

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação

**Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia hidrográfica Mirim-
São Gonçalo com influência do vento**

Thais Magalhães Possa

Pelotas, 2019

Thais Magalhães Possa

Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com influência do vento

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título em Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares - UFPEL
Co-orientadora: Prof. Dr^a. Viviane Santos Silva Terra - UFPEL

Pelotas, 2019

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

P856m Possa, Thais Magalhães

Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia hidrográfica mirim - são gonçalo com influência do vento / Thais Magalhães Possa ; Gilberto Loguercio Collares, orientador ; Viviane Santos Silva Terra, coorientador. — Pelotas, 2019.

122 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. simulação hidrológica. 2. mgb-iph. 3. Vento. 4. Lagoa mirim. I. Collares, Gilberto Loguercio, orient. II. Terra, Viviane Santos Silva, coorient. III. Título.

CDD : 553.7

Elaborada por Patricia Pereira CRB: 10/1487

Thais Magalhães Possa

Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com influência do vento

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 19/02/2019

Banca examinadora:

.....
Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Orientador)
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria

.....
Prof. Dr. Walter Collischonn
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....
Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....
Prof. Dr. Hugo Alexandre Soares Guedes
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa

Agradecimentos

Aos meus pais Antônio e Tania por estarem sempre do meu lado. Vocês são a minha base. Quero agradecer por tudo que já fizeram, e dizer quanto são especiais para mim. Ao meu irmão Marco e a minha cunhada Ana, pelos conselhos e por serem a minha inspiração.

Ao meu orientador Gilberto Loguercio Collares e co-orientadora Viviane Santos Silva Terra pela amizade, orientação e pelo conhecimento compartilhado. Gostaria de agradecer por ter me apresentado a modelagem e sugerido um tema tão importante.

Ao pessoal do grupo de Hidrometria e Hidrossedimentologia, em especial, o técnico em hidrologia Reginaldo Galski Bonczynski, Guilherme K. Bartels, George M. Gonçalves, pela amizade e ajuda ao longo deste trabalho.

Às amigas que fiz no mestrado e estiveram comigo durante todo este tempo, Jéssica e Nelva, pela alegria e pelos abraços acolhedores.

Às minhas queridas amigas Kauana e Daniela, pelo carinho e companheirismo em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Fernando Fan por ter dado contribuições importantes. Além de me fornecer dados essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, mostrando estar sempre disposto a ajudar.

Ao meu namorado Pedro Jardim, pela amizade, carinho e compressão neste último ano. Por me incentivar a buscar o melhor e não desistir mesmo nos maus momentos.

E por fim, ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas pela acolhida e à Universidade Federal de Pelotas pelo ensino, desde a graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária.

A todos, aqui citados ou não, que contribuíram de alguma forma, direta ou indiretamente, para realização deste trabalho.

Resumo

POSSA, Thais Magalhães. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com influência do vento**. 2019. 123f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

A bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo possui grande importância ambiental, econômica e social, na qual estão inseridos 21 municípios brasileiros, com área aproximada de 25.736 km², e 5 departamentos uruguaios com área de 30.523 km². Sua importância se deve em parte ao fornecimento de água para o cultivo do arroz irrigado, abastecimento humano e dessedentação animal. A modelagem hidrológica-hidrodinâmica de bacias, rios e grandes sistemas lagunares busca representar os processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica. Tais processos, transformam a água proveniente da precipitação em vazão, considerando a sua interação com os diversos processos do ciclo hidrológico. Quando o interesse é a simulação de níveis d'água e áreas alagadas, por exemplo, o uso de apenas um modelo hidrológico-hidráulico é uma boa opção por ser um processo que depende bastante tempo e recursos. O vento é um dos elementos climáticos dominantes de circulação de água na bacia Mirim-São Gonçalo, e também interfere nos níveis de água observados. O presente estudo utilizou o modelo MGB-IPH para simulação hidrológica da bacia Mirim-São Gonçalo e dos rios que afluem para a Lagoa Mirim, sendo avaliado com a inclusão da influência do vento na modelagem. Tal procedimento foi realizado através da inserção do coeficiente de atrito do vento no algoritmo inercial de propagação de vazões, presente no modelo. Foram realizados diferentes testes com a intenção de encontrar a melhor representação dos processos envolvidos e dos níveis observados. Os resultados mostraram que, com a inclusão de conexões laterais entre unidades de simulação da Lagoa Mirim, houve transferência de água entre elas, diminuindo a vazão na foz da bacia Mirim-São Gonçalo e melhorando a simulação dos níveis d'água. Nos testes realizados em relação à condição de jusante, constatou-se que a utilização dos níveis observados na estação linimétrica da barragem-eclusa, localizada no canal São Gonçalo, possibilitou melhorar os níveis simulados nas estações do próprio canal, como também no restante da Lagoa, demonstrando a influência da Laguna dos Patos sobre os níveis da Lagoa Mirim. Por fim, verificou-se que a inclusão da influência do vento, com uso de informações de estações convencionais, aprimorou os resultados da modelagem em relação às cotas observadas nas estações linimétricas. Com o uso de informações horárias das estações automáticas os mesmos resultados não foram observados. Assim, o modelo MGB-IPH se mostrou capaz de simular, com sucesso, os níveis na bacia Mirim-São Gonçalo e demonstrou a importância da inclusão do vento para a modelagem hidrológica quando pretende-se representar os processos hidrodinâmicos de grandes ambientes lacustres, como é o caso da região de estudo.

Palavras-chave: Simulação hidrológica; MGB-IPH; vento; Lagoa Mirim

Abstract

POSSA, Thais Magalhães. **Hydrological and hydrodynamic modeling of the Mirim-São Gonçalo basin with influence of the wind**. 2019. 123f. Dissertation (Master of Science in Water Resources) – Water Resources Graduate Program, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2019.

The Mirim-São Gonçalo watershed has a great environmental, economic and social importance, in which are included 21 Brazilian cities, with an approximate area of 25,736 km², and 5 Uruguayan departments with an area of 30,523 km². Its importance is due in part to the provision of water for irrigated rice cultivation, human supply and animal watering. The hydrological-hydrodynamic modeling of basins, rivers and large water bodies seeks to represent the hydrological processes that occur in the watershed. These processes transform the water from the precipitation into the stream, considering its interaction with the various processes of the hydrological cycle. When wanted simulation in water levels and flooded areas, for example, the use of only a hydrological-hydraulic model is advised as a time-consuming and resource-intensive process. Wind is one of the dominant climatic elements of water circulation in the Mirim-São Gonçalo basin, and also interferes with observed water levels. The present study used the MGB-IPH model for hydrological simulation of the Mirim-São Gonçalo basin and the rivers that flow to the Mirim Lagoon, evaluating with the inclusion of the influence of the wind in the modeling. This procedure was performed through the insertion of the coefficient of friction of the wind in the inertial flow propagation algorithm, present in the model. Different tests were carried out with the intention of finding the best representation of the processes involved and of the observed levels. The results showed that, with the inclusion of lateral connections between Mirim Lagoon simulation units, there was water transfer between them, reducing the flow in the mouth of the Mirim-São Gonçalo basin and improving the simulation of water levels. In the tests carried out in relation to the downstream condition, it was verified that the utilization of the levels observed in the limimetric station of the dam-sluice, located in the São Gonçalo channel, allowed to improve the simulated levels in the stations of the channel itself, as well as in the rest of the Lagoa, demonstrating the influence of the Patos Lagoon on the Mirim Lagoon levels. Finally, it was verified that the inclusion of the influence of the wind, using information from conventional stations, improved the results of the modeling in relation to the dimensions observed in the limimetric stations. With the use of hourly information from the automatic stations same results were not observed. Thus, the MGB-IPH model was able to successfully simulate the levels in the Mirim-São Gonçalo basin and demonstrated the importance of wind inclusion for hydrological modeling in order to represent the hydrodynamic processes of large lacustrine environments, such as is the case of the study region.

Key-words: hydrological simulation; MGB-IPH; wind; Lagoa Mirim

Lista de Figuras

Figura 1	Comportas e canal de eclusagem da barragem-eclusa do canal São Gonçalo.....	20
Figura 2	Bacia discretizada em células ligadas entre si por canais de drenagem.....	29
Figura 3	Formas de discretização da bacia hidrográfica (a) dentro de um modelo hidrológico: (b) grade regular; (c) quad-tree; (d) minibacias (método das confluências).....	30
Figura 4	Esquema do balanço de água no solo do modelo MGB-IPH para uma Unidade de Resposta Hidrológica.....	32
Figura 5	Esquema de discretização das minibacias de comprimento Δx e das variáveis de vazão (Q e QM), profundidade (h) e nível (z) do modelo Inercial implementado no modelo hidrológico MGB-IPH.....	36
Figura 6	Discretização da rede de drenagem em minibacias com definição da vazão (Q e Qviz).....	38
Figura 7	Fluxograma das fases do estudo.....	41
Figura 8	Localização da área de estudo, bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo.....	42
Figura 9	Fluxograma da fase inicial do trabalho.....	43
Figura 10	Batimetria interpolada da Lagoa Mirim.....	46
Figura 11	Unidades de Resposta Hidrológica.....	47
Figura 12	Localização das 91 estações pluviométricas na bacia Mirim-São Gonçalo.....	48
Figura 13	Localização das 8 estações fluviométricas na bacia Mirim-São Gonçalo.....	48
Figura 14	Postos fluviométricos com dados de nível.....	50
Figura 15	Modelo digital de elevação e rede de drenagem recondicionada.....	51
Figura 16	Bacia Mirim-São Gonçalo com a rede de drenagem gerada no processo de discretização.....	52
Figura 17	Discretização da bacia Mirim-São Gonçalo em sub-bacias.....	53
Figura 18	Discretização da bacia Mirim-São Gonçalo em minibacias.....	54
Figura 19	Localização das estações meteorológicas convencionais.....	60
Figura 20	Quantidade de medições diárias disponíveis para os postos de Pelotas, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar no período entre 1990 a 2015.....	61
Figura 21	Localização dos postos meteorológicos automáticos mais próximos à Lagoa Mirim.....	62
Figura 22	Disponibilidade de dados por estação por dia.....	62
Figura 23	Valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) do logaritmo das vazões.....	66
Figura 24	Valores do erro do volume (%).....	67
Figura 25	Hidrogramas observados e simulados nos rios Olimar Grande e Cebollatí da bacia Mirim-São Gonçalo no período com dados entre 1990 e 2015.....	69
Figura 26	Hidrogramas observados e simulados nos rios Tacuarí e Arroyo India Muerta da bacia Mirim-São Gonçalo no período com dados entre 1990 e 2015.....	69
Figura 27	Hidrogramas observados e simulados nos rios Jaguarão e Piratini da bacia Mirim-São Gonçalo no período com dados entre 1990 e 2015.....	70
Figura 28	Cotagramas de níveis observados na estação Picada da Areia e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.....	73

Figura 29	Cotagramas de níveis observados na estação de Cerro Chato e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.....	73
Figura 30	Cotagramas de níveis observados na estação de Pedro Osório e anomalias simuladas onde se localiza.....	74
Figura 31	Cotagramas de níveis observados na estação de Passo dos Carros e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.....	74
Figura 32	Cotagramas de níveis observados na estação de Santa Isabel e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.....	75
Figura 33	Cotagramas de níveis observados na estação de Santa Vitória do Palmar e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.....	75
Figura 34	Cotagramas de níveis observados na estação do Porto de Pelotas e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.....	76
Figura 35	Cotagramas de níveis observados na estação à montante da barragem-eclusa do canal São Gonçalo e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.....	76
Figura 36	Cotagramas de níveis observados na estação à jusante da barragem-eclusa do canal São Gonçalo e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.....	77
Figura 37	Vazão simulada na condição de declividade constante de 0,005 m.km ⁻¹ (em azul) e com a conexão lateral de 100 (em vermelho) sem a introdução do vento.....	80
Figura 38	Área alagada no canal São Gonçalo em um dia de seca (imagem à esquerda) e um de cheia (imagem à direita).....	81
Figura 39	Comparação área alagada na condição de declividade constante de 0,005 m.km ⁻¹ (dia de cheia na imagem à esquerda) e dia de seca (imagem à direita) na Lagoa Mirim e seus afluentes.....	82
Figura 40	Comparação área alagada simulada na condição de jusante da barragem-eclusa (dia de cheia na imagem à esquerda) e dia de seca (imagem à direita) na Lagoa Mirim e seus afluentes.....	82
Figura 41	Comparação área alagada simulada na condição de declividade constante de 20m (dia de cheia na imagem à esquerda) e dia de seca (imagem à direita) na Lagoa Mirim e seus afluentes.....	83
Figura 42	Mapa da máxima área inundada registrado pelo GSW (a); Máximas áreas inundadas calculadas pelo MGB-IPH sobrepostas (b) (convencional e HAND).....	84
Figura 43	Mapa da mínima área inundada registrado pelo GSW (a); Mínimas áreas inundadas calculadas pelo MGB-IPH sobrepostas(b) (convencional e HAND).....	85
Figura 44	Vazão simulada com a condição de jusante da barragem-eclusa (em vermelho) e sem condição de jusante (em azul).....	87
Figura 45	Cotagramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C _D igual a 2x10 ⁻⁶ , no posto da barragem-eclusa jusante.....	89
Figura 46	Zoom sobre os cotagramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C _D igual a 2x10 ⁻⁶ , no posto da barragem-eclusa jusante.....	90
Figura 47	Cotagramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C _D igual a 2x10 ⁻⁶ , no posto da barragem-eclusa montante.....	90

Figura 48	Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa montante.....	91
Figura 49	Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto do Porto de Pelotas.....	91
Figura 50	Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto do Porto de Pelotas.....	92
Figura 51	Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Isabel.....	92
Figura 52	Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Isabel.....	93
Figura 53	Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Vitória do Palmar.....	93
Figura 54	Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Vitória do Palmar.....	94
Figura 55	Vazões simuladas na condição de jusante da barragem-eclusa (em azul) e com a introdução do vento sub-diário (em vermelho).....	95
Figura 56	Zoom sobre a vazões simuladas na condição de jusante da barragem-eclusa (em azul) e com a introdução do vento sub-diário (em vermelho)....	95
Figura 57	Vazões simuladas na condição de jusante da barragem-eclusa (em azul) e com a introdução do vento horário (em vermelho).....	98
Figura 58	Zoom das vazões simuladas na condição de jusante da barragem-eclusa (em azul) e com a introdução do vento horário (em vermelho).....	98
Figura 59	Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa jusante.....	99
Figura 60	Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa jusante.....	99
Figura 61	Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa montante.....	100
Figura 62	Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa montante.....	100
Figura 63	Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto do Porto de Pelotas.....	101
Figura 64	Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto do Porto de Pelotas.....	101

Figura 65	Cotagramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Isabel.....	102
Figura 66	Zoom sobre os cotagramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Isabel.....	102
Figura 67	Cotagramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Vitória do Palmar.....	103
Figura 68	Zoom sobre os cotagramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Vitória do Palmar.....	103
Figura 69	NS, NSlog e RMSE para a estação linimétrica da barragem-eclusa montante nas diferentes simulações realizadas.....	105
Figura 70	NS, NSlog e RMSE para a estação linimétrica da barragem-eclusa jusante nas diferentes simulações realizadas.....	105
Figura 71	NS, NSlog e RMSE para a estação linimétrica de Santa Isabel nas diferentes simulações realizadas.....	106
Figura 72	NS, NSlog e RMSE para a estação linimétrica de Porto de Pelotas nas diferentes simulações realizadas.....	106
Figura 73	NS, NSlog e RMSE para a estação linimétrica de Santa Vitória do Palmar nas diferentes simulações realizadas.....	107

Lista de Tabelas

Tabela 1	Identificação das estações de nível.....	49
Tabela 2	Informações das estações utilizadas para obtenção das relações geomorfológicas.....	55
Tabela 3	Análise geral dos estações convencionais utilizadas.....	61
Tabela 4	Postos fluviométricos e suas métricas de desempenho para o período de calibração.....	65
Tabela 5	Métricas de desempenho da comparação entre as anomalias dos níveis simulados e observados nos postos meteorológicos.....	71
Tabela 6	Nash-Sutcliffe para diferentes larguras de conexões laterais. Melhores valores das métricas para cada posto encontram-se destacado em verde.....	78
Tabela 7	NSlog para diferentes larguras de conexões laterais. Melhores valores das métricas para cada posto encontram-se destacado em verde.....	78
Tabela 8	Erro do volume para diferentes larguras de conexões laterais. Melhores valores das métricas para cada posto encontram-se destacado em verde.....	78
Tabela 9	RMSE para diferentes larguras de conexões laterais. Melhores valores das métricas para cada posto encontram-se destacado em verde.....	79
Tabela 10	Médias das métricas de desempenho para as simulações com e sem conexões laterais. Melhores resultados em verde.....	79
Tabela 11	Métricas de desempenho das anomalias dos níveis com a condição de jusante da barragem-eclusa do canal São Gonçalo.....	83
Tabela 12	Áreas totais da máxima área inundada e porcentagens de sobreposição em relação ao GSW.....	85
Tabela 13	Áreas totais da mínima área inundada e porcentagens de sobreposição em relação ao GSW.....	86
Tabela 14	Coeficiente de Nash-Sutcliffe das anomalias dos níveis sub-diários para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.....	88
Tabela 15	Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das anomalias dos níveis sub-diários (NSlog) para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.....	88
Tabela 16	Erro de volume (ΔV) das anomalias dos níveis sub-diários para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.....	88
Tabela 17	Raiz da média dos erros quadráticos (RMSE) das anomalias dos níveis sub-diários para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.....	88
Tabela 18	Coeficiente de Nash-Sutcliffe para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.....	97

Tabela 19	Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das anomalias dos níveis horários (NSlog) para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.....	97
Tabela 20	Erro de volume (ΔV) das anomalias dos níveis horários para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.....	97
Tabela 21	Raiz da média dos erros quadráticos (RMSE) das anomalias dos níveis horários para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.....	97

Sumário

1 Introdução	14
2 Objetivos	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos específicos	17
2.3 Hipótese	17
3 Revisão de Literatura	18
3.1 Bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo	18
3.2 Hidrodinâmica do complexo lagunar Patos-Mirim	20
3.3 Vento	21
3.4 Modelagem hidrológica computacional	23
3.5 Modelo hidrológico de grandes bacias (MGB-IPH)	28
3.6 Método inercial de propagação de vazões	33
3.7 Introdução do vento no método inercial	39
4 Metodologia	41
4.1 Descrição e caracterização do ambiente de estudo	42
4.2 Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB-IPH sem a inclusão da influência do vento	43
4.2.1 Preparação do modelo	44
4.2.1.1 Modelo digital de elevação	44
4.2.1.2 Batimetria	45
4.2.1.3 Uso e tipo do solo	46
4.2.1.4 Dados hidro-climáticos	47
4.2.1.5 Discretização da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo	50
4.2.1.6 Relações Geomorfológicas	54
4.3 Calibração do modelo	56
4.4 Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB - IPH com as conexões laterais	57
4.4.1 Análise de sensibilidade à largura das conexões laterais	58
4.5 Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB-IPH com as condições de contorno	58
4.6 Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB-IPH com a inclusão da influência do vento	59
4.6.1 Dados de direção e velocidade do vento	60
4.6.1.1 Estações convencionais	60
4.6.1.2 Estações automáticas	61

4.6.2	Processamento dos dados de vento	63
4.6.3	Testes de sensibilidade do modelo MGB-IPH com influência do vento	63
5	Resultados e discussão	65
5.1	Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB-IPH sem a inclusão da influência do vento	65
5.1.1	Métricas de desempenho das vazões simuladas.....	65
5.1.2	Hidrogramas calibrados	67
5.1.3	Período de Calibração: Níveis d'água simulados e observados	71
5.1.3.1	Métricas de desempenho.....	71
5.1.3.2	Cotagramas	72
5.2	Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB-IPH com as conexões laterais	77
5.2.1	Análise de sensibilidade à largura das conexões laterais	77
5.3	Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB -IPH com as condições de contorno	80
5.4	Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB -IPH com a inclusão da influência do vento	87
5.4.1	Modelo com inclusão do vento e dados sub-diários	87
5.4.2	Modelo com inclusão do vento e dados horários disponíveis em estações automáticas.....	96
6	Considerações Finais e Conclusão.....	108
7	Recomendações.....	110
	Referências.....	111

1 Introdução

Nos últimos anos, os impactos das alterações climáticas e as ações inconscientes praticadas pelo ser humano sobre os recursos naturais têm intensificado as alterações nos fluxos de matéria e energia. Esses impactos causam efeitos nas características físicas de ecossistemas aquáticos como lagos e reservatórios, bem como nos níveis, qualidade da água e nos regimes de estratificação e mistura (NICKUS et al., 2010).

