



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
CURSO DE ENGENHARIA HÍDRICA



YURI TIMM MULLER

**EFEITO DA DISCRETIZAÇÃO NA CALIBRAÇÃO DO
MODELO MGB-IPH PARA A BACIA DO RIO URUGUAI**

Porto Alegre

Julho 2019

YURI TIMM MULLER

EFEITO DA DISCRETIZAÇÃO NA CALIBRAÇÃO DO MGB-IPH PARA A
BACIA DO RIO URUGUAI

TRABALHO DE CONCLUSÃO APRESENTADO
AO CURSO DE ENGENHARIA HÍDRICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO SUL COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA
A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ENGENHEIRO
HÍDRICO

Orientador: Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

Coorientador: Dr. Francisco Fernando Noronha Marcuzzo

Porto Alegre

Julho 2019

YURI TIMM MULLER

EFEITO DA DISCRETIZAÇÃO NA CALIBRAÇÃO DO MGB-IPH PARA A
BACIA DO RIO URUGUAI

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 09/07/2019 pela Comissão Avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Walter Collischonn
Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS

.....
Mestre Ayan Santos Fleischmann
Bolsista de Doutorado pelo CNPq no HGE do IPH/UFRGS
Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS

.....
Mestre. Franco Turco Buffon
Gerência de Hidrologia e Gestão Territorial – GEHYTE / SUREG-PA
Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM

Conceito:.....

Müller, Yuri Timm
EFEITO DA DISCRETIZAÇÃO NA CALIBRAÇÃO DO MODELO
MGB-IPH PARA A BACIA DO RIO URUGUAI / Yuri Timm
Müller. -- 2019.

104 f.

Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Coorientador: Francisco Fernando Noronha Marcuzzo.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica,
Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Discretização. 2. Modelo de Grande Bacias (MGB).
3. Bacia do rio Uruguai. I. Fan, Fernando Mainardi,
orient. II. Marcuzzo, Francisco Fernando Noronha,
coorient. III. Título.

“Pensamos demasiadamente
e sentimos muito pouco.
Necessitamos mais de
humildade que de máquinas.
Mais de bondade e ternura
que de inteligência...”

Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) por todos ensinamentos de excelência. Sou grato pela oportunidade de graduar-me em uma instituição pública e espero retornar da melhor forma possível os conhecimentos adquiridos para a sociedade.

Agradeço à Companhia de Pesquisa em Recurso Minerais (CPRM) pela oportunidade de estágio, experiência muito valiosa para minha formação, e pelos dados disponibilizados, sem os quais este trabalho não teria sido possível. Agradecimento especial ao M^e Franco Buffon por todo apoio, interesse e incentivo ao trabalho, a M^a Adriana Burin e a M^a Andrea Germano pela acolhida, ensinamentos e conselhos, os quais sempre confiaram na minha capacidade e dedicação. Agradeço ao meu coorientador, Dr. Francisco F. N. Marcuzzo, pelos conhecimentos compartilhados e orientação.

Agradeço também ao professor Dr. Fernando Fan por ter aceitado me orientar nessa monografia. Por toda sua atenção e contribuições durante todo o processo de desenvolvimento deste estudo, além dos conhecimentos e valores passados ao longo das disciplinas.

Por fim, agradeço a minha família. Aos meus pais, Leni e Ingo, pelos valores morais passados ao longo da vida, pelo carinho e todo amor. Ao meu irmão Gabriel Müller e minha cunhada Gabriela Hass, por todos conselhos e boas vibrações. À minha namorada, Gabriela Ferreira, pelo amor, compreensão, e apoio incondicional em todos os momentos desta longa jornada. Sou extremamente grato a todos.

RESUMO

Na modelagem hidrológica e hidrodinâmica, há muitos fatores que influenciam no tempo de processamento e na representatividade dos resultados. Um deles, o qual é o foco do presente estudo, é a metodologia da discretização espacial da bacia hidrográfica. Os modelos mais atuais são interligados em parte ou totalmente com Sistemas de Informações Geográficas (SIG), em que a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) são realizados os processos de delimitação da área de interesse, obtenção da rede de drenagem, divisão da área em elementos menores e obtenção das características físicas de cada elemento. Como a região é segmentada depende do tipo de modelo utilizado e da metodologia de discretização empregada, podendo influenciar diretamente nos resultados. O objetivo principal do estudo foi analisar o efeito da discretização na calibração do MGB-IPH para a bacia do rio Uruguai, em termos da representação de cheias, tempo de processamento e tempo de pré-processamento. Buscou-se investigar a relação de custo versus benefício em utilizar diferentes tamanhos de trechos(dx) de rio no processo de discretização da área, mais especificamente na segmentação da rede de drenagem por comprimento fixo, variando o tamanho de 7km a 100km. As análises foram realizadas para quatro estações fluviométricas ao longo do rio Uruguai (Iraí, Porto Lucena, Passo São Borja e Uruguaiana) e uma no rio Ibicuí, abrangendo diferentes áreas de drenagem. Os resultados obtidos, de modo geral, apresentaram a tendência de quanto menor o tamanho do trecho mais refinado ficou o modelo, apresentando os melhores resultados, porém maior custo computacional. Na comparação com a discretização inicial (10km), o trecho de 7km apresentou os melhores resultados na representação da cheia, porém o tempo de simulação foi demasiado elevado, não justificando tal refinamento. Já com o trecho de 20km, obteve-se redução do tempo de simulação em torno de 4 vezes com pequena queda na qualidade das métricas de desempenho.

Palavras-Chave Discretização. Modelo de Grande Bacias (MGB). Bacia do rio Uruguai,

ABSTRACT

In hydrological and hydrodynamic modeling, there are many factors that influence the processing time and the representativeness of the results. One of them, which is the focus of the present study, is the spatial discretization methodology of the basin. The most current models are interconnected in part or in full with Geographic Information Systems (GIS), from a Digital Elevation Model (MDE) the processes of delimitation of the area of interest are obtained, obtaining the drainage network, dividing the area into smaller elements and obtaining the physical characteristics of each element. The way in which the region will be segmented depends on the type of model used and the methodology of discretization employed, can directly influence the results. The analyzes were performed for four fluviometric stations along the Uruguay River (Iraí, Porto Lucena, Passo São Borja and Uruguaiana) and one on the Ibicuí river (Jacaqua) , encompassing different drainage areas. The main objective of the study was to analyze the effect of discretization in the calibration of the MGB-IPH for the Uruguay River basin in terms of the representation of floods, processing time and pre-processing time. We attempted to investigate the cost versus benefit relationship in using different lengths of river sections in the process of discretization of the area, more specifically in the segmentation of the drainage network by fixed length, varying the size from 7 km to 100 km. With the results obtained, in general, there is a tendency for the more refined the discretization, the better the results, but the higher the computational cost. In the comparison with the initial discretization (10km), the 7km stretch presented the best results in the flood representation, but the simulation time was too high, not justifying such refinement. With the 20 km stretch The obtained results, in general, have a tendency of smaller or smaller size, and the obtained results, but greater computational cost. In the comparison with an initial discretization (10km), the 7km stretch presented the results in the presentation of the flood, but the time of effort was very high, not justifying such refinement. With the 20km stretch, we obtained a reduction of the simulation time around 4 times with a small decrease in the quality of the performance metrics.

Keywords: Discretization. Large Basin Model (MGB). Uruguay River Basin

Lista de Ilustrações

Figura 1. Bacia hidrográfica dividida em células quadradas, rede de drenagem e direções de fluxo.....	21
Figura 2. Discretização por Minibacias pelos métodos da confluência e trechos de iguais tamanhos de comprimentos: (a) por confluência, foram 179 minibacias geradas; (b) Trechos de 10 km, 363 Minibacias geradas; (c) Trechos de 1km, 3038 minibacias geradas.....	23
Figura 3. Subdivisão de uma bacia pelo método de Otto Pfafstetter: a) Delimitação de nível 1; identificação do rio principal; seleção dos quatro afluentes principais; delimitação das bacias pares (maiores contribuintes); delimitação das bacias intermediárias (interbacias) ímpares. b) Exemplo de uma bacia subdividida de código inicial 8.....	24
Figura 4. Discretização dos subtrechos com trechos de comprimento fixos (Δx) e das variáveis Vazão (Q e QM), profundidade (h) e nível (z) do modelo Inercial implementado no modelo MGB-IPH.....	27
Figura 5. Comportamento típico de um hidrograma.....	29
Figura 6. Fluviograma e curva de permanência.....	31
Figura 7. Propagação de escoamentos nas minibacias e propagação de vazão na rede de drenagem.....	32
Figura 8. Diagrama esquemático dos processos físicos no MGB-IPH, representados pelos fluxos horizontais e verticais.....	33
Figura 9. Localização da bacia hidrográfica do rio Uruguai.....	36
Figura 10. Altimetria da bacia do rio Uruguai (MNT 90 m de resolução espacial).....	37
Figura 11. Exemplo de gráfico com informações de cotas (cm), nível (cm) e precipitação (mm) na plataforma SACE, para a bacia do rio Paraguai..	41
Figura 12. Sistemas em operação e em fase de implementação no SACE.....	42
Figura 13. Fluxograma da metodologia aplicada no estudo.....	43
Figura 14. Localização dos postos utilizados na calibração.....	45
Figura 15. Método D8 para distinguir as oito direções de fluxo possíveis com definição da direção pela maior declividade.....	46
Figura 16. Delimitação e divisão da área de estudo.....	47
Figura 17. Número de minibacias geradas na discretização da bacia do rio Uruguai com os diferentes comprimentos.....	48
Figura 18. Localização das estações fluviométricas do Sistema de Alerta Hidrológico do rio Uruguai.....	50
Figura 19. Estações fluviométricas utilizadas no MGB divididas por regiões.....	51
Figura 20. Tempo de simulação e a métrica de desempenho NSE por trecho - Iraí (74100000).....	57
Figura 21. Hidrogramas série original e simuladas para o ano de 2005 em Iraí (74100000).....	59
Figura 22. Hidrogramas série original e simuladas para junho de 2005 em Iraí (74100000).....	60
Figura 23. Tempo de simulação e a métrica de desempenho NSE por trecho - Porto Lucena (74800000).....	61
Figura 24. Hidrogramas série original e simuladas para o ano de 1997 em Porto Lucena (74800000).....	62
Figura 25. Hidrogramas série original e simuladas para outubro de 1997 em Porto Lucena (74800000).....	63
Figura 26. Tempo de simulação e a métrica de desempenho NSE por trecho - Passo São Borja (75780000).....	64

Figura 27. Hidrogramas série original e simuladas para o ano de 1997 em Passo São Borja (75780000)	65
Figura 28. Hidrogramas série original e simuladas para outubro de 1997 Passo São Borja (75780000)	66
Figura 29. Tempo de simulação e a métrica de desempenho NSE por trecho - Uruguaiana (77150000).	67
Figura 30. Hidrogramas série original e simuladas para o ano de 1983 em Uruguaiana (77150000)	68
Figura 31. Hidrogramas série original e simuladas para julho do ano de 1983 em Uruguaiana (77150000).....	69
Figura 32. Tempo de simulação e a métrica de desempenho NSE por trecho – Jacaqua (76500000).	71
Figura 33. Hidrogramas série original e simuladas para o ano de 1983 em Jacaqua (76500000)	72
Figura 34. Hidrogramas série original e simuladas para maio do ano de 1983 em Jacaqua (76500000)	73
Figura 35. Q90 por trecho - Uruguaiana (77150000).....	83
Figura 36. Vazão máxima por trecho - Uruguaiana (77150000).....	83
Figura 37. Vazão média por trecho - - Uruguaiana (77150000)	83
Figura 38. Índice <i>Nash-Sutcliffe</i> (NSE) por trecho - Uruguaiana (77150000).....	84
Figura 39. Índice <i>Nash-Sutcliffe</i> logaritmo (NSElog) por trecho - Uruguaiana (77150000)	84
Figura 40. Diferença dos volumes observados e calculados - Uruguaiana (77150000). 84	
Figura 41. Q90 por trecho - Passo São Borja (75780000)	85
Figura 42. Vazão máxima por trecho - Passo São Borja (75780000)	85
Figura 43. Vazão média por trecho - Passo São Borja (75780000)	85
Figura 44. Índice <i>Nash-Sutcliffe</i> (NSE) por trecho -Passo São Borja (75780000).....	86
Figura 45.Índice <i>Nash-Sutcliffe</i> logaritmo (NSElog) por trecho Passo São Borja (75780000)	86
Figura 46. Diferença dos volumes observados e calculados - Passo São Borja (75780000)	86
Figura 47. Q90 por trecho - Porto Lucena (74800000).....	87
Figura 48. Vazão máxima por trecho - Porto Lucena (74800000).....	87
Figura 49. Vazão média por trecho - Porto Lucena (74800000).....	87
Figura 50. Índice <i>Nash-Sutcliffe</i> (NSE) por trecho -Porto Lucena (74800000).....	88
Figura 51. Índice <i>Nash-Sutcliffe</i> logaritmo (NSElog) por trecho -Porto Lucena (74800000)	88
Figura 52. Diferença dos volumes observados e calculados por trecho - Porto Lucena (74800000)	88
Figura 53. Q90 por trecho - Iraí (74100000).....	89
Figura 54. Vazão máxima por trecho - Iraí (74100000).....	89
Figura 55. Vazão média por trecho - Iraí (74100000).....	89
Figura 56. Índice <i>Nash-Sutcliffe</i> (NSE) por trecho - Iraí (74100000).....	90
Figura 57. Índice <i>Nash-Sutcliffe</i> logaritmo (NSElog) por trecho - Iraí (74100000)	90
Figura 58. Diferença dos volumes observados e calculados por trecho - Iraí (74100000)	90
Figura 59. Q90 por trecho – Jacaqua (76500000)	91
Figura 60. Qmax por trecho – Jacaqua (76500000)	91
Figura 61. Qmed por trecho – Jacaqua (76500000)	91
Figura 62. Índice <i>Nash-Sutcliffe</i> (NSE) por trecho – Jacaqua (76500000).....	92

Figura 63. Índice Nash-Sutcliffe logaritmo (NSElog) por trecho - Jacaqua (76500000)	92
Figura 64. Diferença dos volumes observados e calculados por trecho - Jacaqua (76500000)	92

Lista de Tabelas

Tabela 1. Resumos dos resultados das simulações de cada estação fluviométrica no rio principal.....	55
Tabela 2. Resumo das comparações com a discretização inicial (10km) para cada posto fluviométrico analisado no rio principal.....	56
Tabela 3. Data da vazão máxima (m ³ /s) observada e simuladas - 74100000.....	60
Tabela 4. Data da vazão máxima (m ³ /s) observada e simuladas - 74800000.....	63
Tabela 5. Data da vazão máxima (m ³ /s) observada e simuladas - 75780000.....	66
Tabela 6. Data da vazão máxima (m ³ /s) observada e simuladas - 77150000.....	69
Tabela 7. Resultados das simulações para a estação Jacaqua (76500000).....	70
Tabela 8. Comparações com a discretização inicial (10km) para a estação Jacaqua (76500000)	70
Tabela 9. Data da vazão máxima (m ³ /s) observada e simuladas - 76500000.....	73
Tabela 10. Resumos das simulações considerando os mesmos parâmetros para todas sub-bacias.	93
Tabela 11. Resumo das comparações realizadas com a discretização inicial (10km) considerando os mesmos parâmetros para todas as sub-bacias.....	94

Lista de Quadros

Quadro 1. Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH.....	34
Quadro 2. Postos fluviométricos de interesse utilizados nas análises	52
Quadro 3. Estações climatológicas utilizadas.....	95
Quadro 4. Estações pluviométricas utilizadas	96
Quadro 5. Estações fluviométricas utilizadas.....	100
Quadro 6. Estações do Sistema de Alerta Hidrológico do Rio Uruguai.....	104

Sumário

1	Introdução.....	16
2	Objetivos do Estudo	18
2.1	Objetivo Geral.....	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	Revisão Bibliográfica.....	19
3.1	Modelagem Hidrológica	19
3.2	Discretização espacial de bacias hidrográficas	20
3.2.1	Grade Regular	21
3.2.2	Sub-bacias ou Minibacias.....	21
3.3	Propagação de Vazão em Rios.....	24
3.4	Representação de cheias	29
3.5	Descrição do modelo MGB-IPH.....	31
4	Área de estudo.....	35
4.1	Histórico de Inundações no Rio Uruguai.....	38
4.2	Modelagem na bacia do rio Uruguai.....	39
4.3	Sistemas de Alertas a inundações.....	40
5	Metodologia	43
5.1	Banco de dados	44
5.1.1	Modelo Numérico de Terreno (MNT)	44
5.1.2	Unidades de Resposta Hidrológica (URH's)	44
5.1.3	Dados Hidrológicos e Climatológicos.....	44
5.2	Pré-processamento	45
5.2.1	Delimitação da bacia hidrográfica.....	45
5.2.2	Discretização da bacia em Minibacias	47
5.2.3	Finalização do pré-processamento	49
5.3	Dados de Entrada e Simulação (MGB).....	49
5.4	Modelo de referência (CPRM)	50
5.5	Análise dos resultados	52
6	Resultados e Discussões.....	53
6.1	Análise por posto fluviométrico.....	57
6.1.1	Iraí (74100000).....	57

6.1.2	Porto Lucena (74800000).....	61
6.1.3	Passo São Borja (75780000)	64
6.1.4	Uruguaiana (77150000).....	67
6.1.5	Jacaqua (76500000).....	70
6.2	Parâmetros iguais	74
7	Conclusões	75
8	Recomendações.....	76
9	Referências Bibliográficas	77
10	Apêndice A – Gráficos das métricas de avaliação por estação.....	82
11	Apêndice B – Tabelas com resultados das simulações com parâmetros iguais para todas sub-bacias	93
12	Anexo A – Lista dos Postos Climatológicos Utilizados	95
13	Anexo B– Lista das Estações Pluviométricas Utilizadas	96
14	Anexo C– Lista da Estações Fluviométricas Utilizadas.....	100
15	Anexo C – Lista das Estações do Sistema de Alerta Hidrológico do Rio Uruguai	104

1 Introdução

Os estudos hidrológicos têm por finalidade compreender e avaliar o comportamento das bacias hidrográficas e seus sistemas ambientais associados, servindo de base para o desenvolvimento econômico e ambiental das regiões de interesse. Fornecem informações para projetos de engenharia e embasam soluções de problemas e tomada de decisões. Nas últimas décadas, com a crescente disponibilidade de dados hidrometeorológicos e capacidade computacional, aliada à preocupação com as questões associadas aos recursos hídricos, os modelos hidrológicos vêm sendo utilizados e aperfeiçoados em estudos para fornecer informações mais fidedignas.

Um modelo hidrológico é uma ferramenta que permite, através do equacionamento dos processos, representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 1998). Dentre os processos hidrológicos e hidrodinâmicos que são representados pelas equações matemáticas estão a propagação de vazão em rios, evapotranspiração, armazenamento e infiltração de água no solo, propagação de ondas de cheias e escoamento em planícies de inundação. Estes processos são, em sua essência, contínuos e tridimensionais, o que torna a análise espacial e temporal bastante complexa, resultando na necessidade de adoção de simplificações (RENNÓ *et al.* 2001).

A simulação da propagação de vazão em rios, por exemplo, pode ser em uma, duas ou até três dimensões, em que usualmente utiliza-se modelos unidimensionais, visto que a direção predominante do escoamento em rios é a longitudinal. Dessa forma, uma das maneiras de simular o processo é com as equações de Saint-Venant (MILLER, CUNGE, 1975; CHANSON, 2004). Logo, podem ser adotados modelos com equacionamento completo das equações de Saint-Venant (modelos hidrodinâmicos completos) ou adotar simplificações, como o modelo linear da onda cinemática e Muskingum-Cunge (PONTES, 2011). Ao adotar simplificações do modelo hidrodinâmico completo, tem-se um ganho no tempo de processamento, porém pode-se perder na qualidade da representatividade dos resultados, como, por exemplo, os hidrogramas, vazão de pico, efeitos de jusante e planícies de inundação. Em contrapartida, se considerar as equações completas de Saint-Venant na simulação, os resultados são representados de forma mais fisicamente adequada, porém o custo computacional é mais elevado.

Outro fator que influencia no tempo de processamento e representatividade dos resultados é a metodologia da discretização espacial da bacia hidrográfica. Os modelos são classificados como concentrados, quando consideram a bacia hidrográfica homogênea em toda sua área, ou distribuídos, considerando a variabilidade espacial. Já os modelos hidrológicos distribuídos (MHD) podem ser empregados para considerar a variabilidade das características físicas da bacia. Dentro dos MHD as formas de discretização mais empregadas, para modelagem em grande escala, são a da grade regular e a de sub-bacias. Uma técnica de discretização em “minibacias” é apresentada por Siqueira *et al.* (2016) com a utilização da ferramenta computacional *IPH-Hydro Tools*. No método é informado ao modelo o comprimento fixo do trecho que irá dividir a rede de drenagem, do exutório até a cabeceira. Quanto menor o comprimento mais discretizado

será o modelo, podendo fornecer resultados mais precisos. Porém, o custo computacional pode ser bastante elevado, não justificando tal refinamento.

Dependendo da região ou questões a serem investigadas, os estudos com modelos hidrológicos são diversos. Alguns exemplos são: dimensionamento de obras hidráulicas, aproveitamento de recursos hídricos, qualidade da água, avaliação de impactos às variabilidades climáticas sobre o regime hidrológico e previsão de inundações acoplada a sistemas de alertas. Esse último exemplo de estudo, a previsão de cheias, vem sendo aplicado em muitas bacias brasileiras, devido aos inúmeros eventos ocorridos nos últimos anos. A bacia do rio Uruguai é uma delas, sendo a região bastante afetada por esse tipo de evento. Segundo levantamento realizado por Righi e Robaina (2010), entre 1980 e 2005 foram identificados 41 eventos de inundação na bacia, com os municípios de Marcelino Ramos, Itaqui, Itá, São Borja, Iraí, e Uruguaiana, ao longo do rio Uruguai, e Alegrete, no rio Ibirapuitã, os mais afetados. Tais eventos hidrológicos extremos causam fortes impactos na economia e na vida da população, principalmente as ribeirinhas. Logo, é de crucial importância, para mitigar os danos e impactos de inundações, o desenvolvimento e operacionalização de modelos hidrológicos de previsão com sistemas de alertas.

Concomitantemente ao presente estudo, está em andamento o projeto denominado “Sistema de Alerta Hidrológico na Bacia do Rio Uruguai” pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), que tem por finalidade o desenvolvimento e operacionalização de um sistema de alerta hidrológico para a região, para o qual o modelo MGB-IPH está sendo utilizado na bacia. Sendo assim, o presente trabalho se propõe a analisar o efeito na mudança da discretização de área para a calibração do MGB-IPH na bacia do rio Uruguai, utilizando diferentes tamanhos de trechos de rio no processo de segmentação da rede de drenagem. Com isso, os resultados que serão abordados neste trabalho visam a orientar possíveis alterações na calibração do modelo que está sendo operacionalizado no projeto da CPRM.

2 Objetivos do Estudo

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar o efeito da discretização na aplicação do modelo MGB-IPH para a bacia do rio Uruguai, em termos da representação de cheias, tempo de processamento e tempo de pré-processamento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Além do objetivo geral, o presente estudo possui objetivos específicos, que visam a responder as seguintes questões:

- Qual o impacto do tamanho de trecho(dx) de segmento de rio na calibração do MGB-IPH?
- Existe um tamanho de trecho ótimo que apresente os melhores resultados com menor tempo de simulação?
- Qual o benefício de se utilizar um ajuste inicial dos parâmetros do solo em comparação com uma nova discretização? Redução do tempo de processamento ou aumento dos parâmetros de eficiência?

3 Revisão Bibliográfica

3.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica é um excelente instrumento para o entendimento dos processos hidrológicos e sua dinâmica nas bacias hidrográficas, fornecendo informações relevantes para o adequado gerenciamento dos recursos hídricos. A história da modelagem hidrológica se estende desde o Método Racional até modelos distribuídos (TODINI, 2007).

Os primeiros modelos hidrológicos buscavam representar a bacia hidrográfica de maneira concentrada e descrever individualmente os elementos dos processos compreendidos no ciclo hidrológico. Como exemplo pode-se citar o Método Racional, desenvolvido por Mulvany em 1850, a equação desenvolvida por Horton em 1939 para a infiltração de água no solo, o modelo Muskingum para o escoamento em rios por McCarthy e Puls para o escoamento em reservatórios (MULVANY, 1850; HORTON, 1939; McCARTHY, 1939; PULS, 1928).

Nas últimas décadas, com o avanço da tecnologia na área de sensoriamento remoto e geoprocessamento, os modelos hidrológicos têm sido integrados com os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), devido à grande capacidade de geração de dados espaciais e processamento de informações desses sistemas. Com esse avanço da tecnologia e o acoplamento ao SIG, modelos que representam de maneira espacialmente distribuída as características da bacia hidrográfica vêm sendo desenvolvidos e aperfeiçoados. Tais modelos são denominados de Modelos Hidrológicos Distribuídos (MHD), onde atualmente tem-se um grande número desses modelos sendo utilizados em todo o mundo para a modelagem de bacias de grandes áreas como, por exemplo, o SWAT (NEITSCH *et al.*, 2011), LISFLOOD (VAN DER KNIJFF; ROO, 2013), TOPKAPI (LIU; TODINI, 2002) e o modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH (COLLISCHONN *et al.*, 2007).

Atualmente os modelos podem representar diversos processos hidrológicos e hidrodinâmicos, os quais são retratados por equações matemáticas, alguns exemplos são: propagação de vazão em rios, evapotranspiração, armazenamento e infiltração de água no solo, propagação de ondas de cheias e escoamento em planícies de inundação. Com isso, os estudos com modelos são diversos em que os temas mais recorrentes são: dimensionamento de obras hidráulicas, aproveitamento de recursos hídricos, qualidade da água, avaliação de impactos a variabilidades climáticas sobre o regime hidrológico e previsão de cheias. Finck (2018), em um estudo de sistema de alerta utilizando cotas no rio Uruguai, utilizou modelos hidrológicos de regressão linear para prever inundações em São Borja, Itaqui e Uruguaiana com até 48h de antecedência (24h, $NS > 0,9$; 48h, $NS > 0,7$). Dados diários deste estudo apresentaram mais eficiência, tendo as regressões desenvolvidas para Porto Lucena, Garruchos e Barra do Quaraí apresentado coeficientes de Nash-Sutcliffe, em geral, baixos. Sugeriu-se para o sistema de alerta do rio Uruguai uma associação de modelos para zonas de montante e o uso de regressões para previsões mais a jusante.

A precisão dos resultados e o tempo de processamento são influenciados, dentre outras maneiras, pelo equacionamento utilizado e pela metodologia da discretização de área. Para simulação da propagação de vazão em rios, por exemplo, é empregado o conjunto de equações de Saint-Venant (MILLER, CUNGE, 1975; CHANSON, 2004), onde muitas vezes se utiliza simplificações devido à complexidade da solução do equacionamento completo, reduzindo o custo computacional, mas perdendo na qualidade dos resultados. Nos métodos de discretização de área, mais especificamente nos modelos distribuídos, a maneira com que a bacia é dividida como, por exemplo, em grade regular ou minibacias, afeta diretamente o tempo de processamento e também a precisão dos resultados.

Sendo assim, nos próximos capítulos serão descritos métodos de discretização espacial de bacias hidrográficas e propagação de vazão em rios, com foco nas metodologias de interesse desse estudo, que são: discretização em minibacias e propagação de vazão pelo modelo inercial. Também será detalhado o modelo hidrológico MGB-IPH.

3.2 DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

A representação dos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica pode ser feita em diferentes níveis de discretização espacial, abrangendo aproximações concentradas até totalmente distribuídas. Sendo assim, os modelos podem ser classificados como concentrados, considerando a bacia hidrográfica homogênea em toda sua área, ou seja, não levando em conta a distribuição espacial dos parâmetros que caracterizam os processos físicos na bacia hidrográfica (CLARKE, 1973). Podem também ser do tipo distribuídos, os quais incorporam a variabilidade espacial dos parâmetros físicos da bacia, como a geologia, tipo do solo e sua ocupação, e também a distribuição espacial da precipitação e, eventualmente, da evapotranspiração potencial e real (SILANS *et al.*, 2000).

Para cada modelo, existem ferramentas computacionais que automatizam o estabelecimento da discretização da bacia segundo sua metodologia de discretização (MAIDMENT, 1993; BUARQUE *et al.*, 2009; OLIVERA *et al.*, 2006). De maneira geral, a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) os procedimentos incorporados nas ferramentas determinam a rede de drenagem que interconecta os elementos, a topologia da discretização e a extração de características físicas de cada elemento. Esses procedimentos são interligados com um ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) ou pelo menos trocam informações com um SIG. (MARTIN *et al.*, 2005).

Para discretizar as bacias hidrográficas em um modelo distribuído existem inúmeras maneiras. Tratando-se de modelagem hidrológica em grande escala, as metodologias de grade regular e minibacias são as mais adequadas e comumente utilizadas (PAZ *et al.*, 2011). Sendo assim, esses dois métodos serão descritos nos itens a seguir.

3.2.1 Grade Regular

A discretização em grade regular consiste basicamente na divisão da bacia hidrográfica em células de dimensões iguais dispostas no formato de uma grade (Figura 1). Segundo Paz *et al.*, 2011, trata-se de o método mais comum na discretização da bacia, tendo como grande vantagem seu formato de matriz ou *raster*, em que facilita o cruzamento de informações com outros planos, visto que, por exemplo, mapas como de cobertura vegetal e tipos de solos, são tipicamente na forma de imagens *raster*. Outra facilidade do método é a troca de informações com modelos atmosféricos, para os quais geralmente a discretização é também em grade regular, e também a conexão em ambiente SIG.

Entretanto, esse método possui desvantagens significativas. Segundo Rennó *et al.*, 2001, não conseguem representar corretamente mudanças abruptas de elevação e na tentativa de minimizar esse problema, diminuindo a resolução espacial gerando malhas muito finas (mais detalhadas), pode elevar o custo computacional sem conseguir melhoras significativas, visto que os cálculos dos processos hidrológicos, na superfície e no perfil do solo, são repetidos para cada elemento da grade. Outra dificuldade intrínseca a este tipo de discretização é a definição das direções de fluxo e os trechos de rio para a propagação da vazão, em virtude de que o traçado dos caminhos de fluxos d'água sobre a superfície do terreno inclina-se a gerar linhas em zigue-zague, dado que as ligações entre células vizinhas são em direções múltiplas de 45°, o que foge de uma representação realista.

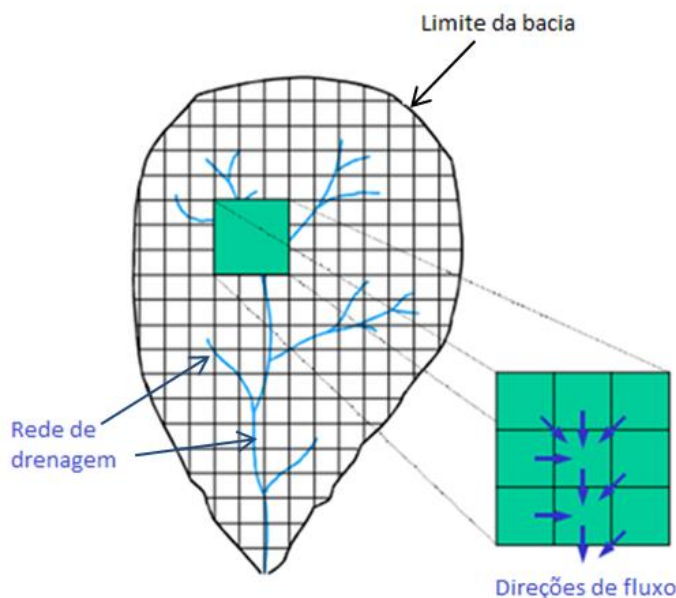


Figura 1. Bacia hidrográfica dividida em células quadradas, rede de drenagem e direções de fluxo.

3.2.2 Sub-bacias ou Minibacias

Nesta metodologia, a bacia é discretizada em sub-bacias menores através da divisão em elementos irregulares, intituladas de sub-bacias ou minibacias (dependendo do modelo), mantendo-se a compatibilidade com a espacialização da topografia. Dentre as inúmeras formas de dividir a bacia hidrográfica em minibacias, a mais corriqueira é

segundo as confluências da rede de drenagem. Consiste, basicamente, percorrer de montante para jusante a rede de drenagem e a cada confluência delimitar a minibacia, a qual corresponde à área de contribuição incremental do trecho. Um exemplo da utilização dessa técnica é encontrado nas ferramentas do pacote ArcHydro Tools, que é um conjunto de ferramentas para análises hidrológicas que pode ser instalado gratuitamente no software de SIG ArcGIS (ESRI, 2007).

No trabalho de Paz *et al.* (2011), o qual apresenta as principais diferenças entre grade regular e minibacias, os autores afirmam que a discretização por minibacias supera a dificuldade do método de grade regular em definir as direções de fluxo e trechos de rio. Porém, a abordagem por confluências gera grande variabilidade no comprimento dos trechos de rio e, conseqüentemente, das áreas das minibacias. Segundo Pontes *et al.*, (2015), a variabilidade dos comprimentos dos trechos do rio é um fator limitante, pois, se o método de propagação do escoamento presente no modelo for sensível à discretização da rede de drenagem, pode causar instabilidades numéricas interferindo no custo computacional.

No trabalho de Siqueira *et al.* (2016) é apresentada uma metodologia para segmentar a rede de drenagem por trechos de rio de igual comprimento, no intuito de superar a limitação da variabilidade dos comprimentos e também suprimir o aparecimento de trechos muito curtos (devido a confluências em sequência muito próximas), os quais não são desejáveis em modelos explícitos de propagação de escoamento devido à instabilidade numérica, como, por exemplo, o método inercial aplicado no MGB-IPH (PONTES *et al.*, 2015). Em trabalhos como Pontes e Collischonn (2015), os problemas de instabilidade numérica em modelos simplificados de propagação e modelos hidrodinâmicos (equacionamento completo) foram abordados, mostrando que mesmo o HEC-RAS (modelo hidrodinâmico) apresenta problemas quando a discretização do trecho de rio é grosseira. A metodologia de segmentação da rede de drenagem por trechos de comprimentos fixos foi incorporada como um algoritmo no pacote de ferramentas do IPH-Hydro Tools, o qual funciona como um plugin dos softwares livres de SIG MapWindow GIS e Quantum GIS, possibilitando a extração de atributos da rede de drenagem, bacias e minibacias hidrográficas a partir de modelos digitais de elevação (SIQUEIRA *et al.*, 2016).

Para executar o algoritmo, primeiramente, define-se o tamanho do comprimento fixo, para então segmentar a rede de drenagem. A partir do pixel do exutório da bacia, a rede de drenagem é percorrida onde são somados os comprimentos até que o tamanho do conjunto de pixels seja equivalente ao tamanho do comprimento do trecho determinado inicialmente, delimitando assim o trecho. Ao encontrar uma confluência, é identificado e segmentado o afluente de maior área de drenagem, segundo as direções acumuladas de fluxo. Posteriormente, o algoritmo retorna para o ponto de confluência e segmenta o afluente com menor área de contribuição, repetindo o procedimento para toda a rede de drenagem até a cabeceira. Um detalhe importante é que ao atingir a cabeceira, se o trecho pertencente a ela não possuir o mesmo comprimento dos outros segmentos, ocorre o

prolongamento do mesmo até atingir o tamanho dos demais, o que acaba gerando um limite variável na definição da rede de drenagem.

A Figura 2 ilustra uma comparação da discretização da bacia hidrográfica Taquari-Antas/RS, pelo método das confluências com o método dos comprimentos de mesmo tamanho (Breda *et al.* 2017). Com a metodologia da segmentação dos trechos de comprimentos iguais o número de minibacias geradas é maior, e quanto menor o tamanho do trecho escolhido maior será o número de minibacias, influenciando direta e significativamente no tempo de processamento da modelagem.

