

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LETÍCIA GIESE DE ANDRADE CRUZ

AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DAS MEDIDAS DE URBANIZAÇÃO E DRENAGEM
IMPLANTADAS EM UM ASSENTAMENTO URBANO PRECÁRIO MEDIANTE
MODELAGEM HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA: ESTUDO DE CASO DO BOLSÃO
AUDI-UNIÃO EM CURITIBA-PR

CURITIBA

2022

LETÍCIA GIESE DE ANDRADE CRUZ

AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DAS MEDIDAS DE URBANIZAÇÃO E DRENAGEM
IMPLANTADAS EM UM ASSENTAMENTO URBANO PRECÁRIO MEDIANTE
MODELAGEM HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA: ESTUDO DE CASO DO BOLSÃO
AUDI-UNIÃO EM CURITIBA-PR

Documento de defesa apresentado ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Oliveira de Andrade

CURITIBA

2022

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C957a

Cruz, Letícia Giese de Andrade

Avaliação da eficácia das medidas de urbanização e drenagem implantadas em um assentamento urbano precário mediante modelagem hidrológica-hidráulica: estudo de caso do Bolsão Audi-União em Curitiba-PR [recurso eletrônico] / Letícia Giese de Andrade Cruz. – Curitiba, 2022.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2022.

Orientador: Fernando Oliveira de Andrade .

1. Controle de Inundações. 2. Hidrologia. 3. Urbanização. 4. Drenagem. I. Universidade Federal do Paraná. II. Andrade, Fernando Oliveira de. III. Título.

CDD: 627.408162

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **LETÍCIA GIESE DE ANDRADE CRUZ** intitulada: **Avaliação da eficácia das medidas de urbanização e drenagem implantadas em um assentamento urbano precário mediante modelagem hidrológica-hidráulica: estudo de caso do Bolsão Audi-União em Curitiba-PR**, sob orientação do Prof. Dr. FERNANDO OLIVEIRA ANDRADE, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 07 de Março de 2022.

Assinatura Eletrônica

08/03/2022 11:00:37.0

FERNANDO OLIVEIRA ANDRADE
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

10/03/2022 08:32:39.0

MELISSA CRISTINA PEREIRA GRACIOSA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC)

Assinatura Eletrônica

14/03/2022 14:37:19.0

ALEXANDRE KOLODYNKIE GUETTER
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

18/03/2022 10:48:16.0

FLAVIO BENTES FREIRE
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Silvia e Pedro, pelo apoio e amor incondicionais.

Ao meu marido Felipe, pelo amor, paciência e cumplicidade.

Ao Professor Dr. Fernando Oliveira de Andrade, pela orientação, incentivo e acompanhamento durante a realização deste trabalho.

A toda equipe do Laboratório de Urbanismo e Paisagismo da UTFPR, por me apresentarem o Bolsão Audi-União e por aceitarem as minhas contribuições no grupo de pesquisa.

Ao grupo de pesquisa do Observatório das Metrôpoles que proporcionou espaços de aprendizagem e discussões que foram essenciais para este estudo.

À Professora Dra. Melissa Cristina Pereira Graciosa, por compartilhar seus conhecimentos, bem como seu tempo, para me auxiliar no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do PPGERHA, por dividirem os momentos difíceis durante as disciplinas.

Aos professores do PPGERHA que mesmo durante a pandemia conseguiram realizar um trabalho fantástico na continuidade das disciplinas ofertadas.

Ao Governo do Estado do Paraná, por meio da COMEC, SANEPAR e IAT, e à Prefeitura Municipal de Curitiba, por meio da COHAB-CT, pela disponibilização de materiais.

Ao CNPQ pela concessão da bolsa.

RESUMO

O crescimento urbano desordenado observado nas grandes cidades brasileiras nas últimas décadas, com conseqüente ocupação de áreas próximas a rios e canais, expôs uma população já socialmente vulnerável às condições de risco iminente de inundações. Este estudo teve como objetivo estudar uma região da cidade de Curitiba, denominada Bolsão Audi-União, localizada às margens do rio Iguaçu, que passou por este processo e que vem sendo objeto de diversas intervenções governamentais em busca de reduzir as enchentes ocorridas no local, bem como, de reduzir a população que está sujeita ao risco de enchentes. Para avaliar as medidas implementadas foram realizadas modelagens hidrológica e hidráulica utilizando os *softwares* HEC-HMS e HEC-RAS. Foram considerados seis cenários distintos referentes à ocupação urbana e às obras hidráulicas e de contenção de cheias. Na modelagem hidrológica foram utilizados os métodos SCS *Curve Number* para estimar a precipitação efetiva, o método do Hidrograma Unitário de Clark para transformação de chuva-vazão e o método da curva de recessão para determinação do escoamento subterrâneo. Além disso, foi realizada a calibração de alguns parâmetros utilizando a função objetivo *Peak Weighted Root Mean Square Error* (PWRMSE). Foram simulados eventos com TR de 10, 25, 50 e 100 anos para a chuva de projeto. A modelagem hidráulica foi realizada utilizando um modelo 2-D, com malha de células de 50 metros na planície de inundação e 10 metros no rio Iguaçu e no Canal Paralelo. Os resultados demonstraram que as obras realizadas a montante do local de estudo conseguem reduzir a vazão de pico no início do rio Iguaçu em 31,4% e 35,1% da área inundável considerando o TR de 100 anos e o uso e ocupação do solo do ano de 2014. Em relação as medidas implementadas diretamente no Bolsão Audi-União, observou-se que o dique construído consegue conter as inundações ocorridas no local, exceto por uma pequena área que não é protegida pelo dique, tanto no cenário de 2014 como em cenários futuros. As medidas não estruturais realizadas, como a criação da Área de Proteção Ambiental do Iguaçu e a realocação de famílias, também se mostraram efetivas, já que estas regiões sofreriam com inundações até mesmo para eventos com TR de 10 anos. Não foram observadas grandes variações no aumento da vazão de pico no início do rio Iguaçu e no crescimento da área inundada em cenários futuros.

Palavras-chave: inundações; HEC-HMS; HEC-RAS; contenção de cheias.

ABSTRACT

The unplanned urban growth that occurred in recent decades in large Brazilian cities had as one of many effects the occupation of areas close to rivers and channels, exposing a population that is already social vulnerable to conditions of imminent flood risk. This paper aims to study a region of the city of Curitiba, called Bolsão Audi-União, located on the floodplain of the Iguaçu river, which has undergone this process and has been the object of several government interventions in an attempt to reduce the floods that occurred in the area, as well as, to reduce the population that is subject to the risk of floods. To evaluate the implemented measures, hydrological and hydraulic modeling were performed using HEC-HMS and HEC-RAS softwares. Six different scenarios were designed considering different urban occupations and different sets of hydraulic and flood control structures. In the hydrological modeling the SCS Curve Number method was applied to estimate the effective precipitation, the Clark's Unit Hydrogram method was used to represent the rainfall-runoff transformation and the recession method was applied to determine the baseflow. In addition, some parameters were calibrated using the objective function Peak Weighted Root Mean Square Error (PWRMSE). Events with return periods of 10, 25, 50 and 100 years were simulated for the designed rain. The hydraulic modeling was carried out using a 2-D model, with a cell mesh of 50 meters in the floodplain and 10 meters in the Iguaçu river and in the Diversion Channel. The results showed that the implemented structures upstream of Bolsão Audi-União can reduce the peak flow at the beginning of the Iguaçu River by 31.4% and 35.1% of the flood area considering the return period of 100 year and the use and occupation of the soil of the year 2014. Regarding the measures implemented directly in Bolsão Audi-União, it was observed that the built levee is able to contain the floods that occur at the area, except for a small area that is not protected by the levee, for both the scenario of 2014 as for future scenarios. The non-structural measures implemented, such as the creation of the Iguaçu Environmental Protection Area and the relocation of families, also proved to be effective, as these regions would suffer from flooding even for events with return period of 10 years. For future scenarios the increase in peak flow and in the flood areas did not show great variations comparing to the 2014 scenario.

Key-words: flooding; HEC-HMS; HEC-RAS; flood control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	–	Localização do Bolsão Audi-União	20
FIGURA 2	–	Evolução do Bolsão Audi-União	21
FIGURA 3	–	Enchente de 1995 na área do Bolsão Audi-União	22
FIGURA 4	–	Concepção do controle de cheias no rio Iguazu	24
FIGURA 5	–	Etapas do Canal Paralelo	25
FIGURA 6	–	Mancha de inundação após as obras do Canal Paralelo segundo o PDD .	29
FIGURA 7	–	Perfil longitudinal do Rio Iguazu com as envoltórias para os cenários Dirigido e Tendencial para TR de 25 e 50 anos	31
FIGURA 8	–	Hidrogramas da seção próxima a BR-277 no rio Iguazu para os cenários Dirigido e Tendencial para TR de 25 e 50 anos	31
FIGURA 9	–	APA do Iguazu e setores do Bolsão Audi-União	33
FIGURA 10	–	Caracterização do Bolsão Audi-União antes das intervenções	34
FIGURA 11	–	Resumo das intervenções no Bolsão Audi-União	36
FIGURA 12	–	Resumo das medidas estruturais e não estruturais no Bolsão Audi-União e a montante do Bolsão Audi-União	39
FIGURA 13	–	Fluxograma dos componentes do HEC-HMS	42
FIGURA 14	–	Fluxograma Metodológico	50
FIGURA 15	–	Localização da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguazu	51
FIGURA 16	–	Rios da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguazu	52
FIGURA 17	–	Imagem de satélite da área da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguazu do ano de 2021	53
FIGURA 18	–	Localização das estações fluviométricas e pluviométrica na bacia hidro- gráfica do Altíssimo Iguazu	55
FIGURA 19	–	Localização das seções topobatimétricas levantadas em 1995	57
FIGURA 20	–	Topologia atual	59
FIGURA 21	–	Topologia sem os reservatórios (SR)	60
FIGURA 22	–	Topologia sem o Canal Paralelo (SC)	61
FIGURA 23	–	Topologia sem os reservatórios e sem o Canal Paralelo (SR/SC)	62
FIGURA 24	–	Isócronas	68
FIGURA 25	–	Histograma Tempo-Área	68
FIGURA 26	–	Primeira parte do escoamento subterrâneo	71
FIGURA 27	–	Escoamento subterrâneo	71
FIGURA 28	–	Polígonos de Thissen	73
FIGURA 29	–	Representação da ponte no <i>software</i> HEC-RAS	78
FIGURA 30	–	Malha do modelo hidráulico	79
FIGURA 31	–	Classificação do uso e ocupação do solo para 2009 e 2014	82
FIGURA 32	–	Hietograma de TR de 10 anos	86
FIGURA 33	–	Hietograma de TR de 25 anos	86
FIGURA 34	–	Hietograma de TR de 50 anos	87

FIGURA 35	– Hietograma de TR de 100 anos	87
FIGURA 36	– Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica Autódromo	90
FIGURA 37	– Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica Vargem Grande	91
FIGURA 38	– Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica Olaria . . .	92
FIGURA 39	– Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica Ponte PR-415	93
FIGURA 40	– Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica Fazendinha	94
FIGURA 41	– Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica BR-277 . .	95
FIGURA 42	– Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica BR-277 entre 2013 e 2015	96
FIGURA 43	– Hidrogramas de projeto no rio Iguaçu para TR de 100 anos	98
FIGURA 44	– Hidrogramas de projeto no rio Iguaçu para TR de 50 anos	98
FIGURA 45	– Hidrogramas de projeto no rio Iguaçu para TR de 25 anos	99
FIGURA 46	– Hidrogramas de projeto no rio Iguaçu para TR de 10 anos	100
FIGURA 47	– Hidrogramas de projeto no Canal Paralelo para TR de 100 anos	100
FIGURA 48	– Hidrogramas de projeto no Canal Paralelo para TR de 50 anos	101
FIGURA 49	– Hidrogramas de projeto no Canal Paralelo para TR de 25 anos	102
FIGURA 50	– Hidrogramas de projeto no Canal Paralelo para TR de 10 anos	102
FIGURA 51	– Mancha de inundação cenário 2014	107
FIGURA 52	– Mancha de inundação cenário 2024	108
FIGURA 53	– Mancha de inundação cenário 2034	109
FIGURA 54	– Mancha de inundação cenário SR	110
FIGURA 55	– Mancha de inundação cenário SC	111
FIGURA 56	– Mancha de inundação cenário SR/SC	112

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	Dados das estações fluviométricas	54
TABELA 2	–	Dados das estações pluviométricas	55
TABELA 3	–	Características dos trechos de rios	63
TABELA 4	–	Características fisiográficas das sub-bacias	64
TABELA 5	–	Reservatório Iraí	64
TABELA 6	–	Reservatório Piraquara I	65
TABELA 7	–	Reservatório Piraquara II	65
TABELA 8	–	Regra hidráulica Canal Paralelo	66
TABELA 9	–	Classificação do coeficiente NSE	74
TABELA 10	–	Resumo dos cenários de estudo	81
TABELA 11	–	Valores de CN atribuídos à região de estudo	82
TABELA 12	–	Valores de CN em 2009 e 2014	83
TABELA 13	–	População estimada e projetada na bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu	84
TABELA 14	–	Estimativa futura do <i>Curve Number</i> e tempos de concentração	84
TABELA 15	–	Precipitação acumulada para as chuvas de projeto	88
TABELA 16	–	Parâmetros calibrados	89
TABELA 17	–	Vazões de pico no rio Iguaçu (m^3/s)	103
TABELA 18	–	Vazões de pico no Canal Paralelo (m^3/s)	103
TABELA 19	–	Vazões de pico na divisão do rio Iraí no Canal Paralelo (m^3/s)	104
TABELA 20	–	Áreas de inundação (km^2)	113
TABELA 21	–	Valores de CN para áreas agrícolas	128
TABELA 22	–	Valores de CN para áreas urbanas	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APA	Áreas de Proteção Ambiental
BHAI	Bacia Hidrográfica do Alto Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba
CADÚnico	Cadastro Único para Programas Sociais do Governo Federal
CIC	Cidade Industrial de Curitiba
CN	<i>Curve Number</i>
COHAB-CT	Companhia de Habitação Popular de Curitiba
COMEC	Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba
DHI	<i>Danish Hydraulic Institute</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
HTA	Histograma Tempo-Área
HEC	<i>Hydrologic Engineering Center</i>
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center – River Analysis System</i>
HU	Hidrograma Unitário
IAT	Instituto Água e Terra
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPPUC	Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba
NSE	<i>Nash–Sutcliffe</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MUF	Moradias União Ferroviária
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PDD	Plano Diretor de Drenagem do Alto Iguaçu
PDI	Plano de Desenvolvimento Integrado para a Região Metropolitana de Curitiba
PMC	Prefeitura Municipal de Curitiba

PRA-01	Parque e Controle de Cheias do Alto Iguaçu
PROSAM	Programa de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana de Curitiba
PTS	Plano de Trabalho Social
PWRMSE	<i>Peak Weighted Root Mean Square Error</i>
RMC	Região Metropolitana de Curitiba
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SEHIS	Setor Especial de Habitação de Interesse Social
SEMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SUDERHSA	Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
TR	Tempo de Recorrência
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
USACE	<i>US Army Corps of Engineers</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (m^2)
CN	<i>Curve Number</i>
C_a	Coefficiente de propagação
C_b	Coefficiente de propagação
c_f	Coefficiente de fricção de fundo ($m^{1/2}/s$)
F_r	Número de Froude
f	Parâmetro de Corioli (s^{-1})
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
H	Cota de elevação superficial da lâmina da água (m)
h	Profundidade da lâmina da água (m)
i	Intensidade (mm/h)
I_a	Abstração inicial (mm)
I_t	Vazão média de entrada no tempo t (m^3/s)
k	Constante de recessão
L	Comprimento do rio principal (km)
N	Número de dados observados
n	Coefficiente de rugosidade de Manning ($s/m^{1/3}$)
O_t	Vazão média de saída no tempo t (m^3/s)
P_r	Precipitação total (mm)
P_e	Precipitação efetiva (mm)
Q	Vazão (m^3/s)
q	Vazão de contribuição lateral por unidade de área ($m^3/s \cdot m^2$)
R	Coefficiente de armazenamento (<i>horas</i>)
R_h	Raio hidráulico (m)
S	Armazenamento no solo (mm)
S_f	Inclinação da linha de energia (m/m)
S_t	Volume médio armazenado no reservatório no tempo t (m^3)

t	Tempo (s)
TR	Tempo de recorrência ($anos$)
t_c	Tempo de concentração ($horas$)
t_{ch}	Tempo de duração da chuva ($minutos$)
u	Componente do vetor velocidade na direção x (m/s)
v	Componente do vetor velocidade na direção y (m/s)
V	Velocidade (m/s)
Y	Declividade média (m/m)
y_h	Profundidade hidráulica (m)
γ	Constante de decaimento da vazão
Ω	Volume ocupado pelo fluido (m^3)
ν_t	Viscosidade turbulenta (m^2/s)
u_*	Velocidade cisalhante (m/s)
ω	Velocidade angular sideral (s^{-1})
φ	Latitude

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS GERAIS	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	ESTUDOS REALIZADOS NA REGIÃO DO BOLSÃO AUDI-UNIÃO	19
2.1.1	Canal Paralelo	22
2.1.2	Plano Diretor de Drenagem do Alto Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba	26
2.1.2.1	Medidas não estruturais	26
2.1.2.2	Medidas estruturais	27
2.1.2.3	Linhas de inundação ao longo do rio Iguaçu segundo o projeto do Canal Paralelo	28
2.1.2.4	Estudos hidrológicos e hidráulicos do PDD	29
2.1.3	Projetos e obras executados pela Prefeitura Municipal de Curitiba no Bolsão Audi-União	32
2.1.4	Medidas estruturais e não estruturais no Bolsão Audi-União	37
2.2	MODELAGEM HIDROLÓGICA	39
2.2.1	Programa computacional HEC-HMS	41
2.2.1.1	Aplicações do programa HEC-HMS	43
2.3	MODELAGEM HIDRÁULICA	44
2.3.1	Escoamento em rios e canais	45
2.3.2	Programa computacional HEC-RAS	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	ÁREA DE ESTUDO	51
3.2	MATERIAIS	54
3.2.1	Dados monitorados da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu	54
3.2.2	Modelo Digital de Elevação e dados topográficos	55
3.3	MÉTODOS	57
3.3.1	Chuva de projeto	57
3.3.2	Modelagem hidrológica	58
3.3.2.1	Topologia da rede de drenagem	58
3.3.2.2	Características das obras hidráulicas	64
3.3.2.3	Método SCS <i>Curve Number</i>	66
3.3.2.4	Hidrograma Unitário de Clark	67
3.3.2.5	Tempo de concentração	70
3.3.2.6	Escoamento subterrâneo	70
3.3.2.7	Calibração dos parâmetros	72
3.3.3	Modelagem hidráulica	74

3.3.3.1	Formulação matemática	75
3.3.3.2	Terreno e singularidade	77
3.3.3.3	Condições de contorno	79
3.4	CENÁRIOS DE ESTUDO	80
3.4.1	Determinação do <i>Curve Number</i>	81
4	RESULTADOS	85
4.1	CHUVA DE PROJETO	85
4.2	CALIBRAÇÃO	88
4.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA	97
4.4	MODELAGEM HIDRÁULICA	106
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	116
	REFERÊNCIAS	119
ANEXO A	VALORES DE CN PARA DIFERENTES TIPOS DE USO DO SOLO	128

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional no Brasil ocorreu de forma expressiva a partir dos anos de 1950 até os anos 2000, quando a população passou de aproximadamente 51,9 milhões de habitantes para 169,6 milhões de habitantes (IBGE, 1950; IBGE, 2000). Este crescimento ocorreu, muitas vezes, sem um planejamento urbano adequado e em um cenário de grande desigualdade social. Como consequência, houve também o aumento do processo de favelização ou, como definido pelo IBGE (1953), dos “aglomerados subnormais”, principalmente nas grandes cidades. Em 1980 cerca de 1,9% dos domicílios brasileiros eram caracterizados como subnormais, enquanto nos anos 1990 esse valor passou para 2,9% e em 2000 atingiu 3,7% (MATION *et al.*, 2014). Desta forma, a população vivendo em aglomerados subnormais passou de aproximadamente 2,25 milhões em 1980 para 6,5 milhões de pessoas nos anos 2000 (MATION *et al.*, 2014).

A cidade de Curitiba, bem como a Região Metropolitana de Curitiba (RMC), também passou por intenso crescimento nesta época. Entretanto, este processo teve algumas singularidades na cidade, dado que houve um grande planejamento urbano nas décadas de 1970 e 1980, em destaque para os planos Wilhelm-IPPUC, PDI I e II (Plano de Desenvolvimento Integrado para a Região Metropolitana de Curitiba) (RITTER, 2011). Porém, os planos existentes em Curitiba acabaram por excluir uma população mais desfavorecida que passou a ocupar a periferia da cidade ou os municípios da RMC (TEIXEIRA, 2019; FIRKOWSKI, 2001).

Dois momentos de crescimento podem ser destacados em Curitiba, o primeiro ocorreu nos anos 1970 quando foi criada a Cidade Industrial de Curitiba (CIC) e muitos trabalhadores rurais foram atraídos em busca de novas oportunidades (RITTER, 2011). Um segundo momento ocorreu na década 1990, com a reabertura comercial da economia brasileira, em que muitas empresas automobilísticas passaram a se instalar na RMC (GARCIAS, 2013). Foi na década de 1990 que ocorreu um surto de crescimento, principalmente na região leste de Curitiba e foi quando as ocupações irregulares também aumentaram (LIMA, 2000; GARCIAS, 2013).

As cidades de Pinhais, Piraquara e São José dos Pinhais localizadas na franja leste de Curitiba tiveram um aumento médio de 36,6% nas ocupações irregulares entre os anos de 1992 e 1997, quando a população nestas ocupações passou de 9.303 para 38.221 habitantes nas três cidades (LIMA, 2000). Assim, dado o crescimento acelerado das ocupações irregulares nesta área da RMC, muitas famílias acabaram ocupando regiões menos adequadas a receber moradias como, por exemplo, as áreas de mananciais.

Os bairros da parte leste de Curitiba também apresentaram um aumento de ocupações neste período. Uma das ocupações que surgiram nessa época foi a do chamado Bolsão Audi-União que fica ao lado do rio Iguaçu, entre a BR-277 e a Avenida Comendador Franco. Esta ocupação iniciou-se em meados da década de 1990 e teve uma expansão muito rápida principalmente em direção ao rio Iguaçu (TEIXEIRA, 2019; HAYAKAWA; ULTRAMARI, 2008).

Esta região de Curitiba, assim como as cidades vizinhas localizadas à leste, fazem parte da bacia hidrográfica do Alto Iguaçu, onde se encontra o principal sistema de abastecimento de água de Curitiba e de outras onze cidades da RMC (PRESTES, 2018). É nesta bacia que se

encontram o rio Atuba e o rio Iraí que em sua confluência formam o rio Iguaçu. O rio Iguaçu contorna a cidade de Curitiba, separando Curitiba de São José dos Pinhais e de Fazenda Rio Grande.

Em eventos de chuvas intensas esta região sofre com inundações, principalmente ao longo da várzea do rio Iguaçu, devido à baixa declividade da planície da cabeceira do Iguaçu e às ocupações próximas ao rio Iguaçu (LIMA, 2000; ZANELLA, 2014). Alguns dos principais episódios pluviais críticos ocorreram na década de 1990. Em janeiro de 1995, por exemplo, em apenas seis dias choveu cerca de 361,8 mm e mais de 15.000 pessoas ficaram desabrigadas. Estima-se que este evento causou prejuízos à época de 43,7 milhões de dólares (LIMA, 2000; ZANELLA, 2014).

Em vista do desastre ocorrido em 1995, o Governo do Estado do Paraná decretou estado de emergência na RMC e a Prefeitura de Curitiba decretou estado de calamidade pública (ZANELLA, 2014). Foi decidido então pela realização de obras emergenciais de prevenção de cheias na região. As obras envolveram a criação de um parque com 20 km^2 com bacias de acumulação e a execução de um Canal Paralelo ao rio Iguaçu que exerce uma barreira física às ocupações e aumenta a capacidade de vazão do rio Iguaçu (TUCCI, 2002).

Na época da construção do Canal Paralelo foram realizados estudos hidrológicos e hidrodinâmicos por Tucci (1996) para avaliar a alternativa escolhida para o Canal Paralelo para dois cenários, o cenário existente em 1996 e um cenário de médio prazo que correspondia ao ano de 2005. Em dezembro de 2002 a SUDERHSA (2002a) realizou o Plano Diretor de Drenagem do Alto Iguaçu (PDD), neste plano foram propostas outras medidas de controle de cheias e foram feitas simulações hidrológicas e hidrodinâmicas para a urbanização projetada do ano de 2020 com e sem a execução das medidas propostas.

Após estes dois estudos, realizados em 1996 e 2002, há poucos registros de novos estudos hidrológicos e hidráulicos realizados na área. Entretanto, diversas obras foram realizadas nesta região desde de então, inclusive obras do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) para construção de novas moradias nas áreas de ocupações irregulares, além do projeto de construção de dois diques de 1,5 metros de altura e de outro canal, na margem direita do rio Iguaçu, que conecta-se a uma lagoa de acumulação, diminuindo a contribuição de escoamento lateral no rio Iguaçu (PRESTES, 2018; TEIXEIRA, 2019).

Considerando este contexto, o presente estudo realizará uma modelagem hidrológica e uma modelagem hidráulica, utilizando os programas computacionais HEC-HMS e HEC-RAS, no trecho do rio Iguaçu compreendido entre a BR-277 e a Avenida Comendador Franco, trecho este que fica localizado no Bolsão Audi-União, que teve boa parte de sua área afetada pela enchente de 1995 e que vem passando por diversas intervenções nos últimos 20 anos. Este trabalho representa também um aprimoramento do estudo apresentado no livro "A dimensão ambiental na urbanização de favelas: olhares críticos a partir da drenagem urbana nos projetos do PAC"(no prelo) em que foram utilizadas diversas simplificações nas modelagens hidrológica e hidráulica. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a efetividade das medidas implementadas, por meio da obtenção de mapas de manchas de inundação, considerando o cenário de uso e ocupação do solo de 2014 e dois cenários futuros em que são previstos aumentos populacionais aproximados de 12% e 20% na bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a eficácia das medidas de urbanização e drenagem realizadas tanto no Bolsão Audi-União, localizado em Curitiba-PR, como a montante dele, mediante elaboração de mapas de manchas de inundação obtidos a partir de modelagem hidráulico-hidrológica, considerando diferentes cenários de uso e ocupação do solo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Propor cenários de estudo da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu considerando as intervenções realizadas e a projeção de crescimento populacional;
- Representar os processos hidrológico-hidráulicos por meio de modelagem hidrodinâmica;
- Avaliar o desempenho das intervenções a partir da análise territorial das manchas de inundação obtidas na modelagem hidrodinâmica.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho se divide em cinco capítulos. O primeiro capítulo consiste nessa introdução em que a região estudada e o contexto político-social em que ela se insere são apresentados, são expostos também os objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo refere-se a revisão bibliográfica que inicialmente apresenta com mais detalhes o Bolsão Audi-União, apresenta os principais estudos e obras realizados na área e, por fim, discorre sobre os temas modelagem hidrológica e hidráulica e suas aplicações.

O terceiro capítulo apresenta a bacia hidrográfica de estudo, os materiais utilizados neste trabalho e, em seguida, são apresentados os métodos utilizados para a obtenção dos resultados. O quarto capítulo refere-se a apresentação e discussão dos resultados obtidos nas modelagens hidrológica e hidráulica.

No último capítulo são tecidas as considerações finais e recomendações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

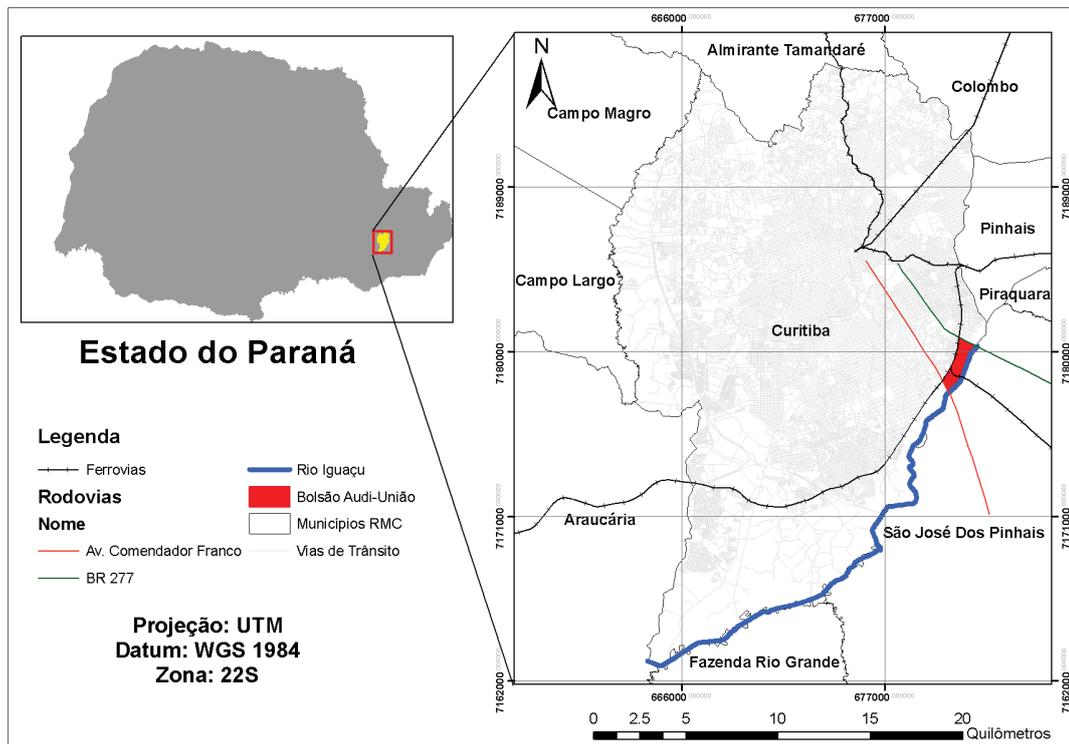
Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura referente ao desenvolvimento deste trabalho. Os seguintes temas serão abordados: a) Estudos realizados na região do Bolsão Audi-União, b) Aspectos relevantes de modelagem hidrológica e c) Aspectos relevantes de modelagem hidráulica.

2.1 ESTUDOS REALIZADOS NA REGIÃO DO BOLSÃO AUDI-UNIÃO

Como descrito no Capítulo 1, a região leste da cidade de Curitiba passou por um intenso processo de crescimento desordenado a partir da década de 1990, devido a diversos fatores, entre eles a migração de uma população sem recursos em busca de novas oportunidades devido à instalação de novas indústrias nesta região e ao parcelamento do solo de forma segregadora (HAYAKAWA; ULTRAMARI, 2008; GARCIAS, 2013). Neste trabalho é feito um recorte em uma das ocupações que surgiram nesta época, localizada na região chamada Bolsão Audi-União, que sofreu com diversos episódios de inundações e que vem passando por várias intervenções nas últimas duas décadas.

O Bolsão Audi-União fica localizado no limite municipal de Curitiba com São José dos Pinhais, no bairro Uberaba, em uma área de 2 km^2 , sendo delimitado pelo rio Iguazu a leste, pela linha férrea a oeste, pela BR-277 a norte e pela Avenida Comendador Franco a sul. A localização do Bolsão Audi-União na cidade de Curitiba pode ser observada na Figura 1.

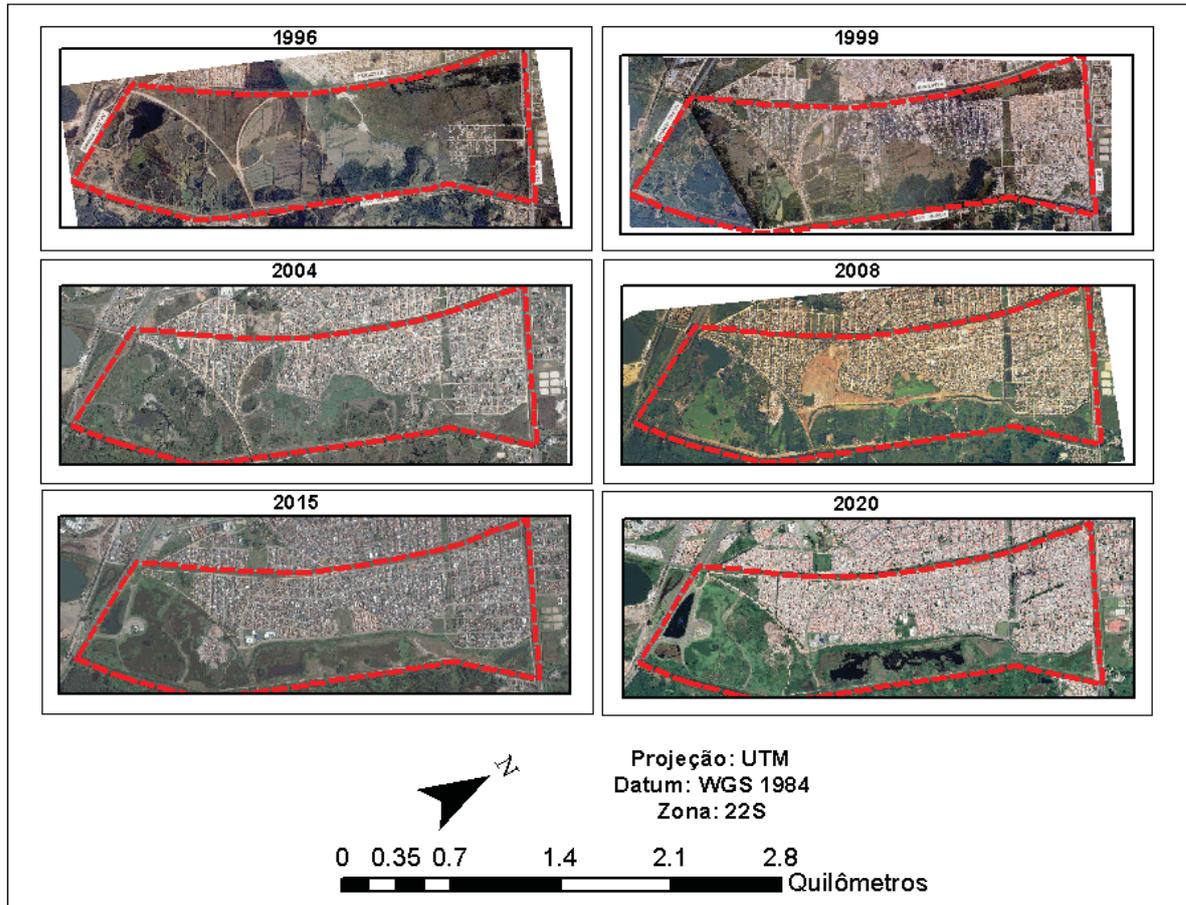
FIGURA 1 – Localização do Bolsão Audi-União



FONTE: Autora (2022)

O Bolsão teve seu surgimento em meados dos anos 1990 com as primeiras ocupações sendo formadas próximas a BR-277, em 2005 era considerado pela Prefeitura Municipal de Curitiba a maior e mais complexa área irregular da cidade e em 2014 já contava com mais de 3,1 mil casas, 12 mil habitantes e sete vilas (TEIXEIRA, 2019; SCHÄFER; GOMIDE, 2014; CURITIBA, 2013; CURITIBA, 2005). A evolução da ocupação do Bolsão pode ser observada na Figura 2 que mostra a rápida expansão das moradias ao longo das últimas décadas.

FIGURA 2 – Evolução do Bolsão Audi-União



FONTE: Adaptado de COHAB-CT (2017c) e do *Google Earth Pro*.
 LEGENDA: A linha vermelha delimita a área do Bolsão Audi-União.

A área onde se localiza o Bolsão é uma região em que dos anos de 1960 até os anos 1990 existiam muitas cavas utilizadas para a mineração de areia. Assim, desde os anos de 1960 a área já era desmatada e tal processo só se intensificou com o processo de urbanização (TEIXEIRA, 2019; CURITIBA, 2013). Além disso, a região tem uma topografia plana e, dada a sua proximidade ao rio Iguaçu, é muito suscetível à inundações. Hayakawa e Ultramarini (2008) fizeram um levantamento de registros de eventos em que ocorreram inundações na cidade de Curitiba de 1980 a 2007, ao total foram observados 16 eventos, em que seis desses eventos ocorreram no bairro Uberaba, bairro onde se encontra o Bolsão.

Destaca-se aqui os eventos ocorridos em 1995 e em 2001. No evento ocorrido em 1995 foi registrado mais de 350 mm de chuva em menos de uma semana, a área atual do Bolsão foi quase toda atingida como é possível observar na Figura 3, e algumas casas que já existiam na época sofreram prejuízos, entretanto, nesta época a ocupação do Bolsão estava apenas se iniciando (TEIXEIRA, 2019; ZANELLA, 2014). Mesmo assim, ao menos 615 pessoas ficaram desabrigadas em Curitiba e mais de 15.000 pessoas ficaram desabrigadas em cidades da RMC (HAYAKAWA; ULTRAMARI, 2008; ZANELLA, 2014). Este evento motivou a construção do Canal Extravasador paralelo ao rio Iguaçu que será tratado com mais detalhes no próximo subitem.

FIGURA 3 – Enchente de 1995 na área do Bolsão Audi-União



FONTE: COHAB-CT (2017c)

No evento ocorrido em 2001 houve o registro de 71,8 mm de chuva em um único dia. Neste caso, segundo Hayakawa e Ultramarini (2008), algumas vilas do Bolsão foram atingidas, 1.748 pessoas ficaram desabrigadas em Curitiba e foram registrados casos de leptospirose em alguns moradores do Bolsão Audi-União. É interessante notar que neste ano o Canal Paralelo já havia sido construído, no entanto, houve o transbordamento do rio Iguaçu nesta região. O fato de algumas vilas terem sido atingidas pode ser explicado principalmente pelas ocupações do Bolsão terem aumentado depois da construção do Canal Paralelo, como apresentado na Figura 2, já que a população passou a se sentir mais segura em morar próximo ao rio Iguaçu (HAYAKAWA; ULTRAMARI, 2008; TEIXEIRA, 2019). Assim, a partir do ano 2000 novas obras foram realizadas pela Prefeitura Municipal de Curitiba (PMC) que buscaram amenizar as inundações que ocorriam na região.

Nos subitens a seguir serão apresentados alguns estudos e obras realizados que abrangem a área do Bolsão e que buscaram reduzir as enchentes ocorridas no local. Inicialmente serão apresentados os estudos realizados para o projeto do Canal Paralelo, em seguida serão apresentados alguns levantamentos, propostas e resultados do Plano Diretor de Drenagem do Alto Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba, então serão apresentados os projetos e obras realizados pela PMC e, por fim, um resumo das principais medidas estruturais e não estruturais realizadas no Bolsão Audi-União e a montante dele será apresentado.

2.1.1 Canal Paralelo

Episódios de inundações na bacia hidrográfica do Alto Iguaçu na RMC (BHAI) já eram registrados com frequência desde a década de 1980, entretanto, o evento ocorrido em 1995 foi determinante na decisão de uma rápida execução do Canal Paralelo. Os planos de realização do Canal Paralelo já estavam presentes no Programa de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana de Curitiba (PROSAM), no entanto, até então os recursos para a obra eram escassos. Após a enchente de 1995, o Governo do Estado do Paraná obteve os recursos por meio do Banco Mundial e rapidamente montou uma equipe multidisciplinar para que de fato o canal pudesse ser executado. Desta forma, em um período de apenas seis meses foram feitos os levantamentos dos lotes existentes, foram realizadas desapropriações, o projeto executivo do canal foi apresentado à Assembleia Legislativa e foram fornecidos os recursos para a realização

de todas as desapropriações e obras de arte previstas (HAYAKAWA; ULTRAMARI, 2008).

Na época, Tucci (1996) realizou estudos hidrológicos e hidrodinâmicos do rio Iguaçu na RMC que foram utilizados como base para o planejamento do projeto do Parque de Controle de Cheias do Alto Iguaçu (PRA-01) que fazia parte do PROSAM e que tinha como objetivo desenvolver o controle de cheias da RMC. Segundo Tucci (1996), a precipitação ocorrida em janeiro de 1995 teve duração de sete dias, com tempo de recorrência (TR) de 100 anos e, ao considerar o registro de precipitações com duração de sete dias desde 1889 na estação pluviométrica Prado Velho, foi a maior precipitação já registrada com esta duração, ficando duas vezes acima da média histórica. Além disso, Tucci (1996) observou que, em geral, as inundações ocorridas no rio Iguaçu se davam devido a precipitações com duração de em média sete dias.

As principais causas das enchentes na RMC na época foram elencadas por Tucci (1996). Entre elas estavam:

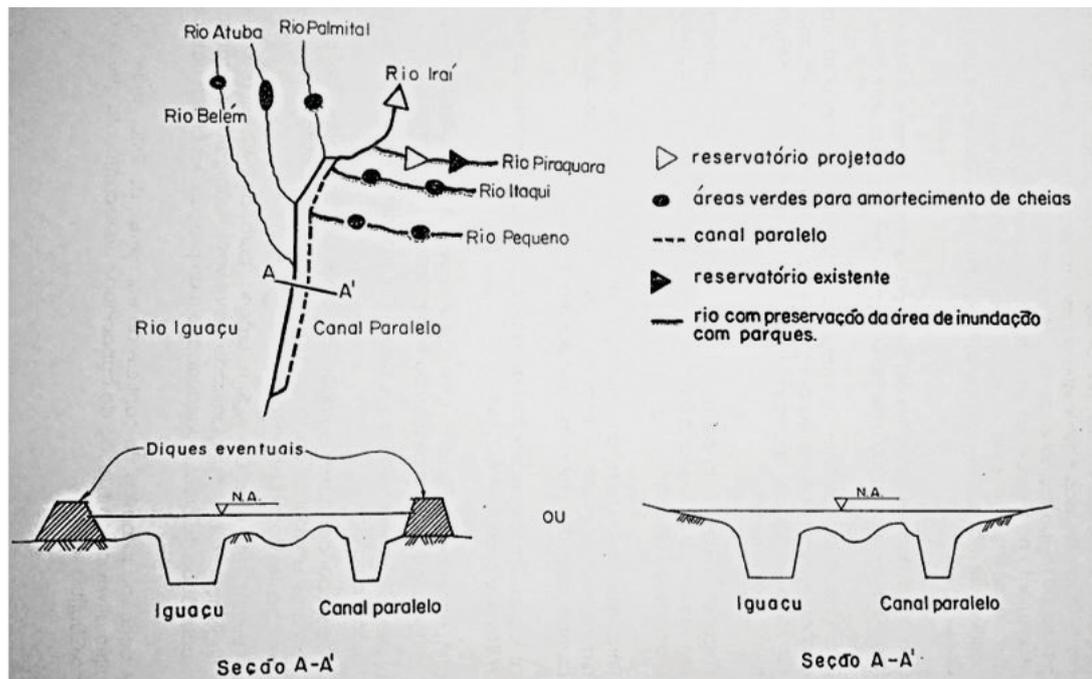
- Baixa capacidade da seção menor do rio Iguaçu, de aproximadamente $55 \text{ m}^3/\text{s}$ no início do rio Iguaçu que correspondia a um TR de 2 anos;
- Leito maior do rio Iguaçu sendo ocupado pela população;
- Aumento das vazões de pico por causa da urbanização;
- Obstruções como pontes e aterros que reduziam a seção do rio.