Em relação aos ecossistemas aquáticos, em um sistema com lagos e reservatórios é importante entender a origem das águas e os processos hidrodinâmicos que refletem as forças atuantes nos ecossistemas, como fitoplânctons, heterogeneidade espacial, transporte de sedimentos e correntes de densidade (CURTARELLI et al., 2015; PINARDI et al., 2015).

A comunidade científica vem desenvolvendo modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para grandes bacias (COLLISCHONN et al., 2007; COSTI et al., 2018; FAN et al., 2014) com uma infinidade de aplicações voltadas para sistemas de previsão hidrológica (FAN et al., 2014; SAMBONÍ, 2017), mapeamento de áreas de risco de inundação (TRIGG et al., 2016), prognóstico de impactos de mudanças climáticas em recursos hídricos (SORRIBAS et al., 2016) ou até funcionando como ferramenta de gestão para estudar os processos hidrológicos envolvidos em uma bacia hidrográfica (MARINHO FILHO et al., 2012) como a evapotranspiração, o armazenamento de água no solo e os escoamentos nos rios e planícies alagáveis (PAIVA et al., 2013).

Embora exista a possibilidade de um acoplamento externo entre modelos hidrológicos-hidráulicos e modelos hidrodinâmicos de duas ou três dimensões para avaliar simultaneamente bacias, rios e grandes corpos lagunares, essa é uma abordagem custosa e exige um tempo maior de processamento para simular os níveis e áreas alagadas (LOPES, 2017).

De maneira geral, os modelos hidrológicos utilizam abordagens em que os processos hidrológicos que ocorrem na bacia são modelados separadamente do lago. Apesar disso, os estudos de modelagem ainda são considerados uma ferramenta adequada para o estudo da hidrodinâmica e/ou da dinâmica de ambientes lacustres (FERNANDES; DYER; NIENCHESKI, 2001; FERNANDES et al., 2002; LI et al., 2017; LOPES, 2017).

Para propagar vazões em modelos matemáticos existem diferentes formas como, as equações de Saint-Venant, desprezando apenas o termo que representa a inércia advectiva. Esse tipo de simplificação é denominado na literatura como “modelo inercial” (BATES et al., 2010, NEAL; SCHUMANN, BATES, 2012).

Fan et al. (2014) avaliaram a formulação do modelo inercial para a representação do escoamento unidimensional em diferentes testes hipotéticos de declividade de rio e efeitos de jusante, como remanso e maré. Já Pontes et al. (2017) incorporaram a troca lateral entre as minibacias utilizadas no modelo, o que permitiu aprimorar a simulação de ambientes com planícies de inundação e Lopes et al. (2018) aprimoraram esta versão através da incorporação do vento para simular toda a bacia hidrográfica da Laguna dos Patos, mas sem aplicar o vento ao complexo lagunar Mirim-São Gonçalo.

A Lagoa Mirim e os corpos d'água ao seu entorno compõem uma das principais bacias hidrográficas transfronteiriças da América do Sul, a bacia Mirim-São Gonçalo. Esta possui um importante valor ambiental e econômico para o Estado do Rio Grande do Sul e para o Uruguai (OLIVEIRA et al., 2014). O canal São Gonçalo conecta a Lagoa Mirim com a Laguna dos Patos e mantém uma ligação indireta com o oceano Atlântico (HARTMANN et al., 1986).

Seu regime hidrológico inverte periodicamente o sentido do fluxo de escoamento (HARTMANN; HARKOT, 1998) em função das oscilações de níveis da Laguna dos Patos e da Lagoa Mirim, das condições de escoamento do principal contribuinte, o rio Piratini, da ação dos ventos e do regime pluvial (HARTMANN; HARKOT, 1990).

Fenômenos atmosféricos como as frentes frias e os fortes ventos sudoeste-sul, movimentam a água do sistema, conduzindo para a região norte da Lagoa Mirim e dos Patos (MÖLLER JR et al., 2001). Esse fenômeno quando se manifesta, aumenta a vazão da bacia hidrográfica da Lagoa Mirim e ao mesmo tempo, impulsiona as águas da plataforma contra a costa, força a entrada da água do mar para o estuário e equilibra o gradiente de pressão (HIRATA; MÖLLER JR; MATA, 2010). Estes fatores e particularidades agregam complexidade à simulação hidrológica deste sistema lagunar.

A região em que está localizada a bacia possui um regime de chuvas bem distribuído ao longo do ano, apesar de possuir baixos índices de umidade no solo em períodos de seca devido aos elevados níveis de evapotranspiração, na primavera e verão. Nessas condições, se faz necessário irrigação para manter níveis adequados de produção e produtividade agrícola. Por outro lado, a ocorrência de chuvas intensas e concentradas ao longo de um mesmo dia, também no período da primavera e verão, exige cuidados especiais na manutenção dos cultivos. Essas precipitações causam encharcamento dos solos em áreas mal drenadas e sérios prejuízos devido aos alagamentos e inundações.

Já no lado uruguaio da bacia Mirim-São Gonçalo, que abrange a Zona Leste do Uruguai, a bacia compreende aproximadamente 20% do território do país, sendo esta região menos desenvolvida em relação à pecuária extensiva e produção agrícola (arroz). Assim, devido à sua extensão, essa área apresenta grande importância estratégica para o desenvolvimento econômico e rural do Uruguai. Dessa maneira, a bacia apresenta forte relevância para ambos os países em razão da disponibilidade hídrica que potencializa a produção agropecuária bem como para o abastecimento de conglomerados urbanos.

O estudo das variações de níveis e vazões que ocorrem no sistema lagunar e no canal São Gonçalo, ligação natural da Lagoa Mirim à Laguna dos Patos, é essencial para compreender a hidrodinâmica de um sistema complexo como este, bem como as interações entre os diferentes ambientes desse sistema. Esta interação é influenciada diretamente pela ação do vento nesse sistema, tanto na abrangência da Lagoa Mirim como na Laguna dos Patos.

Desta forma, esse trabalho propõe a avaliação do modelo hidrológico-hidráulico MGB-IPH para simular vazões, níveis d'água e os remansos na região da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com a introdução da influência do vento, utilizando o método inercial local apresentado por Pontes et al. (2017) e Lopes et al. (2018).

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

Estudar a modelagem integrada de grandes bacias e corpos lagunares sobre a influência do vento na bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo empregando o modelo MGB-IPH;
- Agregar gradualmente complexidade ao modelo em busca de uma melhoria na representação de um sistema bacia-lagoa;
- Avaliar os efeitos destas melhorias sobre as vazões e níveis d'água simulados em relação aos observados;
- Avaliar a interação da Lagoa Mirim sobre a Laguna dos Patos.

2.3 Hipótese

A utilização de um modelo hidrológico-hidráulico de grande escala pode representar os níveis d'água e áreas alagadas de uma bacia hidrográfica, até mesmo seus lagos, lagunas e estuário, desde que o modelo considere a variabilidade espacial de seus parâmetros;

O método inercial de propagação de vazões produz um esquema analítico estável e sua aplicação pode ser suficiente para avaliar a influência do vento nos níveis d'água simulados;

O emprego da influência do vento pode melhorar a representação dos níveis d'água.

3 Revisão de Literatura

Nos itens a seguir serão abordados conceitos e conteúdos científicos que apontam relevância e estão correlacionados ao presente estudo. Primeiramente se descreve a área de estudo e sua importância para a região na qual está inserida, bem como são apresentados conceitos relacionados a hidrodinâmica e influência do vento em um sistema bacia-lagoa como este.

A seguir, é feita uma breve revisão sobre modelagem hidrológica computacional através da apresentação de modelos hidrológicos existentes, conceitos e métodos empregados. Em seguida, são exemplificadas abordagens de representação de sistemas complexos como é o caso de ambientes de baixa declividade e com planície de inundação, com ênfase no modelo MGB-IPH com o método de propagação inercial de vazão, o qual será utilizado na presente pesquisa.

Por fim, é apresentado o equacionamento para a inserção da influência do vento no modelo inercial.

3.1 Bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo

A água é um dos recursos naturais que detém dos mais variados e correntes usos, sendo utilizada principalmente para irrigação, abastecimento público, fins industriais, geração de energia elétrica, dessedentação animal, diluição de dejetos e preservação da fauna e flora (TUCCI, 2009).

O Brasil possui a maior reserva de água doce do mundo. A região Amazônica, por exemplo, ocupa 45% do território nacional e apresenta uma rede hidrográfica formada por rios extensos e com grande abundância de água, com 81% em relação à disponibilidade de águas superficiais do país (ANA, 2017).

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, define a Bacia Hidrográfica como sendo a unidade geográfica para implementação da norma e do sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos (JORGE et al., 2015).

A bacia hidrográfica é a principal unidade de estudo para avaliar os componentes do ciclo hidrológico. Definida como uma área de captação natural da água da chuva, o sistema de drenagem de uma bacia é constituído pelo rio principal e

seus tributários, que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída, seu exutório (TUCCI, 2009).

O principal corpo de água da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo é a Lagoa Mirim, que possui uma área de aproximadamente 4.000km², um comprimento aproximado de 190km ao longo do eixo maior, na sua porção mais larga uma extensão média de 40km e na porção mais estreita extensões médias de 20km. A profundidade média da Lagoa Mirim é de 4,5m e a máxima chega até 15m. O volume do lago pode atingir 17km³ e varia conforme a vazão e as condições hidrológicas (VIEIRA; RANGEL, 1988).

A Lagoa Mirim é um dos principais corpos hídricos do sistema lagunar meridional da América do Sul, apresentando um regime de águas compartilhado entre o Brasil e o Uruguai com uma infinidade de afluentes. Suas águas escoam através do canal São Gonçalo, em direção à Laguna dos Patos, e depois são lançadas no Oceano Atlântico, pelo canal de Rio Grande.

A lagoa detém grande importância em relação a vários aspectos ecológicos ligados a ambientes úmidos, destacando-se, nesse sentido, o Banhado do Taim, onde está situada a Estação Ecológica do Taim, entre a Lagoa Mirim e a Lagoa Mangueira (KOTZIAN; MARQUES, 2004).

A Lagoa Mirim é conectada à Laguna dos Patos através do canal São Gonçalo, que está situado no sudeste do estado do Rio Grande do Sul e mantém ligação indireta com o oceano Atlântico. O canal possui aproximadamente 76km de comprimento, largura média de 240m e profundidade em torno de 6m (HARTMANN et al., 1986).

O canal São Gonçalo possui um regime hidrológico que inverte periodicamente o sentido do fluxo de escoamento (HARTMANN; HARKOT, 1998) em função de o relevo ser predominantemente plano, o que influencia à ação dos ventos e dos níveis d'água entre a Laguna dos Patos e a Lagoa Mirim (HARTMANN et al., 1986).

Antes de 1977, em situações de estiagem, com a inversão do fluxo do canal São Gonçalo, o escoamento se observava no sentido da Laguna Patos para a Lagoa Mirim e, como consequência a entrada de água salobra na Lagoa Mirim.

Para controlar o nível d'água, bem como evitar a intrusão de água salina em significativa porção do canal São Gonçalo e Lagoa Mirim, foi construída uma barragem e eclusa na extremidade nordeste do canal São Gonçalo, a uma distância de aproximadamente 8km do porto de Pelotas, disposta transversalmente ao canal

(Figura 1), com 245m de comprimento, construída por paredes de diafragma e estrutura de concreto armado. Essa estrutura contém portões basculantes e comportas by-pass em ambas as margens, a fim de regular os níveis d'água dentro da eclusa e assegurar a qualidade da água tanto para abastecimento público quanto para irrigação (GOUVÊA; ZARNOT; ALBA, 2010).



Figura 1 – Comportas e canal de eclusagem da barragem-eclusa do canal São Gonçalo.

3.2 Hidrodinâmica do complexo lagunar Patos-Mirim

Os termos lagoa e lago são normalmente atribuídos ao mesmo significado porém, conforme Phleger (1969), as lagoas costeiras são classificadas de acordo com a geomorfologia, as formações das barreiras e o grau de enclausuramento em relação ao mar. A classificação entre as lagoas costeiras com base em aspectos geomorfológicos e hidrológicos foi feita por Kjerfve (1986), o qual considera as taxas e intensidades das trocas de água com o oceano como condicionante a serem definidas como lagoas estranguladas, restritas ou abertas.

A bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo apresenta uma lagoa estrangulada. Este tipo de lagoa apresenta elevadas trocas de água e são fortemente influenciadas pelo vento e pela descarga fluvial, sendo a maré o forçante menos significativo na circulação estuarina (KJERFVE, 1986; MÖLLER; STECH; MATA, 1996). Em geral, suas águas escoam do canal São Gonçalo em direção à Laguna dos Patos, onde o deságue no Oceano Atlântico ocorre através do canal de Rio Grande (KOTZIAN; MARQUES, 2004).

A precipitação sobre a bacia conduz a níveis d'água oscilando entre 2m e 3m, que por sua vez, provocam alagamentos nas planícies aluviais, chegando a um volume de $17 \times 10^9 \text{m}^3$ na Lagoa Mirim, que se altera conforme a vazão do canal São Gonçalo e as condições hidrológicas do local (VIEIRA; RANGEL, 1988).

Os alagamentos em áreas mais baixas do canal São Gonçalo são mais propícios nos meses chuvosos (janeiro, fevereiro e julho). Esse período apresenta uma precipitação média anual de 1.366mm, causando o aumento do escoamento superficial e conseqüentemente, as cheias e inundações (SIMON; SILVA, 2015).

Entre os fatores que influenciam na vazão do São Gonçalo, se destacam o nível d'água na Laguna dos Patos, a condição de escoamento no principal contribuinte, o Rio Piratini, o nível d'água do canal na sua foz, as condições impostas na barragem-eclusa, além do vento, sendo este o que mais influência (HARTMANN; HARKOT, 1990).

Marques e Möller Jr (2008) procuraram relacionar a vazão e o nível da Laguna dos Patos com o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS). Os autores verificaram um aumento destas variáveis em anos de existência do fenômeno El Niño e uma diminuição com a ocorrência do La Niña.

De acordo com Oliveira et al. (2014) os processos hidrodinâmicos na Lagoa Mirim são modulados principalmente em função da descarga fluvial, o que permite considerar os efeitos do vento. Estes fenômenos provocam grandes variações de nível ao longo do tempo, fazendo com que a Lagoa Mirim atue como um grande reservatório de água doce.

3.3 Vento

O vento é definido como o ar em movimento constante causado por diferenças na pressão atmosférica. Esta diferença faz com que o ar mais frio, se desloque do centro de alta pressão ao ar mais quente envolvente do centro de baixa pressão. Uma vez que este fenômeno acontece, as pressões e a velocidade de deslocamento do ar se tornam grandezas diretamente proporcionais (PEREIRA et al., 2002).

A influência do vento na dinâmica de circulação da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo está relacionado às massas de ar que se deslocam fortemente na direção sudoeste-sul e aos fenômenos atmosféricos como as frentes frias que

movimentam a água do sistema, conduzindo para a região norte da Lagoa Mirim e Patos (MÖLLER JR et al., 2001).

O fenômeno quando se manifesta, aumenta a vazão da bacia hidrográfica da Lagoa Mirim e, ao mesmo tempo, impulsiona as águas da plataforma contra a costa, forçando a entrada da água do mar que equilibra o gradiente de pressão (HIRATA; MÖLLER JR; MATA, 2010).

O controle da morfologia dos corpos hídricos costeiros (lagos e lagoas) respondendo aos principais forçantes da circulação, ou seja, ao vento juntamente com a descarga fluvial e as marés, se mostram significativos fatores que distinguem as lagoas costeiras de rios e estuários (KJERFVE, 1994).

O vento induz diferenças no nível superficial da água em diferentes regiões de lagos e lagoas. As variações de nível podem ocorrer por efeitos locais ou não. O efeito local ocorre quando cessa a atuação do vento sobre a lagoa, provocando oscilações de nível, também conhecidas como “seiches”. Os seiches podem ocasionar sérios problemas à circulação eólica e ao transporte hídrico (FERNANDES, 2001). Já o efeito não local atua na região costeira variando o nível d’água, por meio do transporte de Ekman (MÖLLER JR et al., 2001).

Nas latitudes que cobrem a costa do estado do Rio Grande do Sul atuam o Anticiclone do Atlântico Sul, predominante nos meses de verão e o Anticiclone Móvel Polar atuante nos meses de inverno. Os anticiclones provocam mudanças periódicas nas condições hidrometeorológicas (HARTMANN; SANO, 1986; TOMAZELLI, 1993), ocasionando flutuações sobre as massas de água da Laguna dos Patos e, conseqüentemente, mudanças diárias na sua circulação. Tais mudanças são decorrentes do regime de chuvas da região e das variações climáticas.

O Anticiclone do Atlântico Sul é considerado um centro de alta pressão, semi-fixo, localizado sobre o oceano Atlântico. Este fenômeno é caracterizado por dias ensolarados com condições de estabilidade atmosférica. Já o Anticiclone Móvel Polar, está situado ao sul da Argentina, e se dá devido às variações do comportamento das massas frias que levam frio da Antártica, deslocando no sentido SW-NE até ao território sul-brasileiro (NIMER, 1989).

O anticiclone atuante sobre o Oceano Atlântico resulta na predominância do vento nordeste (NE) na região com velocidades médias de vento que se encontram em 5 m.s^{-1} (MÖLLER JR, 1996). Com a entrada das frentes frias há dominância do

vento sudoeste (SW), com uma velocidade média de 8 m.s^{-1} (STECH; LORENZETTI, 1992).

Na Lagoa Mirim o vento predominante é o Nordeste e, quando associado as baixas profundidades em situações de baixa pluviosidade e alto consumo de água, pode ocasionar um grande “empurrão” de suas massas de água na direção NE-SW. Isso causa a geração de ondas e conseqüentemente aos empilhamentos dessas no sentido inverso da direção do vento (DNIT, 2014).

A influência da ação dos ventos na hidrodinâmica das lagoas vem sendo abordado em estudos de modelagem numérica. Por exemplo, desde os modelos bidimensionais (2D) como o IPH-A (PAZ, 2003) até aos modelos tridimensionais (3D) como o POM (CASTELÃO; MÖLLER JR, 2006) e IPH-ECO (FRAGOSO JR et al., 2009). Xavier (2002) também com o objetivo de avaliar a circulação das águas da Lagoa Mirim forçada pela ação dos ventos, aplicou o modelo numérico 3D SisBAHIA. Esse modelo permitiu uma análise das trocas de águas e, ao mesmo tempo, estimar o deságue do esgoto sanitário a margem próxima a cidade de Santa Vitória do Palmar.

Com isso, se torna importante considerar as condições do vento em modelos hidrológicos-hidráulicos, de forma que visem a compreensão e representação dos processos hidrodinâmicos presentes em um sistema complexo como a bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo.

3.4 Modelagem hidrológica computacional

Os modelos hidrológicos são ferramentas que nos permitem representar o funcionamento físico da natureza em uma bacia hidrográfica. Apesar dessa representação simplificada, os modelos possuem limitações de uso e exigem uma qualidade e quantidade específica de dados hidrológicos (TUCCI, 2005).

A história da modelagem hidrológica varia desde o método racional (MULVANY, 1850), muito utilizado nas últimas décadas em projetos de drenagem urbana (LIMA, 2011), até os recentes modelos distribuídos que consideram as características físicas da bacia (TODINI, 2007).

Em geral, os modelos desenvolvidos descreviam os processos de cada componente do ciclo hidrológico, como a infiltração de água no solo por Horton na

década de 30, o hidrograma de escoamento superficial direto por Sherman e o escoamento em rios pelo modelo de Saint-Venant (SINGH; FREVERT, 2002).