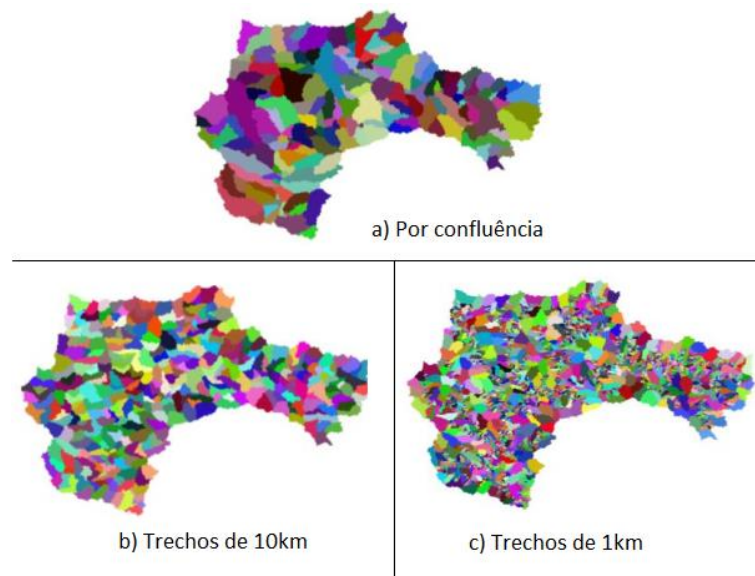


Figura 2. Discretização por minibacias pelos métodos da confluência e trechos de iguais tamanhos de comprimentos: (a) por confluência, foram 179 Minibacias geradas; (b) Trechos de 10 km, 363 minibacias geradas; (c) Trechos de 1km, 3038 Minibacias geradas. (Fonte: Adaptado de Breda *et al.*, 2017)

Outra abordagem de discretização é a do Engenheiro Otto Pfafstetter, que no ano de 1989 desenvolveu uma metodologia de codificação numérica de bacias hidrográficas, que segundo a Resolução nº 30/2002 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) é o método oficial para codificação das bacias brasileiras. A ottocodificação é baseada na hierarquização das bacias hidrográficas segundo sua área de contribuição exclusiva. Esse fato torna possível extrair dados como: área de contribuição da bacia, área de contribuição a montante, distância em relação à foz, comprimento do curso d'água, trecho imediatamente a montante e a jusante da confluência, dentre outras informações (NOGUEIRA, 2010). Utilizando pequena quantidade de dígitos em um código específico para uma dada bacia, permite inferir através desse código quais as bacias hidrográficas que se localizam a montante e a jusante daquela em estudo. Cada vez que for citada uma determinada numeração, sabe-se exatamente a identificação da bacia hidrográfica, seu rio principal e seu relacionamento com as demais bacias da mesma região hidrográfica, até o nível continental (SILVA, 1999). Muller *et al.* (2018), com o método de subdivisão e codificação de bacias hidrográficas do engenheiro Otto Pfafstetter (1989), aliado a técnicas e programas de geoprocessamento, obtiveram dados das sub-bacias de área, perímetro, coordenadas do exutório, rio principal, entre outras, da sub-bacia 70, onde está localizado a nascente da bacia do rio Uruguai.

O método consiste em, primeiramente, identificar o rio principal e os quatro afluentes com as maiores áreas de drenagem de jusante para montante, atribuindo às bacias os códigos pares 2, 4, 6 e 8. Os quatro afluentes principais dividem o rio principal em cinco trechos, que são as áreas de contribuição intermediárias, denominadas de inter-bacias e recebem os códigos ímpares 1, 3, 5, 7 e 9. Dependendo do nível de discretização desejado, repete-se o procedimento para dividir as sub-bacias anteriores até que os cursos d'água principais não tenham mais afluentes. O primeiro dígito sempre corresponde ao código da sub-bacia de origem, e o próximo dígito equivale ao novo processo de divisão. Buarque *et al.*, (2008) apresenta uma rotina para delimitação, subdivisão e também obtenção automática de características físicas das bacias hidrográficas, baseada nos princípios do método de Otto.

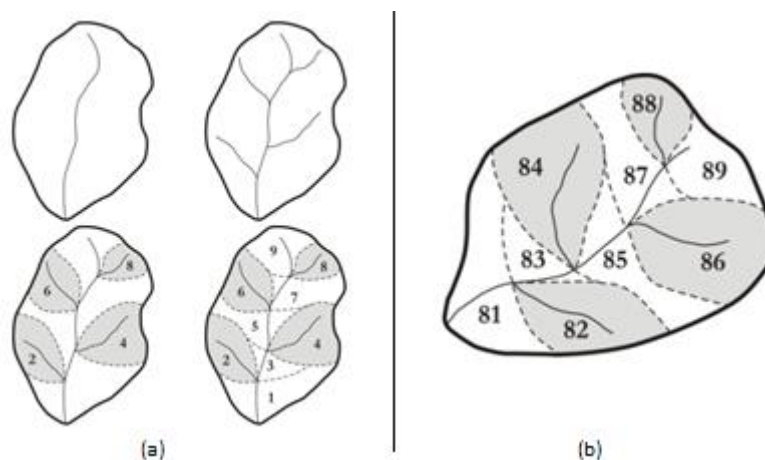


Figura 3. Subdivisão de uma bacia pelo método de Otto Pfafstetter: a) Delimitação de nível 1; identificação do rio principal; seleção dos quatro afluentes principais; delimitação das bacias pares (maiores contribuintes); delimitação das bacias intermediárias (inter-bacias) ímpares. b) Exemplo de uma bacia subdividida de código inicial 8. (Fonte: Adaptado de Buarque *et al.*, 2008)

3.3 PROPAGAÇÃO DE VAZÃO EM RIOS

Para representar a propagação de vazão em rios existem muitos métodos. Os mais completos se fundamentam na resolução e aplicação do conjunto de equações de *Saint-Venant* (MILLER e CUNGE, 1975; CHANSON, 2004), o qual é composto pela equação da continuidade (Equação 1) e pela equação dinâmica (Equação 2).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

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

Sendo: Q a vazão; A é a área da seção transversal ao escoamento; x é a distância no sentido longitudinal; t é o tempo; h é a profundidade do rio, S_0 é a declividade do fundo do rio; S_f representa a perda de energia por atrito com o fundo e as margens; g é aceleração da gravidade.

A equação dinâmica pode ser fragmentada em cinco termos, os quais representam as diferentes forças e balanço de momentum que atuam sobre um volume de controle, e são apresentados na sequência. A equação 3 apresenta o termo F_1 que corresponde à

força de atrito com fundo e margens do rio. Na equação 4 tem-se o termo F_2 representando a força resultante do peso da massa da água, e na equação 5, é apresentado o termo F_3 equivalente à força da diferença de pressão entre as extremidades dos contornos (montante e jusante) do volume de controle. A equação 6 apresenta o termo F_4 referente à inércia advectiva, e por último o termo F_5 na equação 7, o qual representa a inércia local (FAN *et al.*, 2014).

$$F_1 = gAS_f \quad (3)$$

$$F_2 = gAS_0 \quad (4)$$

$$F_3 = gA \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5)$$

$$F_4 = \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} \quad (6)$$

$$F_5 = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (7)$$

Os modelos que são baseados no equacionamento completo das equações de Saint-Venant apresentam certas dificuldades em sua utilização. Segundo Paiva (2009), tais modelos exigem maior quantidade de dados de entrada. Em bacias de grande escala exigem um minucioso pré-processamento dos dados topográficos e a solução das equações é complexa, originando códigos computacionais complicados e extensos, elevando o custo computacional. Com isso, são adotadas simplificações das equações de Saint-Venant, originando modelos mais simples, com certas limitações, mas com resultados aceitáveis na maioria das aplicações. Como exemplo, ao desprezar os termos F_3 , F_4 e F_5 tem-se a equação 8, recomendada para rios com declividade alta.

$$gAS_0 - gAS_f = 0 \quad (8)$$

O conjunto das Equações 1 e 8 dá origem ao modelo de propagação de onda cinemática (FAN, 2014), e sua combinação resulta na Equação 9, denominada de equação de onda cinemática, onde é regularmente utilizada no módulo de propagação de vazão em modelos hidrológicos chuva-vazão (SILVA *et al.*, 2003; BEVEN, 2011)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

Sendo: C a velocidade de propagação onda de cheia (celeridade).

Outro modelo simplificado, que também é frequentemente utilizado em modelos hidrológicos chuva-vazão, é o modelo Muskingum-Cunge (CUNGE, 1969; TUCCI, 2005), e consiste em uma das soluções numéricas da Equação 9. Esses modelos simplificados conseguem bons resultados em muitos casos com baixo tempo de processamento, porém algumas restrições são pertinentes, não conseguindo representar bem alguns fenômenos em rios, como, por exemplo, remanso na entrada de reservatórios e efeito de maré sobre o escoamento, além de não serem indicados em rios de baixa declividade (PONTES; COLLISCHONN, 2012).

Modelo inercial

Um método mais robusto para propagação de vazão em rios, o qual é utilizado no presente estudo, é o método inercial ou modelo inercial local. A metodologia tem aplicação em rios de baixa declividade, com planície de inundação e em rios sujeitos a efeitos de marés, apresentando resultados semelhantes e satisfatórios aos modelos que consideram o equacionamento completo das equações de Saint-Venant, com um código mais simples. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Fan *et al.*, (2014), onde foi comparado o modelo inercial unidimensional com o programa computacional HEC – RAS (USACE, 2010), que utiliza as equações completas de Saint-Venant na simulação da propagação de vazão em rios, mostraram que o modelo inercial apresentou resultados equivalentes ao HEC –RAS na representação dos efeitos hidrodinâmicos.

O método inercial se baseia nas equações de Saint-Venant em que apenas o segundo termo da equação 2, o termo F4, que corresponde à parcela da advecção, é desprezado. Combinado os termos F3 (pressão) e F2 (peso), tem-se a equação 10:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (10)$$

Sendo: y o nível ou a cota da superfície da água em relação a um referencial. A combinação das Equações 1 e 10 resulta no sistema chamado na literatura de “modelo inercial”, “modelo de inércia local” ou ainda de “modelo inercial simplificado” (BATES *et al.*, 2010; ALMEIDA *et al.*, 2012; ALMEIDA E BATES, 2013; YAMAZAKI *et al.*, 2013).

Considerando que os rios naturais têm seção transversal aproximadamente retangular, a Equação 1 é alterada dividindo os termos pela largura do rio (B), dando origem à Equação (11), enquanto a equação 10 é reescrita aproximando o termo de atrito ($F1$) por Manning, originando a equação 12. Além disso, considerando que os rios naturais têm largura significativamente maior que a profundidade, permite aproximar o raio hidráulico pela profundidade (FAN; PONTES; PAIVA, 2014), resultando na equação 13.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA \frac{Q \cdot |Q| \cdot n^2}{A^2 \cdot R^{4/2}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + g \frac{|Q|Q \cdot n^2}{h^{7/3}} \quad (13)$$

Sendo: Q a vazão (m^3/s); A é a área (m^2); R é o raio hidráulico (m); e n o coeficiente de rugosidade de Manning; h é a profundidade (m) e q é a vazão por unidade de largura (m^2/s); Ainda o termo $|Q|$ representa o módulo da vazão, e a adoção do produto $|Q|Q$ permite representar a magnitude e o sinal da perda de energia devida ao atrito de forma correta na Equação 12.

A equação da continuidade (Equação 1) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \quad (14)$$

Sendo: V o volume de água em um pequeno subtrecho do rio; Q_{in} são as vazões que entram nesse trecho de rio, incluindo a vazão de todas os subtrechos localizados imediatamente a montante e a vazão gerada no próprio subtrecho, e Q_{out} são as vazões que saem desse trecho de rio, o que inclui a vazão que segue para jusante e eventuais perdas por evaporação.

Segundo a metodologia apresentada por Bates *et al.*, (2010), as equações 13 e 14 são utilizadas considerando a discretização do rio em subtrechos, de modo que cada subtrecho possui um único trecho de rio com comprimento fixo, conforme ilustra a Figura 4 onde subtrecho é denominado de “minibacia”. O nível da água no trecho de rio do subtrecho A é $y_i = z_i + h_i$ e o nível da água no trecho de rio do subtrecho B é $y_{i+1} = z_{i+1} + h_{i+1}$, considerando que o subtrecho A está a montante do subtrecho B. A vazão de troca entre o subtrecho A e o subtrecho B é Q_i . As variáveis equivalentes a profundidade (h), cota do nível da água (y) e cota do fundo (z) são definidas nos centros dos subtrechos.

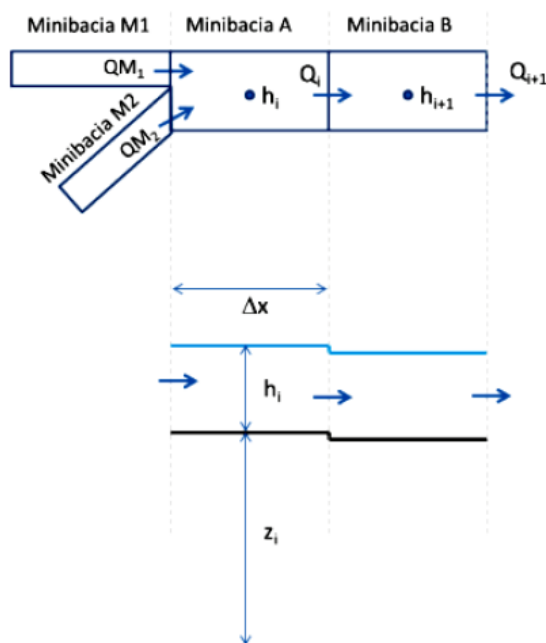


Figura 4. Discretização dos subtrechos com trechos de comprimento fixos (Δx) e das variáveis Vazão (Q e QM), profundidade (h) e nível (z) do modelo Inercial implementado no modelo MGB-IPH. Fonte: Pontes et al., 2015

As seguintes aproximações numéricas são adotadas para representar as derivadas das equações 13 e 14:

$$\frac{\partial y}{\partial x} \cong \frac{y_{i+1}^t - y_i^t}{\Delta x_i} \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \cong \frac{Q_{i+1}^{t+\Delta t} - Q_i^t}{\Delta t} \quad (16)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} \cong \frac{V_{i+1}^{t+\Delta t} - V_i^t}{\Delta t} \quad (17)$$

Sendo: o sobrescrito t ou $t + \Delta t$ se referindo ao tempo e o subscrito i ou $i + 1$ se referindo ao espaço. Substituindo as aproximações das equações 15 e 16 na equação 13, e reorganizando os termos de forma a explicitar o valor da vazão no final do intervalo de tempo, a equação 18 é obtida:

$$Q_i^{t+\Delta t} = \left(\frac{(Q_i^t - g \cdot B \cdot \Delta t \cdot (hflow_i \cdot Sflow_i))}{\left(1 + \frac{g \cdot \Delta t \cdot hflow_i \cdot (Q_i^t)^2}{B \cdot (hflow_i)^{10/3}}\right)} \right) \quad (18)$$

Sendo: $Q_i^{t+\Delta t}$ (m^3/s) a vazão no subtrecho i no final do intervalo de tempo; n o coeficiente de Manning ($m^{-1/3} \cdot s$); g é a aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$); $hflow_i$ (m) corresponde à profundidade na seção transversal calculada entre o subtrecho i e o subtrecho $i+1$, e é calculada com a Equação 19; B é a largura do rio no trecho em metros; $Sflow_i$ é a declividade da linha de água em função da perda de energia por atrito calculada pela equação 20, onde y é a cota do nível de água.

$$hflow_i = \max[y_i^t; y_{i+1}^t] - \max[Ztab_{i,1}; Ztab_{i+1,1}] \quad (19)$$

$$Sflow_i = \frac{y_{i+1}^t - y_i^t}{\Delta x_i} \quad (20)$$

A equação 17 é aproximada pela equação 14, resultando na equação 21:

$$\frac{V_{i+1}^{t+\Delta t} - V_i^t}{\Delta t} = \sum Q_{in}^{t+\Delta t} - \sum Q_{out}^{t+\Delta t} \quad (21)$$

Partindo-se de uma condição inicial em que os valores de y_i^t são conhecidos para qualquer subtrecho i , a solução das cotas e vazões ao final do intervalo de tempo pode ser encontrada aplicando primeiramente a Equação 19 e, posteriormente, a Equação 21 em todos os subtrechos.

A partir da Equação 21 se obtém o valor de $V_{t + \Delta t}$ em todos os subtrechos. Este valor é utilizado para obter o nível da água, via interpolação da tabela cota – volume de cada subtrecho. Assim, ao final do intervalo de tempo são conhecidos também os valores de $y_{t + \Delta t}$. Posteriormente, os valores de profundidade de água nos subtrechos são atualizados pela equação 21:

$$h_i^{t+1} = y_i^{t+1} - Ztab_{i,1} \quad (22)$$

Como o esquema numérico é explícito, está sujeito a uma restrição do tamanho do intervalo de tempo adotado. Na equação 23 representa a condição de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), a qual deve ser respeitada na escolha do valor de t para evitar instabilidade numérica.

$$(\sqrt{gh}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (23)$$

Sendo: g a aceleração da gravidade (m.s^{-2}); h é a profundidade (m); Δx é o comprimento do subtrecho de rio (m); e Δt é o passo de tempo de cálculo em segundos. Isto significa que a escolha do valor do passo de tempo deve ser feita satisfazendo a equação 24.

$$\Delta t = \alpha \frac{\Delta x}{\sqrt{gh}} \quad (24)$$

Sendo: α um valor menor ou igual a 1. Bates *et al.*, (2010) sugerem que o valor de α seja limitado a valores entre 0,3 e 0,7, para evitar instabilidade numérica.

3.4 REPRESENTAÇÃO DE CHEIAS

A representação de cheias na modelagem ou a partir de medições em campo é tipicamente realizada através de hidrogramas, cotogramas, mapas de manchas de inundação, entre outros. Alguns conceitos básicos são apresentados na sequência.

Os hidrogramas são a representação gráfica da variação da vazão ao longo do tempo numa determinada seção de rio ou curso d'água. Podem ser interpretados como a resposta da bacia hidrográfica a um evento de precipitação em função das suas características fisiográficas, as quais regem as relações entre a chuva e o escoamento na bacia e a contribuição subterrânea. O comportamento de um hidrograma varia conforme a intensidade da chuva, podendo apresentar picos múltiplos caso tenha variações abruptas na precipitação, sequência de chuvas intensa ou recessão anormal do escoamento subterrâneo (PORTO *et al.* 1999). O típico comportamento de um hidrograma de uma bacia hidrográfica é apresentado na Figura 5

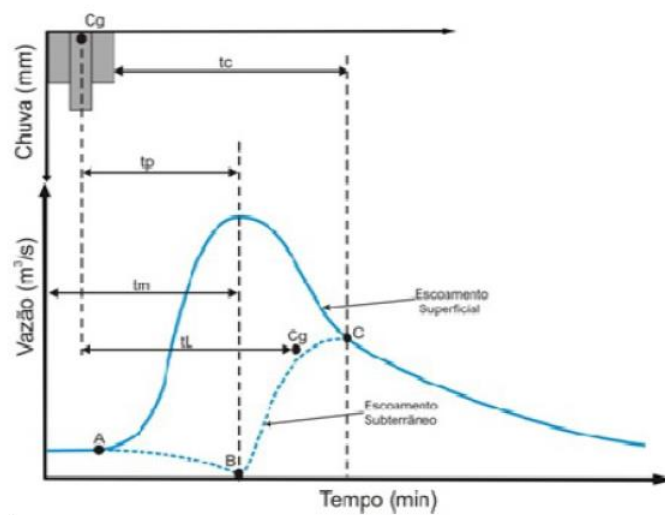


Figura 5. Comportamento típico de um hidrograma. Fonte: Finotti *et al.*, (2009)

Segundo Tucci (2004, apud ANA 2012), a caracterização do hidrograma pode ser feita a partir dos seguintes componentes:

- Tempo de retardo (t_l): intervalo de tempo entre o centro de massa da precipitação e o centro de gravidade do hidrograma;
- Tempo de pico (t_p): intervalo de tempo entre o centro de massa da precipitação e o pico de vazão máxima; ou tempo que leva para ser atingida a máxima vazão

- Tempo de concentração (t_c): tempo necessário para a água precipitada ir do ponto mais distante da bacia até o ponto ou seção avaliada. Esse é o tempo definido também como o tempo entre o fim da precipitação e ponto de inflexão do hidrograma;
- Tempo de ascensão (t_m): tempo entre o início da chuva e o pico do hidrograma;
- Tempo de base (t_b): tempo entre o início da precipitação e o tempo que o volume precipitado já escoou através da seção avaliada, ou em que o rio volta às condições anteriores da precipitação;
- Tempo de recessão (t_e): tempo necessário para a vazão baixar até o Ponto C quando acaba o escoamento superficial.

Os principais fatores que influenciam na forma do hidrograma são (PORTO *et al.* 1999):

- Área da bacia: define a potencialidade hídrica da mesma, quanto maior sua área maior é o volume, porém bacias muito planas ou com grandes áreas de extravasamento tendem a regularizar o escoamento e reduzir o pico.
- Relevo: aspectos relacionados com a densidade da drenagem da bacia, quanto mais densa maior o pico do hidrograma; a declividade (rios e bacia), quanto mais íngremes maiores são as velocidades do escoamento, reduzindo o tempo de concentração e podendo provocar picos de cheia; a capacidade de armazenamento, pode amortecer o escoamento e diminuir os picos, devido a presença de lagos, depressões e áreas muito planas; e a forma da bacia, se forem circulares tendem a ter maiores vazões do que bacias alongadas e antecipar os picos.
- Cobertura da bacia: a cobertura vegetal tende a retardar o escoamento e aumentar perdas por interceptação e evapotranspiração. Já a urbanização pode reduzir significativamente a infiltração e aumentar o escoamento superficial, gerando picos nos hidrograma.
- Modificações artificiais no rio: com a construção de reservatórios ocorre a regularização das vazões reduzindo os picos, já as canalizações diminuem a permeabilidade da superfície elevando a velocidade do escoamento, e aumentando os picos.
- Distribuição, duração e intensidade da precipitação: chuvas que se deslocam de jusante para montante geram hidrogramas com picos menores. As chuvas convectivas de grande intensidade e distribuídas numa pequena área podem provocar as grandes enchentes em pequenas bacias. Para bacias grandes, as chuvas frontais, com menor intensidade e longa duração (vários dias), são mais críticas.
- Constituição geológica do subsolo: interfere na quantidade de chuva transformada em chuva efetiva. Solos pouco profundos, tende a ter baixa capacidade de armazenamento, diminuindo o tempo de concentração.

Outra informação tipicamente retirada de uma série de vazões (simuladas ou observadas) é a curva de permanência. Tal curva relaciona a vazão (eixo das ordenadas usualmente) e a porcentagem do tempo em que ela é superada ou igualada sobre todo o período (geralmente no eixo das abscissas). Representa o complemento da função distribuição cumulativa de probabilidade de vazões ou a probabilidade de excedência das vazões (QUIMPO e MCNALLY, 1983). É frequentemente usada para demonstrar o padrão de variação de vazões, sendo muito importante para a gestão e planejamento dos recursos hídricos como, por exemplo, a outorga de direito de uso da água. Da curva de permanência pode-se estimar vazões características da série, a exemplo da Q90, que significa a vazão que é igualada ou superada em 90% do tempo. A Figura 6 exemplifica a curva de permanência de um hidrograma.

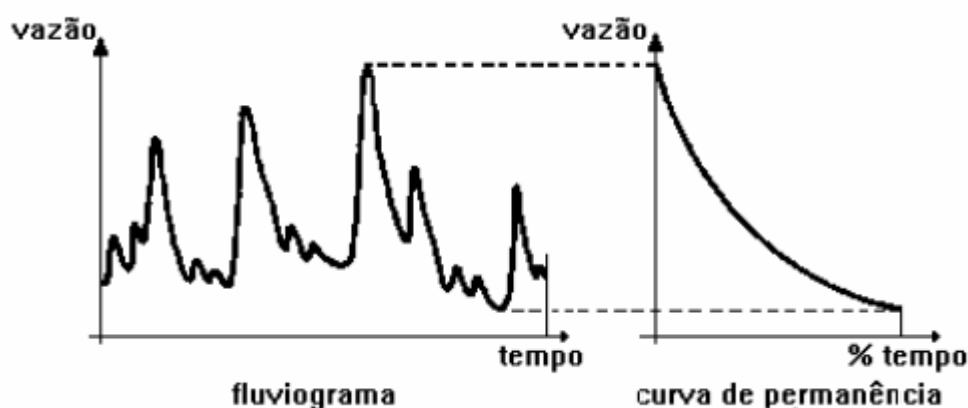


Figura 6. Fluviograma e curva de permanência. Fonte: Tucci, 2004

Outra forma de representar as cheias, são os mapas de área inundadas ou manchas de inundação. Esses mapas possibilitam estimar as áreas atingidas previstas por um modelo hidráulico/hidrológico e/ou delimitadas em campo após um evento de inundação, associadas às vazões e cotas do rio. Os mapas de manchas de inundação são uma continuidade dos sistemas de alertas hidrológicos, pois abrangem o conceito de medidas não estruturais. Esses mapas podem ser utilizados como ferramentas de planejamento urbano e como incremento ao sistema de alerta, que, em função dos resultados de previsão das cotas de inundação, permite alertar autoridades, Defesa Civil e, quando pertinente, a população em geral sobre as áreas a serem atingidas pela enchente (CPRM, 2019).

3.5 DESCRIÇÃO DO MODELO MGB-IPH

O modelo MGB-IPH foi desenvolvido por Collischonn (2001) com a intenção de simular os processos de transformação de chuva em vazão em grandes bacias hidrográficas (COLLISCHONN *et al.* 2007). O modelo foi fundamentado nos modelos LARSIM (BREMICKER 1998) e VIC -2L (WIGMOSTA *et al.* 1994; LIANG *et al.* 1994; NIJSSEM *et al.* 1997). É um modelo hidrológico distribuído que utiliza equações de base física para simular os processos hidrológicos como, por exemplo, o balanço de água no solo, balanço de energia e evapotranspiração, interceptação, geração e propagação dos

escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo em cada elemento da discretização da bacia e propagação do escoamento na rede de drenagem (BUARQUE, 2015).

A discretização da bacia hidrográfica inicialmente utilizava a metodologia de grade regular, dividindo a bacia em células quadradas de 10 km por 10 km conectadas pela rede de drenagem. A versão atual possui discretização da bacia em unidades irregulares, definidas a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), que são denominadas de minibacias. A discretização por minibacias pode ser através de duas metodologias: segmentação da rede de drenagem por confluências ou por trechos de comprimento fixo. Detalhes das metodologias supracitadas estão no item 1.1.2. Ainda, cada minibacia é dividida em Unidades de Resposta Hidrológica (URH), as quais correspondem a áreas de comportamento hidrológico similar, definidas pela combinação de um plano de informações, contendo mapas de solo, de vegetação e uso da terra. Os balanços verticais de água e energia são computados independentemente para cada URH (FAN, 2011; PAIVA *et al.*, 2011a; PONTES, *et al.*, 2015b). A Figura 7 ilustra os processos de geração e propagação de escoamentos nas minibacias e propagação de vazão na rede de drenagem, onde D_{sup} corresponde ao escoamento superficial, D_{int} ao escoamento subsuperficial e D_{bas} ao escoamento subterrâneo.

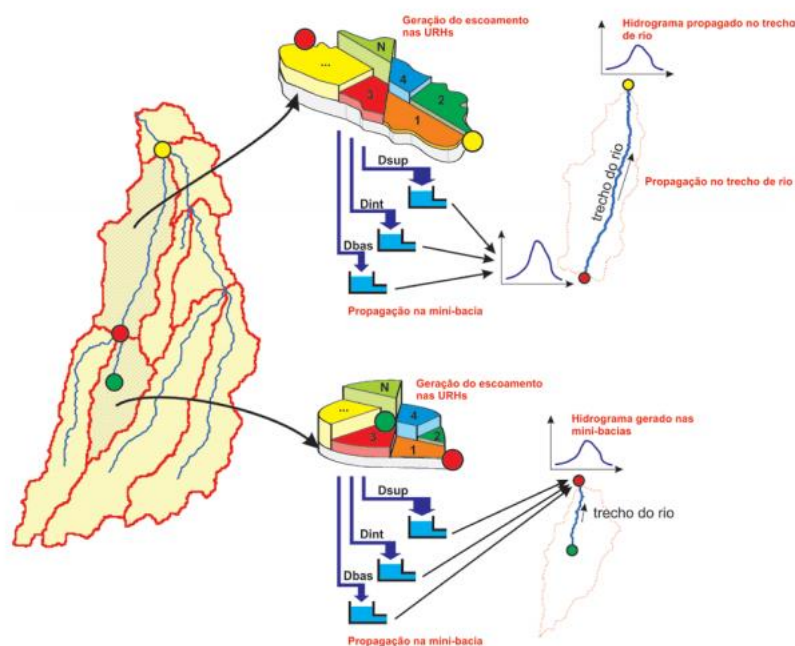


Figura 7. Propagação de escoamentos nas minibacias e propagação de vazão na rede de drenagem
Fonte: Buarque 2015

Os processos físicos do MGB-IPH são estabelecidos pelos módulos de balanço de água no solo, de evapotranspiração; escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula e o escoamento na rede drenagem; dado que os processos físicos podem ser representados através de fluxos verticais e horizontais (Figura 8) dentro de cada minibacia. Por conseguinte, o balanço de água no solo é contabilizado a partir da geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, utilizando uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada

(COLLISCHONN, 2001; MELLER 2012). A interceptação de água pela copa das árvores é representada por um reservatório de volume máximo, o qual dependente da cobertura vegetal e é função do índice de área foliar da vegetação para calcular o volume máximo interceptado (COLLISCHONN, 2001; PAIVA, 2009). O método de Penman-Monteith é utilizado para calcular a evapotranspiração e também determinar a evaporação potencial da lâmina interceptada, sendo que tal método utiliza dados meteorológicos e parâmetros relativos a características aerodinâmicas e aos estômatos das plantas para calcular a evapotranspiração (COLLISCHONN, 2001; PAIVA 2009). Já a geração de escoamento subterrâneo é obtida através de relação linear, enquanto que o escoamento sub-superficial é calculado através de relações não-lineares, ambos de acordo com o armazenamento de água no solo (SIQUEIRA, 2015).

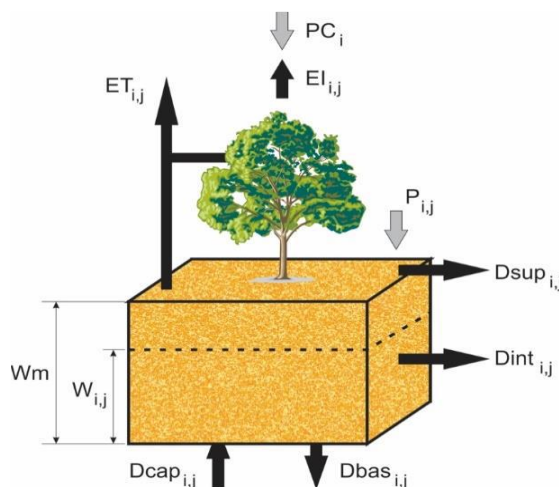


Figura 8. Diagrama esquemático dos processos físicos no MGB-IPH, representados pelos fluxos horizontais e verticais (Fonte: BUARQUE, 2015).

Os processos horizontais descrevem matematicamente a propagação nas minibacias e a propagação de vazões na rede de drenagem. São módulos que representam o escoamento da água através do solo, do aquífero até a rede de drenagem, havendo um retardo e amortecimento desse escoamento dentro do interior da minibacia. Posto isto, o escoamento nas minibacias é representado pela propagação desses volumes de água até o rio principal da respectiva minibacia utilizando três reservatórios lineares simples (MELLER, 2012; PAIVA, 2009). A propagação de vazão nos trechos de rio é realizada utilizando dois métodos, um mais simplificado que é o método de Muskingum Cunge, o qual se baseia na equação da continuidade e na equação de armazenamento, relacionando a vazão de entrada e de saída do trecho conforme descrito por Tucci (2005), e o segundo é o método Inercial.

As dimensões dos rios (largura e profundidade) são parâmetros hidráulicos importantes em modelagem hidrodinâmica, influenciando diretamente nos resultados. Podem ser medidas em campo, estimadas por imagem de satélite ou ainda através de relações geomorfológicas que relacionam a largura e profundidade à área da bacia. No MGB-IPH normalmente são utilizadas as relações geomorfológicas por meio da equação 25, onde y refere-se à largura ou a profundidade, A área da minibacia e a e b são coeficientes fixos.

$$y = a.A^b \quad (25)$$

No MGB-IPH existem diversos parâmetros específicos que representam os processos hidrológicos, dividindo-se em fixos e em calibráveis, e totalizando 15 parâmetros. Os parâmetros fixos têm valores que podem ser mensuráveis, estando relacionados com a vegetação ou, ainda, podem não interferir de forma significativa nos resultados (COLLISCHONN, 2001), são eles: índice de área foliar (relação entre as folhas e a correspondente área de solo); resistência superficial (resistência ao fluxo de umidade do solo); altura da cobertura vegetal e albedo. Já os parâmetros calibráveis, necessitam de ajuste a cada aplicação do modelo para se obter bons resultados, comparando-se os hidrogramas observados aos calculados e são definidos a seguir (COLLISCHONN, 2001).

O módulo responsável por gerar escoamento em cada minibacia discretizada possui 11 parâmetros calibráveis por sub-bacia considerada. Estes parâmetros, em conjunto com o significado e faixas de variação, são apresentados no Quadro 1

Quadro 1. Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH (Fonte: Adaptado de Tschiedel, 2016).

Parâmetro	Faixa de variação	Definição
WM	50 - 1000	Capacidade de Armazenamento do Solo
b	0.12 - 1.6	Correlação entre o armazenamento e saturação do solo
Kbas	0.05 - 5	Controla a vazão durante a estiagem
Kint	abr/40	Controla a quantidade de água na camada do solo
XL	0.67	Controla o perfil da redução da curva de água na superfície
Cap	0 - 4	Controla a vazão do reservatório de subsolo
WC	0.1 - 0.9	Parâmetro de armazenamentos residuais
CB	200 - 8000	Parâmetro do reservatório linear simples
QB	0.0001-0.1	Condição inicial da vazão de base da simulação
CS	1 - 20	Parâmetro de calibração do espalhamento da superfície
CI	50 - 200	Parâmetro de calibração do espalhamento da sub-superfície

O processo de definição dos parâmetros parte do procedimento da calibração do modelo, podendo ser realizado de forma manual. Consiste em variar os valores dos parâmetros, e os resultados obtidos das vazões simuladas são comparados com os dados das vazões observadas nos postos fluviométricos, avaliando se houve ganho na qualidade dos resultados por meio de métricas de desempenho. Ainda, o MGB-IPH traz a possibilidade de ser feita a calibração automática por meio de um algorítmico evolucionário, o qual possui um mecanismo de adaptação contínua visando a otimização global do sistema, análogo à genética e ao processo evolutivo de plantas em um sistema natural (YAO, YANG, 2009).

As métricas normalmente utilizadas pelos usuários do MGB-IPH para a avaliação do desempenho de modelos hidrológicos são destacadas a seguir. O coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE) que mede o desempenho geral do modelo ao

representar a vazão e possui valores entre $-\infty$ até 1. Quanto mais próximo de 1 melhor o ajuste, enquanto os valores negativos indicam que a média dos dados observados apresentam resultados melhores (FAN *et al.*, 2017).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs}(t) - Q_{calc}(t))^2}{\sum(Q_{obs}(t) - Q_{obs}(t))^2} \quad (26)$$

Para medir o desempenho do modelo na representação dos períodos de recessão do hidrograma e as estiagem (vazões mínimas) é adotado o Nash do logaritmo das vazões (NSElog), onde também possui valor ideal e máximo igual a 1.

$$NSE_{log} = 1 - \frac{\sum[\log(Q_{obs}(t) - Q_{calc}(t))]^2}{\sum[\log(Q_{obs}(t) - Q_{obs}(t))]^2} \quad (27)$$

A terceira métrica normalmente utilizada é o erro relativo de volume (Equação 28), o qual contabiliza se o modelo está representando o balanço hídrico corretamente. Assim valores positivos significa que o modelo está superestimando a vazão observada e valores negativos indicam que está subestimando.

$$\Delta V = \frac{\sum(Q_{cal}(t)) - \sum(Q_{obs}(t))}{\sum Q_{obs}(t)} \quad (28)$$

Atualmente, o modelo possui uma interface gráfica acoplada ao software MapWindow GIS® (AMES, 2006) e também ao software Quantum GIS 2.18 que permite a preparação, inserção de dados, simulação e visualização dos resultados em uma plataforma de livre acesso e amigável ao usuário (PONTES *et al.*, 2017).