As alternativas de controle apresentadas por Tucci (1996) buscavam minimizar os efeitos das enchentes, já que as enchentes não podem ser totalmente controladas, e deveriam ser aplicadas em conjunto para que efetivamente a ocorrência de inundações diminuísse. Desta forma, Tucci (1996) deixa claro a importância de se estabelecer Planos Diretores e Códigos de Obras nos municípios da RMC para que fossem instituídas regras que proibissem a população de ocupar áreas com risco de inundação. Foi proposto também que houvesse o confinamento do escoamento por diques, transferindo assim o volume de água do leito maior para o leito menor, entretanto, esta proposta não deveria ser feita de forma isolada, já que ela daria confiança a população para ocupar o leito maior e com o aumento populacional as enchentes voltariam a aumentar futuramente, tornando as soluções futuras ainda mais complexas já que não seria possível aumentar as seções transversais do rio.

Em relação ao uso de reservatórios, Tucci (1996) aponta que na época os reservatórios Iraí e Piraquara II ainda não existiam, mas a construção deles já estava prevista. No entanto, Tucci (1996) salienta que as áreas de drenagem a montante destes reservatórios representam apenas 15% da bacia de contribuição no início do rio Iguaçu e que essas áreas eram menos urbanizadas do que outras sub-bacias, assim, o efeito dos reservatórios no amortecimento do escoamento era limitado.

Por fim, Tucci (1996) propõe também a ampliação da capacidade de escoamento do total do sistema pela construção do Canal Paralelo iniciando após a confluência do rio Piraquara com o rio Iraí, passando a receber os rios Pequeno e Itaqui, até então afluentes do rio Iguaçu. A concepção do sistema de controle de cheias proposta por Tucci (1996) está representada na Figura 4 .

FIGURA 4 – Concepção do controle de cheias no rio Iguazu



FONTE: CONSÓRCIO (1997)

Desta forma, a solução proposta por Tucci (1996) para o controle de enchentes da RMC envolveu quatro diretrizes principais:

- Construção de um Canal Paralelo ao rio Iguazu;
- Concepção do Parque do Iguazu ao longo de toda a extensão do Canal Paralelo;
- Implantação de áreas de amortecimento ao longo dos afluentes para evitar o aumento das enchentes com o processo de urbanização;
- Plano Diretor de Drenagem que buscasse evitar a ocupação de áreas inapropriadas e que atendesse a legislação sobre a delimitação de novos loteamentos.

Para realizar a modelagem hidrológica, Tucci (1996) utilizou o modelo IPH II para representar a transformação de precipitação em vazão nas sub-bacias. Já para a representação de escoamento em rios foram utilizados três modelos distintos: o modelo hidrodinâmico foi utilizado em pontos que necessitavam mais precisão, este modelo resolve as equações de Saint Venant através de um esquema numérico implícito de diferenças finitas; o modelo Muskingum-Cunge foi utilizado em trechos que havia poucas informações das características físicas e que não era necessário uma precisão muito grande; o modelo de Pulz foi utilizado para simular o amortecimento em reservatórios.

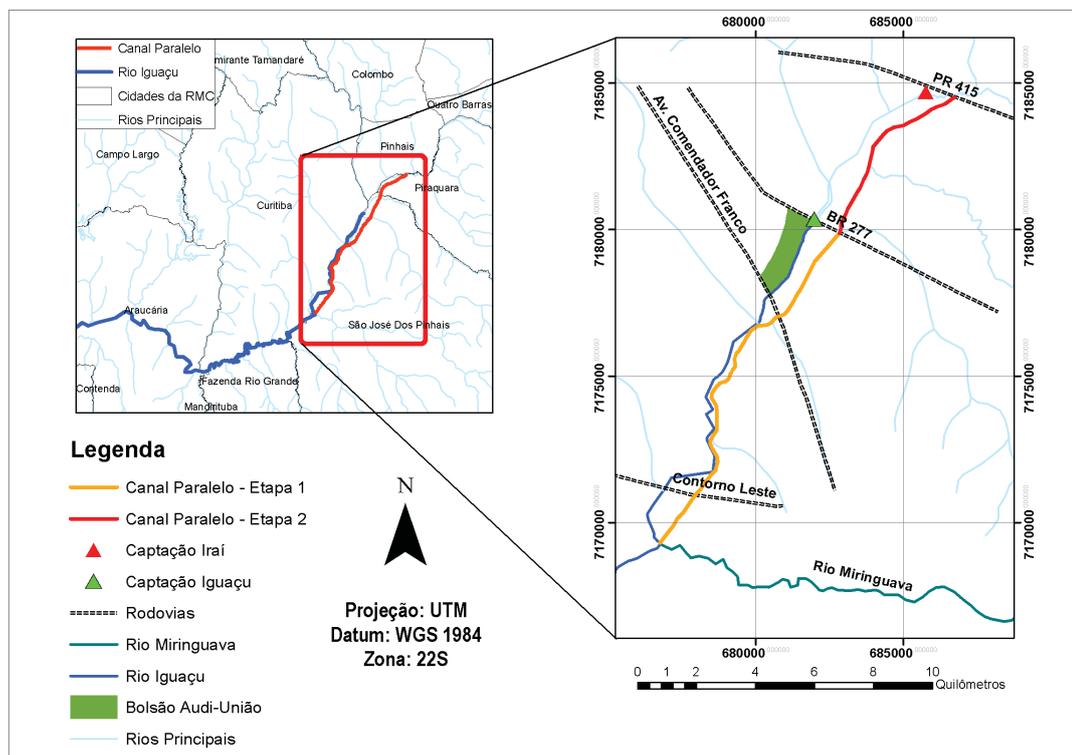
As simulações foram feitas para dois cenários de desenvolvimento da bacia. O primeiro referia-se à ocupação urbana e às barragens já existentes na época. O segundo era um cenário de médio prazo, correspondente ao ano de 2005, em que as barragens de Iraí e Piraquara II já estariam construídas e haveria maior desenvolvimento urbano. As precipitações utilizadas no estudo foram do evento de julho de 1983, do evento de 1995 e uma precipitação de projeto

com duração de sete dias e TR de 50 anos. Os dados de precipitação foram obtidos do posto Prado Velho. Já os dados de vazão foram obtidos de vários postos presentes nas sub-bacias, entretanto, Tucci (1996) aponta uma grande dificuldade em conseguir dados de vazão, já que existiam poucos postos distribuídos na bacia e muitas falhas nas séries de dados.

Além disso, foram analisadas dez configurações diferentes que envolviam o possível aumento da seção do rio Iguazu em alguns trechos, diferentes configurações do Canal Paralelo, possível canalização a jusante do rio Miringuava e possíveis retificações do rio Iguazu (TUCCI, 1996). Após as simulações e estimativas orçamentárias foi escolhida a opção denominada SIM-5, essa alternativa previa o prolongamento do Canal Paralelo no trecho entre a PR-415 e a BR-277, sem alterar as calhas existentes do rio Iguazu e de parte do canal que já estava construída, previa também uma integração entre o canal e o rio Iguazu logo após a Av. do Contorno e uma retificação do rio Iguazu de 10 km localizada a jusante da confluência com o rio Miringuava (CONSÓRCIO, 1997).

Assim, as obras do Canal Paralelo foram realizadas em duas etapas. Inicialmente o canal foi executado entre a BR-277 e o rio Miringuava, num trecho de quinze quilômetros de comprimento, 40 metros de largura e três metros de profundidade. Após os anos 2000 foi executada mais uma parte do canal, denominada de Canal de Água Limpa que inicialmente recebe a vazão remanescente da captação da Estação de Tratamento de Água (ETA) do rio Iraí, recebendo em seguida as contribuições dos rios Itaqui e Pequeno e então é conduzida à captação da ETA Iguazu e à continuação do Canal Paralelo (PRESTES, 2018; SANEPAR, 2013). A representação da localização do Canal Paralelo e das etapas de sua execução pode ser observada na Figura 5.

FIGURA 5 – Etapas do Canal Paralelo



2.1.2 Plano Diretor de Drenagem do Alto Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba

O Plano Diretor de Drenagem do Alto Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba, neste trabalho referido simplesmente como Plano Diretor de Drenagem do Alto Iguaçu (PDD), foi apresentado em dezembro de 2002 pela extinta Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA) que fazia parte da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA) do Governo do Estado do Paraná. O objetivo do PDD era "[...] oferecer às instituições públicas e à comunidade da Bacia do Alto Iguaçu subsídios técnicos e institucionais que permitam reduzir os impactos das cheias na sua área de abrangência"(SUDERHSA, 2002b).

Desta forma, o PDD compreendia as bacias dos afluentes do rio Iguaçu e 14 cidades da RMC em uma área de aproximadamente 2.500 km^2 da BHAI. O PDD foi dividido em dez módulos que compreendiam temas como: ações não estruturais, avaliação da capacidade do sistema de drenagem existente na época, propostas de medidas estruturais de controle de cheias, manual de drenagem urbana para fornecer subsídios técnicos à entidades de interesse, estudos de custo-benefício das medidas de controle e capacitação técnica (SUDERHSA, 2002b).

Os dois principais elementos norteadores do PDD eram o controle do escoamento superficial na sua origem e o incremento nulo de vazão no sistema de drenagem devido a novos empreendimentos. Para que estes objetivos fossem atingidos era necessário uma ação articulada dos municípios da RMC, já que muitas vezes o controle do escoamento a montante de um determinado ponto se dava em outro município. Além disso, era essencial que fossem feitas alterações nas leis municipais para que novos empreendimentos cumprissem a especificação de não aumentar a vazão no sistema de drenagem (SUDERHSA, 2002b).

Assim, o PDD apresentava soluções envolvendo propostas de medidas estruturais e não estruturais para o controle de enchentes. Estas medidas, seus conceitos e exemplos propostos pelo PDD para a BHAI serão apresentados com mais detalhes nos subitens a seguir.

2.1.2.1 Medidas não estruturais

As medidas não estruturais são medidas que buscam reduzir o impacto das inundações sem modificar o risco das enchentes naturais, visando melhorar a convivência da população com as enchentes e atuando de forma preventiva (FILHO *et al.*, 2000; ENOMOTO, 2004; SUDERHSA, 2002c; HANSSON *et al.*, 2008). Assim, as medidas não estruturais abrangem os seguintes elementos:

- Legislação para controle de impactos, por meio de zoneamento, restrição ao aumento de vazão e incentivo a preservação de áreas permeáveis;
- Previsão e alerta de inundação;
- Administração, por meio da fiscalização e planejamento do sistema de drenagem;
- Seguros para desastres naturais;

- Educação da população e dos planejadores da cidade.

Desta forma, avaliando as peculiaridades da bacia de estudo, as medidas não estruturais propostas pelo PDD foram, em síntese, as seguintes:

- Legislação para controle da ocupação da várzea do rio Iguaçu e seus tributários na RMC baseada no mapa de inundação produzido pelo PDD;
- Legislação para controle de aumento da vazão devido à expansão urbana;
- Previsão em tempo real para a área ribeirinha do rio Iguaçu pela SUDERHSA utilizando modelos matemáticos;
- Plano da Defesa Civil para eventos em que a capacidade do projeto de drenagem fosse superada;
- Educação para a população sobre eventos de inundação;
- Projeto de capacitação para profissionais que atuassem na fiscalização da implementação do PDD na RMC.

2.1.2.2 Medidas estruturais

As medidas estruturais envolvem obras de engenharia que buscam reduzir o risco de enchentes, podendo ser divididas em medidas extensivas, que agem na bacia, ou intensivas, que agem no rio. As medidas extensivas buscam alterar a relação de precipitação-vazão e pode ser realizada pela alteração da cobertura vegetal do solo, por exemplo, reduzindo e retardando os picos de enchente (TUCCI, 2001). As medidas intensivas podem se dividir em quatro categorias (ENOMOTO, 2004; HEIDARI, 2009; TANG *et al.*, 2020):

- Melhoria do canal, através de corte de meandros ou da redução da rugosidade por desobstrução, acelerando o escoamento;
- Reservatórios e bacias de acumulação que irão retardar o escoamento;
- Mudança no canal, realizada através da construção de desvios que reduzem a vazão no canal principal;
- Diques e polders que protegem as áreas ribeirinhas contra o extravasamento do rio.

No PDD foram estudadas e analisadas quais seriam as melhores medidas estruturais para serem implantadas em cada sub-bacia da BHAÍ (SUDERHSA, 2002d). Esta análise foi feita baseada em questionários entregues aos técnicos responsáveis pela administração do sistema de drenagem das prefeituras das 14 cidades que fazem parte da BHAÍ com o objetivo de levantar os principais pontos de enchentes. Além disso, foram utilizados mapas, também fornecidos às prefeituras, para demarcar as áreas afetadas pelas inundações. Desta forma, foi possível fazer uma análise da distribuição espacial das inundações, determinando os pontos críticos e fornecendo subsídio para simular cenários que auxiliariam na determinação das medidas estruturais necessárias (SUDERHSA, 2002d).

No total o PDD propôs 200 intervenções ao longo de mais de 800 *km* de rios da BHAI. Observou-se que a principal medida proposta foi a implantação de lagoas de acumulação, sendo sugerida a construção de 102 lagoas. As outras medidas estruturais indicadas no PDD foram (SUDERHSA, 2002d):

- Substituição de estruturas de travessias dos rios sob vias públicas;
- Melhoria das condições de escoamento em canais;
- Diques de proteção de áreas urbanas sob risco de enchentes;
- Aterro das áreas urbanas sob risco de enchentes.

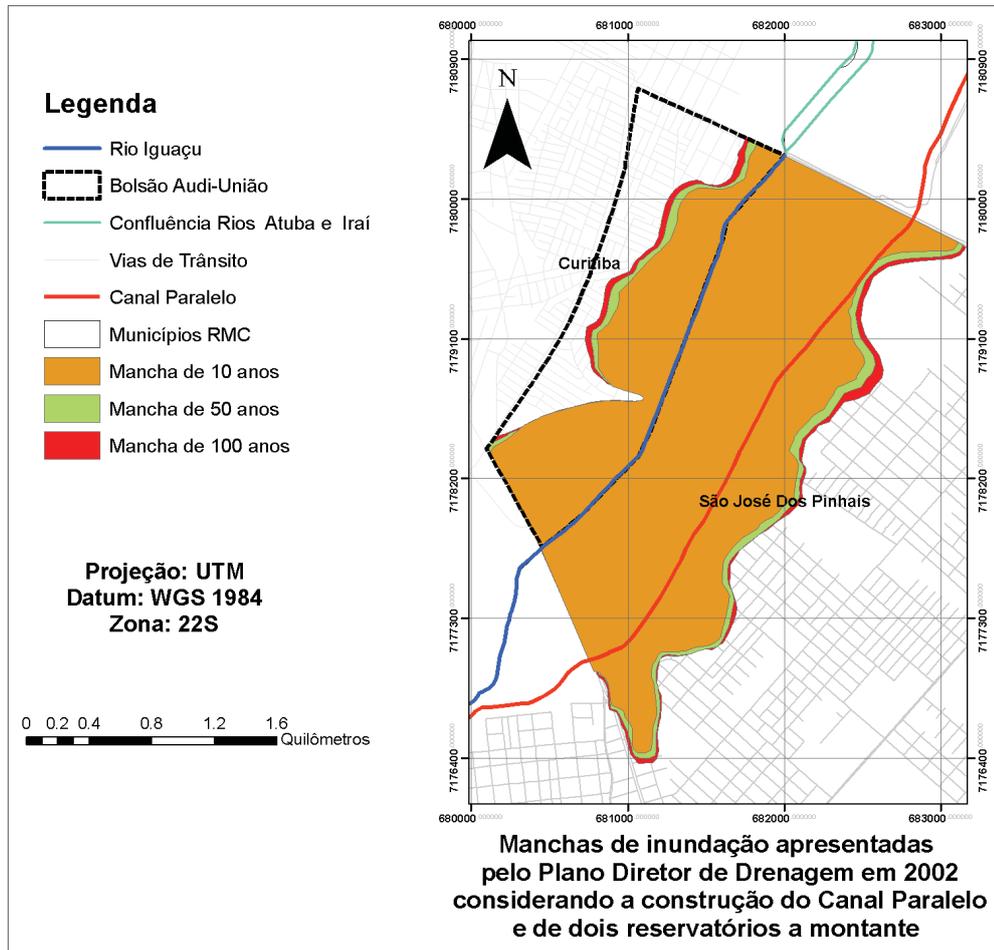
Na época se estimava que o custo de todas as obras para implementação das medidas de controle era de 550 milhões de reais e estas medidas beneficiariam ao menos 4 milhões de moradores da RMC. Vale ressaltar que as medidas estruturais propostas foram analisadas em âmbito de um anteprojeto e que foram projetadas para um TR de 10 anos (SUDERHSA, 2002d).

2.1.2.3 Linhas de inundação ao longo do rio Iguaçu segundo o projeto do Canal Paralelo

Antes de avaliar as mudanças na vazão e nas manchas de inundação devido à implementação das medidas estruturais e não estruturais propostas, foi realizado pela SUDERHSA (2002e) o mapeamento das linhas de inundação ao longo do rio Iguaçu, com o objetivo de mostrar as áreas de abrangência das enchentes com base nas proposições dos estudos e no modelo utilizado por Tucci (1996). Desta maneira, o PDD mapeou as áreas de inundação após a realização das obras do Canal Paralelo descritas no item 2.1.1. Para realizar este mapeamento foram utilizadas curvas de nível com resolução vertical de 5 m (altitude) obtidas de cartas aerofotogramétricas de 1976 fornecidas pela Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba (COMEC), seções transversais do rio Iguaçu e resultados das simulações hidrológicas presentes no CONSÓRCIO (1997).

Assim, foram estimadas as linhas de inundação para os tempos de recorrência de 10, 50 e 100 anos. Na Figura 6 é apresentado o mapeamento realizado na região que abrange o Bolsão Audi-União.

FIGURA 6 – Mancha de inundação após as obras do Canal Paralelo segundo o PDD



FONTE: Adaptado de SUDERHSA (2002e)

2.1.2.4 Estudos hidrológicos e hidráulicos do PDD

Após avaliar e determinar as linhas de inundação a partir dos resultados dos estudos realizados por Tucci (1996) para a BHA1, o PDD fez uma atualização do diagnóstico das inundações para diversos cenários e tempos de recorrência. Para tanto, foram utilizados métodos hidráulicos e métodos hidrológicos diferentes dos utilizados por Tucci (1996). Neste contexto, a BHA1 foi discretizada em sub-bacias menores em que foram determinados os parâmetros específicos necessários para as simulações. Foram considerados três cenários distintos para as simulações hidrológicas e hidráulicas, estes cenários foram (SUDERHSA, 2002f):

- Cenário referente ao ano de 2002;
- Cenário Tendencial, referente ao ano de 2020, considerando a previsão de aumento de urbanização e a impermeabilização decorrente da urbanização;
- Cenário Dirigido, considera as mesmas condições do Cenário Tendencial, mas incluindo as medidas de controle propostas pelo PDD.

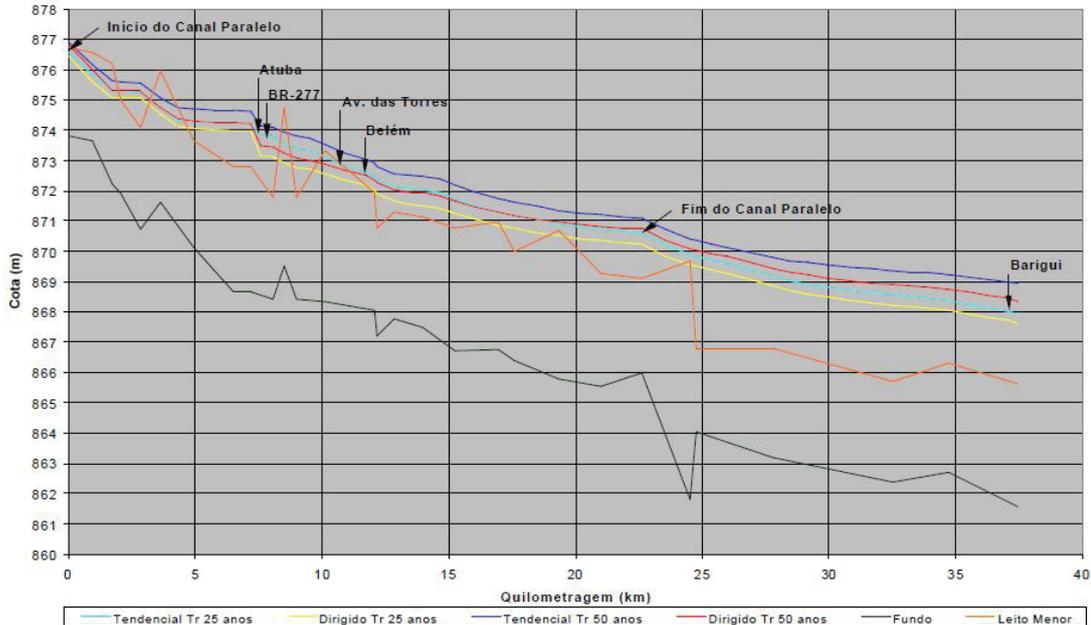
Para determinação do escoamento superficial direto foi utilizado o método *Curve Number* (CN) do *Soil Conservation Service*, sendo possível analisar a mudança do volume do escoamento superficial direto causada pela urbanização da BHAI. O valor de CN foi estimado para cada sub-bacia discretizada utilizando imagens de satélite, mapa de solos da BHAI, tabela de grupos hidrológicos dos solos e estudos populacionais. Além disso, foram determinados os tempos de concentração, utilizando o método de Germano *et al.* (1998), e a chuva de projeto, em que foram utilizadas as curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) propostas por Fendrich *et al.* (1989) para o posto Prado Velho e o método dos blocos alternados para definição dos hietogramas de projeto. Os hidrogramas de projeto foram definidos por meio de hidrogramas unitários gerados pelo método do *Soil Conservation Service* (SCS) (SUDERHSA, 2002f).

Para determinar as cotas máximas de inundação foram utilizados dois modelos, um modelo hidrodinâmico e um modelo hidráulico-hidrológico. O sistema hidrodinâmico utilizou a aplicação de equações de escoamento não permanente, este modelo consegue simular com mais precisão sistemas mais complexos, entretanto precisa de uma base de dados com alto nível de detalhamento. Os *softwares* utilizados neste modelo foram o MIKE11 do *Danish Hydraulic Institute* (DHI) e o IPHS1 do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Já o modelo hidráulico-hidrológico realiza a determinação da cota de inundação a partir de curvas-chave das seções transversais que foram determinadas a partir de equações de movimento permanente e uniforme, no PDD o *software* utilizado para aplicação deste modelo foi o CABC da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (SUDERHSA, 2002g).

Para aplicação dos modelos citados anteriormente, foi necessário a obtenção de dados das seções transversais dos rios, que no caso do rio Iguaçu foram obtidos do CONSÓRCIO (1997), e a definição do coeficiente de rugosidade de Manning, que foi feita a partir da observação dos revestimentos das seções transversais. Além disso, a topologia da rede de drenagem foi definida e foram estabelecidas as condições de contorno, que foram hidrogramas a montante e nível da água a jusante. Desta forma, foram feitas simulações para os três cenários estudados para os TR de 10 e 25 anos para os afluentes do rio Iguaçu (SUDERHSA, 2002g).

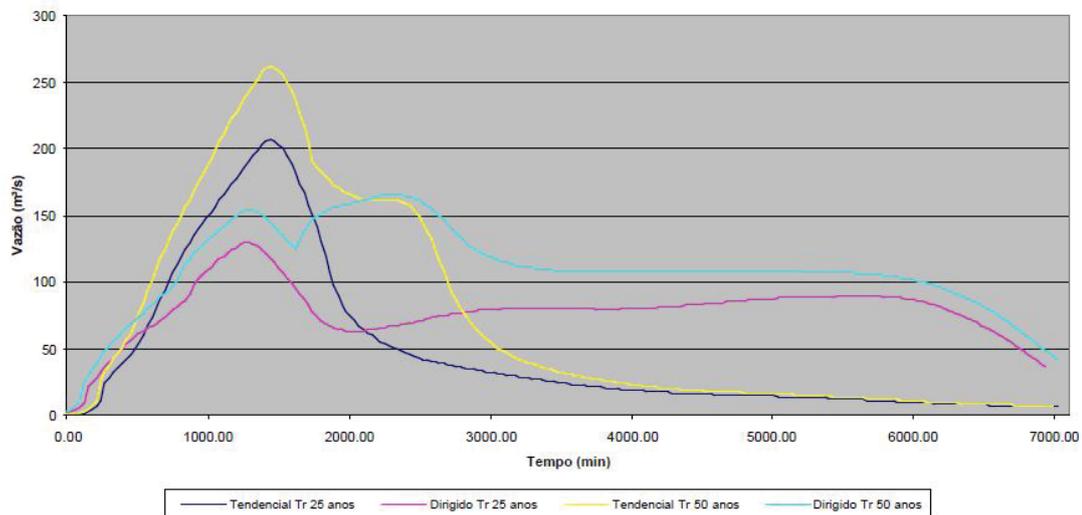
Para a bacia de contribuição direta do rio Iguaçu não foram mapeadas as linhas de inundação, mas foram determinadas, para os TR de 25 e 50 anos, as reduções globais do nível da água e o amortecimento dos hidrogramas devido à implantação das medidas de controle propostas (SUDERHSA, 2002h). Estas reduções podem ser observadas na Figura 7 que apresenta o perfil longitudinal do rio Iguaçu do início do Canal Paralelo até a confluência com o rio Barigui. Os hidrogramas simulados para a seção próxima a BR-277, onde se inicia o Bolsão Audi-União, podem ser observados na Figura 8.

FIGURA 7 – Perfil longitudinal do Rio Iguazu com as envoltórias para os cenários Dirigido e Tendencial para TR de 25 e 50 anos



FONTE: SUDERHSA (2002g)

FIGURA 8 – Hidrogramas da seção próxima a BR-277 no rio Iguazu para os cenários Dirigido e Tendencial para TR de 25 e 50 anos



FONTE: SUDERHSA (2002g)

Para realização das simulações foi utilizada uma chuva de projeto de 24 horas de duração. Foi observado que, aplicando as medidas de controle sugeridas, entre a BR-277 e Avenida das Torres (Avenida Comendador Franco) haveria uma redução da linha d'água de aproximadamente 80 cm tanto para o TR de 25 anos como para o TR de 50 anos. Além disso, o abatimento nos hidrogramas simulados foram de aproximadamente $75 \text{ m}^3/\text{s}$ e $100 \text{ m}^3/\text{s}$ para os TR de 25 e 50 anos respectivamente. Apesar da redução da linha d'água parecer pequena, a região do Bolsão Audi-União é, em geral, muito plana e até mesmo esta redução poderia auxiliar na diminuição de enchentes no local.

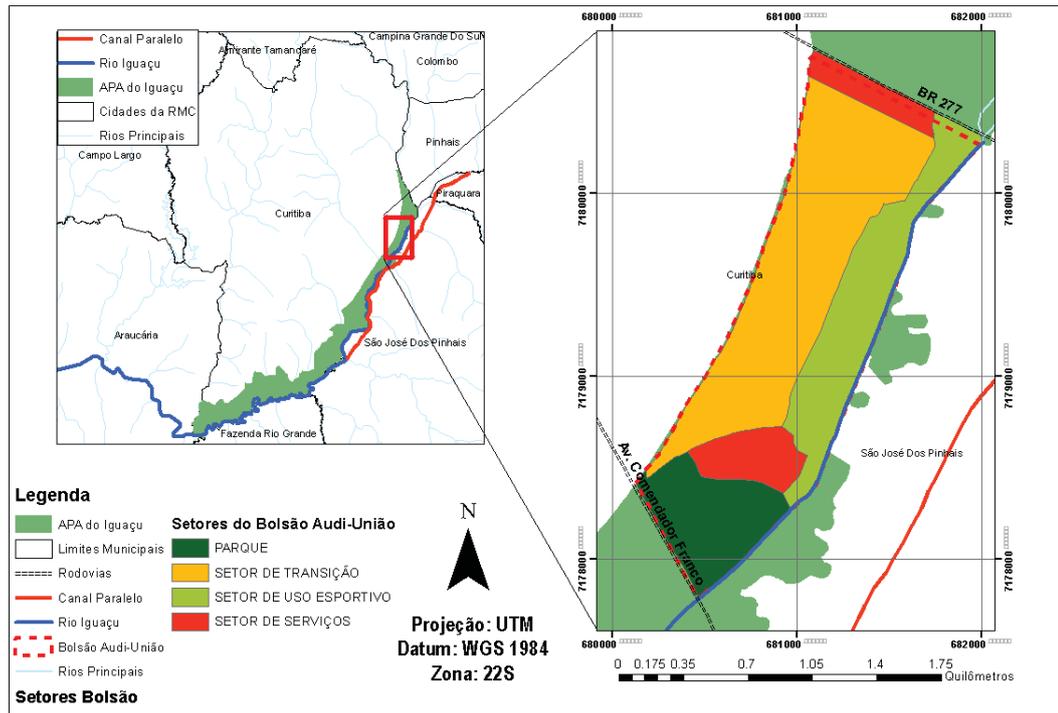
2.1.3 Projetos e obras executados pela Prefeitura Municipal de Curitiba no Bolsão Audi-União

Como apontado por Tucci (1996) as obras do Canal Paralelo poderiam dar confiança à população que poderia passar a ocupar áreas ainda mais próximas do rio Iguaçu. Para que isso não ocorresse, seria essencial que fosse executado o parque que acompanharia o curso do rio Iguaçu e que fossem criadas leis que regulamentassem a ocupação da região. Entretanto, após a execução do Canal Paralelo, pouco foi realizado na área do Bolsão em relação a outras medidas de prevenção de cheias e, como previsto por Tucci (1996), houve um avanço das ocupações em direção a várzea do rio Iguaçu, como pôde ser observado na Figura 2. Como consequência, os moradores do Bolsão continuaram a sofrer com eventos de inundação, entre eles o evento de 2001, descrito anteriormente, que atingiu diversas vilas do Bolsão Audi-União (HAYAKAWA; ULTRAMARI, 2008).

Buscando responder à falta de regulamentação em relação a ocupação do solo, a cidade de Curitiba instituiu em 03 de janeiro de 2000 a Lei Municipal nº 9.800, que estabelece a divisão do território em zonas e setores, além de estabelecer critérios de uso e ocupação do solo (CURITIBA, 2000c). O Setor Especial de Habitação de Interesse Social (SEHIS) é um dos setores estabelecidos pela Lei nº 9.800 e abrange áreas onde há o interesse de realizar a regularização fundiária e ordenar a ocupação por meio de urbanização. Buscando complementar a Lei nº 9.800, foi estabelecido o Decreto nº 250/2000 que dispõe sobre a criação de novos SEHIS, que ficaram definidos como áreas destinadas à implantação de novos núcleos habitacionais de interesse social pela Companhia de Habitação Popular de Curitiba (COHAB-CT) (CURITIBA, 2000b).

Os novos SEHIS incluíram as Áreas de Proteção Ambiental (APA), entre elas a APA do Iguaçu estabelecida pelo Decreto nº 192/2000 que abrange a área do Bolsão Audi-União. A APA do Iguaçu tem como objetivo preservar parte da bacia hidrográfica do rio Iguaçu que está dentro do município de Curitiba e divide sua área de abrangência em "áreas e setores". Uma das áreas definidas pela APA do Iguaçu, por exemplo, é a área de preservação permanente, que determina que as faixas marginais mínimas de 100 metros ao longo do rio Iguaçu e 50 metros de seus meandros devem ser preservadas ou recuperadas (CURITIBA, 2000a). Em 2008, por meio do Decreto nº 174/2008, o zoneamento da APA do Iguaçu foi aprovado e, posteriormente, foi atualizado por meio do Decreto nº 26/2015 (CURITIBA, 2008a; CURITIBA, 2015). A delimitação da APA do Iguaçu e os setores da APA no Bolsão Audi-União estão representados na Figura 9.

FIGURA 9 – APA do Iguaçu e setores do Bolsão Audi-União



FONTE: Autora (2022) e CURITIBA (2015)

A partir do Decreto nº 192/2000 a Prefeitura Municipal de Curitiba passou a pautar as intervenções no Bolsão Audi-União. A primeira intervenção realizada pela PMC foi registrada em 2003, quando houve a retirada de 300 famílias da vila União das Ilhas que foram transferidas para o município de Contenda. Logo em seguida, 400 famílias foram deslocadas da Vila Yasmin para o Jardim Iraí que também fica no Bolsão Audi-União (TEIXEIRA, 2019).

Em 2005, foi estabelecido o Projeto Bolsão Audi-União que previa ações de melhoria de infraestrutura e reassentamento a partir do repasse de recursos do Orçamento Geral da União (OGU). No ano de 2006, a COHAB-CT apresentou o Plano de Trabalho Social (PTS) do Bolsão Audi-União em que foram levantados dados socioeconômicos dos moradores e tinha como objetivo fornecer dados para o Cadastro Único para Programas Sociais do Governo Federal (CADÚnico). Neste levantamento, foram observados diversos problemas no Bolsão, como: ausência de rede de drenagem, menos de 15% dos moradores tinham atendimento de abastecimento de água e de rede elétrica, 53% dos domicílios estavam localizados em áreas inadequadas da APA e 1.537 domicílios se encontravam em áreas sujeitas a inundação e precisavam ser realocados (TEIXEIRA, 2019). A precária situação do Bolsão nesta época e a proximidade das moradias com as cavas existentes pode ser visualizada na Figura 10 obtida do acervo da COHAB-CT.

FIGURA 10 – Caracterização do Bolsão Audi-União antes das intervenções



FONTE: COHAB-CT (2017a)

O PTS serviu como instrumento para orientar o projeto de intervenção realizado pela COHAB-CT para realizar a regularização fundiária e urbanizar a região (TEIXEIRA, 2019; SCHÄFER; GOMIDE, 2014). Assim, através do Decreto nº 894/2007 a área do Bolsão passou a ser considerada de área de interesse público, com o objetivo de recuperar as áreas degradadas, além de controlar e prevenir cheias e enchentes (CURITIBA, 2007). A partir de 2007, o Projeto Bolsão Audi-União passou a ser vinculado ao Projeto Bacia do Iguaçu, que foi objeto de contrato celebrado entre a União e a PMC, incorporando recursos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), mais especificamente do PAC PPI – Saneamento Integrado. Os principais objetivos do PAC eram realizar ações de intervenções em favelas, incluindo obras de saneamento, urbanização de assentamentos precários e reassentamento de famílias, sendo que cerca de 38 milhões de reais foram destinados ao Projeto Bacia do Iguaçu (COHAB-CT, 2017b; CURITIBA, 2013).

Segundo COHAB-CT (2017c), as principais propostas de intervenção compreendidas no Projeto Bolsão Audi-União são:

- Execução do Dique 1 ao longo da margem direita do rio Iguaçu, a partir da Avenida Comendador Franco com comprimento aproximado de 850 metros;
- Execução do Dique 2, com comprimento aproximado de dois quilômetros, a uma distância de 250 metros da margem direita do rio Iguaçu que funcionaria como uma barragem às inundações do rio Iguaçu;
- Execução de um canal de macro drenagem ao longo do Dique 2, cuja função é conduzir o escoamento superficial de parte do Bolsão Audi-União para uma bacia de acumulação;

- Execução e pavimentação de ruas e vias estruturantes;
- Aterro de uma área que até então se encontrava alagada para a implantação do loteamento "Moradias União Ferroviária"(MUF) destinado ao reassentamento de famílias;
- Execução de uma galeria simples para a drenagem da área do MUF;
- Execução de uma estrutura de deságue no rio Iguaçu próximo à Avenida Comendador Franco, destinada ao controle da vazão da bacia de acumulação.

O projeto final com o resumo das propostas citadas acima pode ser observado na Figura 11.

Apesar das diversas intervenções citadas anteriormente estarem previstas no projeto, segundo a COHAB-CT (2017c) o Dique 1 e a estrutura de deságue da Bacia de Acumulação no rio Iguaçu não foram construídos. Além disso, houve apenas a construção de cerca de 1,3 quilômetros do Dique 2 até o início de 2021. Entretanto, a maior parte das intervenções foram realizadas até o ano de 2014. A percepção dos moradores em relação às melhorias apresentadas após as obras foi avaliada por Schäfer e Gomide (2014) no conjunto habitacional Moradias União Ferroviária. Segundo os autores não havia registros de inundações desde a criação do MUF e no questionário aplicado junto à população apenas 4% dos moradores relataram alguma inundação. Desta forma, as obras realizadas pela PMC aparentemente solucionaram os problemas relacionados a enchentes na região.

Vale ressaltar que além dos recursos obtidos junto ao PAC PPI – Saneamento Integrado, no ano de 2008 o parque Centenário da Imigração Japonesa, foi implementado dentro da área do Bolsão Audi-União e recebeu recursos do PAC Copa. O parque, que abrange as áreas em que houve a remoção de moradias em 2003, foi criado pelo Decreto nº 520/2008 e teve entre os seus principais objetivos a proteção e conservação dos recursos naturais existentes, a contenção da urbanização inadequada na área, o controle da degradação dos solos e assoreamento do rio Iguaçu e a ampliação das áreas de amortecimento e armazenagem de águas pluviais (CURITIBA, 2008b).

Além disso, ainda no âmbito de recursos federais investidos na região, em 2013, o Governo do Estado do Paraná recebeu recursos do PAC 2 - Drenagem, para o desenvolvimento de quatro estudos de concepção de parques metropolitanos. Estes parques, em sua maioria, localizam-se a montante do Bolsão Audi-União em rios afluentes do rio Iguaçu, e foram concebidos de forma a proteger o meio ambiente, controlar as cheias e prevenir ocupações desordenadas (COMEC, 2021). Até primeiro semestre de 2021 há o registro do início das obras de dois parques, entretanto nenhum dos quatro parques projetados foram concluídos.

2.1.4 Medidas estruturais e não estruturais no Bolsão Audi-União

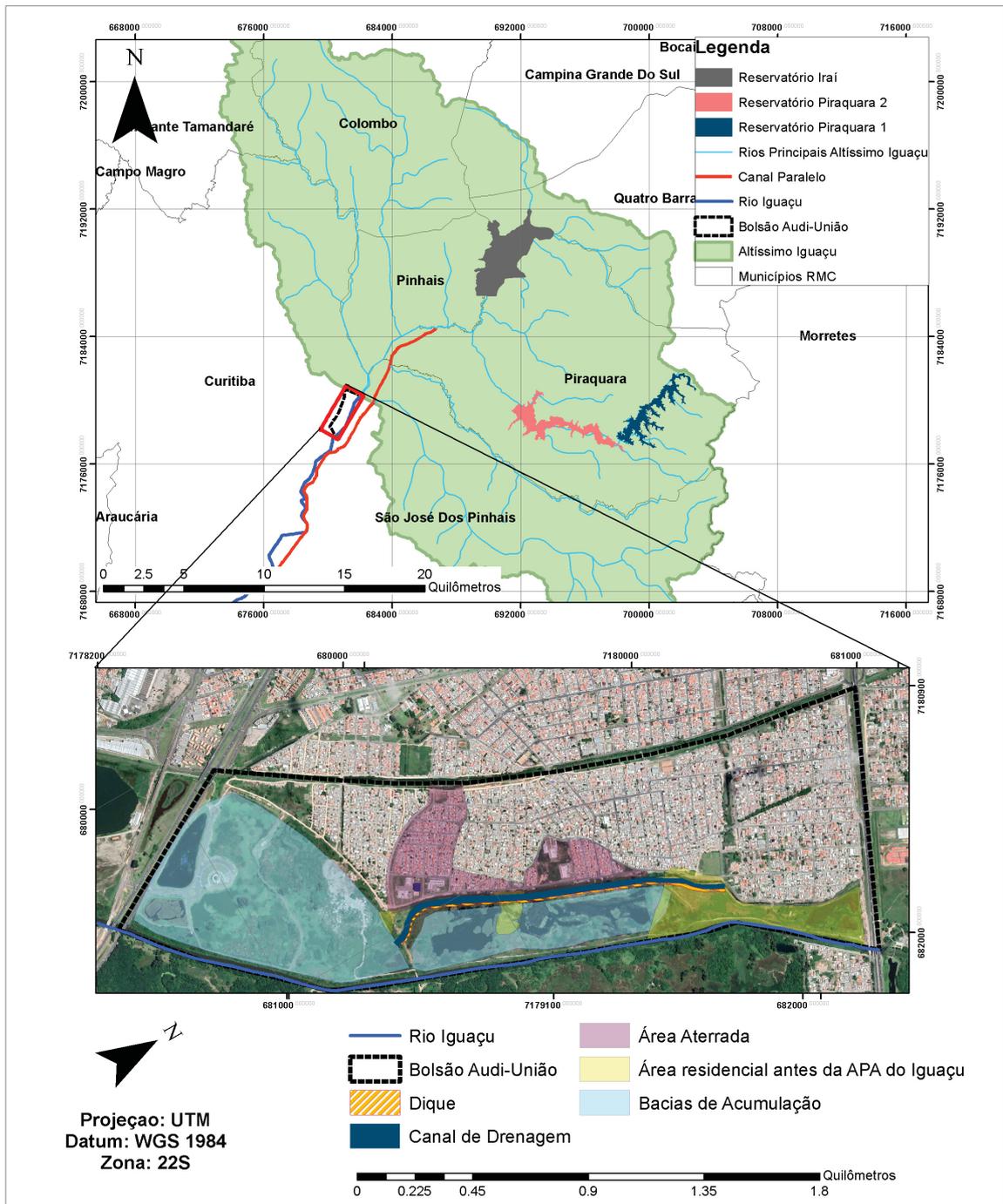
Considerando as obras, planos governamentais e decretos apresentados nos itens anteriores, pode-se dizer que as principais medidas estruturais realizadas no Bolsão Audi-União ou a sua montante consistem em:

- Construção do Canal Paralelo entre os anos de 1996 até início dos anos 2000, que reduziu a vazão de entrada no rio Iguaçu;
- Construção dos reservatórios de água Iraí e Piraquara II entre os anos 2000 e 2009 que, juntamente com o já existente reservatório Piraquara I, amortecem as vazões na entrada no rio Iguaçu;
- Construção de um dique de aproximadamente 1,3 quilômetros de comprimento a 250 metros da margem direita do rio Iguaçu, executado na segunda metade da década de 2000, que passou a proteger da área residencial do Bolsão Audi-União;

- Construção de um canal de macro drenagem e de lagoas de acumulação que conduzem e armazenam as águas pluviais do Bolsão Audi-União, reduzindo a vazão que é adicionada ao rio Iguaçu;
- Aterro de uma área que até então se encontrava alagada para o reassentamento de famílias do Bolsão Audi-União.

Além disso, ao menos duas medidas não estruturais podem ser observadas na área. A primeira delas é o Plano Diretor de Drenagem do Alto Iguaçu, implementado em 2002 pelo Governo do Estado do Paraná, que tem entre as suas principais premissas o acréscimo nulo de vazão devido a novos empreendimentos na BHAI. Adicionalmente, o Decreto nº 192/2000 do município de Curitiba, que criou a APA do Iguaçu, é uma medida não estrutural que impacta diretamente o Bolsão Audi-União, já que toda sua área encontra-se dentro da APA, e em decorrência deste decreto algumas moradias foram realocadas do Bolsão Audi-União para outras regiões e posteriormente o parque Centenário da Imigração Japonesa foi construído dentro da APA. Em suma, as principais medidas estruturais apresentadas, bem como a região que era ocupada por moradias previamente à implementação da APA do Iguaçu, podem ser observadas na Figura 12.