Estes modelos são classificados de acordo com as suas limitações que podem ser decorrentes da dificuldade em formular matematicamente alguns processos e representar a variabilidade espacial das variáveis (CLARK et al., 2007). Por causa desta variabilidade espacial, muitos modelos hidrológicos têm sido acoplados com ferramentas de sistemas de informações geográficas (SIGs), desde os mais simples de bases conceituais até os modelos distribuídos de base física (VIANA et al., 2018).

Os modelos de base física possuem forte embasamento matemático. As equações diferenciais e as formas simplificadas são algumas das ferramentas matemáticas usadas na modelagem dos fenômenos (RENNÓ; SOARES, 2003). Entretanto, esta abordagem pode gerar incertezas associadas à simulação hidrológica e ao tempo de processamento (TODINI, 2007).

Na modelagem existem processos entendidos e representados considerando o tipo de relações entre as variáveis (empíricos ou conceituais). Os modelos conceituais exigem o mínimo de parâmetros matemáticos no ajuste dos dados simulados aos observados (KHAKBAZ et al., 2012; TUCCI, 2005).

Por sua vez, modelos empíricos utilizam uma série de observações da variável hidrológica a ser modelada, onde o ajuste dos dados simulados aos observados é frequentemente realizado por funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos (RENNÓ; SOARES, 2003).

Já os modelos hidrológicos classificados de acordo com a variabilidade espacial dos parâmetros, podem ser: distribuídos, semi-distribuídos e concentrados. Os modelos distribuídos e semi-distribuídos levam em consideração a variabilidade espacial da bacia hidrográfica, já os concentrados consideram a bacia homogênea em toda a sua extensão (KHAKBAZ et al., 2012), com um único valor médio de precipitação e vazão (SILANS, 2000).

Um exemplo de modelo distribuído é o modelo TOPMODEL, que gera a vazão em função do escoamento superficial do tipo Dunne (DUNNE; BLACK, 1970), ou seja, pelo volume escoado superficialmente quando o solo está saturado (SILVA; KOBAYAMA, 2007).

O primeiro artigo publicado a respeito do modelo TOPMODEL foi em 1979 (BEVEN; KIRKBY, 1979), mas somente em 1984 teve origem ao seu acrônimo

(Topography-based hydrological model) por BEVEN et al. (1984). O modelo pretende reproduzir a heterogeneidade da bacia através das variáveis topográficas, considerando constante a precipitação e a transmissividade (SILVA; KOBAYAMA, 2007).

Na classe dos modelos distribuídos, além do TOPMODEL, encontram-se os modelos SHE (BATHURST; WICKS; O'CONNELL, 1995) e o MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001).

O modelo SHE (Système Hydrologique Européen) apresenta forte embasamento físico, sendo formulado pelo Consórcio Europeu do Instituto de Hidrologia (BATHURST, 1986; BATHURST; WICKS; O'CONNELL, 1995). A versão atualizada é denominada de SHETRAN que, em geral, é aplicado em estudos de mudança do uso do solo (FIGUEIREDO; BATHURST, 2006).

Existem ainda modelos de superfície como VIC e ISBA aplicados para representar os fenômenos em escala regional e global, desde a energia sobre o solo e a vegetação até o balanço hídrico. Há também modelos hidrodinâmicos como o HEC-RAS, TELEMAC, LISFLOOD-FP, que visam a simulação hidrodinâmica de rios e várzeas de inundação na escala local, a global como o CaMa-Flood (YAMAZAKI et al., 2011).

Outro modelo é o SWAT, que inclui sub-modelos voltados à gestão agrícola, a concentração de sedimentos e a erosão do solo. Neste tem-se dois módulos, um de balanço hídrico e outro de representação do escoamento superficial que apresenta uma solução numérica mais simples (ARNOLD et al., 1998).

Viola et al. (2012) citaram os principais modelos hidrológicos que foram aplicados nas diferentes regiões do mundo, sendo eles: SWAT no Uruguai (STACKELBERG et al., 2007), NRM3 no Quênia (NOTTER et al., 2007), AGNPS no sul da Itália (LICCIARDELLO et al., 2007), o MGB-IPH no sul, sudeste e norte do Brasil (COLLISCHONN et al., 2005; NÓBREGA et al., 2011; RIBEIRO NETO et al., 2008) e LASH no sudeste do Brasil (MELLO et al., 2008; VIOLA et al., 2009).

A escala da bacia hidrográfica é o parâmetro que norteia a escolha entre modelos distribuídos e concentrados, pois modelos hidrológicos para as pequenas bacias (concentrados) não são, em geral, adequados para os de grande escala (LOPES, 2015).

Os modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão além de representarem os processos do ciclo hidrológico, incluindo a evapotranspiração, o balanço de água no solo, a geração de escoamento superficial, permitem representar a propagação de cheias em rios.

Em determinadas situações existe a necessidade de simular grandes bacias com extensas redes fluviais e corpos d'águas como lagos e lagoas, com a finalidade de, por exemplo, prever o nível d'água a curto prazo, estudar a circulação ou avaliar as mudanças climáticas e seus efeitos sobre as áreas alagadas. Quando áreas como essas são simuladas, a abordagem realizada usualmente é combinar um modelo hidrológico-hidráulico para simular a bacia hidrográfica e seus rios com um modelo hidrodinâmico de duas ou três dimensões, que simula os grandes corpos d'água, devido às particularidades e limitações desses modelos. Os dados de saída do modelo hidrológico-hidráulico servem como entrada do modelo hidrodinâmico 2D ou 3D e são aplicados em sistemas altamente dinâmicos e de grande escala (DARGAHI; SETEGN, 2011; LI et al., 2014).

O método de acoplamento hidrológico para representar o fluxo lateral de rios, com modelos hidráulicos para calcular os níveis d'água ao longo da extensão do rio, também é amplamente utilizado com o objetivo de modelar as planícies de inundação (LERAT et al., 2012). Lerat et al. (2012) compararam diferentes estratégias para acoplar o modelo chuva-vazão *GR4J*, com o modelo de propagação linear de onda difusa no Rio Illinois. De maneira geral o estudo demonstrou uma boa performance para o canal principal quando utilizados pontos de medições como condições de entrada do modelo, de forma conjunta com outros tributários modelados. O estudo enfatizou a importância da correta escolha do número de tributários de entrada para obtenção do resultado, o que demonstra uma das limitações do acoplamento entre modelos.

Recentemente, Munar et al. (2018) realizaram o acoplamento de um modelo hidrológico de larga escala (MGB-IPH) com um modelo hidrodinâmico (IPH-ECO) para avaliar a influência de forças externas como descarga fluvial e vento na bacia da Lagoa Mirim. Os resultados mostraram que a integração entre os modelos permitiu representar a variabilidade espacial e temporal dos níveis d'água na superfície da lagoa, sendo o vento responsável pelas variações de níveis na escala de dias, enquanto as vazões na escala sazonal. O trabalho ainda incluiu usos diversos da

água, como a irrigação, para avaliar seu impacto sobre os níveis d'água do sistema modelado.

Além destes estudos, existem abordagens integradas de modelos hidrológicos-hidráulicos aplicados na simulação de sistemas hidrodinamicamente complexos. Lopes et al. (2018) propuseram uma abordagem integrada usando um único modelo hidrológico, o modelo MGB-IPH, com o objetivo de simular a bacia da Laguna dos Patos e incluir a influência do cisalhamento do vento. De acordo com os autores, foi possível usar a abordagem para simular os hidrogramas, níveis d'água e as áreas alagadas na bacia. Os resultados das métricas de desempenho nos lagos e lagoas estavam dentro da faixa estabelecida na literatura e apresentaram melhoras quando inserido o efeito do vento no algoritmo de propagação de fluxo. Com esse estudo, os autores concluíram que é possível utilizar o modelo proposto para simular sistemas de previsão de cheias e outros sistemas hidrológicos similares. Ressalta-se, porém, que os autores não aplicaram a influência do vento sobre a bacia Mirim-São Gonçalo, objeto de estudo do presente trabalho.

A propagação do escoamento superficial em rios, cujo escoamento é unidimensional e ocorre preponderantemente na direção longitudinal, pode ser representada matematicamente, baseada em equações de uma, duas ou três dimensões (CASTRO, 2015; CHOW, 1988). A representação desta propagação é usualmente feita através de um conjunto de duas equações, conhecidas como equações de Saint-Venant (BATES; HORRITTM; FEWTRELL, 2010). A primeira é a equação da conservação da massa e a segunda representa a quantidade do movimento, sendo expressas como:

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

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t}}_{(a)} + \underbrace{\frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x}}_{(b)} + \underbrace{g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x}}_{(c)} = \underbrace{g \cdot A \cdot S_0}_{(d)} - \underbrace{g \cdot A \cdot S_f}_{(e)} \quad (2)$$

onde: Q é a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); A é a área da seção transversal ao escoamento (m^2); x é a distância no sentido longitudinal (m); t é o tempo (s); q é a vazão lateral por comprimento longitudinal; h é a profundidade do rio (m); S_0 é a declividade do fundo do rio (adimensional); S_f representa a perda de energia por atrito na calha do rio (adimensional) e g é a aceleração da gravidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

A Equação 2 pode ser interpretada como o conjunto de forças e processos que atuam em um pequeno volume de controle. O termo “a” representa a inércia local, o termo “b” a advecção da quantidade de movimento para dentro do volume de controle, o termo “c” a força associada à pressão, o termo “d” a força resultante do peso da massa da água no volume de controle e o último termo, a força de atrito com o fundo e as margens do rio (FAN et al., 2014).

Um exemplo de modelo hidrológico bastante utilizado que aplica esta abordagem é o HEC-RAS. Este modelo emprega soluções numéricas das equações de Saint-Venant para propagar a vazão em rios (CESTARI JUNIOR; SOBRINHO; OLIVEIRA, 2015; LEON; GOODELL, 2016).

Há também modelos simplificados como o da Onda Cinemática e do Muskingum-Cunge. Entretanto, não permitem representar o escoamento em rios sujeitos a efeito de remanso na entrada de reservatórios e em estuários sujeito ao efeito de marés (PONCE, 1989; PONTES; COLLISCHONN, 2012).

3.5 Modelo hidrológico de grandes bacias (MGB-IPH)

Para a modelagem de rios e planícies, foi utilizado como modelo chuva-vazão o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias, MGB-IPH, que é um modelo distribuído, baseado na estrutura dos modelos LARSIM e VIC-2L (LIANG; WOOD; LETTENMAIER, 1995) com algumas modificações e simplificações.

O modelo é constituído por dois módulos principais: balanço no solo e balanço na água, incluindo a evapotranspiração, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo, e escoamento na rede de drenagem. O intervalo de tempo é diário ou menor. A evapotranspiração e a lâmina interceptada é calculada através da equação de Penman-Monteith (WIGMOSTA; VAIL; LETTENMAIER, 1994). Na sua estrutura original, a bacia hidrográfica era discretizada em elementos regulares (células

quadradas) de aproximadamente 10 por 10km, interconectadas entre si por uma rede de drenagem, conforme mostra a Figura 2.

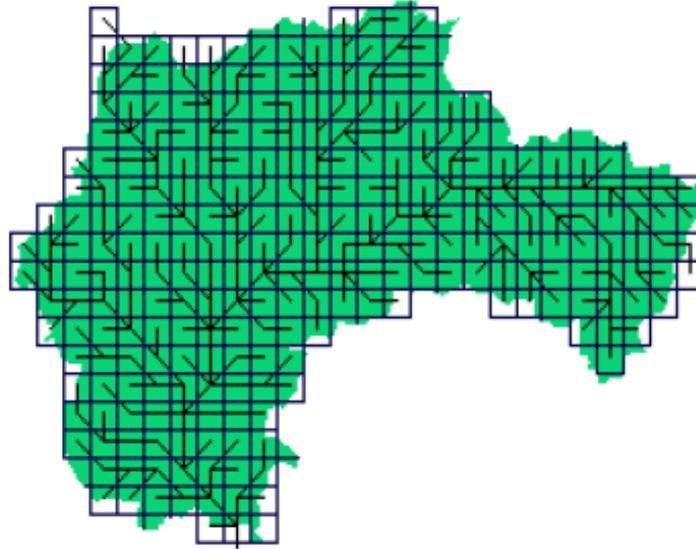


Figura 2 - Bacia discretizada em células ligadas entre si por canais de drenagem.
Fonte: COLLISCHONN, 2001.

Em sua versão mais recente, minibacias são extraídas do Modelo Digital de Elevação (MDE) (FAN; COLLISCHONN, 2013) e cada uma dessas possui um único trecho de rio correspondente. A discretização em minibacias pode ser feita através de dois pacotes de ferramentas, o ArcHydro Tools pertencente ao software de SIG ArcGIS (ESRI, 2007) ou pelo IPH-Hydro Tools que funciona como um plugin do software livre de SIG MapWindow GIS (SIQUEIRA et al., 2016). Adicionalmente, o modelo utiliza uma unidade de discretização espacial maior, que são as sub-bacias.

As sub-bacias são definidas em função da rede de drenagem, da variabilidade interna das características físicas e da localização dos postos fluviométricos que fornecerão os dados observados. Essa divisão permite a calibração do modelo hidrológico nas diferentes regiões com tipos de vegetação e usos do solo específicos, através de parâmetros que devem ser definidos em cada uma delas.

Fan et al. (2015) apresentaram formas de discretização em bacias de grandes escalas, considerando elementos menores como: grades regulares, grades com sub-níveis ou quad-tree e minibacias (Figura 3).

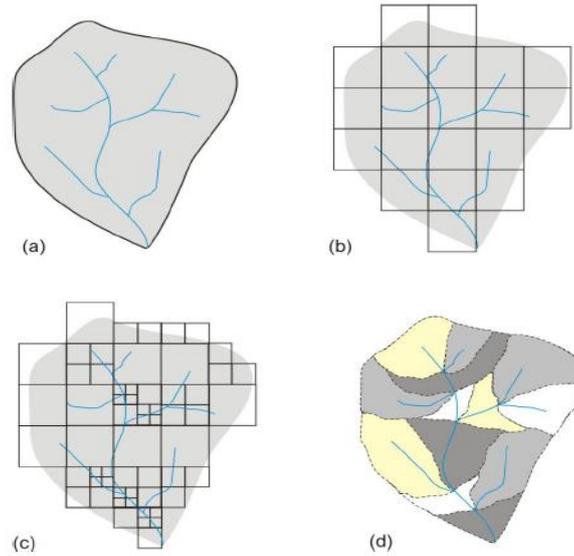


Figura 3 - Formas de discretização da bacia hidrográfica (a) dentro de um modelo hidrológico: (b) grade regular; (c) quad-tree; (d) minibacias (método das confluências).
Fonte: FAN et al., 2015.

O modelo simula os processos verticais do ciclo hidrológico através de relações conceituais, com base nas Unidades de Resposta Hidrológica (URH). Essas são áreas de comportamento hidrológico similar em relação ao uso do solo, cobertura vegetal e tipo de solo que atribuem a variabilidade das características físicas na minibacia. Uma URH é caracterizada por vários parâmetros, modulados pelos parâmetros como armazenamento máximo de água no solo (W_m), parâmetro de escoamento subterrâneo (K_{bas}) e subsuperficial (K_{int}), parâmetro de relação entre fração de área saturada e armazenamento médio de umidade no solo (b) e tempo de residência do escoamento superficial (C_s), subsuperficial (C_i) e de base (C_b).

Os volumes escoados resultantes de todas as URH em cada minibacia são somados e armazenados em reservatórios lineares simples com base nas Equações a seguir:

$$V_{sup_i}^{t'} = V_{sup_i}^{t-1} + \Delta t \cdot \sum_j D_{sup_{ij}} \quad (3)$$

$$V_{int_i}^{t'} = V_{int_i}^{t-1} + \Delta t \cdot \sum_j D_{int_{ij}} \quad (4)$$

$$V_{bas_i}^{t'} = V_{bas_i}^{t-1} + \Delta t \cdot \sum_j D_{bas_{ij}} \quad (5)$$

onde: V_{sup_i} , V_{int_i} , V_{bas_i} são os volumes armazenados nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo (m^3), respectivamente; $D_{int_{ij}}$ é o volume gerado de escoamento subsuperficial; $D_{sup_{ij}}$ do escoamento superficial; $D_{bas_{ij}}$ o volume percolado ao aquífero(mm); onde o índice i se refere às minibacias, j as URH e $t-1$ ao início do intervalo de tempo.

Considerando estas três equações, a vazão de saída de cada reservatório é representada através de uma função linear do armazenamento:

$$Q_{sup_i} = \frac{1}{TKS_i} \cdot V_{sup_i}^{t'} \quad (6)$$

$$Q_{int_i} = \frac{1}{TKI_i} \cdot V_{int_i}^{t'} \quad (7)$$

$$Q_{bas_i} = \frac{1}{TKB_i} \cdot V_{bas_i}^{t'} \quad (8)$$

onde: Q_{sup_i} é a vazão de saída do reservatório superficial($m^3 \cdot s^{-1}$); Q_{int_i} a vazão de saída do reservatório subsuperficial($m^3 \cdot s^{-1}$); Q_{bas_i} a do reservatório subterrâneo em ($m^3 \cdot s^{-1}$); TKS_i (s), TKI_i (s), TKB_i (s), o tempo de retardo do reservatório superficial, subsuperficial e subterrâneo, na respectiva ordem.

Cada reservatório possui características distintas em relação ao retardo e o amortecimento, alterando o escoamento gerado em cada minibacia. Os tempos de retardo dos reservatórios superficial e subsuperficial são calculados pelo modelo através do tempo de concentração da minibacia, $Tind_i$ (m), estimado pela equação de Kirpich, que estabelece relação com os parâmetros calibráveis C_s e C_i .

$$TKS_i = C_s \cdot Tind_i \quad (9)$$

$$TKI_i = C_i \cdot Tind_i \quad (10)$$

O intervalo de tempo que acarreta o retardo do reservatório subterrâneo pode ser estimado em função das recessões dos hidrogramas em períodos de estiagem.

A vazão que chega ao trecho de rio de cada minibacia é calculada através da soma do escoamento resultante dos três reservatórios (superficial, subsuperficial e subterrâneo), conforme mostrado a seguir, a qual é direcionada à minibacia de jusante que se propaga na rede de drenagem, utilizando o método de Muskingum-Cunge ou as equações hidrodinâmicas 1D da forma descrita em PONTES et al. (2017).

$$Q_{cel} = Q_{sup} + Q_{int} + Q_{bas} \quad (11)$$

A Figura 4 apresenta o balanço de água vertical e horizontal simulados em cada minibacia.

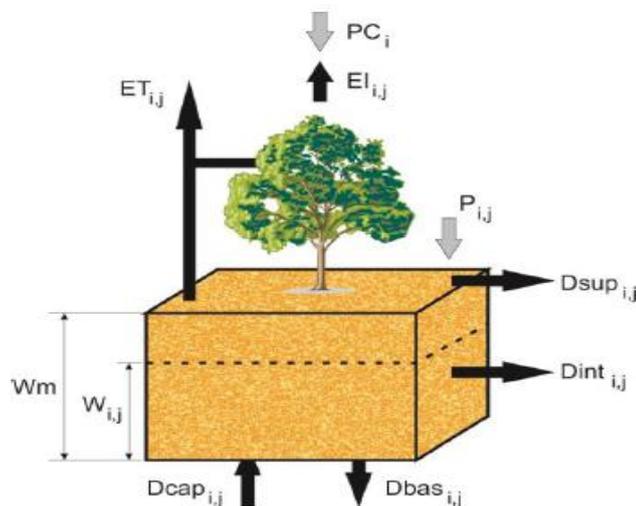


Figura 4 - Esquema do balanço de água no solo do modelo MGB-IPH para uma Unidade de Resposta Hidrológica.

Fonte: Adaptado de COLLISCHONN, 2001.