Informações mais detalhadas sobre o funcionamento do modelo MGB-IPH podem ser encontradas em trabalhos como os de Collischonn (2001), Fan (2011, 2015), Fan e Collischonn (2014), Meller (2012) e Paiva (2009).

4 Área de estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do rio Uruguai, abrangendo partes dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul no Brasil, bem como partes da Argentina e do Uruguai até sua foz no rio da Prata. Segundo Marcuzzo (2017), a área territorial da bacia do rio Uruguai no Brasil é de aproximadamente 174.078km², o equivalente a aproximadamente 50% da área territorial da bacia, sendo que no estado do Rio Grande do Sul é de aproximadamente 126.372km² (36%) e no estado de Santa Catarina é de aproximadamente 95.733km² (14%). O mesmo autor relata que a área territorial da bacia do rio Uruguai na Argentina é de, aproximadamente, 62.005km² (18%) e no Uruguai é de, aproximadamente, 113.179km² (32%). possui uma superfície de drenagem de aproximadamente 349.843 km², sendo que aproximadamente 49,8% estão localizados na porção brasileira desta bacia hidrográfica, 32,4% no Uruguai e 17,7% na Argentina. Diagramas unifilares detalhados da parte brasileira da bacia hidrográfica do rio Uruguai, incluindo os barramentos, podem ser analisados em Almeida *et al.* (2016) e Souza *et al.* (2017). A Figura 9 apresenta a bacia do rio Uruguai em sua totalidade, e também as divisões em sub-bacias na porção brasileira.



Figura 9. Localização da bacia hidrográfico do rio Uruguai. Elaboração: Francisco F.N. Marcuzzo

O rio Uruguai é formado a partir da confluência do rio Pelotas com o rio Canoas, o qual a partir dessa junção percorre um caminho de 2.200 km de extensão até a sua foz no estuário do rio da Prata. Inicialmente, o rio Pelotas é responsável pela divisa entre os Estados do RS e SC, para posteriormente o rio Uruguai dividir esses estados em trecho nacional, com fluxo de água no sentido Leste-Oeste. Após a confluência com o rio Peperi-Guaçu, o rio Uruguai muda para a direção sudoeste e passa a delimitar a fronteira entre o Brasil e a Argentina. Por fim, após a afluência do rio Quarai, quando o rio Uruguai ultrapassa a tríplice fronteira entre Brasil, Argentina e Uruguai, ele serve de fronteira para o Uruguai e Argentina até a sua foz (GUIMARÃES *et al.* 2018).

Seguindo os critérios da metodologia de Otto Pfafstetter, a região hidrográfica pode ser dividida em quatro sub-bacias de nível 1, sendo elas Alto Uruguai, Quarai, Ibicuí e Negro, e dez bacias de nível 2 (BRASIL, 2006). A Sub-Bacia do Alto Uruguai abrange os dois formadores do rio Uruguai, os rios Pelotas e Canoas (a ottocodificação da sub-bacia do rio Pelotas pode ser vista em Muller *et al.* 2018), e possui como principal característica o alto potencial hidrelétrico devido ao seu alto gradiente de relevo. A Sub-Bacia do Médio Uruguai tem condição de fronteira, nela o rio Uruguai começa a delimitar as fronteiras internacionais e consta com uma área em território brasileiro que possui como característica a grande diversidade de usos, como, por exemplo, a Sub-Bacia do Rio Quarai para irrigação de arroz e o rio Ijuí com grande potencial hidrelétrico. A Sub-bacia Ibicuí caracteriza-se como uma bacia do médio Uruguai, com rios de

Campanha, utilizados para irrigação de arroz em rotação com a pecuária bovina. Por fim, a Sub-Bacia do rio Negro, que não tem subdivisões e abrange as nascentes deste importante curso de água que atravessa a República Oriental do Uruguai, desaguando no rio Uruguai já próximo à sua foz.

A altimetria da bacia do rio Uruguai é apresentada na Figura 10. A bacia apresenta regiões bem distintas, com as maiores altitudes no extremo leste nas sub-bacias a montante, sendo a maior altitude ligeiramente superior a 1800m. O ponto mais baixo é praticamente no nível do mar, logo após a confluência com o rio Paraná. Uma análise detalhada da altimetria da Região Hidrográfica do rio Uruguai pode ser vista em Marcuzzo (2017).

Em um estudo fisiográfico da bacia do rio Uruguai, Melati e Marcuzzo (2015), mostram que a sub-bacia com maior área (47.148 km²) é a 76 (rio Ibicuí), localizada na porção sul da bacia do rio Uruguai, e que a com menor área (2.967 km²) é a 79, localizada no extremo da porção sul da bacia do rio Uruguai. Os autores também identificaram que o maior talvegue de rio foi mensurado na sub-bacia 76, com 567 km de extensão e que a sub-bacia 77 é a mais plana, com 70% (0 a 3% de declividade), já a sub-bacia 73 é a mais ondulada e/ou fortemente ondulada, com 65% da sua área (8 e 45% de declividade).

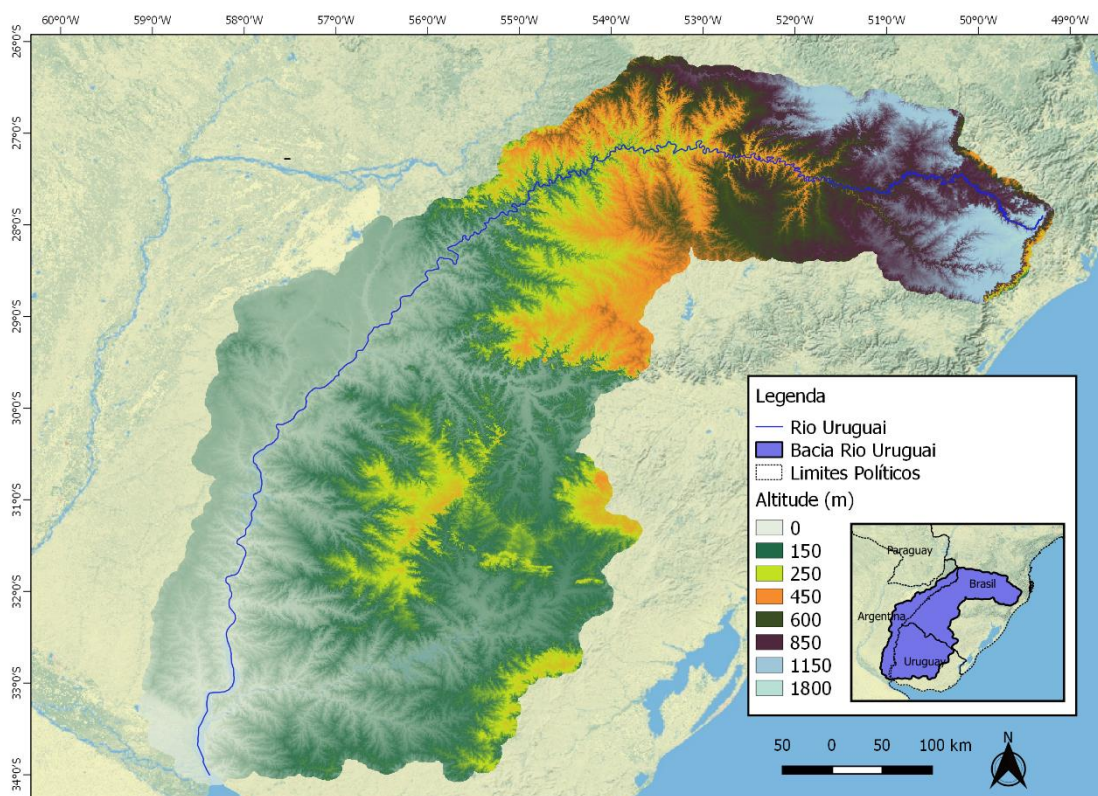


Figura 10. Altimetria da bacia do rio Uruguai (MNT 90 m de resolução espacial). Fonte: autoria própria

Em relação ao clima da região da bacia hidrográfica do rio Uruguai é caracterizado, de acordo com a classificação de Köppen, em dois tipos fundamentais de clima fortemente influenciados pela morfologia, subtropical (Cfa) e temperado (Cfb). Em

ambos a temperatura média do mês mais frio oscila entre -3° a 18°C e chove pelo menos 30mm em todos os meses do ano. Nas áreas de relevo mais baixo, próximas ao rio Uruguai, onde a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C ("verão quente"), o clima é classificado como Cfa e nas áreas mais altas da bacia, onde a temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C ("verão tépido"), o clima é Cfb.

As regiões de maior precipitação na parte brasileira da bacia do rio Uruguai, correspondem à porção setentrional da bacia, em outubro, com 228,9mm, correspondendo à sub-bacia 74, segundo Guimarães *et al.* (2017). Por outro lado, segundo os mesmos autores, as regiões de menor precipitação pluviométrica na bacia do rio Uruguai, correspondem à região mais ocidental da bacia, em agosto, com 69,2mm, correspondendo à sub-bacia 77. A menor precipitação média anual na bacia é de $1.455,4\text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, enquanto que a maior é de $1964,2\text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$. A amplitude de precipitação média anual entre as sub-bacias pertencentes à bacia do rio Uruguai, em sua parte brasileira, foi de $508,8\text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ (GUIMARÃES *et al.*, 2017).

4.1 HISTÓRICO DE INUNDAÇÕES NO RIO URUGUAI

O rio Uruguai é considerado o segundo sistema fluvial em importância da bacia do rio da Prata, e sua bacia hidrográfica possui tríplice fronteira, abrangendo os países da Argentina, Brasil e Uruguai (RIGHI e ROBAINA, 2010). No Brasil engloba os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, representando um território de grande valor para o país devido ao seu grande potencial hidrelétrico e as atividades agroindustriais. Desse modo, os estudos na bacia do rio Uruguai são inúmeros e diversos, e neste item serão apresentados alguns dados sobre os alguns levantamentos e notícias de eventos sobre inundações.

Conforme Cesco e Ceolin (2017), historicamente os fenômenos naturais das inundações no rio Uruguai têm importância econômica positiva para toda a região oeste de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul. Esses eventos eram esperados como as estações do ano, trazendo benefícios para a agricultura (depositavam nutrientes nas planícies inundadas) e não provocavam grandes tragédias nessas regiões, pois, além de a ocupação urbana ser reduzida, não eram ocupadas as zonas das baixadas e várzeas.

Devido à crescente urbanização, dentre outros motivos, as inundações passaram a causar enormes impactos na economia e na vida da população, principalmente as ribeirinhas. Segundo levantamento realizado por Righi e Robaina (2010), o qual analisou notícias sobre inundações do jornal Zero Hora e do Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul em conjunto com os dados pluviométricos da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO) e da Agência Nacional das Águas (ANA), foram identificados 41 eventos de inundação na bacia entre os anos de 1980 e 2005, com os municípios de Marcelino Ramos, Itaquí, Itá, São Borja, Iraí, e Uruguaiana, ao longo do rio Uruguai, e Alegrete, no rio Ibirapuitã, os mais afetados.

4.2 MODELAGEM NA BACIA DO RIO URUGUAI

Nesse item são apresentados estudos com o MGB-IPH aplicado na bacia hidrográfica do rio Uruguai, em sua totalidade ou parcialmente.

Em uma sequência de dois artigos, Collischonn *et al.*, 2005, estudaram a previsão de vazão sazonal na bacia do rio Uruguai, combinando o MGB-IPH com o modelo climático global do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) para previsão de precipitação. No primeiro foi realizado o ajuste do modelo hidrológico, apresentando resultados satisfatórios nos hidrogramas, curva de permanência e estatísticas das séries em comparação com os dados registrados de cinco postos fluviométricos. No segundo artigo, foram realizadas previsões de vazão para período de 1995 a 2001, comparados às vazões observadas e também as previsões que seriam obtidas utilizando o método tradicional, o qual é fundamentado nas médias ou medianas mensais. Os resultados mostraram que o modelo global do CPTEC subestima a precipitação quase que na totalidade da bacia do rio Uruguai, porém, quando a precipitação foi corrigida por intermédio de um método estatístico, foram obtidas previsões de vazão significativamente superiores às aquelas adquiridas pelos métodos tradicionais (COLLISCHONN *et al.*, 2005)

Em seu trabalho, Ponte (2016) aplicou o MGB-IPH para toda a bacia do rio da Prata. No estudo foi utilizado o módulo de propagação de vazão baseado no modelo inercial, representação de planície de inundação, e também aplicada a metodologia de discretização da bacia hidrográfica em minibacias, adotando um comprimento fixo de trecho de rio e um limite superior para a área de drenagem das minibacias. Segundo o autor, com os resultados obtidos constatou que modelo conseguiu simular de maneira satisfatória os processos hidrológicos na maioria dos pontos analisados, representando vazões, níveis e áreas inundadas. Na bacia do rio Uruguai houve pequena influência da planície de inundação e da operação de reservatórios, diferentemente da bacia do rio Paraguai. Apesar da regularização da vazão praticada na operação de Itaipu tenha ocasionado moderada mudança nas vazões médias ao longo do rio Paraná, vazões extremas (Q5 e Q90) sofreram alterações significativas (PONTES, 2016).

Fan *et al.*, (2017) realizaram um estudo de previsão hidrológica na região do alto Uruguai, com objetivo de estimar as vazões de entrada para as UHE de Barra Grande e Campos Novos, utilizando como dado de entrada não apenas a precipitação monitorada na bacia, mas também previsões meteorológicas do modelo ETA-15km, que podem ser obtidas pelo CPTEC, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Os autores concluíram que se podem prever eventos de inundação com dois até três dias de antecedência para a UHE Barra Grande. Já para a UHE de Campos Novos os índices demonstraram que para até 10 dias de antecedência a previsão pelo modelo é melhor do que apenas se assumir a média histórica dos dados, e também que usar o último dado observado para previsão não é muito apropriado para antecedências maiores que 22 horas.

Mais recentemente Guimarães (2018) e Guimarães *et al.* (2018), em um estudo para o Sistema de Alerta da bacia do rio Uruguai, concluíram que há tanto a influência da localização espacial das estações quanto da distribuição espacial da precipitação na bacia.

Nesta perspectiva, os autores citam que há um incremento da previsibilidade quanto mais a jusante o posto fluviométrico estiver localizado (ou seja, com maior área da bacia), com as estações de Itaqui e Uruguiana apresentando a maior previsibilidade (três dias). Ainda, os autores relatam que a influência da distribuição espacial da precipitação pode ser analisada comparando os eventos cuja propagação da onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí (estação Passo do Mariano Pinto) com os eventos em que a onda de cheia provém do alto rio Uruguai (Itaqui).

4.3 SISTEMAS DE ALERTAS A INUNDAÇÃO

Este item visa apresentar de forma resumida conceitos sobre sistemas de alertas hidrológicos e informações mais detalhadas sobre o sistema de alerta da CPRM, o qual contempla a região a bacia do rio Uruguai.

A implementação de um sistema de alerta e previsão de cheias é uma medida não estrutural, que é recomendada, dentre outras formas, pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para reduzir o impacto causado pelas inundações. Esta medida pode ser empregada isoladamente ou em conjunto com outras medidas, tais como o planejamento do uso do solo e o uso de seguro para desencorajar e evitar que a população ocupe áreas sujeitas a inundação. Assim, os sistemas de previsão e alerta de cheias colaboram para a redução do risco de perda de vidas e oferecem tempo hábil para os serviços de emergência e as comunidades se prepararem para a inundação protegendo seus bens de maior valor (PEDROLLO *et al.* 2017).

Resumidamente, os principais elementos que compõem a logística de um sistema de alerta de eventos críticos, em ordem, são: estações automáticas de monitoramento instaladas em pontos chaves do rio; central de previsão e emissão de boletins; Defesa Civil; e reavaliação do sistema de alerta. Por exemplo, segundo GERMANO e MATOS, 2017, no monitoramento das cheias (na plataforma SACE - Sistema de Alerta de Eventos Críticos da CPRM) são consideradas três cotas de referência. O primeiro nível é a cota de atenção, onde acompanha-se a subida do hidrograma informando a Defesa Civil e a equipe do Sistema de Alerta Hidrológico (SAH) fica sob atenção para prováveis operações. O segundo nível é denominado de cota de alerta, nessa situação a cota está próxima da cota de inundação, sendo acionada a Defesa Civil com emissão de boletins mais frequentes da previsão hidrológica. O terceiro nível é a cota de inundação, indicando que em alguma região do município ocorrerá a inundação, sendo a população alertada sobre o nível atual e o previsto, explicitando sobre prováveis erros no modelo. A definição das cotas supracitadas é uma etapa extremamente importante, normalmente são baseadas nos levantamentos topográficos de cada localidade, principalmente pelo perfil transversal da seção, e na análise de frequência das séries históricas de cotas máximas.

Para um sistema de alertas contra cheias a previsão em tempo real é uma componente de fundamental importância, possibilitando estimar com antecedência a ocorrência de eventos, e usualmente é baseada em modelos matemáticos. O termo “em tempo real” é empregue aos modelos hidrológicos de previsão, que são acionados quando estações de monitoramento atingem cotas críticas como, por exemplo, as citadas no parágrafo anterior (TUCCI, 2005). Ainda, segundo Tucci (2005), os modelos de previsão

em tempo real são classificados em função do dado de entrada, tais como: previsão meteorológica da precipitação, estimativa da precipitação por radar, previsão da precipitação por rede telemétrica e previsão da vazão com base em dados a montante.

No Brasil, o maior número de sistemas de previsão para o gerenciamento de inundação é gerenciado pela CPRM - Serviço Geológico do Brasil/SGB, que tem por missão institucional gerar e difundir o conhecimento geológico e hidrológico básico para o desenvolvimento sustentável do país (PEDROLLO *et al.* 2017). O sistema desenvolvido pela CPRM é o SACE - Sistema de Alerta de Eventos Críticos, é um sistema computacional em Java, capaz de coletar, armazenar, analisar e divulgar os dados das estações automáticas coletados, sendo esses dados transmitidos via GPRS ou satélite e armazenados via diretório, ftp ou url (CPRM, 2019). As informações são disponibilizadas no site da CPRM em forma tabular e gráficas (Figura 11), assim como os boletins de alerta.

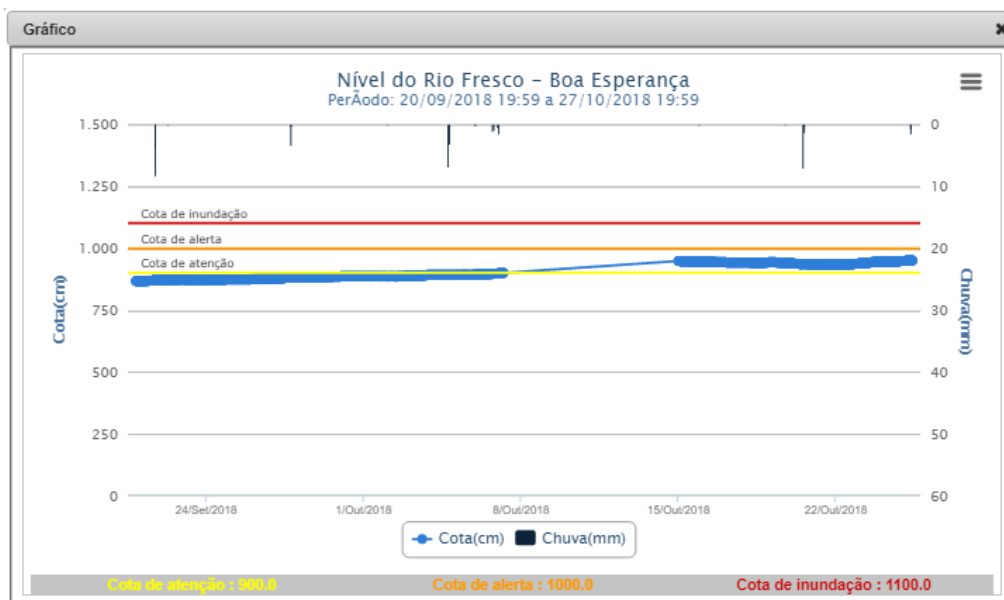


Figura 11. Exemplo de gráfico com informações de cotas (cm), nível (cm) e precipitação (mm) na plataforma SACE, para a bacia do rio Paraguai. (Fonte: CPRM,2019).

Ao total são 14 bacias hidrográficas já contempladas pelo SACE (Figura 12), são elas: a bacia do rio Amazonas, operante desde 1989; do rio Paraguai (pantanal), em operação desde 1994; do rio Doce (MG), ativo desde 1996; do rio Caí (RS), online desde 2010; com operação desde 2014 são as do rio Muriaé (MG e RJ), Acre (AC) e rio Madeira (RO); ativos desde 2015 são as do rio Parnaíba (PI), Taquari (RS) e do rio Branco (RR); desde 2017 as bacias do rio Xingu (MT e PA) e do rio Mundaú (AL); em 2018 dois sistema entraram online, uma é da bacia do rio das Velhas (MG) e o outro é a do rio Uruguai (RS –SC), a qual este estudo visou orientar possíveis modificações no modelo hidrológico operacionalizado. Ademais, a CPRM visa à implementação de mais dois sistemas, totalizando 16 ao final de 2019, um para a bacia do rio Itapecuru (MA) e outra para o rio Pomba (MG)

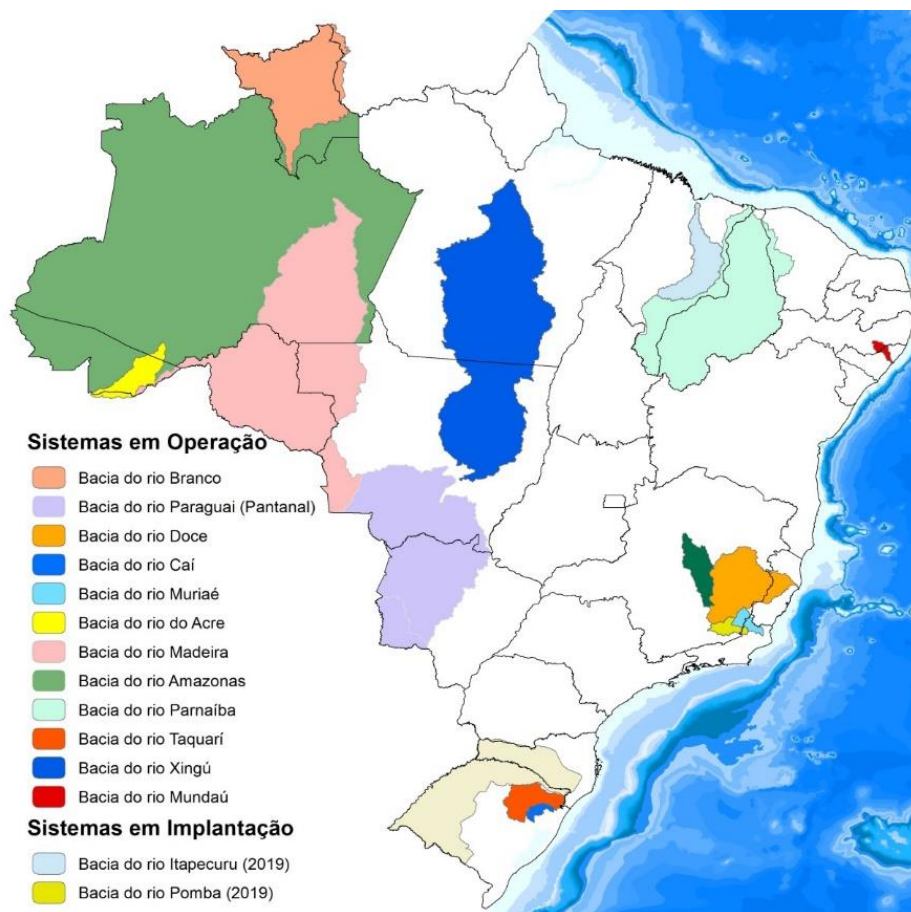


Figura 12. Sistemas em operação e em fase de implementação no SACE (Fonte: CPRM, 2019).

5 Metodologia

Para investigar a influência da discretização na calibração, utilizou-se da metodologia de segmentar a rede de drenagem por trechos de comprimentos fixos (SIQUEIRA *et al.* 2016), descrita no item 3.2.2. O modelo utilizado foi o MGB-IPH 3.0 com interface no MapWindow GIS. Seu funcionamento e ponderações foram elucidados no item 3.4. As simulações foram executadas no mesmo computador de configurações igual a: Intel® Core™ i5-5200U CPU@ 2.20GHZ, RAM instalada de 8 GB.

Como base das análises realizadas nesse estudo, foi utilizado um modelo de referência (CPRM), descrito no item 5.4, com parâmetros do solo estabelecidos para a discretização de 10km. Por conseguinte, foram realizados testes variando os comprimentos dos trechos de 7km até 100km, mantendo-se os mesmos parâmetros. Ao total foram oito testes seguindo a seguinte sequência: 10km, 7km, 20km, 35km, 40km, 50km, 75km e 100km. Na Figura 13 está ilustrado um fluxograma simplificado da metodologia empregada, com as etapas e procedimentos necessários para a execução do estudo. Ressalta-se que o procedimento da aquisição do banco de dados e delimitação é executado apenas uma vez e os demais procedimentos (a partir da segmentação até a análise dos resultados) foram realizados para cada variação na discretização considerada. Nos itens apresentados na sequência (de 4 até 5.5) consta a descrição da área de estudo e do procedimento da metodologia de forma mais detalhada.

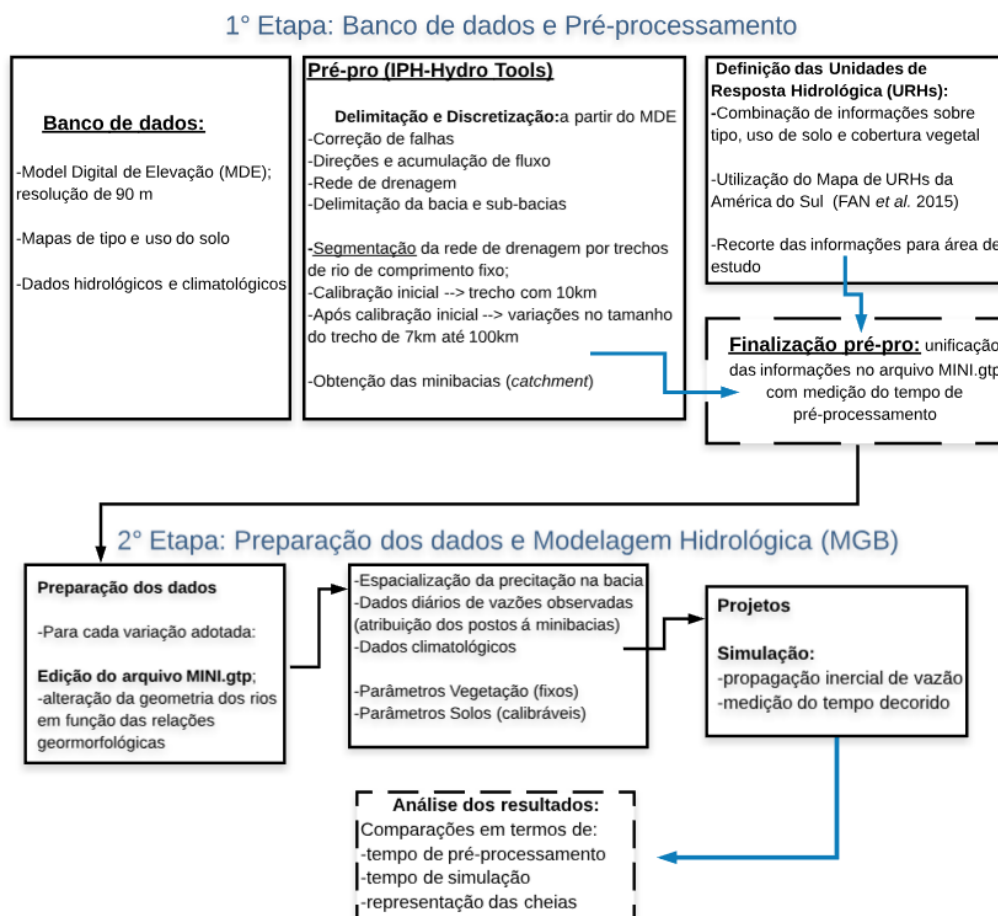


Figura 13. Fluxograma da metodologia aplicada no estudo

5.1 BANCO DE DADOS

O primeiro procedimento para a modelagem é a construção de uma base de dados. Na sequência são mostradas as informações do banco de dados utilizado nas simulações, contendo o modelo digital de terreno, informações sobre uso e ocupação do solo, dados hidrológicos e climatológicos.

5.1.1 Modelo Numérico de Terreno (MNT)

Utilizou-se o modelo numérico de terreno MERIT, proveniente da remoção de multi-erros (altura de árvores, ruídos e viés) do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com 90 metros de resolução espacial (Yamazaki *et al.* 2017), disponibilizado pela Universidade de Tóquio (2017). O MDT é essencial para efetuar a etapa de pré-processamento da área (detalhado no item 5.2), sendo utilizado, por exemplo, na delimitação da bacia, sub-bacias, minibacias, rede de drenagem, entre outros. Além disso, o MDT é utilizado na extração das características físicas da bacia por meio da aplicação de ferramentas desenvolvidas especificamente para esta finalidade.

5.1.2 Unidades de Resposta Hidrológica (URH's)

Como já mencionado no item 3.5, cada minibacia é dividida em Unidades de Resposta Hidrológica (URH's), as quais representam regiões que teoricamente possuem comportamento hidrológico similar e são essenciais, visto que influenciam diretamente os processos hidrológicos simulados. O modelo MGB-IPH traz a possibilidade de definir e inserir essas informações de diferentes formas. Nesse estudo utilizou-se do mapa publicado por Fan *et al.* (2015) das URH's da América do Sul, sendo recortado para a região de interesse. O mapa tem resolução espacial de 400m e nove classes distintas, sendo: I) Floresta em solo raso; II) Floresta em solo profundo; III) Agricultura em solo raso; IV) Agricultura em solo profundo; V) Campo em solo raso; VI) Campo em solo profundo; VII) Várzeas inundáveis; VIII) Áreas Semi-impermeáveis; e IX) Água.

5.1.3 Dados Hidrológicos e Climatológicos

O banco de dados utilizado contempla toda a porção brasileira da bacia e conta com 76 Estações fluviométricas, as quais 24 são estações do sistema de alerta do rio Uruguai, e 158 estações pluviométricas. Todas as estações são operadas pela CPRM e os dados são disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) através da plataforma HydroWeb. Contém também dados de 35 estações climatológicas, estes disponibilizados na própria base interna do MGB-IPH das normais climatológicas de 1960-1990 calculadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET) para todo o país, conforme apresentado por Fan e Collischonn (2014). O período dos dados de entrada selecionados foi de janeiro de 1980 até julho de 2017, cuja determinação deu-se em função da grande disponibilidade de dados e por incluir eventos significativos de cheia como, por exemplo, a do ano de 1983 e a de 2014. A Figura 14 apresenta todos os postos e estações utilizadas, destacando as estações fluviométricas do Sistema de Alerta do Rio Uruguai.

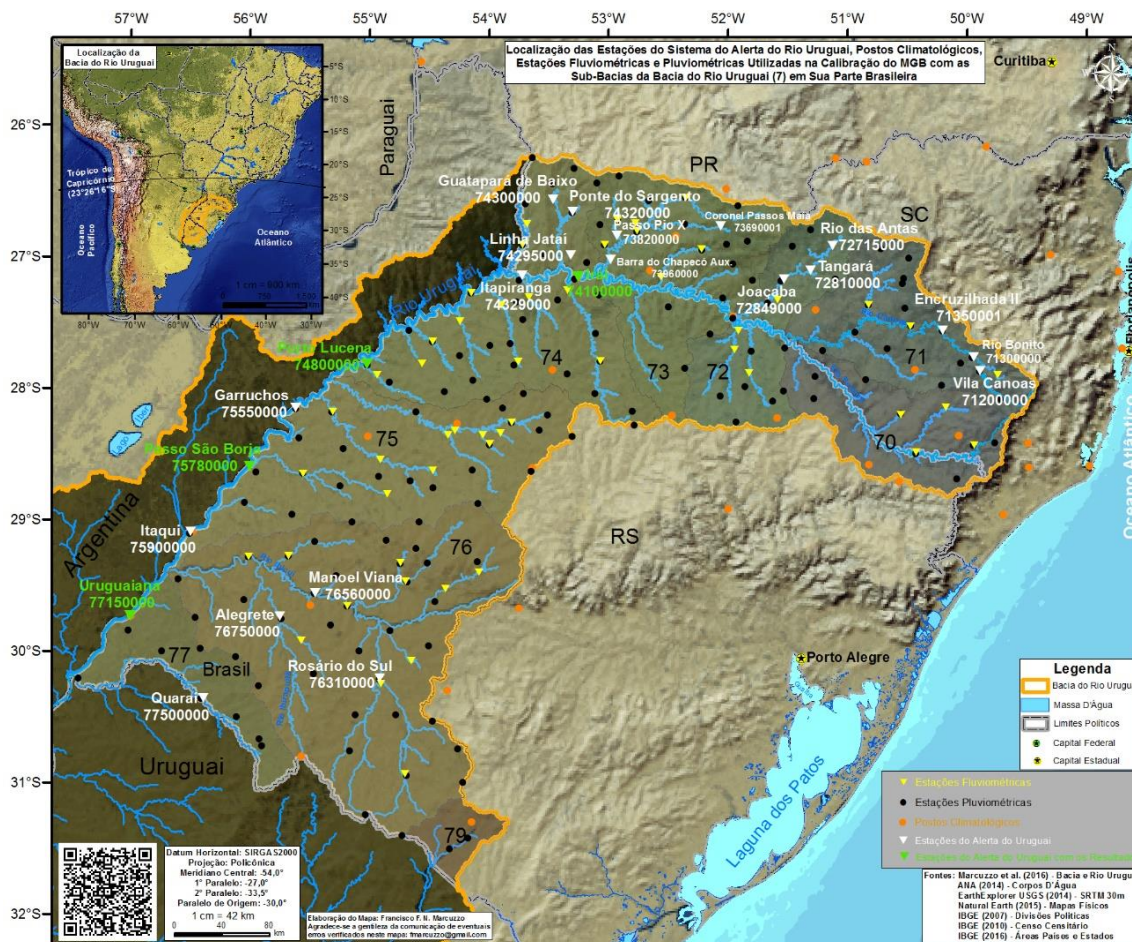


Figura 14. Localização dos postos utilizados na calibração. Elaboração: Francisco Marcuzzo

5.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

A aplicação do modelo MGB-IPH necessita de uma etapa de pré-processamento na qual são definidas as características físicas da bacia. A versão utilizada do modelo usa o pacote de ferramentas IPH-*HydroTools*, implementado em forma de plug-in do software MapWindow GIS. Na sequência são descritos os passos do pré-processamento.

5.2.1 Delimitação da bacia hidrográfica

A delimitação da área de estudo foi realizada seguindo os passos básicos para delimitar uma bacia hidrográfica utilizando-se de ferramentas de geoprocessamento. Ressalta-se que, para melhorar a qualidade da rede de drenagem o MNT foi previamente condicionado. Foi aplicada a técnica *stream burning*, a qual ajusta as elevações dos pixels do MNT com base numa rede de drenagem vetorial obtida de outra fonte, forçando os caminhos de fluxos para a rede de drenagem importada. Foi utilizada as ferramentas do ArcHydro tools e a base hidrográfica vetorial do IBGE (2017) para aplicar o procedimento.

- **Remoção de depressões espúrias;**

O primeiro passo na manipulação do MNT para geração das bacias e rede de drenagem utilizado foi a remoção de depressões/falhas. No IPH - *HydroTools* há duas

possibilidades de preenchimento de depressões através da ferramenta *Sink and Destroy*. O primeiro método é o PFS (*Priority-First-Search*) e o segundo o MHS (*Modify Heuristic Search*). Nesse estudo foi utilizado o segundo método (MHS), que conforme Jones (2002, apud Siqueira *et al.* 2016) a tendência de escoamento do MDE/MNT na região do entorno da depressão é utilizada para evitar uma busca completamente “às cegas”, sendo utilizados caminhos de mínimo custo. Ou seja, são utilizados caminhos (até o exutório da depressão) que minimizem o comprimento do trajeto e ao mesmo tempo em que as diferenças de elevação também sejam minimizadas, além de técnicas de preenchimento/rompimento (MARTZ e GARBRECHT, 1999) para a definição final das direções de fluxo. Ainda, Buarque *et al.* (2009) aponta que a redução do número de redes de drenagem paralelas é uma das vantagens do procedimento supracitado.