FIGURA 12 – Resumo das medidas estruturais e não estruturais no Bolsão Audi-União e a montante do Bolsão Audi-União



FONTE: Autora (2022) e adaptado do *Google Earth Pro*

2.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

O estudo do comportamento de uma bacia hidrográfica envolve a compreensão de diversos processos complexos do ciclo hidrológico. Tais processos são diretamente influenciados pelas diferentes características físicas da bacia hidrográfica e pelo impacto da atividade humana sobre ela. Na busca por representar os processos do ciclo hidrológico e avaliar as implicações de dife-

rentes cenários de intervenção e/ou alterações em uma bacia hidrográfica foram desenvolvidos os modelos hidrológicos (ANDREWS *et al.*, 2011; WAGENER *et al.*, 2009).

Desta maneira, os modelos hidrológicos tentam aproximar a dinâmica real de uma bacia hidrográfica por meio de representações matemáticas que reproduzem os processos de evapotranspiração, chuva-vazão, propagação de ondas de cheia, infiltração e armazenamento de água no solo, fornecendo como resposta a estes processos o escoamento no exutório da bacia (MACHADO *et al.*, 2017; PONTES *et al.*, 2015).

Os modelos hidrológicos podem ser empregados para estimar dados não disponíveis devido à falta de equipamentos de monitoramento e para prever a resposta hidrológica em cenários futuros (KLEMEŠ, 1986; BEVEN, 2011). Outras aplicações dos modelos hidrológicos podem ser observadas na simulação de cenários de mudanças e variabilidade climática, bem como, de mudanças na vegetação e no uso e ocupação do solo da região estudada (PONTES *et al.*, 2015). Assim, os modelos podem auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos e na tomada de decisão pelos planejadores, que podem definir as melhores opções para atender os objetivos de cada projeto (TUCCI, 2005; SINGH; WOOLHISER, 2002).

Quanto a classificação dos modelos hidrológicos, eles podem ser divididos em modelos contínuos, quando os eventos são contínuos no tempo, ou discretos, quando as mudanças de estado ocorrem em intervalos discretos. Podem ser separados também em relação a distribuição espacial, sendo que os chamados modelos concentrados não levam em conta a variabilidade espacial, enquanto nos modelos distribuídos as variáveis e parâmetros do modelo variam com o espaço e/ou o tempo. Outra classificação dos modelos os divide em modelos estocásticos, quando o conceito de probabilidade é utilizado no modelo, e em modelos determinísticos, quando o conceito de probabilidade não é considerado no modelo. Por fim, os modelos podem ser separados em conceituais, quando as funções do modelo levam em conta os processos físicos envolvidos, e em empíricos, que utilizam funções que não consideram os processos físicos (TUCCI, 2005).

Dado que os modelos hidrológicos buscam representar sistemas complexos e com grande heterogeneidade, diversos modelos foram desenvolvidos buscando se adaptar as singularidades de cada bacia hidrográfica estudada (MACHADO *et al.*, 2017; TUCCI, 2005). Entretanto, segundo Fenicia *et al.* (2008), a aplicação adequada de um modelo deve atender a três exigências: o modelo deve ser capaz de reproduzir com precisão a resposta observada no sistema; os parâmetros do modelo devem ser bem definidos segundo informações extraídas de dados disponíveis sobre a bacia; o modelo deve ser uma representação realista do sistema.

A utilização de modelos foi facilitada pela criação de pacotes de programas computacionais que compilam diversos métodos utilizados na hidrologia, cabendo ao hidrólogo a busca de dados para inserção nos programas, a escolha dos métodos que melhor se ajustam às necessidades de seu estudo e a calibração dos parâmetros utilizados (TUCCI, 2005; SINGH; WOOLHISER, 2002). Um dos programas de modelagem hidrológica de fácil acesso, por ser um *software* aberto, e que possui constantes atualizações e melhorias é o *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) criado pelo *US Army Corps of Engineers* (USACE). Este programa será usado neste trabalho e no próximo item será apresentada uma descrição sobre ele e sobre suas funcionalidades.

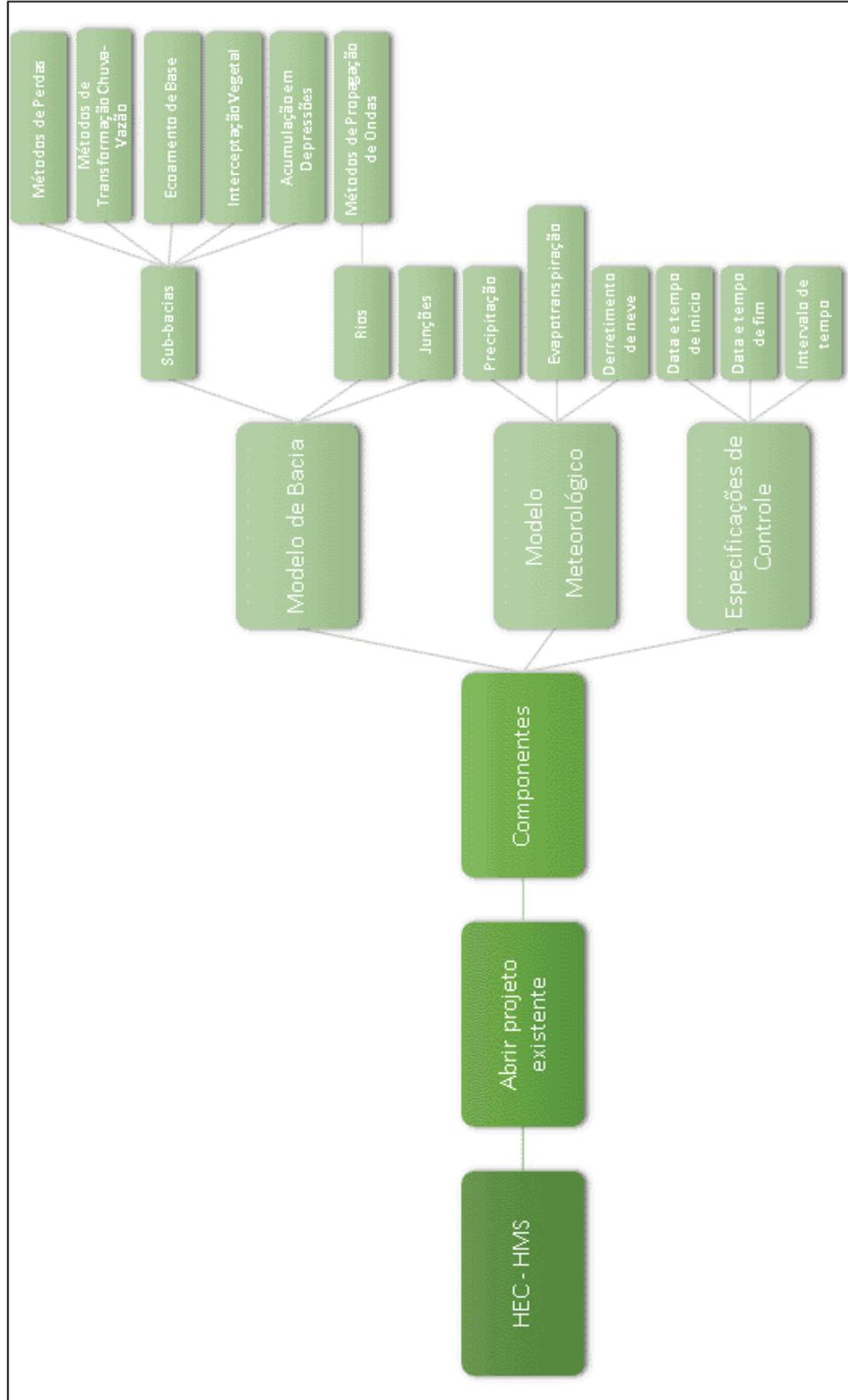
2.2.1 Programa computacional HEC-HMS

O programa computacional HEC-HMS foi construído para simular o processo de transformação de chuva em escoamento em bacias hidrográficas dendríticas e pode ser aplicado para uma vasta gama de bacias, desde grandes bacias até bacias urbanas pequenas (USACE, 2016b). O programa vem sendo desenvolvido há mais de 30 anos, com muitos algoritmos tendo origem nos primeiros programas projetados pelo *Hydrologic Engineering Center*, como o HEC-1 que começou a ser desenvolvido em 1968 e teve sua última versão lançada em 1998 (USACE, 1998). Várias funcionalidades foram adicionadas ao programa conforme foram lançadas novas versões, em sua quarta versão, por exemplo, foram adicionadas funcionalidades relativas a transporte de sedimentos. Desta forma, o programa é continuamente aprimorado, buscando atender as novas demandas relacionadas a simulações hidrológicas (USACE, 2016b).

Os métodos mais comumente utilizados na hidrologia estão inclusos no HEC-HMS. O programa inclui métodos capazes de calcular as perdas por infiltração, a transformação de chuva em vazão, o escoamento subterrâneo e a propagação de ondas de cheia. Além disso, é possível incluir nas simulações elementos de controle de vazão, como reservatórios e elementos de desvio de escoamento (USACE, 2000; USACE, 2016b).

Dentro do programa a bacia hidrográfica pode ser representada pelas sub-bacias, rios, confluências, exutório, reservatórios e desvios. Os dados de entrada são: precipitação, evapotranspiração e características físicas da bacia. Além disso, caso existam dados observados de vazão, eles também podem ser inseridos no modelo (USACE, 2016b). A Figura 13 apresenta um resumo dos componentes inclusos no programa. Maiores detalhes podem ser obtidos em USACE (2016b).

FIGURA 13 – Fluxograma dos componentes do HEC-HMS



FONTE: Adaptado de Cruz (2019)

Adicionalmente, o HEC-HMS contém um componente de calibração dos parâmetros e condições iniciais estimados. Diversas são as funções de calibração presentes no programa, entretanto, para que seja possível realizar a calibração é necessário que os hidrogramas observados sejam inclusos na simulação (USACE, 2000).

2.2.1.1 Aplicações do programa HEC-HMS

Devido aos diversos atributos e capacidades do *software* HEC-HMS citados anteriormente, muitas pesquisas para diversas áreas vêm utilizando o programa (RESENDE *et al.*, 2017; BAI *et al.*, 2019; MORAES *et al.*, 2018; ALMEIDA *et al.*, 2016). O programa pode ser aplicado para avaliar os impactos de mudanças futuras que podem ocorrer em bacias hidrográficas, como mudanças climáticas e de uso e ocupação do solo (TRIPATHI *et al.*, 2014; WOLTEMADE *et al.*, 2020; MEENU *et al.*, 2013), bem como, para avaliar o impacto da implantação de diferentes medidas estruturais de controle de cheias, como reservatórios e *wetlands* (YAZDI *et al.*, 2018; VERGUTZ *et al.*, 2019; DECINA; BRANDÃO, 2016), na resposta de bacias hidrográficas.

Mudanças climáticas podem levar ao aumento de precipitação nos próximos anos e a resposta hidrológica devido a este aumento pode ser dimensionada pelo HEC-HMS. Esta situação foi estudada por Bai *et al.* (2019) na bacia do rio Nippersink, localizada no estado Illinois no Estados Unidos, em que foi avaliada a mudança na dinâmica da bacia em consequência da variação do forçamento radioativo devido à emissão de gases de efeito estufa. Bai *et al.* (2019) analisaram três prováveis cenários de aumento de forçamento radiativo e observaram que as precipitações estimadas e vazões simuladas por meio do HEC-HMS se apresentaram muito maiores do que já registrado nas séries históricas, ou seja, os resultados demonstraram que o risco de ocorrência de enchentes deve aumentar futuramente na região estudada.

A bacia hidrográfica do Alto Iguaçu foi objeto de estudo de Bello (2013) para avaliar as vulnerabilidades ambientais e socioeconômicas em Curitiba em que foram analisadas as futuras mudanças climáticas na cidade devido ao aumento populacional e ao aumento de emissão de gases de efeito estufa. Foi observada a possibilidade de um aumento entre 2,75°C e 4,25°C na temperatura média nos anos 2071 a 2100 quando comparados com o período de 1961 a 1990. Também foram observados aumentos de precipitação em todos as estações do ano ao comparar os dois períodos. Após realizar o diagnóstico de mudanças climáticas, Bello (2013) utilizou os resultados no HEC-HMS para obter previsões de aumento de vazão que posteriormente foram utilizadas para mapear regiões mais vulneráveis a inundações futuras. O estudo concluiu que a área das inundações com tempos de retorno de 25 e 50 anos deve aumentar 5,2% e 5,6% respectivamente (BELLO, 2013).

Além disso, o HEC-HMS também vem sendo utilizado para dimensionar as mudanças no escoamento devido a alterações no uso e ocupação do solo (DU *et al.*, 2015; KANG *et al.*, 2018; SURIYA; MUDGAL, 2012). No último século, o Brasil vem passando por grandes alterações em sua ocupação territorial, com diversas áreas de florestas transformadas em pastos e com uma crescente ocupação urbana (MATOS, 2012; YOUNG, 2012; RIVERO *et al.*, 2009). Esse cenário foi observado por Moraes *et al.* (2018) na bacia do rio Xopotó no Estado de Minas Gerais, que identificaram, a partir da técnica de classificação de imagens *Maximum Likelihood*

Classification, as mudanças na ocupação territorial na bacia nos anos de 1979, 2001 e 2015 e avaliaram como a resposta da bacia foi diferente em cada ano. Utilizando o HEC-HMS Moraes *et al.* (2018) observaram que o hidrograma simulado para o ano de 2015 teve uma vazão de pico maior, podendo apresentar um aumento de 436,6%, e um tempo de concentração menor do que o hidrograma simulado para 1979 para um mesmo evento de chuva.

A avaliação do desempenho de medidas estruturais na redução de vazões também pode ser realizada a partir de simulações no HEC-HMS e auxiliar na tomada de decisão de planejadores em projetos de contenção de cheias. O estudo de Yazdi *et al.* (2018) utilizou o programa HEC-HMS, em conjunto com um algoritmo de análise de custos, para avaliar qual seria a melhor configuração da construção de um conjunto de barragens em uma bacia hidrográfica em Teerã no Irã, objetivando a atenuação da vazão de pico, o aumento do tempo de pico e a redução de custos. Yazdi *et al.* (2018) chegaram a conclusão que a configuração que apresentava o melhor custo-benefício reduziria a vazão de pico em 54% e aumentaria o tempo de pico em 77% para um tempo de recorrência de 10 anos.

Nesse contexto de avaliação de medidas estruturais, Vergutz *et al.* (2019) utilizaram o HEC-HMS para analisar como a implantação de quatro reservatórios de detenção *off-line* na bacia hidrográfica do Córrego São Pedro em Uberlândia-MG mitigariam os impactos de inundações na região. Os autores chegaram a conclusão que com a construção dos reservatórios a vazão de pico com tempo de recorrência de 100 anos chegaria a $56,9 \text{ m}^3/\text{s}$, valor menor do que o simulado considerando o período de pré-urbanização da região ($72,9 \text{ m}^3/\text{s}$), ou seja, a implantação dos reservatórios poderia auxiliar na redução das inundações na área estudada.

2.3 MODELAGEM HIDRÁULICA

A determinação de áreas inundáveis é essencial para o planejamento urbano. Uma das maneiras de avaliar a dinâmica das inundações em áreas urbanas se dá por meio da utilização de modelagem hidráulica (COUTINHO, 2015; MASOERO *et al.*, 2013). Tais modelos buscam determinar a capacidade de vazão dos rios e canais que fazem parte do sistema de drenagem e conseguem simular as cotas de inundações. Assim, os modelos hidráulicos permitem que cenários e alternativas sejam simulados e avaliados, auxiliando planejadores e órgãos de interesse, como a Defesa Civil, que podem utilizar os resultados para orientar na demarcação de novos loteamentos e na realização de planos de emergência (WINTER, 2018).

Os modelos hidráulicos levam em consideração as características da planície de inundação, das seções transversais dos canais e do material da cobertura superficial dessas regiões (WINTER, 2018). A obtenção de dados do relevo do terreno estudado pode ser feita a partir da aquisição de imagens de sensoriamentos remotos de alta resolução, a partir de levantamentos fotogramétricos que podem trazer informações precisas para a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e curvas de nível, podendo ser obtidos também a partir de levantamentos topográficos feitos em campo com equipamentos como GPS (*Global Positioning System*) ou Estação Total (HORRITT; BATES, 2001).

Além dos dados relativos ao relevo da área de estudo, dados batimétricos de qualidade são fundamentais para a aplicação dos métodos hidráulicos para cada sistema estudado e para a ob-

tenção de resultados precisos. Entretanto, a obtenção desses dados é mais difícil, já que os sinais ópticos ou sinais de radares de sensores remotos geralmente não conseguem penetrar a superfície da água (TRIGG *et al.*, 2009). A falta de dados batimétricos pode ser solucionada utilizando simplificações, com áreas e inclinações médias para os canais, ou utilizando dados batimétricos antigos (TRIGG *et al.*, 2009). Ao utilizar o levantamento topográfico em conjunto com dados hidrométricos as áreas inundáveis podem ser estimadas utilizando modelos hidráulicos.

Os modelos hidráulicos podem ser separados em modelos unidimensionais (1-D) ou modelos bidimensionais (2-D). Os modelos 1-D dividem a planície de inundação e o canal em uma série de seções transversais perpendiculares a direção do escoamento e, ao fornecer as condições de contorno de entrada e saída, é possível obter a velocidade e profundidade média em cada seção transversal. A desvantagem deste modelo é a falta de representação das áreas entre as seções transversais. Desta forma, para representar a área inundável, as profundidades médias de cada seção transversal são interpoladas e sobrepostas a um MDT do local estudado (BATES; ROO, 2000).

Buscando representar melhor a extensão das inundações, foram desenvolvidos modelos 2-D que, diferentemente dos modelos 1-D, representam uma topografia contínua da área estudada e não necessitam de processos secundários para determinar a área de inundação (BATES; ROO, 2000). Assim, o modelo 2-D consegue representar as trocas de volume entre a calha do rio e a planície de inundação de maneira mais adequada. A aplicação dos modelos 2-D pode ser observada em especial em estudos de projetos de estruturas hidráulicas e de ruptura de barragem, em que há a ocorrência de diferentes tipos de escoamento e variações bruscas na profundidade e velocidade, características que não conseguem ser representadas em modelos 1-D devido as suas simplificações (COUTINHO, 2015). Embora seja um modelo mais completo, o modelo 2-D requer dados mais precisos sobre o relevo, como MDT obtidos a partir de sensores remotos de alta resolução que não são fornecidos de forma gratuita. Apesar dos avanços do modelo 2-D, Horritt e Bates (2001) e Coutinho (2015) apresentam em seus estudos que modelos 1-D podem representar com precisão a extensão de inundações e acabam sendo modelos mais atrativos por necessitarem de menos variáveis e de menos tempo de processamento. Além disso, muitos estudos usam modelos híbridos, utilizando modelos unidimensionais para representar a calha principal do rio e modelos bidimensionais para representar a planície de inundação (COUTINHO, 2015; MASOERO *et al.*, 2013; LIN *et al.*, 2006).

2.3.1 Escoamento em rios e canais

O escoamento em rios pode acontecer em regime permanente ou em regime não permanente. O escoamento é considerado permanente quando não há variação dos gradientes de velocidade e do nível com o tempo, assim, neste regime não há variação de vazão ao longo do tempo para uma mesma seção (CHOW, 1959; TUCCI, 2005). Usualmente o escoamento permanente é utilizado para verificar a capacidade de vazão de canais, como observado nos estudos de Silva (2013) e Lins (2019) e, em geral, consegue apresentar bons resultados para esta função.

O escoamento não permanente é definido como aquele com vazão variável ao longo do tempo (CHOW, 1959; TUCCI, 2005). Estudos sobre inundações usualmente tem interesse no

escoamento não permanente, já que a cota de inundação muda instantaneamente com a passagem de onda de cheia, tornando o elemento tempo essencial para o dimensionamento de estruturas de controle (CHOW, 1959). O escoamento não permanente é governado pelos princípios da conservação de massa e da quantidade de movimento, que são expressos matematicamente por equações diferenciais, denominadas equações de Navier-Stokes que são utilizadas em modelos 3-D e simplificadas pelas equações denominadas *Shallow Water Equations* nos modelos 2-D. No caso de modelos 1-D são utilizadas equações derivadas das equações de Navier-Stokes, que utilizam algumas hipóteses simplificadoras, denominadas equações de Saint Venant (USACE, 2016a).

Além das definições descritas anteriormente, o escoamento pode ser uniforme, quando não há mudança nas seções transversais e na velocidade média ao longo de todo o canal, ou pode ser variável, quando há mudança nas seções e na velocidade média ao longo do canal. Escoamentos variáveis podem ainda ser divididos em rapidamente variados, quando há uma mudança brusca de profundidade, condição observada em saltos hidráulicos por exemplo, ou gradualmente variados quando a mudança de profundidade se dá de forma mais lenta (CHOW, 1959).

Em relação aos efeitos da aceleração da gravidade sobre um fluido, eles podem ser analisados utilizando a razão entre as forças inerciais e a forças da gravitacionais que atuam sobre o fluido. Essa relação é dada pelo número de Froude representado na Equação 2.1.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gy_h}}, \quad (2.1)$$

onde V é a velocidade média (m/s); g é a aceleração da gravidade (m/s^2); y_h é a profundidade hidráulica dada pela razão entre a área molhada e a largura da seção (m).

Quando a forças gravitacionais se sobrepõem às forças inerciais, a Equação 2.1 resulta em $F_r < 1$ e o escoamento é denominado subcrítico. Caso contrário, tem-se $F_r > 1$ e o escoamento é denominado supercrítico, indicando que o escoamento tem alta velocidade. Quando há igualdade entre as forças inerciais e gravitacionais, o escoamento é denominado crítico e tem-se $F_r = 1$ (CHOW, 1959; GRACIOSA, 2010).

2.3.2 Programa computacional HEC-RAS

O *software* HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) foi desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers* (USACE) e é um *software* gratuito capaz de realizar modelagens hidráulicas. O HEC-RAS permite a modelagem de escoamento permanente unidimensional, escoamento não permanente uni ou bidimensional, cálculo de transporte de sedimentos, modelagem de variação de temperatura da água e modelagem de qualidade da água (USACE, 2016a).

Além de auxiliar na determinação de áreas de inundação de rios, o programa HEC-RAS é uma ferramenta que pode auxiliar na análise do perfil longitudinal da água, na análise de transporte de sedimentos e no efeito de estruturas hidráulicas sobre o escoamento do rio (MULUNGO, 2012; BALES *et al.*, 2007).

Segundo Graciosa (2010), os modelos hidráulicos podem ser divididos em modelos de remanso, que consideram o escoamento permanente, ou modelos hidrodinâmicos, que consideram o escoamento não permanente. O modelo hidrodinâmico do HEC-RAS utiliza a equação da continuidade e a equação de conservação da quantidade de movimento para representar o escoamento não permanente, aplicando o sistema de equações de Navier-Stokes para modelos 2-D e de Saint Venant para modelos 1-D.

Neste trabalho o *software* HEC-HMS será utilizado para estimar os hidrogramas para diferentes tempos de recorrência e diferentes cenários no início do rio Iguaçu e do Canal Paralelo, que serão utilizados posteriormente no *software* HEC-RAS como condição de contorno da seção a montante do trecho estudado. Assim, por meio do HEC-RAS a propagação do escoamento poderá ser realizada, os mapas de inundação da área estudada poderão ser gerados e as medidas estruturais implementadas serão avaliadas. Esta combinação da utilização do HEC-HMS para fazer modelagens hidrológicas e do HEC-RAS para realizar a modelagem hidráulica vem sendo aplicada em diversos estudos (GÜL *et al.*, 2010; MULUNGO, 2012; WINTER, 2018; DECINA; BRANDÃO, 2016; TANG *et al.*, 2020).

A aplicação conjunta dos programas computacionais HEC-HMS e HEC-RAS para avaliação da efetividade de medidas estruturais e não estruturais na mitigação de cheias pode ser observada em estudos em regiões que observaram um crescente adensamento populacional próximo a rios e canais. Esta situação pode ser observada no estudo de Gül *et al.* (2010), que avaliou como a construção de uma represa a montante de uma região urbanizada e que sofre com constantes inundações na Turquia poderia auxiliar na redução das áreas inundadas. Utilizando os *softwares* HEC-HMS e HEC-RAS, e simulando eventos com TR de 100 e 500 anos, o estudo chegou a conclusão que a construção da represa reduziria a extensão de áreas inundadas em apenas 3,5% para ambos os eventos.

O estudo de Decina e Brandão (2016) avaliou o desempenho de medidas estruturais e não estruturais para controle de inundações na bacia do Córrego do Gregório em São Carlos-SP, utilizando os programas computacionais HEC-HMS e HEC-RAS. Foram avaliados os efeitos da construção de cinco reservatórios de detenção *in-line* localizados no exutório de cinco sub-bacias da bacia de estudo e os efeitos de medidas não estruturais, como conservação de áreas florestais e áreas públicas. O estudo concluiu que um cenário futuro, em que há a combinação de medidas estruturais e não estruturais, reduziria a vazão de pico em até 30,2% ao comparar com um cenário futuro em que apenas medidas não estruturais fossem implantadas. Apesar disso, foi observado que mesmo com todas as medidas sendo aplicadas, a ocupação urbana futura aumentaria a impermeabilização do solo e as áreas de inundação estimadas para o ano de 2012 aumentariam em até 9,1% futuramente.

A utilização conjunta dos *softwares* HEC-HMS e HEC-RAS também foi aplicada por Tang *et al.* (2020) que estudaram como a combinação de diferentes localizações e tamanhos de *wetlands*, utilizadas como medidas estruturais na redução de cheias em uma bacia hidrográfica de Houston-Texas, impactariam a redução das manchas de inundação na área estudada. O estudo chegou a conclusão que a combinação de *wetlands* localizadas mais a montante e com os maiores volumes seria a combinação mais efetiva na redução das áreas inundadas e na redução da duração das enchentes.

Além da avaliação do desempenho de medidas estruturais e não estruturais, alguns estudos utilizam os programas computacionais HEC-HMS e HEC-RAS para estimar a capacidade de canais e determinar a área de inundação em cenários futuros de uso e ocupação do solo. Este foi o caso do estudo de Winter (2018) que avaliou a área de inundação em um trecho canalizado do Córrego Fundo na cidade de Pato Branco-PR. Foram avaliados dois cenários de ocupação urbana, o primeiro cenário era referente a ocupação do ano de 2015 e o segundo cenário era referente a ocupação total das possíveis áreas a serem urbanizadas segundo o Plano Diretor Municipal. Os resultados do estudo mostraram que, caso o segundo cenário se confirme, as áreas inundáveis podem aumentar 493,86%.

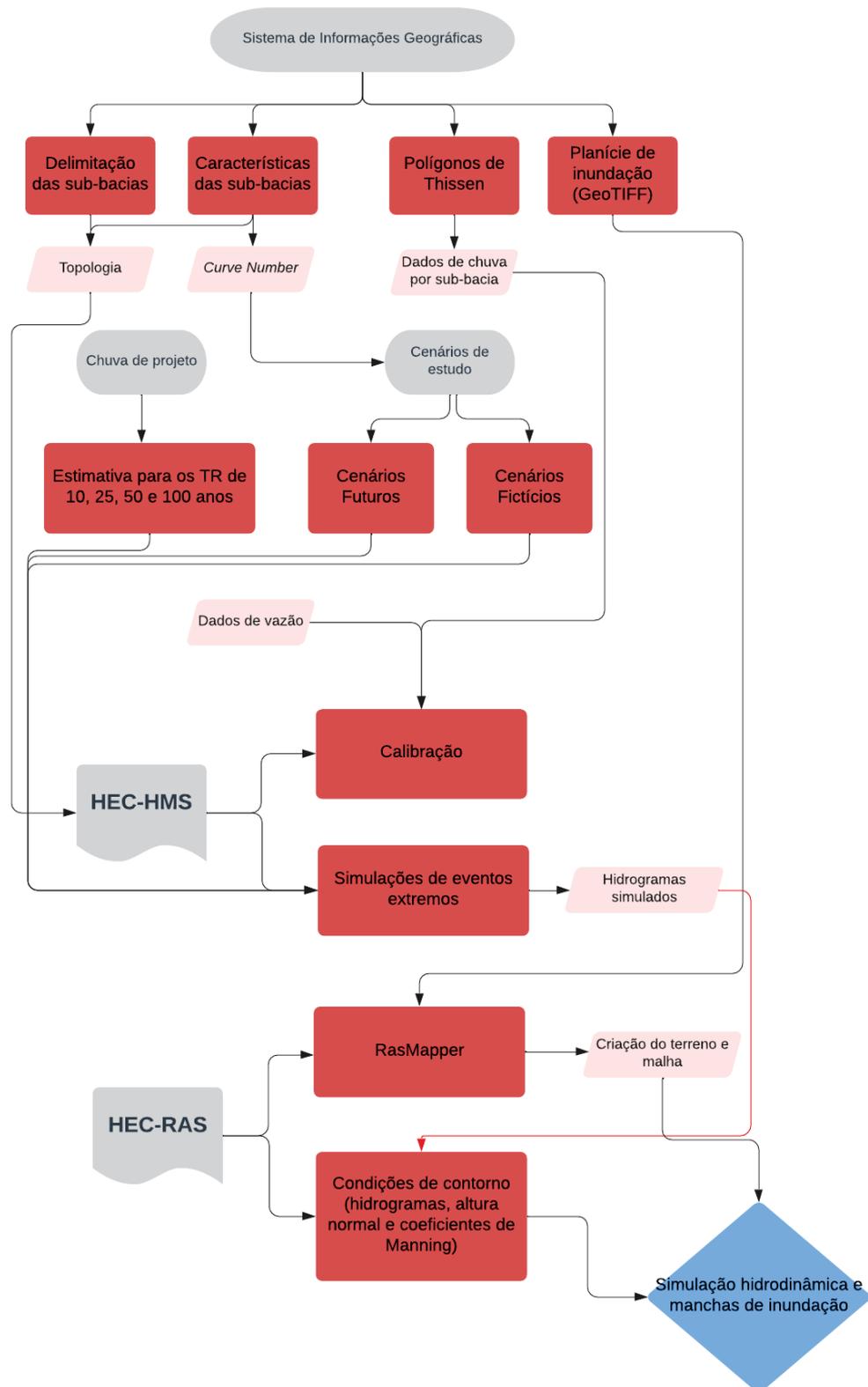
O HEC-RAS também foi utilizado no estudo de Ogras e Onen (2020), que neste caso utilizaram o *software* para avaliar as inundações em um trecho do rio Tigres na Turquia. Os autores avaliaram o perfil da água para tempos de recorrência de 25, 50, 100 e 500 anos e buscaram avaliar como as estruturas de três pontes existentes no trecho afetariam o escoamento e qual seria a cota de inundação nestes pontos. Como resultado, foi observado que para o TR de 25 anos em apenas uma das pontes o escoamento não seria obstruído e que a ponte mais a jusante, denominada *Ten-Eyed Bridge*, seria a mais afetada em todos os cenários, já que é uma ponte de baixa elevação e que reduz muito a seção do rio. Ogras e Onen (2020) apontam que esta ponte não pode ser alterada, pois é um patrimônio histórico, e sugerem que uma solução para que as inundações sejam minimizadas seria a construção de um canal nas proximidades do rio Tigres, de maneira que a vazão possa ser reduzida.

A sub-bacia do rio Palmital, localizada nos municípios de Pinhais e Colombo na bacia do Alto Iguaçu e a montante da área estudada neste trabalho, foi estudada por Enomoto (2004) que utilizou o HEC-RAS para elaborar mapas de inundação para a esta sub-bacia. A autora avaliou dois cenários de impermeabilização do solo, um cenário relativo ao ano de 2004, com taxa de impermeabilização de 15%, e um cenário tendencial com taxa de impermeabilização de 22,5%. Foi observado que as áreas inundadas aumentariam em até 9,59% de um cenário para outro. Entretanto, Enomoto (2004) aponta que os resultados obtidos superestimaram as áreas de inundação, já que as curvas de nível utilizadas tinham intervalos de 5 metros. Assim, Enomoto (2004) deixa claro a importância da utilização de curvas de nível ou MDT com maiores precisões, como curvas de 1 em 1 metro, para que o resultado apresentado seja mais próximo a realidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados neste trabalho. Inicialmente é realizada uma descrição da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu, ilustrando em detalhes a área de estudo. Em seguida são apresentados os materiais utilizados, como dados de chuva, dados de vazão, Modelo Digital de Elevação e dados topográficos. Por fim, são apresentados os métodos utilizados para a modelagem hidrológica e modelagem hidráulica. O fluxograma apresentado na Figura 14 representa resumidamente as principais etapas utilizadas para realização deste trabalho.

FIGURA 14 – Fluxograma Metodológico



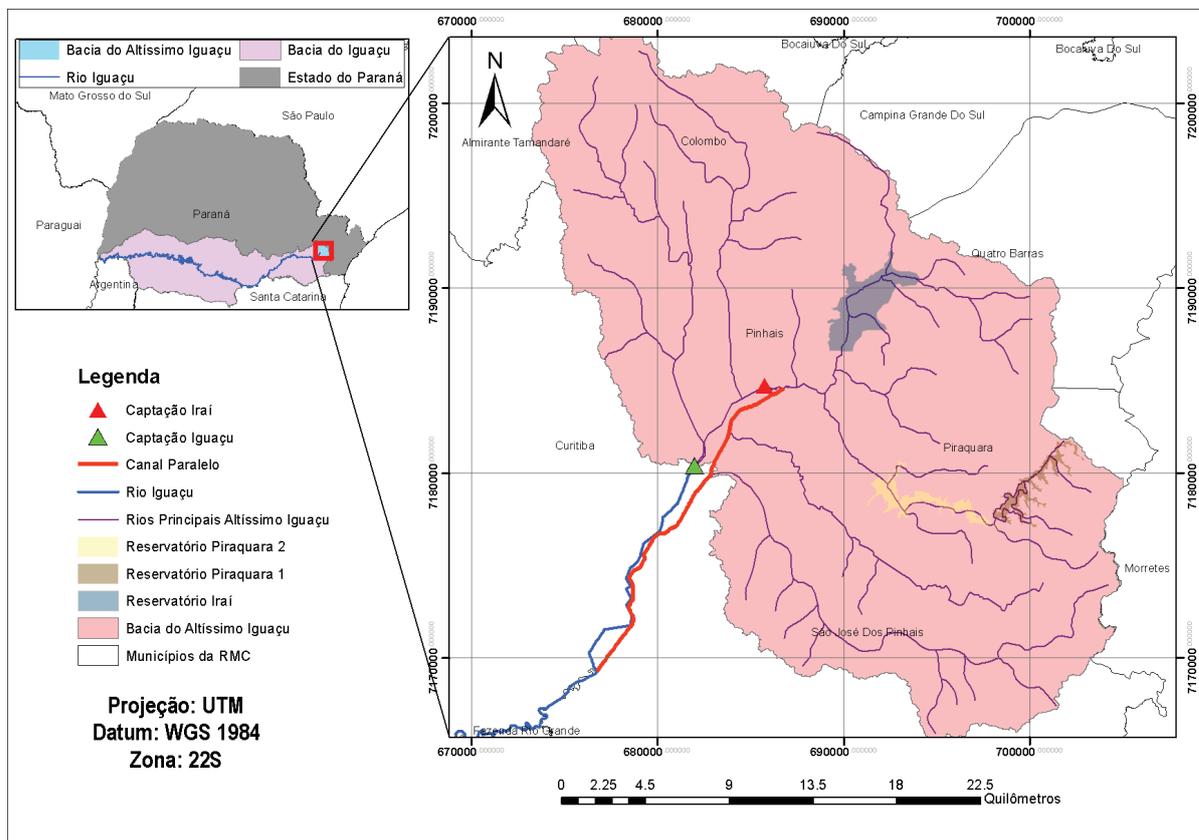
FONTE: Autora (2022)

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica de estudo é denominada bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu e faz parte da BHAI, compreendendo as sub-bacias a montante da formação do rio Iguaçu, ou seja, a montante do Bolsão Audi-União. A bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu fica localizada no primeiro planalto paranaense, entre os paralelos $25^{\circ}13'08''\text{S}$ e $25^{\circ}36'56''\text{S}$ e entre os meridianos $48^{\circ}57'18''\text{O}$ e $49^{\circ}16'29''\text{O}$, em uma área de aproximadamente $693,7 \text{ km}^2$. A cabeceira do rio Iraí, que forma o rio Iguaçu, fica na Serra do Mar em altitudes que chegam a mais de 1300 metros acima do nível do mar (IPARDES, 2005).

A localização da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu no Estado do Paraná, assim como o rio Iguaçu, o Canal Paralelo, três reservatórios de água e dois pontos de captação de água que fazem parte dela estão representados na Figura 15.

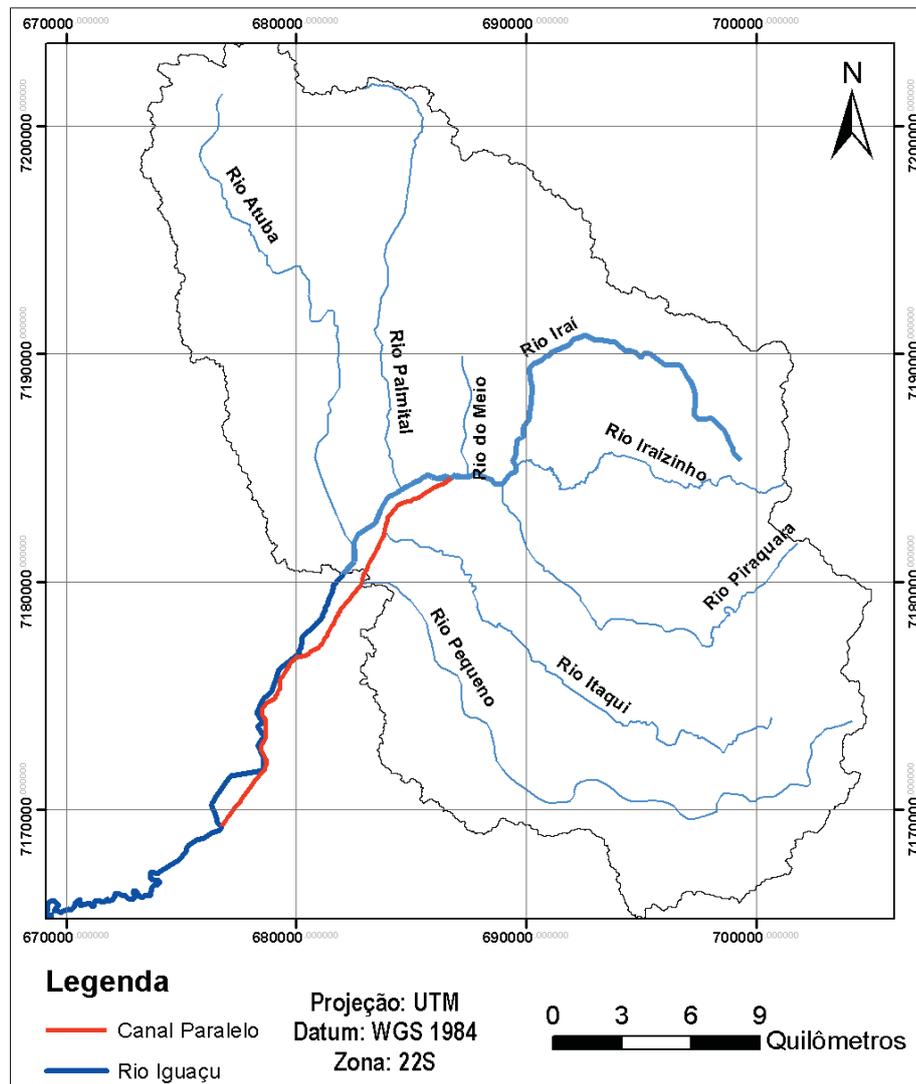
FIGURA 15 – Localização da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu



FONTE: Autora (2022)

A bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu é composta por oito rios principais que formam o rio Iguaçu e o Canal Paralelo. A localização desses rios bem como suas denominações estão apresentadas na Figura 16.

FIGURA 16 – Rios da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguazu



FONTE: Autora (2022)

Segundo a classificação de Köppen, o clima Cfb é o clima predominante na região, representando um verão mais úmido do que o inverno e chuvas abundantes e bem distribuídas ao longo de todo o ano (ITCG, 2008a). A precipitação anual média na bacia varia entre 1400 mm a 1500 mm (SUDERHSA, 1998). A disponibilidade hídrica superficial varia entre $20 \text{ m}^3/\text{s}$ a $58 \text{ m}^3/\text{s}$ (IPARDES, 2009b), enquanto a demanda hídrica total varia entre $6 \text{ m}^3/\text{s}$ a $11 \text{ m}^3/\text{s}$ (IPARDES, 2009a).

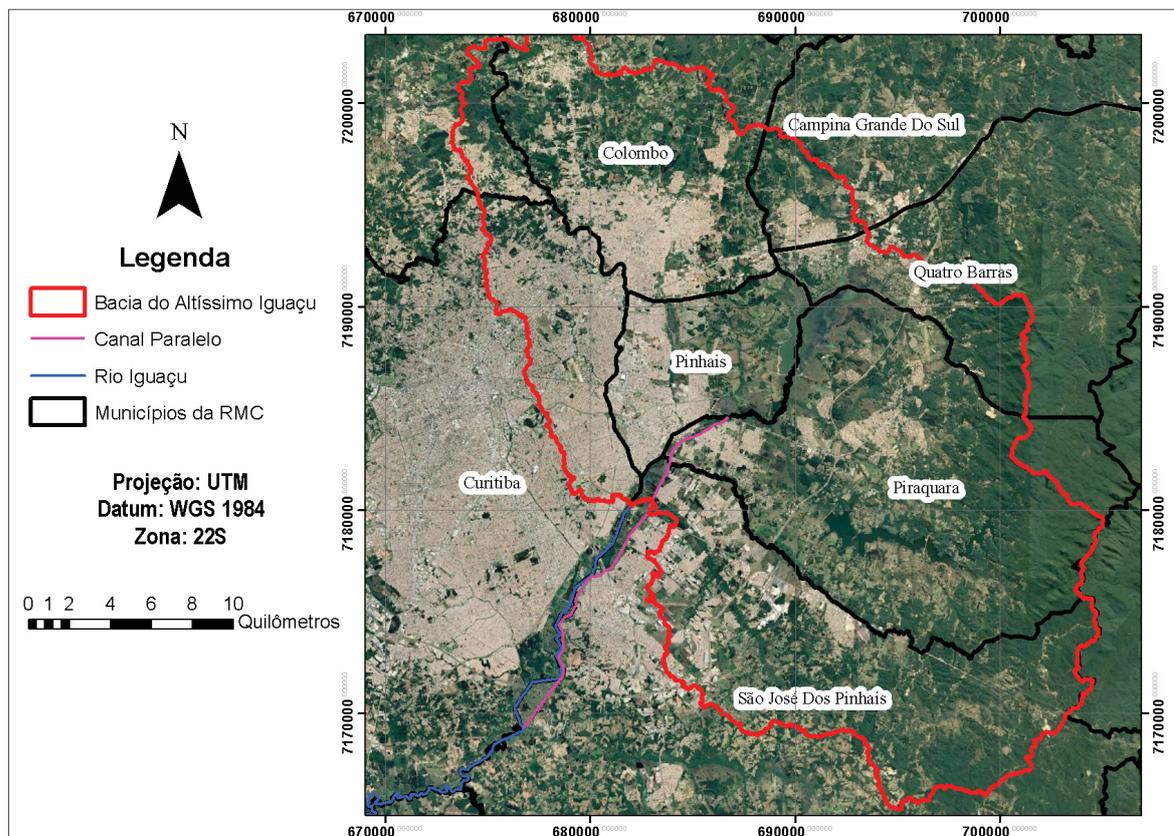
A vegetação remanescente na área é principalmente de Floresta Ombrófila Mista, chamada também de Floresta de Araucária (IPARDES, 2013–2014). As formações geológicas presentes na bacia tem origem no período Proterozóico Inferior até período Cenozóico, sendo que a principal formação presente na região é a Formação Guabirutuba, caracterizada como depósitos arenosos, argilosos e conglomeráticos (CUNHA, 2011; ITCG, 2008b).