A propagação de escoamento do modelo hidrológico em sua estrutura original é baseada no modelo de Muskingum-Cunge, um método de propagação de vazão relativamente simples de ser aplicado e que vem sendo aplicado em várias bacias hidrográficas brasileiras, como as bacias do rio Taquari-Antas (RS), rio Taquari (MS), a bacia do Uruguai (COLLISCHONN et al., 2007) e a bacia do rio Piancó (PB) (FELIX; PAZ, 2016).

De maneira semelhante, foi aplicado com a finalidade de prever as vazões afluentes aos reservatórios hidrelétricos da bacia do Rio São Francisco, mostrando ser suficiente para estimativa de vazões em locais sem dados (SILVA; COLLISCHONN; TUCCI, 2014).

O modelo hidrodinâmico unidimensional utilizado no presente trabalho é um modelo inercial (BATES et al., 2010) com seção retangular. O modelo inercial é apresentado detalhadamente no item 3.7 com base em Pontes et al. (2015) que realizaram adaptações no esquema numérico proposto por Bates et al. (2010).

Diante da dificuldade da modelagem hidrológica em grande escala em regiões com planícies de inundação (NEAL et al., 2012; PAIVA et al., 2013), muitos modelos adotam simplificações das equações de Saint Venant para propagar o escoamento, observando-se resultados bastante satisfatórios em trabalhos anteriores tais como o de Yamazaki et al. (2013), Pontes et al. (2015) e Lopes (2017).

Lopes (2017), aplicou um só modelo hidrológico-hidráulico, o MGB-IPH Inercial na bacia hidrográfica da Laguna dos Patos- RS, incluindo a influência do vento no algoritmo inercial de propagação de vazões na simulação, encontrando bons resultados na simulação dos níveis d'água.

Os modelos que utilizam as equações de Saint Venant demonstram potencial para representar o escoamento em regiões de baixa declividade, com trechos de reservatórios e sujeitos a efeitos de marés. No entanto, as equações completas de Saint-Venant resultam em um algoritmo e código computacional muito mais complexo quando comparado a uma simplificação destas (FAN et al., 2014).

3.6 Método inercial de propagação de vazões

Quando as propriedades do fluido não mudam com o tempo, o escoamento é considerado permanente. Esta condição de escoamento superficial ocorre principalmente em rios e canais e é baseada em duas equações físicas: a da continuidade (Equação 1) e a dinâmica (Equação 2), onde essa combinação origina as equações conhecidas como Saint-Venant (TUCCI, 2005). Estas equações são utilizadas, em sua grande maioria, por modelos hidrodinâmicos unidimensionais para fornecer as variáveis do escoamento no tempo e no espaço (BUARQUE, 2015).

Fan et al. (2014) com base em Bates et al. (2010) discretizaram as equações do modelo inercial e propuseram a decomposição da equação dinâmica conforme descrito abaixo:

$$F1 = \frac{\partial Q}{\partial t} \tag{12}$$

$$F2 = \frac{\partial\left(\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x} \quad (13)$$

$$F3 = g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad (14)$$

$$F4 = g \cdot A \cdot S_0 \quad (15)$$

$$F5 = g \cdot A \cdot S_f \quad (16)$$

onde: Q é a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); A é a área da seção transversal ao escoamento (m^2); x é a distância no sentido longitudinal (m); t é o tempo (s); S_0 é a declividade do fundo do rio (adimensional); S_f representa a perda de energia por atrito na calha do rio (adimensional) e g é a aceleração da gravidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Na aproximação inercial, a Equação 2 é simplificada, desprezando a inércia advectiva (Equação 13) já que os valores são insignificantes frente aos outros termos da equação (MOUSSA; BOCQUILLON, 1996):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (17)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} - gAS_0 + gAS_f = 0 \quad (18)$$

A Equação 18, por sua vez, é reescrita considerando que o valor da declividade de fundo do canal (S_f) pode ser calculado por equações empíricas de escoamento em regime permanente como a de Manning (CUNGE, 1980), conforme é demonstrado na Equação 19:

$$S_f = \frac{Q \cdot |Q| \cdot n^2}{A^2 \cdot R_h^{\frac{4}{3}}} \quad (19)$$

onde: Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a vazão; A área em m^2 ; R_h o raio hidráulico em metros (m); e n o coeficiente de rugosidade de Manning.

Assim o termo S_f isolado da equação de Manning pode ser substituído na Equação 18, obtendo-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g(B \cdot h) \frac{\partial y}{\partial x} + g(B \cdot h) \cdot \frac{Q \cdot |Q| \cdot n^2}{(B \cdot h)^2 \cdot R_h^{\frac{4}{3}}} = 0 \quad (20)$$

onde: o termo $|Q|$ representa o módulo da vazão; e a adoção do produto $|Q| \cdot Q$ permite representar a magnitude e o sinal da perda de energia.

A equação dinâmica também pode ser representada considerando o canal como sendo retangular, admitindo que normalmente as seções naturais de rios e canais apresentam larguras maiores que a profundidade. Dessa forma, o perímetro molhado da seção é considerado igual à largura do rio (B) e o raio hidráulico aproximado diretamente a profundidade ($R_h=h$) resultando em:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gh \frac{\partial y}{\partial x} + g \frac{Q \cdot |Q| \cdot n^2}{R_h^{\frac{4}{3}}} = 0 \quad (21)$$

A equação da continuidade pode ser estimada em função da diferença entre as vazões:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \quad (22)$$

onde: V é o volume de água em um pequeno sub-trecho do rio (m^3); Q_{in} são as vazões que entram nesse trecho de rio ($m^3 \cdot s^{-1}$), incluindo a vazão de todas as minibacias localizadas imediatamente a montante e a vazão gerada na própria minibacia, e Q_{out} são as vazões que saem desse trecho de rio ($m^3 \cdot s^{-1}$), o que inclui a vazão que segue para jusante e eventuais perdas por evaporação.

Como as duas últimas equações (21 e 22) não possuem solução analítica, o rio é discretizado em sub-trechos (Figura 5) para que cada minibacia possua apenas um sub-trecho de rio, estando a minibacia B situada à jusante da minibacia A.

Adaptando o esquema numérico propostos por Bates et al. (2010), considera-se que as variáveis h (profundidade), y (cota do nível d' água) e z (cota do fundo) são

definidas nos centros dos sub-trechos e a vazão de troca entre elas que corresponde a Q_i é definida nos contornos de cada sub-trecho.

O único trecho de rio em cada minibacia faz com que as trocas de vazão ocorram da minibacia a montante para a jusante. Nesse caso, o nível d' água do trecho do rio é calculado somando h (profundidade) e z (cota do fundo) através da equação $y_i = z_i + h_i$ para minibacia A e pela equação $y_{i+1} = z_{i+1} + h_{i+1}$ para B (PONTES et al., 2015).

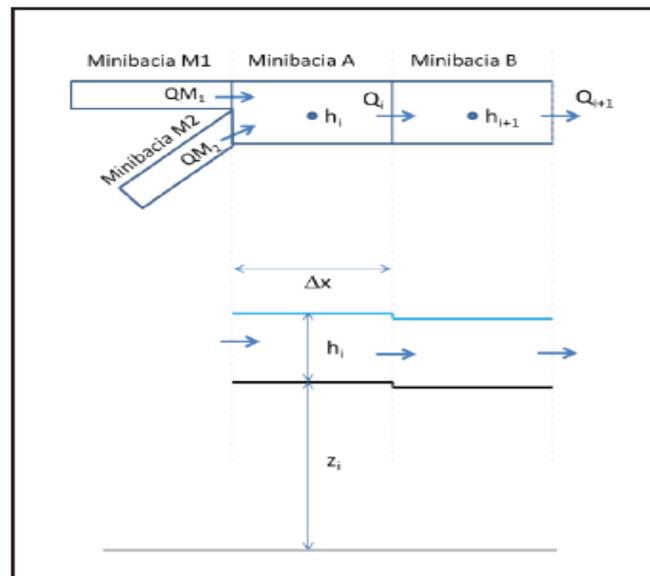


Figura 5 - Esquema de discretização das minibacias de comprimento Δx e das variáveis de vazão (Q e QM), profundidade (h) e nível (z) do modelo Inercial implementado no modelo hidrológico MGB-IPH. Fonte: PONTES et. al., 2015.

Para a resolução das equações 21 e 22 foram adotadas as seguintes aproximações apresentadas nas Equações 23, 24 e 25, onde o índice i representa em qual minibacia ocorre o cálculo e o índice t informa qual o intervalo de tempo:

$$\frac{\partial y}{\partial x} \cong \frac{y_{i+1}^t - y_i^t}{\Delta x_i} \quad (23)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \cong \frac{Q_i^{t+\Delta t} - Q_i^t}{\Delta t} \quad (24)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} \cong \frac{V_i^{t+\Delta t} - V_i^t}{\Delta t} \quad (25)$$

Assim, o método de Euler que fornece aproximações numéricas do tipo “Forward” ou aproximação de Euler, é aplicado para representar o nível e a vazão distribuída no tempo e no espaço. Com isso, aplicando e reorganizando a equação 23, obtêm-se a seguinte equação:

$$Q_i^{t+\Delta t} = \left(\frac{((Q_i^t) - g \cdot W \cdot \Delta t \cdot (h_{flowi} \cdot S_{flowi}))}{1 + \left(\frac{g \cdot \Delta t \cdot h_{flowi} \cdot (|Q_i^t| \cdot n^2)}{W \cdot (h_{flowi})^2} \right)} \right) \quad (26)$$

onde: o sobrescrito t corresponde ao tempo; o subscrito i ao espaço; Q é a vazão ($m^3 \cdot s$); W é a largura da calha do rio, n é o coeficiente de Manning ($m^{\frac{-1}{3}} \cdot s$); S_{flowi} é a declividade da linha d’água; h_{flowi} (m) corresponde à profundidade na seção transversal entre a minibacia i e a minibacia i+1.

O h_{flowi} é calculado pela Equação 27 e a declividade da linha d’água (S_{flowi}) através da equação 28, representada por:

$$h_{flowi} = \max[y_i^t; y_{i+1}^t] - \max[Z_{tabi,1}; Z_{tabi+1,1}] \quad (27)$$

$$S_{flowi} = \frac{y_{i+1}^t - y_i^t}{\Delta xi} \quad (28)$$

onde: $Z_{tabi,1}$, $Z_{tabi+1,1}$, y_{i+1}^t e y_i^t são, respectivamente, a cota de fundo nas minibacias i e i+1 e os níveis de água nas minibacias i e i+1.

Por fim a equação da continuidade pode ser aproximada para cada segmento de rio por:

$$\frac{V_i^{t+\Delta t} - V_i^t}{\Delta t} = \sum Q_{in}^{t+\Delta t} - \sum Q_{out}^{t+\Delta t} - \sum Q_{viz}^{t+\Delta t} - Evq_i \quad (29)$$

onde: $\sum Q_{in}^{t+\Delta t}$ refere-se as vazões que entram na minibacia i no tempo t+ Δt ; $\sum Q_{out}^{t+\Delta t}$ refere-se as vazões que saem da minibacia i e das adjacentes; Evq_i é a evaporação da área inundada na minibacia i e $\frac{V_i^{t+\Delta t} - V_i^t}{\Delta t}$ é a variação do volume no tempo e na minibacia i. Este equacionamento ainda possibilita a troca lateral entre

minibacias através do termo $\sum Q_{viz}^{t+\Delta t}$, podendo ainda representar bifurcações na rede de drenagem, conforme ilustrado na Figura 6.

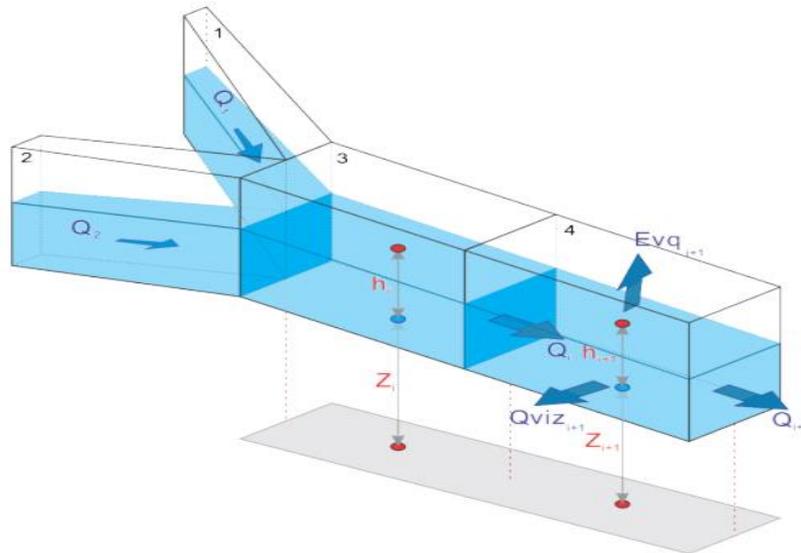


Figura 6 - Discretização da rede de drenagem em minibacias com definição da vazão (Q e Qviz).
Fonte: PONTES et al., 2017.

Dessa forma, o modelo inercial permite achar todos os valores de nível d' água em qualquer minibacia i através de uma condição inicial de vazão de referência, onde o valor de h_{flow} é encontrado pela equação 27, os valores de $Q_{t+\Delta t}$ em cada minibacia i pela equação 28 e os volumes pela equação 29.

Este adota um esquema numérico explícito para evitar a instabilidade numérica, onde a condição de Courant-Friedrichs-Levy (CFL) deve ser respeitada:

$$\Delta t = \alpha \frac{\Delta x}{\sqrt{gh}} \quad (30)$$

onde: g é a aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$); h corresponde a profundidade máxima entre todas encontradas nos trechos analisados (m); Δx o comprimento do menor trecho de rio (m); e Δt é o passo de tempo de cálculo (s).

A Equação 30 pode ser reescrita em função de Δt , onde a condição do intervalo de tempo de cálculo é imposta e é dada pela Equação 31:

$$\Delta t = \alpha \frac{\Delta x}{\sqrt{g.h}} \leq 1 \quad (31)$$

3.7 Introdução do vento no método inercial

A representação da ação do vento na modelagem hidráulica por meio das equações de Saint-Venant pode ser feita através da incorporação da força de atrito que esse exerce sobre o sistema hídrico na parcela dinâmica do conjunto de equações. Segundo Abbott e Price (1994) a tensão causada pelo vento é representada pela Equação 32:

$$\tau = d_{ar} \cdot C_D \cdot |U| \cdot U \quad (32)$$

onde: τ é a tensão causada pelo vento no escoamento, U é valor da componente do vetor da velocidade do vento na direção do escoamento ($m \cdot s^{-1}$), d_{ar} é a densidade do ar (massa específica do ar dividida pela massa específica da água), C_D é o coeficiente de arraste do vento ou coeficiente de resistência ar-água (adimensional). A velocidade do vento U multiplica o módulo da mesma para que o sentido dessa velocidade seja preservado (contra ou a favor do escoamento).

A inclusão deste termo no modelo MGB-IPH com propagação inercial foi feita por Lopes (2017) através da modificação da Equação 26 conforme mostra a Equação 33.

$$Q_i^{t+\Delta t} = \frac{((Q_i^t) - g \cdot B \cdot \Delta t \cdot (h_{flowi} \cdot S_{flowi}) + \Delta t \cdot B \cdot d_{ar} \cdot C_D \cdot |U| \cdot U) \cdot (-\cos(Azvi - Azmi))}{\left(1 + \frac{g \cdot \Delta t \cdot (|Q_i^t|)^2 \cdot n^2}{B + (h_{flow})^3}\right)} \quad (33)$$

onde: $Azvi$ é o azimute da direção do vento na minibacia i ; $Azmi$ é o azimute equivalente à linha imaginária que possui a finalidade de ligar os centróides das minibacias de montante (i) e a jusante ($i+1$), definindo a direção do escoamento.

A principal modificação associada a Equação 32 é a introdução do termo $(-\cos(Azvi - Azmi))$, que representa a decomposição do vetor da velocidade do vento na direção do escoamento. Dessa forma, caso a direção do vento seja a mesma do escoamento, ele agregará vazão ao escoamento. Caso contrário este atuará contra a propagação, diminuindo a vazão na minibacia.

Com isso, o MGB-IPH com propagação inercial mostra-se um modelo com potencial para ser aplicado na bacia Mirim-São Gonçalo visto que representa os níveis d'água, os efeitos de jusante, permite as trocas laterais entre minibacias e a simulação do efeito do vento.

4 Metodologia

Aqui será descrita a metodologia utilizada no presente trabalho que trata da modelagem hidrológica da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo empregando o modelo MGB-IPH e a análise da inclusão dos ventos observados na Lagoa Mirim. Primeiramente, está apresentada a descrição da área de estudo. A seguir, organizou-se um banco de dados que permitisse a aplicação do modelo tal qual sua última disponibilização, que incorpora a propagação inercial de vazões. Com o modelo apto à aplicação, foi calibrado manualmente visando os melhores resultados em relação aos dados observados de vazão.

Uma vez calibrado o modelo, foi gradativamente aprimorado com a inclusão de novos processos e dados, cuja utilização não é permitida via interface. Estas modificações e inclusões foram realizadas de maneira a buscar melhores resultados a cada nova rodada. Primeiramente, foram implementadas no modelo as trocas laterais entre as minibacias na lagoa. A seguir, foi analisada a influência da condição de jusante sobre os níveis da Lagoa Mirim. Por fim, foi realizada a inclusão e a modelagem do vento na bacia.

A Figura 7 apresenta um fluxograma com as fases do estudo.

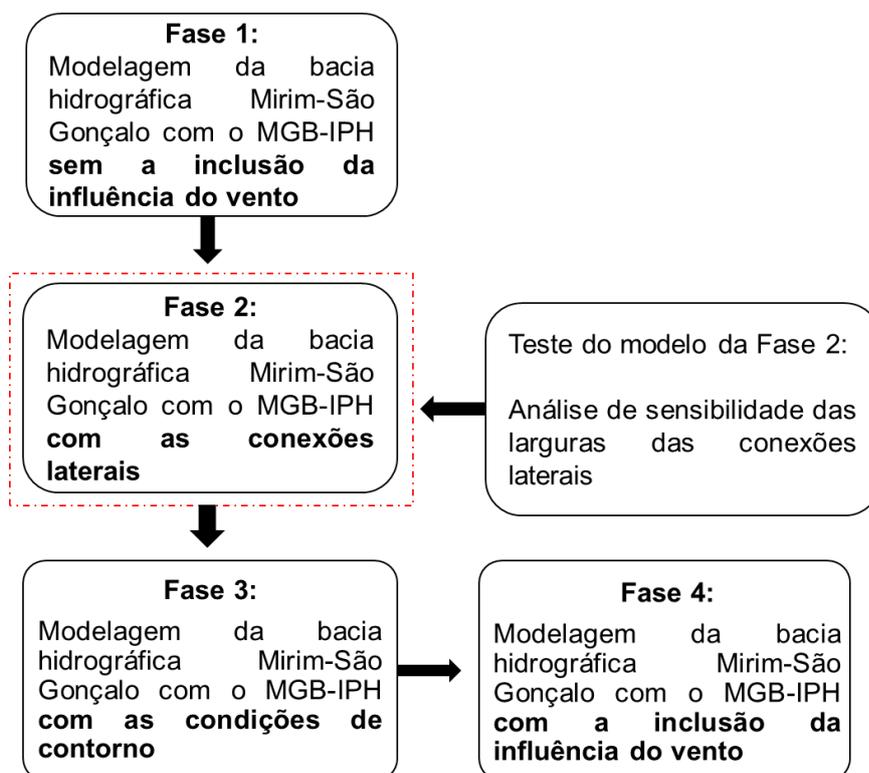


Figura 7 - Fluxograma das fases do estudo.

4.1 Descrição e caracterização do ambiente de estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo que possui uma área aproximada de 56.000km² sendo 46% em território brasileiro e 54% em território uruguaio, localizada na fronteira do sudeste do Rio Grande do Sul (Figura 8), entre as coordenadas 31°30' a 34°35' de latitude Sul e 53°31'a 55°15' de longitude Oeste.