- **Direções de fluxo;**

Após a correção das falhas do *raster* (MNT) foi realizado o procedimento de identificar as direções de fluxo em cada célula. O método empregado é o D8, o qual foi proposto por Marks, Dozier e Frew (1984) e O’Callaghan e Mark (1984), cujo nome refere-se às 8 possíveis direções de fluxo. A elevação de cada célula é comparada com às células vizinhas (8 possíveis), com exceção daquelas localizadas no extremo (borda) da grade. Assim, é identificada a direção com maior declividade (positiva) e a célula central é codificada em uma nova matriz com as dimensões do raster, conforme o ângulo deste direção (Figura 15).

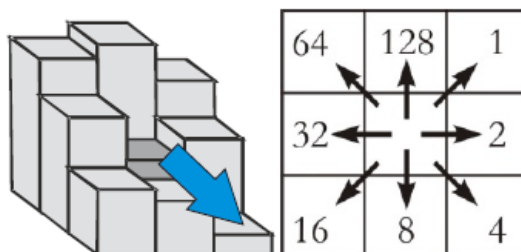


Figura 15. Método D8 para distinguir as oitonas direções de fluxo possíveis com definição da direção pela maior declividade. Fonte: Buarque *et al.* (2009)

- **Acumulação de fluxo e definição da rede de drenagem;**

Com as direções de fluxo geradas e definidas, foi utilizada a ferramenta *Flow Accumulation*, a qual cria um arquivo de área acumulada (soma das células na direção indicada), ou seja, em cada célula é atribuído um valor com o número de células que drenam a água até a mesma. Com isso, a rede de drenagem pode ser gerada a partir de um número/porcentagem de células ou área de drenagem baseada na resolução espacial do arquivo. No presente trabalho, foi escolhido o limiar de 7.000 células, ou seja, a rede de drenagem é formada pelas células que recebem contribuição mínima de 7.000 ou mais. Conforme elucidado por Fan *et al.* (2013), a escolha do valor do número de células ou tamanho da área de contribuição, influencia significativamente na rede de drenagem gerada, tendo a relação de quanto menor o valor escolhido, mais densa é a drenagem e vice-versa.

- **Delimitação da bacia hidrográfica e sub-bacias:**

A partir dos arquivos gerados das direções de fluxo e rede de drenagem, e com arquivo *shapefile* de ponto(s) contendo o exutório da bacia e também das sub-bacias, foi realizada a delimitação da área de contribuição de cada ponto considerado através da ferramenta *Watershed Delineation*. A definição das sub-bacias é uma etapa importante, pois os parâmetros do modelo (fixos e calibráveis) são atribuídos por sub-bacia. Podem ser definidas utilizando diferentes critérios como, por exemplo, ocupação e uso predominante do solo, em regiões mais planas e declivosas ou ainda onde sabe-se da existência de dados fluviométricos. A bacia hidrográfica modelada foi dividida em 43 sub-bacias (Figura 16).

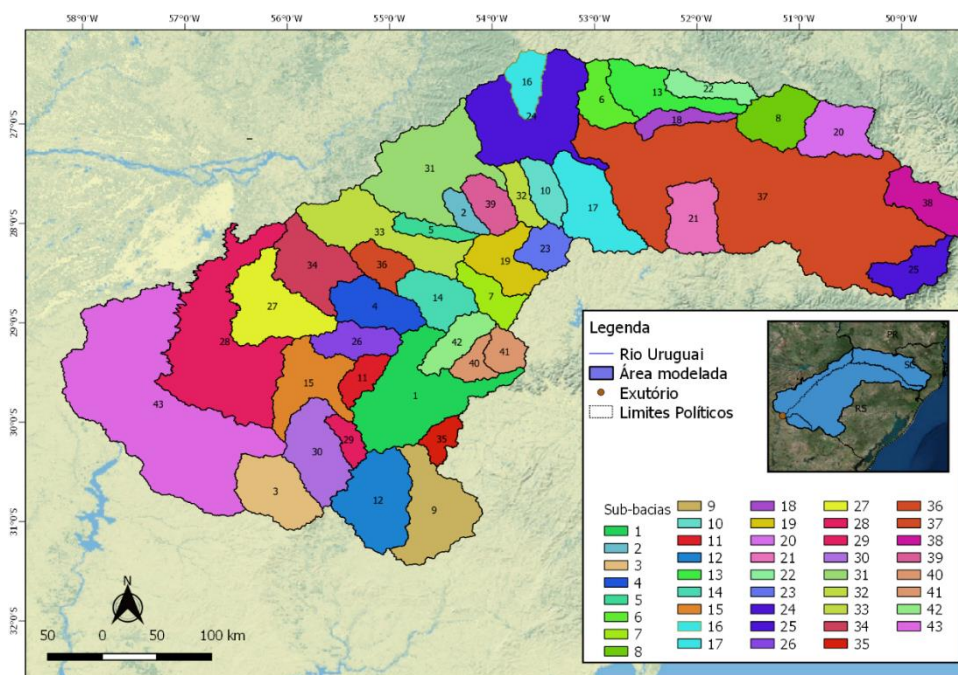


Figura 16. Delimitação e divisão da área de estudo. Fonte: autoria própria

5.2.2 Discretização da bacia em Minibacias

No modelo MGB-IPH tem a possibilidade de discretizar a bacia em minibacias por dois métodos: segmentar a rede de drenagem por confluência ou por trechos de comprimento fixos. O funcionamento e as diferenças entres os métodos foram descritos no item 3.2.2. Para este estudo, utilizou-se da metodologia de Siqueira *et al.* (2016), a qual dividi a rede de drenagem em trechos de comprimento fixo. Para tal, foi utilizada a ferramenta *Fixed Length Segmentation* sendo informado como dado de entrada o tamanho do trecho e os arquivos gerados nas etapas anteriores, das direções de fluxo, acumulação de fluxo e rede de drenagem. Assim, foram considerados oito comprimentos diferentes na discretização da bacia, sendo eles: 7 km, 10 km, 20 km, 35 km, 40 km, 50 km, 70 km e 100 km. O número de minibacias geradas varia de forma inversa com o tamanho do trecho escolhido, ou seja, quanto menor o tamanho maior número de minibacias, conforme exemplifica a Figura 17.

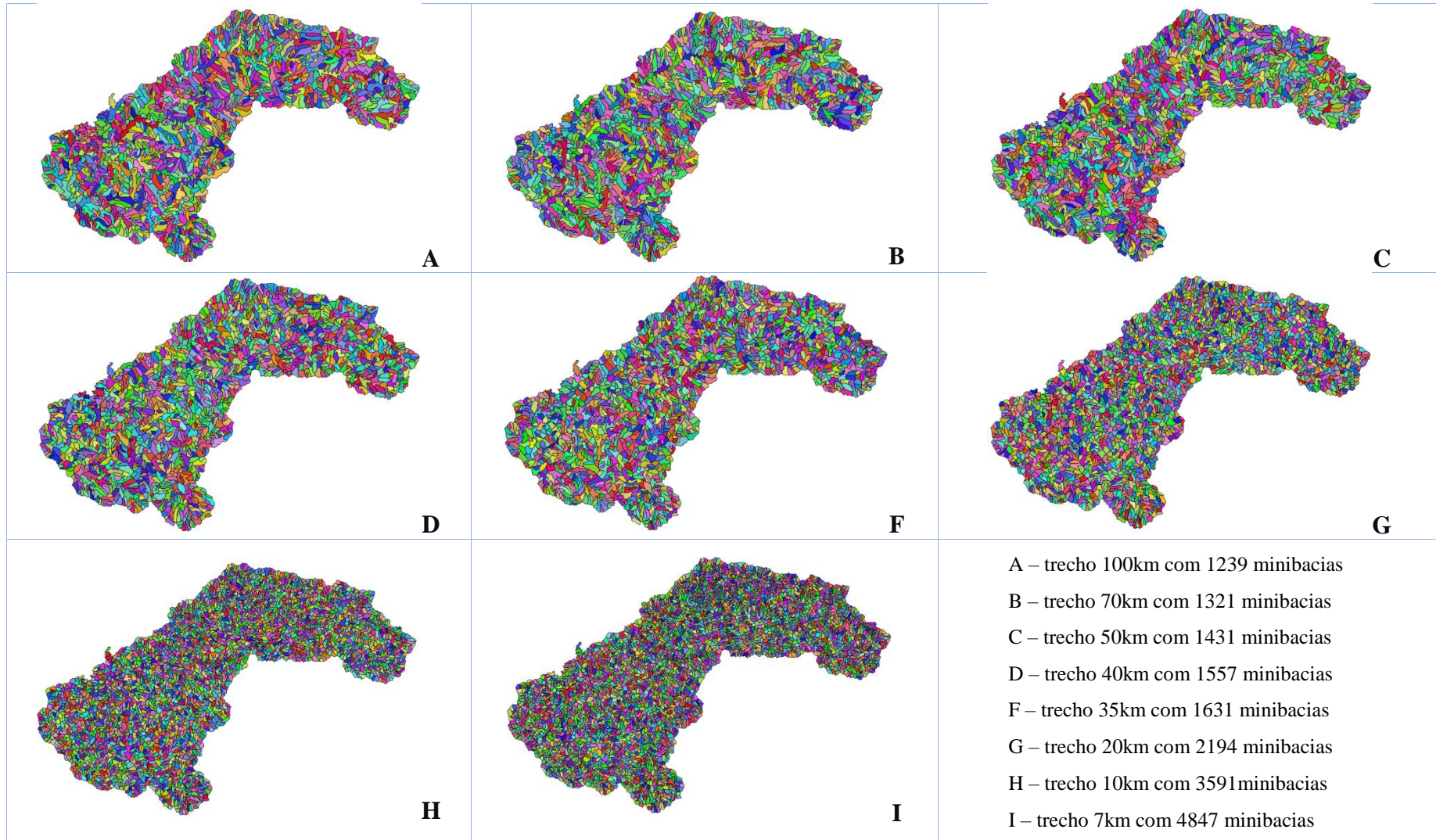


Figura 17. Número de minibacias geradas na discretização da bacia do rio Uruguai com os diferentes comprimentos

5.2.3 Finalização do pré-processamento

A finalização do pré-processamento ocorre com o passo da unificação dos arquivos gerados nas etapas anteriores em arquivos base para a simulação hidrológica. Dentre eles, é gerado o arquivo *mini.gtp*. É nele que contém informações topológicas do modelo, fornecendo para cada minibacia informações como sub-bacia pertencente, área de drenagem, largura e profundidade do trecho da calha do rio, entre outras. Para gerar o arquivo *mini.gtp* foi utilizada a ferramenta *MGB-Preprocessing* com os seguintes arquivos; Modelo Numérico de Terreno (MNT) corrigido; direções de fluxo; minibacias; rede de drenagem; sub-bacias e o arquivo das classes de resposta hidrológica (HRCs) atribuídas às minibacias.

Para cada variação na discretização adotada foi gerado um arquivo *mini.gtp* e o tempo marcado com um cronômetro digital, denominado nesse estudo de tempo de pré-processamento.

5.3 DADOS DE ENTRADA E SIMULAÇÃO (MGB)

Na preparação dos dados de entrada, primeiramente foi realizada a edição do arquivo “*mini.gtp*”. Mais especificamente, foram modificadas as larguras e profundidades dos trechos de rio e também o Coeficiente de Manning, ambos associados às sub-bacias. Essas alterações foram baseadas no modelo de referência, segundo um levantamento (ainda não publicado pela CPRM) das características geomorfológicas da bacia do rio Uruguai, a qual foi dividida em seis regiões distintas, ou seja, cada região tem uma equação que relaciona a profundidade e largura da calha do rio. O processo consistia em identificar a minibacia correspondente ao início do rio Uruguai (confluência dos rios Pelotas e Canoas) e a partir desse ponto, utilizando-se de planilha de cálculo do Excel, era identificada automaticamente qual a região de cada sub-bacia e realizado o respectivo ajusta na geometria do rio.

Posteriormente foram gerados os *shapefile* dos centroides das minibacias, sendo nesse arquivo vinculadas as informações dos postos climatológicos e da interpolação dos dados dos postos pluviométricos. O método de interpolação utilizado no MGB-IPH é o Inverso da Distância ao Quadrado para o centroide de cada minibacia a fim de espacializar as variáveis. As séries dos dados diários das vazões observadas de cada posto fluviométrico também são atribuídas para o centroide da minibacia correspondente de forma automática. Porém, foi constatado em muitos casos o equívoco da numeração da minibacia, sendo necessário seu ajuste manual. Esse procedimento se mostrou exaustivo, devido às variações no número de minibacias geradas a cada discretização aplicada.

O próximo passo é a atribuição dos parâmetros fixos e calibráveis do modelo por sub-bacia. Nessa etapa foram utilizados os parâmetros do modelo de referência (CPRM). Por fim, as simulações foram realizadas com propagação inercial de vazão e o tempo decorrido medido, sendo que o modelo fornece o tempo ao final de cada simulação.

5.4 MODELO DE REFERÊNCIA (CPRM)

Este item visa a apresentar de forma sucinta a configuração do modelo de referência utilizado como base do presente estudo.

Especificamente, a área modelada do rio Uruguai vai desde as suas nascentes nos rios Canoas e Pelotas até logo após a confluência do rio Quaraí com o rio Uruguai, na tríplice fronteira entre Brasil, Argentina e Uruguai, compreendendo uma área total de aproximadamente 216.846 km², com o exutório localizado nas coordenadas -30.21 e -57.64. A bacia foi dividida em 43 sub-bacias, conforme ilustrado na Figura 16, contemplando regiões de interesse do Sistema de Alerta Hidrológico da CPRM, como Uruguaiana, Alegrete, São Borja, Garruchos, Porto Lucena, Iraí, entre outras. A Figura 18 apresenta a localização de todas as estações do sistema do alerta hidrológico.

A região também foi dividida em seis regiões distintas, baseado em uma pesquisa das características geomorfológicas da bacia hidrográfica do rio Uruguai (estudo ainda não publicado pela CPRM), o qual serviu de base na definição dos parâmetros fixos e calibráveis, assim como para o equacionamento da geometria dos rios. O comprimento utilizado na segmentação da rede de drenagem foi de 10km, conforme recomendado por Fan *et al.* (2013) em estudo da sensibilidade do modelo inercial a valores de comprimento de trecho. A Figura 19 ilustra as estações fluviométricas utilizadas na calibração do MGB separadas por regiões.

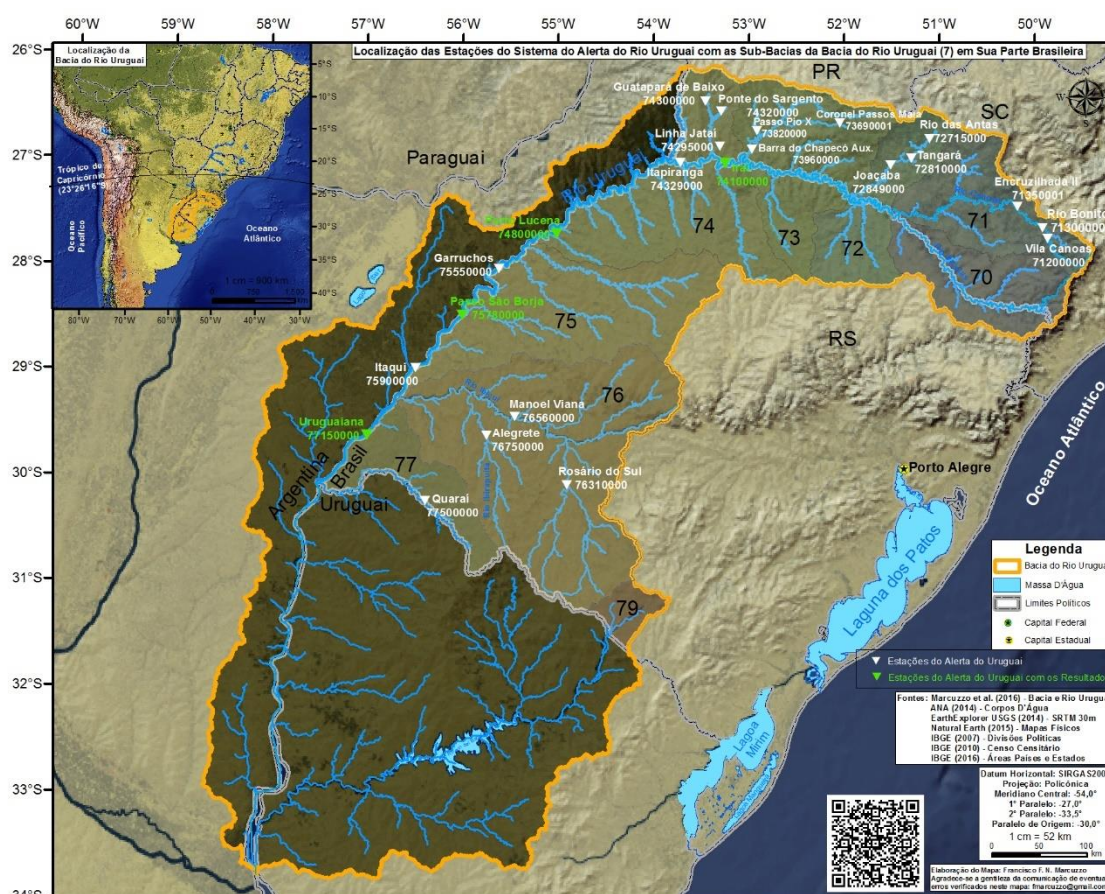


Figura 18. Localização das estações fluviométricas do Sistema de Alerta Hidrológico do rio Uruguai

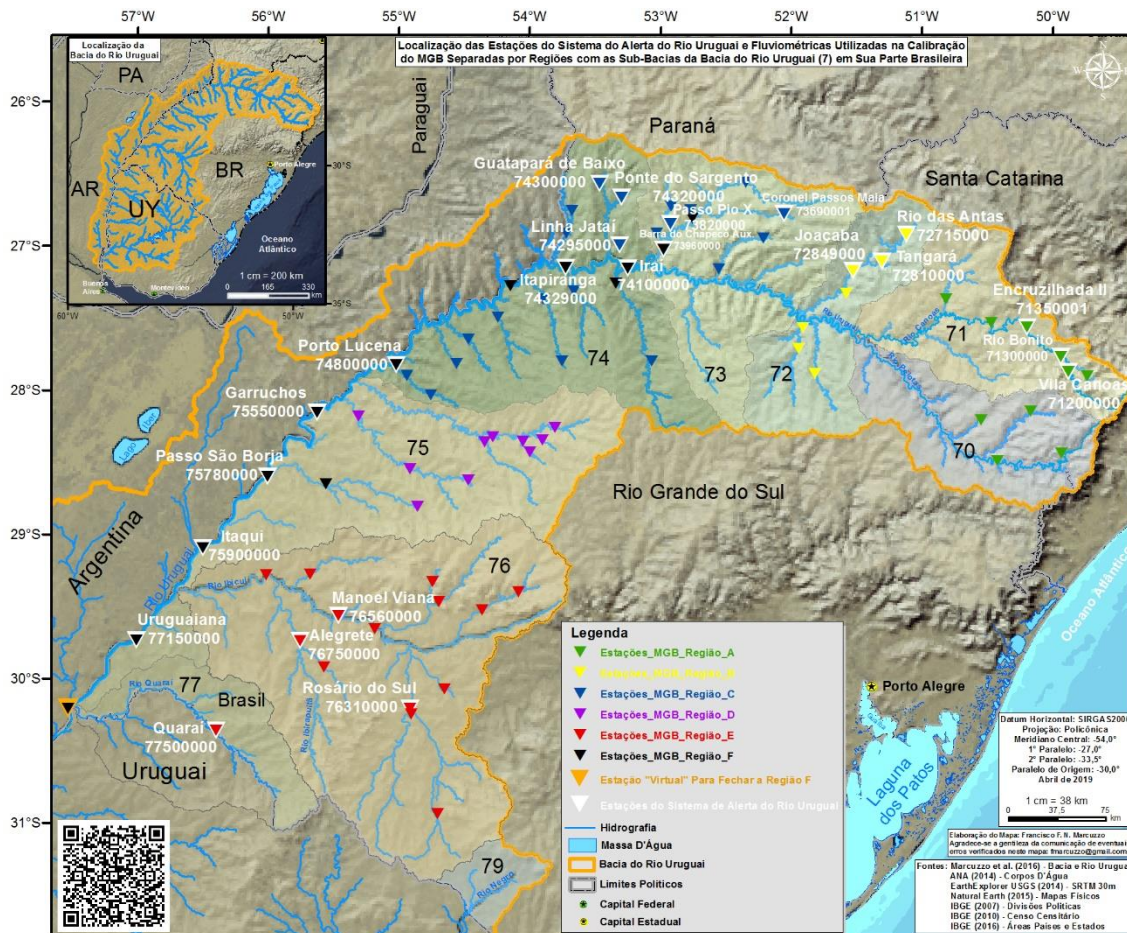


Figura 19. Estações fluviométricas utilizadas no MGB divididas por regiões.

5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados foi realizada para quatro estações fluviométricas ao longo do rio Uruguai (Iraí, Porto Lucena, Passo São Borja e Uruguaiana) de modo a verificar o efeito da discretização em regiões com diferentes áreas de contribuição ao longo do rio principal, e também contemplando regiões com histórico de inundações, as quais são de interesse de estudos do sistema de alerta hidrológico da CPRM. Também se analisou uma quinta estação (Jacaqua), no rio Ibicuí afluente do rio Uruguai, para verificar o efeito das modificações propostas em uma região de pequena área de drenagem. Os postos utilizados constam na Quadro 2 com informações de código, nome, área de drenagem, coordenadas decimais e geodésicas.

Código	Nome	Lat (Dec)	Long (Dec)	Lat (Geo)	Long (Geo)	AreaDrenag ANA (km ²)
74100000	Iraí	-27.1736	-53.2292	-27° 10' 32.16"	- 53° 13' 46.92"	61900
74800000	Porto Lucena	-27.8528	-55.0256	-27° 51' 9.00"	-55° 1' 32.16"	95200
75780000	Passo São Borja	-28.0631	-54.7558	-28° 3' 47.16"	-54° 45' 20.88"	125000
77150000	Uruguaiana	-29.7486	-57.0892	- 29° 44' 54.96"	- 57° 5' 18.96"	190000
76500000	Jacaqua	-29.6869	-55.1961	- 29° 41' 12.84"	- 55° 11' 45.96"	27800

Quadro 2. Postos fluviométricos de interesse utilizados nas análises

As métricas de avaliação deste estudo para cada variação na discretização adotada são:

- Métricas de desempenho do MGB-IPH: coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NSE), *Nash-Sutcliffe* logaritmo (NSElog) e diferença entre volumes observados e calculados (ΔV).
- Representação das cheias: hidrogramas, mudança nos tempos de propagação, vazão de pico (Qmax), vazão média (Qmed) e vazão mínima (Q90).
- Tempos: pré-processamento (medido na geração do arquivo “mini.gtp”), e simulação.

6 Resultados e Discussões

Primeiramente é apresentado um resumo dos resultados obtidos para as diferentes discretizações (Tabela 1) e um resumo das comparações feitas com a discretização inicial (10km) na Tabela 2, considerando os postos fluviométricos de interesse do rio principal. As principais análises, abordando de maneira geral os resultados, são apresentadas na sequência, seguida de breve discussão sobre as diferenças encontradas. Nos itens na de 6.1.1 a 6.1.5, são apresentados os resultados e análises individuais por posto fluviométrico.

Na Tabela 1 consta informações de tamanho do trecho, número de minibacias geradas, tempo de pré-processamento, tempo de simulação, métricas de desempenho do MGB-IPH e vazões características (Q90, máxima e média). Notoriamente, o número de minibacias aumentou conforme o comprimento do trecho(dx) diminuiu, com o valor máximo no trecho de 7km de 4847 e mínimo de 1239 no trecho de 100km. O tempo de pré-processamento não sofreu grande influência da discretização, com variação máxima apresentada de apenas 2min e 45s. Já o tempo de simulação está diretamente relacionado ao dx, o qual apresentou diferença entre o menor e o maior de 1h 37min e 6s. Do comprimento de 100km até 20km ocorreu aumento gradativo do tempo indo de 2min 42s até 7min e 42s. A partir de 20km ocorreu acréscimo significativo no tempo de simulação, aumentando em torno de 4,5 vezes para o trecho de 10km (de 7min para 34min), e do comprimento de 10km para 7km também apresentou aumento de aproximadamente 4 vezes, passando de 34min e 39s para 1h 39min e 48s.

Em relação às métricas de desempenho do MGB-IPH, de modo geral para todos os postos, quanto menor o tamanho do trecho (mais refinado o modelo) melhores foram os resultados apresentados, principalmente quanto ao coeficiente NSE. Relativo as vazões, a tendência apresentada foi de quanto maior o tamanho do trecho maiores foram as vazões baixas (Q90) e menores as vazões de pico (Qmax). Nas discretizações menos detalhadas (50, 70 e 100km) não seguiu um padrão e apresentou variações. Em Uruguaiana na simulação com o comprimento de 100km, apresentou instabilidade no trecho com 100km, com vazões muito elevadas e picos adiantados. Ressalta-se que a instabilidade só foi observada nessa estação (com dx de 100km) e não verificada nas demais estações.

As comparações com a discretização inicial (10km) são apresentados na Tabela 2. Os valores indicados estão em função do trecho de referência (10km), ou seja, valores negativos significam que ocorreu diminuição das métricas, tempos ou no número de minibacias geradas, e valores positivos o inverso. Esse comparativo visou a ilustrar o quantitativo das diferenças dos valores, possibilitando ter visão mais clara se tem vantagem ou desvantagem em se utilizar outras discretização ao invés da inicial (10km). Os resultados mais parecidos com o trecho inicial foram das discretizações mais próximas, ou seja, com 7km e 20km. Em geral, nos valores das métricas as diferenças apresentadas foram pequenas, com 7km obtendo-se valores superiores e a partir de 20km os resultados apresentam valores inferiores, se distanciando da qualidade apresentada com a discretização de 10km, conforme o aumento o comprimento do trecho utilizado. Já

no tempo de simulação as diferenças são maiores, principalmente nos comprimentos mais próximos ao 10km, sendo o trecho de 7km o único que apresentou maior tempo e as demais discretizações apresentaram tempos menores que o trecho inicial.

As diferenças apresentadas nos resultados podem ter sido ocasionadas por erros no balanço de massa no modelo, os quais não foram calculados. Outra explicação é que parte dessas diferenças podem estar relacionadas com questões numéricas de difusão em função do tamanho do trecho (dx), ou ainda pela atenuação da propagação da onda de cheia relacionada a erros de fase e erros de amplitude. Ressalta-se que as análises foram feitas de maneira sistemática e pontual, abordando as diferenças quantitativas dos resultados encontrados, e não se aprofundando em questões teóricas como os possíveis erros numéricos supracitados, devido a complexa análise dos mesmos.

Outra questão a ser discutida é a localidade das estações. Como o modelo foi aplicado para uma grande área da bacia hidrográfica do rio Uruguai, deu-se prioridade nas análises dos postos no rio principal, não abrangendo bacias de cabeceira, as quais são, possivelmente, mais sensíveis a discretização devido a menor área e possuem resposta mais rápida à eventos hidrológicos. Outra questão relevante, que poderia somar a este estudo, seria uma comparação com um modelo regional aplicado para alguma sub-bacia do rio Uruguai. Como, por exemplo, o trabalho de Fleischmann *et al.* (2019) em que foi feita a análise do quão localmente é relevante o modelo, comparando-se o MGB em escala espacial global, regional e local, com HEC-RAS detalhado da bacia de Itajaí-Açu (Brasil), avaliando vazão, nível e área inundada com diferentes tamanhos de trecho(dx).

Tabela 1. Resumos dos resultados das simulações de cada estação fluviométrica no rio principal

ESTAÇÕES	Tamanho do Trecho(km)	7	10	20	35	40	50	70	100
	Nº de minibacias	4847	3591	2194	1631	1557	1431	1321	1239
	Tempo Pre - pro	34min e 10s	33min 40s	33min 3s	32min 47s	32min 50s	32min 5s	31min 51s	31min 25s
	Tempo Simulação	1h 39min 48s	34min 30s	7min 42s	5min 43s	5min 12s	3min 36s	3min 12s	2min 42s
URUGUAIANA	NSE	0.934	0.929	0.917	0.890	0.890	0.879	0.803	0.770
	NESlog	0.195	0.187	0.162	0.142	0.145	0.122	0.125	0.117
	ΔV	3.39%	3.10%	4.77%	4.28%	3.26%	7.92%	3.37%	8.92%
	Q90 (m ³ /s)	1604	1631	1734	1785	1769	2033	1848	2121
	Qmax (m ³ /s)	29467	29531	29129	27872	28097	27490	28108	36972
	Qmed (m ³ /s)	5079	5076	5158	5134	5083	5301	5075	5534
PASSO SÃO BORJA	NSE	0.851	0.847	0.834	0.809	0.798	0.795	0.751	0.686
	NESlog	0.173	0.163	0.140	0.124	0.124	0.099	0.097	0.108
	ΔV	1.39%	1.35%	3.57%	3.20%	2.05%	6.94%	4.50%	-5.61%
	Q90 (m ³ /s)	1171	1183	1276	1311	1298	1516	1400	1483
	Qmax (m ³ /s)	37963	37342	36940	33372	32807	33146	29671	36010
	Qmed (m ³ /s)	3669	3667	3747	3734	3693	3870	3779	3418
PORTO LUCENA	NSE	0.839	0.748	0.786	0.738	0.734	0.707	0.639	0.613
	NESlog	0.146	0.053	0.110	0.092	0.102	0.065	0.043	0.050
	ΔV	10.83%	34.04%	13.90%	14.91%	11.24%	20.37%	26.33%	20.82%
	Q90 (m ³ /s)	896	1102	990	1029	1001	1214	1197	1315
	Qmax (m ³ /s)	45854	44451	43891	38370	37368	37821	35487	38027
	Qmed (m ³ /s)	2839	3434	2917	2944	2850	3084	3235	3098
IRAÍ	NSE	0.868	0.852	0.825	0.829	0.820	0.758	0.771	0.746
	NESlog	0.171	0.151	0.115	0.140	0.146	0.046	0.124	0.089
	ΔV	7.24%	16.59%	21.45%	8.95%	7.05%	33.94%	7.18%	16.37%
	Q90 (m ³ /s)	545	577	656	621	606	872	656	814
	Qmax (m ³ /s)	38403	40078	38084	31274	31066	37649	27871	50840
	Qmed (m ³ /s)	1859	2020	2104	1888	1855	2321	1856	2018

Tabela 2. Resumo das comparações com a discretização inicial (10km) para cada posto fluviométrico analisado no rio principal

ESTAÇÕES	Tamanho do Trecho(km)	10	7	20	35	40	50	70	100
	N° de minibacias	3591	1256	-1397	-1960	-2034	-2160	-2270	-2352
Tempo Pré-pro	33min e 40s	+30s	-10s	-53s	-53s	-1min e 35s	-1min e 49s	-2min e 15s	
Tempo Simulação	34min e 30s	+1h e 5min	-26min e 48s	-28min e 47s	-29min e 18s	-30min e 54s	-31min e 18s	-31min e 48s	
URUGUAINA	NSE	0.929	0.005	-0.013	-0.039	-0.039	-0.050	-0.126	-0.159
	NESlog	0.187	0.009	-0.024	-0.044	-0.041	-0.065	-0.061	-0.070
	ΔV	3.10%	0.29%	1.67%	1.18%	0.16%	4.82%	0.27%	5.82%
	Q90 (m³/s)	1631	-27	103	154	138	402	217	490
	Qmax (m³/s)	29531	-63	-401	-1659	-1434	-2041	-1422	7441
	Qmed (m³/s)	5076	3	82	58	8	225	-1	459
PASSO SÃO BORJA	NSE	0.847	0.004	-0.014	-0.038	-0.050	-0.053	-0.096	-0.161
	NESlog	0.163	0.010	-0.023	-0.039	-0.039	-0.063	-0.066	-0.055
	ΔV	1.35%	0.04%	2.22%	1.85%	0.70%	5.59%	3.15%	-6.96%
	Q90 (m³/s)	1183	-12	93	128	115	333	217	300
	Qmax (m³/s)	37342	621	-402	-3970	-4535	-4196	-7672	-1332
	Qmed (m³/s)	3667	1	80	66	25	203	112	-249
PORTO LUCENA	NSE	0.748	0.091	0.037	-0.011	-0.015	-0.042	-0.109	-0.136
	NESlog	0.053	0.093	0.058	0.039	0.049	0.012	-0.010	-0.003
	ΔV	34.04%	-23.21%	-20.14%	-19.13%	-22.80%	-13.67%	-7.71%	-13.23%
	Q90 (m³/s)	1102	-206	-112	-73	-100	112	95	213
	Qmax (m³/s)	44451	1403	-560	-6081	-7083	-6630	-8964	-6424
	Qmed (m³/s)	3434	-595	-516	-490	-584	-350	-199	-336
IRAÍ	NSE	0.852	0.016	-0.027	-0.023	-0.032	-0.094	-0.081	-0.106
	NESlog	0.151	0.020	-0.036	-0.011	-0.005	-0.105	-0.027	-0.061
	ΔV	16.59%	-9.35%	4.86%	-7.64%	-9.54%	17.35%	-9.41%	-0.22%
	Q90 (m³/s)	577	-32	79	44	29	295	79	237
	Qmax (m³/s)	40078	-1675	-1993	-8804	-9012	-2429	-12206	10762
	Qmed (m³/s)	2020	-161	84	-132	-165	300	-164	-2

6.1 ANÁLISE POR POSTO FLUVIOMÉTRICO

Nos itens a seguir são elucidados os resultados e análises por estação fluviométrica, primeiro para as quatro estações localizadas no rio principal e por último a estação no afluente. Os resultados são apresentados na forma de hidrogramas anuais e mensais (mês com a maior cheia). De todo período de simulação (1980 a 2017), foi escolhido apenas um ano por estação para elaboração dos hidrogramas, de modo a contemplar períodos/eventos de cheias. Ressalta-se que não foi analisado o mesmo período para todos os postos devido a falhas nos dados observados, que podem comprometer as análises. Outra forma de análise é por meio de gráficos que relacionam o tempo de simulação (em colunas) e NSE (pontos) de cada trecho. Optou-se por dar destaque a esse comparativo em função da representatividade da métrica NSE para as vazões máximas e por esse estudo estar utilizando como base um potencial modelo de previsão de cheias.

Demais gráficos dos resultados desse estudo são apresentados no APÊNDICE A.

6.1.1 Iraí (74100000)

A estação fluviométrica Iraí está localizada nas coordenadas -27.17 S e -53.22 W e tem área de drenagem igual a 61900km², sendo o posto mais a montante. A Figura 20 apresenta a relação do tempo de simulação com a métrica *Nash-Sutcliffe* (NSE) por comprimento. Em destaque (na cor vermelha) está a discretização inicial (10km). Diminuindo 3km do comprimento (10 para 7) obteve-se um ganho no valor do NSE de apenas 0.016, mas o tempo de simulação se elevou em mais de 1 hora. Nos comprimentos maiores que 10km, de 20km a 40km ocorreu uma pequena queda na qualidade, com a discretização de 35km chegando mais próxima da inicial, a qual apresentou diferença de apenas 0.023 no valor da métrica e diminuição do tempo em aproximadamente 28 minutos. Já nos trechos de 50km a 100km ocorreu as maiores quedas na qualidade dos resultados.