Além disso, os solos predominantes na bacia são os latossolos e os cambissolos (ITCG, 2008c). Os latossolos são solos formados por materiais minerais, geralmente são muito profundos,

apresentando os horizontes A, B e C com pouca diferenciação entre eles, com textura argilosa e bem drenados (SANTOS *et al.*, 2018; IAC, 1999a). Os cambissolos são solos pouco profundos, com horizonte B pouco desenvolvido, formado por minerais herdados de rochas, com grande variação de textura e, por consequência, podem variar entre fortemente até imperfeitamente drenados (SANTOS *et al.*, 2018; IAC, 1999b).

Em relação ao uso e ocupação do solo, a bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu é composta principalmente por áreas urbanas, mas também conta com algumas regiões, sobretudo próximas a Serra do Mar, de uso misto do solo (IPARDES, 2010–2014). Na bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu ficam localizadas porções de oito cidades da RMC, inclusive parte da cidade de Curitiba, estas cidades estão entre as cidades mais populosas do Estado do Paraná, sendo que a população presente na bacia somava aproximadamente 814,52 mil habitantes em 2010 (IBGE, 2010; IPPUC, 2021). A mancha urbana na bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu pode ser observada na Figura 17 em que é possível notar que a parcela mais ocidental da bacia, onde estão as sub-bacias do rio Atuba e do rio Palmital, tem um adensamento populacional maior, enquanto a parcela oriental da bacia é menos ocupada.

FIGURA 17 – Imagem de satélite da área da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu do ano de 2021



FONTE: Adaptado do *Google Earth Pro*

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Dados monitorados da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu

A bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu conta com monitoramento fluviométrico em quase todos os rios principais apresentados na Figura 16. Entretanto, existem muitas falhas nos dados, a estação Vargem Grande, por exemplo, não conta com registros nos meses de janeiro e fevereiro no ano de 2005, e a estação Olaria tem falta de registro de dados nos meses de maio e dezembro de 2005. Muitas estações não se encontram atualmente em operação e as séries de dados disponíveis das estações localizadas nas sub-bacias mais urbanizadas vão no máximo até os anos de 2011 e 2012. Além disso, em todas as estações existentes os dados de vazão são dados diários, obtidos a partir da média de leituras de nível feitas duas vezes ao dia e convertidas em vazão pelas curvas-chave de cada estação. Para a modelagem hidrológica e obtenção dos hidrogramas no início do rio Iguaçu e no Canal Paralelo foram utilizados os dados de seis estações fluviométricas que estão descritas na Tabela 1 a seguir.

TABELA 1 – Dados das estações fluviométricas

Nome	Longitude	Latitude	Código ANA*	Último ano com dados observados disponíveis
BR-277	49° 11' 21" O	25° 29' 00" S	65009000	Março de 2015
Autódromo	49° 11' 52" O	25° 26' 48" S	65007046	Fevereiro de 2012
Vargem Grande	49° 10' 02" O	25° 26' 35" S	65056055	Dezembro de 2012
Ponte PR-415	49° 07' 16" O	25° 27' 02" S	65004995	Em operação
Olaria	49° 07' 06" O	25° 26' 27" S	65003950	Dezembro de 2015
Fazendinha	49° 08' 48" O	25° 31' 09" S	65010000	Maio de 2020

FONTE: Adaptado de ANA (2020) e ÁGUASPARANÁ (2020)

LEGENDA: * Agência Nacional de Águas

Os dados de chuva foram obtidos de quatro estações pluviométricas distribuídas na bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu. As estações selecionadas apresentam dados diários de chuva e não contém falhas nas séries de dados para os períodos de simulação. Os dados referentes às estações pluviométricas estão descritos na Tabela 2 a seguir.

TABELA 2 – Dados das estações pluviométricas

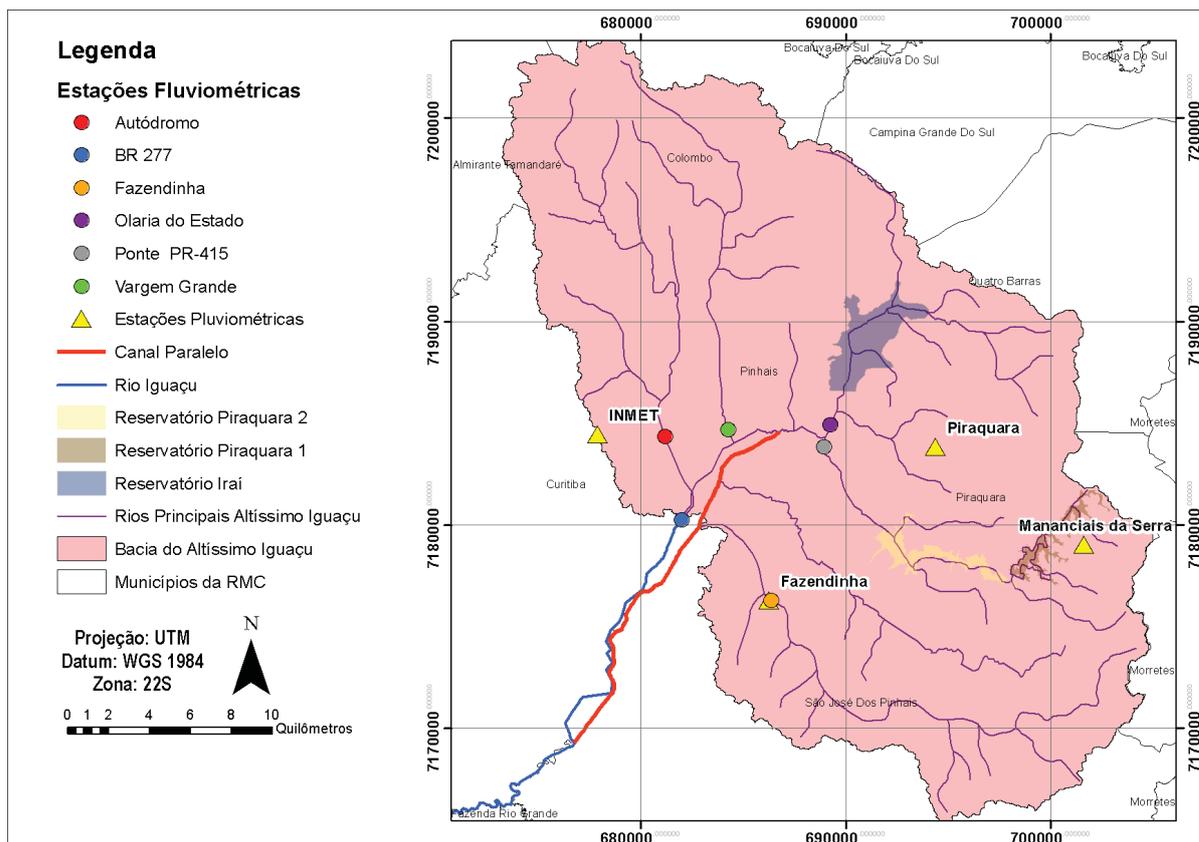
Nome	Longitude	Latitude	Código ANA *
INMET	49° 13' 51" O	25° 26' 47" S	2549006
Mananciais da Serra	49° 59' 38" O	25° 29' 33" S	2548041
Fazendinha	49° 08' 48" O	25° 31' 09" S	2549017
Piraquara	49° 04' 01" O	25° 27' 00" S	2549004

FONTE: Adaptado de ANA (2020) e ÁGUASPARANÁ (2020)

LEGENDA: * Agência Nacional de Águas

A localização das estações fluviométricas e pluviométricas pode ser observada na Figura 18.

FIGURA 18 – Localização das estações fluviométricas e pluviométrica na bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu



FONTE: Autora (2022)

3.2.2 Modelo Digital de Elevação e dados topográficos

A utilização do Modelo de Digital de Elevação (MDE) da área da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu foi fundamental para realizar a preparação de dados relativos ao terreno, como

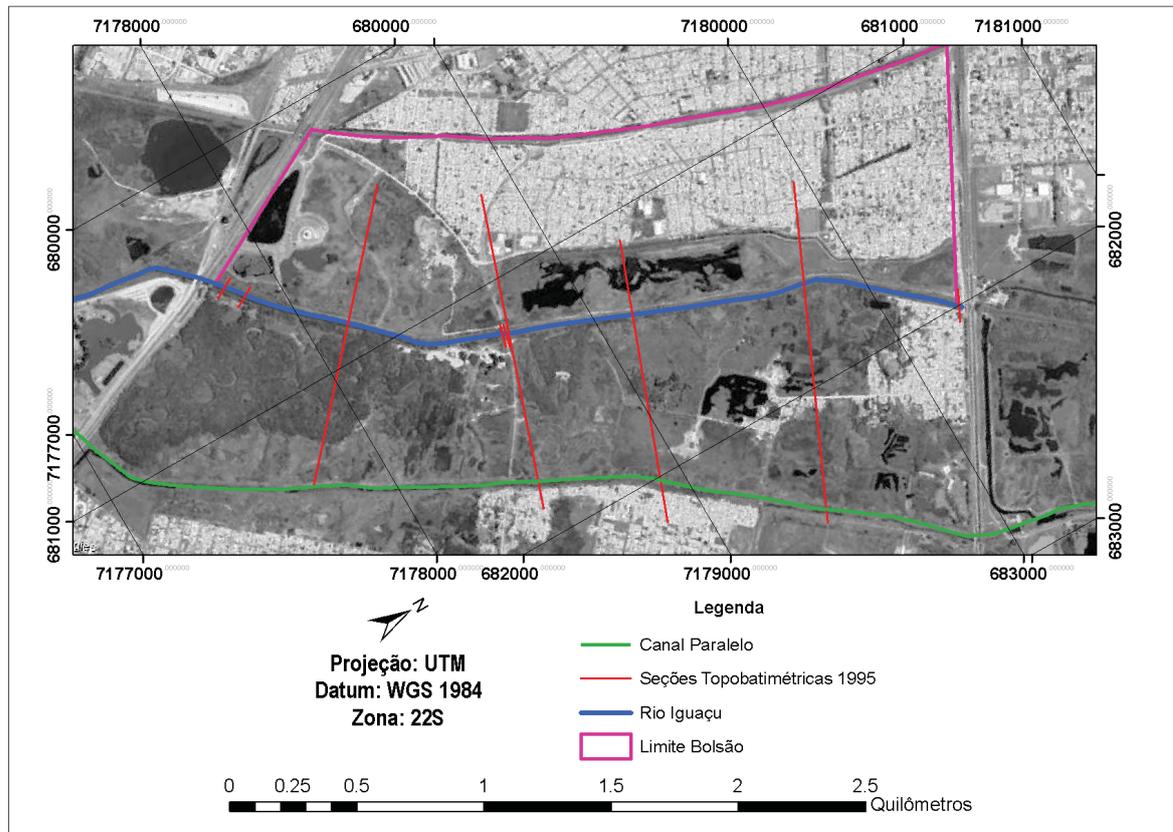
declividade média, delimitação das sub-bacias e estimativa do tempo de concentração de cada sub-bacia, para serem posteriormente aplicados no modelo hidrológico.

Os MDE foram obtidos do radar polarimétrico (PALSAR) do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) lançado em 2006 e encerrado em 2011 pela missão japonesa *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). Os MDE encontram-se no formato GeoTIFF, possuindo resolução que varia entre 12,5 m e 30 m e estão disponíveis gratuitamente no *site* do *Alaska Satellite Facility* que faz parte do Instituto Geográfico da *University of Alaska Fairbanks* (ASF, 2021a; ASF, 2021b).

Além dos MDE do satélite ALOS-PALSAR, foram utilizadas curvas de nível com melhores precisões para gerar um arquivo no formato GeoTIFF e avaliar as manchas de inundação. Parte do Bolsão Audi-União passou por levantamentos topográficos feitos ou contratados pela COHAB-CT que foram disponibilizados para utilização neste trabalho. O primeiro levantamento é do ano de 2008 e foi realizado pela empresa SVN Engenharia de Aerolevantamentos LTDA, possuindo curvas de nível de 1 em 1 metro, além de pontos cotados com precisão milimétrica. O segundo levantamento foi realizado em 2014 pela empresa Gaia Sul Ambiental, possuindo curvas de 1 em 1 metro e pontos cotados com precisão centimétrica. Para as áreas não compreendidas pelos levantamentos citados anteriormente, foram utilizadas curvas de nível de 1 em 1 metro para Curitiba de levantamentos feitos em 1992 e 2001 fornecidas pelo IPPUC e curvas de nível de 1 em 1 metro para o município de São José dos Pinhais fornecidas pela Prefeitura Municipal de São José dos Pinhais.

Para representar a calha do rio Iguaçu no trecho estudado foram utilizados dados do levantamento topobatimétrico realizado pela empresa AGRITEC S.A. em 1995 para o PRA-01 e disponibilizados pela COMEC para este trabalho. A localização aproximada das seções topobatimétricas levantadas está representada na Figura 19, ao total foram levantadas nove seções no trecho de estudo. Apesar de algumas seções se estenderem em boa parte da várzea do rio Iguaçu, muitas alterações ocorreram no relevo desde 1995, inclusive com as obras do dique, das lagoas de acumulação e aterros para construção de novas áreas residenciais, portanto, os dados topobatimétricos foram utilizados apenas para representar o leito menor do rio Iguaçu. A planície de inundação foi representada pelas curvas de nível mais atuais que apresentam as mudanças de relevo citadas anteriormente.

FIGURA 19 – Localização das seções topobatimétricas levantadas em 1995



FONTE: Autora (2022) e adaptado do *Google Earth Pro*

Para o Canal Paralelo não foi possível obter levantamentos das seções transversais no trecho estudado, entretanto foi possível obter o perfil longitudinal do canal e uma descrição das seções a partir do projeto do Canal Paralelo (CONSÓRCIO, 1997). Desta forma, a calha do Canal Paralelo foi representada por seções trapezoidais de 40 metros de largura, 3 metros de altura e 28 metros de base, com uma pequena seção de estiagem de 8 metros de largura e 2 metros de base, com profundidade variável, seguindo o perfil longitudinal disponibilizado.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Chuva de projeto

A estimativa da intensidade de precipitação em uma bacia hidrográfica é uma etapa essencial na determinação das vazões de projeto de obras de controle de inundações e de drenagem urbana e, neste caso, a precipitação estimada pode ser denominada chuva de projeto. A chuva de projeto é um evento crítico estimado a partir do tratamento estatístico de dados observados de precipitação. Segundo Voorhees e Wenzel (1984 apud BEMFICA *et al.*, 2000), para um tempo de recorrência definido, a chuva de projeto pode ser determinada pela intensidade média, pela duração do evento e pela distribuição temporal da chuva (hietograma).

O tempo de recorrência (TR) indica o inverso da probabilidade de um evento de chuva de

mesma intensidade ser igualado ou superado e é escolhido conforme as características de cada projeto. Em relação a duração do evento pluvial, ela deve ser escolhida de forma que seja longa o suficiente para que toda a bacia contribua para o local de estudo e pode ser aproximada pelo tempo de concentração da bacia. Para a representação do hietograma optou-se neste estudo pelo método dos blocos alternados descrito em detalhes por Filho e Marcellini (1995). A intensidade da chuva foi estimada pela curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência) determinada por Fendrich *et al.* (1989) para o posto pluviométrico Prado Velho em Curitiba que é representada pela Equação 3.1.

$$i = \frac{3221,07 \times TR^{0,258}}{(t_{ch} + 26)^{1,01}}, \quad (3.1)$$

onde i representa a intensidade em mm/h ; TR representa o tempo de recorrência em anos; t_{ch} representa a duração da chuva em minutos.

3.3.2 Modelagem hidrológica

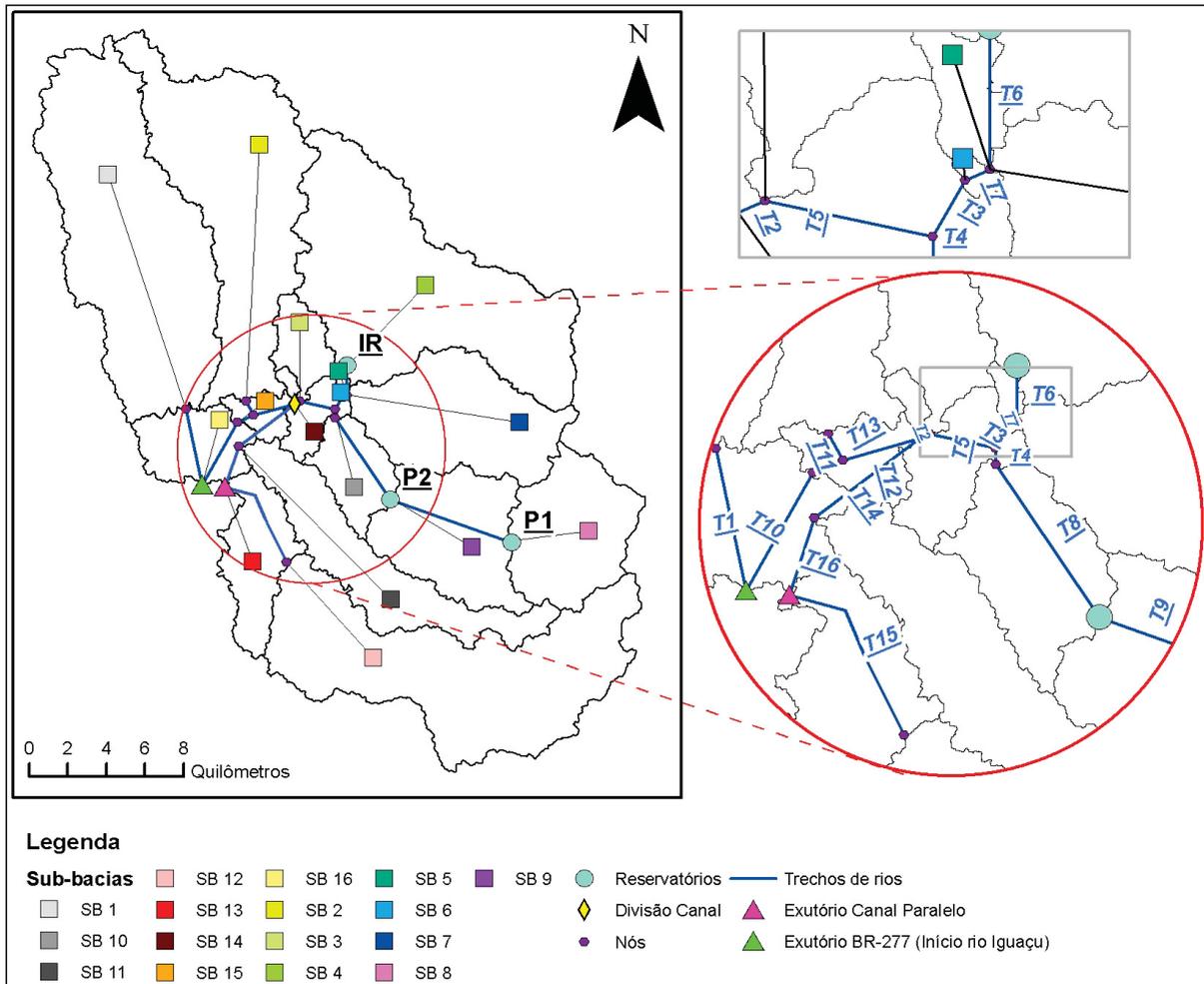
A modelagem hidrológica foi realizada utilizando o *software* HEC-HMS descrito no item 2.2.1. Os métodos selecionados no programa para determinar os hidrogramas de projeto foram o método SCS *Curve Number* utilizado para a separação do escoamento superficial, o método da curva de recessão para estimar o escoamento subterrâneo e o hidrograma unitário de Clark para a transformação de chuva efetiva em vazão. Estes métodos serão explicados com mais detalhes a seguir, entretanto, inicialmente serão apresentadas a topologia da rede de drenagem utilizada e as condições inseridas no modelo para representar as obras hidráulicas existentes na bacia.

3.3.2.1 Topologia da rede de drenagem

Como citado no capítulo 2.2.1, no programa HEC-HMS são inseridos os dados referentes a bacia hidrográfica de estudo, como as sub-bacias e suas áreas, trechos de rios, confluências, reservatórios e desvios. Para a realização da modelagem hidrológica a bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu foi discretizada em 16 sub-bacias e quatro diferentes topologias foram utilizadas.

A primeira topologia é a topologia que representa a atual situação da bacia, em que são representados os reservatórios e o Canal Paralelo, apresentada na Figura 20. Os reservatórios foram denominados "IR"(reservatório Iraí), "P1"(reservatório Piraquara I) e "P2"(reservatório Piraquara 2).

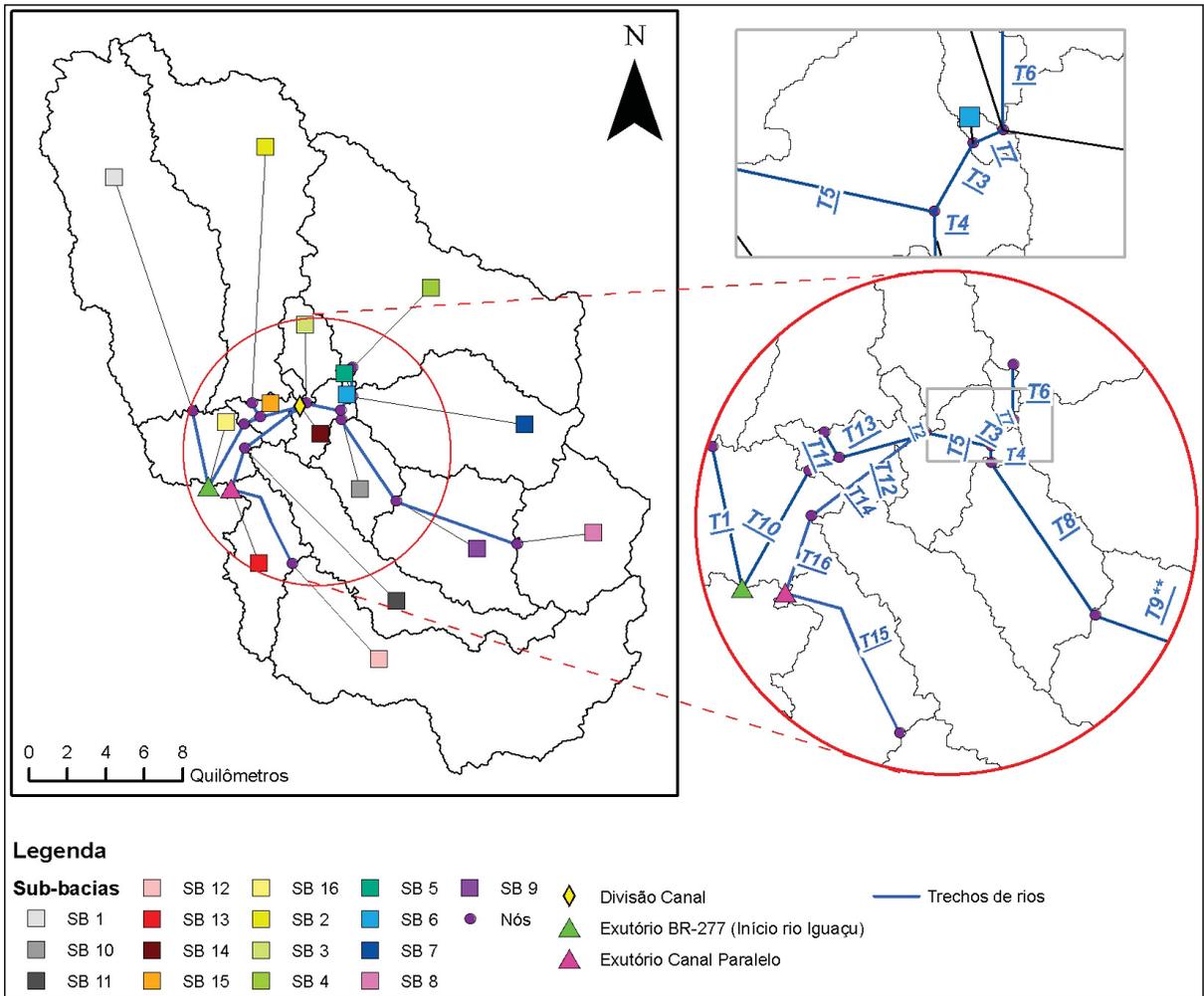
FIGURA 20 – Topologia atual



FONTE: Autora (2022)

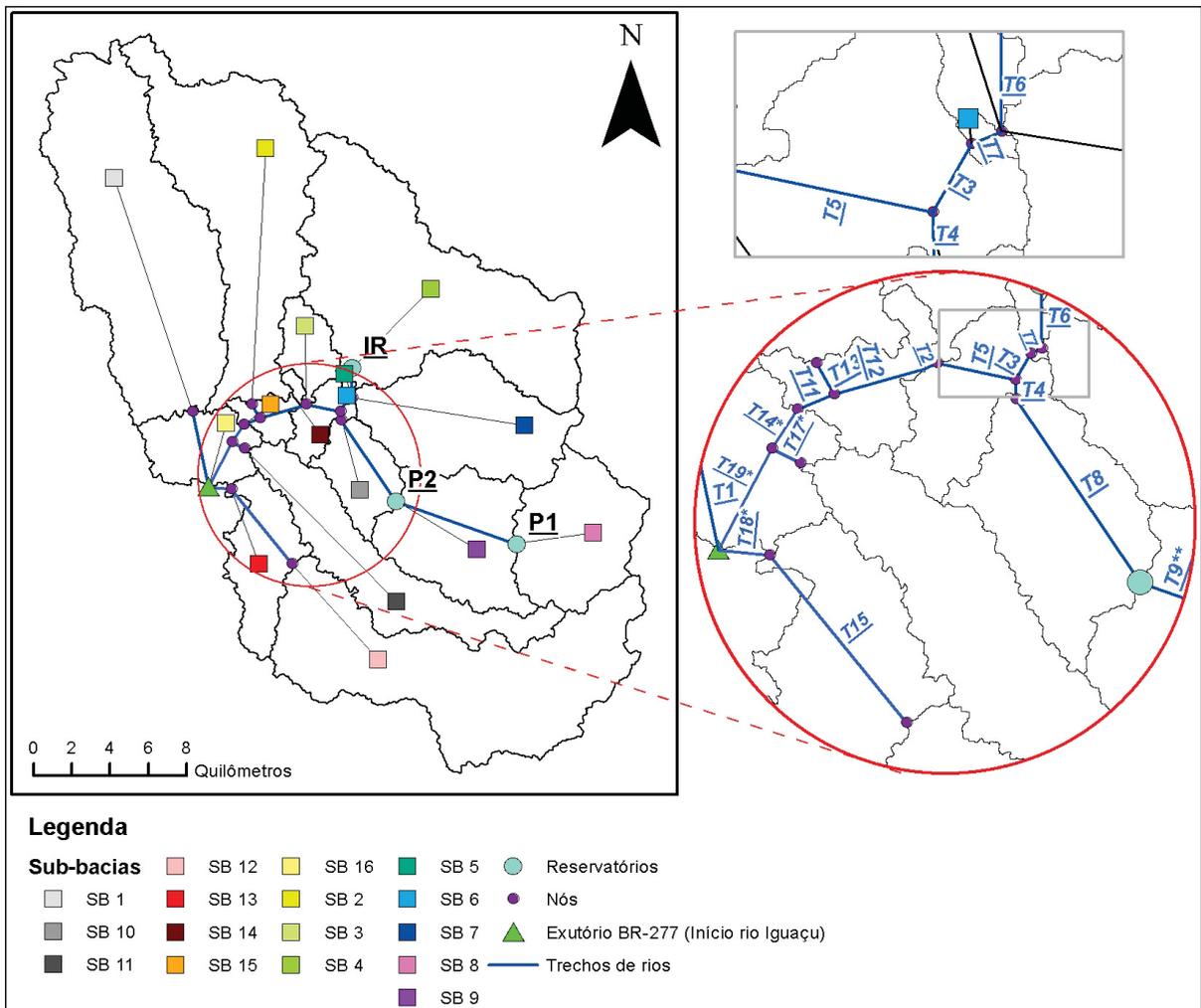
As outras topologias, apresentadas nas figuras a seguir, indicam cenários fictícios, que foram criados para a avaliação das obras hidráulicas implementadas na bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu, sendo eles: cenário sem os reservatórios (SR), cenário sem o Canal Paralelo (SC) e cenário sem os reservatórios e sem o Canal Paralelo (SR/SC).

FIGURA 21 – Topologia sem os reservatórios (SR)



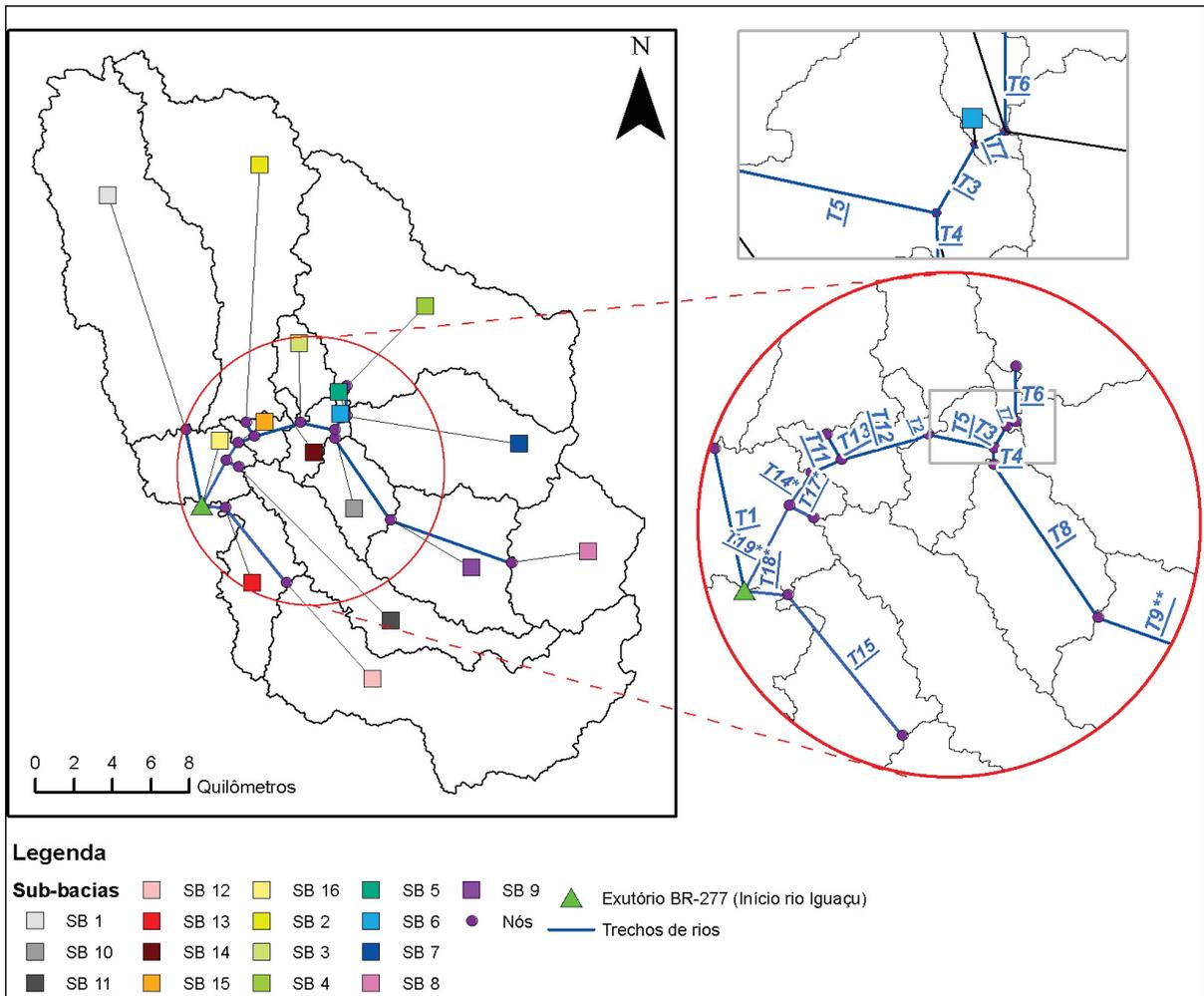
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 22 – Topologia sem o Canal Paralelo (SC)



FONTE: Autora (2022)

FIGURA 23 – Topologia sem os reservatórios e sem o Canal Paralelo (SR/SC)



FONTE: Autora (2022)

Para representação da propagação de ondas de cheias em rios foi selecionado o método de Muskingum-Cunge. Para isto é necessário inserir no HEC-HMS informações sobre o formato geométrico do trecho, largura da base, declividade das paredes (H/V), comprimento do trecho (L), coeficiente de rugosidade de Manning (n), declividade do trecho (S) e vazão indexada. Para isto, foram utilizadas características aproximadas obtidas a partir de dados levantados em campo e apresentados em SUDERHSA (2002g), SUDERHSA (2002i), SUDERHSA (2002j), SUDERHSA (2002k) e CONSÓRCIO (1997). Os valores de coeficiente de rugosidade de Manning foram estimados por meio de calibração, conforme será explicado na seção 3.3.2.7. Na tabela 3 são apresentadas as características adotadas nos trechos, no trecho T9 não foi utilizado nenhum método de propagação devido a proximidade dos reservatórios, os trechos marcados com "*" e "**" são trechos fictícios utilizados nas simulações dos cenários "SC", "SR" e "SR/SC".

TABELA 3 – Características dos trechos de rios

Trecho	Formato	Base (m)	H/V	L (m)	n	S (m/m)	Q (m^3/s)
T1	Retângulo	20	-	4551	0,04	0,0005	90,05
T2	Trapézio	12	1,25	425	0,04	0,0002	39,33
T3	Trapézio	7	1,67	856	0,05	0,0002	19,33
T4	Retângulo	15	-	670	0,04	0,0005	19,35
T5	Trapézio	12	1,25	2745	0,04	0,0002	39,33
T6	Trapézio	7	1,67	1688	0,05	0,0002	19,33
T7	Trapézio	7	1,67	844	0,05	0,0002	19,33
T8	Retângulo	12	-	7986	0,04	0,0005	15,00
T10	Trapézio	20	1,25	3830	0,04	0,0005	81,86
T11	Trapézio	20	1,25	861	0,04	0,0035	216,58
T12	Trapézio	12	1,25	2554	0,04	0,0003	48,17
T13	Trapézio	10	1,67	828	0,04	0,0005	40,96
T14	Trapézio	18	2	3900	0,04	0,0003	40,85
T15	Retângulo	15	-	7832	0,04	0,0004	37,40
T16	Trapézio	23	2	2600	0,04	0,0008	85,61
T9**	Retângulo	10	-	11750	0,04	0,0005	12,13
T14*	Trapézio	20	1,25	930	0,04	0,0005	81,86
T17*	Retângulo	10	-	700	0,04	0,0013	14,87
T18*	Retângulo	15	-	840	0,04	0,0004	37,40
T19*	Trapézio	20	1,25	2900	0,04	0,0005	81,86

FONTE: Autora (2022) e adaptado de SUDERHSA (2002g), SUDERHSA (2002i), SUDERHSA (2002j), SUDERHSA (2002k) e CONSÓRCIO (1997)

As características fisiográficas das sub-bacias, como área, comprimento do talvegue principal e declividade média, foram obtidas a partir do MDE do satélite ALOS-PALSAR e estão apresentadas na Tabela 4.

TABELA 4 – Características fisiográficas das sub-bacias

Sub-bacia	Área (km^2)	L (m)	Declividade Média (%)
SB 1	114,19	28.895,50	11,14
SB 2	93,19	24.087,33	10,85
SB 3	10,97	6.913,31	9,56
SB 4	110,10	20.394,65	10,74
SB 5	1,00	1.761,29	8,11
SB 6	0,15	1.082,29	10,16
SB 7	52,93	18.531,55	11,38
SB 8	41,30	11.562,81	21,10
SB 9	43,90	16.385,69	10,22
SB 10	16,90	10.841,73	7,02
SB 11	44,00	28.056,01	8,07
SB 12	105,56	43.379,62	12,93
SB 13	24,21	16.288,38	5,60
SB 14	9,50	5.767,81	6,00
SB 15	6,30	5.070,69	3,90
SB 16	19,93	7.996,67	4,78

FONTE: Autora (2022)

3.3.2.2 Características das obras hidráulicas

A bacia hidrográfica do Altíssimo Iguazu conta com diversas obras hidráulicas que alteram a vazão no rio Iguazu, entre elas três reservatórios de água para abastecimento da RMC, o Canal Paralelo, dois pontos principais de captação de água nos rios Iraí e Iguazu, além de alguns pontos de menor captação de água em afluentes do rio Iguazu. Neste estudo os pontos de captação de água não foram inseridos no modelo, entretanto os reservatórios e a divisão do rio Iraí no Canal Paralelo foram considerados.

No HEC-HMS os reservatórios foram inseridos como elementos denominados "*Reservoirs*", em que para representar o amortecimento das ondas de cheias foram inseridas no modelo tabelas de cota-volume e volume-descarga, que foram obtidos de SUDERHSA (2002i), estas tabelas estão apresentadas a seguir.

TABELA 5 – Reservatório Iraí

Cota (m)	Volume (m^3)	Descarga (m^3/s)
888,0	0	0
888,1	1.460.000	1,34
888,2	2.920.000	3,8
888,3	4.380.000	6,98
888,4	5.840.000	10,75
888,5	7.300.000	15,02

FONTE: SUDERHSA (2002i)

TABELA 6 – Reservatório Piraquara I

Cota (m)	Volume (m^3)	Descarga (m^3/s)
907,2	0	0
907,5	949.000	2,87
908,5	3.958.000	14,32

FONTE: SUDERHSA (2002i)

TABELA 7 – Reservatório Piraquara II

Cota (m)	Volume (m^3)	Descarga (m^3/s)
890,0	0	0
890,5	303.000	15,03
891,5	984.000	49,63
892,5	1.725.000	141,37

FONTE: SUDERHSA (2002i)

Para representar o efeito dos reservatórios o programa HEC-HMS utiliza o método de Puls Modificado, que utiliza uma aproximação em uma dimensão da equação da continuidade discretizada no intervalo de tempo Δt . Utilizando a aproximação por diferenças finitas, a equação da continuidade dada pelo método de Puls Modificado é representada pela Equação 3.2.

$$\frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{O_t + O_{t+1}}{2} = \frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t}, \quad (3.2)$$

onde I_t e I_{t+1} representam as vazões de entrada nos tempos t e $t + 1$ (m^3/s); O_t e O_{t+1} representam as vazões de saída nos tempos t e $t + 1$ (m^3/s); S_t e S_{t+1} representam o volume armazenado no reservatório nos tempos t e $t + 1$ (m^3).

A Equação 3.2 pode ser rearranjada conforme a Equação 3.3 apresentada a seguir.

$$\frac{2S_{t+1}}{\Delta t} + O_{t+1} = I_t + I_{t+1} + \frac{2S_t}{\Delta t} - O_t \quad (3.3)$$

Na Equação 3.3, os termos a direita são conhecidos, já que I_t e I_{t+1} são vazões dadas pelo hidrograma de entrada, como condição inicial O_t foi considerado igual a I_t e S_t é dado em função de O_t de acordo com as tabelas de volume-descarga inseridas no modelo. Os termos da esquerda S_{t+1} e O_{t+1} podem então ser estimados utilizando a Equação 3.3 e utilizando a relação estabelecida pelas tabelas de volume-descarga.

Além dos reservatórios, foi inserido no modelo a divisão do rio Iraí no Canal Paralelo, utilizando o elemento "*diversion*" apresentado no HEC-HMS. Para isto, é necessário inserir no programa uma relação em que a vazão que é desviada para o canal é dada em função da vazão na porção a montante do rio Iraí (antes do início do Canal Paralelo). Para determinação dessa função, foi criado um modelo simplificado no *software* HEC-RAS em que foram inseridos o trecho do rio Iraí entre a ponte PR-415 até o início do rio Palmital e o trecho do Canal Paralelo desde seu início até o início do rio Itaqui, utilizando uma simulação com vazão permanente e utilizando

como condição de contorno a jusante a altura norma. A relação estabelecida está descrita na Tabela 8.

TABELA 8 – Regra hidráulica Canal Paralelo

Vazão Iraí Montante (m^3/s)	Vazão Canal Paralelo (m^3/s)
0,0	0,0
15,7	5,0
26,2	10,0
45,7	20,0
65,0	30,0
83,9	40,0
103,69	50,0
123,13	60,0
127,02	62,0

FONTE: Autora (2022)

3.3.2.3 Método SCS *Curve Number*

O método SCS *Curve Number* é um dos métodos disponíveis no HEC-HMS para estimar a precipitação efetiva, que corresponde a parcela da precipitação que não foi interceptada ou infiltrada. Tal método foi apresentado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos em 1975, sendo caracterizado por apresentar um reduzido número de parâmetros e uma relação entre os parâmetros e características físicas da bacia (TUCCI, 2005). Neste método a precipitação efetiva depende de quatro variáveis: a umidade anterior do solo, a cobertura do solo, o uso do solo e a precipitação ocorrida (USACE, 2000). A formulação da precipitação efetiva é representada pelas Equações 3.4 e 3.5.

$$P_e = \frac{(P_r - I_a^2)}{(P_r - I_a + S)}, \quad (3.4)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254, \quad (3.5)$$

onde P_e representa a precipitação efetiva (mm); P_r representa a precipitação total (mm); I_a representa a abstração inicial (mm); S representa o armazenamento do solo (mm); CN é o parâmetro *Curve Number*.

A Equação 3.4 é válida quando a precipitação total é maior do que a abstração inicial ($P > I_a$), caso contrário, a precipitação efetiva é igual a zero. Este método estima que para condições médias I_a pode ser definido como 20% da capacidade de armazenamento do solo (USACE, 2000).

A capacidade de armazenamento do solo pode ser estimada a partir do parâmetro CN, que indica o potencial de infiltração do solo e está associado a umidade anterior do solo, tipo hidrológico do solo e ao uso e ocupação do solo. O valor de CN pode variar de 1 a 100, sendo

que 100 indica um solo 100% impermeável, enquanto 1 indica um solo totalmente permeável (TUCCI, 2005).