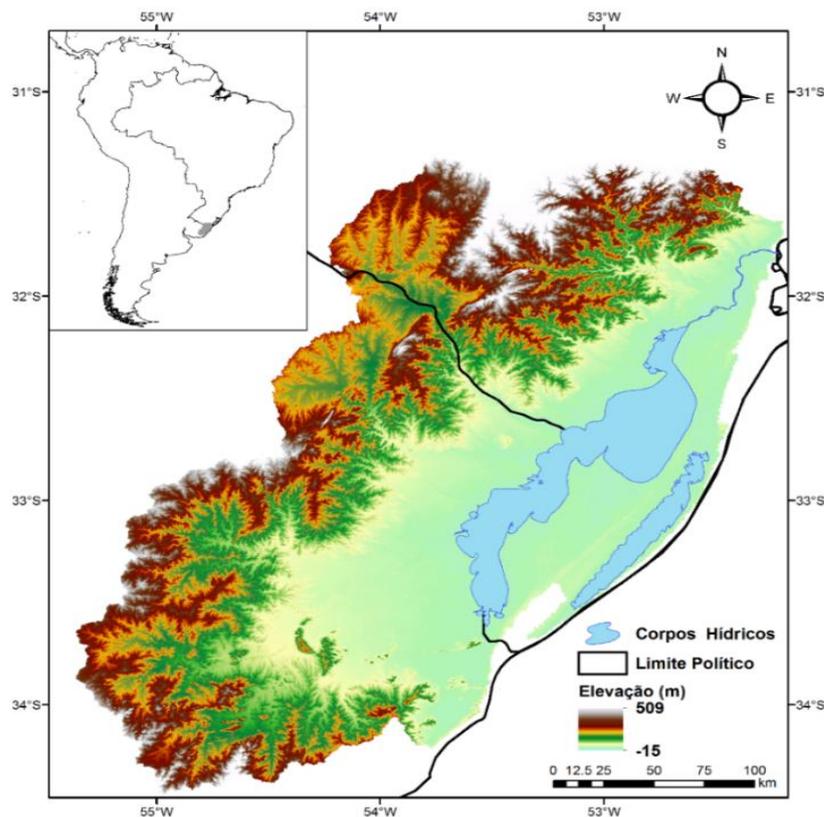


Figura 8 - Localização da área de estudo, bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo.

Portanto, esta é uma bacia transfronteiriça já que parte de seus contribuintes estão em território Uruguaio (SOSINSKI, 2009). Seu regime de águas apresenta uma infinidade de afluentes e, na porção brasileira os principais são os rios Piratini e Jaguarão, situados na margem esquerda (HARTMANN et al., 1986).

A Lagoa Mirim possui um comprimento aproximado de 190km ao longo do eixo maior, na sua porção mais larga uma extensão média de 40 km e na porção mais estreita extensões médias de 20km e, em média, largura de 40km, sendo que armazena um volume médio de 12,4 bilhões m³, o qual mantém um espelho d'água de superfície aproximada de 4.000km². Alguns autores como Kotzian e Marques (2004) apresentam valores aproximados destes apresentados.

Segundo a classificação de Köppen o clima é do tipo subtropical. A região possui temperatura e precipitação média anual de 18°C e 1.378mm, respectivamente (WREGE et al., 2011). Os solos predominantes são Organossolos com manchas de Gleissolos Háplicos (IBGE, 2002).

4.2 Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB-IPH sem a inclusão da influência do vento

Nessa etapa, o modelo é aplicado tal qual é utilizado. Os dados necessários para modelagem foram reunidos e processados com intenção de permitir a criação do projeto de modelagem. Após rodar o modelo, o mesmo foi calibrado manualmente através da manipulação do conjunto de parâmetros para valores que resultariam na melhor representatividade dos dados simulados em relação aos observados e, por consequência, nos melhores valores das métricas de desempenho. Estas foram o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, o coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões e o erro relativo de volume. Além disso, foi efetuada a comparação dos níveis d'água simulados e observados, para verificar a capacidade do modelo em simular corretamente os níveis na lagoa.

O fluxograma desta fase inicial está apresentado na Figura 9.

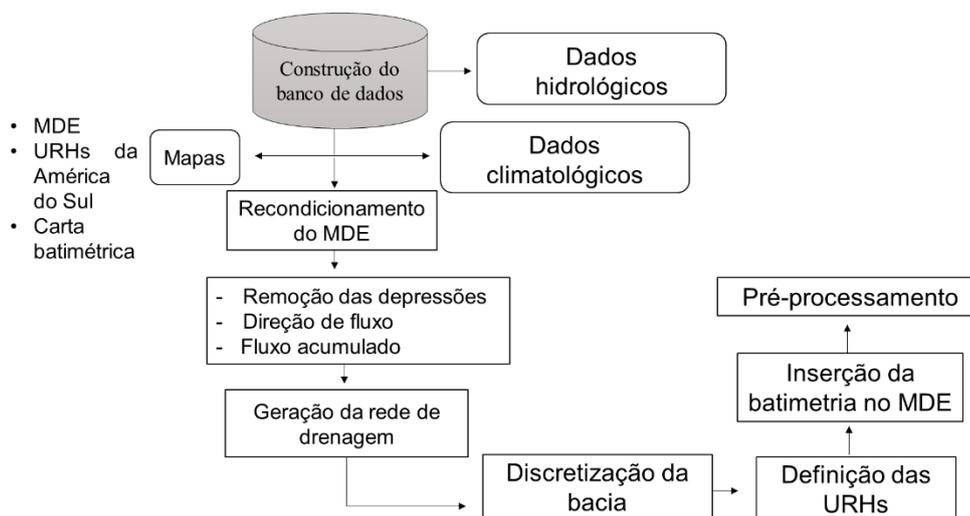


Figura 9 - Fluxograma da fase inicial do trabalho.

4.2.1 Preparação do modelo

Primeiramente, para aplicar o modelo MGB-IPH com o método de propagação Inercial de vazões, foi necessário construir um banco de dados utilizado pelo modelo. Este consiste no modelo digital de elevação (MDE), mapa de uso e tipo de solo, além de uma série de arquivos com dados observados de precipitação, vazão e clima (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação). O MDE é utilizado para gerar a rede drenagem, delimitar a bacia e discretizar a bacia em sub-bacias e minibacias. Já os mapas de tipo, de uso do solo e de vegetação são combinados e reclassificados para gerar as chamadas Unidades de Resposta Hidrológica. As informações provenientes desses arquivos são processadas para que possam ser utilizadas pelo modelo. Os arquivos de precipitação são interpolados para as minibacias pelo método do inverso da distância ao quadrado, enquanto que para as informações climatológicas são utilizados os dados da estação climatológica mais próxima a cada minibacia. Os dados necessários para a aplicação do modelo serão descritos abaixo.

4.2.1.1 Modelo digital de elevação

A obtenção de dados do relevo foi através do Modelo Digital de Elevação (MDE) da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (FARR et al., 2007), com resolução espacial de 90m e resolução vertical de 1m.

O Modelo de Grandes Bacias é rodado inteiramente dentro do software livre de SIG MapWindow (SIQUEIRA et al., 2016), das etapas de pré-processamento à simulação. Apesar dos erros e limitações do SRTM decorrentes de problemas na reflexão dos sinais de radar em corpos d'água ou em vertentes com declividade elevada (FARR et al., 2007), o seu uso ainda é adequado para modelagem proposta.

O fato da região lagunar apresentar altitude constante e próxima a zero em virtude do sinal não ultrapassar sua superfície, foi necessário incorporar dados de batimetria nesta área para que posteriormente fosse possível gerar dados de cota-área alagada para cada minibacia com base nas informações do MDE.

4.2.1.2 Batimetria

A batimetria inserida na Lagoa Mirim foi extraída a partir da digitação da carta de hidrografia e navegação da Marinha do Brasil que contém dados anteriores ao ano de 1941. Os dados da carta foram reunidos em um ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), o ArcGIS. Neste ambiente, foram interpolados através do Topo to Raster, disponível na barra de ferramentas 3dAnalyst.

Os dados interpolados foram inseridos no MDE do SRTM através de uma operação de mapas, na qual o modelo do SRTM foi subtraído pelo interpolado. Esta operação resultou em valores negativos da altimetria que representa a área das lagoas no MDE, uma vez que o valor de altimetria do SRTM era zero.

Dessa forma, para evitar posteriormente erros de processamento pelos programas de geoprocessamento usados, tais como o pacote IPH-HydroTools (SIQUEIRA et al., 2016), foi somado o valor constante de 20m ao MDE tornando todas as células positivas. O resultado final da batimetria interpolada pode ser observado na Figura 10. O MDE com a batimetria foi utilizado para a geração de informações de área alagada e cota do nível d'água em cada minibacia com o uso da ferramenta PREPRO, disponível no IPH-Hydro Tools.

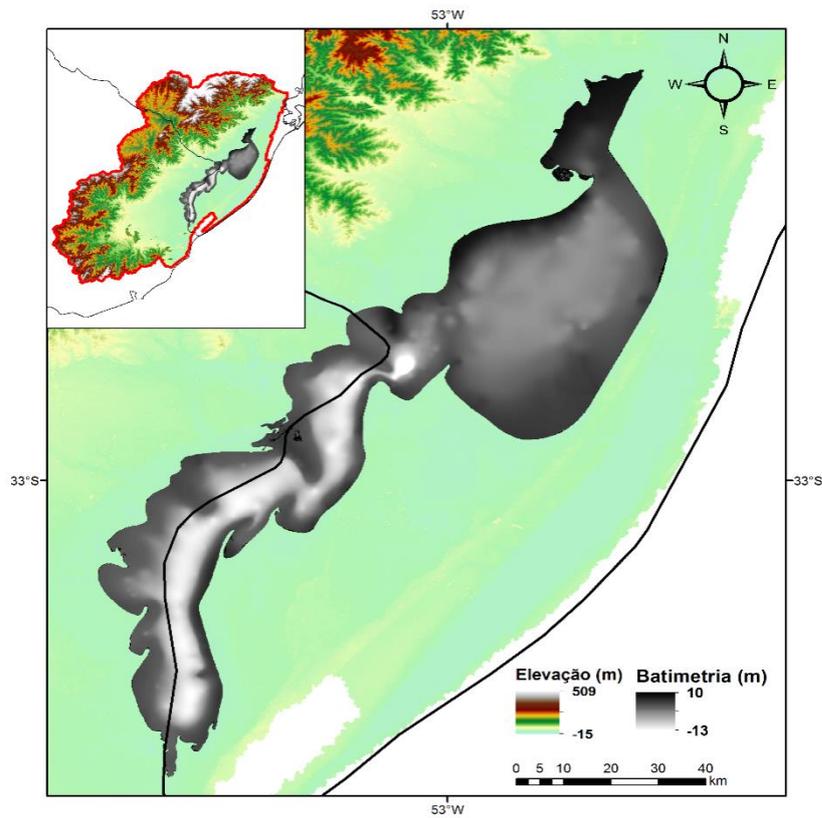


Figura 10 - Batimetria interpolada da Lagoa Mirim.

4.2.1.3 Uso e tipo do solo

Para a determinação das Unidades de Resposta Hidrológica (URH's) da bacia Mirim-São Gonçalo, apresentadas na Figura 11, foi utilizado o mapa de URH's da América do Sul desenvolvido por Fan et al. (2015) e disponibilizado pelo portal de Hidrologia de Grande Escala (HGE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, 2017). Os mapas de uso, tipo de solo e vegetação são reclassificados e combinados, gerando as Unidades de Resposta Hidrológica que são regiões que possuem o mesmo comportamento hidrológico influenciando diretamente nos processos hidrológicos simulados pelo modelo.

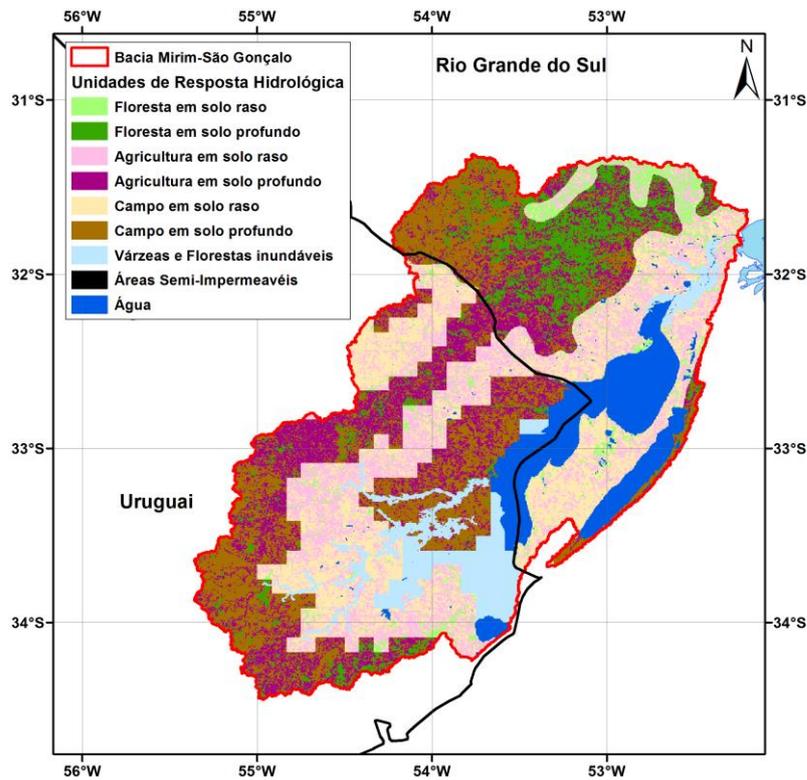


Figura 11 - Unidades de Resposta Hidrológica.

4.2.1.4 Dados hidro-climáticos

Foram utilizados 91 postos pluviométricos e 14 fluviométricos, sendo 8 das estações fluviométricas e 45 das pluviométricas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Uruguai (INUMET), o restante dos dados foram obtidos da rede hidrológica nacional operada pela Agência Nacional de Águas (ANA). As estações pluviométricas utilizadas na bacia Mirim-São Gonçalo estão representadas na Figura 12 e as estações fluviométricas com o respectivo código na Figura 13.

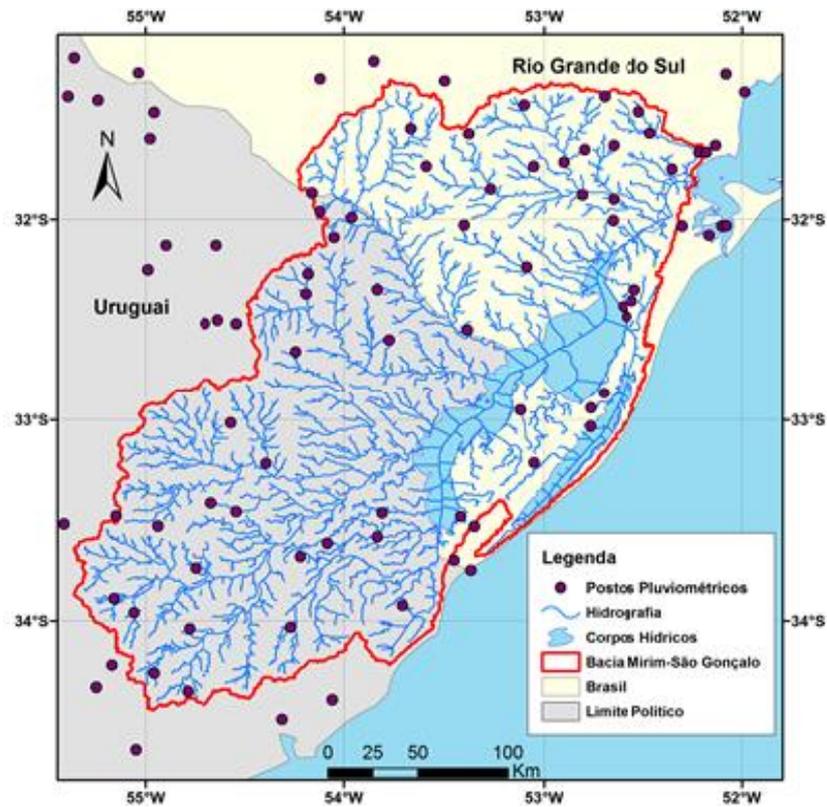


Figura 12 - Localização das 91 estações pluviométricas na bacia Mirim-São Gonçalo.

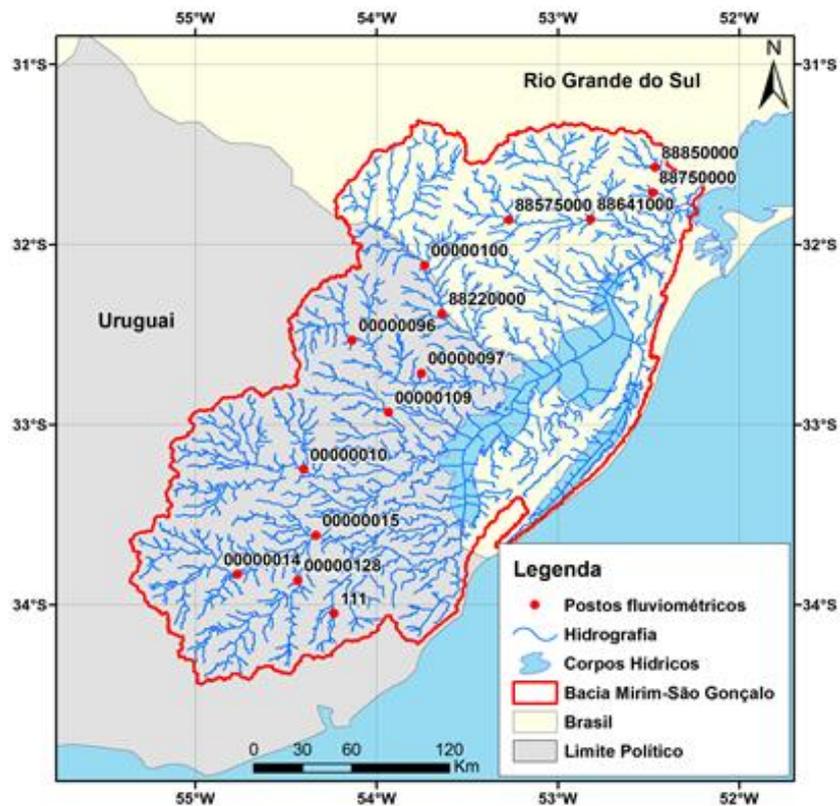


Figura 13 - Localização das 14 estações fluviométricas na bacia Mirim-São Gonçalo.

Também foram utilizados dados de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, insolação e pressão atmosférica para obter a evapotranspiração através do método de Penman-Monteith nas URH (Unidades de Resposta Hidrológica) de cada minibacia. As variáveis foram obtidas através do próprio banco de dados do MGB-IPH que apresenta um conjunto de normais climatológicas de 1960 a 1990 calculadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para todo o Brasil.

Os dados de níveis foram obtidos através de 10 estações linimétricas, localizadas em Picada da Areia, Cerro Chato, Pedro Osório, Passo dos Carros e Ponte Cordeiro de Farias, obtidos pelo sistema Hidroweb e mantido pela Agência Nacional de Águas (ANA). Os dados de níveis d'água da estação de Santa Isabel, Santa Vitória do Palmar e, a montante e a jusante da barragem do canal São Gonçalo foram obtidos junto a Agência de Desenvolvimento da Lagoa Mirim (ALM), da UFPel. Os níveis d'água do canal São Gonçalo foram fornecidos pelo Porto de Pelotas, que possui uma régua instalada junto ao cais.

O número referente ao código e nome de cada estação encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1—Identificação das estações de nível.

ID	Código	Estação de nível	Latitude (S)	Longitude (W)	Ad (Km²)
1	88220000	Picada da Areia	32° 23' 8.00"	53° 38' 16.00"	5420
2	88575000	Cerro Chato	31° 51' 52.92"	53° 16' 5.88"	1050
3	88641000	Pedro Osório	31° 51' 47.88"	52° 48' 57.96"	4700
4	88750000	Passo dos Carros	31° 42' 50.04"	52° 28' 36.12"	131
5	88850000	Ponte Cordeiro de Farias	31° 34' 24.96"	52° 27' 45.00"	386
6	-	Barragem-eclusa montante	31° 48' 46.800"	52° 23' 20.400"	-
7	-	Barragem-eclusa jusante	31° 48' 39.600"	52° 23' 16.800"	-
8	88040000	Santa Vitória do Palmar	33° 30' 30.96"	53° 26' 9.96"	-
9	88810000	Porto de Pelotas	31° 46' 55.92"	52° 20' 0.00"	-
10	88900000	Santa Isabel	32° 9' 16.92"	52° 37' 48.00"	-

Ad: Área de drenagem

Na Figura 14 são apresentados os postos limimétricos com os respectivos códigos.