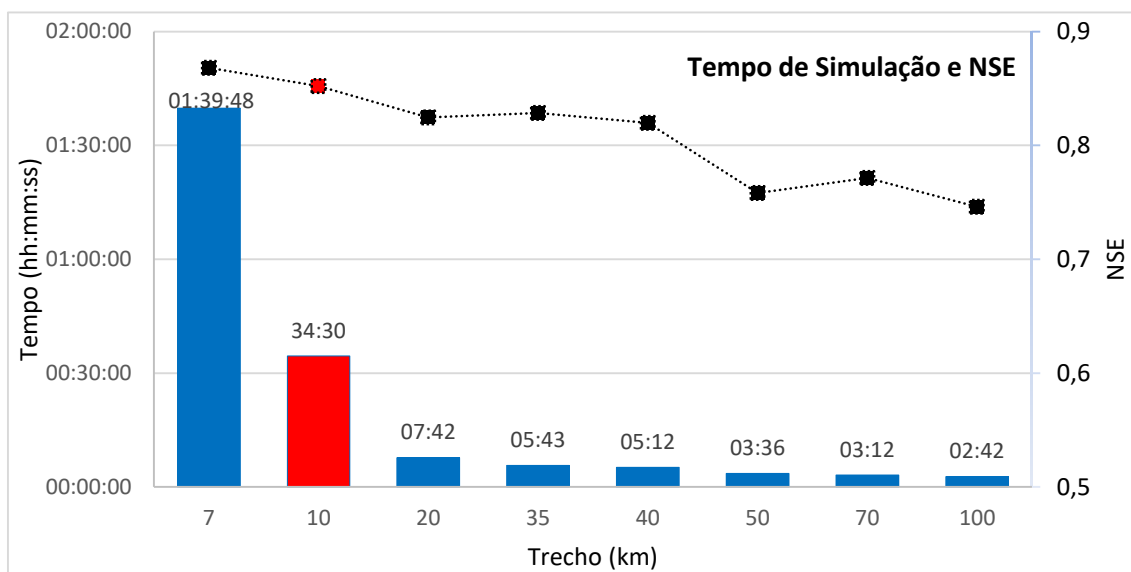


Figura 20. Tempo de simulação e a métrica de desempenho NSE por trecho - Iraí (74100000)

Na Figura 21 é apresentado o hidrograma do ano de 2005, e na Figura 22 o hidrograma do mês (junho) da maior cheia do ano. De modo geral, as vazões baixas e médias foram superestimadas e os picos subestimados. No hidrograma mensal, é possível visualizar com maior detalhe o efeito das diferentes discretizações. Nos comprimentos de 7, 10, 20 e 50km as vazões no período de ascensão do hidrograma foram superestimadas, mas em nenhum trecho o pico observado foi ultrapassado. Já os comprimentos 35, 40, 70 e 100km minimizaram a cheia. O trecho de 10km foi o que apresentou a melhor representação do pico da cheia seguido do de 20km, com pequena diferença entre eles. Ressalta-se que em nenhuma discretização utilizada ocorreu a antecipação ou atraso do pico da cheia, conforme pode ser conferido tanto nos hidrogramas como na Tabela 3, a qual traz as informações de data da vazão máxima observada e simulada.

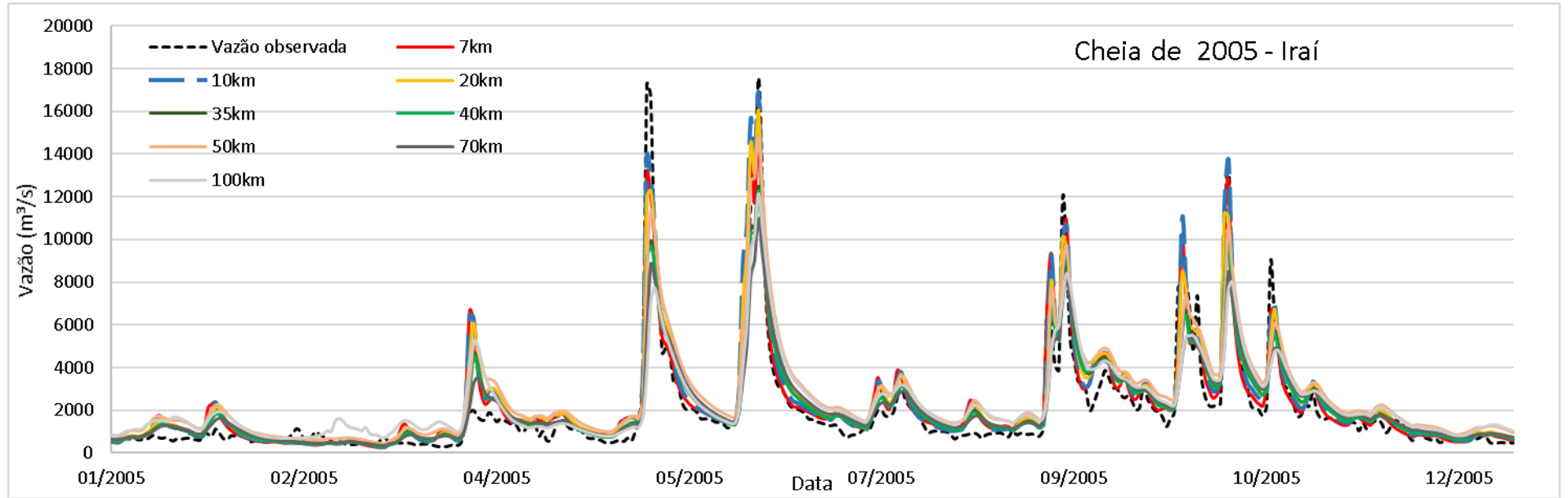


Figura 21. Hidrogramas observado e simulados para o ano de 2005 em Iraí (74100000)

Tabela 3. Data da vazão máxima (m³/s) observada e simuladas - 74100000

Trecho	Vazão Max. (m ³ /s)	Data
Q Obs.	17549	18/06/2005
7km	14966	18/06/2005
10km	16897	18/06/2005
20km	16080	18/06/2005
35km	12504	18/06/2005
40km	12298	18/06/2005
50km	14795	18/06/2005
70km	11003	18/06/2005
100km	12129	18/06/2005

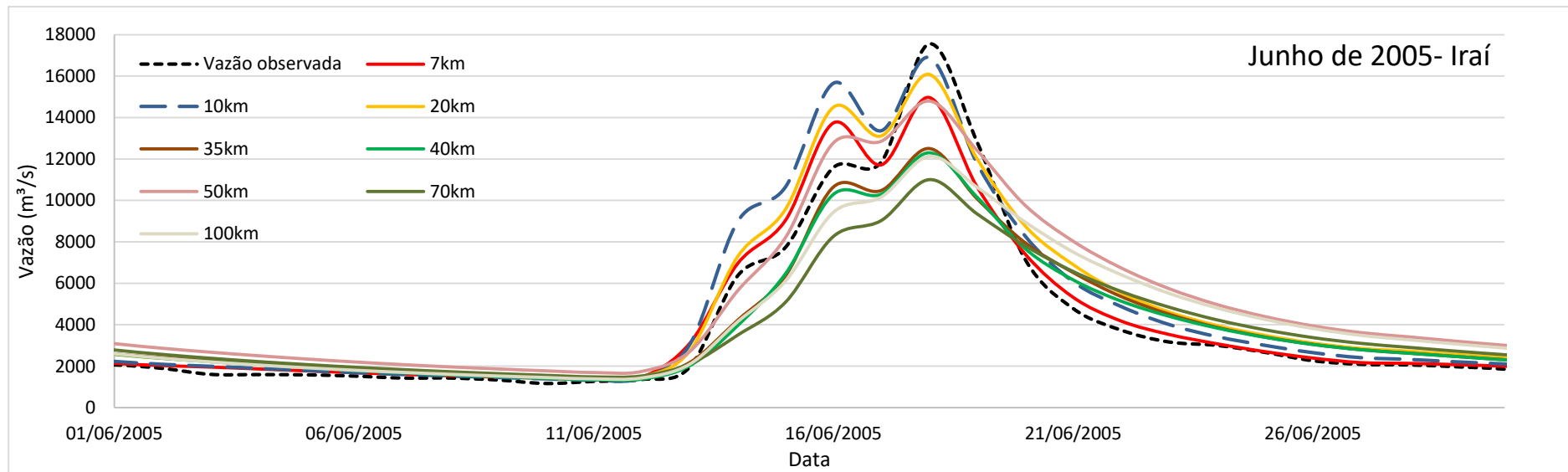


Figura 22. Hidrogramas observado e simulados para junho de 2005 em Iraí (74100000)

6.1.2 Porto Lucena (74800000)

A estação fluviométrica Porto Lucena está localizada nas coordenadas -27.17 S e -53.22 W, e tem área de drenagem igual a 95200km². Como é possível notar na Figura 23, comparando-se com a discretização inicial (10km), nos trechos de 7km e 20km ocorreu melhora na qualidade da métrica NSE em 0.091 e 0.037, respectivamente. Apesar da discretização de 7km ter apresentado os melhores resultados, seu custo computacional foi muito elevado. Em contrapartida, com o trecho de 20km o tempo de simulação foi reduzido em aproximadamente 27 minutos e ainda apresentou melhora na qualidade. Após 20km ocorreu um declínio acentuado nos valores do NSE, chegando a 0.613 no trecho de 100km.

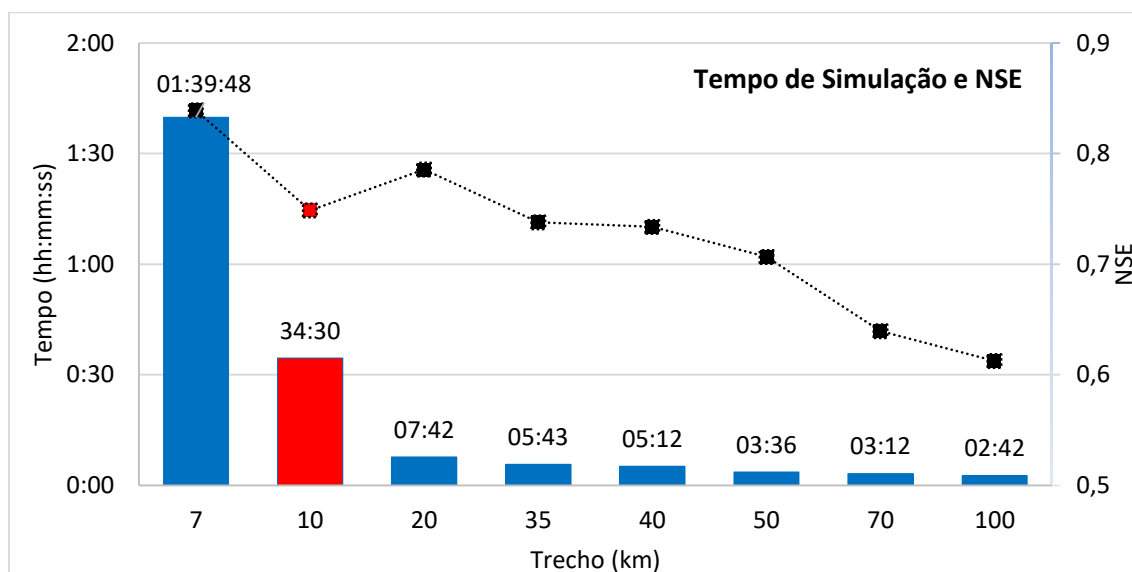


Figura 23. Tempo de simulação e a métrica de desempenho NSE por trecho - Porto Lucena (74800000)

Na Figura 24 é apresentado o hidrograma do ano de 1997, e na Figura 25 o hidrograma mensal para outubro de 1997. Nota-se que a maioria dos picos foram subestimados e as baixas vazões superestimadas. Conforme pode ser visto no hidrograma mensal e na Tabela 4, o pico da cheia foi antecipado em um dia nas discretizações de 7km a 50km, e apresentou atraso de três dias para a de 100km. Na de 70km não ocorreu nenhum atraso ou adiantamento da cheia, mas as vazões simuladas foram muito baixas, se distanciando do pico da vazão observada. O trecho que melhor representou o pico da cheia foi o de 10km seguido do de 7km, com pequena dispersão entre eles.

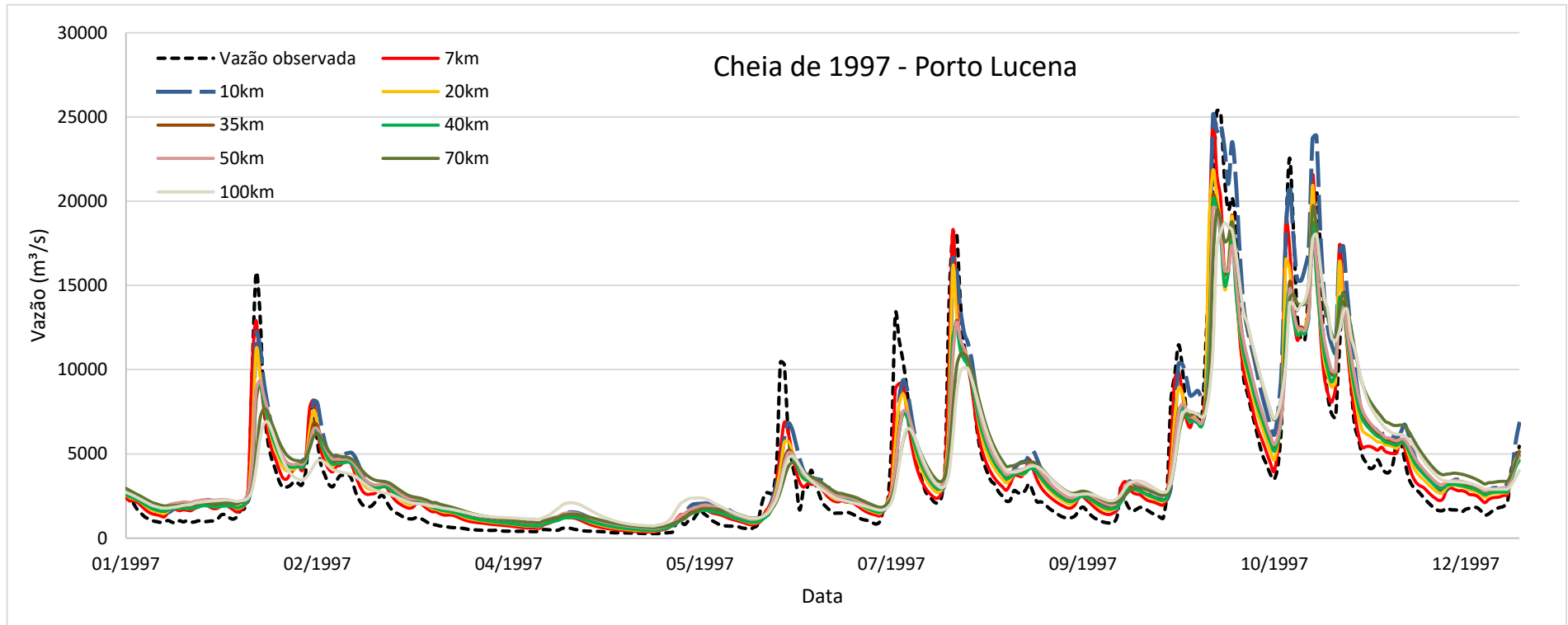


Figura 24. Hidrogramas observado e simulados para o ano de 1997 em Porto Lucena (74800000)

Tabela 4. Data da vazão máxima (m³/s) observada e simuladas - 74800000

Trecho	Vazão Max. (m ³ /s)	Data
Q Obs.	25345	13/10/1997
7km	25053	12/10/1997
10km	25097	12/10/1997
20km	21852	12/10/1997
35km	20336	12/10/1997
40km	20136	12/10/1997
50km	19614	12/10/1997
70km	19423	13/10/1997
100km	18704	15/10/1997

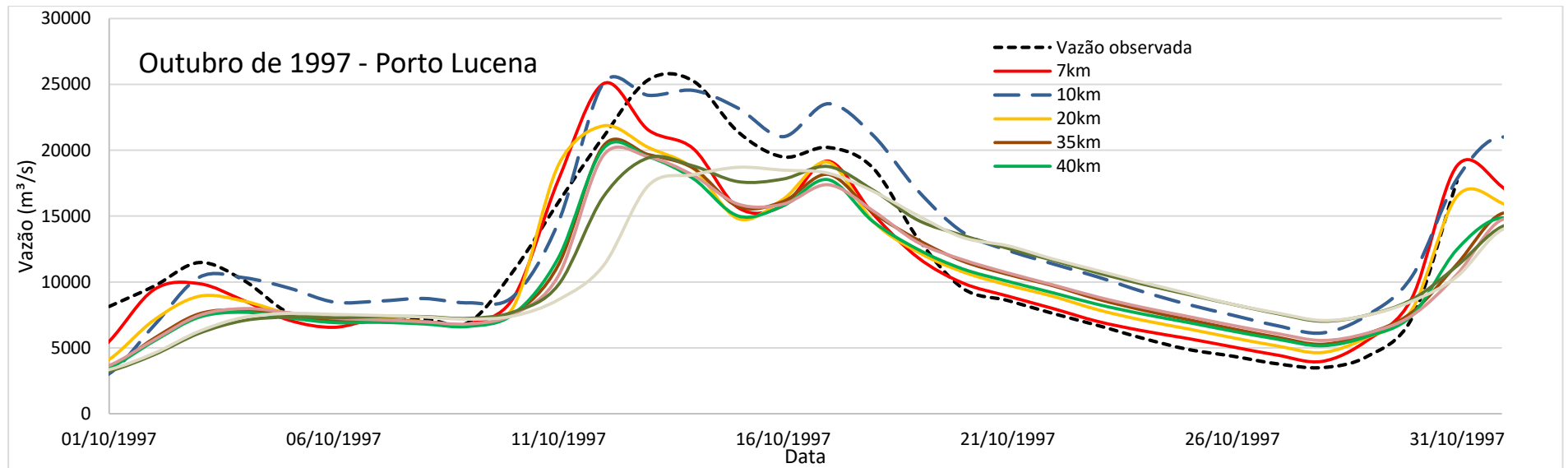


Figura 25. Hidrogramas observado e simulados para outubro de 1997 em Porto Lucena (74800000)

6.1.3 Passo São Borja (75780000)

A estação fluviométrica Passo São Borja está localizada nas coordenadas -28.62 S e -56.03 W, e tem área de drenagem igual a 125000km². Observa-se na Figura 26 que a qualidade dos resultados decaiu conforme o comprimento do trecho aumentou. Nos comprimentos menores, 7, 10 e 20km, obteve-se os melhores resultados, tratando-se da métrica de desempenho NSE. Destaque-se que a diferença entre a discretização inicial e a de 20km foi de apenas 0.014 (0.847 – 0.834). De 35km a 50km, ocorreu pequeno declínio no valor da métrica, e de 70km a 100km essa queda se tornou mais acentuada, chegando no valor de 0.686 no maior trecho considerado.

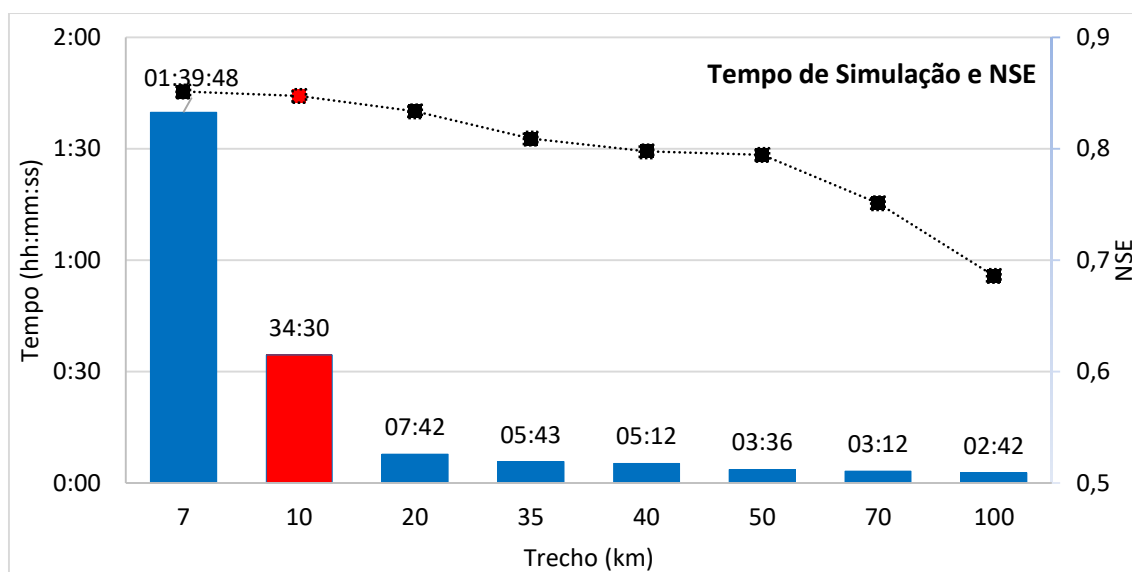


Figura 26. Tempo de simulação e a métrica de desempenho NSE por trecho - Passo São Borja (75780000).

A análise dos hidrogramas foi possível realizar com o mesmo período da estação anterior (Porto Lucena), devido à ausência de falhas nos dados observados. Logo na Figura 27 é apresentado o hidrograma do ano de 1997, e na Figura 28 o hidrograma mensal de outubro de 1997. Nesse caso o pico da cheia foi antecipado em três dias na maioria das discretizações, exceto para a de 40km que o pico foi antecipado em quadro dias e a de 70km em um dia. Nos três menores comprimentos (7, 10 e 20) os hidrogramas são parecidos apresentando pouca dispersão entre eles. A discretização que melhor representou o pico da cheia foi a de 7km seguido da de 10km.

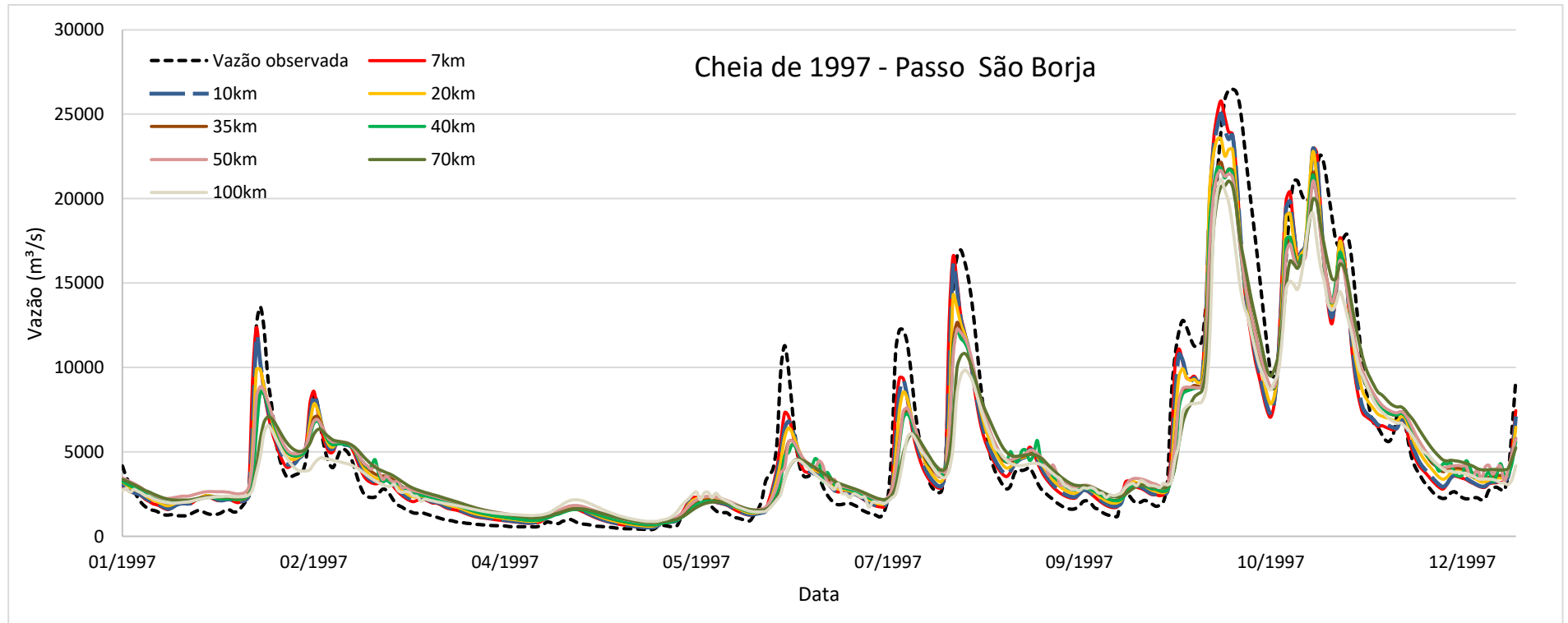


Figura 27. Hidrogramas observado e simulados para o ano de 1997 em Passo São Borja (75780000)

Tabela 5. Data da vazão máxima (m³/s) observada e simuladas - 75780000

Trecho	Vazão Max. (m ³ /s)	Data
Q Obs.	26473	18/10/1997
7km	25784	15/10/1997
10km	25046	15/10/1997
20km	23537	15/10/1997
35km	22158	15/10/1997
40km	21830	14/10/1997
50km	21655	15/10/1997
70km	21046	17/10/1997
100km	21168	15/10/1997

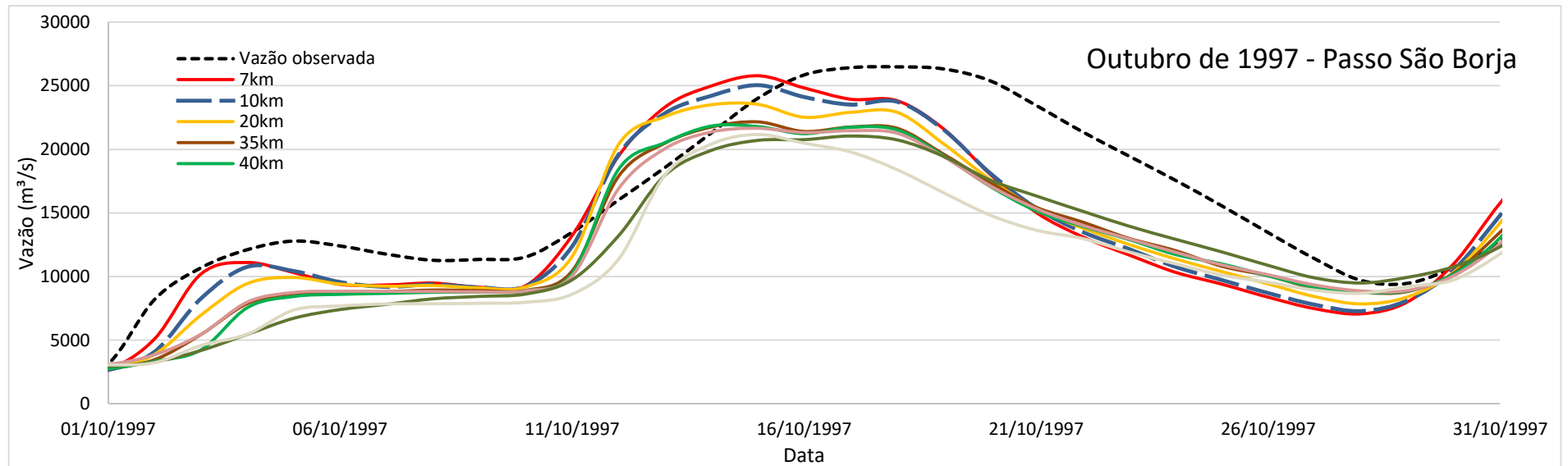


Figura 28. Hidrogramas observado e simulados para outubro de 1997 Passo São Borja (75780000)

6.1.4 Uruguaiana (77150000)

A estação fluviométrica Uruguaiana está localizada nas coordenadas -29.74 S e -57.08 W, e tem área de drenagem igual a 190000km², sendo o posto mais a jusante. Os três menores comprimentos 7,10 e 20km apresentaram os valores mais próximos de 1, sendo 0.934, 0.929 e 0,917 respectivamente. Nota-se que os valores são muito próximos, por outro lado as diferenças nos tempos de simulação são elevadas, apresentando numa diferença máxima de 1h e 32min entre o trecho 7km para o de 20km. Do 35km até 50km, o valor do NSE ficou praticamente constante em 0.890, e após decaiu chegando no valor de 0.770 no trecho de 100km.

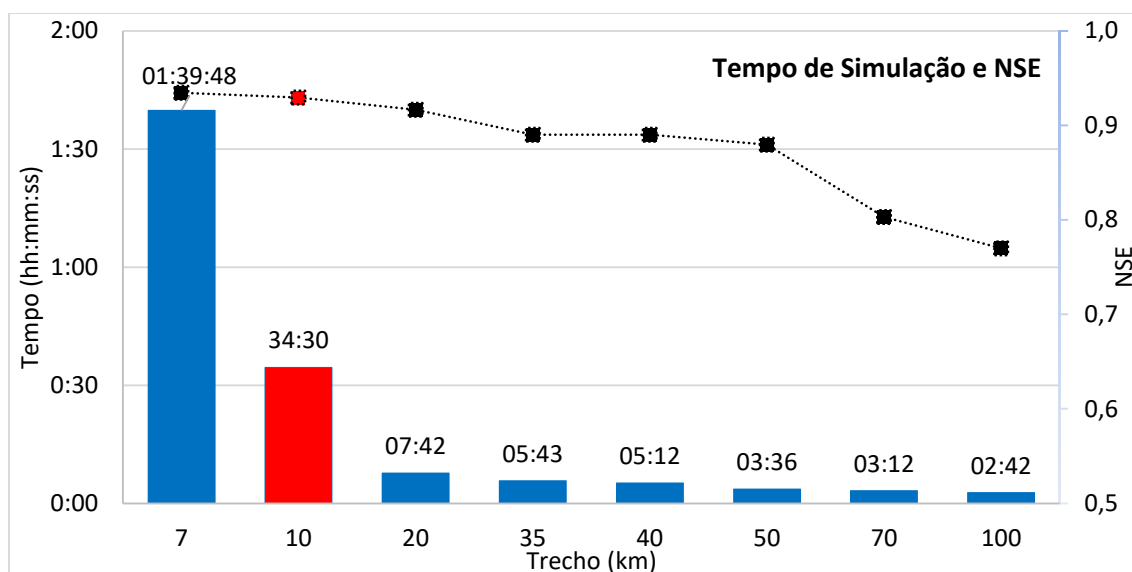


Figura 29. Tempo de simulação e a métrica de desempenho NSE por trecho - Uruguaiana (77150000).

O período escolhido para analisar os hidrogramas foi o ano de 1983, maior cheia histórica registrada da região de Uruguaiana. Logo, na Figura 30 está o hidrograma anual e na Figura 31 está o hidrograma do mês de julho. O comportamento dos hidrogramas seguiu os dos postos anteriores, ou seja, os picos foram subestimados e vazões baixas superestimadas. Na maioria dos casos o pico da cheia foi antecipado em dois dias. Os trechos de menor comprimento (até 20km) apresentaram hidrogramas muito próximos, com baixa dispersão entre eles. Na maior discretização (100km) ocorreu problemas de instabilidade, tanto nas vazões baixas como nos picos, com a máxima vazão simulada sendo maior e ocorrendo sete dias antes que a maior vazão observada.

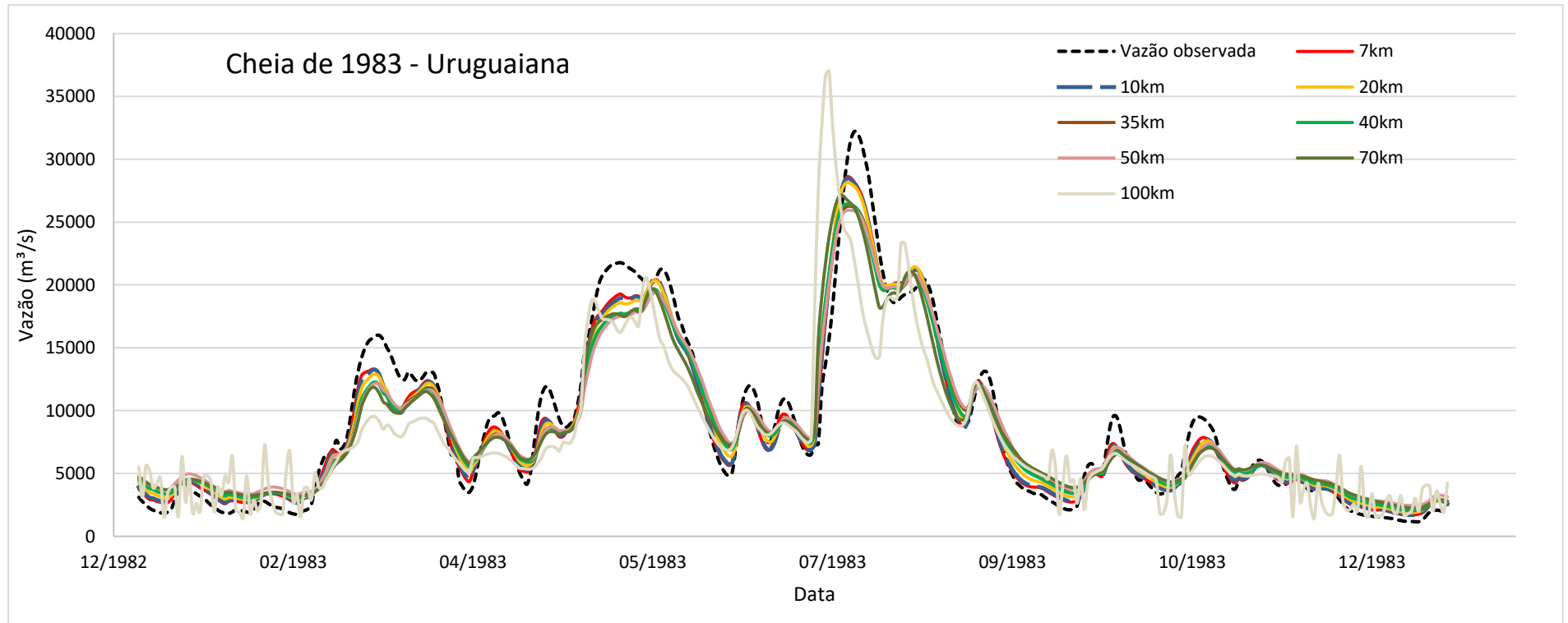


Figura 30. Hidrogramas observado e simulados para o ano de 1983 em Uruguaiana (77150000)

Tabela 6. Data da vazão máxima (m³/s) observada e simuladas - 77150000

Trecho	Vazão Max. (m ³ /s)	Data
Q Obs.	32210	19/07/1983
7km	28593	17/07/1983
10km	28479	17/07/1983
20km	28151	17/07/1983
35km	26253	18/07/1983
40km	26433	17/07/1983
50km	25933	18/07/1983
70km	27127	15/07/1983
100km	36972	12/07/1983

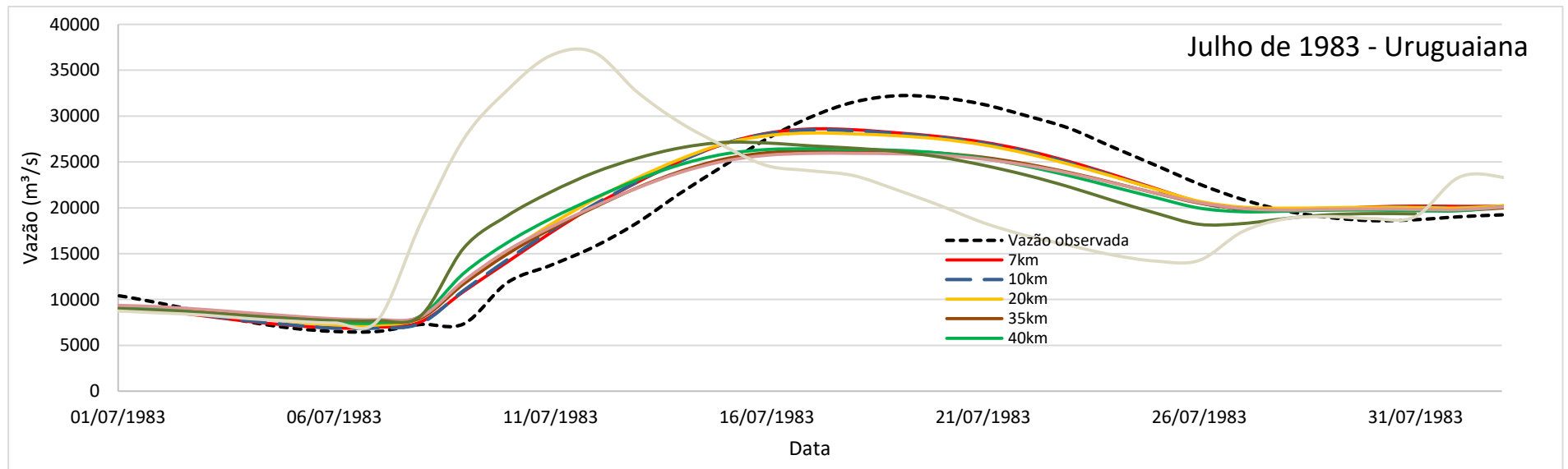


Figura 31. Hidrogramas observado e simulados para julho do ano de 1983 em Uruguiana (77150000)

6.1.5 Jacaqua (76500000)

A estação fluviométrica Jacaqua está localizada nas coordenadas -29.68 S e -55.19 W, e tem área de drenagem igual a 27800km². É o posto de menor área de drenagem e o localiza-se no rio Ibicuí único afluente do rio Uruguai analisado. A Tabela 7 apresenta o resumo com os resultados das simulações e a Tabela 8 as comparações realizadas com a discretização inicial.

