificar as áreas críticas de extravasamento e subsidiar o planejamento de intervenções estruturais e não estruturais para mitigação dos impactos. Dentre as soluções estruturais propostas, destaca-se a implantação de uma bacia de retenção, destinada ao amortecimento dos picos de vazão.

Complementarmente, recomenda-se a adoção de medidas não estruturantes, incluindo:

- a revisão do zoneamento urbano, incorporando as faixas de inundação mapeadas;
- a promoção da infiltração e retenção de águas pluviais em nível de lote;
- e o manejo sustentável do solo e da cobertura vegetal nas áreas de contribuição.

A conjugação de intervenções estruturais, práticas de engenharia natural e instrumentos de planejamento urbano representa a abordagem mais eficaz para reduzir a vulnerabilidade hidrológica e aumentar a resiliência frente aos eventos climáticos extremos.

Por fim, o estudo reforça que a implantação das medidas propostas — em especial a bacia de retenção e o fortalecimento do sistema de drenagem — deve ser acompanhada de monitoramento hidrológico contínuo e de uma gestão adaptativa, considerando os cenários futuros de precipitação e as projeções de intensificação de eventos extremos associadas às mudanças climáticas.

9. PARECER CONCLUSIVO SIMPLIFICADO

Síntese dos resultados:

- As análises hidrológicas e hidrodinâmicas apontam alta suscetibilidade a inundações na área.
- As simulações bidimensionais (HEC-RAS 2D) evidenciaram a insuficiência hidráulica incapaz de conduzir vazões de pico de eventos com tempo de retorno ≥ 10 anos.
- As manchas de inundação simuladas confirmam o impacto direto sobre as áreas adjacentes, com ampliação significativa nos eventos de maior recorrência;
- As metodologias e ferramentas aplicadas (HEC-RAS 2D, SCS-CN, I-Pai-Wu) são referenciadas por órgãos técnicos reconhecidos (DNIT, 2005; USACE, 2016; TUCCI, 2012) e garantem consistência e confiabilidade aos resultados.
- Recomenda-se o monitoramento hidrometeorológico contínuo e a revisão periódica do modelo, com base em dados observados, para aprimorar as calibrações e reduzir incertezas. Ainda, diante dos resultados, opina-se favoravelmente à continuidade dos estudos e à implantação das medidas propostas, visando reduzir a vulnerabilidade hidrológica.
- Recomenda-se a implantação de medidas não estruturantes a curto, médio e longo prazo, com a atualização ou criação de um zoneamento urbano, incorporando as faixas de inundação mapeadas e evitando a ocupação destas áreas; incentivar soluções de infiltração e retenção em nível de lote e; implementar manejo sustentável do solo e da cobertura vegetal nas áreas de contribuição.

10. ASSINATURA DO RESPONSÁVEL TÉCNICO

Consta o presente Laudo Técnico Hidrológico e hidrodinâmico, visando aumentar a resiliência do Município de Dona Francisca, frente as mudanças climáticas, contendo 33 páginas, e assinado digitalmente.

gov.br Documento assinado digitalmente
ALAN MINUSSI PASINI
Data: 20/07/2026 23:04:29-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Alan Minussi Pasini
Eng. Civil CREA/RS 194591