Figura 14 - Postos fluviométricos com dados de nível.

4.2.1.5 Discretização da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo

Neste item foram inseridos os dados obtidos no processo de discretização da bacia Mirim-São Gonçalo. Uma das primeiras etapas para a extração de informações a partir do MDE consiste na determinação da direção do escoamento e na área acumulada de cada pixel, seguido da definição da rede de drenagem e a divisão em sub-bacias e minibacias (PAIVA et al., 2011). Como os corpos hídricos da bacia se encontram em áreas planas do MDE, uma forma de melhorar a definição das direções de fluxo em regiões como essas é através do acondicionamento do MDE, pelo método conhecido como “stream-burning” (HUTCHINSON, 1989).

Assim foi empregada a ferramenta “stream-burning” da extensão ArcHydro incorporada ao ArcGIS e nela inserida uma camada de hidrografia vetorizada manualmente. Isso foi realizado para definir uma rede de drenagem correta além de permitir a conexão entre a Lagoa Mirim e o canal São Gonçalo, de forma que a

hidrografia passasse no meio da bacia. A Figura 15 representa o zoom da área da lagoa com a rede de drenagem recondicionada para facilitar a visualização.

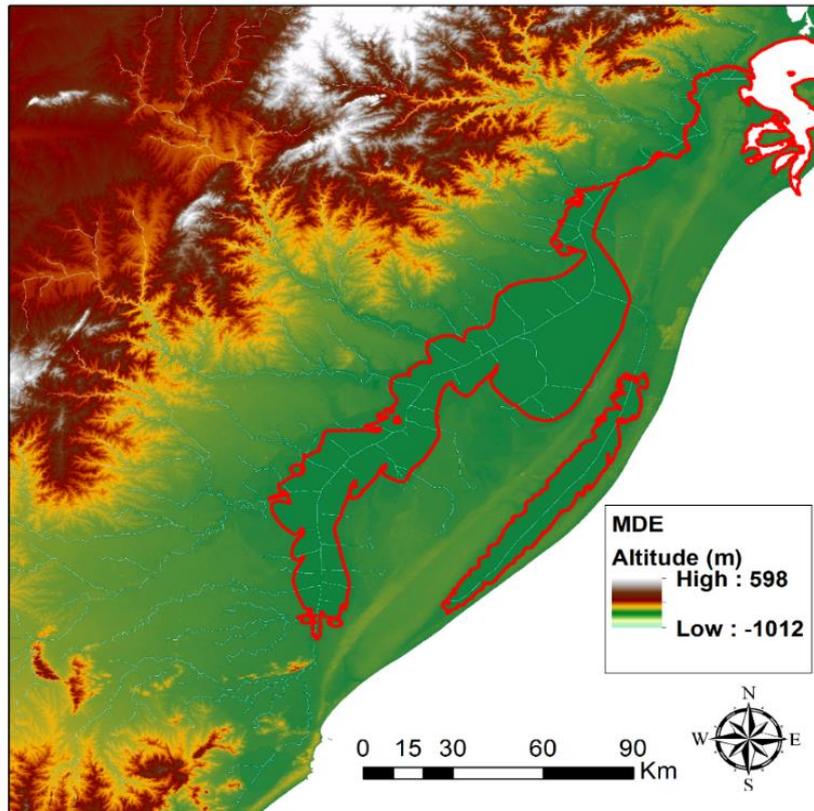


Figura 15 - Modelo digital de elevação e rede de drenagem recondicionada.

A extração da rede de drenagem através do MDE é gerada a partir da definição de um limiar de área acumulada, que representa o número mínimo de células necessárias para começar o curso de água (FAN et al., 2013). No presente estudo foi adotado o valor de 20km^2 . O resultado da rede de drenagem é apresentado na Figura 16.



Figura 16 – Bacia Mirim-São Gonçalo com a rede de drenagem gerada no processo de discretização.

Dentre os métodos de discretização, os que definem comprimentos diferentes de trechos de rios para as minibacias não reproduzem um funcionamento adequado do método inercial uma vez que o passo de tempo do método é estabelecido em função do comprimento dos trechos (Equação 30). Caso haja o uso deste, o modelo aplica o menor trecho de rio no cálculo do passo de tempo de simulação, de acordo com o critério de estabilidade de Courant e, conseqüentemente, diminui o passo de tempo resultante e aumenta o tempo de simulação.

Para evitar este problema, foi aplicado um algoritmo de segmentação de drenagem, o qual está disponível no pacote IPH-Hydro Tools (SIQUEIRA et al., 2016). Este algoritmo necessita da indicação de um comprimento máximo de trecho de rio, que no caso foi adotado 10km. A discretização é refinada até que este limite não seja superado, caso exceder o trecho de rio é subdividido em sub-trechos para manter o modelo estável.

O algoritmo de segmentação começa a partir do exutório da bacia, onde percorre a drenagem de jusante à montante segmentando-a em trechos de comprimentos de rios fixos. Primeiramente, segmenta o maior afluente de cada confluência, ou seja, com maior área de drenagem. Essa área é calculada através do

mapa de fluxo acumulado gerado anteriormente. Ao segmentar de jusante à montante, o algoritmo retorna à montante, reconhecendo o afluente com menor área de drenagem e segue pelo mesmo, até toda a rede de drenagem ser segmentada.

O processo de discretização originou 15 sub-bacias (Figura 17) e 1777 minibacias (Figura 18). As sub-bacias são definidas como sendo unidades maiores de drenagem que abrangem uma grande quantidade de minibacias. Foram definidas com base na localização das estações fluviométricas da área de estudo e utilizadas principalmente no processo de calibração do modelo hidrológico, a qual é atribuído vários parâmetros a cada URH's de acordo com o comportamento hidrológico conferido a elas.

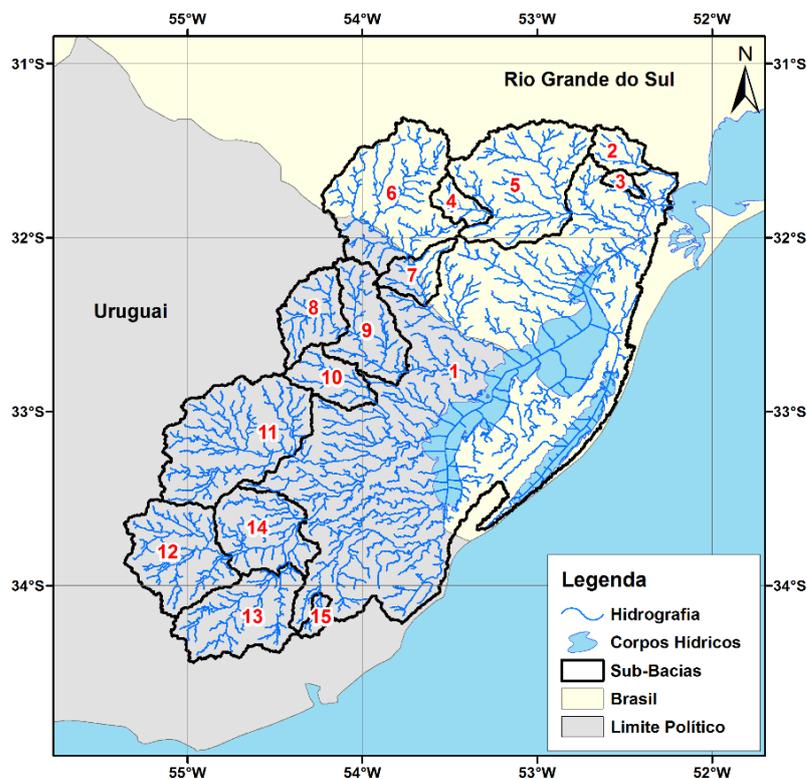


Figura 17 - Discretização da bacia Mirim-São Gonçalo em sub-bacias.

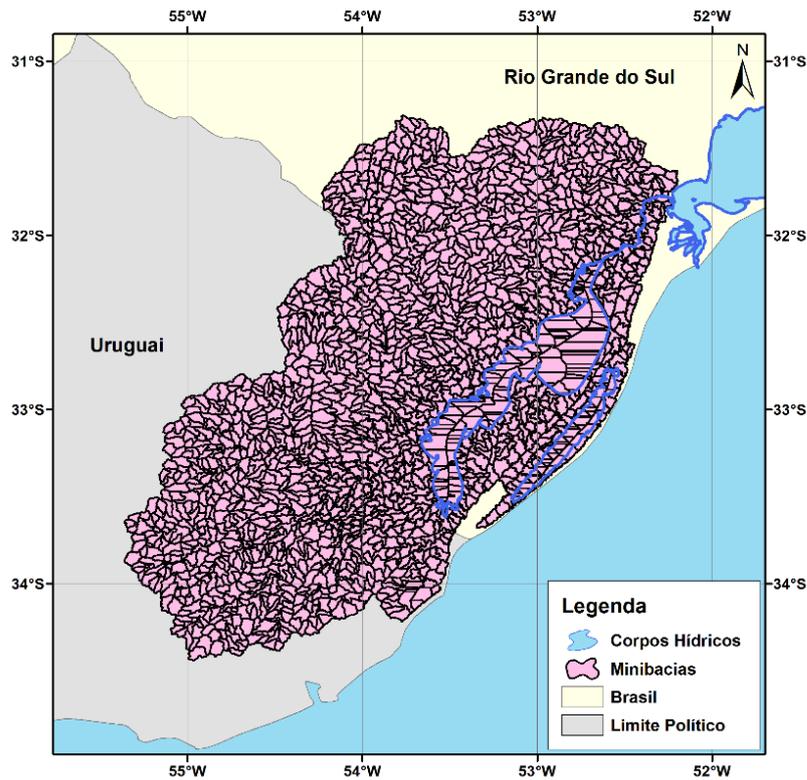


Figura 18 - Discretização da bacia Mirim-São Gonçalo em minibacias.

4.2.1.6 Relações geomorfológicas

Com o pré-processamento do MDE foram obtidas informações relevantes para a simulação hidrológica como a área de drenagem total da minibacia, área de drenagem total acumulada, comprimento do trecho de rio, código do trecho de rio situado a jusante da minibacia em análise, declividade do trecho de rio e um arquivo que define a área alagada para cada cota do nível d'água. Por este motivo foi importante a utilização do MDE com a batimetria inserida. Para definir as larguras e profundidades de cada trecho das minibacias foram utilizados os dados provenientes das estações de resumo de descarga da ANA, adquiridas no portal Hidroweb. Destas, foram correlacionadas as maiores larguras e profundidades observadas às suas respectivas áreas de drenagem. Com isto, foi possível ajustar duas equações potenciais relacionando área de drenagem à largura e profundidade, conhecidas como relações geomorfológicas. A Tabela 2 apresenta as estações utilizadas bem como as informações adquiridas de cada uma.

Tabela 2 - Informações das estações utilizadas para obtenção das relações geomorfológicas.

Estação	Nome	Rio	Área (km ²)	Profundidade (m)	Largura (m)
				Máxima	Máxima
88176000	Arroio Candiota montante	Arroio Candiota	297	1,84	16
88177000	Sanga Funda montante	Arroio Sanga Funda	297	1,57	20
88220000	Picada da Areia	Rio Jaguarão	5420	4,29	90
88260000	Passo das Pedras	Rio Jaguarão	6920	5,71	132,7
88400000	Granja Santa Marta	Arroio Chasqueiro	281	1,11	21,6
88550000	Ponte do Império	Rio Piratini	1870	2,29	102
88560001	Picada Nova	Rio Piratini	2240	2,99	62
88575000	Cerro chato	Arroio Basílio	1050	2,03	61,36
88680000	Passo do Ricardo	Rio Piratini	5410	4,11	150
88750000	Passo dos Carros	Arroio Fragata	131	2,74	38,54
88850000	Ponte Cordeiro de Farias	Arroio Pelotas	386	5,24	63,5
88600001	Contrato	Arroio Basílio	2380	5,35	61

Os formatos das equações das relações geomorfológicas são apresentadas nas Equações 34 e 35:

$$H_{rio_i} = cAd_i^d \quad (34)$$

$$B_{rio_i} = aAd_i^b \quad (35)$$

onde: H_{rio_i} é a profundidade da calha (m) na minibacia i ; B_{rio_i} é a largura da calha (m) na minibacia i ; Ad_i é a área de drenagem (km²) na minibacia i e os parâmetros a , b , c e d são os parâmetros do ajuste da equação potencial. Os valores obtidos para os parâmetros a , b , c e d considerando os dados observados foram 2,3786; 0,4486; 0,1597 e 0,3818, respectivamente.

Estas foram utilizadas para definir as larguras e profundidades de todas as minibacias que compõem a bacia na etapa de pré-processamento. Contudo, uma vez que estas variáveis não se comportam da mesma maneira na região da lagoa, onde a profundidade é definida pela batimetria e a largura é toda extensão de cada minibacia, foram alteradas manualmente as profundidades das minibacias situadas dentro da lagoa para 1m. Dessa maneira, todas as minibacias da lagoa seriam imediatamente inundadas mesmo para vazões baixas. A partir daí, o que definiria a cota e o volume de cada minibacia dentro da lagoa, em resposta à vazão de entrada, seria o arquivo de cota e a área alagada que incluiria as informações da batimetria.

4.3 Calibração do modelo

O modelo foi calibrado para um período de 26 anos, entre 1º de janeiro de 1990 a 31 de dezembro de 2015, o qual foi escolhido de modo que envolvesse um maior número de dados fluviométricos. A modelagem foi melhorada com a calibração manual, através da comparação entre hidrogramas simulados e observados. Além do ajuste do modelo pela comparação visual entre vazões observadas e calculadas, os seguintes parâmetros estatísticos foram empregados nas análises: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões (NSlog) e o erro relativo de volume (EV).

Com a aplicação do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) foi possível ajustar as altas vazões dos hidrogramas. Verifica-se que para representar os picos de vazões entre os dados simulados e observados o valor ideal de NS deve ser igual e máximo a 1. O coeficiente de ajuste considera o quadrado das diferenças entre as vazões observadas e simuladas, conforme mostra a Equação 36:

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \right] \quad (36)$$

onde: n é o número total de observações; Y_i^{obs} , a vazão observada; Y_i^{sim} é a vazão simulada; e Y_i^{mean} é a média das vazões observadas.

O coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões (NSlog) é calculado da mesma maneira mas por meio do logaritmo das vazões observadas e simuladas, com isso contempla melhor as situações das vazões em períodos de estiagem. O desempenho do modelo é considerado bom se o valor do NS é maior que 0,75 e é considerado aceitável se o valor fica entre 0,36 e 0,75 (COLLISCHONN, 2001). O NSlog também possui valor ideal igual e máximo a 1. Já o EV confere um melhor ajuste na quantidade de vazão gerada pelo modelo em relação às vazões observadas ao longo do tempo quando aproxima ao valor zero.

Uma vez que o referencial zero do MGB-IPH não é o mesmo dos quais são referenciadas as estações de observação, as anomalias dos níveis d'água simulados no ambiente de estudo foram corrigidos utilizando a média das séries observadas referente ao mesmo período. Para isso, cada valor das anomalias simuladas nas

minibacias referentes às estações foi subtraído pela média da série observada em cada estação. Desta maneira foi possível comparar diretamente a anomalia e o nível observado. A verificação do desempenho do modelo, ao simular os níveis d'água, foi realizada através do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões (NSlog), erro do volume (ΔV) e raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos desvios (RMSE). O coeficiente NSlog foi calculado somando às séries o menor valor de nível d'água, conferindo todos valores como positivos, permitindo calcular seus logaritmos.

4.4 Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB- IPH com as conexões laterais

Para representar a região de planície na área de estudo, o método de discretização convencional do modelo MGB-IPH foi modificado. Essa modificação consiste em incluir as trocas de vazões laterais entre as minibacias dentro do MGB-IPH Inercial.

De acordo com Pontes et al. (2015), isso pode ser realizado incorporando canais de ligação entre todas as minibacias adjacentes situadas na área de planícies e com isso, conectando-as. Para identificar as minibacias que possuem conectividade lateral admitiu-se que uma minibacia está conectada a uma minibacia vizinha em regiões com planícies de inundação e no interior da lagoa, em que, embora não haja trechos de rio, ainda ocorre transferência de água livremente entre elas.

Em geral, as características geométricas (largura, comprimento e cota de fundo) dos canais fictícios não são conhecidas. No intuito de achar valores adequados foi feito uma análise de sensibilidade, descrita no item 4.4.1, com base nas larguras dos canais que interligam as minibacias de planície (parâmetro b). Já o comprimento dos canais foi calculado conforme a Equação 37 (PONTES et al., 2015), que representa a soma do raio de dois círculos que possuem áreas equivalentes ao de duas minibacias conectadas.

$$L = \sqrt{\frac{A_1}{\pi}} + \sqrt{\frac{A_2}{\pi}} \quad (37)$$

onde: L é o comprimento do canal (km); e A_1 e A_2 as áreas das minibacias interconectadas pelo mesmo.

4.4.1 Análise de sensibilidade à largura das conexões laterais

O parâmetro b que representa a largura dos trechos de rios fictícios entre as minibacias com conexão lateral não é calculado automaticamente e necessita de calibração para buscar o melhor valor. Este é utilizado nas soluções numéricas das equações de Saint-Venant do modelo inercial local. O modelo foi simulado com diferentes valores de b e o melhor valor do coeficiente a ser atribuído nas simulações foi verificado através dos valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões (NSlog), erro do volume (ΔV) e raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos desvios (RMSE), que foram avaliados em todos os postos de nível. Os valores dos parâmetros avaliados foram: 10m, 25m, 50m, 100m, 150m, 250m, 500m, 1000m.

4.5 Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB-IPH com as condições de contorno

Essa fase do estudo pode ser dividida em três testes. Primeiro foram analisadas as saídas de nível d'água com a programação atual do MGB-IPH, na qual é mantida uma declividade constante de $0,005 \text{ m.km}^{-1}$ da minibacia do exutório em relação a minibacia fictícia posterior a esta. No segundo teste foi feita uma substituição da declividade constante por uma equivalente aquela em relação ao nível constante do mar, ou seja, 20m já que o MDE original foi somado por este valor para compensar o escavamento da calha dentro da lagoa. O último teste foi desenvolvido com a finalidade de verificar o desempenho do modelo ao se incluir dados diários de nível d'água observados da barragem-eclusa do canal São Gonçalo como condição de jusante. Dessa forma a declividade seria calculada em relação aos próprios valores observados na barragem. Neste caso também foi necessário somar 20 metros aos valores observados.

Para auxiliar na avaliação de qual condição de jusante resultaria nas melhores simulações, foram gerados mapas da área inundada em um dia de cheia e um de

seca pela versão convencional do modelo. Na sua primeira versão, o modelo gerava a área inundada através da comparação entre o nível d'água (NA) simulado e as cotas do MDE, em cada minibacia (PONTES et al., 2015).

Mais recentemente, foi incorporado ao MGB-IPH o desenvolvimento e utilização do modelo de terreno denominado HAND (Height Above Nearest Drainage ou Altura Acima da Drenagem Mais Próxima). Esse, por sua vez, foi desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e pelo INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) (NOBRE et al., 2011) e calcula alturas relativas ao rio por meio da diferença entre a altitude extraída do Modelo Digital de Elevação (MDE) e a rede de drenagem, seguindo as direções de fluxo (RENNÓ et al., 2008; NOBRE et al., 2011).

Dessa forma, levando em consideração a existência de dois métodos, ambos foram avaliados frente ao produto Global Surface Water (GSW), constituído da análise de 3 milhões de imagens obtidas pelo satélite Landsat na resolução de 30 metros, ao longo dos últimos 32 anos (PEKEL et al., 2016).