Nota-se que não foi obtida nenhuma melhora na qualidade ao diminuir ou aumentar o tamanho do trecho em relação a discretização inicial de 10km, podendo ser observado mais claramente na Figura 32. Apesar disso, a diferença para o trecho de 20km foi pequena, chegando a 0.023 (0.914 – 0.891). Após 20km os resultados apresentaram uma queda gradativa no valor do coeficiente NSE.

Tabela 7. Resultados das simulações para a estação Jacaqua (76500000)

Trecho (km)	Nº de minibacias	Tempo Pré-pro	Tempo Simulação	JACAQUA					
				NSE	NESlog	ΔV	Q90	Qmax	Qmed
7	4847	33min e 40s	1h 39min e 48s	0.894	0.258	0.163	71	6014	655
10	3591	33min e 30s	34min e 40s	0.914	0.254	0.164	74	5559	656
20	2194	32min e 47s	7min e 42s	0.891	0.220	0.190	87	5827	670
35	1631	32min e 50s	5min e 43s	0.876	0.198	0.182	102	5623	666
40	1557	32min e 5s	5min e 12s	0.870	0.190	0.184	107	5699	667
50	1431	31min e 51s	3min 36s	0.842	0.179	0.191	111	5469	671
70	1321	31min e 25s	3min e 12s	0.817	0.153	0.229	128	5703	691
100	1239	33min e 40s	2min e 42s	0.787	0.173	0.096	106	6020	618

Tabela 8. Comparações com a discretização inicial (10km) para a estação Jacaqua (76500000)

Trecho (km)	Nº de minibacias	Tempo Pré-pro	Tempo Simulação	JACAQUA					
				NSE	NESlog	ΔV	Q90	Qmax	Qmed
10	3591	00:33:40	00:34:30	0.914	0.254	0.164	74	5559	656
7	1256	+30s	+1h e 5min	-0.020	0.004	-0.001	-4	455	0
20	-1397	-10s	-26min e 48s	-0.023	-0.034	0.026	13	268	15
35	-1960	-53s	-28min e 47s	-0.038	-0.056	0.018	28	64	10
40	-2034	-53s	-29min e 18s	-0.044	-0.064	0.020	33	140	11
50	-2160	-1min e 35s	-30min e 54s	-0.072	-0.075	0.027	37	-91	15
70	-2270	-1min e 49s	-31min e 18s	-0.097	-0.102	0.065	54	144	35
100	-2352	-2min e 15s	-31min e 48s	-0.127	-0.081	-0.068	32	460	-38

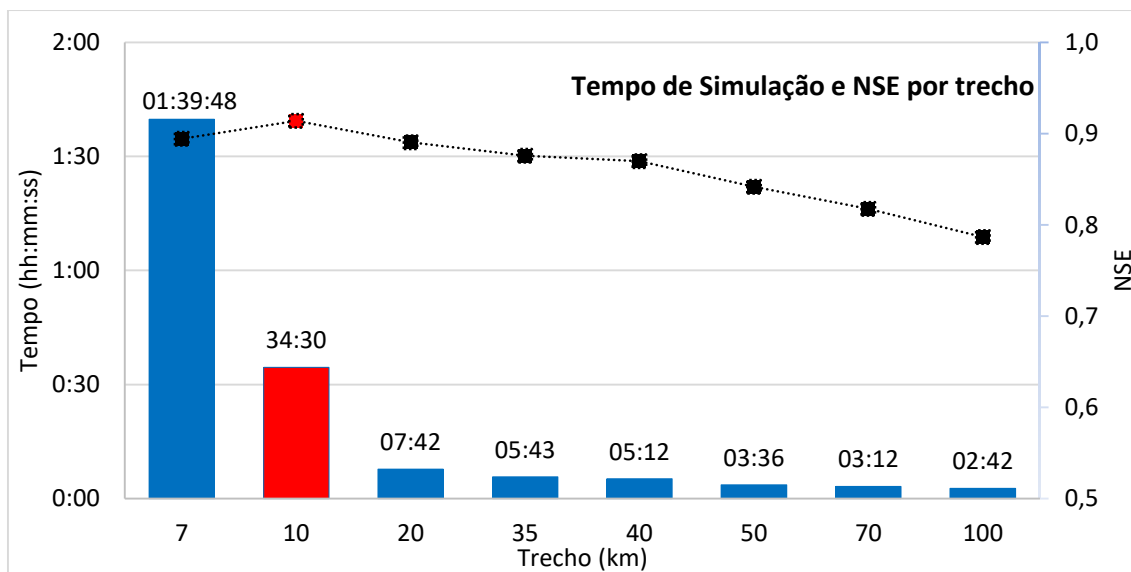


Figura 32. Tempo de simulação e a métrica de desempenho NSE por trecho – Jacaqua (76500000).

Na Figura 33 é apresentado o hidrograma do ano de 1983, e na Figura 34 o hidrograma do mês (maio) da maior cheia do ano. Nota-se que nessa localidade, a discretização mais detalhada (7km) superestimou os picos, enquanto que os demais trechos apresentaram a mesma tendência das estações anteriores, picos subestimados e vazão baixas superestimadas. Apenas os trechos 7km e 10km não apresentaram defasagem do pico da maior cheia (mês de maio), e após 20km os hidrogramas apresentaram adiantamento de um dia no pico da cheia.

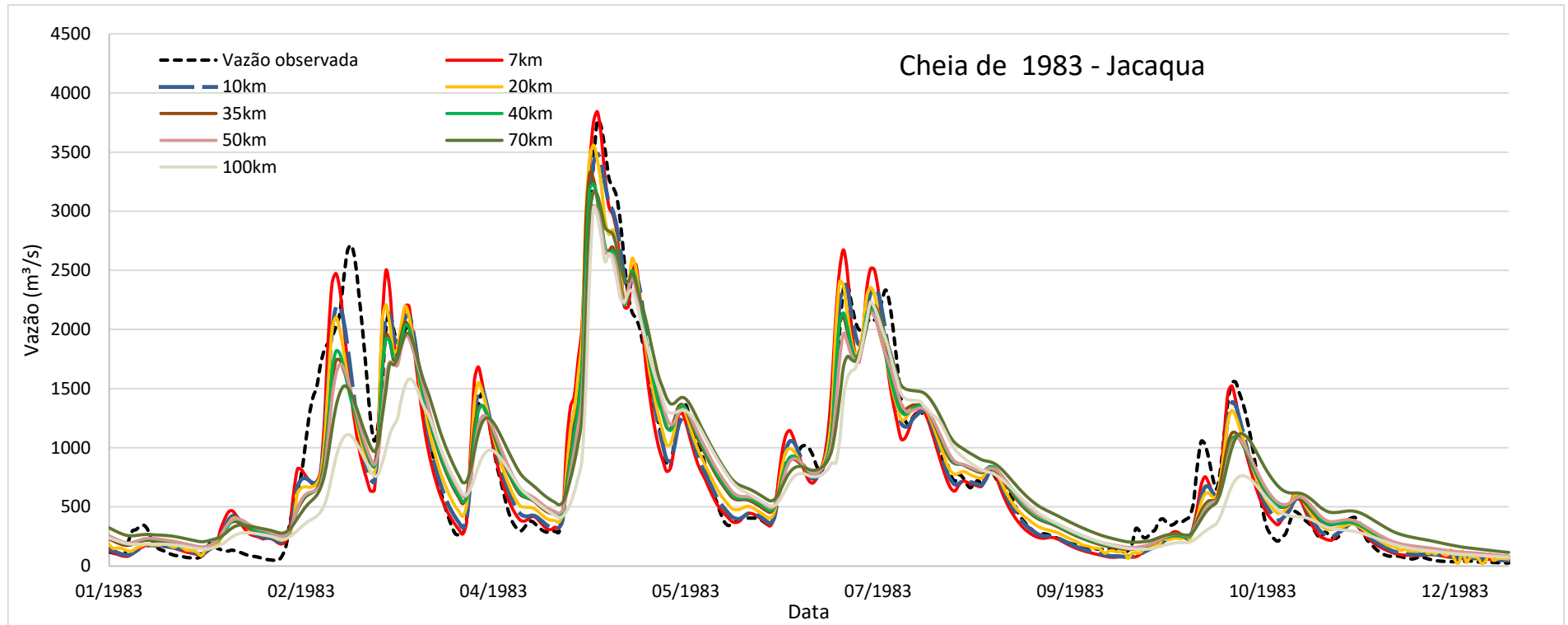


Figura 33. Hidrogramas observado e simulados para o ano de 1983 em Jacaqua (76500000)

Tabela 9. Data da vazão máxima (m³/s) observada e simuladas - 76500000

Trecho	Vazão Max. (m ³ /s)	Data
Q Obs.	3768	08/05/1983
7km	3842	08/05/1983
10km	3486	08/05/1983
20km	3560	07/05/1983
35km	3324	07/05/1983
40km	3229	07/05/1983
50km	3043	07/05/1983
70km	3165	07/05/1983
100km	3029	07/05/1983

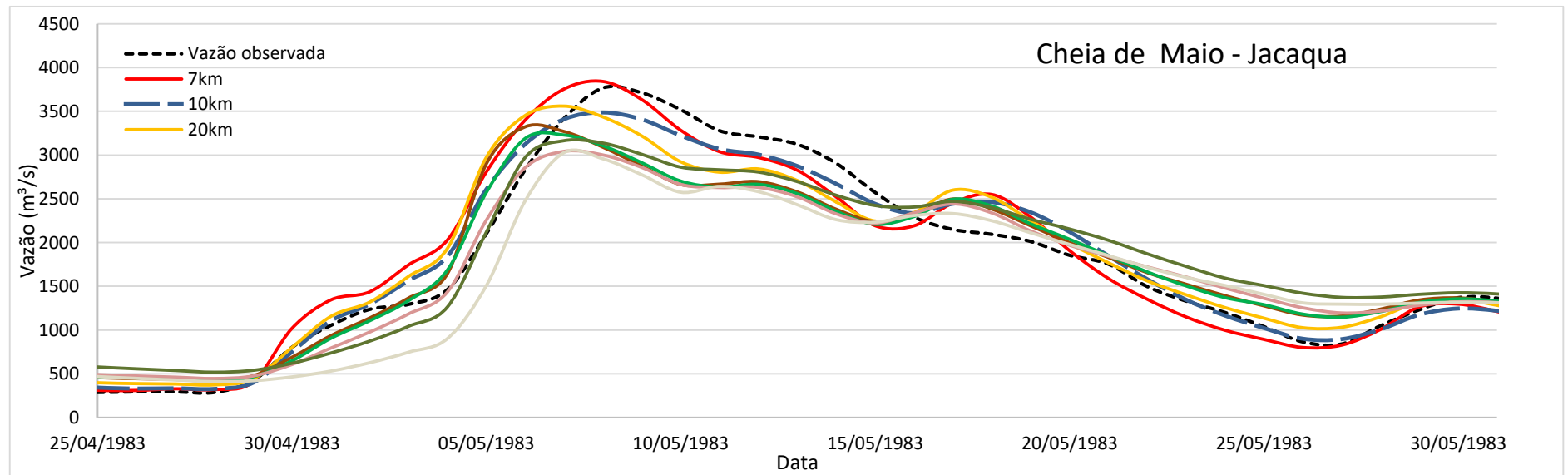


Figura 34. Hidrogramas observado e simulados para maio do ano de 1983 em Jacaqua (76500000)

6.2 PARÂMETROS IGUAIS

De modo a investigar se os resultados obtidos não estavam vinculados exclusivamente aos parâmetros utilizados, pois os mesmos foram definidos em uma pesquisa extensa das características das sub-bacias e utilizando-se da discretização recomendada por Fan *et al.* (2013), era esperado de certa forma que os melhores resultados, tratando-se da qualidade das métricas, fossem do modelo de referência. Sendo assim, fez-se uma média dos parâmetros do solo e foram aplicados igualmente para todas as 43 sub-bacias. De modo geral os resultados apresentaram queda nos valores das métricas, mas a tendência seguiu a mesma dos parâmetros iniciais. As tabelas com os resumos dos resultados (nas estações no rio principal) com todas as discretizações encontram-se no APÊNDICE B.

7 Conclusões

Com as modificações propostas na discretização espacial da bacia, mais especificamente nos tamanhos dos trechos de rio (dx) no processo de segmentação da rede de drenagem, foi possível verificar os efeitos das alterações nos quesitos da qualidade dos resultados (métricas de desempenho do MGB-IPH e representação de cheias) e nos tempos de simulação e do pré-processamento considerado.

O primeiro questionamento dos objetivos específicos, foi sobre o impacto do tamanho de trecho na calibração do MGB-IPH. Ficou constatado que, de modo geral, quanto menor o tamanho do trecho, mais discretizado ficou o modelo (maior número de minibacias) e apresentou os resultados de melhor qualidade, porém, com maior custo computacional

A melhora ou piora dos parâmetros de desempenho não foi grande de um trecho para seu subsequente, como, por exemplo, de 7km para 10km a maior diferença no coeficiente de eficiência *NashSutcliffe* (NSE) foi de 0,113 em Porto Lucena e para os demais postos no rio principal não ultrapassou de 0,007. Já o tempo de simulação apresentou grandes diferenças nas três menores discretizações, chegando a 1h 37min de 7km para 20km. Após 20km ocorreu pequena redução nos tempos, indo de 7min e 42s (20km) até 2min e 42s (100km). O tempo de pré-processamento não demonstrou ser muito influenciado pelo tamanho do trecho, obtendo-se uma variação máxima de apenas 2min e 45s entre o menor e o maior. Ressalta-se que o tempo de pré-processamento foi cronometrado apenas na etapa de geração do arquivo “mini.gtp”, e que possivelmente pode-se ter melhor estimativa da influência do tamanho do trecho nesse quesito, medindo o tempo de geração dos arquivos de cada passo do pré-processamento.

O impacto observado nas vazões foi de que quanto maior o tamanho do trecho, considerando de 7km até 40km, os resultados mostraram a tendência de aumentar as vazões baixas (Q_{90}) e reduzir as vazões máximas (Q_{max}) ou seja, vazões baixas superestimadas e os picos subestimados. De 50km até 100km não seguiu a tendência, apresentando oscilações nos valores das vazões. Nos hidrogramas, os trechos que mais se aproximaram dos hidrogramas e picos das cheias observadas foram, em ordem, 10km, 7km e 20km. Ficou constatado que quanto mais a jusante o posto fluviométrico (maior área de drenagem) mais adiantados foram os picos nos hidrogramas. Em Iraí (74100000), o mais a montante do rio Uruguai, foi o único que não apresentou defasagem nas vazões, em Porto Lucena (74800000) a antecipação foi de um dia, em Passo São Borja (75780000) passou para três dias. Em Uruguaiana (77150000) foi de dois dias, apesar de ser o posto mais a jusante e com maior área de drenagem, a antecipação no pico não foi maior que o posto a montante, possivelmente pela região ser muito plana o que acabou atenuando a velocidade de propagação da cheia. Na análise do posto afluente (76500000), com a menor área de drenagem dentre as estações, ficou constatado que a discretização de 10km apresentou os melhores resultados das métricas de eficiência.

O segundo questionamento foi em relação a existência de um tamanho de trecho(dx) ideal, que apresente os melhores resultados com menor tempo de simulação. Não foi constatado um comprimento de trecho que fornecesse os melhores resultados com menor tempo de simulação. Ainda, como análise mais completa sobre esse quesito teriam que ser considerados outros fatores como a resolução espacial dos postos pluviométricos, resolução do MDE/MNT utilizado e também simplificações na geometria hidráulica.

O terceiro questionamento foi referente ao benefício (se obteve-se ou não) ao utilizar um ajuste inicial dos parâmetros do solo em comparação com uma nova discretização. Nas comparações com a discretização inicial (10km), ao refinar mais o modelo obteve-se pequeno benefício e alto custo computacional, visto que a melhora nos parâmetros de eficiência foi pequena e o tempo de simulação elevado (aumentou em torno de 4 vezes). Já ao dobrar o tamanho do trecho para 20km apresentou redução do tempo de simulação aproximadamente de 27min (indo de 34min para 7min) com pequena queda na qualidade. A partir do trecho de 20km os tempos de simulação foram cada vez menores, porém a qualidade dos resultados também decaiu, não se mostrando ser vantajoso utilizar tamanhos de trechos a partir de 20km.

Por fim, recomenda-se que seja utilizado 20km na segmentação da rede de drenagem para a bacia do rio Uruguai, visto que diminuiu o tempo de simulação em torno de 4 vezes com pequena queda na qualidade das métricas, comparando com o trecho inicial (10km). Porém, o presente estudo visou investigar o efeito da discretização sem alterar os parâmetros do solo iniciais, e nas análises não se aprofundou em questões numéricas de difusão em função do tamanho do trecho (dx) ou em erros de fase e de amplitude. Também não considerou os resultados em bacias de cabeceira e discretizações menores que 7km, podendo influenciar na recomendação sobre o tamanho do trecho a ser utilizado.

8 Recomendações

Para trabalhos futuros dando continuidade a este estudo, tem-se as seguintes indicações:

- Testar modelo com cheias mais rápidas, em escala horária;
- Testar mesmas hipóteses em outras bacias, como bacias de cabeceira
- Avançar mais na compreensão parâmetros vs. escala do MGB
- Testar sensibilidade com outros MDEs.

9 Referências Bibliográficas

ALMEIDA, G. A., BATES, P., FREER, J. E. & SOUVIGNET, M. Improving The Stability Of A Simple Formulation Of The Shallow Water Equations For 2-D Flood Modeling. *Water Resources Research*, v. 48. 2012.

ALMEIDA, G. A. & BATES, P.,. Applicability Of The Local Inertial Approximation Of The Shallow Water Equations To Flood Modeling. *Water Resources Research*, v 49, pp. 4833-4844. 2013.

ALMEIDA, D. B.; KOEFENDER, A.; SOUZA, C. J. R.; MARCUZZO, F. F. N. Diagramas unifilares e mapeamento das estações F, FD, P, Pr e barramentos das sub-bacias 70 a 74 no Rio Uruguai. In: Simpósio dos Recursos Hídricos do Nordeste, 13., 2016, Aracaju. Anais... Aracaju: ABRH, 2016. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17189>>. Acesso em: 25 jun. 2019.

BATES, P. D., HORRIT, M. S. & FEWTRELL, T. J. A Simple Inertial Formulation Of The Shallow Water Equations For Efficient Two-Dimensional Flood Inundation Modelling. *Journal of Hydrology*, Volume 387, pp. 33-45. 2010

BEVEN, K. J. Rainfall-runoff modelling: the primer. John Wiley & Sons, 2 ed. 2011.

BUARQUE, D.C.; PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W. Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização em modelos hidrológicos. In: Simpósio Sul-Sudeste de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro (RJ), ABRH.

BUARQUE, D. C.; FAN, F. M.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. (2009). Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Porto Alegre, RS Vol. 14, n. 2 (abr./jun. 2009), p. 91-103.

BUARQUE, D. C. 2015. SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM GRANDES BACIAS: Estudo de caso do rio Madeira. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Porto Alegre, 182p.

BUREK, P., VAN DER KNIJFF, J., DE ROO, A., 2013. LISFLOOD Distributed Water Balance and Flood Simulation Model - Revised User Manual 2013, JRC Technical Reports. Joint Research Centre of the European Commission: Luxembourg: Publications Office of the European Union.

BRÊDA, J. P. L. F.; SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L. Extração de parâmetros físicos de bacias hidrográficas através da segmentação por trechos de mesmo comprimento com o IPH-Hydro Tools. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18. (SBSR), 2017, Santos. Anais... São José dos Campos: INPE, 2017.p. 4811 - 4818

CPRM, 2019. Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/sace/>>. Acesso em 26 jan. 2019

CESCO, S; CEOLIN, L. P. S. Políticas públicas e inundações do rio Uruguai no município de São Borja: o olhar dos atingidos e a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. *Rev. Bras. Ciênc. Polít.*, Brasília, n. 22, p. 285-328, Abr. 2017.

CIARAPICA, L.; TODINI, E. (2002). TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales. *Hydrological Processes*.

CHANSON, H. (2004). *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*. Butterworth-Heinemann, 2nd edition, Oxford, UK. 630 pages.

COLLISCHONN, W. et al. The MGB-IPH model for large scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, p. 878 a 895, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>>. Acesso em 25 set. 2018

ESRI, 2007. *Arc Hydro Tools version 1.2 for ArcGIS 9.2 Tutorial*. California.100p.

FAN, F. M., COLLISCHONN, W., PONTES, P. R., PAIVA, R. C. (2013). Avaliação da aplicabilidade de um modelo simplificado inercial para propagação de vazão em canais. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves - RS. *Anais XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.

FAN, F.M.; PONTES, P.R.M.; PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W. (2014). Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint Venant. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Submetido.

FAN, F. M. et al. Evaluation of upper Uruguay river basin (Brazil) operational flood forecasts. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Porto Alegre, v. 22, n. 37, 2017.

FINCK, J. S. Estudo preliminar de sistema de alerta para a parte brasileira da bacia do rio Uruguai utilizando modelo de previsão cota-cota. 2018. 104 f. TCC (Graduação) Curso de Engenharia Ambiental, UFRGS/IPH, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/179893>>. Acesso: 25 jun. 2019.

FINOTTI, A.R.; FINKLER, R.; SILVA, M.D.; CEMIN, G. Monitoramento de recursos hídricos em áreas urbanas. Caxias do Sul: EDUCS, 2009. 270 pp.

FLEISCHMANN, A. PAIVA, R. COLLISCHONN, W. Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. *Journal of Hydrology*. Volume 3, Abril de 2019.

GUIMARÃES, G. M. Análise de previsibilidade de cheias na bacia do rio Uruguai através do modelo MGB-IPH. 2018. 173 f. TCC (Graduação) Curso de Engenharia Ambiental, UFRGS/IPH, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/179900?locale-attribute=en>>. Acesso: 25 jun. 2019.

GUIMARÃES, G. M.; FAN, F. M.; MARCUZZO, F. F. N.; BUFFON, F. T.; GERMANO, A. de O. Com qual antecedência conseguimos prever cheias no rio Uruguai usando um modelo hidrológico de grande escala? In: Encontro Nacional de Desastres, 1., 2018, Porto Alegre. *Anais... Porto Alegre: ABRH, 2018*. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/19640>>. Acesso em: 25 jun. 2019.

GUIMARÃES, G. M.; FINCK, J. S.; MARCUZZO, F. F. N. Espacialização pluviométrica da precipitação média mensal na parte brasileira da Bacia do Rio Uruguai. In: congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, 29.; encontro técnico aesabesp, 28.; feira nacional de saneamento e meio ambiente, 28., 2017, São Paulo. *Anais eletrônicos... São Paulo: ABES; AESABESP, 2017*. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18201>>. Acesso em: 25 jun. 2019.

HORTON, R. E. 1939. *Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity*. Transactions American Geophysical Union, Washington.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Bases cartográficas contínuas, versão 2017. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc250/versao2017/shapefile/> Acesso em: 16 set. 2018.

LIU, Z.; MARTINA, M. L. V.; TODINI, E. (2005). Flood forecasting using a fully distributed model: application of the TOPKAPI model to the Upper Xixian Catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9. 347 – 364.

MAIDMENT, D.R. GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. *Environmental modeling with GIS*. New York, Oxford University Press, 1993.

MARCUZZO, F. F. N. Bacia hidrográfica do rio Uruguai: altimetria e áreas. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22., 2017, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ABRH, 2017. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18489>>. Acesso em: 25 jun. 2019.

MARCUZZO, F. F. N.; SOUZA, C. J. R.; ALMEIDA, D. B. Bacia hidrográfica internacional do rio Uruguai e consistência dos seus divisores de água na escala 1:3.000. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 48., 2016, Porto Alegre. Anais... São Paulo: SBG, 2016. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17127>>. Acesso em: 25 jun. 2019.

MELATI, M. D.; MARCUZZO, F. F. N.. Mapeamento fisiográfico básico das sub-bacias pertencentes à Bacia do Rio Uruguai. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 21., 2015, Brasília, DF. Anais... Brasília, DF: ABRH, 2015. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/15053>>. Acesso em: 25 jun. 2018.

MARTIN, P. H.; LEBOEUF, E. J.; DOBBINS, J. P.; DANIEL, E. B.; ABKOWITZ, M. D. Interfacing GIS with water resource models: A state-of-the-art review. *Journal of the American Water Resources Association*. December pp. 1471-1487, 2005.

McCARTHY, C. T. 1939. *The Unit Hydrograph and Flood Routing*. Providence: U. S. Corps of Engineers.

MILLER, W. A.; CUNGE, J. A. EM: MAHMOOD, K.; YEVJEVICH, V. (eds). (1975). *Unsteady flow in open channels*. Fort. Collins: Water Resources Publications. v.1, capítulo 5.

MULLER, Y. T.; ROLIM, F. E.; MARCUZZO, F. F. N. Ottocodificação e análise altimétrica e da precipitação pluviométrica da bacia hidrográfica do rio Pelotas na divisa entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *Geographia Meridionalis*, Pelotas, RS, v. 4, n. 02 Jul a dez., p. 227 245, 2018. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20640>>. Acesso em: 05 jun. 2019.

MULVANY, T.J. On the use of self-registering rain and flood gauges, in making observations of the relations of rain fall and of flood discharges in a given catchment. *Proc. Inst. Civ. Eng. (Irel.)*, v.4, pt.2, p. 18-33, 1850.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. 2011. *Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation - verion 2009*, Texas Water

Resources Institute Technical Report. Texas A&M University System: College Station, Texas, p. 618.

NOGUEIRA, R. F. Uso da codificação hidrográfica segundo o método de Otto Pfafstetter para análise hidrológica da bacia do Rio Paraopeba (MG). Departamento Geografia, UFMG. Monografia. Belo Horizonte, 2010. 63p.

OLIVERA, F., M. VALENZUELA, R. SRINIVASAN, J. CHOI, H. CHO, S. KOKA, and A. AGRAWAL. ArcGIS-SWAT: A geodata model and GIS interface for SWAT. *J. American Water Resour. Assoc.*42(2): 295-309, 2006.

PAIVA, R. C., COLLISCHONN, W. TUCCI, C. E. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. *Journal of Hydrology*, v. 406, pp. 170-181. 2011a.

PAZ, A.R.; BUARQUE, D.C.; COLLISCHONN, W.; VICTORIA, D.C.; ANDRADE, R.G. Discretização de modelos hidrológicos de grande escala: grade regular x minibacias. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), 2011, Maceió. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2011.

PEDROLLO, M. C. R.; SOTÉRIO, P. W.; GERMANO, A. O. Metodologia para definição de cotas de referência em sistemas de alerta e previsão hidrológica. In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS São Paulo

PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Conservação de volume em modelos simplificados de propagação de vazão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, p. 83-96, 2012.

PONTES, P.R.M.; COLLISCHONN, W. (2015). O modelo Muskingum-Cunge Todini em rios com planície de inundação. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 2, p.298-309.

PONTES, P. R. M. et al. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, pp. 888-904. 2015.

PONTES, P. R. M. 2011. Comparação de modelos hidrodinâmicos simplificados de propagação de vazão em rios e canais. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH).

PULS, L. G. 1928. Flood Regulation of the Tennessee River. House Document nº 185, 70th Congress, 1st Session. Washington, D. C

RENNÓ, C. D; SOARES, J. V. Discretização espacial de bacias hidrográficas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto,10, 2001. Anais... São José dos Campos: INPE, 2001, Foz do Iguaçu. p. 485 - 492.

QUIMPO, R. G.; McNALLY, T.A. (1983). Regionalized flow duration for Philippines. In: *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 109, nº 4, p. 320-330. Oct. 1983.

RIGHI, E.; ROBAINA, L. E. S. Enchentes do Rio Uruguai no Rio Grande do Sul Entre 1980 e 2005: Uma Análise Geográfica. *Sociedade & Natureza*, v. 22, n. 1, p. 35 – 54, 2010. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/sn/v22n1/04.pdf> >. Acesso em 09 set. 2018.

TODINI, E. (2007). Hydrological catchment modelling: Past, Present and Future. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11(1), 468-482.

TUCCI, C. E. M. (1998). Modelos hidrológicos, Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p

Tucci, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 679 p.2005.

SILANS, A. M. B. P.; ALMEIDA, C. N.; ALBUQUERQUE, D. J. S.; PAIVA, A. E. D. B. Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia Hidrográfica do rio do peixe - estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n. 3, p. 5-19, 2000. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=44&SUMARIO=642>> Acesso em 14 out. de 2018

SILVA, P. A. Classificação e codificação de bacias hidrográficas brasileiras segundo o método Pfafstetter, com uso de geoprocessamento. Encontro de Las Aguas, 2, 1999, Montevideo. Proceedings... Montevideo Uruguay: IICA, 1999.

SIQUEIRA, V.A.; FLEISCHMANN, A.S.; JARDIM, P.F.; FAN, F.M.; COLLISCHONN, W. 2016. IPHHydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 21, n.1. 274-287.

VIEIRA DA SILVA, R. C., MASCARENHAS, F. C. B, MIGUEZ, M. G. Hidraulica Fluvial. Volume I. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2003. 304 p.

VOGUEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. (1995). Flow duration curves. II: A review of applications in water resources planning. In: *Water Resources Bulletin*. Vol. 31, n° 6, p. 1029-1039. Dec., 1995.

YAMAZAKI, D.; DE ALMEIDA, G. A. M.; BATES, P. D. Improving computational efficiency in global river models by implementing the local inertial flow equation and a vectorbased river network map. *Water Resources*, v. 49, 2013.

WMO: WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Manual on Flood Forecasting and Warning. Geneva, n. 1072, 2011. 142 p.

10 Apêndice A – Gráficos das métricas de avaliação por estação

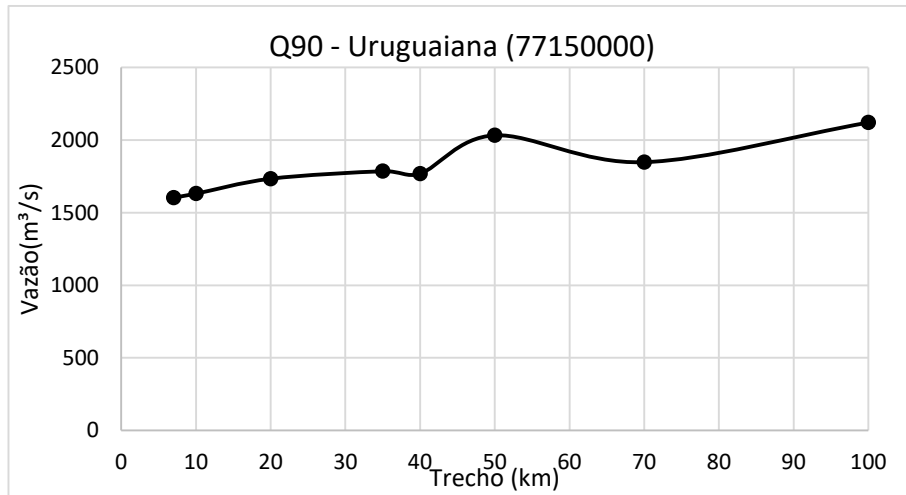


Figura 35. Q90 por trecho - Uruguiana (77150000)

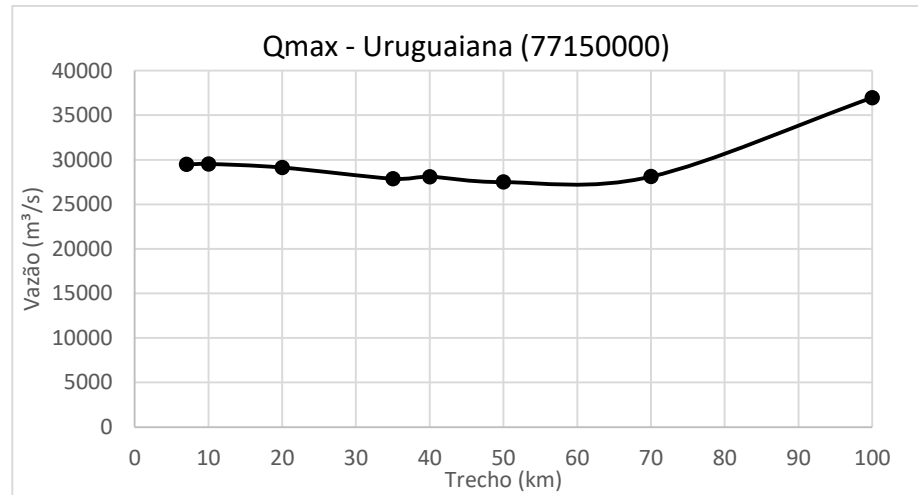


Figura 36. Vazão máxima por trecho - Uruguiana (77150000)

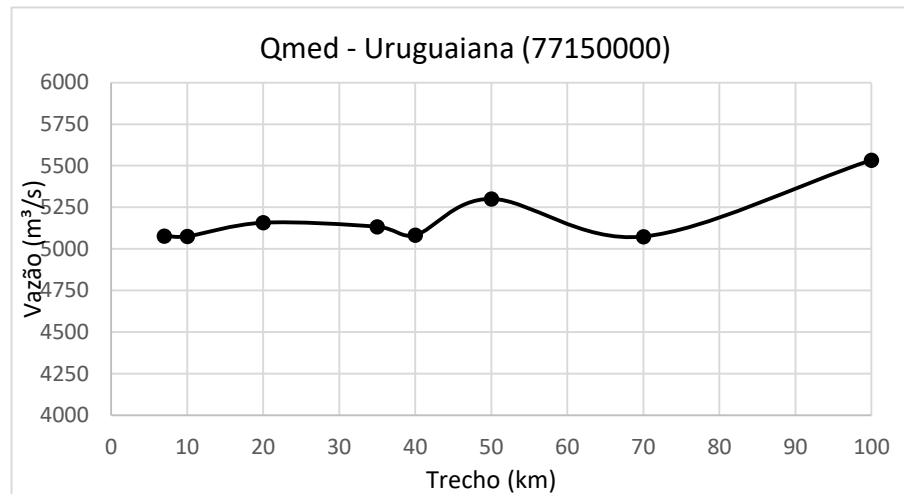


Figura 37. Vazão média por trecho - - Uruguiana (77150000)

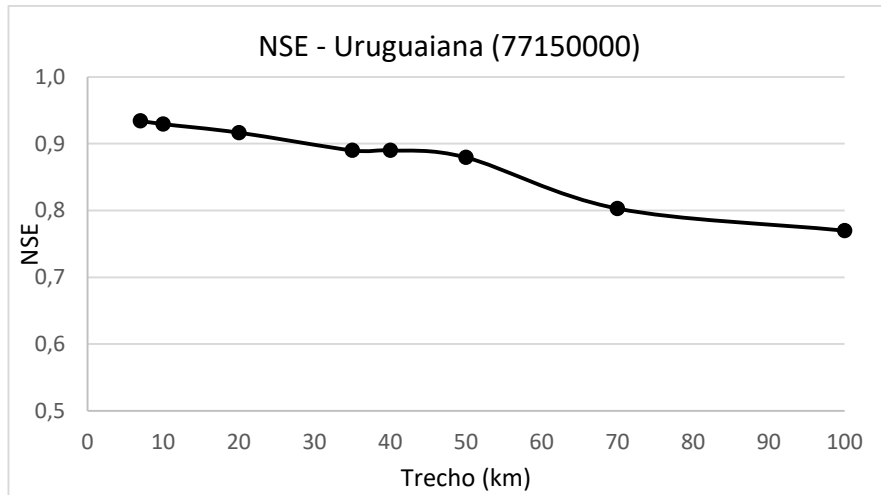


Figura 38. Índice *Nash-Sutcliffe* (NSE) por trecho - Uruguaiana (77150000)