A classificação hidrológica do solo é dada pelos seguintes grupos (TUCCI, 2005):

- Grupo A: solos arenosos com pouco argila e silte, produzindo alta infiltração e baixo escoamento;
- Grupo B: solos arenosos menos profundos e menos permeáveis que o tipo A, porém com permeabilidade superior a média;
- Grupo C: solos com maior percentagem de argila e pouco profundos, com escoamento superficial acima da média e capacidade de infiltração abaixo da média;
- Grupo D: solos que geram a maior proporção de escoamento superficial, contendo argilas expansivas e pouco profundas.

Ao conhecer o grupo do solo, é possível definir o valor de CN para condições médias de umidade do solo conforme a Tabela 21 para áreas agrícolas e a Tabela 22 para áreas urbanas presentes no Anexo A. As condições médias de umidade do solo correspondem à umidade da capacidade de campo (TUCCI, 2005).

Como em uma bacia hidrográfica há muita variação do tipo de solo e do uso e ocupação do solo, também há variação nos valores de CN para cada região. Assim, o valor de CN para representar toda a bacia pode ser calculado por uma média ponderada, representada pela Equação 3.6 (USACE, 2000).

$$CN = \frac{\sum A_i \times CN_i}{\sum A_i}, \quad (3.6)$$

onde CN representa o valor final de CN utilizado para calcular o escoamento superficial; i representa um índice correspondente as subdivisões da bacia em áreas com o mesmo tipo de solo e uso e ocupação de solo; A_i representa área de cada subdivisão; CN_i representa o CN de cada subdivisão.

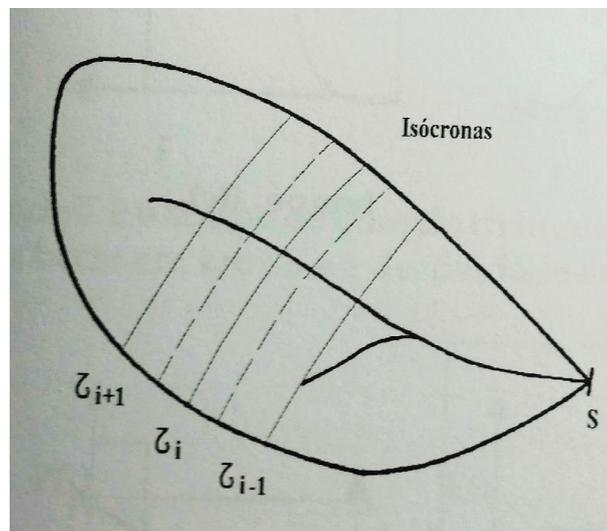
O processo utilizado para a obtenção dos valores de CN para as sub-bacias estudadas neste trabalho será descrito no item 3.4.1.

3.3.2.4 Hidrograma Unitário de Clark

Um hidrograma representa um gráfico da vazão em função do tempo em determinado ponto de um rio ou canal. Um hidrograma unitário (HU) é definido como o hidrograma gerado devido a uma chuva efetiva de 1 cm de altura distribuída de forma uniforme sobre a área de drenagem, com intensidade constante e duração definida. Assim, um hidrograma unitário é considerado único para cada bacia hidrográfica (CHOW *et al.*, 1988). Desta forma, conhecendo-se o HU característico da uma bacia hidrográfica para determinada duração de uma precipitação unitária, é possível definir, por proporção, o hidrograma gerado por outras precipitações efetivas desde que essas tenham a mesma duração da chuva unitária.

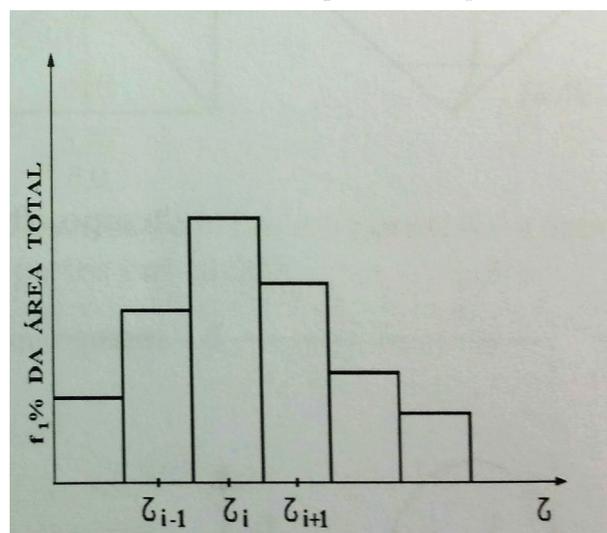
O hidrograma unitário de Clark representa a transformação de chuva-vazão por meio de dois processos: translação e atenuação (USACE, 2000). O processo de translação consiste no movimento da água ao longo da bacia até o exutório e no modelo de Clark é representado através do chamado histograma tempo-área (HTA). O HTA baseia-se na áreas entre isócrinas espaçadas igualmente (A_i), ou seja, na área entre as linhas que unem os pontos da bacia que tem o mesmo tempo de concentração em relação ao exutório da bacia (Figura 24). Assim, o HTA é uma representação gráfica onde a ordenada é dada pela relação A_i/A_t , onde A_t é a área total da bacia, e a abscissa é dada pelo tempo de contribuição de cada área A_i até o exutório (Figura 25) (TUCCI, 2005). Deste modo, a translação da chuva é dada ao multiplicar a precipitação total pelo HTA.

FIGURA 24 – Isócronas



FONTE: Tucci (2005)

FIGURA 25 – Histograma Tempo-Área



FONTE: Tucci (2005)

No HEC-HMS o HTA é estimado de forma sintética pelas Equações 3.7 e 3.8 (USACE, 2000).

$$\frac{A_i}{A_t} = 1,414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1,15} \text{ para } t \leq \frac{t_c}{2}, \quad (3.7)$$

$$\frac{A_i}{A_t} = 1 - 1,414 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1,15} \text{ para } t \geq \frac{t_c}{2}, \quad (3.8)$$

onde A_i representa a área acumulada que contribui para a vazão em um tempo t ; A_t representa a área total da bacia; t representa o tempo em unidades de tempo de concentração; t_c representa o tempo de concentração da bacia hidrográfica.

Além do processo de translação, o modelo de Clark leva em conta o efeito de armazenamento, já que considera que a bacia se assemelha a um reservatório (TUCCI, 2005). Este efeito é estimado pelo modelo de reservatório linear e combina a Equação 3.9 (equação da continuidade) com a Equação 3.10 resultando na Equação 3.11 (USACE, 2000).

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t, \quad (3.9)$$

$$S_t = RO_t, \quad (3.10)$$

$$O_t = C_a I_t + C_b O_{t-1}, \quad (3.11)$$

onde $\frac{dS}{dt}$ representa a taxa de variação do armazenamento no tempo; I_t representa a vazão média de entrada no tempo t ; O_t representa a vazão média de saída no tempo t ; R representa o coeficiente de armazenamento; C_a e C_b são coeficientes de propagação dados pelas Equações 3.12 e 3.13.

$$C_a = \frac{\Delta t}{R + 0,5\Delta t}, \quad (3.12)$$

$$C_b = 1 - C_a, \quad (3.13)$$

Por fim, a vazão média de saída pode ser estimada pela seguinte Equação (USACE, 2000):

$$\bar{O}_{final} = \frac{O_{t-1} + O_t}{2}, \quad (3.14)$$

onde \bar{O}_{final} representa a vazão média de saída; O_{t-1} representa a vazão de saída no tempo $t - 1$; O_t representa a vazão de saída no tempo t .

Desta forma, o modelo do HU de Clark necessita de dois parâmetros, o tempo de concentração (t_c) e o coeficiente de armazenamento R , que podem ser calibrados no HEC-HMS.

3.3.2.5 Tempo de concentração

O método escolhido nesse estudo para estimar o tempo de concentração das sub-bacias foi o *SCS Lag*. A seleção desse método fundamentou-se no fato de que o método é baseado no valor do *Curve Number* e portanto, pode ser utilizado para estimar condições futuras em que ocorre o aumento da urbanização e de áreas impermeáveis, com conseqüente aumento do valor de *CN* e redução do tempo de concentração. O tempo de concentração dado por este método é determinado pela Equação 3.15 (SILVEIRA, 2005).

$$t_c = 0,057 \times \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7} \times L^{0,8} \times Y^{-0,5}, \quad (3.15)$$

onde t_c representa o tempo de concentração (h); CN representa o *Curve Number*; L representa o comprimento do canal principal (km); Y representa a declividade média da bacia (m/m).

3.3.2.6 Escoamento subterrâneo

A vazão em um rio, e conseqüentemente o hidrograma em uma seção do rio, é dada devido a dois componentes: o escoamento superficial e o escoamento subterrâneo. O escoamento superficial é definido em função da precipitação efetiva e neste trabalho foi determinado pelo hidrograma unitário de Clark (item 3.3.2.4).

O escoamento subterrâneo se dá devido à contribuição de aquíferos na vizinhança do rio. Esse processo ocorre quando a água da chuva infiltra no solo, aumentando sua umidade e então abastecendo os aquíferos que contribuem por percolação para a vazão no rio (TUCCI, 2001).

O método para determinação do escoamento subterrâneo selecionado para este trabalho foi o modelo de curva de recessão em que a vazão subterrânea é determinada pela Equação exponencial 3.16 que pode ser simplificada pela Equação 3.17 (USACE, 2000; TUCCI, 2001).

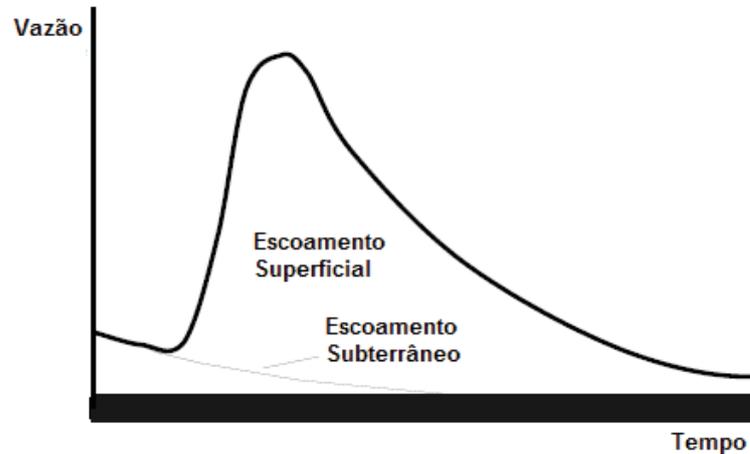
$$Q_t = Q_0 e^{-\gamma t}, \quad (3.16)$$

$$Q_t = Q_0 k^t, \quad (3.17)$$

onde Q_t representa a vazão subterrânea no tempo t ; Q_0 representa a vazão subterrânea inicial; γ representa a constante de decaimento da vazão; k é a constante de recessão.

Segundo USACE (2000), para a aplicação deste modelo no HEC-HMS a vazão subterrânea é dividida em duas partes. Na primeira parte, que ocorre no início da simulação, há um decaimento da contribuição subterrânea (Figura 26), conforme a Equação 3.17, em que Q_0 e k são valores determinados por calibração.

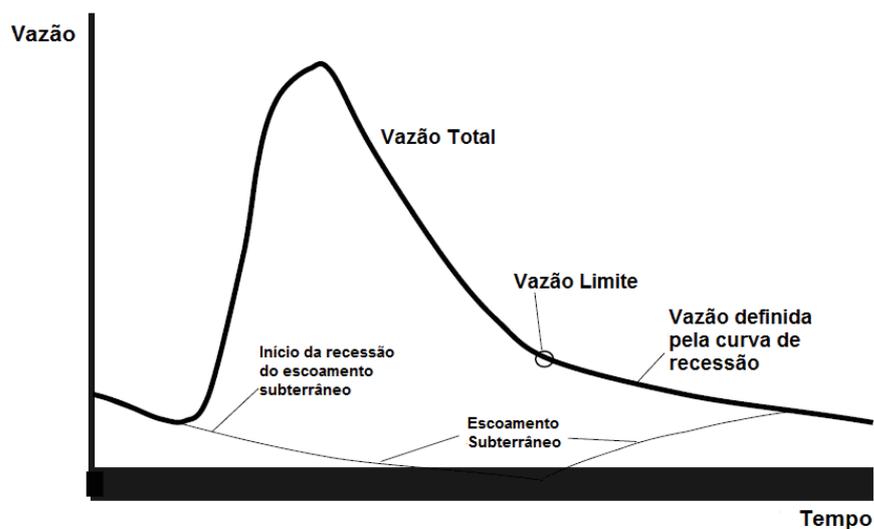
FIGURA 26 – Primeira parte do escoamento subterrâneo



FONTE: Adaptado de USACE (2000)

Esse decaimento ocorre até um tempo t definido por uma vazão limite que ocorre após a vazão de pico. Esta vazão limite é determinada como uma porcentagem da vazão de pico chamada no programa de *Ratio to Peak Flow*. Por exemplo, se a vazão de pico for $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ e o *Ratio to Peak Flow* for definido como 0,10 a vazão limite será $100 \text{ m}^3/\text{s}$ e o decaimento do escoamento subterrâneo ocorrerá até instante de tempo t em que o vazão total do hidrograma atingir $100 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir desse ponto, a vazão total do hidrograma é determinada por uma curva de recessão, conforme a Equação 3.17, em que Q_0 é definida como a vazão limite determinada anteriormente. A vazão subterrânea é então estimada indiretamente, subtraindo-se o escoamento superficial da vazão total estimada (Figura 27).

FIGURA 27 – Escoamento subterrâneo



FONTE: Adaptado de USACE (2000)

Em suma, os parâmetros que devem ser calibrados no modelo de curva de recessão são: a vazão inicial Q_0 , a constante de recessão k e a taxa de vazão de pico "*Ratio to Peak Flow*".

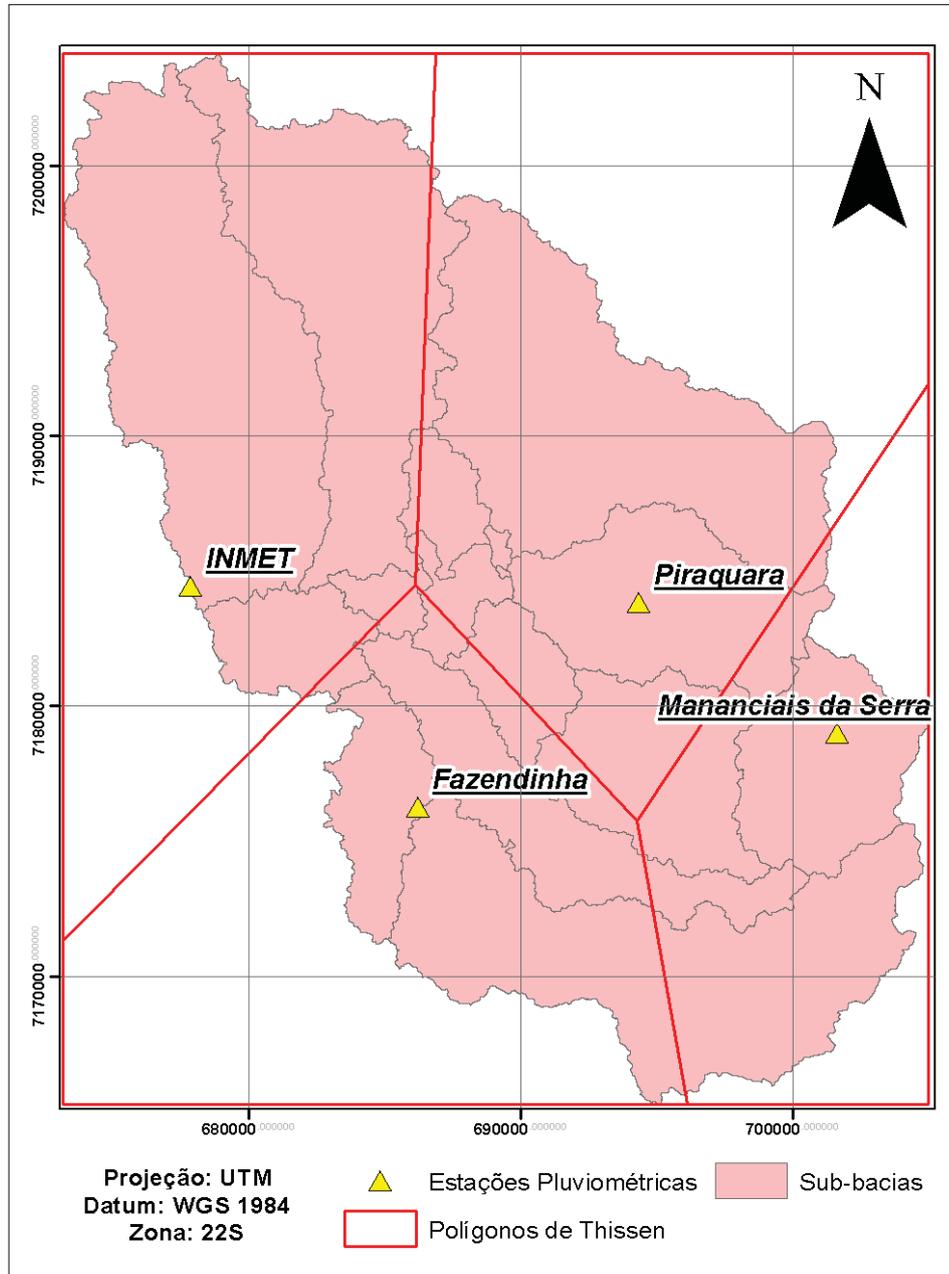
3.3.2.7 Calibração dos parâmetros

Quando existem dados disponíveis de vazão observada é possível realizar o processo de calibração de parâmetros, que consiste na busca em encontrar o melhor conjunto de parâmetros que forneçam os resultados mais próximos aos valores observados (GRACIOSA, 2010). Nesse estudo, os parâmetros *Curve Number* e tempo de concentração utilizados no modelo foram obtidos a partir de equações e procedimentos descritos na literatura. No entanto, o coeficiente de armazenamento do HU de Clark (R), os parâmetros do modelo de curva de recessão e os coeficientes de rugosidade de Manning dos trechos de rios utilizados no modelo foram estimados diretamente por calibração.

Para realizar a calibração foram utilizados eventos ocorridos nos anos de 2007 a 2011 verificados nas estações fluviométricas apresentadas na Figura 18. Para as sub-bacias SB 11 e SB 13, que não contam com estações fluviométricas a jusante de seus respectivos exutórios, foi realizada uma regressão linear utilizando como variáveis independentes as características fisiográficas das outras sub-bacias (área, comprimento do talvegue principal e inclinação média) e como variáveis dependentes os parâmetros calibrados para as outras sub-bacias.

Além disso, devido a ampla área da bacia, decidiu-se por utilizar dados de chuva de quatro estações pluviométricas presentes na bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu, aplicando o método dos polígonos de Thissen para estimar a precipitação ocorrida em cada sub-bacia. Os polígonos determinados podem ser observados na 28.

FIGURA 28 – Polígonos de Thissen



FONTE: Autora (2022)

A calibração foi realizada de forma automática no próprio *software* HEC-HMS. O *software* apresenta dois métodos de calibração e quatro métodos de função objetivo. Os métodos de calibração buscam encontrar os parâmetros que minimizem o valor da função objetivo, enquanto os métodos de função objetivo são índices que representam a qualidade do ajuste da simulação. O método de calibração selecionado neste estudo foi o *Nelder and Mead Algorithm* que consegue fazer uma calibração de um conjunto de parâmetros ao mesmo tempo e utiliza um número de iterações igual a 50 vezes o número de parâmetros a serem ajustados (USACE, 2000).

A função objetivo escolhida foi a *Peak Weighted Root Mean Square Error* (PWRMSE). Essa função calcula o quadrado da diferença entre a vazão simulada e a vazão observada, dando

um peso a cada uma dessas diferenças que é proporcional a magnitude de cada valor observado, assim, quando valores observados são maiores que a média observada o peso é maior do que 1,0, enquanto para valores observados menores que a média observada o peso é menor do que 1,0 (USACE, 2000). A Equação 3.18 representa a formulação da função PWRMSE.

$$PWRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^{obs} + Q_i^{sim})^2 \left(\frac{Q_i^{obs} - Q_{med}^{obs}}{2Q_{med}^{obs}} \right)}{N} \right]^{0,5}, \quad (3.18)$$

onde Q_i^{obs} representa a vazão observada no instante i ; Q_i^{sim} representa a vazão simulada no instante i ; Q_{med}^{obs} representa a vazão média observada; N é igual ao número de dados observados.

Como para cada evento simulado foi realizado um processo de otimização dos parâmetros no HEC-HMS, foram observadas algumas variações nos parâmetros obtidos na calibração para cada evento. Desta forma, decidiu-se utilizar uma média dos parâmetros calibrados para obter os parâmetros finais.

Após esse processo, foi realizada uma análise de desempenho da simulação utilizando o coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE). Esse coeficiente pode variar de $-\infty$ até 1, sendo que 1 indica um ajuste perfeito do modelo aos dados observados (ALE *et al.*, 2012). O coeficiente NSE pode ser estimado pela Equação 3.19

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i^N (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_i^N (Q_i^{obs} - Q_{med}^{obs})^2}, \quad (3.19)$$

De acordo com Moriasi *et al.* (2007), os valores obtidos de NSE podem ser classificados como muito bom, bom, satisfatório e insatisfatório (Tabela 9). Assim, buscou-se que os parâmetros encontrados resultassem em simulações que tivessem ao menos um resultado satisfatório.

TABELA 9 – Classificação do coeficiente NSE

Grau de Performance	NSE
Muito Bom	$0,75 < NSE \leq 1,0$
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$
Satisfatório	$0,50 < NSE \leq 0,65$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,5$

FONTE: Moriasi *et al.* (2007)

3.3.3 Modelagem hidráulica

Neste item são apresentadas as equações matemáticas utilizadas pelo *software* HEC-RAS para escoamento não-permanente em modelos 2-D. Além disso, é apresentado o processo de

determinação dos dados de entrada exigidos pelo programa. Esses dados de entrada referem-se à geometria do rio e do canal, à planície de inundação, às condições de contorno e ao coeficiente de rugosidade de Manning.

3.3.3.1 Formulação matemática

A modelagem hidráulica foi realizada mediante o uso do programa computacional HEC-RAS, considerando o regime de escoamento não permanente e modelagem bidimensional. No modelo 2-D, as características hidráulicas da área de estudo (vazão e profundidade da água) são obtidos mediante a solução numérica das equações de conservação de massa (continuidade) e conservação de quantidade de movimento nas direções x e y .

A equação da continuidade estabelece que a variação de volume de entrada e saída do escoamento no volume de controle é igual a variação do armazenamento dentro do volume de controle (USACE, 2016a). Considerando um fluido incompressível, a equação da continuidade é dada pela Equação 3.20.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0, \quad (3.20)$$

onde H é a cota de elevação superficial da lâmina da água (m); t é o tempo (s); x e y são as direções do escoamento em coordenadas cartesianas (m); h é profundidade da água (m); u e v são as componentes do vetor velocidade nas direções x e y respectivamente (m/s); q é vazão de contribuição lateral por unidade de área ($m^3/s \cdot m^2$).

Ao realizar a integração sobre a superfície horizontal com vetor normal \mathbf{n} , a Equação 3.20 pode ser escrita no seu formato integral, apresentado a seguir pela Equação 3.21.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_A (\mathbf{V} \bullet \mathbf{n}) dA + Q = 0, \quad (3.21)$$

onde Ω é o volume ocupado pelo fluido (m^3); V é o vetor velocidade (m/s); A é a superfície lateral (m^2); Q é a vazão dada por infiltração, precipitação ou evapotranspiração (m^3/s).

No modelo 2-D o terreno estudado é delimitado por uma malha composta por diversas células em que o volume e a área lateral de cada célula são dados em função da cota de elevação superficial da lâmina da água (H). Desta forma, a Equação 3.21 pode ser discretizada com base na malha computacional, resultando na Equação 3.22.

$$\frac{\Omega(H^{t+1}) - \Omega(H^t)}{\Delta t} + \sum_k (\mathbf{V}_k \bullet \mathbf{n}_k) A_k(H) + Q = 0, \quad (3.22)$$

onde k refere-se a face da célula e t é o passo de tempo (s).

A conservação da quantidade de movimento é expressa pela segunda lei de Newton que define que a soma de todas as forças externas que atuam sobre o volume de controle é igual à taxa de variação com o tempo da quantidade de movimento linear do sistema (FOX *et al.*,

2000). O sistema de equações que representa a conservação da quantidade de movimento nas direções x e y respectivamente, é apresentado a seguir:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial(u)}{\partial x} + v \frac{\partial(u)}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v, \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial(v)}{\partial x} + v \frac{\partial(v)}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u, \quad (3.24)$$

onde g é aceleração da gravidade (m/s^2); ν_t é uma propriedade do escoamento chamada de viscosidade turbulenta (m^2/s); c_f é o coeficiente de fricção de fundo ($m^{1/2}/s$); f é o parâmetro de Coriolis (s^{-1}).

Para representar os efeitos da turbulência no escoamento o HEC-RAS considera um processo de difusão turbulenta, cuja taxa é fornecida pela viscosidade turbulenta ν_t , que pode ser estimada pelas Equações 3.25 e 3.26 (USACE, 2016a).

$$\nu_t = D h u_*, \quad (3.25)$$

$$u_* = \sqrt{g R_h S_f} = \frac{n \sqrt{g}}{R_h^{1/6}} |V|, \quad (3.26)$$

onde D é uma constante empírica adimensional que depende da geometria do canal; u_* é a velocidade cisalhante (m/s); R_h é o raio hidráulico (m); S_f é a inclinação da linha de energia (m/m); n é o coeficiente de rugosidade de Manning ($s/m^{1/3}$); $|V|$ é o módulo do vetor de velocidade (m/s).

O coeficiente de fricção de fundo é dado pela equação de Chézy e pode ser estimado utilizando a equação de Manning, resultando na Equação 3.27.

$$c_f = \frac{n^2 g}{R_h^{4/3}} |V|, \quad (3.27)$$

O parâmetro de Coriolis é utilizado para representar o efeito da força horizontal aplicada sobre um objeto devido a rotação da Terra e pode ser estimado pela Equação 3.28.

$$f = 2\omega \text{sen}(\varphi), \quad (3.28)$$

onde ω é igual a 0,00007292115855306587/s e representa a velocidade angular sideral e φ representa a latitude.

O conjunto das equações 3.21, 3.23 e 3.24 formam as chamadas equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível. A hipótese de águas rasas é utilizada, uma vez que a ordem de grandeza dos comprimentos dos corpos de água é bastante superior a ordem de grandeza das profundidades. Desta forma, as acelerações e tensões presentes na direção vertical do escoamento podem ser desprezadas, quando comparadas aos valores presentes no plano horizontal, resultando em um escoamento bidimensional nas direções x e y .

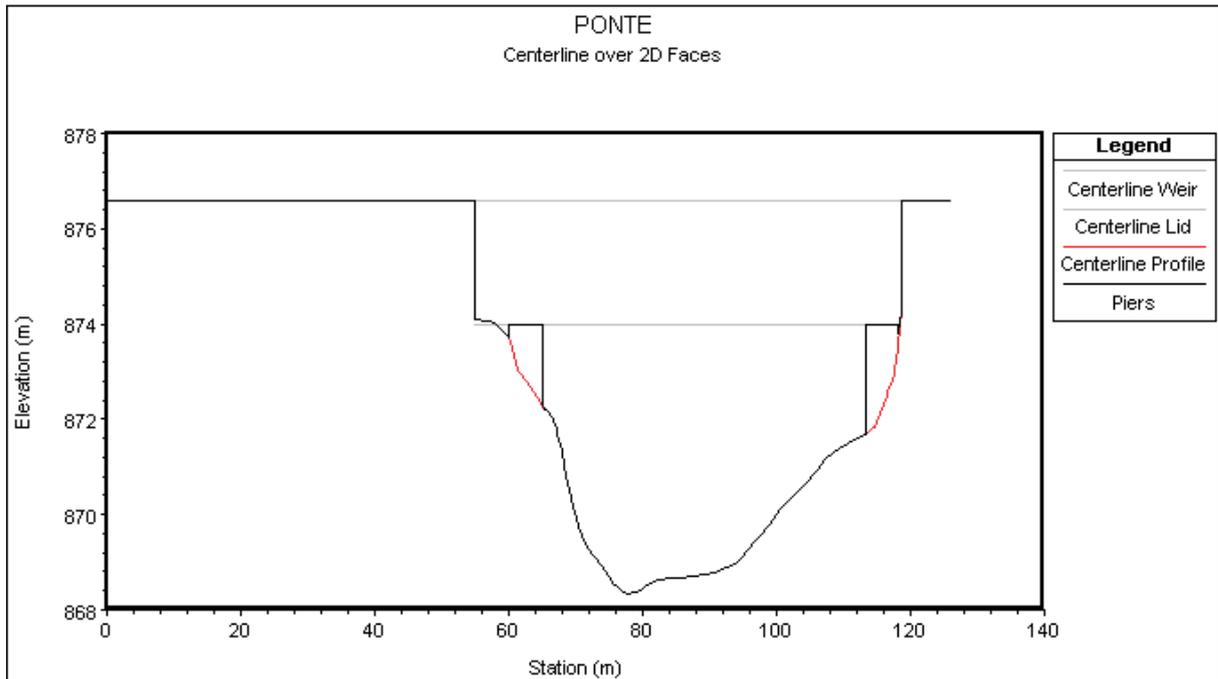
A solução numérica utilizada pelo *software* HEC-RAS para a equação da continuidade (3.20) é feita pelo uso do método de volumes finitos (PATANKAR, 2018). Este método resolve as equações discretizadas sobre uma malha computacional que envolve e representa a área de estudo. A geração da malha computacional é realizada usando a ferramenta "*Geometry/2D Flow Area*" disponível no *software* HEC-RAS. Em relação as equações de conservação de quantidade de movimento (3.23 e 3.24), o *software* HEC-RAS baseia-se tanto no método de volume finitos, como em outras formas de discretização apresentadas com maiores detalhes em USACE (2016a).

3.3.3.2 Terreno e singularidade

Para representar a planície de inundação foram utilizados os dados dos levantamentos topográficos descritos no item 3.2.2. A partir destes levantamentos foi realizada uma interpolação com precisão de 2 metros e um arquivo GeoTIFF da planície de inundação foi gerado.

A batimetria do rio foi obtida a partir das seções descritas no item 3.2.2 e foi utilizada para representar o leito menor do rio Iguaçu. As seções foram inseridas no HEC-RAS e foram interpoladas de 20 em 20 metros e utilizando a componente RasMapper as seções foram convertidas em um arquivo GeoTIFF. O arquivo GeoTIFF do rio foi sobreposto ao arquivo GeoTIFF do terreno e novamente foram traçadas seções ao longo do rio de 20 em 20 metros que iam um pouco além da margem do rio para que fossem feitos ajustes de possíveis erros de representação ocorridos no momento da união do rio com o terreno. A partir dessa geometria foi gerado um novo arquivo GeoTIFF para o rio que foi finalmente sobreposto ao terreno. O mesmo procedimento foi realizado para a representação do Canal Paralelo. Por fim, foi obtido o modelo final do terreno que foi convertido em um modelo de terreno no formato hdf.

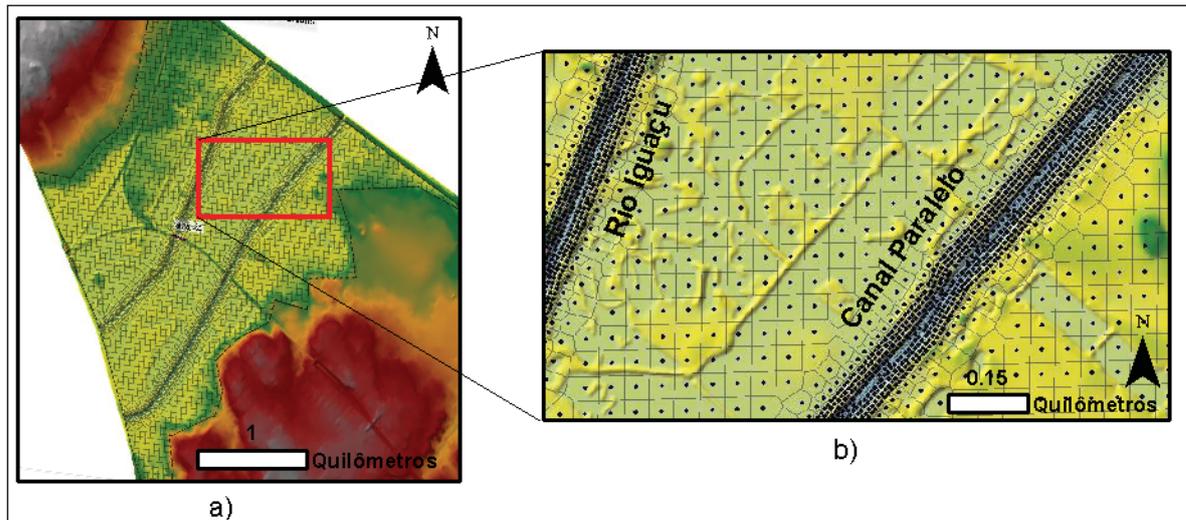
A cerca de 1200 metros a montante da Av. Comendador Franco existe uma ponte sobre o rio Iguaçu que também foi inserida no modelo. A representação da ponte no *software* HEC-RAS está apresentada na Figura 29. A cota inferior da ponte é de 874,0, enquanto a cota superior da ponte é de 876,6 e largura de 7 metros. A seção no rio é pouco reduzida, já que não há pilares no meio do rio.

FIGURA 29 – Representação da ponte no *software* HEC-RAS

FONTE: Autora (2022)

A malha utilizada possui células de 50 metros na planície de inundação e 10 metros nas calhas e margens do rio Iguazu e do Canal Paralelo que foram orientadas perpendicularmente ao fluxo do rio. A escolha do tamanho das células computacionais se deu em função do tempo de processamento das simulações hidrodinâmicas e de uma representação adequada da mancha de inundação. Assim, por exemplo, foram realizadas simulações iniciais com células de 10 metros na planície de inundação e canais, que levaram mais de uma hora de processamento e apresentaram resultados semelhantes aos das simulações com células de 50 metros na planície de inundação, que tiveram um tempo de processamento de cerca de 15 minutos. A Figura 30 apresenta a malha utilizada em "a" e o detalhe das células no rio e no canal em "b".

FIGURA 30 – Malha do modelo hidráulico



FONTE: Autora (2022)

3.3.3.3 Condições de contorno

O modelo 2-D do HEC-RAS realiza uma modelagem em escoamento não permanente e, neste caso, é solicitado que sejam indicadas duas condições de contorno, uma na seção a montante e outra na seção a jusante. Na seção a montante foram utilizados os hidrogramas simulados no HEC-HMS para o rio Iguaçu e para o Canal Paralelo como condição de contorno de entrada.

Na seção a jusante foi adotada a altura normal como condição de contorno, já que não existem estações fluviométricas próximas ao final do trecho estudado. A altura normal é dada em função da declividade média do canal que correspondeu a 0,0004 m/m para o rio Iguaçu e 0,0005 m/m para o Canal Paralelo. Além disso, é exigido que seja inserida a declividade da linha de energia que foi considerada igual a declividade de fundo.

O coeficiente de rugosidade de Manning é utilizado para estimar a perda de carga devida ao atrito causado pela rugosidade dos contornos do canal. Este coeficiente pode ser muito variável, uma vez que depende de diversos fatores como o material de cobertura do canal, o escoamento no canal, a forma da seção transversal e possíveis sinuosidades presentes no canal (USACE, 2016a).

A escolha do coeficiente de rugosidade de Manning se deu em função de estudos realizados na bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu. Tucci (1996) adotou em seu estudo o coeficiente de Manning para o rio Iguaçu igual a 0,032 em trechos sem grandes sinuosidades, chegando até 0,042 a depender da sinuosidade do trecho. Já o PDD apontou que para um canal estreito e sinuoso com vegetação nas margens o coeficiente deveria ser de 0,04 e para o leito maior de várzeas com vegetação o coeficiente adotado deve ser de 0,05 (SUDERHSA, 2002g). O trabalho de Enomoto (2004) que estudou as manchas de inundação na sub-bacia do rio Palmital projetou um cenário para o ano de 2020 em que o coeficiente de Manning seria de 0,041 para o canal principal e 0,071 para a planície de inundação. Assim, os estudos analisados apresentaram valores que podem variar de 0,032 até 0,071. Por fim, optou-se por adotar o valor de 0,05 para a planície

de inundação e 0,04 para o canal, conforme sugerido por SUDERHSA (2002g).

3.4 CENÁRIOS DE ESTUDO

Foram avaliados seis cenários de estudo. Entretanto, preliminarmente, foram realizadas simulações para calibração de parâmetros e para verificar se os parâmetros calibrados poderiam ser mantidos fixos considerando a alteração do uso de ocupação do solo, e consequente variação do valor do CN, de 2009 para 2014.

Para a calibração foram utilizados dados de vazão de 2007 a 2011 dos postos apresentados na Figura 18. Os valores de CN foram estimados utilizando imagens de satélite do ano de 2009 de acordo com o que será apresentado no item 3.4.1, o tempo de concentração foi obtido da Equação 3.15 e foram calibrados os parâmetros de coeficiente de armazenamento, os parâmetros de escoamento subterrâneo e os coeficientes de Manning dos trechos de rios inseridos no modelo. Os parâmetros calibrados foram mantidos fixos para todos os cenários.

Em seguida, foram feitas simulações para eventos ocorridos entre 2013 e 2015, em que ainda havia dados disponíveis de vazão para o posto BR-277, sendo possível avaliar se de fato é possível manter os parâmetros calibrados fixos para cenários futuros. Para este período, o CN foi estimado conforme o apresentado no item 3.4.1 e o tempo de concentração foi estimado pela Equação 3.15.

Após a calibração, cenários de eventos críticos foram simulados considerando o uso e ocupação do solo nos anos de 2014, 2024 e 2034 e utilizando as chuvas de projeto estimadas. Foram simulados também cenários, sem a existência do Canal Paralelo e sem a existência dos reservatórios considerando o uso e ocupação do solo de 2014. A Tabela 10 a seguir apresenta um resumo dos cenários estudados.

TABELA 10 – Resumo dos cenários de estudo

Denominação do cenário	Ano do uso e ocupação do solo	Obras hidráulicas consideradas	Topologia utilizada
2014	2014	Todas (Canal Paralelo e reservatórios no HEC-HMS e dique no HEC-RAS)	Figura 20
2024	2024	Todas (Canal Paralelo e reservatórios no HEC-HMS e dique no HEC-RAS)	Figura 20
2034	2034	Todas (Canal Paralelo e reservatórios no HEC-HMS e dique no HEC-RAS)	Figura 20
SC	2014	Reservatórios no HEC-HMS e dique no HEC-RAS	Figura 22
SR	2014	Canal Paralelo no HEC-HMS e dique no HEC-RAS	Figura 21
SR/SC	2014	Apenas o dique no HEC-RAS	Figura 23

FONTE: Autora (2022)

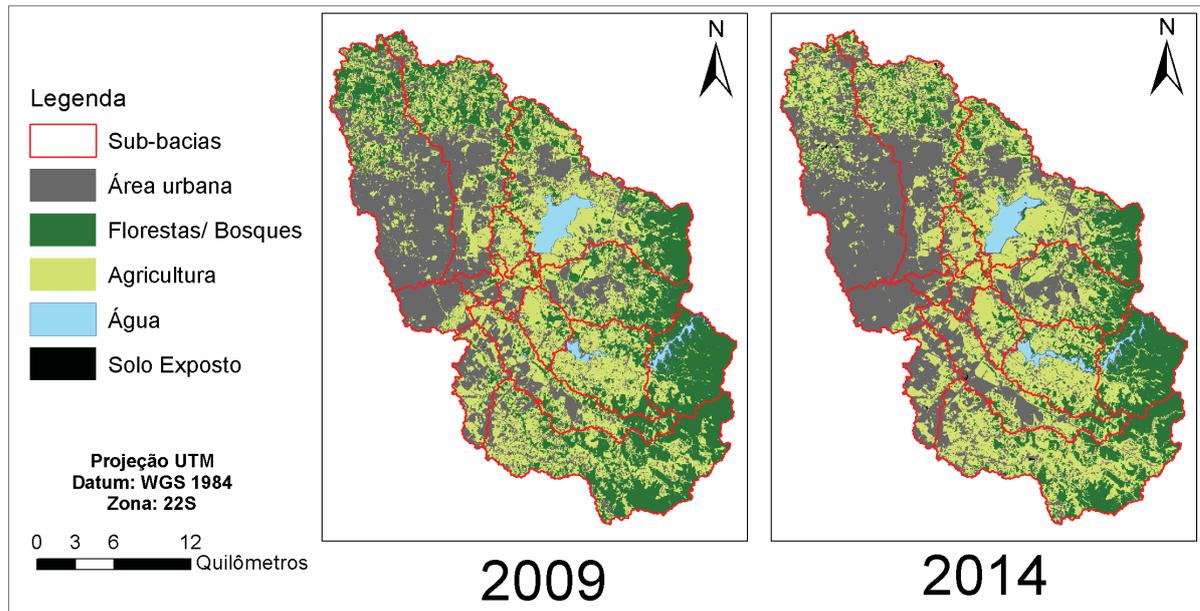
A estimativa futura dos valores de CN será explicada no item 3.4.1. O tempo de concentração foi dado em função do CN, enquanto os outros parâmetros se mantiveram constantes.

3.4.1 Determinação do *Curve Number*

A definição dos CN para os anos de 2009 e 2014 se deu através do mapa de uso e ocupação do solo e do mapa de solos da região estudada. Para os cenários futuros, os CN foram estimados a partir da estimativa de aumento populacional apresentada pelo IPPUC para a RMC (IPPUC, 2021).

Os dados de uso e ocupação do solo para os anos de 2009 e 2014 foram estimados a partir da classificação das imagens dos satélites *Landsat-7* e *Landsat-8* respectivamente. Utilizando-se a técnica de classificação supervisionada de imagens, as áreas foram classificadas em área urbana, agricultura, florestas/bosques, água e solo exposto. O resultado desta classificação pode ser observado na Figura 31.

FIGURA 31 – Classificação do uso e ocupação do solo para 2009 e 2014



FONTE: Autora (2022)

Além disso, para determinar o CN, foi utilizado também o mapa de solos do Estado do Paraná disponibilizado pelo ITCG (2008c). Este mapa segue o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, entretanto no método SCS *Curve Number* os solos devem ser classificados segundo a classificação hidrológica apresentada no item 3.3.2.3. Assim, a conversão da classificação foi feita de acordo com o apresentado no estudo de Sartori *et al.* (2005).

Após a obtenção dos dados de uso e ocupação do solo e de solos, os CN foram atribuídos com base nas Tabelas 21 e 22. Desta maneira, os valores de CN utilizados neste trabalho, para cada tipo de uso e ocupação e para cada classificação hidrológica do solo, podem ser observados na Tabela 11 apresentada a seguir.

TABELA 11 – Valores de CN atribuídos à região de estudo

Uso e Ocupação	Tipo de solo			
	A	B	C	D
Floresta/ Bosques	35	61	74	80
Água/Lagos	98	98	98	98
Agricultura	67	76	83	86
Solo Exposto	68	79	86	89
Área Urbana	82	88	92	94

FONTE: Adaptado de Tucci (2001)

Desta forma, foi possível obter os valores de CN e tempos de concentração para as sub-bacias para os anos de 2009 e 2014, os quais estão apresentados na Tabela 12.