4.6 Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB-IPH com a inclusão da influência do vento

Nesta etapa foi feita a simulação do modelo MGB-IPH com propagação inercial e incorporação da influência do vento com uso de dados sub-diários e horários com a condição de jusante que resultou os melhores resultados na etapa 2. O primeiro passo foi definir os azimutes da Equação 32. Para calcular o $Azmi$ foram utilizados os pares de coordenadas do centroide da minibacia de origem e os da de destino, podendo essas serem minibacias a jusante ou laterais. Isso foi feito com o uso do software Excel, considerando-se o quadrante em que a minibacia de destino está em relação a de origem. Enquanto o $Azvi$ que é o azimute da direção do vento na minibacia i é informado pelos próprios órgãos que geram os dados. Durante a fase de execução foram inseridas séries históricas de direção e velocidade do vento e estas informações estão descritas a seguir.

4.6.1 Dados de direção e velocidade do vento

4.6.1.1 Estações convencionais

Os dados de direção e velocidade do vento foram obtidos através do portal BDMEP do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de estações meteorológicas que estão localizadas na Figura 19.

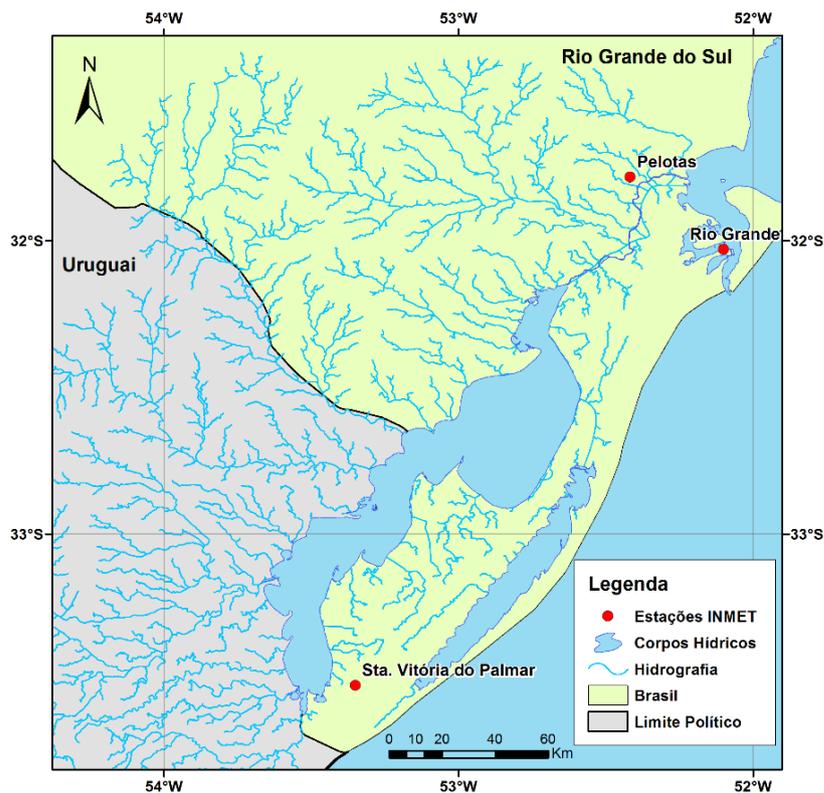


Figura 19 - Localização das estações meteorológicas convencionais.

A Figura 20 mostra os números de medições diárias disponíveis para cada um dos postos, Pelotas, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar no período entre 1990 e 2015. Nos postos as medições eram em 3 horários diários, às 00:00, 12:00 e 18:00 UTC e estão disponíveis para o período de calibração com um número elevado de falhas em 2015 para a estação de Rio Grande e entre 1990 e 1992 em todos os postos.

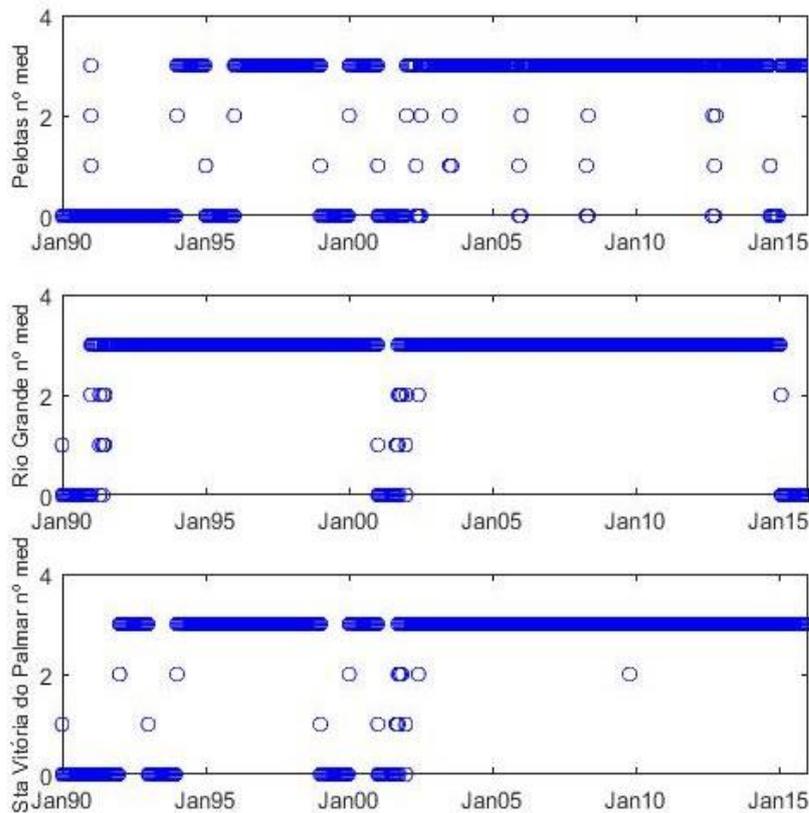


Figura 20 - Quantidade de medições diárias disponíveis para os postos de Pelotas, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar no período entre 1990 a 2015.

A Tabela 3 apresenta a análise geral dos dados de vento em cada posto, o que inclui o período de dados bem como a velocidade mínima, máxima e média e a direção predominante. Como era esperado, as estações de Rio Grande e Pelotas possuem mesma direção predominante (Nordeste), dada a proximidade entre as duas regiões.

Tabela 3 - Análise geral dos estações convencionais utilizadas.

Posto Meteorológico	Data Mínima	Data Máxima	Velocidade ($m.s^{-1}$)			Direção ($^{\circ}$)
			Mínima	Máxima	Média	Moda
Rio Grande	01/01/1991	19/01/2015	0	21	3,0887	45
Pelotas	01/01/1994	31/12/2015	0	17,5	3,2837	45
Santa Vitória do Palmar	01/01/1992	27/11/2015	0	20	3,9229	135

4.6.1.2 Estações automáticas

As estações automáticas situadas próximas a Lagoa Mirim foram visualizadas no site do INMET. Os dados horários de direção e velocidade do vento destas estações foram obtidos mediante solicitação ao órgão.

A localização das estações utilizadas está representada na Figura 21.



Figura 21 - Localização dos postos meteorológicos automáticos mais próximos à Lagoa Mirim.

O número de medições por dia disponíveis em cada um dos postos está representado na Figura 22.

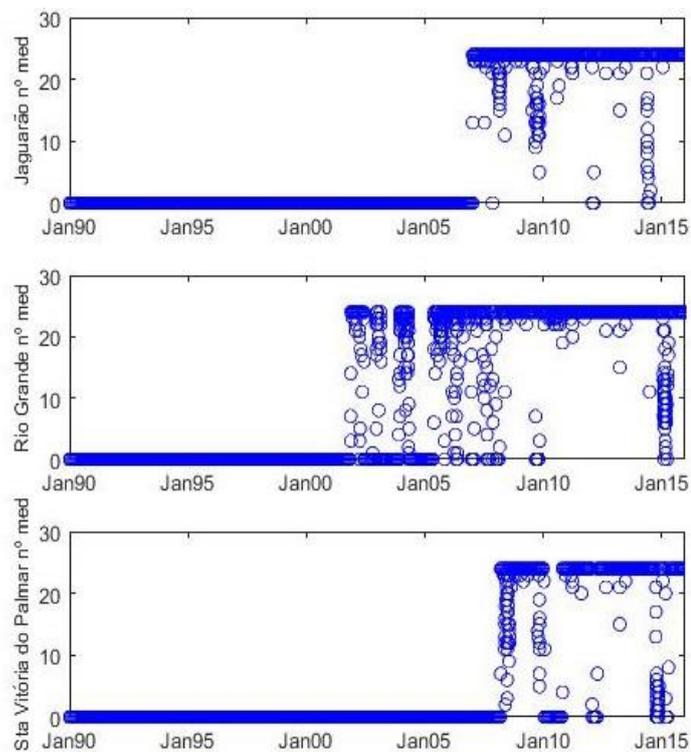


Figura 22 - Disponibilidade de dados por estação por dia.

Observa-se que as estações com medições diárias disponibilizam uma quantidade de dados inferiores às estações com medições sub-diárias, sendo que as situadas em Rio Grande e Santa Vitória do Palmar também compreendem uma disponibilidade limitada de dados nas estações automáticas.

4.6.2 Processamento dos dados de vento

O preenchimento de falhas dos dados de velocidade e direção do vento horário foi realizado através do software Matlab enquanto o do vento sub-diário foi através do software Excel. Para preencher às falhas de velocidade do vento sub-diário, foi realizado, primeiramente, uma regressão linear com os dados dos horários anteriores e posteriores do mesmo dia. Caso não existisse nenhum dado em um mesmo dia, este era preenchido através das informações do posto mais próximo, podendo ainda ser pelo segundo posto mais próximo caso o primeiro também apresentasse falhas no período analisado. Quando não foi possível preencher as falhas por estes métodos, foi considerado vento com intensidade igual a zero. O uso de dados das outras estações também foi aplicado para preencher as falhas de dados de vento horário.

Após o preenchimento de todos os dados, estes foram interpolados usando o software Matlab para cada minibacia através do método do vizinho mais próximo. Cabe ressaltar que existe a necessidade de trabalhar com passos de tempo sub-diário no módulo de propagação inercial do modelo MGB-IPH, com isso é necessário ter dados em um período de 24h.

4.6.3 Testes de sensibilidade do modelo MGB-IPH com influência do vento

Esta fase foi realizada com o intuito de avaliar a sensibilidade e a aplicação do modelo com a inserção do vento. A análise de sensibilidade buscou contribuir para avaliar o quão sensível os níveis simulados são em relação à mudança do coeficiente de atrito do vento C_D de forma a achar um valor que gerasse os melhores resultados. O modelo foi rodado com os seguintes valores de C_D : 2×10^{-6} , 4×10^{-6} , 1×10^{-5} , 2×10^{-5} e 4×10^{-5} .

No presente estudo, o melhor coeficiente de atrito do vento foi verificado com base no comportamento da vazão de saída do sistema e nos níveis simulados, bem

como nas métricas de desempenho (NS, NSlog, EV, RMSE). Estes testes foram realizados levando em consideração as informações da barragem-eclusa do canal São Gonçalo como condição de contorno de jusante uma vez que com a utilização destas foram observados os melhores níveis simulados. Nestes testes foram empregados dados de vento sub-diários (três vezes ao dia) das estações convencionais e horários das estações automáticas, permitindo a comparação dos níveis simulados empregando a simulação do modelo com cada conjunto de dados.

5 Resultados e discussão

5.1 Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB-IPH sem a inclusão da influência do vento

5.1.1 Métricas de desempenho das vazões simuladas

A Tabela 4 apresenta os resultados das métricas de desempenho NS, NSlog e ΔV do modelo MGB-IPH em relação às vazões simuladas. Em geral, o modelo apresentou um bom desempenho, sendo o NS maior que 0,5 para a maioria dos postos. São estes, no lado Uruguaio, Puente Ruta 8 (Vieja), Picada de Corbo, Paso Borches e Paso Dragon e, no Brasil, Picada da Areia, Pedro Osório, Passo dos Carros e Ponte Cordeiro de Farias.

Nos postos Vergara, India-Muerta, Puente R.13, Passo Del Avestruz e Passo Averías, localizados no Uruguai, o modelo apresentou um baixo desempenho em relação às vazões de pico, tendo bons resultados apenas na simulação das vazões de base no posto Vergara e Passo Del Avestruz. Isto pode estar associado à menor resolução do mapa de URH na região do Uruguai ou à uma menor disponibilidade de dados das estações pluviométricas na região. Ainda, pode haver dados incorretos quanto às medições fluviométricas.

Tabela 4 - Postos fluviométricos e suas métricas de desempenho para o período de 1990 à 2015.

Código	Nome	Rio	NS	Nslog	ΔV (%)
10	Puente Ruta 8 (Vieja)	Río Olimar Grande	0.529	0.623	3.514
14	Picada de Corbo	Río Cebollatí	0.602	0.681	4.717
15	Paso Averías	Río Cebollatí	0.407	0.633	-7.422
96	Paso Borches	Río Tacuarí	0.646	0.681	9.253
97	Paso Dragón	Río Tacuarí	0.619	0.623	9.915
100	Paso Centurión	Río Yaguarón	0.275	0.551	18.569
109	Vergara	Arroyo Parao	0.345	0.535	-4.761
111	India Muerta-Puente R.13	Arroyo India Muerta	0.175	0.228	-17.013
128	Paso Del Avestruz	Arroyo Del Aiguá	0.216	0.569	-46.688
88220000	Picada da Areia	Rio Jaguarão	0.587	0.625	-6.038
88575000	Cerro Chato	Arroio Basílio	0.392	0.642	-47.577
88641000	Pedro Osório	Rio Piratini	0.585	0.692	18.341
88750000	Passo dos Carros	Arroio Fragata	0.572	0.609	3.007
88850000	Ponte Cordeiro de Farias	Arroio Pelotas	0.579	0.442	27.048
Média			0.47	0.58	-2.51
Máximo			0.65	0.69	27.05
Minimo			0.18	0.23	-47.58

NS: Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; NSlog: Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões; ΔV : Erro de volume (%). Estatística calculada com base nos valores absolutos.

Em relação aos valores de NSlog (Figura 23), nota-se que o modelo apresentou um bom desempenho na maioria dos postos (mais de 60%) da bacia Mirim-São Gonçalo, com valores médios de 0,58. Tais valores apresentaram-se melhores do que os valores de NS e indicam um bom ajuste das vazões mínimas.

Também é mostrado um bom desempenho do modelo em ambos os postos no rio Tacuarí, com valores superiores a 0,6. Já os postos localizados nos rios Arroyo India Muerta e Arroio Pelotas tiveram valores insatisfatórios de NSlog, provavelmente devido à menor quantidade de dados pluviométricos disponíveis nestas estações ou até mesmo pela incapacidade do modelo de representar a região por ausência de algum processo que ocorra neste ambiente.

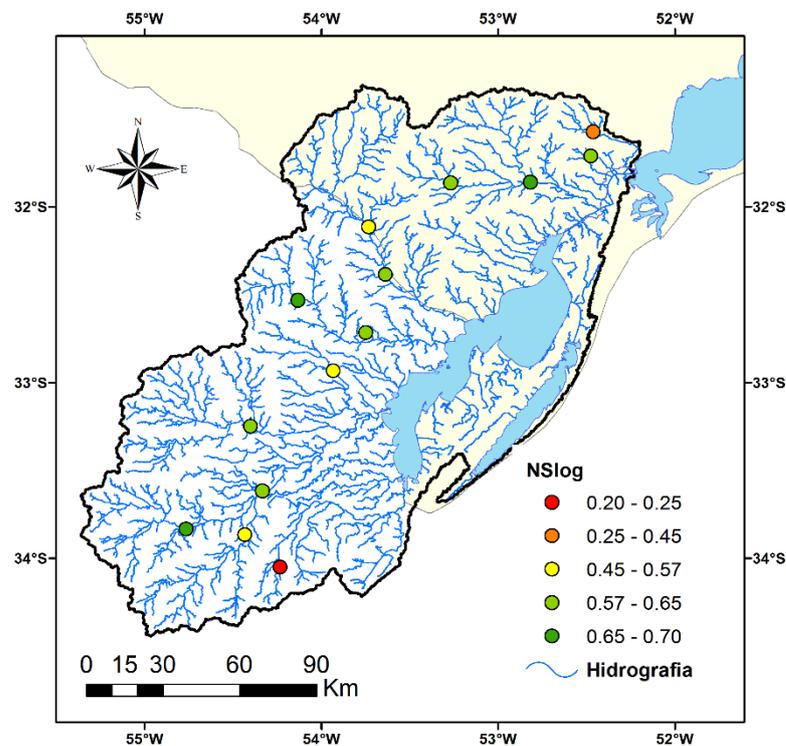


Figura 23- Valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) do logaritmo das vazões.

A Figura mostra os valores de erro do volume (ΔV). Os melhores resultados de ΔV foram os valores entre -10% e 10%. Os maiores erros ocorreram nos postos dos rios Arroyo Del Aiguá (-46,88%), Arroio Basílio (-47,77%) e Arroio Pelotas (27,04%). Percebe-se que, de maneira geral, o modelo apresentou um bom desempenho para esta métrica.

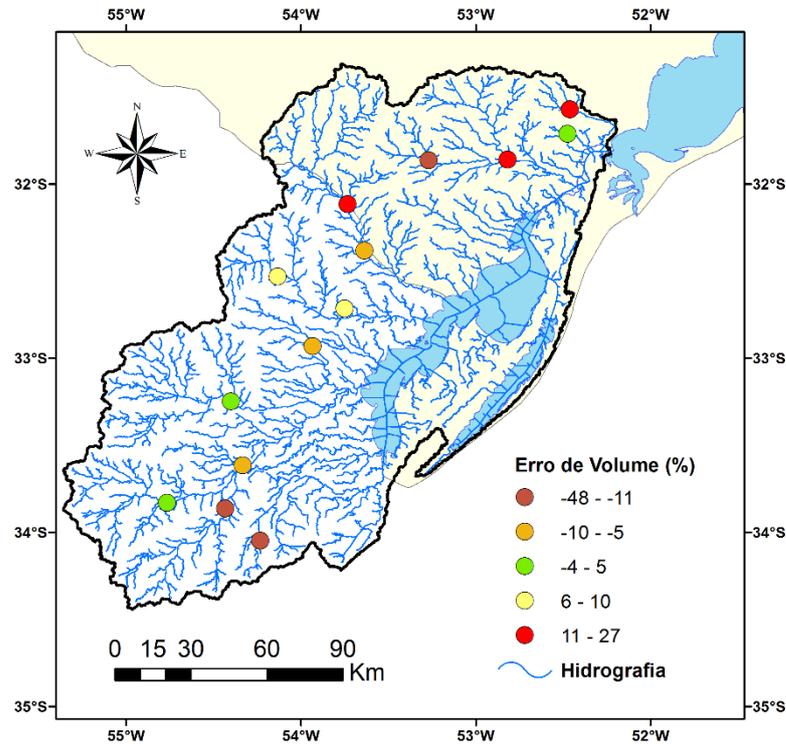


Figura 24- Valores do erro do volume (%).

5.1.2 Hidrogramas calibrados

A Figura 25 apresenta os hidrogramas observados e simulados nos rios Olimar Grande e Cebollatí e a Figura 26 nos rios Tacuarí e Arroyo India Muerta da bacia Mirim-São Gonçalo no período com dados entre 1990 e 2015. Verifica-se a subestimativa dos picos de vazão no rio Olimar Grande, embora o mesmo tenha apresentado uma boa concordância com as vazões de base, a partir dos resultados obtidos nas métricas de desempenho.

Os picos dos hidrogramas simulados do rio Cebollatí (Figuras 25b e 25c) ficaram subestimados em relação aos observados. Observa-se ainda, nos períodos de recessão, que o ajuste do modelo foi satisfatório na calibração, o que evidencia o bom desempenho do mesmo na simulação de vazões mínimas.

Entretanto, verifica-se também nos hidrogramas que o posto fluviométrico Picada de Corbo (Figura 25b) representa melhor o regime hidrológico, tanto para os picos de vazão quanto para a vazão de base, quando comparado com o hidrograma do posto Paso Averías (Figura 25c) no mesmo período da calibração, refletindo em índices de NS e NSlog melhores.