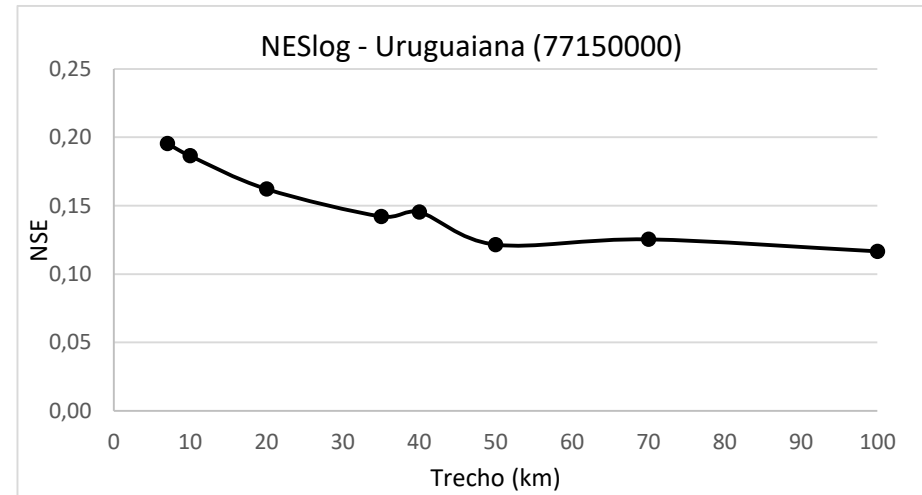


Figura 39. Índice *Nash-Sutcliffe* logarítmico (NSElog) por trecho - Uruguaiana (77150000)

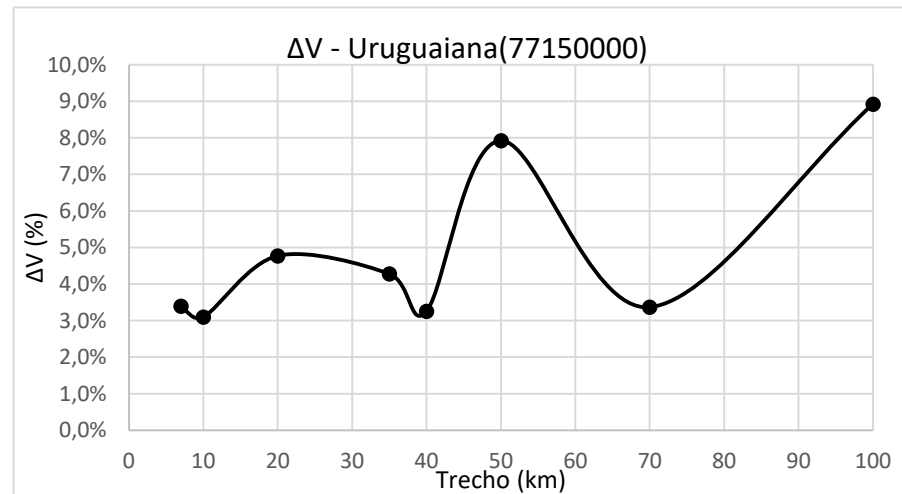


Figura 40. Diferença dos volumes observados e calculados - Uruguaiana (77150000)

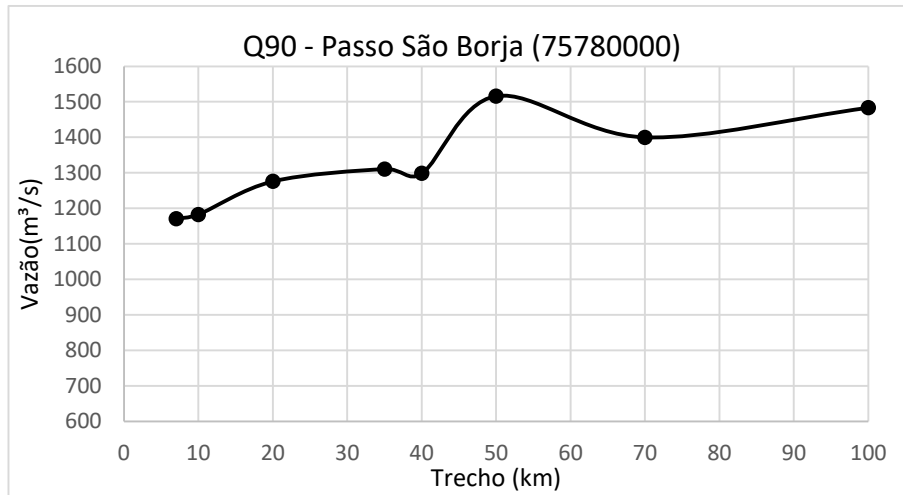


Figura 41. Q90 por trecho - Passo São Borja (75780000)

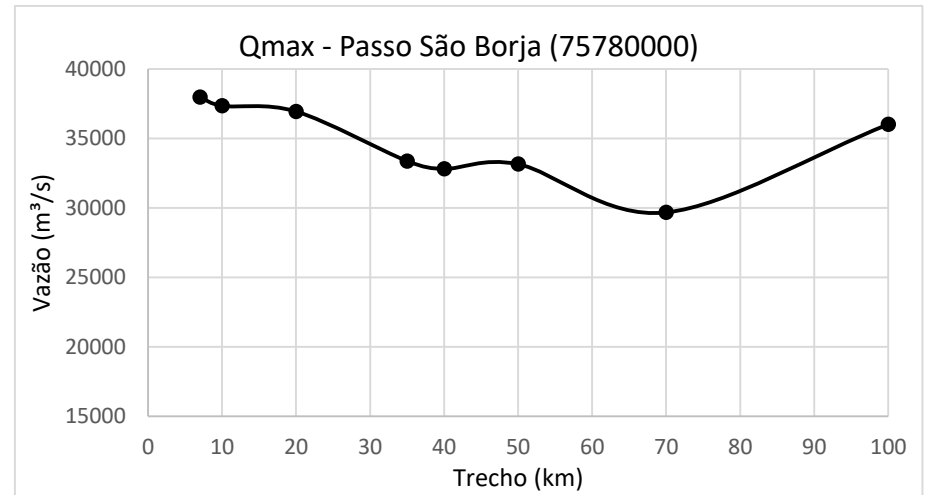


Figura 42. Vazão máxima por trecho - Passo São Borja (75780000)

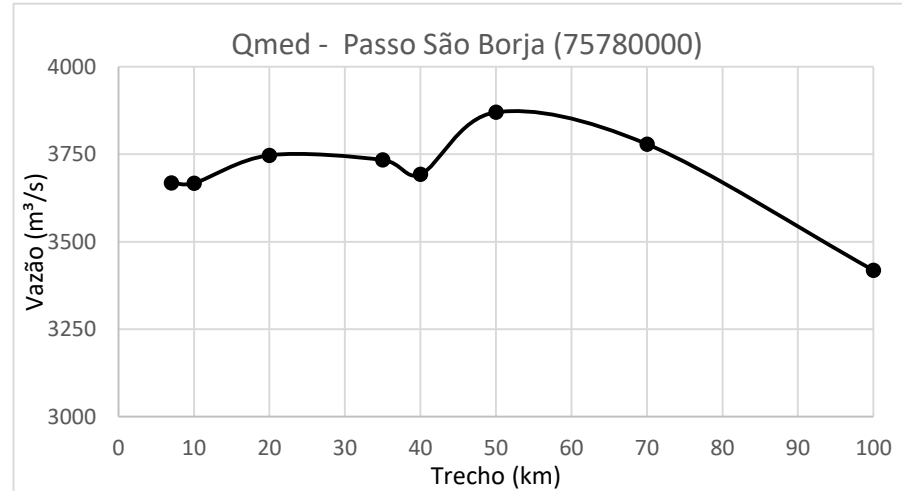


Figura 43. Vazão média por trecho - Passo São Borja (75780000)

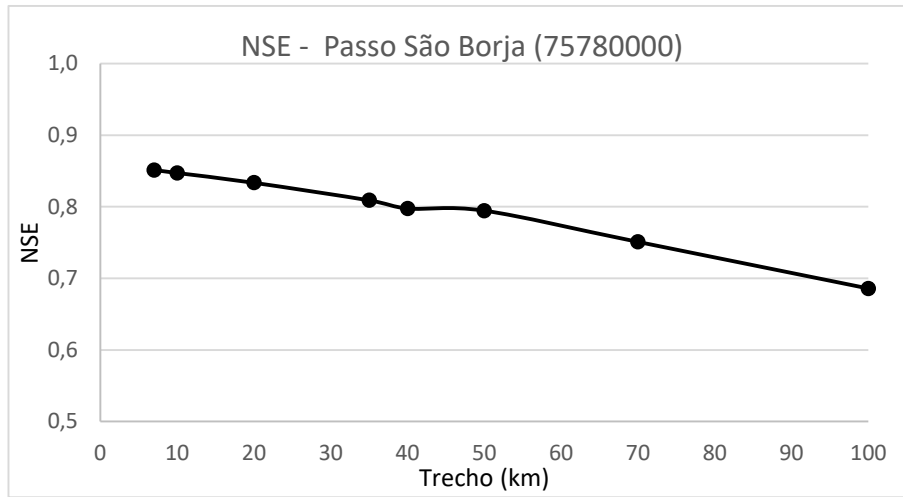


Figura 44. Índice *Nash-Sutcliffe* (NSE) por trecho -Passo São Borja (75780000)

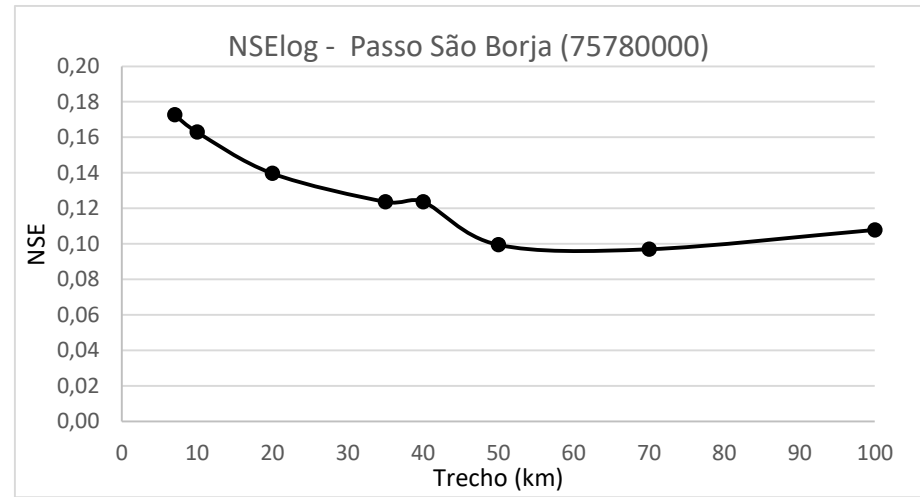


Figura 45. Índice *Nash-Sutcliffe* logaritmo (NSElog) por trecho Passo São Borja (75780000)

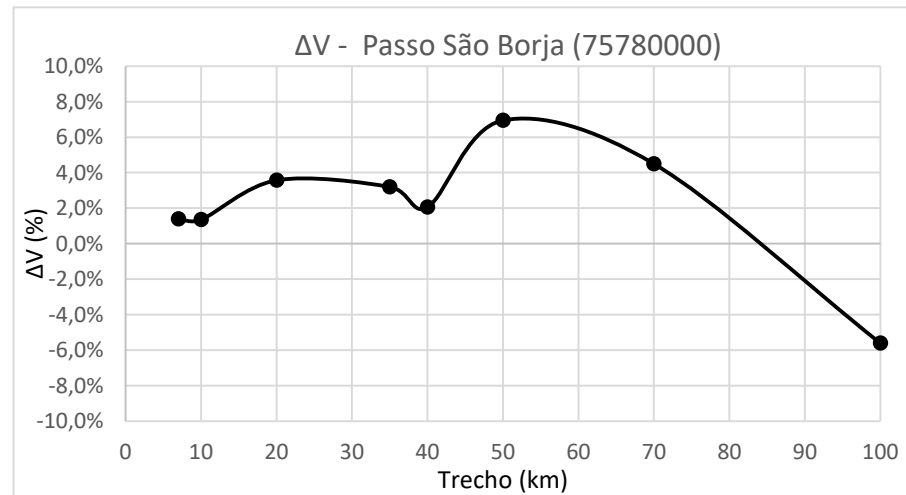


Figura 46. Diferença dos volumes observados e calculados - Passo São Borja (75780000)

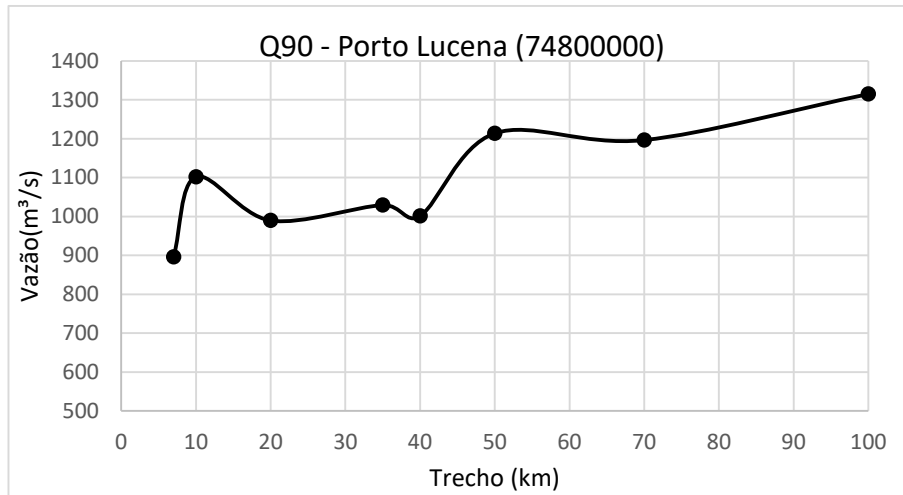


Figura 47. Q90 por trecho - Porto Lucena (74800000)

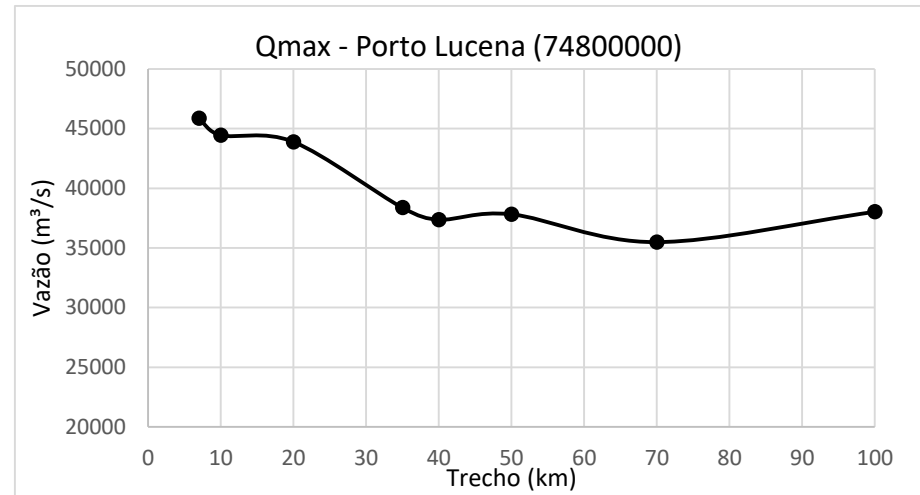


Figura 48. Vazão máxima por trecho - Porto Lucena (74800000)

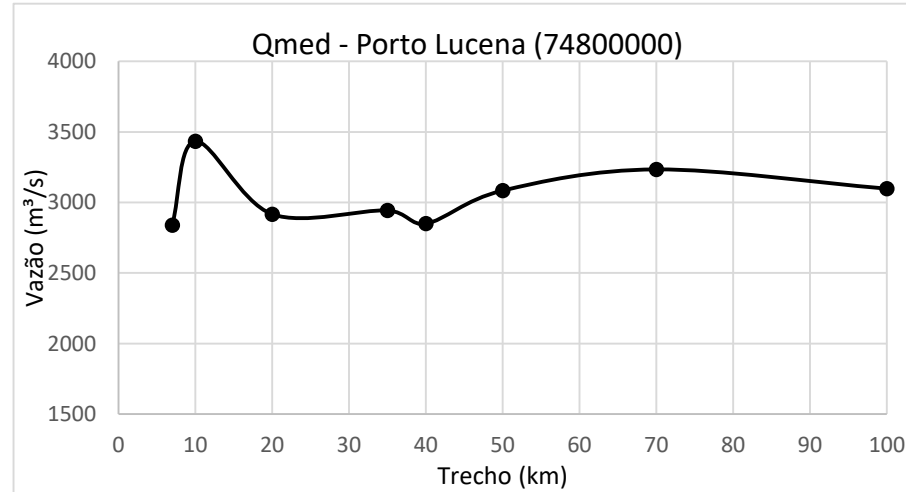


Figura 49. Vazão média por trecho - Porto Lucena (74800000)

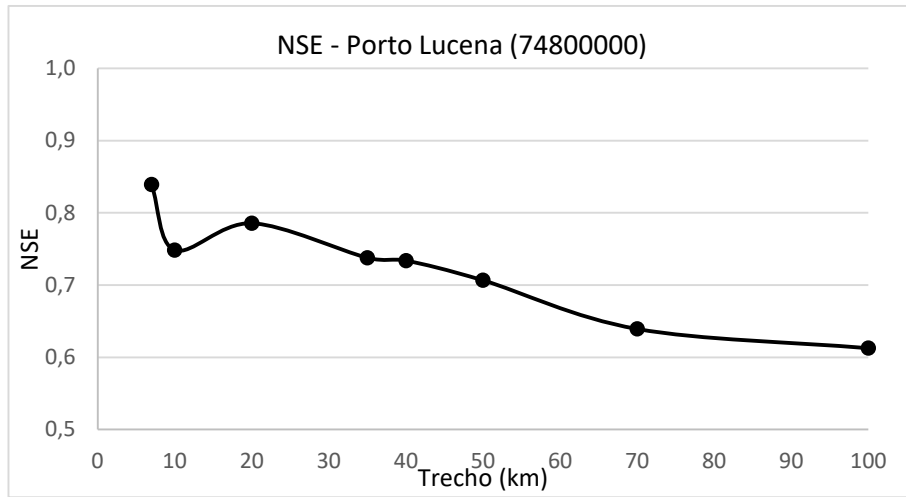


Figura 50. Índice *Nash-Sutcliffe* (NSE) por trecho -Porto Lucena (74800000)

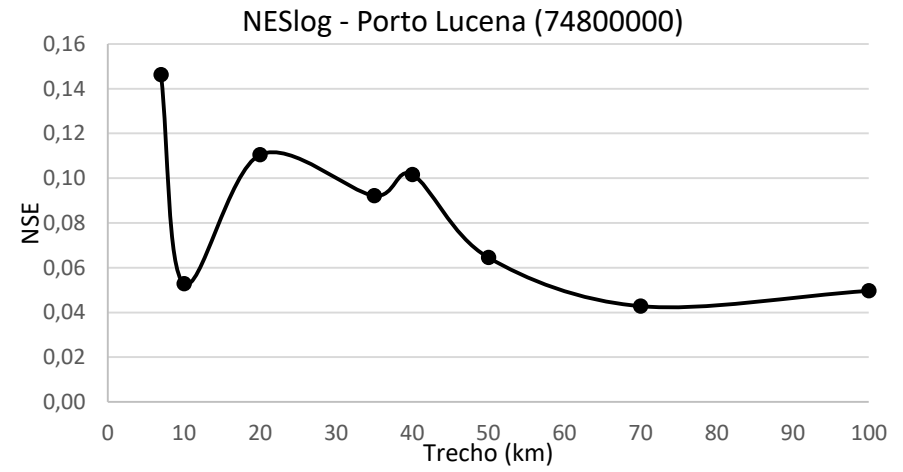


Figura 51. Índice *Nash-Sutcliffe* logarítimo (NSElog) por trecho -Porto Lucena (74800000)

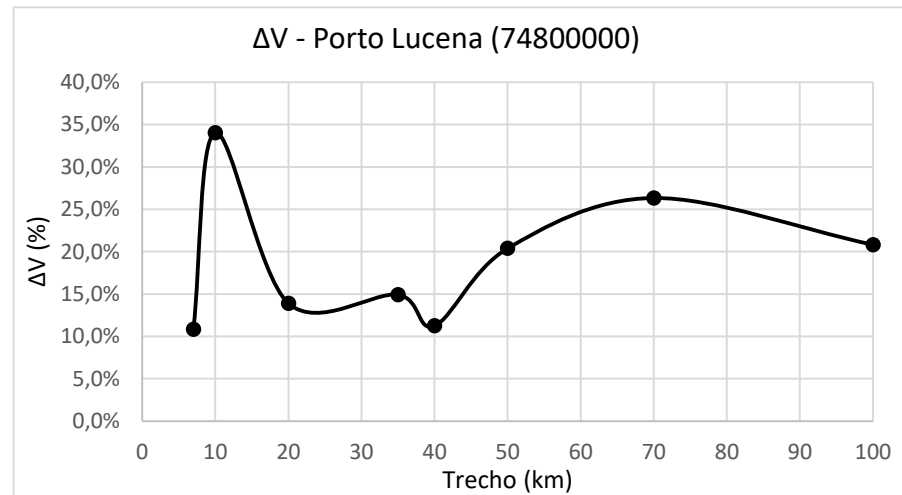


Figura 52. Diferença dos volumes observados e calculados por trecho - Porto Lucena (74800000)

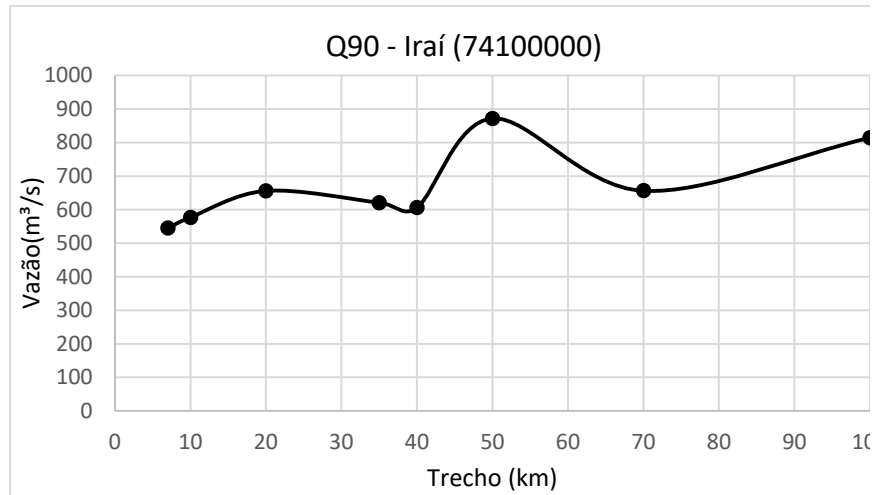


Figura 53. Q90 por trecho - Iraí (74100000)

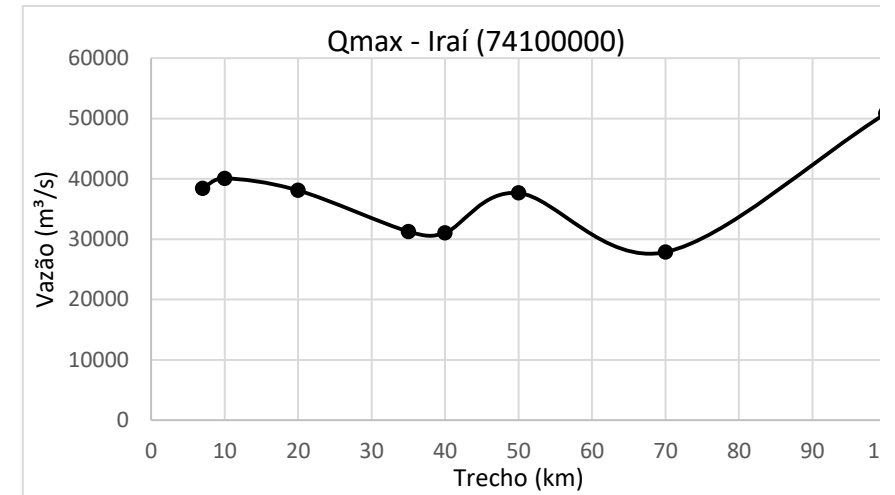


Figura 54. Vazão máxima por trecho - Iraí (74100000)

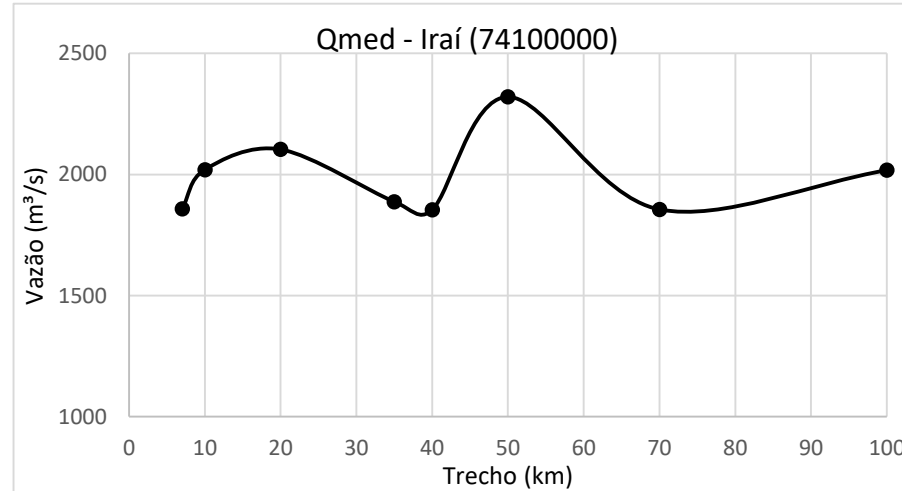


Figura 55. Vazão média por trecho - Iraí (74100000)

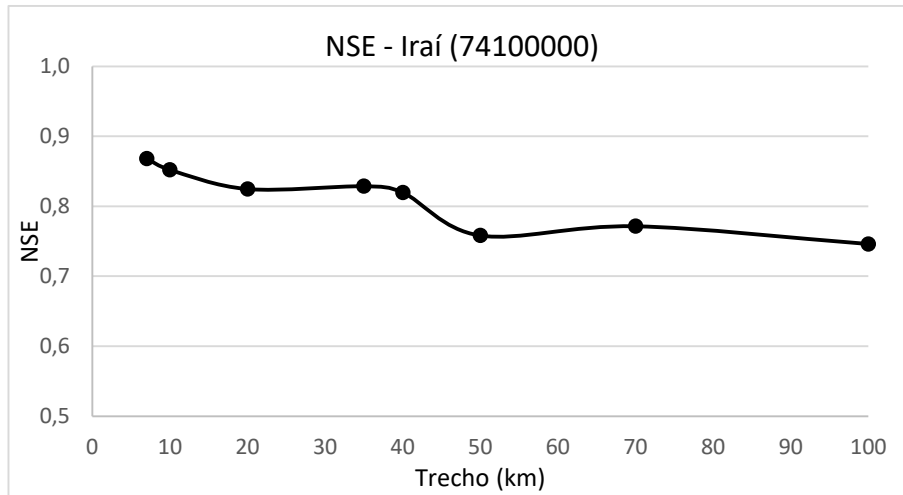


Figura 56. Índice *Nash-Sutcliffe* (NSE) por trecho - Iraí (74100000)

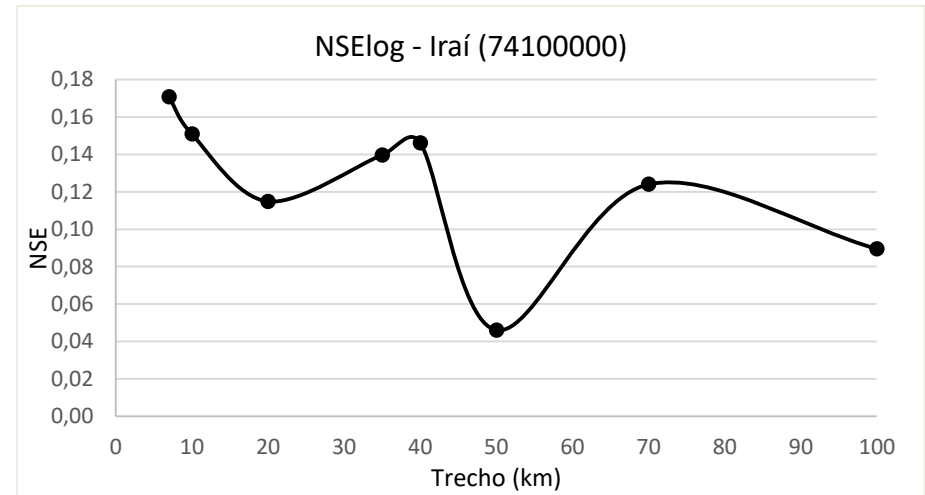


Figura 57. Índice *Nash-Sutcliffe* logaritmo (NSElog) por trecho - Iraí (74100000)

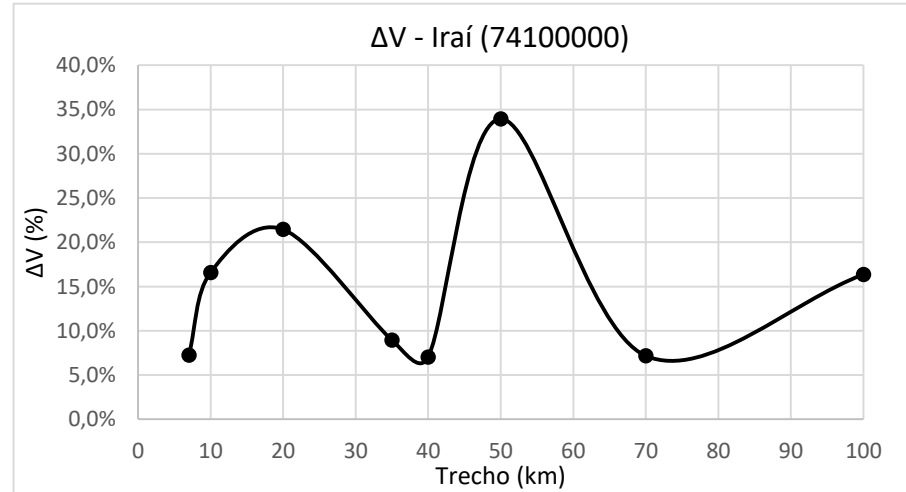


Figura 58. Diferença dos volumes observados e calculados por trecho - Iraí (74100000)

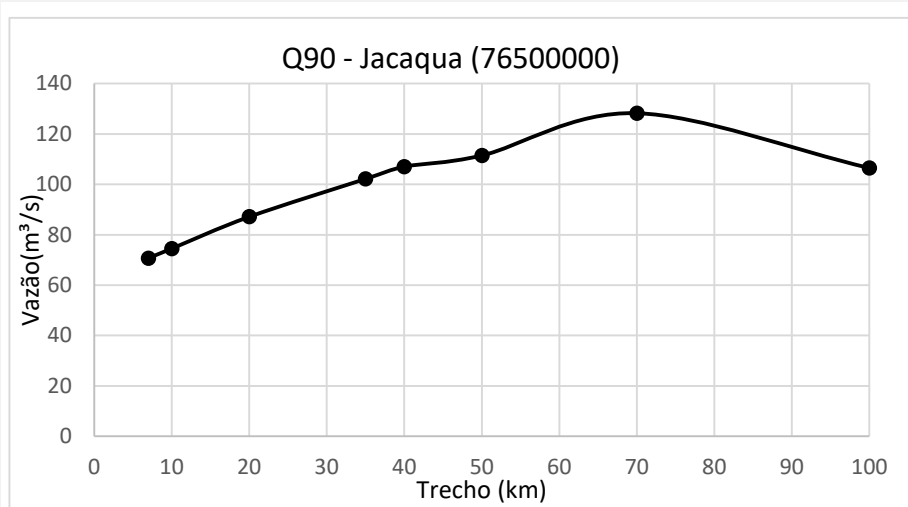


Figura 59. Q90 por trecho – Jacaqua (76500000)

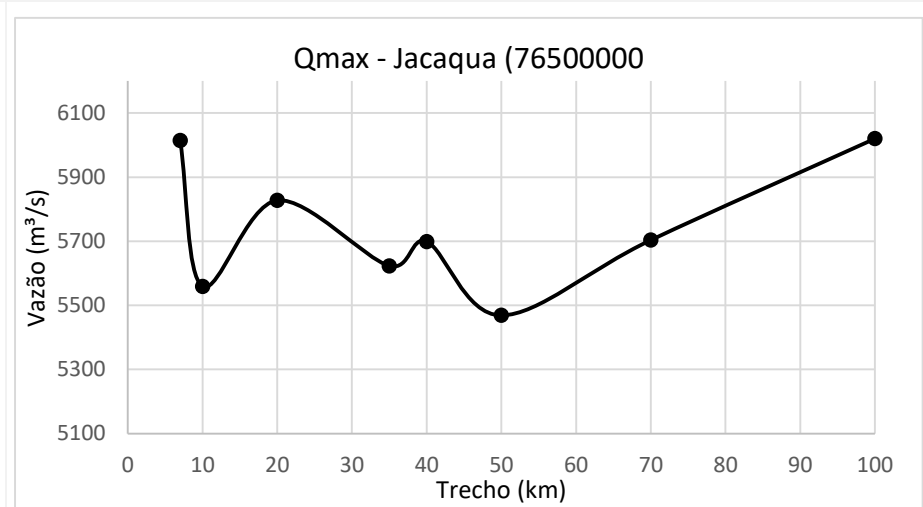


Figura 60. Qmax por trecho – Jacaqua (76500000)

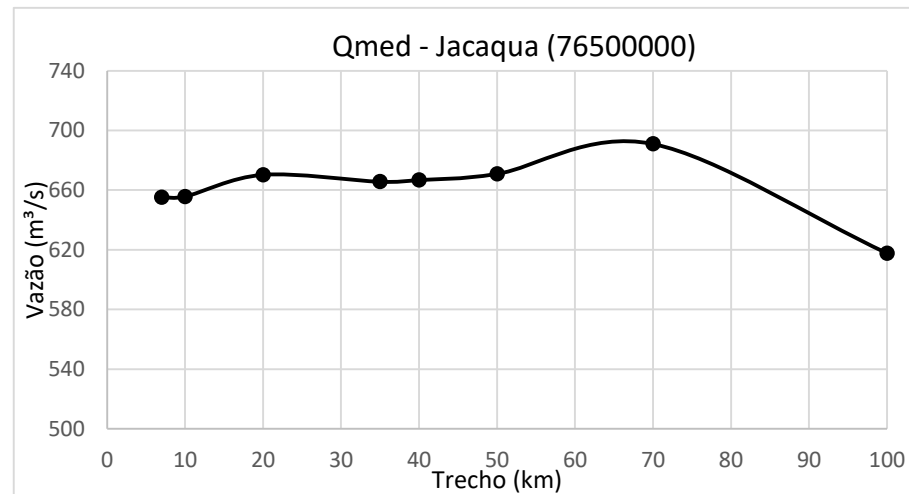


Figura 61. Qmed por trecho – Jacaqua (76500000)

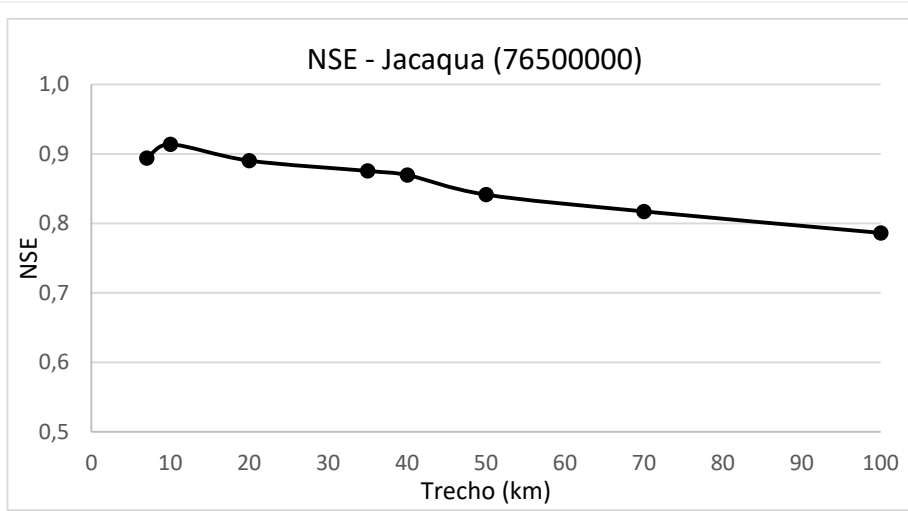


Figura 62. Índice Nash-Sutcliffe (NSE) por trecho – Jacaqua (76500000)

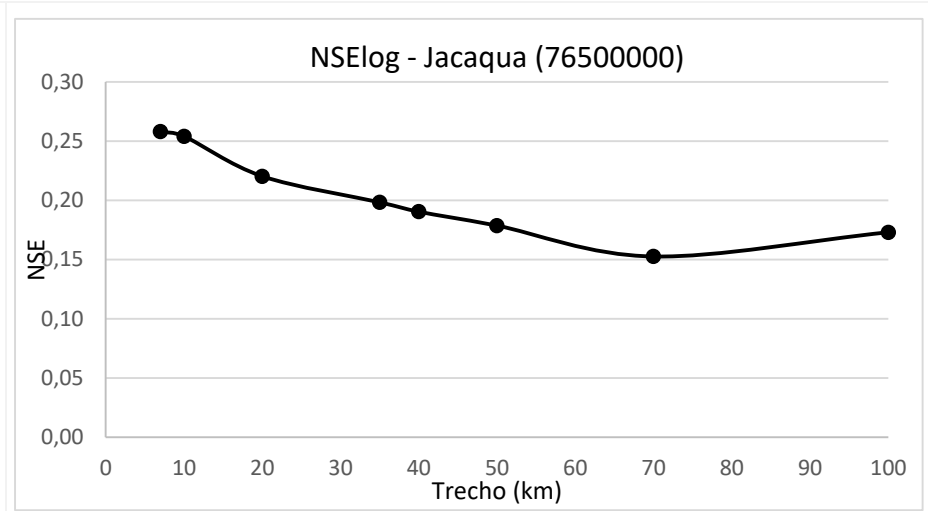


Figura 63. Índice Nash-Sutcliffe logaritmo (NSElog) por trecho - Jacaqua (76500000)

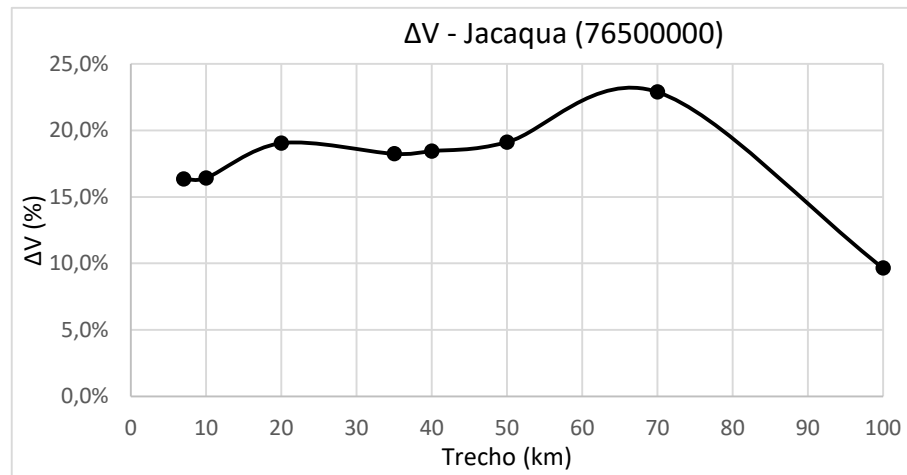


Figura 64. Diferença dos volumes observados e calculados por trecho - Jacaqua (76500000)

11 Apêndice B – Tabelas com resultados das simulações com parâmetros iguais para todas sub-bacias

Tabela 10. Resumos das simulações considerando os mesmos parâmetros para todas sub-bacias.