TABELA 12 – Valores de CN em 2009 e 2014

Sub-bacia	CN (2009)	Tempo de concentração - 2009 (h)	CN (2014)	Tempo de concentração - 2014 (h)
SB 1	86,93	4,79	88,81	4,46
SB 2	78,33	5,58	80,57	5,21
SB 3	82,59	1,91	83,53	1,86
SB 4	76,29	5,22	77,25	5,07
SB 5	79,52	0,77	79,94	0,77
SB 6	81,75	0,43	82,22	0,43
SB 7	77,30	4,56	78,93	4,34
SB 8	81,67	2,00	81,70	2,00
SB 9	73,13	4,92	74,91	4,67
SB 10	80,95	3,38	81,96	3,27
SB 11	77,44	7,51	80,26	6,89
SB 12	76,26	8,71	78,57	8,13
SB 13	84,71	4,62	86,50	4,34
SB 14	85,43	1,90	86,58	1,82
SB 15	90,23	1,77	90,95	1,72
SB 16	92,31	2,10	92,98	2,04

FONTE: Autora (2022)

A previsão dos valores futuros de CN foi baseada na projeção do aumento populacional que ocorrerá na bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu, e foi realizada de forma semelhante ao apresentado no estudo de Moreira (2013). Esta previsão foi feita considerando que a área urbana aumentará a uma taxa igual ao aumento populacional e as áreas de agricultura, florestas/bosques e solo exposto se reduzirão proporcionalmente. Assim, conhecendo-se a área urbana estimada para o ano de 2014, as áreas urbanas em 2024 e 2034 podem ser definidas a partir o aumento populacional previsto pelo IPPUC (2021) para estes anos.

O IPPUC (2021) apresenta estimativas de projeção demográfica para os bairros de Curitiba e para as cidades da RMC. Para este trabalho, o aumento populacional foi estimado para os bairros de Curitiba e para as parcelas das cidades da RMC que encontram-se dentro da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu, esta estimativa é apresentada na Tabela 13 a seguir.

TABELA 13 – População estimada e projetada na bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu

Ano	População estimada	Varição em relação ao ano de 2014
2010	814.552,32	-
2014	874.655,08	-
2024	979.775,77	12,0%
2034	1.045.685,00	20,0%

FONTE: Adaptado de IPPUC (2021)

Os resultados obtidos para as estimativas futuras dos valores de CN e os tempos de concentração correspondentes para os anos de 2024 e 2034 para as sub-bacias estão apresentados na Tabela 14.

TABELA 14 – Estimativa futura do *Curve Number* e tempos de concentração

Sub-bacia	CN (2024)	Tempo de concentração - 2024 (h)	CN (2034)	Tempo de concentração - 2034 (h)
SB 1	89,99	4,25	90,74	4,12
SB 2	81,59	5,04	82,23	4,94
SB 3	83,87	1,83	84,08	1,82
SB 4	77,65	5,01	77,90	4,98
SB 5	80,08	0,75	80,18	0,75
SB 6	82,22	0,43	82,23	0,43
SB 7	79,43	4,27	79,74	4,23
SB 8	81,72	2,00	81,73	2,00
SB 9	75,09	4,65	75,20	4,63
SB 10	82,23	3,24	82,40	3,22
SB 11	80,90	6,75	81,29	6,67
SB 12	78,82	8,07	78,97	8,03
SB 13	87,24	4,22	87,70	4,15
SB 14	86,93	1,80	87,15	1,78
SB 15	91,81	1,65	92,35	1,61
SB 16	93,87	1,96	94,00	1,94

FONTE: Autora (2022)

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos neste estudo em conjunto com uma discussão destes resultados. Esses resultados envolvem: chuva de projeto, parâmetros calibrados no *software* HEC-HMS, hidrogramas simulados de projeto e mapas de inundação simulados no *software* HEC-RAS.

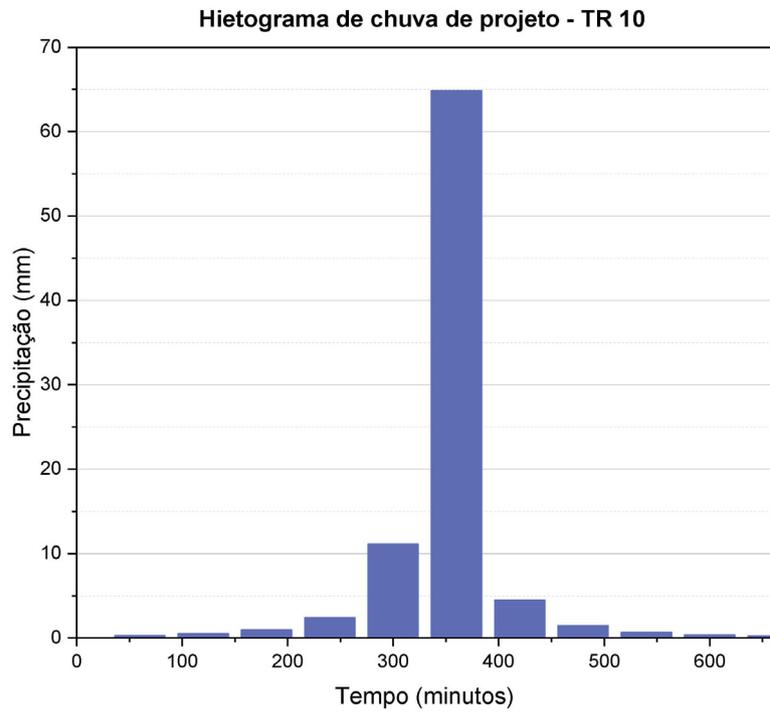
4.1 CHUVA DE PROJETO

Para os anos em que serão simulados eventos extremos (2014, 2024 e 2034), ou seja, em que é utilizada a chuva de projeto, o maior tempo de concentração observado foi de 8,13 horas em 2014 na sub-bacia do SB 12. Desta forma decidiu-se adotar uma chuva de projeto com o tempo de 11 horas de duração, ou seja, maior do que o maior tempo de concentração desta sub-bacia.

Os tempos de recorrência escolhidos foram de 10, 25, 50 e 100 anos. O intervalo de tempo de cada bloco do hietograma foi estabelecido em 1 hora, já que este foi o intervalo utilizado nas simulações de calibração.

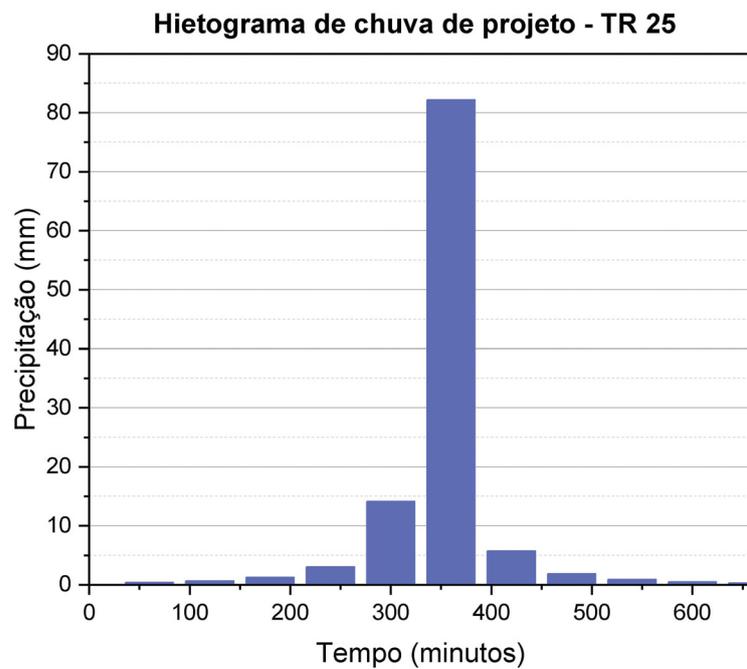
Assim, as chuvas de projeto puderam ser determinadas, utilizando a curva IDF dada pela Equação 3.1 e o método dos blocos alternados (FILHO; MARCELLINI, 1995). Os resultados obtidos para os hietogramas estão apresentados nas Figuras 32 a 35. Na Tabela 15 são apresentados os valores de precipitação acumulada para cada tempo de recorrência.

FIGURA 32 – Hietograma de TR de 10 anos



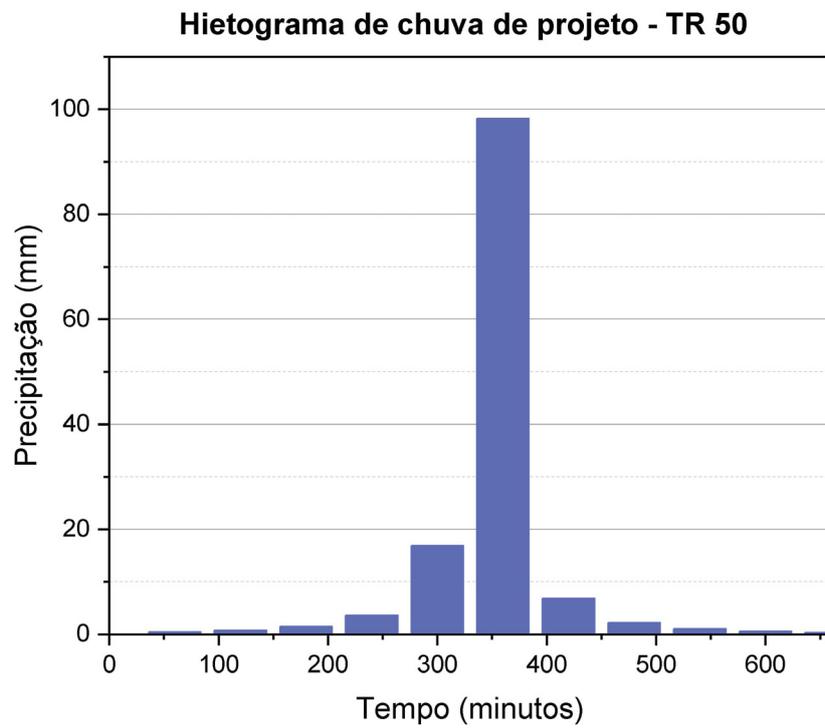
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 33 – Hietograma de TR de 25 anos



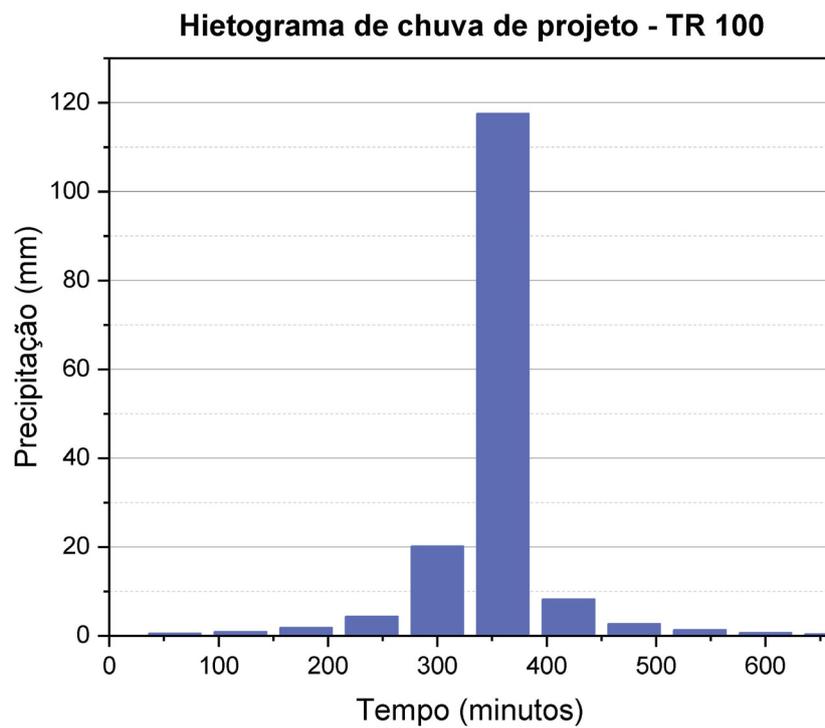
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 34 – Hietograma de TR de 50 anos



FONTE: Autora (2022)

FIGURA 35 – Hietograma de TR de 100 anos



FONTE: Autora (2022)

TABELA 15 – Precipitação acumulada para as chuvas de projeto

Tempo de Retorno (anos)	Precipitação Acumulada (mm)
100	158,75
50	132,75
25	111,01
10	87,64

FONTE: Autora (2022)

4.2 CALIBRAÇÃO

O processo de calibração consistiu na determinação dos parâmetros de escoamento subterrâneo, do coeficiente de armazenamento do HU de Clark (Equação 3.10) e dos coeficientes de rugosidade de Manning dos trechos de rios apresentados na seção 3.3.2.1.

Para isto, foram selecionados eventos observados nos postos fluviométricos entre 2007 e 2011. Os dados de vazão são dados diários, entretanto as simulações foram realizadas em intervalos de tempo horário. Assim, o HEC-HMS faz uma interpolação dos valores diários, obtendo 22 valores interpolados entre as vazões observadas diárias.

Os dados de chuva foram obtidos das quatro estações pluviométricas apresentadas na Figura 28, sendo que o método de Thissen foi utilizado para representação da chuva em cada sub-bacia. Os dados destas estações são dados diários de chuva que, neste caso, como as simulações foram feitas para intervalos horários, o HEC-HMS divide a precipitação observada diária em 24 valores iguais, transformando a precipitação diária em horária.

A calibração foi realizada para cada um dos eventos selecionados utilizando a Equação 3.16 (PWRMSE) como função objetivo. Em seguida, os valores médios encontrados foram utilizados para as simulações de verificação que abrangeram os mesmos eventos selecionados na calibração. Os parâmetros de coeficiente de rugosidade de Manning calibrados foram previamente apresentados na Tabela 3. Os valores dos parâmetros dos métodos de escoamento subterrâneo e HU de Clark encontrados pelo processo de calibração e verificação estão apresentados na Tabela 16.

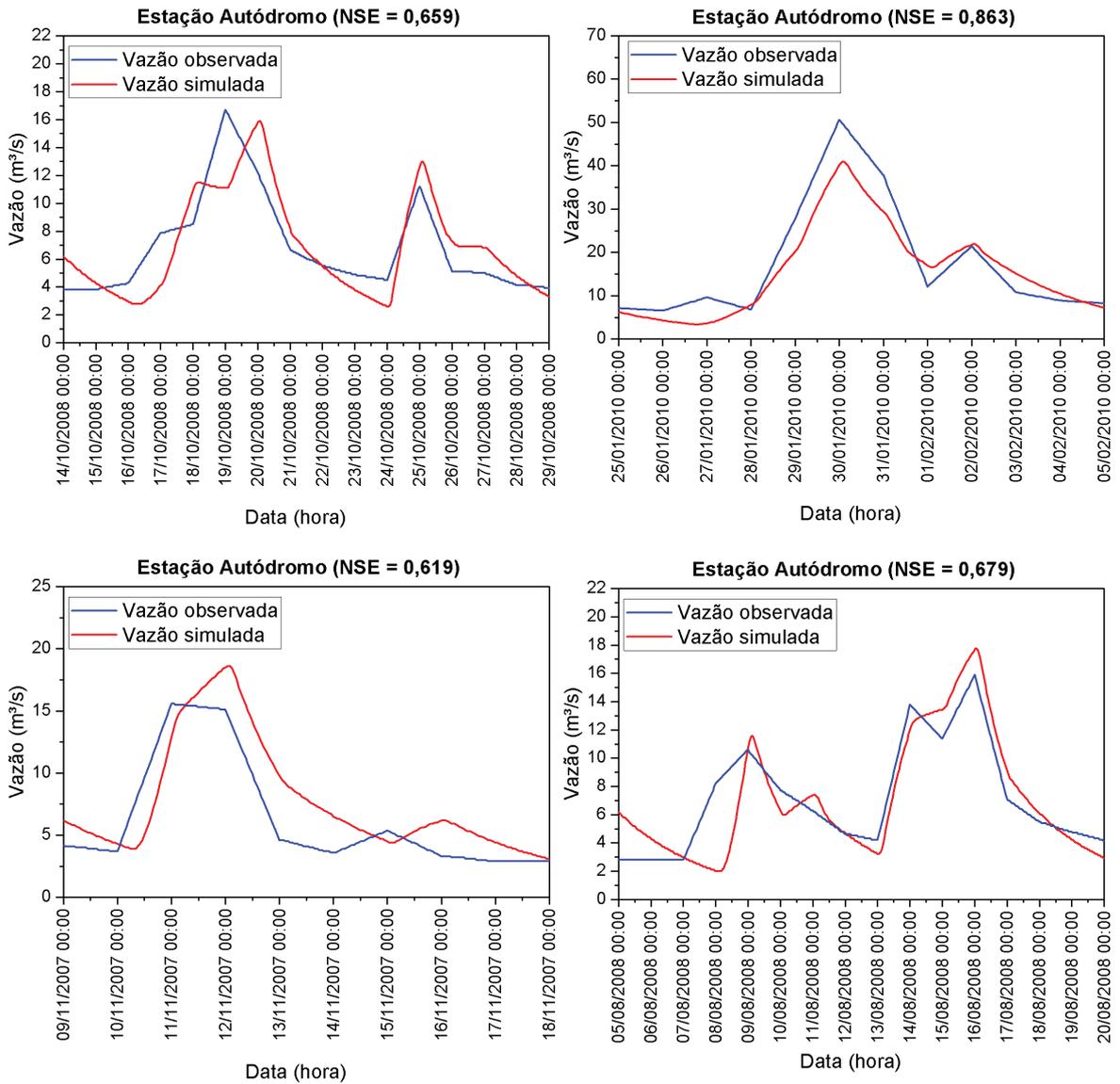
TABELA 16 – Parâmetros calibrados

Sub-bacia	HU Clark - Coeficiente de armazena- mento (horas)	Recessão - Vazão inicial (m ³ /s)	Recessão - Constante de recessão	Recessão - Ratio to peak
SB 1	30,96	6,22	0,69	0,49
SB 2	29,07	2,27	0,66	0,26
SB 3	33,85	0,31	0,26	0,28
SB 4	62,22	1,48	0,31	0,52
SB 5	28,20	0,46	0,35	0,33
SB 6	31,93	0,99	0,80	0,58
SB 7	55,98	1,60	0,70	0,60
SB 8	113,49	2,71	0,78	0,69
SB 9	64,92	0,48	0,24	0,08
SB 10	23,00	0,42	0,27	0,39
SB 11	90,01	1,89	0,61	0,36
SB 12	144,20	3,84	0,88	0,55
SB 13	56,58	1,11	0,39	0,25
SB 14	48,57	0,59	0,38	0,55
SB 15	30,11	0,22	0,23	0,22
SB 16	28,54	0,11	0,42	0,39

FONTE: Autora (2022)

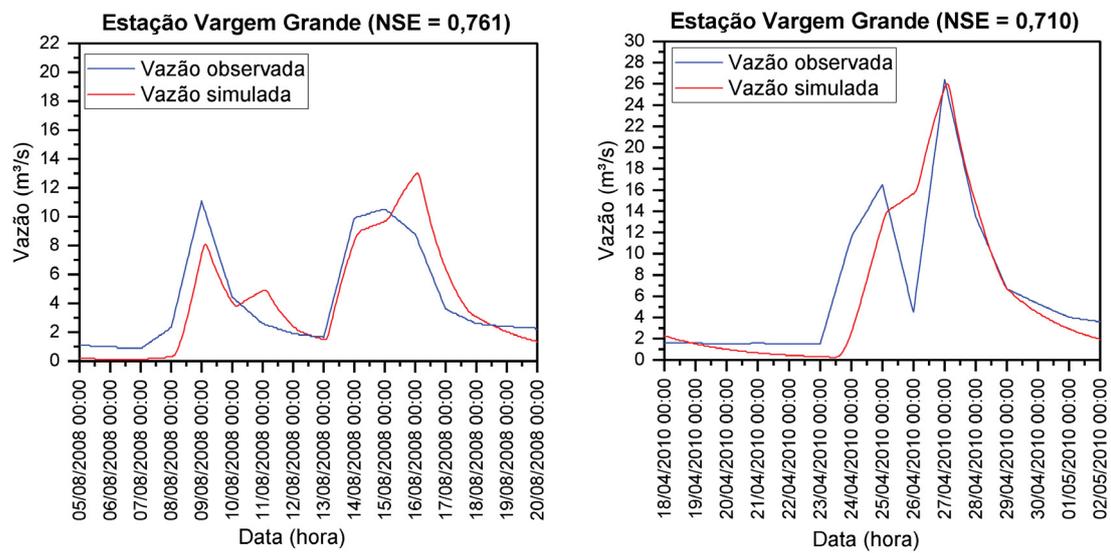
Os hidrogramas obtidos das simulações de verificação são apresentados nas Figuras 36 a 41 e os valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) estimados para cada evento estão no título de cada figura.

FIGURA 36 – Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica Autódromo



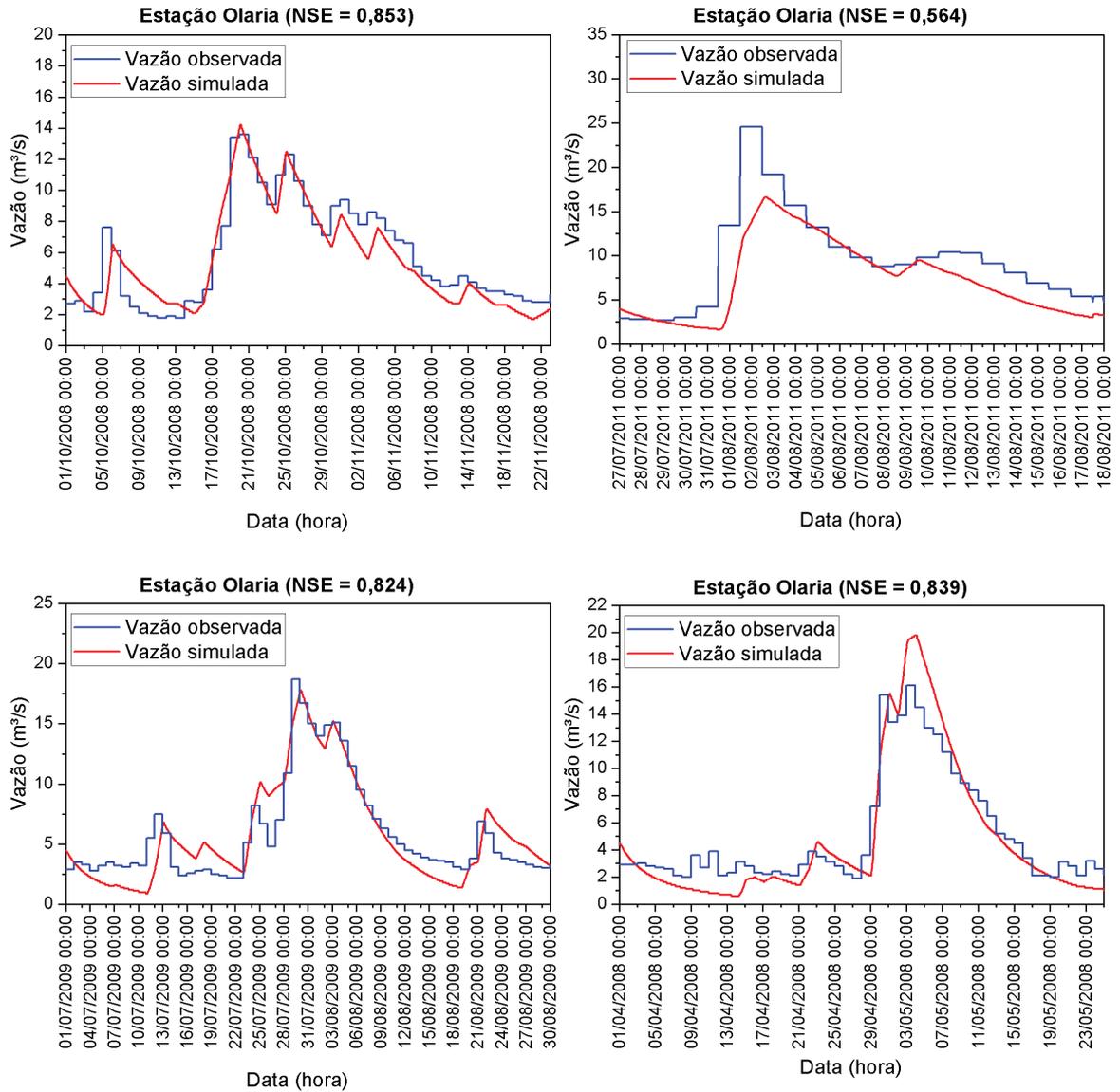
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 37 – Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica Vargem Grande



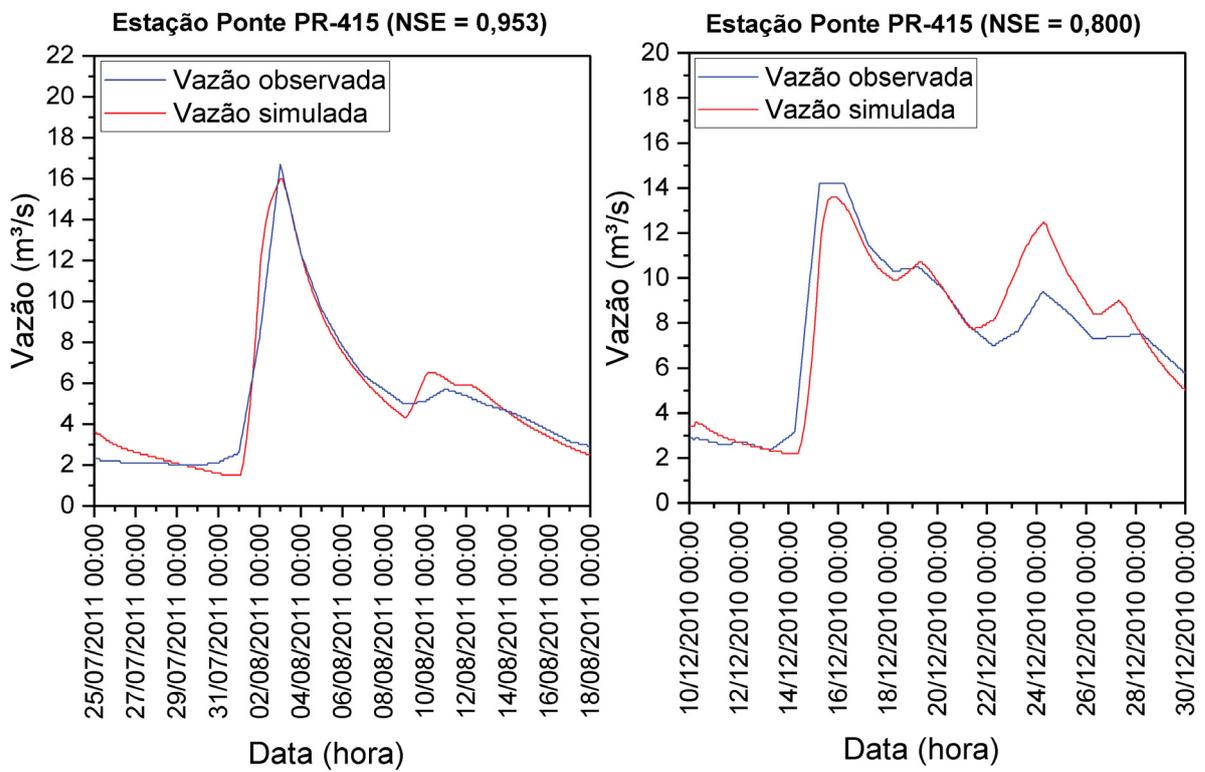
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 38 – Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica Olaria



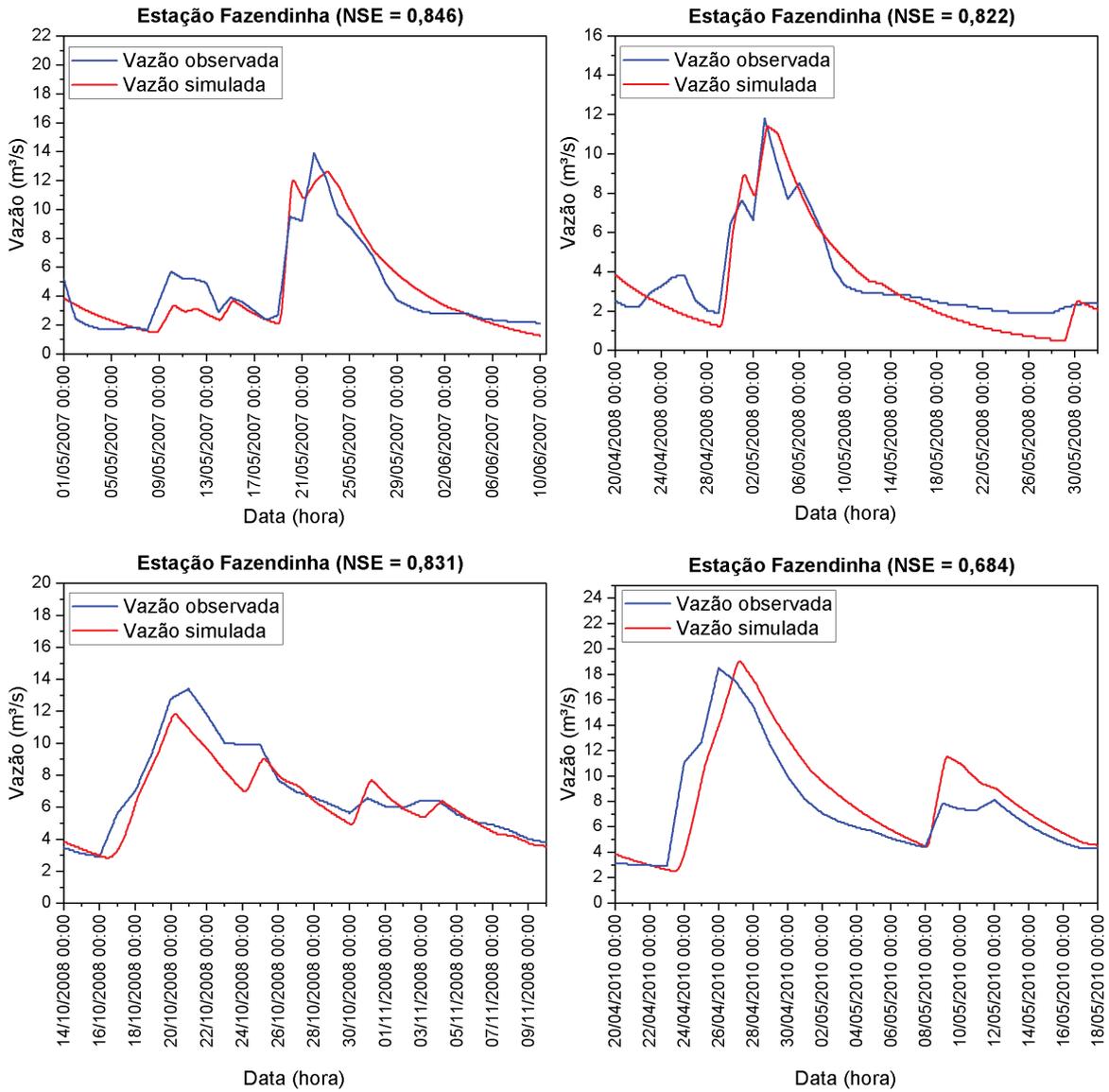
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 39 – Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica Ponte PR-415



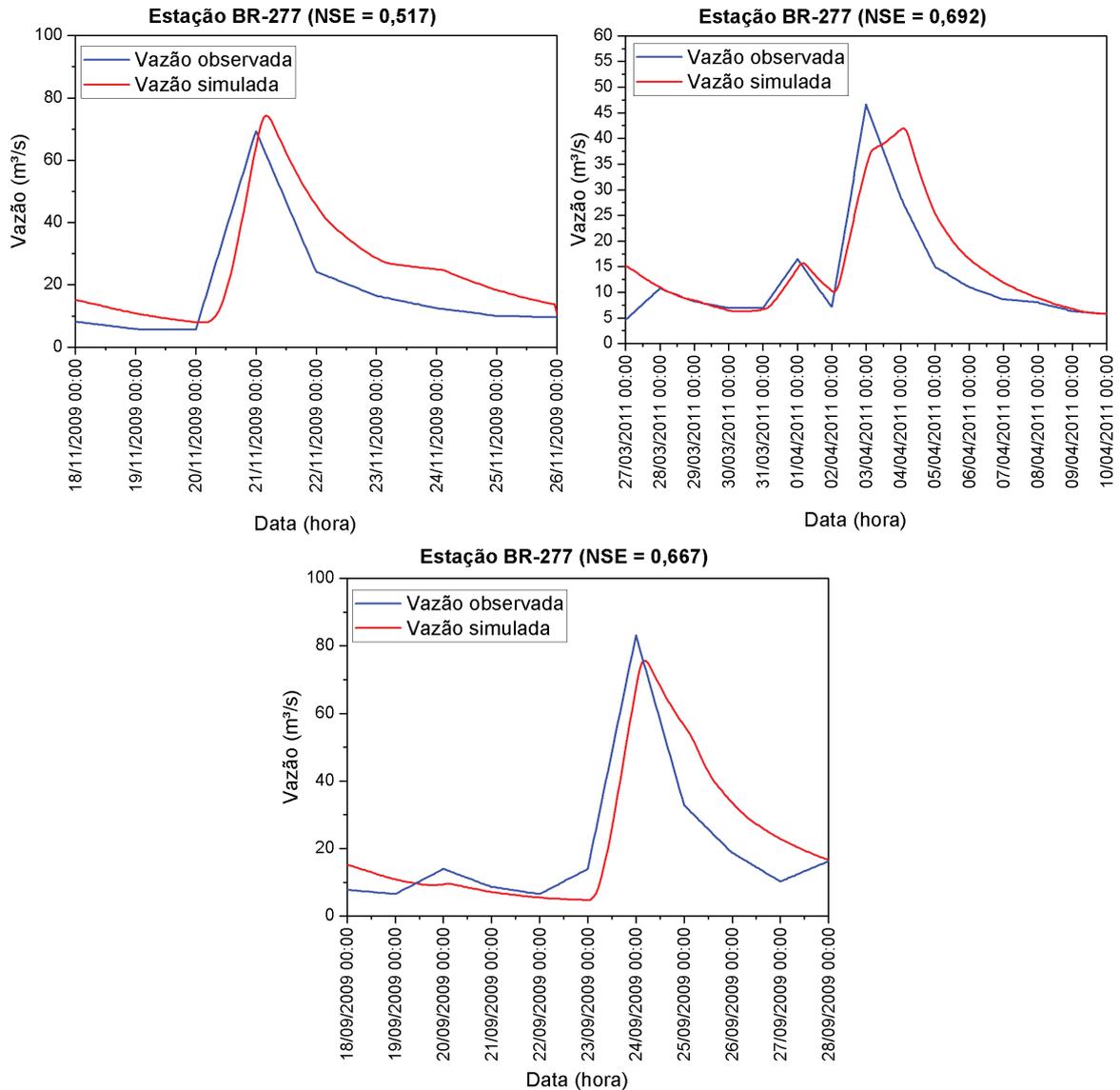
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 40 – Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica Fazendinha



FONTE: Autora (2022)

FIGURA 41 – Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica BR-277



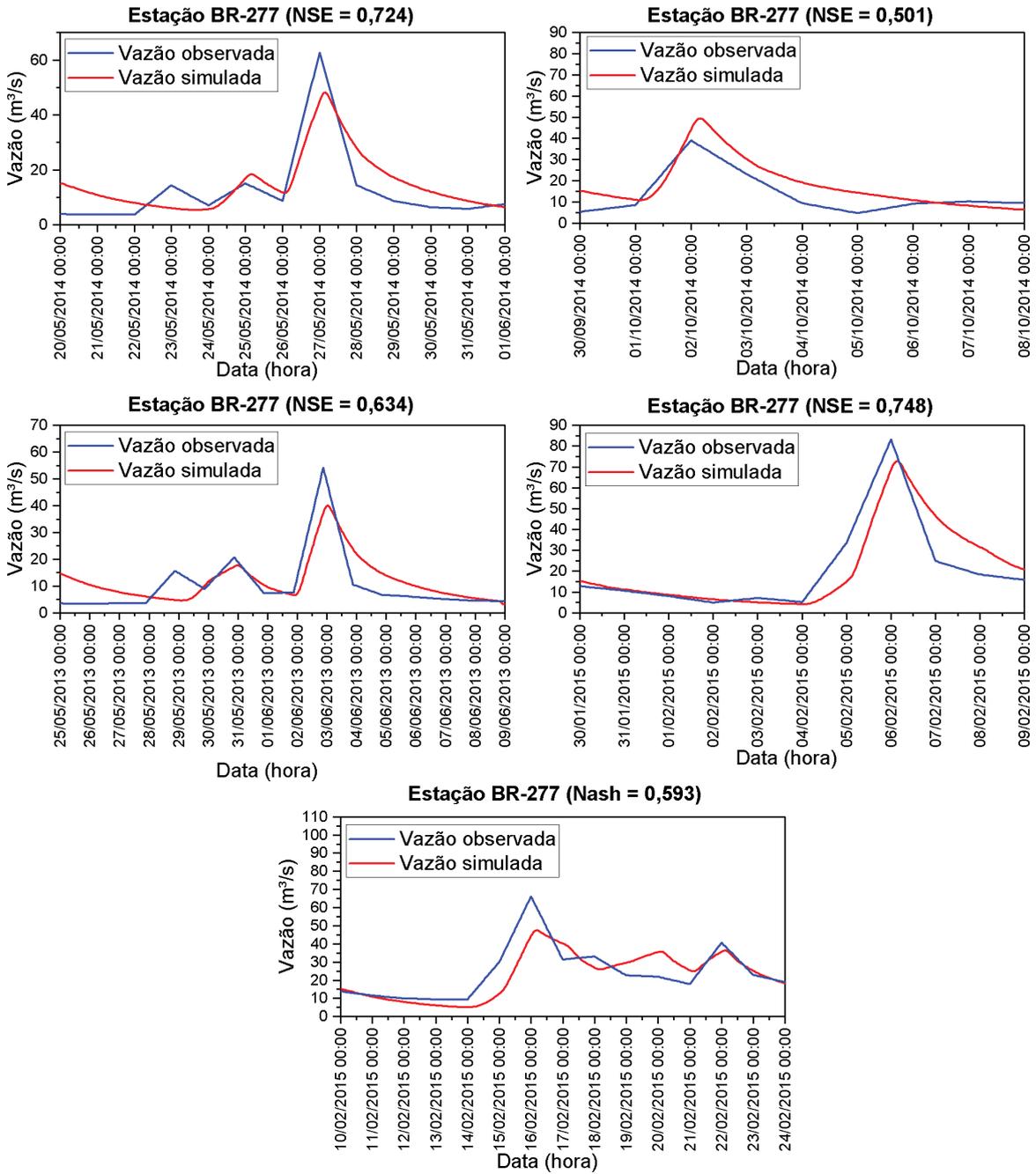
FONTE: Autora (2022)

Nota-se que todas as simulações apresentaram ao menos um ajuste satisfatório, segundo a classificação apresentada na Tabela 9. Apesar disso, apenas nove simulações apresentaram um ajuste muito bom dos hidrogramas simulados, este fato pode ter ocorrido principalmente pelos dados de vazão serem dados diários, devido a simplificação dada pelas interpolações e a utilização de uma distribuição de chuva aproximada. Entretanto, tendo em vista a baixa disponibilidade de dados e as muitas falhas existentes na série de dados de vazão, considerou-se que um ajuste ao menos satisfatório seria adequado para este estudo. Assim, os parâmetros calibrados referentes ao escoamento subterrâneo, ao coeficiente de armazenamento e ao coeficiente de rugosidade de Manning foram considerados constantes para todos os cenários de simulação.

Além das simulações de verificação apresentadas anteriormente, foram feitas simulações de eventos ocorridos entre os anos de 2013 e 2015 na estação fluviométrica BR-277 para verificar se é possível manter os parâmetros calibrados fixos para cenários futuros. Assim, para estas

simulações, foram utilizados os parâmetros de CN e tempo de concentração apresentados na Tabela 12 para o ano de 2014. O resultado dessas simulações podem ser observados na Figura 42, em que é possível observar que todos os hidrogramas apresentaram um ajuste ao menos satisfatório, indicando que os parâmetros calibrados podem ser mantidos fixos.

FIGURA 42 – Hidrogramas simulados e observados na estação fluviométrica BR-277 entre 2013 e 2015



FONTE: Autora (2022)

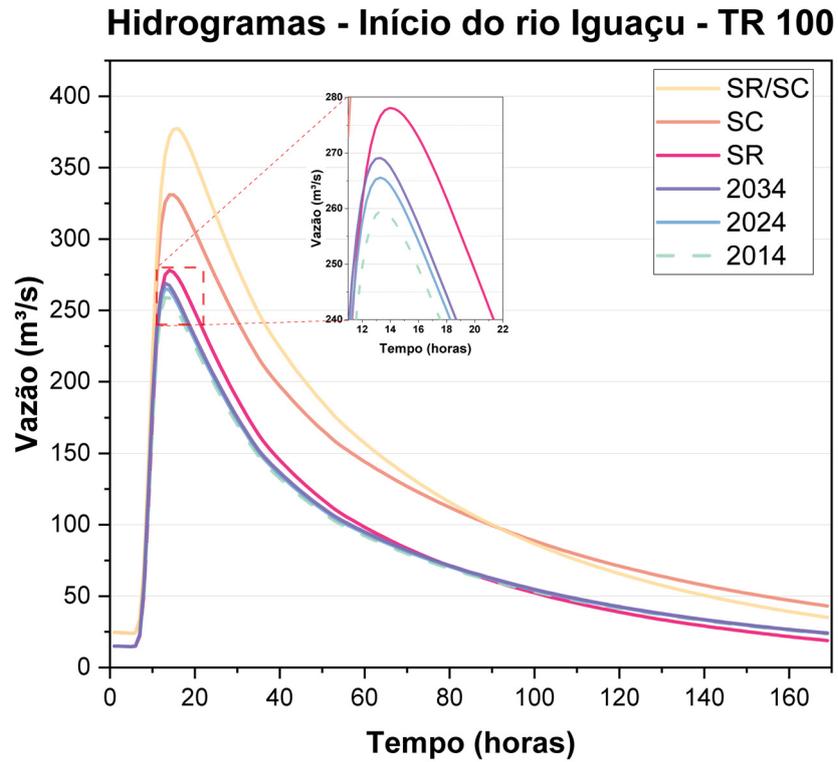
4.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica foi realizada utilizando os métodos apresentados na seção 3.3.2. Foram obtidos os hidrogramas no início do rio Iguazu (Exutório BR-277 na Figura 20) e no Canal Paralelo após a confluência com o rio Pequeno (Exutório Canal Paralelo na Figura 20), considerando os seguintes cenários:

- Cenário 2014, que considera o uso e ocupação do solo de 2014 para os TR de 10, 25, 50 e 100 anos, utilizando a topologia apresentada na Figura 20;
- Cenário 2024, que considera o uso e ocupação do solo de 2024, considerando o aumento da área urbana com a projeção de aumento populacional aproximado de 12% em relação a 2014, para os TR de 10, 25, 50 e 100 anos, utilizando a topologia apresentada na Figura 20;
- Cenário 2034, que considera o uso e ocupação do solo de 2034, considerando o aumento da área urbana com a projeção de aumento populacional aproximado de 20% em relação a 2014, para os TR de 10, 25, 50 e 100 anos, utilizando a topologia apresentada na Figura 20;
- Cenário SR, que considera o uso e ocupação do solo de 2014 sem os reservatórios para os TR de 10, 25, 50 e 100 anos, utilizando a topologia apresentada na Figura 21;
- Cenário SC, que considera o uso e ocupação do solo de 2014 sem o Canal Paralelo para os TR de 10, 25, 50 e 100 anos, utilizando a topologia apresentada na Figura 22;
- Cenário SR/SC, que considera o uso e ocupação do solo de 2014 sem os reservatórios e o Canal Paralelo para os TR de 10, 25, 50 e 100 anos, utilizando a topologia apresentada na Figura 23.

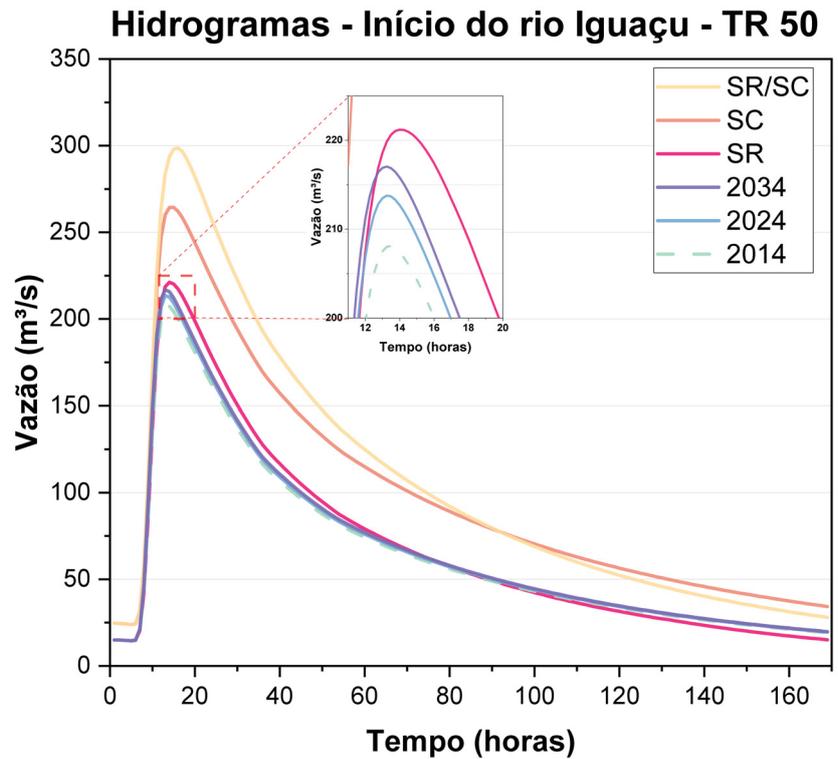
Os hidrogramas obtidos para os cenários descritos acima estão apresentados nas Figuras 43 a 50 a seguir.

FIGURA 43 – Hidrogramas de projeto no rio Iguaçu para TR de 100 anos



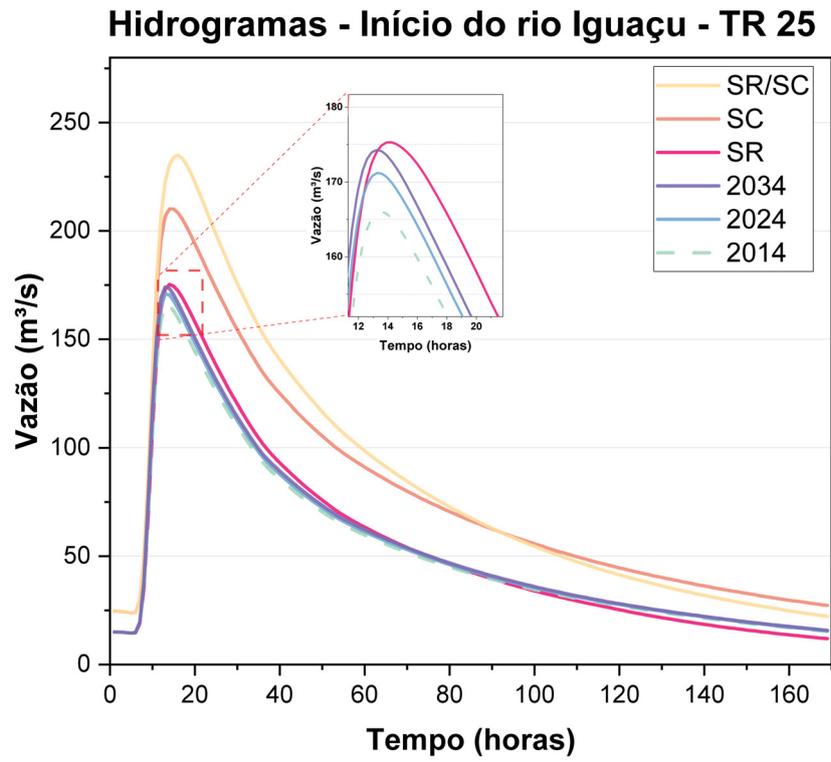
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 44 – Hidrogramas de projeto no rio Iguaçu para TR de 50 anos



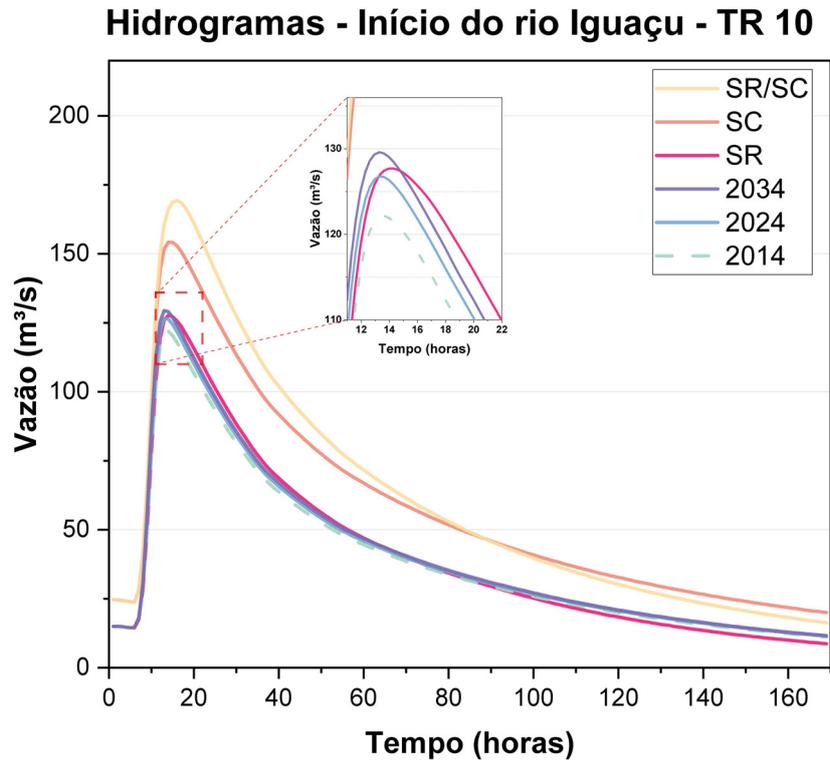
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 45 – Hidrogramas de projeto no rio Iguaçu para TR de 25 anos



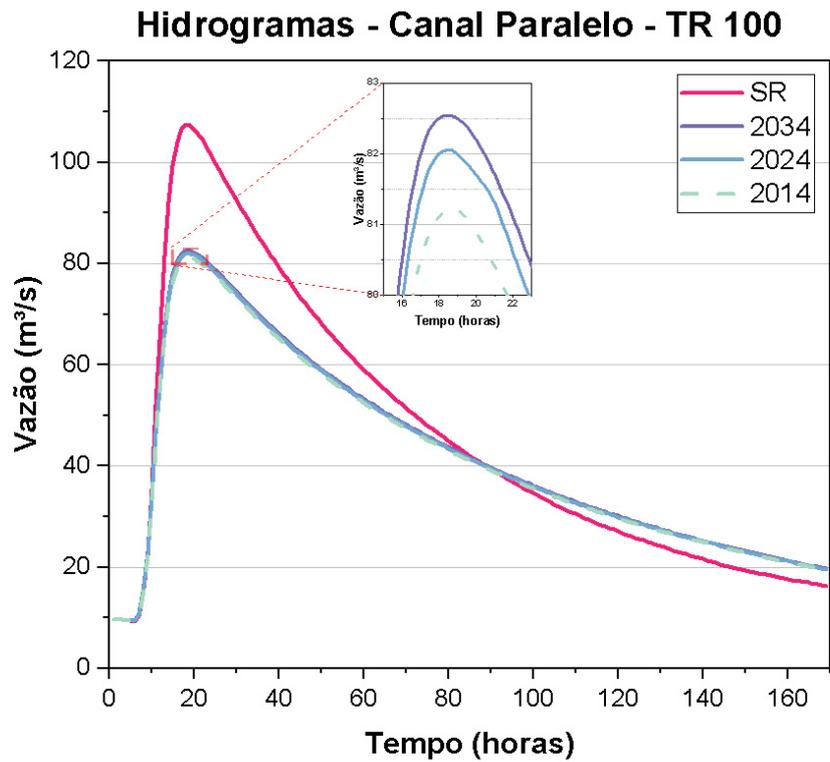
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 46 – Hidrogramas de projeto no rio Iguazu para TR de 10 anos



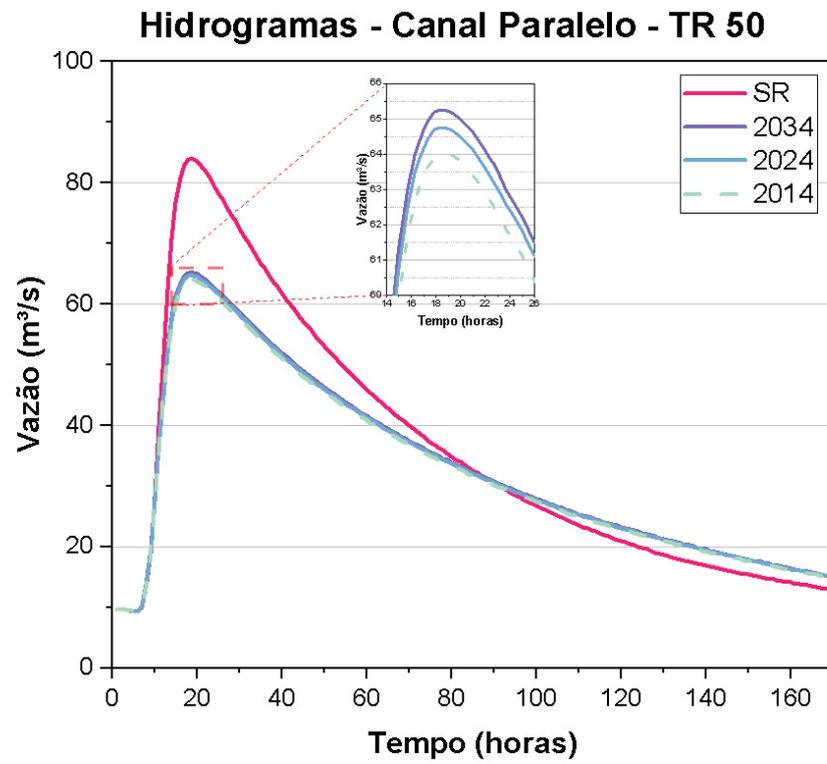
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 47 – Hidrogramas de projeto no Canal Paralelo para TR de 100 anos



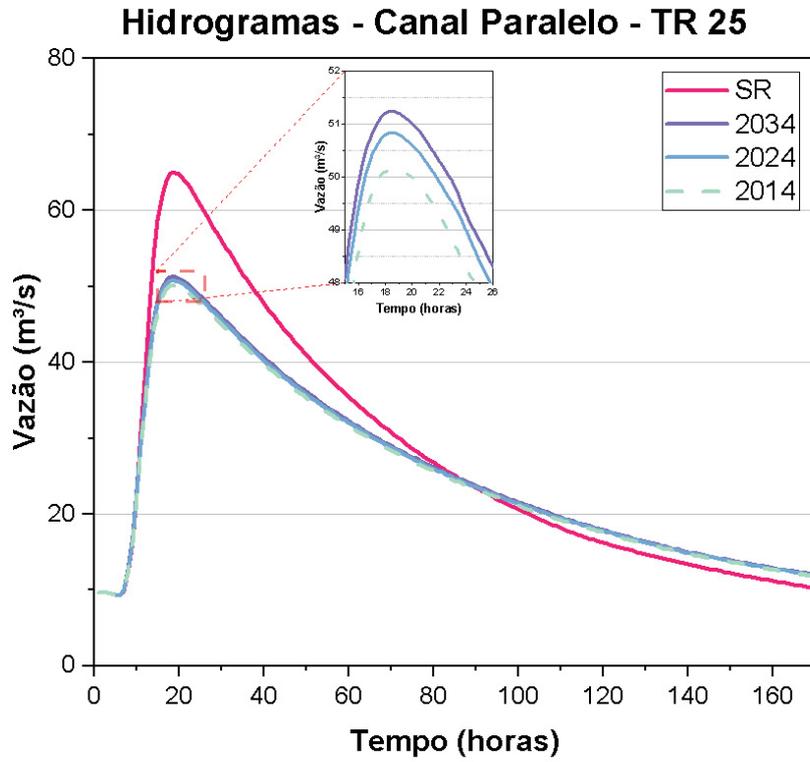
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 48 – Hidrogramas de projeto no Canal Paralelo para TR de 50 anos



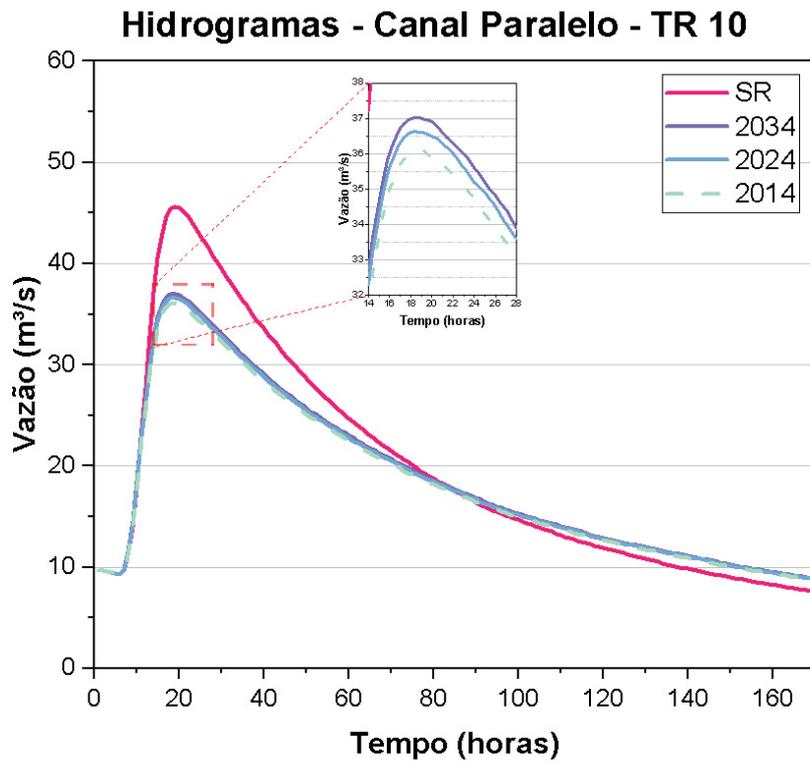
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 49 – Hidrogramas de projeto no Canal Paralelo para TR de 25 anos



FONTE: Autora (2022)

FIGURA 50 – Hidrogramas de projeto no Canal Paralelo para TR de 10 anos



FONTE: Autora (2022)

Os valores de vazão de pico dos hidrogramas estão apresentados de forma resumida nas Tabelas 17 e 18 a seguir.

TABELA 17 – Vazões de pico no rio Iguazu (m^3/s)

Rio Iguazu				
Cenário	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
2014	121,9	165,6	207,5	258,9
2024	126,5	170,9	213,5	265,3
2034	129,4	174,1	216,9	269,0
SR	127,7	175,3	221,2	278,1
SC	154,2	210,1	264,4	330,9
SR/SC	169,3	234,9	298,7	377,3

FONTE: Autora (2022)

TABELA 18 – Vazões de pico no Canal Paralelo (m^3/s)

Canal Paralelo				
Cenário	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
2014	36,1	50,1	64,0	81,2
2024	36,6	50,8	64,7	82,0
2034	37,0	51,2	65,2	82,5
SR	45,6	65,0	84,0	107,4

FONTE: Autora (2022)

Analisando os hidrogramas e comparando o cenário 2014 com os cenários de 2024 e 2034, fica claro que não houve aumento exacerbado de vazão para cenários futuros. O aumento é maior no início do rio Iguazu do que no Canal Paralelo, isso porque as sub-bacias mais urbanizadas contribuem diretamente para o rio Iguazu, enquanto as menos urbanizadas contribuem para o Canal Paralelo. As sub-bacias SB 1 e SB 2 por exemplo, que tem maiores áreas urbanizadas, tiveram redução no volume infiltrado no solo de cerca de 19,3% e 9,7%, respectivamente, comparando os cenários de 2014 e 2034. Já as sub-bacias com menor urbanização como as sub-bacias SB 7 e SB 8 tiveram redução do volume infiltrado no solo de cerca de 4,6% e 1,3%, respectivamente, ao comparar os mesmos cenários.

Apesar da pouca variação das vazões de pico do cenário 2014 para os cenários 2024 e 2034, foi possível notar que para os TR de 10 e 25 anos houve a redução em 1 hora no tempo de pico, que ocorria em 13 horas em 2014 e passou a ocorrer em 12 horas em 2024 e 2034 no início do rio Iguazu. Para os tempos de recorrência de 50 e 100 anos o tempo de pico se manteve 12 horas nos cenários 2014, 2024 e 2034 no início do rio Iguazu.

No cenário SR o tempo de pico para todos os tempos de recorrência ficou em 13 horas, enquanto no cenário SC o tempo de pico passou a 14 horas, exceto para o TR de 10 anos, e no cenário SR/SC passou para 15 horas no início do rio Iguazu. Esse aumento pode ter ocorrido devido a distância das sub-bacias que contribuem para os reservatórios até o início do rio Iguazu,

além do maior tempo de concentração das sub-bacias que contribuem diretamente para o Canal Paralelo.

Nos hidrogramas simulados para o Canal Paralelo o tempo de pico ocorreu em 18 horas para os cenários 2014, 2024, 2034 e SR.

A variação das vazões de pico do cenário 2014 para o cenário 2024 no início do rio Iguaçu ficou entre $4,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR 10) e $6,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR 100), ou seja, ocorreram aumentos de 3,8% e 2,5% respectivamente. Já a variação entre as vazões de pico do cenário 2014 para o cenário 2034 ficou entre $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR 10) e $10,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR 100), aumentos de 6,2% e 3,9% respectivamente, demonstrando que o aumento da urbanização é mais significativo em eventos de precipitação que ocorrem com maior frequência, em que os efeitos da infiltração no solo são mais importantes, como também foi observado no estudo de Enomoto (2004). Para o Canal Paralelo os aumentos de vazão de pico foram ainda menores, com aumentos entre $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR 10) e $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR 100) do cenário 2014 para o cenário de 2034, correspondendo a variações de 2,5% e 1,6% respectivamente.

O cenário SR deixa claro a importância dos reservatórios no amortecimento das vazões de pico, em especial em eventos de chuva de menor recorrência. Considerando o hidrograma de TR de 100 anos no início do rio Iguaçu, por exemplo, a vazão de pico no cenário sem o reservatório é 7,4% maior do que aquela com reservatório, sendo maior até mesmo do que no cenário futuro 2034. Essa situação fica ainda mais evidente ao considerar as vazões de pico no Canal Paralelo, no cenário SR há um aumento de 32,3% na vazão de pico ao comparar com o cenário 2014 e TR de 100 anos. Para tempos de retorno menores, a diferença nas vazões de pico entre os cenários com e sem reservatório diminuem, chegando a uma variação de 4,8% ao comparar com o cenário 2014 e TR de 10 anos no rio Iguaçu e 26,3% ao comparar com o cenário 2014 e TR de 10 anos no Canal Paralelo. Ou seja, para chuvas que acontecem com maior frequência os reservatórios não são tão importantes na redução da vazão de pico no início de rio Iguaçu como em eventos de chuvas com frequências menores.

Para deixar mais claro a importância dos reservatórios, são apresentadas na Tabela 19 a seguir as vazões de pico no rio Iraí no início da divisão do rio Iraí no Canal Paralelo, ou seja, no ponto "Divisão Canal" apresentado na topologia presente na Figura 20.

TABELA 19 – Vazões de pico na divisão do rio Iraí no Canal Paralelo (m^3/s)

Divisão Canal				
Cenário	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
2014	32,1	43,8	55,3	69,7
SR	51,0	72,8	92,4	120,9
Variação	58,9%	66,2%	67,1%	73,5%

FONTE: Autora (2022)

Nota-se, a partir da Tabela 19, que o aumento das vazões de pico pouco antes do início do Canal Paralelo no cenário SR é de ao menos 58,9% comparando com o cenário 2014 em que há a existência dos reservatórios. Entretanto, é possível observar que o aumento na vazão de

pico no rio Iguaçu não apresenta taxas tão altas como no ponto de divisão do Canal Paralelo, isso porque no cenário SR ainda há um amortecimento da vazão dado pela existência do Canal Paralelo.

O cenário SC simulou a situação fictícia sem a existência do Canal Paralelo considerando o uso e ocupação do solo do ano de 2014. Neste cenário o aumento das vazões de pico no início do rio Iguaçu foram ainda maiores do que aquelas do cenário SR, indicando que a estrutura do canal é ainda mais importante na redução das vazões de pico no início do rio Iguaçu do que os reservatórios. Em relação ao cenário SR houve um aumento de 19,0% na vazão de pico para o TR de 100 anos e 20,8% para o TR de 10 anos no início do rio Iguaçu. Em relação ao cenário 2014, para o TR de 100 anos houve um aumento da vazão de pico de 27,8% no início do rio Iguaçu e para o TR de 10 anos essa variação ficou em 26,5%, ou seja, a redução na vazão de pico no início do rio Iguaçu dada pela existência do Canal Paralelo é semelhante tanto em eventos de chuvas mais frequentes como em eventos de chuvas menos frequentes.

No cenário SR/SC foi avaliado como o conjunto do Canal Paralelo e dos reservatórios auxiliam na redução da vazão de pico no início do rio Iguaçu. Neste cenário observou-se um aumento de 38,9% na vazão de pico para o TR de 10 anos e 45,7% na vazão de pico para o TR de 100 anos no início do rio Iguaçu ao comparar com o cenário 2014. Comparando as vazões de pico do cenário SC com as vazões de pico do cenário SR/SC é possível observar um aumento de 9,8% na vazão de pico com TR de 10 anos e 14,0% na vazão de pico com TR de 100 anos de um cenário para o outro.

Os resultados da modelagem hidrológica demonstram a relevância das medidas estruturais implementadas a montante do Bolsão Audi-União na redução da vazão no início do rio Iguaçu, mesmo que essas medidas recebam contribuições de sub-bacias menos urbanizadas. A implementação dessas medidas ocorreu em um momento adequado, em que estava ocorrendo um grande desenvolvimento urbano em Curitiba e na RMC, fazendo com que o aumento das vazões dado pelo crescimento urbano fosse amenizado pela existência das medidas estruturais. Fica claro também que apesar dos reservatórios não terem sido construídos com a intenção de amortecimento de vazões, mas para abastecimento das cidades da RMC, eles acabam trazendo reduções significativas tanto nas vazões no rio Iguaçu, como nas vazões no Canal Paralelo.

Nota-se também que o Canal Paralelo, que foi construído com o objetivo de reduzir as vazões do rio Iguaçu para eventos de precipitação com TR de até 50 anos, cumpre o propósito para o qual foi construído, e tem grande importância na redução de vazões em especial em eventos que ocorrem com menor frequência. Entretanto, segundo Tucci (2007), apesar deste tipo de medida estrutural trazer benefícios para a redução da vazão no canal principal, a transferência da inundação que ocorreria a montante para a jusante pode ocorrer, por isso mesmo é necessário o controle do avanço da ocupação urbana a jusante do Canal Paralelo.

Em relação aos hidrogramas que simulam cenários futuros, não houve grande aumento das vazões de pico, como descrito anteriormente. Essa situação se assemelhou ao apresentado na pesquisa de Enomoto (2004) que estudou a sub-bacia do rio Palmital e utilizou uma técnica semelhante a técnica utilizada neste trabalho para representar o aumento das áreas urbanas em cenários futuros. No estudo de Enomoto (2004) o aumento médio da vazão de pico ficou em $1 \text{ m}^3/\text{s}$ no rio Palmital comparando os cenários de 2004 e 2020, entretanto, foi observado que

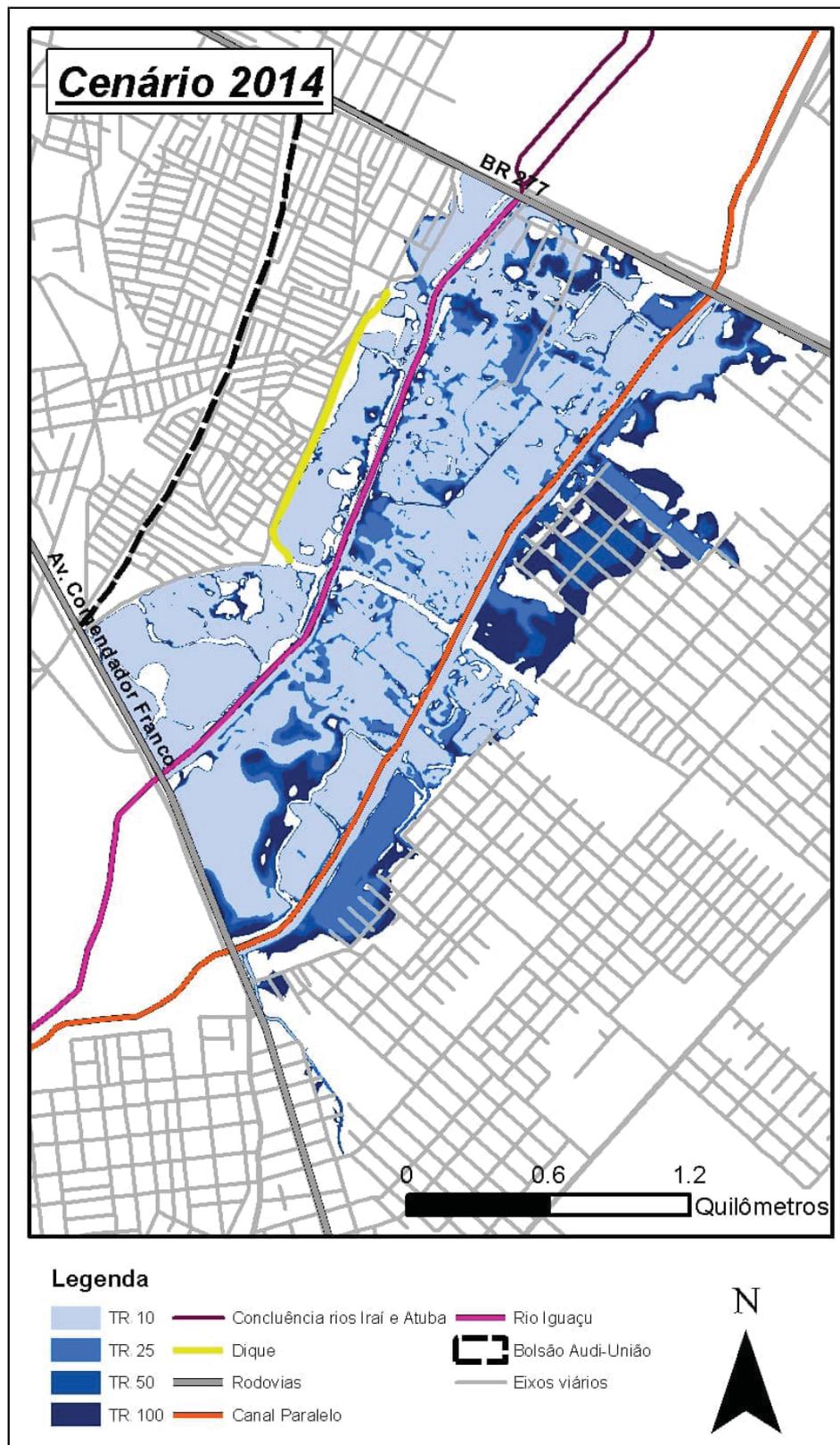
mesmo um aumento aparentemente pequeno na vazão levou a um aumento de cerca de 9,59% na área da mancha inundação para TR de 100 anos. Desta forma, a análise complementar das manchas de inundação se faz necessária para avaliar se o pequeno aumento da vazão de pico também representa um pequeno aumento na área inundável.

4.4 MODELAGEM HIDRÁULICA

A modelagem hidráulica foi realizada utilizando um modelo bidimensional no *software* HEC-RAS. A escolha do modelo 2-D se deu devido a peculiaridade da área de estudo, em que o rio Iguazu e o Canal Paralelo compartilham a mesma planície de inundação, situação que dificilmente poderia ser representada em um modelo 1-D, já que as seções transversais do Canal Paralelo e do rio Iguazu não poderiam se sobrepor. Desta forma, a modelagem hidráulica foi realizada seguindo os métodos apresentados na seção 3.3.3 e utilizando como condições de contorno os hidrogramas obtidos na modelagem hidrológica e a altura normal apresentados na seção 3.3.3.3.

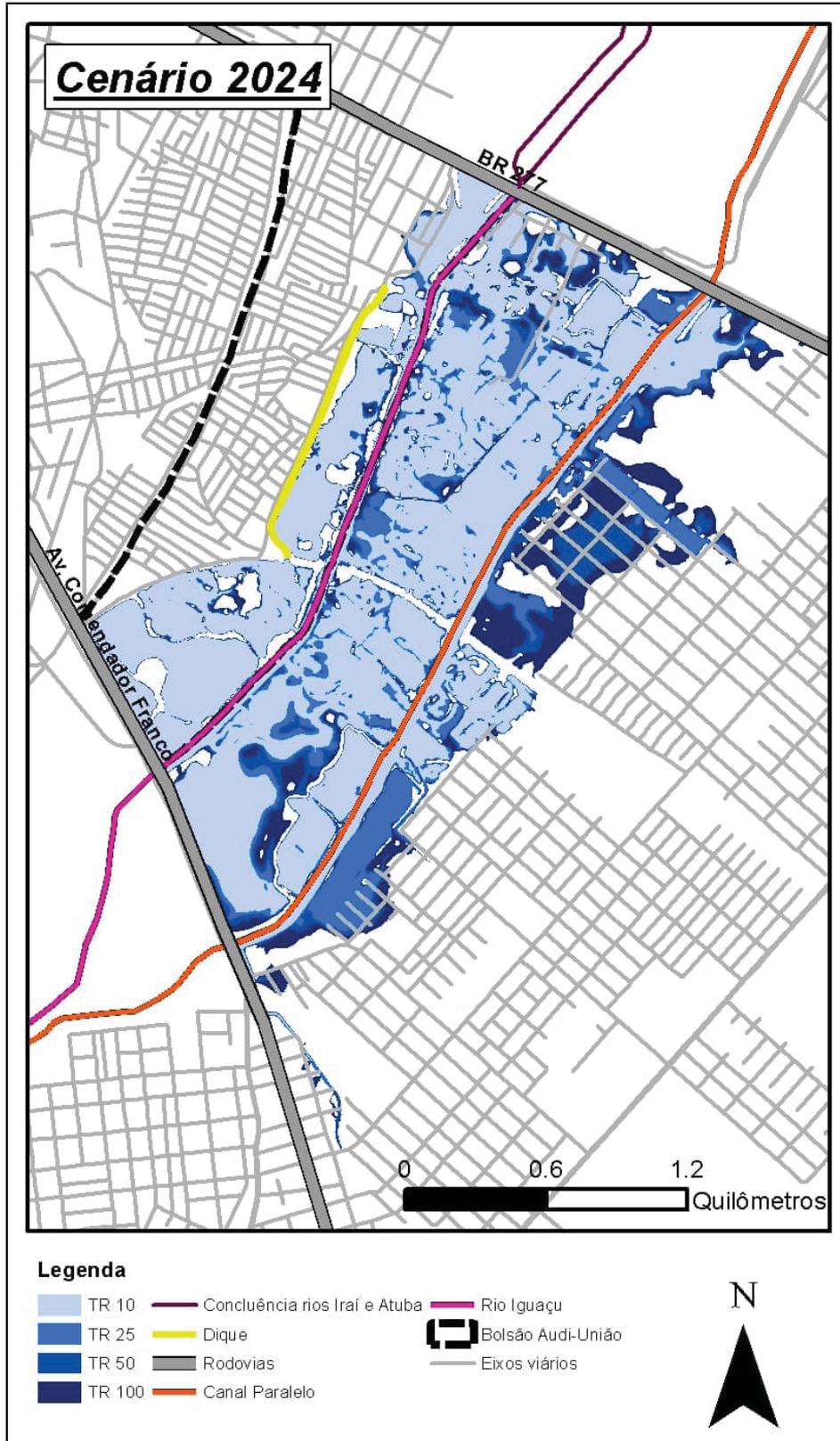
O principal objetivo da modelagem hidráulica foi avaliar a mancha de inundação na região do Bolsão Audi-União considerando os cenários apresentados anteriormente, além de avaliar se as medidas de contenção de cheias do rio Iguazu se mostram efetivas nos cenários 2014, 2024 e 2034. Os mapas de inundação obtidos são referentes a máxima inundação simulada na modelagem hidráulica e podem ser observados nas Figuras 51 a 56.

FIGURA 51 – Mancha de inundação cenário 2014



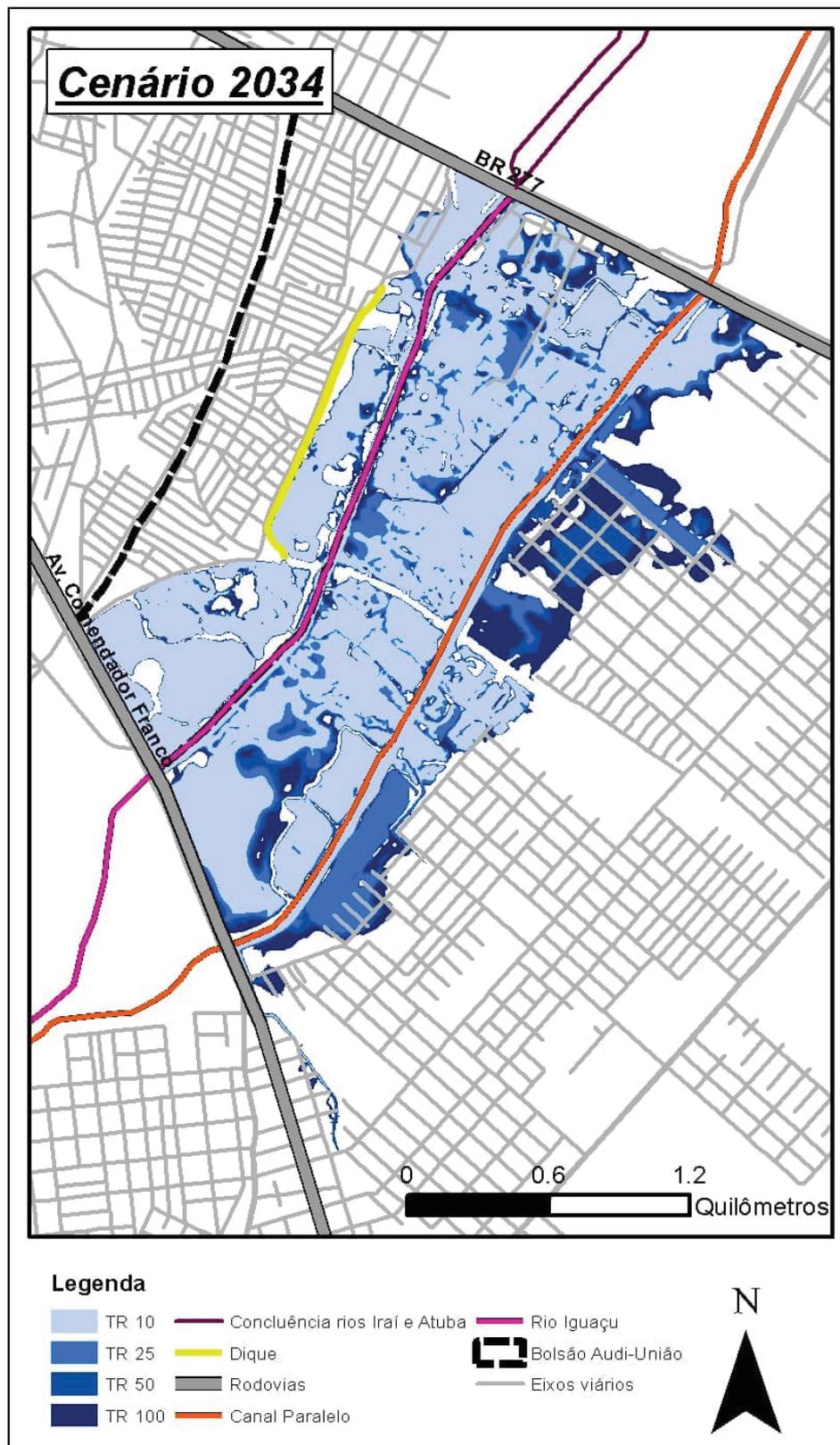
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 52 – Mancha de inundação cenário 2024



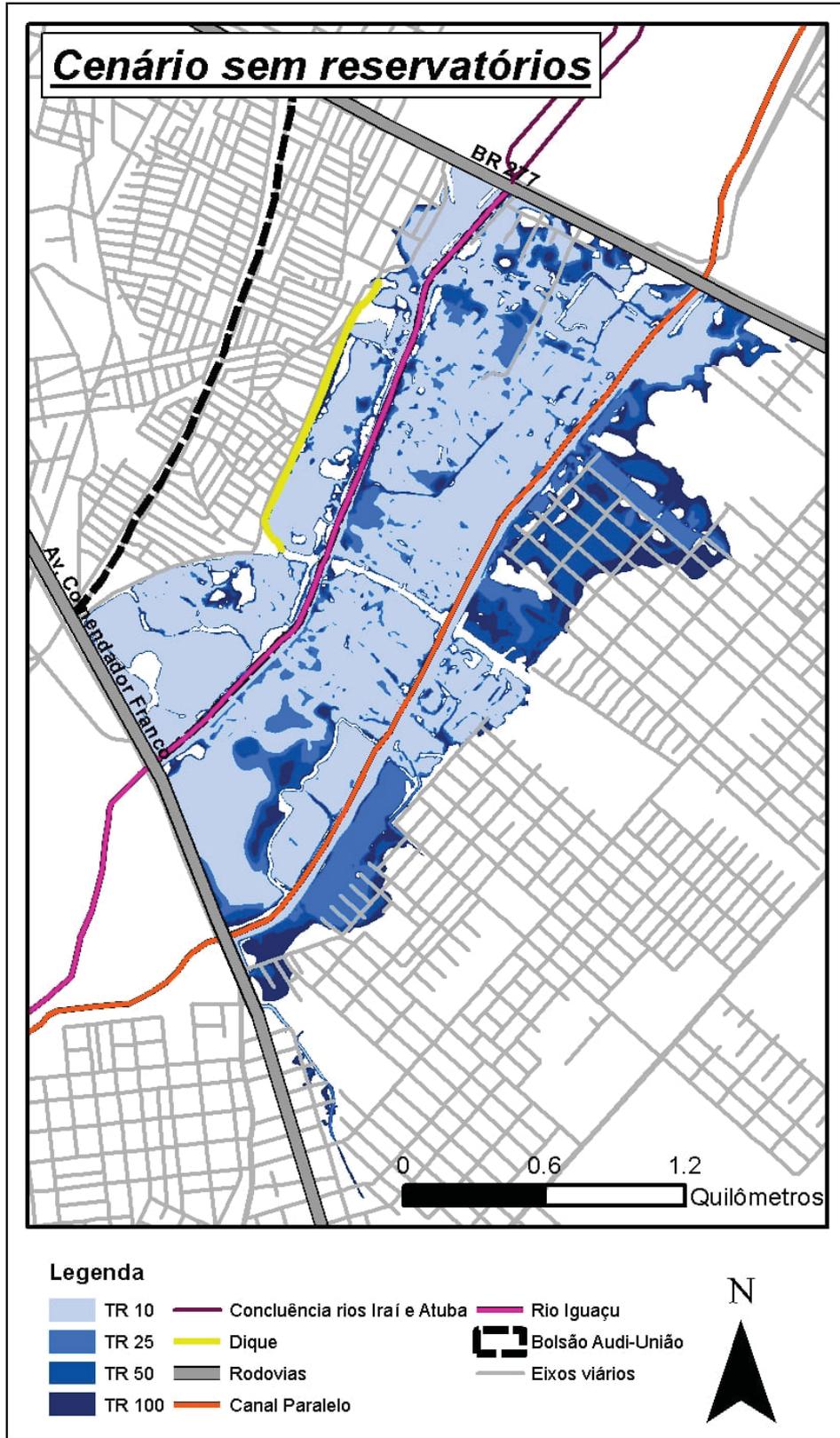
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 53 – Mancha de inundação cenário 2034



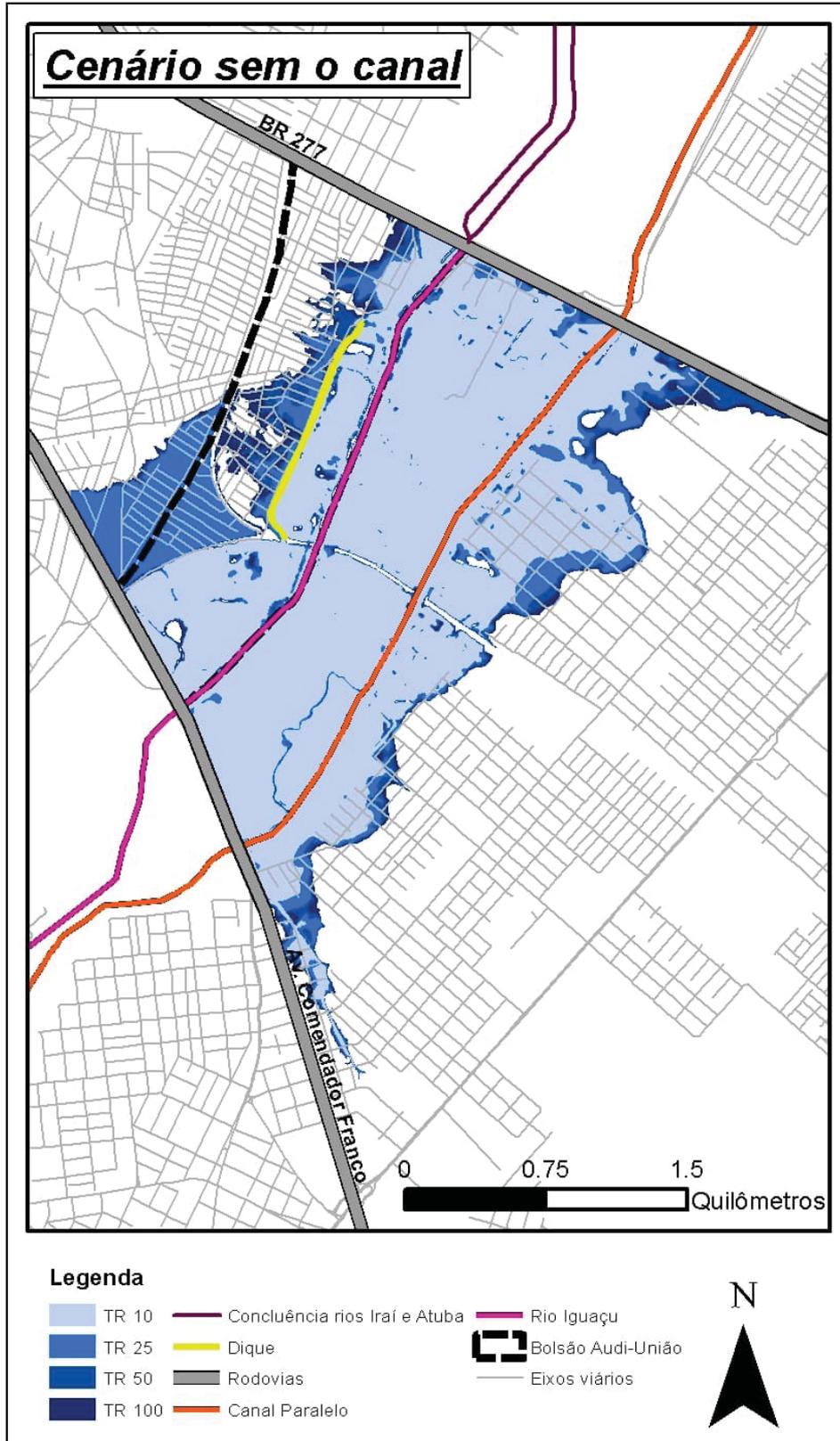
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 54 – Mancha de inundação cenário SR



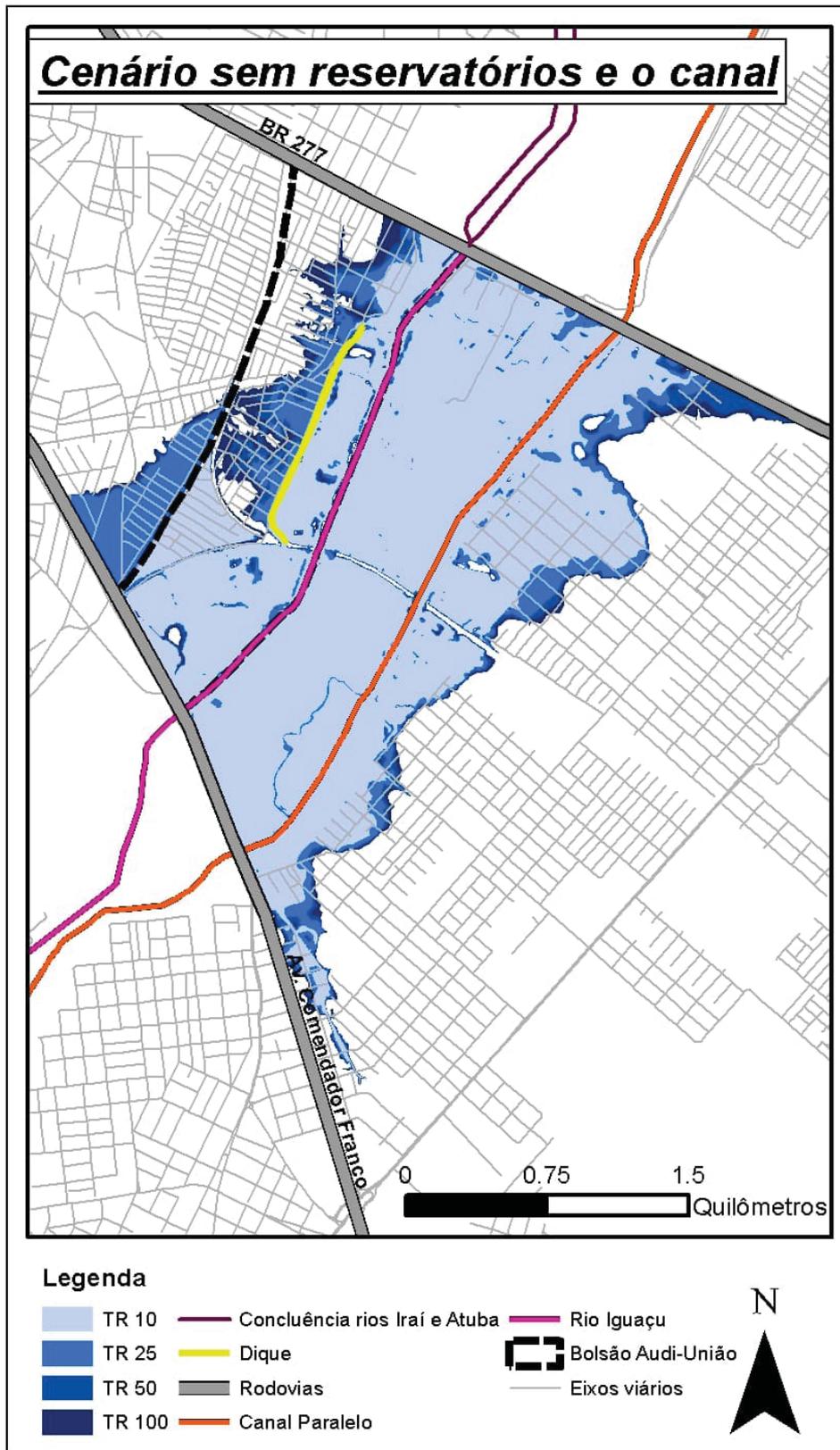
FONTE: Autora (2022)

FIGURA 55 – Mancha de inundação cenário SC



FONTE: Autora (2022)

FIGURA 56 – Mancha de inundação cenário SR/SC



FONTE: Autora (2022)

Para melhor compreensão da dimensão das manchas de inundação, são apresentadas na Tabela 20 as áreas das manchas de inundação para cada cenário estudado.