ESTAÇÕES	Tamanho do Trecho (km)	7	10	20	35	40	50	70	100
	Nº de minibacias	4847	3591	2194	1631	1557	1431	1321	1239
	Tempo Pré -pro	34min e 10s	33min e 40s	33min e 3s	32min e 47s	32min e 50s	32min e 5s	31min e 51s	31min e 25s
	Tempo Simulação	1h 10min e 13s	40min e 6s	7min e 52s	6min e 34s	6miin e 5s	4min e 59s	4min e 29s	4min e 15s
URUGUAIANA	NSE	0.929	0.922	0.917	0.867	0.890	0.855	0.784	0.706
	NESlog	0.189	0.179	0.162	0.131	0.145	0.111	0.115	0.098
	ΔV	2.90%	2.95%	4.77%	4.01%	3.26%	7.55%	2.99%	-4.25%
	Q90 (m³/s)	1574	1597	1734	1777	1769	2031	1849	1742
	Qmax (m³/s)	29267	29166	29129	27170	28097	26723	27184	33437
	Qmed (m³/s)	5059	5062	5158	5120	5083	5288	5061	4706
PASSO SÃO BORJA	NSE	0.864	0.854	0.833	0.797	0.784	0.779	0.728	0.682
	NESlog	0.173	0.162	0.135	0.118	0.119	0.093	0.091	0.100
	ΔV	1.70%	1.83%	4.06%	3.66%	2.55%	7.29%	5.01%	-3.56%
	Q90 (m³/s)	1119	1133	1233	1269	1259	1486	1371	1532
	Qmax (m³/s)	36086	35355	34588	30941	30611	30510	27780	33651
	Qmed (m³/s)	3683	3688	3769	3754	3714	3886	3801	3495
PORTO LUCENA	NSE	0.821	0.708	0.751	0.689	0.686	0.655	0.585	0.563
	NESlog	0.134	0.049	0.099	0.083	0.092	0.054	0.037	0.037
	ΔV	11.48%	34.97%	14.77%	15.83%	12.18%	21.25%	27.28%	23.96%
	Q90 (m³/s)	873	1055	978	1022	994	1213	1178	1367
	Qmax (m³/s)	41155	41231	37896	34107	33561	33419	32719	32273
	Qmed (m³/s)	2858	3461	2942	2970	2876	3110	3263	3181
IRAÍ	NSE	0.857	0.852	0.805	0.763	0.766	0.704	0.694	0.686
	NESlog	0.161	0.151	0.092	0.116	0.124	0.029	0.105	0.059
	ΔV	8.08%	16.59%	22.36%	10.17%	8.15%	34.75%	8.31%	20.96%
	Q90 (m³/s)	576	577	711	668	650	922	704	920
	Qmax (m³/s)	31938	40078	29181	26611	27418	27092	23989	26659
	Qmed (m³/s)	1875	2020	2121	1911	1876	2337	1878	2099

Tabela 11. Resumo das comparações realizadas com a discretização inicial (10km) considerando os mesmos parâmetros para todas as sub-bacias

ESTAÇÕES	Tamanho do Trecho(km)	10	7	20	35	40	50	70	100
	N° de minibacias	3591	1256	-1397	-1960	-2034	-2160	-2270	-2352
	Tempo Pré -pro	33min 40s	+30s	-10s	-53s	-53s	-1min e 35s	-1min e 49s	-2min e 15s
	Tempo Simulação	40min e 6s	+30min e 7s	-32min e 14s	-33min e 32s	-34min e 1seg	-35min e 7s	-35min e 37s	-35min e 57s
URUGUAINA	NSE	0.922	0.007	-0.005	-0.054	-0.032	-0.067	-0.138	-0.216
	NESlog	0.179	0.010	-0.017	-0.048	-0.034	-0.068	-0.064	-0.080
	ΔV	2.95%	-0.05%	1.82%	1.06%	0.31%	4.61%	0.04%	-7.20%
	Q90 (m ³ /s)	1597	-23	137	181	173	434	253	146
	Qmax (m ³ /s)	29166	101	-36	-1996	-1069	-2442	-1981	4271
	Qmed (m ³ /s)	5062	-3	96	58	22	226	-1	-356
PASSO SÃO BORJA	NSE	0.854	0.01	-0.022	-0.058	-0.070	-0.076	-0.127	-0.173
	NESlog	0.162	0.01	-0.027	-0.044	-0.043	-0.069	-0.071	-0.062
	ΔV	1.83%	-0.13%	2.23%	1.83%	0.72%	5.46%	3.18%	-5.39%
	Q90 (m ³ /s)	1133	-13	101	137	126	353	239	399
	Qmax (m ³ /s)	35355	732	-767	-4413	-4744	-4844	-7575	-1704
	Qmed (m ³ /s)	3688	-5	80	66	25	198	113	-193
PORTO LUCENA	NSE	0.708	0.113	0.042	-0.019	-0.022	-0.054	-0.124	-0.145
	NESlog	0.049	0.085	0.051	0.034	0.044	0.005	-0.012	-0.012
	ΔV	34.97%	-23.50%	-20.20%	-19.14%	-22.79%	-13.72%	-7.69%	-11.02%
	Q90 (m ³ /s)	1055	-182	-77	-33	-61	158	123	311
	Qmax (m ³ /s)	41231	-75	-3334	-7123	-7670	-7812	-8511	-8957
	Qmed (m ³ /s)	3461	-603	-519	-491	-585	-351	-199	-280
IRAÍ	NSE	0.852	0.005	-0.047	-0.089	-0.086	-0.148	-0.158	-0.166
	NESlog	0.151	0.010	-0.059	-0.035	-0.027	-0.122	-0.046	-0.092
	ΔV	16.59%	-8.51%	5.77%	-6.42%	-8.44%	18.16%	-8.28%	4.37%
	Q90 (m ³ /s)	577	-1	134	91	73	345	127	343
	Qmax (m ³ /s)	40078	-8140	-10897	-13467	-12660	-12985	-16088	-13418
	Qmed (m ³ /s)	2020	-145	2121	1910	1875	2336	1877	2098

12 Anexo A – Lista dos Postos Climatológicos Utilizados

Quadro 3. Estações climatológicas utilizadas

ID	Código	Nome	Lat (Dec)	Long (Dec)
1	83826	Foz do Iguaçu	-25.55	-54.57
2	83858	Xanxerê	-26.85	-52.40
3	83860	Palmas	-26.48	-51.98
4	83864	Porto União	-26.23	-51.07
5	83865	Irineópolis	-26.25	-50.80
6	83867	Rio Negro	-26.10	-49.80
7	83872	Indaial	-26.90	-49.22
8	83880	Palmeira das Missões	-27.88	-53.43
9	83881	Iraí	-27.18	-53.23
10	83883	Chapecó	-27.12	-52.62
11	83885	Marcelino Ramos	-27.45	-51.90
12	83887	Campos Novos	-27.38	-51.20
13	83891	Lages	-27.82	-50.33
14	83897	Florianópolis	-27.58	-48.57
15	83898	Camboriú	-27.00	-48.63
16	83907	São Luiz Gonzaga	-28.40	-55.02
17	83909	Santo Ângelo	-28.30	-54.25
18	83912	Cruz Alta	-28.63	-53.60
19	83914	Passo Fundo	-28.22	-52.40
20	83915	Guaporé	-28.92	-51.90
21	83916	Lagoa Vermelha	-28.22	-51.50
22	83918	Vacaria	-28.55	-50.70
23	83919	Bom Jesus	-28.67	-50.43
24	83920	São Joaquim	-28.30	-49.93
25	83921	Araranguá	-28.88	-49.52
26	83922	Orleans	-28.33	-49.33
27	83923	Urussanga	-28.52	-49.32
28	83924	Laguna	-28.48	-48.80
29	83927	Uruguaiana	-29.75	-57.08
30	83929	Itaqui	-29.12	-56.53
31	83931	Alegrete	-29.68	-55.52
32	83936	Santa Maria	-29.70	-53.70
33	83953	Santana do Livramento	-30.83	-55.60
34	83957	São Gabriel	-30.33	-54.32
35	83980	Bagé	-31.33	-54.10

13 Anexo B– Lista das Estações Pluviométricas Utilizadas

Quadro 4. Estações pluviométricas utilizadas

ID	Código	Nome	Lat(Dec)	Long (Dec)
1	2851050	Capão do Cedro	-28.09	-51.54
2	2751006	Paim Filho	-27.71	-51.74
3	2751017	Clemente Argolo	-28.01	-51.45
4	2853034	Panambi	-28.34	-53.54
5	2652045	Prainha do Ouro Verde	-26.76	-52.33
6	2750008	Passo Caru	-27.54	-50.86
7	2750007	Painel	-27.92	-50.10
8	2750020	São José do Cerrito	-27.66	-50.58
9	2753014	Liberato Salzano	-27.60	-53.07
10	2849035	Silveira	-28.63	-49.93
11	2955017	São João	-29.83	-55.34
12	2651052	Salto Veloso	-26.91	-51.41
13	2751022	Irakitan	-27.15	-51.04
14	2750003	Encruzilhada II	-27.51	-50.11
15	2853003	Conceição	-28.46	-53.97
16	2755001	Porto Lucena	-27.85	-55.02
17	2651040	Ponte Serrada	-26.91	-51.97
18	2653001	Campo Ere - EMPASC	-26.46	-53.08
19	2752017	Itatiba do Sul	-27.39	-52.45
20	2852007	Colônia Xadrez	-28.19	-52.75
21	2754014	São Martinho	-27.70	-53.97
22	2651022	Santo Agostinho	-26.61	-51.88
23	2653029	Paraíso	-26.62	-53.68
24	2751007	Sananduva	-27.98	-51.78
25	2750009	Passo Marombas	-27.33	-50.75
26	2751018	Marcelino Ramos	-27.46	-51.90
27	2752006	Erebango	-27.85	-52.30
28	2754001	Alto Uruguai	-27.30	-54.14
29	2751025	Pinhal da Serra	-27.89	-51.18
30	2853035	Nova Ramada	-28.07	-53.68
31	2653030	Raigão Alto	-26.94	-53.71
32	2651036	Quilômetro 30	-26.78	-51.26
33	2652002	Marata	-26.58	-52.64
34	2751012	Capinzal	-27.34	-51.61
35	2653004	Ponte do Sargento	-26.68	-53.29
36	2754009	Tucunduva	-27.67	-54.46
37	2751011	Irani	-27.05	-51.91
38	2754015	Porto Mauá	-27.59	-54.66
39	2650032	Santa Cecília	-26.97	-50.42
40	2754010	Esquina Araujo	-27.97	-54.12

Continuação Quadro 5. Estações pluviométricas utilizadas

ID	Código	Nome	Lat(Dec)	Long (Dec)
41	2957008	Cabanha Alceu Neves	-29.85	-57.11
42	2853033	Santa Barbara do Sul	-28.39	-53.26
43	2653007	Saudades	-26.93	-53.01
44	2653002	Dionísio Cerqueira	-26.27	-53.63
45	2749009	Rio Bonito	-27.70	-49.85
46	2749035	Bocaina do Sul	-27.75	-49.95
47	2749031	Vila Canoas	-27.80	-49.78
48	2849009	Bom Jardim da Serra	-28.34	-49.62
49	2849023	Despraiado	-28.37	-49.81
50	2854005	Passo Major Zeferino	-28.73	-54.65
51	2852006	Carazinho	-28.29	-52.72
52	2854006	Passo Viola	-28.21	-54.60
53	2854012	Coimbra	-28.79	-54.45
54	2753026	Planalto	-27.31	-53.05
55	2850019	Bossoroca	-28.70	-54.92
56	2854018	Jóia	-28.65	-54.11
57	2652001	Bonito	-26.95	-52.18
58	2652021	Jardinópolis	-26.74	-52.90
59	2753013	Iporã	-27.00	-53.53
60	2753016	Miraguai	-27.50	-53.69
61	2854001	Boa Vista	-28.11	-53.99
62	2855001	Garruchos	-28.19	-55.64
63	2851043	Esmeralda	-28.06	-51.19
64	2653003	Modelo	-26.78	-53.05
65	2750001	Campo Belo do Sul	-27.90	-50.75
66	2750010	Ponte Alta do Norte	-27.16	-50.47
67	2750011	Ponte Alta do Sul	-27.48	-50.39
68	2753019	Iraí	-27.19	-53.25
69	2750022	Ponte Alta do Norte - CIFSUL	-27.12	-50.46
70	2753004	Linha Cescon	-27.81	-53.03
71	3056010	Olho D'Água	-30.00	-56.48
72	2855007	Santo Antônio das Missões	-28.49	-55.23
73	2855008	Itacumbi	-28.77	-55.26
74	2650019	Lebon Régis	-26.90	-50.66
75	2653013	Palma Sola	-26.35	-53.27
76	2753024	Barra do Guarita	-27.20	-53.73
77	2652031	São Lourenço do Oeste	-26.40	-52.90
78	2753006	Palmitos	-27.06	-53.16
79	2751015	Barracão	-27.68	-51.45
80	2856007	Cunha	-28.90	-56.09
81	2955008	Manoel Viana	-29.59	-55.49

Continuação Quadro 5. Estações pluviométricas utilizadas

ID	Código	Nome	Lat(Dec)	Long (Dec)
82	3054007	Rosário do Sul	-30.25	-54.92
83	3054016	Granja Umbu	-30.51	-54.77
84	3055007	São Carlos	-30.20	-55.49
85	2653005	São José do Cedro	-26.47	-53.45
86	2753025	Campo Novo	-27.69	-53.80
87	2652034	Porto Faé Novo	-26.82	-52.74
88	2752005	Concórdia	-27.31	-51.99
89	2753015	Palmeira das Missões	-27.91	-53.31
90	2850004	Coxilha Rica	-28.15	-50.44
91	2854003	Girua	-28.05	-54.36
92	3054002	Dom Pedrito	-30.98	-54.68
93	2855012	Samburá	-28.41	-55.61
94	2750012	Ponte do Rio Antinhas	-27.35	-50.44
95	2751021	Jaborá	-27.17	-51.74
96	2856006	Passo São Borja	-28.67	-55.98
97	2855004	Passo do Novo	-28.68	-55.58
98	2855005	Fazenda Santa Cecília do Butui	-28.99	-55.67
99	2754013	Campina das Missões	-27.99	-54.83
100	2751004	Joaçaba	-27.17	-51.50
101	2752021	Gaurama	-27.59	-52.09
102	3054021	Cerro Batovi	-30.56	-54.45
103	2849021	Urubici	-28.01	-49.59
104	2954007	Jaguari	-29.51	-54.68
105	2954033	Bom Retiro	-29.99	-54.49
106	2954005	Furnas do Segredo	-29.36	-54.50
107	2652000	Abelardo Luz	-26.56	-52.33
108	2850006	Invernada Velha	-28.45	-50.30
109	3054019	Ibaré	-30.77	-54.22
110	2853023	Condor	-28.23	-53.47
111	2956006	Passo Mariano Pinto	-29.31	-56.06
112	2955014	Passo da Cachoeira	-29.31	-55.71
113	2955002	Cachoeira Santa Cecília	-29.20	-55.48
114	2956005	Itaqui	-29.13	-56.56
115	2751001	Anita Garibaldi	-27.69	-51.13
116	2853028	Anderson Clayton	-28.66	-53.61
117	2955006	Ponte do Miracatu	-29.46	-55.29
118	2954019	Quevedos	-29.35	-54.07
119	2852046	Itapejara	-28.06	-52.00
120	2954001	Cacequi	-29.88	-54.83
121	2956008	João Arregui	-29.47	-56.67
122	2956007	Plano Alto	-29.77	-56.52
123	3055004	Saica	-30.03	-55.09

Continuação Quadro 5. Estações pluviométricas utilizadas

ID	Código	Nome	Lat(Dec)	Long (Dec)
124	2955007	Unistalda	-29.05	-55.15
125	3056004	Fazenda Junco	-30.02	-56.82
126	2954031	Esquina dos Lima	-29.05	-54.57
127	3057002	Barra do Quaraí	-30.21	-57.55
128	3154006	Estância do Espantoso	-31.53	-54.29
129	3154003	Torquato Severo	-31.03	-54.18
130	3155001	Três Venda	-31.28	-55.04
131	3154008	Serrilhada	-31.44	-54.71
132	3154010	Fazenda São Jorge	-31.45	-54.13
133	3055003	Fazenda Encerra	-30.70	-55.97
134	3055011	Alto Quaraí	-30.75	-55.95
135	3055005	Santa Rita	-30.52	-55.13
136	3055009	BR-293	-30.79	-55.18
137	3056007	Caty	-30.53	-56.17
138	2853026	Chapada	-28.06	-53.07
139	2854013	São Bernardo	-28.91	-54.07
140	2853010	Passo Faxinal	-28.29	-53.78
141	2955016	Jacaqua	-29.69	-55.20
142	2954020	Santiago	-29.19	-54.86
143	2955013	Alegrete	-29.78	-55.77
144	2954030	Florida	-29.25	-54.60
145	2954004	Ernesto Alves	-29.37	-54.74
146	2956009	Fazenda Três Capões	-29.64	-56.09
147	3056006	Harmonia	-30.07	-56.17
148	2651001	Campina da Alegria	-26.87	-51.80
149	2853040	Mauá	-28.18	-53.86
150	2855002	Passo do Sarmento	-28.21	-55.32
151	3056003	Quaraí	-30.38	-56.48
152	3055008	Passo da Guarda	-30.29	-55.98
153	2954032	Ponte Toropi II	-29.65	-54.43
154	2753002	Frederico Westphalen	-27.35	-53.40
155	2753007	Santo Augusto	-27.85	-53.77
156	2753009	Três Passos	-27.37	-53.75
157	2754007	Três de Maio	-27.78	-54.23
158	2851020	Passo das Pedras	-28.25	-51.85

14 Anexo C– Lista da Estações Fluviométricas Utilizadas

Quadro 5. Estações fluviométricas utilizadas

ID	Código	Nome	Lat (Dec)	Long (Dec)	Lat (Geo)	Long (Geo)	AreaDrenag ANA (km ²)	Altitude ANA (m)	Tipo
1	Despraiado	70100000	-28.3694	-49.8025	-28° 22' 9.84"	-49° 48' 9.00"	533	1080	FDQ
2	Invernada Velha	70200000	-28.4394	-50.3019	-28° 26' 21.84"	-50° 18' 6.84"	2820	850	FrDSQ
3	Fazenda Mineira	70300000	-28.0900	-50.0611	- 28° 5' 24.00"	- 50° 3' 39.96"	1170	1000	FDQ
4	Coxilha Rica	70500000	-28.1614	-50.4428	- 28° 9' 41.04"	- 50° 26' 34.08"	550	930	FDQ
5	Vila Canoas	71200000	-27.8039	-49.7792	-27° 48' 10.08"	-49° 46' 42.96"	1010	900	FDQT
6	Ponte do Rio João Paulo	71250000	-27.8297	-49.6269	- 27° 49' 46.92"	-49° 37' 36.84"	489	900	FDQ
7	Rio Bonito	71300000	-27.7022	-49.8400	-27° 42' 7.92"	-49° 50' 24.00"	2000	900	FSQ
8	Encruzilhada II	71350001	-27.5078	-50.1128	-27° 30' 28.08"	-50° 6' 46.08"	3230	800	FDQ,
9	Ponte Alta do Sul	71383000	-27.4858	-50.3917	-27° 29' 8.88"	- 50° 23' 30.12"	4610	880	FSQ
10	Passo Marombas	71498000	-27.3339	-50.7539	-27° 20' 2.04"	- 50° 45' 14.04"	3680	829	FDQ
11	Passo do Granzotto	72430000	-27.8786	-51.7547	-27° 52' 42.96"	- 51° 45' 16.92"	1620	600	F
12	Passo Santa Tereza	72630000	-27.7067	-51.8853	-27° 42' 24.12"	- 51° 53' 7.08"	2800	400	FS
13	Passo Colombelli	72680000	-27.5619	-51.8578	- 27° 33' 42.84"	- 51° 51' 28.08"	3660	400	FDQ
14	Rio das Antas	72715000	-26.8958	-51.0756	-26° 53' 44.88"	-51° 4' 32.16"	801	840	F
15	Tangará	72810000	-27.0881	-51.2581	- 27° 5' 17.16"	-51° 15' 29.16"	2010	630	FQ
16	Joaçaba I	72849000	-27.1594	-51.4811	- 27° 9' 33.84"	-51° 28' 51.96"	3710	600	F
17	Barra do Rio Pardo	72870000	-27.3156	-51.5267	- 27° 18' 56.16"	-51° 31' 36.12"	420	560	F
18	Bonito	73300000	-26.9486	-52.1825	- 26° 56' 54.96"	-52° 10' 57.00"	654	600	FS
19	Barca Irani	73350000	-27.1656	-52.5228	-27° 9' 56.16"	-52° 31' 22.08"	1500	280	FS
20	Abelardo Luz	73600000	-26.5603	-52.3264	- 26° 33' 38.16'	- 52° 19' 32.88"	1840	760	F
21	Coronel Passos Maia	73690001	-26.7722	-52.0256	- 26° 46' 23.88"	- 52° 1' 31.08"	740	800	F
22	Passo Quilombo	73765000	-26.7600	-52.7503	- 26° 45' 36.00"	- 52° 45' 1.08"	266	400	FQ
23	Porto Fae Novo	73770000	-26.8181	-52.7347	- 26° 49' 3.00"	- 52° 44' 3.84"	5550	360	FS
24	Jardinópolis	73780000	-26.7369	-52.9014	- 26° 44' 12.84"	- 52° 54' 6.12"	642	360	FQ

Continuação Quadro 6. Estações fluviométricas utilizadas

ID	Código	Nome	Lat (Dec)	Long (Dec)	Lat (Geo)	Long (Geo)	AreaDrenag ANA (km ²)	Altitude ANA (m)	Tipo
25	Passo Pio X	73820000	-26.8594	-52.9044	- 26° 51' 33.84"	- 52° 54' 16.92"	1010	320	FQ
26	Saudades	73900000	-26.9256	-53.0075	- 26° 55' 27.84"	-53° 0' 32.04"	418	280	FQ
27	Barra do Chapecó Aux.	73960000	-27.0400	-52.9544	- 27° 2' 30.84"	-52° 57' 15.84"	8240	240	FSQ
28	Iraí	74100000	-27.1736	-53.2292	-27° 10' 32.16"	- 53° 13' 46.92"	61900	200	F
29	Linha Cescon	74205000	-27.8131	-53.0294	-27° 48' 47.16"	-53° 1' 45.84"	437	350	F
30	Passo Rio da Várzea	74270000	-27.2786	-53.3203	-27° 16' 42.96"	- 53° 19' 13.08"	5340	240	FS
31	Linha Jataí	74295000	-27.0133	-53.2953	-27° 0' 47.88"	- 53° 17' 43.08"	300	240	FDQ
32	Guatapara de Baixo	74300000	-26.5881	-53.4536	-26° 35' 17.16"	- 53° 27' 12.96"	814	0	FDQ
33	Ponte do Sargento	74320000	-26.6822	-53.2861	-26° 40' 55.92"	- 53° 17' 9.96"	609	320	FSQ
34	Itapiranga	74329000	-27.1717	-53.7094	-27° 10' 18.12"	- 53° 42' 34.92"	72300	0	FDQ
35	Palmitinho	74370000	-27.3328	-53.6444	-27° 19' 58.08"	- 53° 38' 39.84"	2020	240	FS
36	Bandeirante	74422000	-26.7753	-53.6675	-26° 46' 31.08"	- 53° 40' 3.00"	521	0	FQ
37	Raigão Alto	74424500	-26.9333	-53.7061	-26° 56' 0.00"	- 53° 42' 21.96"	2090	0	FQ
38	Ponte do Rio Turvo	74460000	-27.8247	-53.7303	-27° 49' 28.92"	-53° 43' 49.08"	502	400	FQ
39	Três Passos	74470000	-27.3922	-53.8808	-27° 23' 31.92"	- 53° 52' 50.88"	1540	240	FS
40	Alto Uruguai	74500000	-27.3019	-54.1397	-27° 18' 6.84"	-54° 8' 22.92"	82300	120	F
41	Cascata Burica - Nova	74610000	-27.5225	-54.2333	- 27° 31' 21.00"	-54° 14' 0.00"	2260	0	FSQ
42	Tucunduva	74700000	-27.6742	-54.4625	- 27° 40' 22.08"	-54° 27' 51.84"	1140	120	FSQ
43	Linha Cascata	74750000	-27.8450	-54.5561	-27° 50' 42.00"	-54° 33' 21.96"	329	200	FS
44	Porto Lucena	74800000	-27.8528	-55.0256	-27° 51' 9.00"	-55° 1' 32.16"	95200	83	FSQ
45	Passo São João	74880000	-28.0631	-54.7558	-28° 3' 47.16"	-54° 45' 20.88"	817	700	FDQ
46	Linha União	74900000	-27.9308	-54.9392	-27° 55' 50.88"	-54° 56' 21.12"	1260	125	FS
47	Passo Faxinal	75155000	-28.2869	-53.7808	-28° 17' 12.84"	-53° 46' 50.88"	1940	200	FS

Continuação Quadro 6. Estações fluviométricas utilizadas

ID	Código	Nome	Lat (Dec)	Long (Dec)	Lat (Geo)	Long (Geo)	AreaDrenag ANA (km ²)	Altitude ANA (m)	Tipo
48	Ponte Nova do Potiribu Jusante	75186000	-28.3708	-53.8792	-28° 22' 14.88"	-53° 52' 45.12"	613	320	FSQ
49	Conceição	75200000	-28.4544	-53.9731	-28° 27' 15.84"	-53° 58' 23.16"	811	160	FQ
50	Ponte Nova do Conceição	75205000	-28.3847	-54.0314	-28° 23' 4.92"	-54° 1' 53.04"	970	160	FS
51	Santo Angelo	75230000	-28.3553	-54.2683	-28° 21' 19.08"	-54° 16' 3.00"	5440	200	FDQ
52	Colônia Mousquer	75295000	-28.3897	-54.3308	- 28° 23' 22.92"	-54° 19' 50.88"	2160	200	FS
53	Passo do Dias	75400000	-28.6569	-54.4589	- 28° 39' 24.84"	- 54° 27' 32.04"	932	200	FQ
54	Passo Santa Maria	75450000	-28.5792	-54.9150	- 28° 34' 41.88"	- 54° 54' 51.84"	3240	120	FDSQT
55	Passo do Sarmiento	75500000	-28.2119	-55.3197	-28° 12' 42.84"	-55° 19' 10.92"	5230	80	FQ
56	Garruchos	75550000	-28.1822	-55.6431	-28° 10' 55.92"	-55° 38' 35.88"	116000	60	F
57	Passo das Turmas	75600000	-28.8372	-54.8550	-28° 50' 13.92"	-54° 51' 18.00"	378	200	F
58	Passo do Novo	75700000	-28.6828	-55.5794	-28° 40' 58.08"	-55° 34' 45.84"	3710	50	FS
59	Passo São Borja	75780000	-28.6244	-56.0369	-28° 37' 27.84"	-56° 2' 12.84"	125000	50	F
60	Itaqui	75900000	-29.1186	-56.5544	-29° 7' 3.00"	-56° 33' 15.84"	131000	43	F
61	Cachoeira 5 Veados	76085000	-29.4289	-54.0542	-29° 25' 44.04"	-54° 3' 15.12"	1540	160	F
62	Vila Clara	76100000	-29.5561	-54.3422	-29° 33' 21.96"	-54° 20' 31.92"	2790	80	F
63	Dom Pedrito	76251000	-30.9703	-54.6933	- 30° 58' 13.08"	-54° 41' 35.88"	462	130	FQ
64	Ponte Ibicui da Armada	76300000	-30.2808	-54.9031	- 30° 16' 50.88"	-54° 54' 11.16"	6010	80	FDQ
65	Rosário Do Sul	76310000	-30.2428	-54.9169	- 30° 14' 34.08"	-54° 55' 0.84"	12100	100	FrSQ
66	Azevedo Sodré	76370000	-30.1056	-54.6375	- 30° 6' 20.16"	-54° 38' 15.00"	1220	100	FDQ
67	Jaguari	76440000	-29.4989	-54.6892	- 29° 29' 56.04"	-54° 41' 21.12"	2320	100	FDSQ
68	Ernesto Alves	76460000	-29.3625	-54.7353	- 29° 21' 45.00"	- 54° 44' 7.08"	926	300	F
69	Jacaqua	76500000	-29.6869	-55.1958	- 29° 41' 12.84"	- 55° 11' 45.96"	27800	20	F
70	Manoel Viana	76560000	-29.5942	-55.4814	- 29° 35' 44.88"	- 55° 28' 53.04"	29400	80	FrSQT
71	Passo da Cachoeira	76650000	-29.3094	-55.7058	- 29° 18' 30.96"	- 55° 42' 24.84"	2560	60	F

Continuação Quadro 6. Estações fluviométricas utilizadas

ID	Código	Nome	Lat (Dec)	Long (Dec)	Lat (Geo)	Long (Geo)	AreaDrenag ANA (km²)	Altitude ANA (m)	Tipo
72	Passo do Osório	76742000	-29.9511	-55.6003	- 29° 57' 3.96"	- 55° 36' 1.08"	1160	100	F
73	Alegrete	76750000	-29.7686	-55.7872	- 29° 46' 5.88"	- 55° 47' 15.00"	5940	66	F
74	Passo Mariano Pinto	76800000	-29.3092	-56.0547	- 29° 18' 33.12"	- 56° 3' 19.08"	42500	60	FrSQT
75	Uruguaiana	77150000	-29.7486	-57.0892	- 29° 44' 54.96"	- 57° 5' 18.96"	190000	39	FSQ
76	Quaraí	77500000	-30.3847	-56.4656	- 30° 23' 3.84"	- 56° 27' 56.16"	4570	80	FSQ

15 Anexo C – Lista das Estações do Sistema de Alerta Hidrológico do Rio Uruguai

Quadro 6. Estações do Sistema de Alerta Hidrológico do Rio Uruguai

ID	Código	Nome	Lat (Dec)	Long (Dec)	Lat (Geo)	Long (Geo)	AreaDrenag ANA (km²)
1	71200000	Vila Canoas	-27.8039	-49.7792	-27° 48' 10.08"	-49° 46' 42.96"	1010
2	71300000	Rio Bonito	-27.7022	-49.8400	-27° 42' 7.92"	-49° 50' 24.00"	2000
3	71350001	Encruzilhada II	-27.5078	-50.1128	-27° 30' 28.08"	-50° 6' 46.08"	3230
4	72715000	Rio das Antas	-26.8958	-51.0756	-26° 53' 44.88"	-51° 4' 32.16"	801
5	72810000	Tangará	-27.0881	-51.2581	- 27° 5' 17.16"	-51° 15' 29.16"	2010
6	72849000	Joaçaba	-27.1594	-51.4811	- 27° 9' 33.84"	-51° 28' 51.96"	3710
7	73690001	Coronel Passos Maia	-26.7722	-52.0256	- 26° 46' 23.88"	- 52° 1' 31.08"	740
8	73820000	Passo Pio X	-26.8594	-52.9044	- 26° 51' 33.84"	- 52° 54' 16.92"	1010
9	73960000	Barra do Chapecó Aux.	-27.0400	-52.9544	- 27° 2' 30.84"	-52° 57' 15.84"	8240
10	74100000	Iraí	-27.1736	-53.2292	-27° 10' 32.16"	- 53° 13' 46.92"	61900
11	74295000	Linha Jataí	-27.0133	-53.2953	-27° 0' 47.88"	- 53° 17' 43.08"	300
12	74300000	Guataporá de Baixo	-26.5881	-53.4536	-26° 35' 17.16"	- 53° 27' 12.96"	814
13	74320000	Ponte do Sargento	-26.6822	-53.2861	-26° 40' 55.92"	- 53° 17' 9.96"	609
14	74329000	Itapiranga	-27.1717	-53.7094	-27° 10' 18.12"	- 53° 42' 34.92"	72300
15	74800000	Porto Lucena	-27.8528	-55.0256	-27° 51' 9.00"	-55° 1' 32.16"	95200
16	75780000	Passo São Borja	-28.0631	-54.7558	-28° 3' 47.16"	-54° 45' 20.88"	125000
17	75550000	Garruchos	-28.1822	-55.6431	-28° 10' 55.92"	-55° 38' 35.88"	116000
18	75900000	Itaqui	-29.1186	-56.5544	-29° 7' 3.00"	-56° 33' 15.84"	131000
19	76290000	Passo dos Farrapos	-30.5183	-55.0431	-30° 31' 5.88"	-55° 2' 35.16"	4610
20	76310000	Rosário do Sul	-30.2428	-54.9169	- 30° 14' 34.08"	-54° 55' 0.84"	12100
21	76560000	Manoel Viana	-29.5942	-55.4814	- 29° 35' 44.88"	- 55° 28' 53.04"	29400
22	76750000	Alegrete	-29.7686	-55.7872	- 29° 46' 5.88"	- 55° 47' 15.00"	5940
23	77150000	Uruguaiana	-29.7486	-57.0892	- 29° 44' 54.96"	- 57° 5' 18.96"	190000
24	77500000	Quaraí	-30.3847	-56.4656	- 30° 23' 3.84"	- 56° 27' 56.16"	4570