TABELA 20 – Áreas de inundação (km^2)

Tempo de Recorrência	Cenário					
	2014	2024	2034	SR	SC	SR/SC
TR 10	2,60	2,63	2,67	2,73	4,40	4,67
TR 25	3,13	3,17	3,19	3,29	5,33	5,54
TR 50	3,50	3,54	3,56	3,84	5,75	5,92
TR 100	4,05	4,08	4,11	4,31	6,06	6,23

FONTE: Autora (2022)

Ao comparar o cenário 2014 com os cenários 2024 e 2034 é possível notar que não houve uma grande variação das áreas inundáveis e que o dique construído foi efetivo para conter inundações tanto no cenário de 2014 como nos cenários futuros, exceto por uma pequena parte do Bolsão Audi-União próxima a BR-277, a qual não contava com proteção do dique até o início deste trabalho. A maior variação nas áreas de inundação se deu para o tempo de retorno de 10 anos entre os anos de 2014 e 2034, em que se espera um aumento da área inundada em 2,67%. Na margem direita do rio Iguaçu, ou seja, na porção do Bolsão Audi-União, a área inundável fica limitada tanto pelo dique, como pelo do aterro executado pela Rede Ferroviária Federal S.A. que acaba funcionando também como uma espécie de contenção contra o avanço de enchentes na região.

É possível observar que o conjunto de medidas não estruturais de remoção de famílias da proximidade da margem direita do rio Iguaçu, de criação da APA do Iguaçu e de criação do parque Centenário da Imigração Japonesa foram de extrema importância para que não houvesse o avanço de inundações em áreas residenciais do Bolsão Audi-União. Entretanto, a remoção de famílias poderia ter abrangido também aquelas moradias que continuam sob risco de sofrer com inundações.

Em relação a área que não é protegida pelo dique, em maio de 2021 houve a retomada das obras pela COHAB-CT para que o dique fosse estendido até a BR-277 (COHAB-CT, 2021). No entanto, esta etapa não foi considerada neste estudo devido as incertezas relacionadas a conclusão desta obra e a dados de levantamento topográfico da região. Caso a obra tenha sido de fato concluída, a área residencial do Bolsão Audi-União ficaria totalmente protegida de inundações considerando eventos de chuva com TR de até 100 anos ocorridos até 2034.

É nítida a dissociação das obras implementadas na margem direita do rio Iguaçu, no município de Curitiba, e da falta de obras e ações de prevenção e contenção de cheias na margem esquerda do rio Iguaçu, no município de São José dos Pinhais. Neste sentido, apesar do Canal Paralelo ter sido construído com a intenção de redução de vazão no rio Iguaçu e como uma barreira para o avanço de ocupações próximas ao rio Iguaçu, observa-se que houve um grande desenvolvimento urbano próximo a margem esquerda do Canal Paralelo, local de alto risco de inundação conforme observado na Figura 51. Essa situação poderia ter sido evitada com o adequado planejamento urbano da cidade de São José dos Pinhais que, conhecendo os riscos de inundação nesta região, poderia ter implementado um zoneamento urbano que orientasse pela proibição da ocupação desta área. Atualmente a proximidade das moradias com o Canal Paralelo

é tão grande que a construção de um dique na região se mostra inviável sem que haja a remoção de moradias do local.

Observando as Figuras 52 e 53 que apresentam as manchas de inundação nos cenários 2024 e 2034 é possível notar que há pouca diferença no avanço de enchentes entre os TR de 10 anos a TR de 100 anos na porção do Bolsão Audi-União. Entretanto, na porção ao lado da margem esquerda do Canal Paralelo a mancha de inundação de TR de 10 anos e 25 anos praticamente não atinge áreas residenciais, enquanto para TR de 50 e 100 anos há um nítido aumento da mancha sobre áreas com moradias.

Além das porções localizadas na margem direita do rio Iguaçu e na margem esquerda do Canal Paralelo, a principal área que é atingida por inundações fica entre o rio e o canal, essa área pertence ao município de São José dos Pinhais e possui uma pequena vila denominada Jardim São Judas Tadeu. Esta área já era ocupada desde antes da enchente ocorrida em 1995 e não teve um aumento expressivo de moradias nas últimas duas décadas. No entanto, as poucas residências que ficam nessa área podem ser atingidas até mesmo por inundações que ocorrem com frequência de TR de 10 anos, conforme Figura 51, indicando que uma ação de remoção das famílias que moram ali seria o ideal. Outra medida importante nesta região é a prevenção de crescimento de mais ocupações, neste sentido a COMEC tem entre seus projetos a criação do Parque Metropolitano do Iguaçu o qual vai abranger esta área e contará com um complexo de equipamentos de lazer e um conjunto de lagoas.

Em relação ao cenário SR, houve um aumento das áreas das manchas de inundação em relação ao cenário 2014 de 5,19% para o TR de 10 anos, 5,02% para o TR de 25 anos, 9,75% para o TR de 50 anos e 6,33% para o TR de 100 anos. Desta forma, fica claro que para eventos de maior frequência os reservatórios não conseguem trazer uma redução tão significativa nas áreas inundadas como em eventos de menor frequência. Observando a Figura 54, é possível notar também que mesmo se não houvesse a existência dos reservatórios o dique conseguiria proteger parte do Bolsão Audi-União e que o avanço da enchente no Bolsão seria semelhante ao cenário de 2014, sendo que o aumento da área inundada se daria principalmente ao lado de São José dos Pinhais.

O cenário SC traz mudanças mais significativas no aumento das áreas inundáveis. Destaca-se a simulação para TR de 25 anos, em que há um aumento de 70,06% na áreas inundadas ao comparar com o cenário 2014, demonstrando a relevância do Canal Paralelo na redução das enchentes ocorridas no local. Nesta simulação o dique construído conseguiria conter enchentes com TR de até 10 anos, enquanto inundações com TR igual ou maiores que 25 anos a inundação avançaria além do dique, alcançando boa parte da área residencial do Bolsão Audi-União. A variação da área de inundação do cenário SC em relação a 2014 é de 69,44% para o TR de 10 anos e 49,60% para o TR de 100 anos, indicando a efetividade do Canal Paralelo não só na redução das vazões no rio Iguaçu, mas também na redução das áreas inundadas.

O conjunto das medidas estruturais Canal Paralelo, reservatórios e dique é avaliado na simulação do cenário SR/SC, em que é observado que caso o canal e os reservatórios não existissem haveria um aumento de áreas inundáveis de 76,75% para o TR de 25 anos e de 79,58% para o TR de 10 anos ao comparar com o cenário 2014, com um avanço ainda maior sobre a área residencial do Bolsão Audi-União do que no cenário SC. Neste cenário, considerando eventos de chuva com

TR de 10 anos o dique conseguiria proteger parte do Bolsão Audi-União em que foi construído, entretanto a enchente conseguiria se sobrepor ao aterro executado pela Rede Ferroviária Federal S.A., atingindo uma região residencial que não seria atingida no cenário SC. Considerando os eventos com TR de 25 anos ou mais o dique não conseguiria conter as inundações e a enchente atingiria áreas residenciais que ficam localizadas atrás do dique.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou um estudo comparativo de situações hipotéticas considerando diferentes cenários de urbanização da bacia hidrográfica de estudo e considerando diferentes topologias da rede de drenagem. A partir da modelagem hidrológica foi possível avaliar as reduções das vazões devido as diferentes obras hidráulicas implementadas na bacia e o aumento de vazões dado pelo crescimento populacional. Adicionalmente, a modelagem hidráulica possibilitou a análise da efetividade das medidas estruturais e não estruturais implementadas diretamente no Bolsão Audi-União. O estudo envolveu também um processo de calibração da modelagem hidrológica, suscitando em uma maior precisão dos resultados obtidos neste trabalho.

A área de estudo envolve uma região bastante complexa, já que a bacia hidrográfica de estudo conta com porções de ao menos 8 municípios dentro de seu perímetro, de forma que cada cidade possui um zoneamento e planejamento urbano diferente, e conseqüentemente a proposição de cenários futuros acaba também se tornando mais complexa. Apesar disso, foram adotadas simplificações para que fosse possível estimar situações futuras de uso e ocupação do solo, de forma que os hidrogramas obtidos são uma estimativa da resposta da bacia em relação a precipitação simulada.

As medidas estruturais implementadas na região de estudo envolvem três reservatórios de água, um canal extravasor e um dique. As medidas não estruturais que foram realizadas na região compreendem a remoção de moradias da margem direita do rio Iguaçu, a implementação da APA do Iguaçu com a criação do parque Centenário da Imigração Japonesa e o estabelecimento do Plano Diretor de Drenagem.

Verificou-se neste estudo que o conjunto de medidas estruturais composto pelos reservatórios e pelo Canal Paralelo traz uma redução na vazão de pico no início do rio Iguaçu de cerca de 31,4% e uma redução 35,1% de áreas inundáveis considerando um tempo de retorno de 100 anos. A partir das manchas de inundação foi possível observar que o dique também se mostrou efetivo na contenção de inundações tanto nos cenários atuais como em cenários futuros, exceto por uma pequena porção da área residencial do Bolsão Audi-União que ainda fica sujeita a inundações, mas que possivelmente será contemplada com a extensão do dique, de forma que toda a região com moradias no Bolsão Audi-União ficará protegida até mesmo em cenários futuros.

Pode-se dizer que a principal medida estrutural realizada na região foi a execução do Canal Paralelo, que de fato conseguiu trazer uma grande redução nas vazões no início do rio Iguaçu e nas áreas inundadas. Os reservatórios não se mostraram tão efetivos como o Canal Paralelo na redução de vazões, esta situação já era prevista por (TUCCI, 1996), que já apontava que a bacia de contribuição dos reservatórios era pequena ao comparar com a área total da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu e que os reservatórios se encontram em sub-bacias menos urbanizadas.

Outra conclusão obtida a partir das manchas de inundação foi a verificação da efetividade das medidas não estruturais. Caso não tivessem sido feitas as remoções das famílias na margem direita do rio Iguaçu, essas seriam afetadas por enchentes com tempos de recorrência até mesmo

de 10 anos, ou seja, a realocação dessas famílias foi uma decisão correta por parte do poder público. Além disso, a criação da APA do Iguaçu e do parque Centenário da Imigração Japonesa auxiliaram na contenção do avanço da ocupação da margem direita do rio Iguaçu ao mesmo tempo que proporcionam uma área de amortecimento de vazões. Infelizmente a criação dessas áreas ocorreu de forma um pouco tardia, após o estabelecimento de uma área urbana muito próxima ao rio, acarretando nas realocações citadas anteriormente e possivelmente em um custo maior para a Prefeitura Municipal de Curitiba.

Apesar deste estudo ser voltado a avaliar as medidas implementadas no Bolsão Audi-União, que fica localizado na margem direita do rio Iguaçu, não é possível deixar de avaliar o avanço da mancha de inundação também na margem esquerda do rio, ou seja, no município de São José dos Pinhais. Neste caso, fica claro que enquanto a porção de Curitiba passou a contar com diversas ações para que fosse reduzido o risco de famílias afetadas por cheias do rio Iguaçu, o mesmo não ocorreu na porção de São José dos Pinhais. Verificou-se que houve um avanço da ocupação urbana em direção ao Canal Paralelo e que seria necessário a realocação das famílias que estão nesta região já que a proximidade das casas com o canal é tão grande que a construção de um dique se mostra inviável. Neste ponto, fica claro a necessidade de se ter a bacia hidrográfica como norteadora do planejamento e da gestão urbana.

Vale destacar que a COMEC vem desenvolvendo projetos de quatro parques metropolitanos que serão realizados em afluentes do rio Iguaçu, entre eles está o parque Ambiental Palmital que contará com lagoas que visam reduzir a vazão do rio Palmital em eventos de cheias. Este rio está localizado na sub-bacia SB 2, uma das sub-bacias mais urbanizadas deste estudo, por isso mesmo, provavelmente ocorrerá uma redução significativa da vazão no início do rio Iguaçu e as manchas de inundação apresentadas neste estudo serão reduzidas. Outro parque que faz parte deste projeto da COMEC é o parque Metropolitano do Iguaçu que ficará entre o rio Iguaçu e o Canal Paralelo, segundo as simulações deste estudo esta região teve toda sua área inundada até mesmo para TR de 10 anos e a construção deste parque será essencial na contenção da urbanização desta área.

Recomenda-se que o Governo do Estado do Paraná faça uma atualização do Plano Diretor de Drenagem, para que o estudo realizado neste trabalho possa ser aprofundado. Além disso, sugere-se também que a rede hidrometeorológica da bacia hidrográfica do Altíssimo Iguaçu seja atualizada e ampliada.

Entre as melhorias propostas para a modelagem hidrológica estão: levantamento de dados mais recentes de vazão para realização da calibração, maior discretização das sub-bacias, utilização de imagens de satélite de alta resolução para que os valores de *Curve Number* possam ser melhor definidos, utilização de dados das prefeituras municipais para avaliação do zoneamento previsto em cada localidade e melhor definição de cenários futuros.

A modelagem hidráulica utilizou dados de batimetria do rio Iguaçu de 1995 e utilizou uma aproximação para a definição da seção transversal do Canal Paralelo. Desta forma, é recomendado que trabalhos futuros façam um levantamento batimétrico atualizado do rio Iguaçu e do Canal Paralelo. Além disso, sugere-se também que os coeficientes de Manning sejam calibrados utilizando dados levantados em campo.

Como historicamente as inundações na região do Bolsão Audi-União ocorrem devido as cheias no rio Iguaçu, esse estudo avaliou somente as obras realizadas com objetivo de reduzir a vazão e a área de inundação do rio Iguaçu no local de estudo, estudos complementares relativos a capacidade do canal de drenagem executado no Bolsão Audi-União podem ser realizados, neste caso um levantamento batimétrico do canal também será necessário.

Além das recomendações citadas, sugere-se também uma avaliação do prejuízo causado pelas inundações na porção de São José dos Pinhais, com o objetivo de avaliar o custo-benefício de desapropriações nos locais atingidos por inundação.

Por fim, vale salientar que a proteção das moradias do Bolsão Audi-União contra inundações do rio Iguaçu está condicionada a manutenção do dique, e possivelmente do aterro executado pela Rede Ferroviária Federal S.A. que acabou por funcionar como uma espécie de dique. Além disso, procedimentos de dragagem e desassoreamento no canal de drenagem, no Canal Paralelo e no rio Iguaçu são essenciais para que as seções transversais desses canais não sejam reduzidas e que as manchas de inundação na região não venham a aumentar.

REFERÊNCIAS

- AGUASPARANÁ - INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. *Sistema de Informações Hidrológicas - SIH: Vazões fluviométricas médias diárias (m^3/s)*. 2020. Disponível em: <<http://www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br/sih-web/gerarRelatorioVazoesFluviometricas.do?action=carregarInterfaceInicial>>. Acessado em: 09 set. 2020.
- ALE, S. *et al.* Development and application of a distributed modeling approach to assess the watershed-scale impact of drainage water management. *Agricultural Water Management*, Elsevier, v. 107, p. 23–33, 2012.
- ALMEIDA, S. *et al.* Efeito do incêndio de Catraia no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Séqua. *Territorium*, n. 23, p. 153–160, 2016.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *HIDROWEB: Séries históricas de estações*. 2020. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acessado em: 09 set. 2020.
- ANDREWS, F. *et al.* An open software environment for hydrological model assessment and development. *Environmental Modelling Software*, v. 26, n. 10, p. 1171–1185, 2011.
- ASF - ALASKA SATELLITE FACILITY. *About ASF*. 2021. Disponível em: <<https://asf.alaska.edu/about-asf>>. Acessado em: 10 mar. 2021.
- ASF - ALASKA SATELLITE FACILITY. *ALOS PALSAR – About*. 2021. Disponível em: <<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-about/>>. Acessado em: 10 mar. 2021.
- BAI, Y. *et al.* Assessing the Impact of Climate Change on Flood Events Using HEC-HMS and CMIP5. *Water, Air, & Soil Pollution*, Springer, v. 230, n. 6, p. 119, 2019.
- BALES, J. D. *et al.* *LiDAR-derived flood-inundation maps for real-time flood-mapping applications, Tar River Basin, North Carolina*. [S.l.], 2007.
- BATES, P. D.; ROO, A. D. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 236, n. 1-2, p. 54–77, 2000.
- BELLO, M. Analyse des vulnérabilités des impacts des changements climatiques. *Vecteur Environnement*, Réseau Environnement, v. 46, n. 2, p. 26, 2013.
- BEMFICA, D. da C. *et al.* Análise da Aplicabilidade de Padrões de Chuva de Projeto a Porto Alegre. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, p. 5–16, 2000.
- BEVEN, K. J. *Rainfall-runoff modelling: the primer*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- CHOW, V. T. *Open-channel hydraulics*. [S.l.]: McGraw-Hill Civil Engineering Series, 1959.
- CHOW, V. T. *et al.* *Applied Hydrology*. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, 1988.
- COHAB-CT - COMPANHIA DE HABITAÇÃO POPULAR DE CURITIBA. *Acervo da Companhia de Habitação Popular de Curitiba*. Curitiba: COHAB-CT, 2017.
- COHAB-CT - COMPANHIA DE HABITAÇÃO POPULAR DE CURITIBA. *Relatório Final de Avaliação - Bacia do Iguaçu - TC 0226009 - 68/2007*. Curitiba: COHAB-CT, 2017.

COHAB-CT - COMPANHIA DE HABITAÇÃO POPULAR DE CURITIBA. *Relatório Final de Avaliação - Bolsão Audi União - TC 0187.559-81/2005*. Curitiba: COHAB-CT, 2017.

COHAB-CT - COMPANHIA DE HABITAÇÃO POPULAR DE CURITIBA. Obra da Cohab vai impedir alagamentos no Uberaba. COHAB-CT, Curitiba, mai. 2021. Disponível em: <<http://www.cohabct.com.br/conteudo.aspx?conteudo=1424>>. Acessado em: 22 nov. 2021.

COMEC - COORDENAÇÃO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA. PAC 2 da Drenagem. Curitiba, 2021. Disponível em: <<http://www.comec.pr.gov.br/Pagina/PAC-2-da-Drenagem>>. Acessado em: 26 mai. 2021.

Consórcio ENERCONSULT/ELC/TEI. *Parque e Controle de Cheias do Alto Iguaçu: Obras Componentes do Sistema de Controle de Cheias*. 1997.

COUTINHO, M. M. *Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina, ES*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

CRUZ, L. G. d. A. *Modelagem hidrológica HEC-HMS da bacia hidrográfica do rio Tibagi*. Curitiba: [s.n.], 2019.

CUNHA, P. V. d. C. *Gênese de calcretes da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba, Paraná*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2011.

CURITIBA. Decreto nº 192 de 03 de abril de 2000. Regulamenta parcialmente o Art. 5º, inciso IX, da Lei nº 9.800/00, no que diz respeito à Área de Proteção Ambiental do Iguaçu, Parque Municipal do Iguaçu e dá outras providências. *Secretaria Municipal de Meio Ambiente*, Curitiba, 2000.

CURITIBA. Decreto nº 250, de 03 de maio de 2000. Dispõe sobre a criação de novos setores especiais de habitação de interesse social. *Secretaria Municipal de Meio Ambiente*, Curitiba, 2000.

CURITIBA. Lei nº 9.800, 03 de janeiro de 2000. Dispõe sobre o Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo no Município de Curitiba e dá outras providências. *Câmara Municipal de Curitiba*, Curitiba, 2000.

CURITIBA. Prefeitura prepara recuperação ambiental na Vila Audi. Curitiba, mar. 2005. Disponível em: <<https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/prefeitura-prepara-recuperacao-ambiental-na-vila-audi/459>>. Acessado em: 28 jan. 2021.

CURITIBA. Decreto nº 894 de 27 de agosto de 2007. Declara áreas de interesse público para fins de implantação do Parque do Centenário da Imigração Japonesa. *Palácio 29 de Março*, Curitiba, 2007.

CURITIBA. Decreto nº 174 de 13 de março de 2008. Regulamenta parcialmente o Art. 5º, inciso IX, da Lei nº 9.800/00, no que diz respeito à Área de Proteção Ambiental do Iguaçu, Parque Municipal do Iguaçu e dá outras providências. *Secretaria Municipal de Meio Ambiente*, Curitiba, 2008.

CURITIBA. Decreto nº 520 de 23 de junho de 2008. Dispõe sobre a criação do Parque Natural Municipal do Centenário da Imigração Japonesa no Brasil e dá outras providências. *Secretaria Municipal de Meio Ambiente*, Curitiba, 2008.

- CURITIBA. Projeto de urbanização da Vila Audi concorre a prêmio internacional. Curitiba, dez. 2013. Disponível em: <<https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/projeto-de-urbanizacao-da-vila-audi-concorre-a-premio-internacional/31498>>. Acessado em: 26 jan. 2021.
- CURITIBA. Decreto nº 26 de 19 de janeiro de 2015. Regulamenta parcialmente o Art. 5º, inciso IX, da Lei nº 9.800/00, no que diz respeito à Área de Proteção Ambiental do Iguazu, Parques Natural Municipal do Iguazu, do Centenário da Imigração Japonesa e o Linear do Cajuru e dá outras providências. *Secretaria Municipal de Meio Ambiente*, Curitiba, 2015.
- DECINA, T. G. T.; BRANDÃO, J. L. B. Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 21, n. 1, p. 207–217, 2016.
- DU, S. *et al.* Quantifying the impact of impervious surface location on flood peak discharge in urban areas. *Natural Hazards*, v. 76, n. 3, p. 1457–1471, 2015.
- ENOMOTO, C. F. *Método Para Elaboração de Mapas de Inundação - Estudo de Caso na Bacia do Rio Palmital, Paraná*. 135 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2004.
- FENDRICH, R. *et al.* Estudo de Chuvas Intensas do Estado do Paraná. *ISAM PUC*, 1989.
- FENICIA, F. *et al.* Learning from model improvement: On the contribution of complementary data to process understanding. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 44, n. 6, 2008.
- FILHO, A. G. d. A. *et al.* Estudo de medidas não-estruturais para controle de inundações urbanas. *Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias*, Ponta Grossa-PR, v. 6, p. 69–90, 2000.
- FILHO, K. Z.; MARCELLINI, S. Precipitações máximas. In: *Drenagem Urbana*. Porto Alegre: ABRH, 1995. p. 37–76.
- FIRKOWSKI, O. *A nova territorialidade da indústria e o aglomerado metropolitano de Curitiba*. 278 p. Tese (Doutorado) — Faculdade de Filosofia, Línguas e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 2001.
- FOX, R. W. *et al.* *Introdução À Mecânica Dos Fluidos*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- GARCIAS, P. M. Industrialização, padrão de comércio externo e o comércio intra-indústria do Estado do Paraná–1990-2010. *Informe Gepec*, v. 17, n. 2, p. 125–141, 2013.
- GERMANO, A. *et al.* Estimativa dos parâmetros do modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 4, p. 103–120, 1998.
- GRACIOSA, M. C. P. *Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010.
- GÜL, G. O. *et al.* A combined hydrologic and hydraulic modeling approach for testing efficiency of structural flood control measures. *Natural Hazards*, Springer, v. 54, n. 2, p. 245–260, 2010.
- HANSSON, K. *et al.* A framework for evaluation of flood management strategies. *Journal of Environmental Management*, Elsevier, v. 86, n. 3, p. 465–480, 2008.

HAYAKAWA, I. F.; ULTRAMARI, C. Situações de risco como definidoras de inflexões no planejamento e na gestão urbana: um estudo em Curitiba. *XVI Encontro Nacional de Estudos Populacionais*, Caxambu-MG, p. 1–19, 2008.

HEIDARI, A. Structural master plan of flood mitigation measures. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Copernicus GmbH, v. 9, n. 1, p. 61–75, 2009.

HORRITT, M.; BATES, P. Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrological processes*, Wiley Online Library, v. 15, n. 5, p. 825–842, 2001.

IAC - INSTITUTO AGRONÔMICO. *Solos do Estado de São Paulo: Latossolos*. Campinas - São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/solosp/pdf/Latossolos.pdf>>. Acessado em: 05 mar. 2021.

IAC - INSTITUTO AGRONÔMICO. *Solos do Estado de São Paulo: Cambissolos*. São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/solosp/pdf/Cambissolos.pdf>>. Acessado em: 05 mar. 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo demográfico: 1950*. Rio de Janeiro: IBGE, 1950.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. As favelas do Distrito Federal e o Censo demográfico de 1950. *Documentos censitários*, IBGE, Rio de Janeiro, n. 9, 1953.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo demográfico: 2000: características gerais da população: resultados da amostra*. Rio de Janeiro: IBGE, 2000.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo 2010*. IBGE, 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acessado em: 11 mar. 2021.

IPARDES - INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *ESTADO DO PARANÁ - HIPSIOMETRIA*. Curitiba, 2005. Disponível em: <http://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2019-09/Hipsometria%20-%20Paran%C3%A1.pdf>. Acessado em: 05 mar. 2021.

IPARDES - INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *ESTADO DO PARANÁ - DEMANDA HÍDRICA*. Curitiba, 2009. Disponível em: <http://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2019-09/Demanda%20h%C3%Adrica%20e%20Tipo%20de%20manancial%20-%20Paran%C3%A1.pdf>. Acessado em: 05 mar. 2021.

IPARDES - INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *ESTADO DO PARANÁ - DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUPERFICIAL*. Curitiba, 2009. Disponível em: <http://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2019-09/Disponibilidade%20h%C3%Adrica%20-%20Paran%C3%A1.pdf>. Acessado em: 05 mar. 2021.

IPARDES - INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *ESTADO DO PARANÁ - USO DA TERRA E REMANESCENTES DA COBERTURA VEGETAL NATIVA*. Curitiba, 2010–2014. Disponível em: <http://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2020-09/Usoda%20terra%20e%20Remanescentes%20.pdf>. Acessado em: 05 mar. 2021.

- IPARDES - INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *ESTADO DO PARANÁ - REMANESCENTES DA COBERTURA VEGETAL NATIVA*. Curitiba, 2013–2014. Disponível em: <http://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2019-09/Remanescentes%20de%20cobertura%20vegetal%20nativa%20-%20Paran%C3%A1%20%282013-2014%29.pdf>. Acessado em: 05 mar. 2021.
- IPPUC - INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA. *Sistema Infocuritiba*. Curitiba: IPPUC, 2021. Disponível em: <<http://infocuritiba.ippuc.org.br/imp/imp.php>>. Acessado em: 28 abr. 2021.
- ITCG - INSTITUTO DE TERRAS CARTOGRÁFIA E GEOCIÊNCIAS. *CLIMA - ESTADO DO PARANÁ*. Curitiba, 2008. Clima - Classificação de Köppen. Escala 1:2.000.000. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mapa_climas_a3.pdf>. Acessado em: 05 mar. 2021.
- ITCG - INSTITUTO DE TERRAS CARTOGRÁFIA E GEOCIÊNCIAS. *GEOMORFOLOGIA - ESTADO DO PARANÁ*. Curitiba, 2008. Escala 1:2.000.000. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mapa_geomorfologico_a3.pdf>. Acessado em: 05 mar. 2021.
- ITCG - INSTITUTO DE TERRAS CARTOGRÁFIA E GEOCIÊNCIAS. *SOLOS - ESTADO DO PARANÁ*. Curitiba, 2008. Escala 1:2.000.000. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mapa_solos.pdf>. Acessado em: 05 mar. 2021.
- KANG, K. *et al.* Impact of altered land use on the hydrology of urban territories. *Russian Meteorology and Hydrology*, v. 43, n. 3, p. 197–202, 2018.
- KLEMEŠ, V. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, v. 31, n. 1, p. 13–24, 1986.
- LIMA, C. d. A. *A ocupação de área de mananciais na região metropolitana de Curitiba: do planejamento à gestão ambiental urbana-metropolitana*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2000.
- LIN, B. *et al.* Integrating 1D and 2D hydrodynamic models for flood simulation. In: THOMAS TELFORD LTD. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*. [S.l.], 2006. v. 159, n. 1, p. 19–25.
- LINS, R. C. *Modelagem hidráulica do canal Beira Rio nos cenários de requalificação do curso d'água e de implantação de bacia de retenção*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2019.
- MACHADO, A. R. *et al.* Avaliação do modelo J2000/JAMS para modelagem hidrológica em bacias hidrográficas brasileiras. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 2, p. 327–340, 2017.
- MASOERO, A. *et al.* Reconstruction and analysis of the Po River inundation of 1951. *Hydrological Processes*, Wiley Online Library, v. 27, p. 1341–1348, 2013.
- MATION, L. F. *et al.* *Favelização no Brasil entre 2000 e 2010: resultados de uma classificação comparável*. [S.l.], 2014.
- MATOS, R. Migração e urbanização no Brasil. *Revista Geografias*, p. 7–23, 2012.

- MEENU, R. *et al.* Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga–Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. *Hydrological Processes*, v. 27, n. 11, p. 1572–1589, 2013.
- MORAES, T. C. d. *et al.* Effects on runoff caused by changes in land cover in a Brazilian southeast basin: evaluation by HEC-HMS and HEC-GEOHMS. *Environmental earth sciences*, Springer, v. 77, n. 6, p. 250, 2018.
- MOREIRA, A. Á. C. *Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Granjeiro-Crato-CE: composição do cenário atual e simulações de uso e ocupação do solo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2013.
- MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.
- MULUNGO, H. E. *Estudo de inundação na bacia do campus da UFSC, Florianópolis-SC*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis -SC, 2012.
- OGRAS, S.; ONEN, F. Flood Analysis with HEC-RAS: A Case Study of Tigris River. *Advances in Civil Engineering*, Hindawi, v. 2020, 2020.
- PATANKAR, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. [S.l.]: CRC press, 2018. 214 p.
- PONTES, P. R. *et al.* Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 4, p. 888–904, 2015.
- PRESTES, M. F. *Requalificação ambiental em assentamentos precários: o PAC Favelas na franja leste da metrópole de Curitiba*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018.
- RESENDE, V. M. *et al.* Previsão de cotas para o Projeto Jaíba no Rio São Francisco. *XXII Símposio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2017.
- RITTER, C. *Os processos de periferização, desperiferização e reperiferização e as transformações socioespaciais no aglomerado metropolitano de Curitiba*. 298 p. Tese (Doutorado) — Tese (Programa de Pós-graduação em Geografia) Universidade Federal do Paraná, 2011.
- RIVERO, S. *et al.* Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. *Nova economia*, v. 19, n. 1, p. 41–66, 2009.
- SANEPAR - COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. *Plano Diretor SAIC: Sistema de Abastecimento de Água Integrado de Curitiba e Região Metropolitana*. Curitiba: Sanepar, 2013.
- SANTOS, H. G. dos *et al.* *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SARTORI, A. *et al.* Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 05–18, 2005.
- SCHÄFER, E. F.; GOMIDE, F. P. d. B. Avaliação Pós-ocupação do conjunto habitacional moradias união Ferroviária Bolsão Audi/União, Curitiba (PR). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 155–164, 2014.

SILVA, T. A. d. *Modelagem hidráulica do canal do Rio Granjeiro, Crato/CE, utilizando o programa computacional HEC-RAS*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2013.

SILVEIRA, A. L. L. da. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 1, p. 05–23, 2005.

SINGH, V. P.; WOOLHISER, D. A. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of hydrologic engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 7, n. 4, p. 270–292, 2002.

SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. *PRECIPITAÇÃO ANUAL*. Curitiba, 1998. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mp07.pdf>. Acessado em: 05 mar. 2021.

SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba*. Curitiba, 2002.

SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba: Definição do Sistema Institucional*. Curitiba, 2002. v. 1. 130 p.

SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba: Políticas e Ações Não-Estruturais*. Curitiba, 2002. v. 2. 107 p.

SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba: Capacidade do Sistema Atual e Medidas de Controle de Cheias – Programa de Implantação de Medidas Estruturais de Controle*. Curitiba, 2002. v. 3, Tomo 3.1. 58 p.

SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba: Capacidade do Sistema Atual e Medidas de Controle de Cheias – Estudos e Projetos Existentes*. Curitiba, 2002. v. 3, Tomo 3.4. 45 p.

SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba: Capacidade do Sistema Atual e Medidas de Controle de Cheias – Estudos Hidrológicos – Metodologia e Hidrogramas Calculados*. Curitiba, 2002. v. 3, Tomo 3.2. 45 p.

SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba: Capacidade do Sistema Atual e Medidas de Controle de Cheias – Soluções Hidrodinâmicas – Metodologia*. Curitiba, 2002. v. 3, Tomo 3.3. 44 p.

SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba: Capacidade do Sistema Atual e Medidas de Controle de Cheias – Estudo dos Efeitos das Medidas de Controle Propostas Sobre o Rio Iguaçu*. Curitiba, 2002. v. 4, Tomo 4.30. 18 p.

SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba: Capacidade do Sistema Atual e Medidas de Controle de Cheias – Modelagem das linhas de inundação da bacia do rio Iraí*. Curitiba, 2002. v. 4, Tomo 4.16. 126 p.

SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba: Capacidade do Sistema Atual e Medidas de Controle de Cheias – Modelagem das linhas de inundação da bacia do rio Pequeno*. Curitiba, 2002. v. 4, Tomo 4.6. 143 p.

SUDERHSA - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba: Capacidade do Sistema Atual e Medidas de Controle de Cheias – Modelagem das linhas de inundação da bacia do rio Itaquí*. Curitiba, 2002. v. 4, Tomo 4.5. 88 p.

SURIYA, S.; MUDGAL, B. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub-watershed: A case study. *Journal of hydrology*, v. 412, p. 210–219, 2012.

TANG, Y. *et al.* Impact of size and location of wetlands on watershed-scale flood control. *Water Resources Management*, Springer, v. 34, n. 5, p. 1693–1707, 2020.

TEIXEIRA, L. B. *Da lama ao caos: a urbanização de Curitiba vista do Bolsão Audi-União*. 296 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2019.

TRIGG, M. A. *et al.* Amazon flood wave hydraulics. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 374, n. 1-2, p. 92–105, 2009.

TRIPATHI, R. *et al.* Climate change, urban development, and community perception of an extreme flood: A case study of Vernonia, Oregon, USA. *Applied Geography*, v. 46, p. 137–146, 2014.

TUCCI, C. E. M. *Estudos Hidrológicos e Hidrodinâmicos do rio Iguaçu na RMC*. [S.l.]: PROSAM-SUCEAM, Curitiba, 2 volumes, 1996.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001.

TUCCI, C. E. M. Flood control and urban drainage management in Brazil. *Waterlines*, JSTOR, p. 6–8, 2002.

TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre-RS: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. *Inundações Urbanas*. Porto Alegre: ABRH, 2007. 389 p.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-1 Flood Hydrograph Package Users Manual*. Davis, CA, 1998.

- USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Hydrologic Modeling System - HEC-HMS - Technical Reference Manual*. Davis, CA, 2000.
- USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-RAS - River Analysis System - Hydraulic Reference Manual*. Davis, CA, 2016.
- USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Hydrologic Modeling System - HEC-HMS - User's Manual*. Davis, CA, 2016.
- VERGUTZ, L. A. A. *et al.* Análise da implantação de reservatórios de retenção de forma que sejam minimizados os impactos causados por inundações. *Engenharia Sanitária e Ambiental, SciELO Brasil*, v. 24, p. 1267–1277, 2019.
- VOORHEES, M. L.; WENZEL, H. G. Urban design-storm sensitivity and reliability. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 68, n. 1-4, p. 39–60, 1984.
- WAGENER, T. *et al.* Advances in the identification and evaluation of complex environmental systems models. *Journal of Hydroinformatics*, v. 11, 2009.
- WINTER, L. G. *Elaboração de manchas de inundação na área central de Pato Branco considerando aspectos urbanísticos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- WOLTEMADE, C. J. *et al.* Impact of changing climate and land cover on flood magnitudes in the Delaware River Basin, USA. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2020.
- YAZDI, J. *et al.* Optimal design of check dams in mountainous watersheds for flood mitigation. *Water Resources Management*, Springer, v. 32, n. 14, p. 4793–4811, 2018.
- YOUNG, C. E. F. Desmatamento e desemprego rural na Mata Atlântica. *Floresta e Ambiente*, Instituto de Florestas/UFRRJ, v. 13, n. 2, p. 75–88, 2012.
- ZANELLA, M. E. *Inundações em Curitiba: impactos, risco e vulnerabilidade socioambiental*. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

ANEXO A – VALORES DE CN PARA DIFERENTES TIPOS DE USO DO SOLO

TABELA 21 – Valores de CN para áreas agrícolas

Uso do solo	Superfície	A	B	C	D
Solo Lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações Regulares	Em curvas de níveis	67	77	83	87
	Terraceamento em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de Cereais	Em curvas de níveis	62	74	82	85
	Terraceamento em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de Legumes ou Cultivados	Em curvas de níveis	60	72	81	84
	Terraceamento em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
Pastagem em curvas de nível	Boas	39	61	74	80
	Pobres	47	67	81	88
	Normais	25	59	75	83
Campos Permanentes	Boas	6	35	70	79
	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
Chácaras	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
	Normais	56	75	86	91
Estradas de terra	Ruim	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

FONTE: Tucci (2001)

TABELA 22 – Valores de CN para áreas urbanas

Descrição do uso do solo	Tipo de Solo			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
Zonas cultivadas: com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim	45	66	77	83
Floresta: cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições com relva em 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 % média impermeável Lotes de (m^2)				
<500	65	77	85	90
1000	38	61	75	83
1300	30	57	72	81
2000	25	54	70	80
4000	20	51	68	79
Parque de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas				
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais estradas	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

FONTE: Tucci (2001)