O rio Tacuarí é um outro importante contribuinte da bacia Mirim-São Gonçalo. Observando as Figuras 26d e 26e, verifica-se que as mesmas apresentam comportamento similar entre elas, havendo nos dois postos fluviométricos uma ótima correlação entre os dados observados e simulados com o modelo. Nota-se também que o modelo obteve boa representação na maioria das datas, entretanto, em outras o desempenho continua prejudicado podendo ser devido a difícil execução da calibração em função da menor quantidade de dados de chuva na região sul da bacia, no lado do Uruguai. A vazão simulada pelo modelo depende diretamente da chuva que incide sobre a bacia, ou seja, isso faz com que quanto maior a quantidade de postos disponíveis nesta região, maior seja a capacidade do modelo de representar a chuva que comprovadamente incidiu sobre a bacia.

O rio Arroyo India Muerta está situado no Departamento de Rocha, no Uruguai. Ao analisar o hidrograma observado (Figura 26f) é possível verificar um número elevado de vazões de pico entre 1993 e 1996 devido à intensa concentração da precipitação nestes anos, o que torna difícil o ajuste do modelo em função da resposta mais rápida da bacia aos eventos consecutivos de precipitação. Verifica-se também nos hidrogramas, a superestimava das vazões mínimas. Provavelmente o mau ajuste observado, tanto para as vazões mínimas como para as máximas, seja novamente pela menor quantidade de dados de chuva nas áreas de abrangência da bacia hidrográfica, na porção uruguaia.

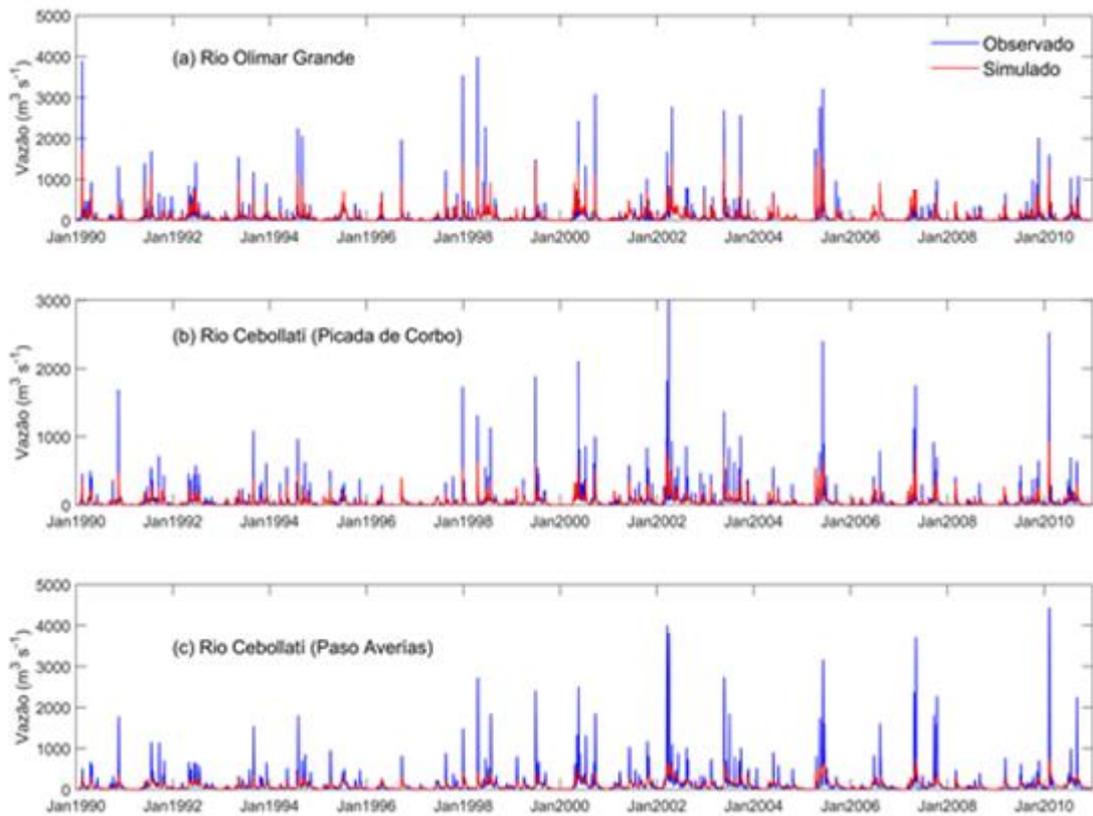


Figura 25 - Hidrogramas observados e simulados nos rios Olimar Grande e Cebollati da bacia Mirim-São Gonçalo no período com dados entre 1990 e 2015.

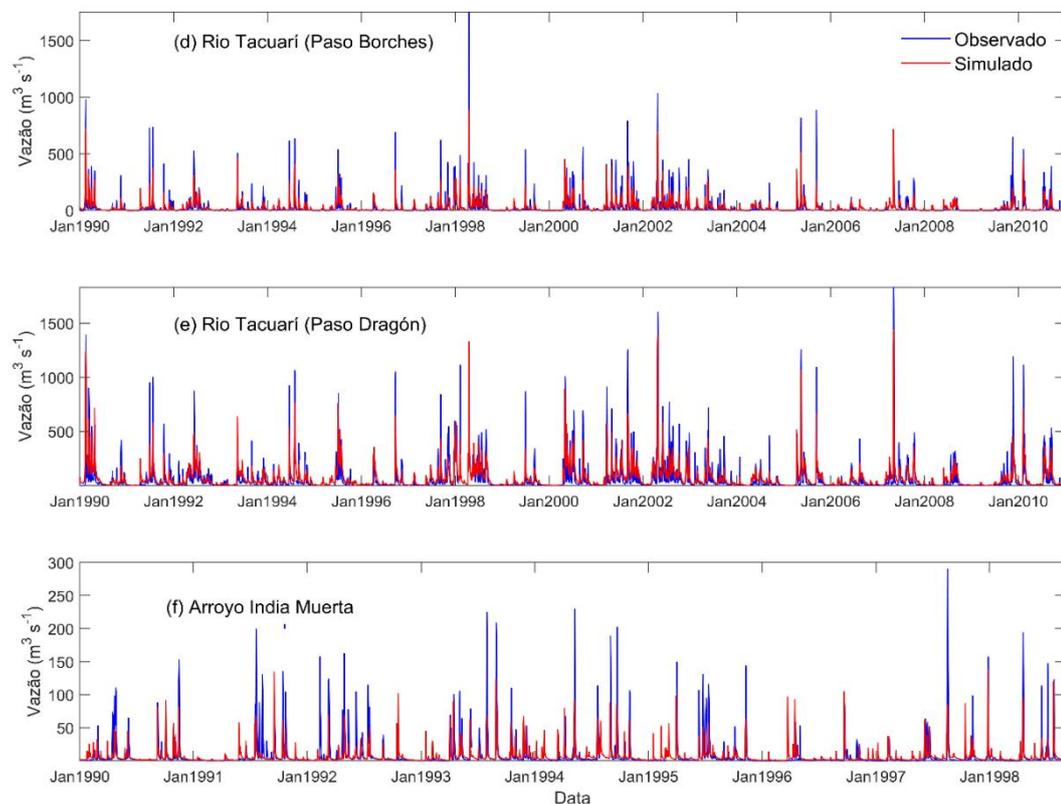


Figura 26 - Hidrogramas observados e simulados nos rios Tacuarí e Arroyo India Muerta da bacia Mirim-São Gonçalo no período com dados entre 1990 e 2015.

A Figura 27 apresenta os hidrogramas observados e simulados nos rios Jaguarão e Piratini da bacia Mirim-São Gonçalo no período com dados entre 1990 e 2015. Na porção brasileira os principais afluentes da bacia são os rios Piratini e Jaguarão, situados na margem esquerda (HARTMANN et al., 1986). O rio Jaguarão divide os municípios de Jaguarão, no Brasil, e Rio Branco, no Uruguai. Constatou-se, através da observação dos hidrogramas (Figura 27a), que a vazão de pico está subestimada e que a ascensão é tipicamente mais rápida que a recessão. Em contrapartida observa-se que mesmo com a escassez de dados de chuva na região, o modelo utilizado representou de forma satisfatória as vazões em períodos de secas com uma razoável concordância entre os hidrogramas simulado e observado.

O rio Piratini deságua no canal São Gonçalo e é considerado um dos principais elementos de controle da vazão do canal em direção a Laguna dos Patos (HARTMANN; HARKOT, 1990). Observa-se uma boa correlação entre os valores observados e simulados no rio Piratini, tanto para as vazões de base como para as de picos, o que demonstra ser um resultado positivo em função da importância que este rio representa para o sistema lagunar Mirim-Patos.

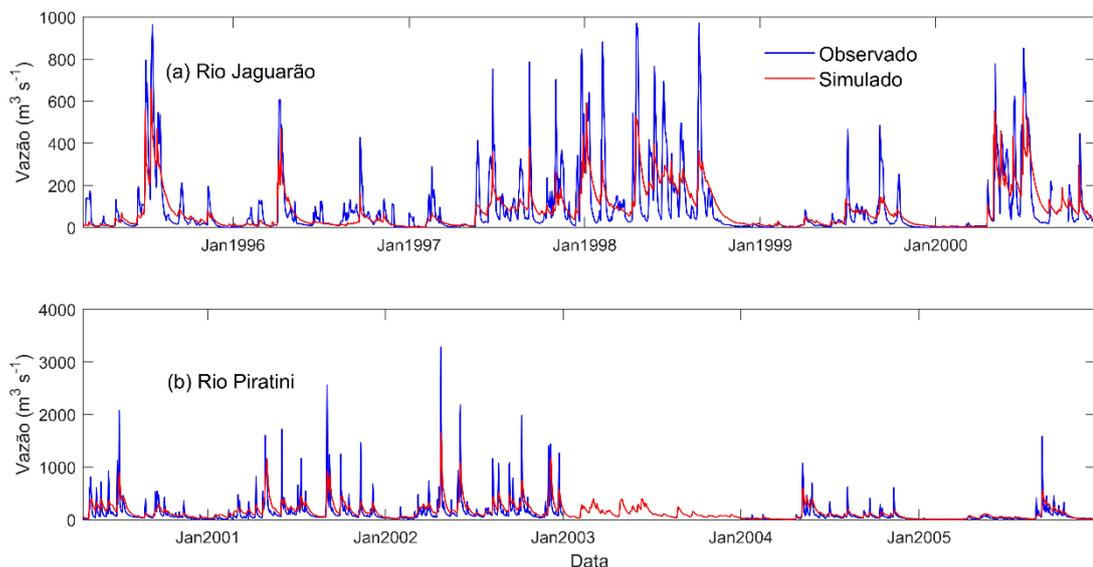


Figura 27 - Hidrogramas observados e simulados nos rios Jaguarão e Piratini no período com dados entre 1990 e 2015.

5.1.3 Período de Calibração: Níveis d'água simulados e observados

5.1.3.1 Métricas de desempenho

A Tabela 5 mostra os valores das métricas de desempenho (NS, NSlog, ΔV , RMSE) utilizados na avaliação da comparação entre as anomalias dos níveis simulados e observados de cada posto meteorológico. Os resultados das simulações indicaram que o MGB-IPH em determinados postos representou corretamente os níveis d'água e em outros não.

Tabela 5 - Métricas de desempenho da comparação entre as anomalias dos níveis simulados e observados nos postos meteorológicos.

Postos	NS	NSlog	ΔV (%)	RMSE
Picada da Areia	0,47	0,46	1,11E-13	0,79
Cerro Chato	0,44	0,47	-2,44E-13	0,38
Pedro Osório	0,70	0,74	1,11E-13	0,59
Passo dos Carros	0,62	0,63	2,22E-13	0,31
Santa Isabel	0,72	0,41	-3,22E-13	0,47
Santa Vitória do Palmar	0,67	0,20	1,67E-12	0,53
Porto de Pelotas	-0,22	-0,08	-1,67E-13	0,32
Barragem-eclusa jusante	-0,15	-2,00	1,78E-13	0,45
Barragem-eclusa montante	-0,02	-1,70	-3,66E-13	0,43
Média	0,25	-0,63	1,33E-13	0,42

NS: Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; NSlog: Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões; ΔV : Erro de volume (%); RMSE: Raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos desvios (m).

Os valores de NS nos postos oscilaram entre 0,4354 a 0,7197, sem considerar os postos a jusante, a montante da barragem-eclusa do canal São Gonçalo e do Porto de Pelotas, que apresentaram os piores resultados. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que importantes corpos hídricos afluem diretamente para a Lagoa Mirim, onde o escoamento acontece apenas pelo canal São Gonçalo. Em função disso, a não observação no presente estudo das regras e agenda de operação das 18 comportas que compõe a barragem-eclusa disposta na parte norte do canal São Gonçalo, que impedem a intrusão de água no sentido Patos-Mirim, por não corresponder ao objetivo proposto, pode levar a reprodução dessas oscilações.

Os melhores resultados de NSlog foram observados nos postos de Cerro Chato, Pedro Osório e Passo dos Carros. Os valores de RMSE oscilaram de 0,7895m no posto Picada de Areia a 0,3118m em Passo dos Carros.

Samboní (2017) também encontrou valores que se enquadram na mesma faixa que os resultados apresentados neste estudo. O autor com o MGB-IPH acoplado com

o modelo hidrodinâmico IPH-ECO simulou a bacia e os principais componentes hidrodinâmicos da Lagoa Mirim. Os resultados de NS, ΔV e RMSE obtidos por Samboní (2017) demonstram que o nível da água foi bem representado, no entanto, com desempenho levemente maior. Valores de NS de 0,90 para a estação de Santa Isabel e 0,91 para Santa Vitória do Palmar foram obtidos com o RMSE variando entre 0,321 a 0,355 e o ΔV entre -0,32 a -0,10.

5.1.3.2 Cotagramas

Nas Figura 28 a Figura 36 são apresentados os cotagramas dos níveis observados e simulados para as fases de calibração em cada estação.

Observou-se que da simulação dos níveis do posto Picada da Areia, apresentada na Figura 28, às do Porto de Pelotas, na Figura 34, o modelo apresentou uma boa representação dos níveis observados através das anomalias simuladas, com melhores resultados no período de estiagem nessas estações, que se localizam fora da Lagoa (Picada da Areia, Cerro Chato, Pedro Osório e Passo dos Carros). No período de cheia, a maioria dos eventos extremos destas estações foram subestimados, com exceção de Porto de Pelotas.

As estações próximas à Lagoa Mirim apresentaram forte ruído na simulação, possivelmente em virtude de ser um ambiente de baixa declividade com um grande número de afluentes que ocasiona flutuações das direções de escoamento. Já nas estações à montante e jusante da barragem-eclusa (Figura 35 e 36) a falha na correta representação dos níveis pode ser explicada pela mudança no tipo de ambiente de lagoa para um canal e pelas interações que acontecem com a Laguna dos Patos logo em seguida, com as oscilações de níveis desta podendo afetar os níveis do canal São Gonçalo. Ainda, a ausência da simulação do vento na bacia pode ser um fator que afeta negativamente os resultados nas estações no entorno da Lagoa Mirim e no canal São Gonçalo.

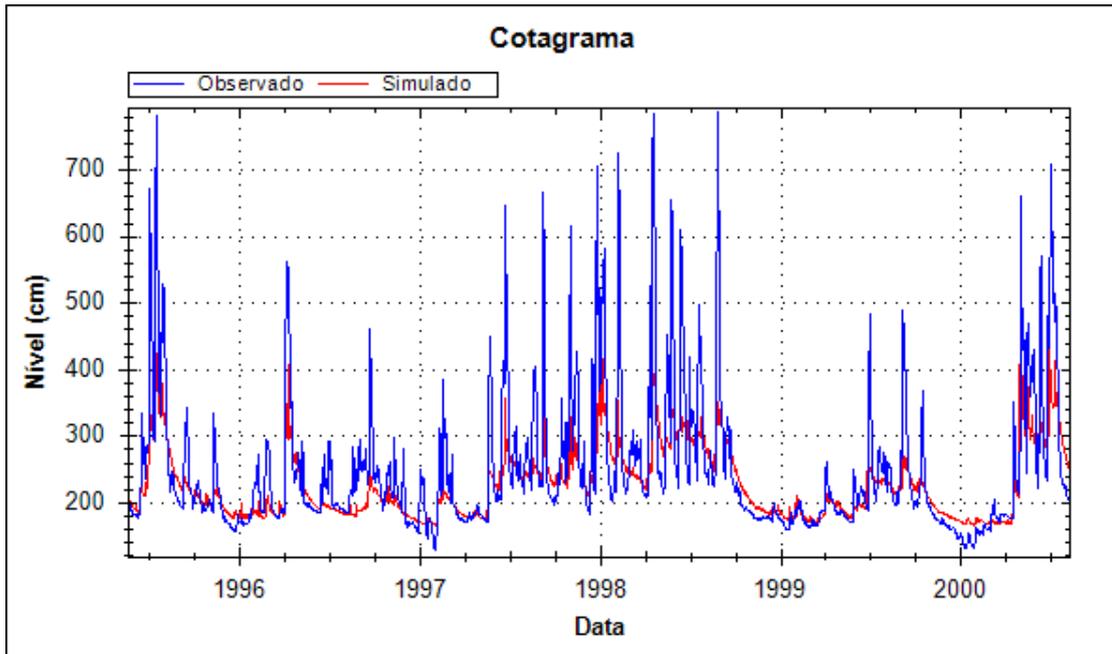


Figura 28 - Cotogramas de níveis observados na estação Picada da Areia e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.

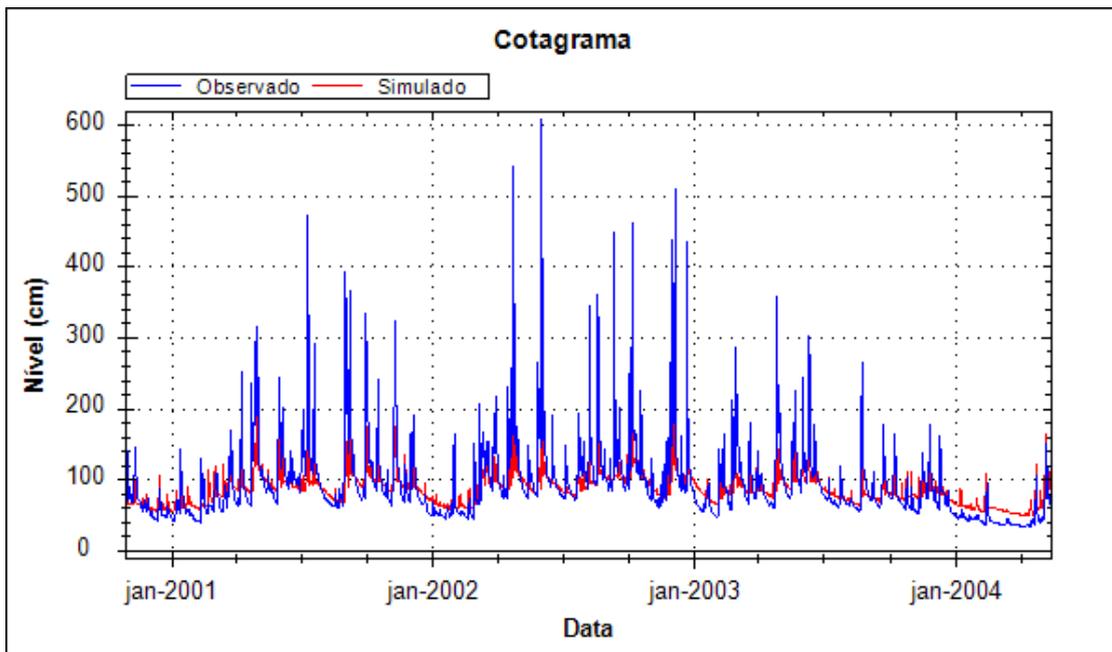


Figura 29 - Cotogramas de níveis observados na estação de Cerro Chato e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.

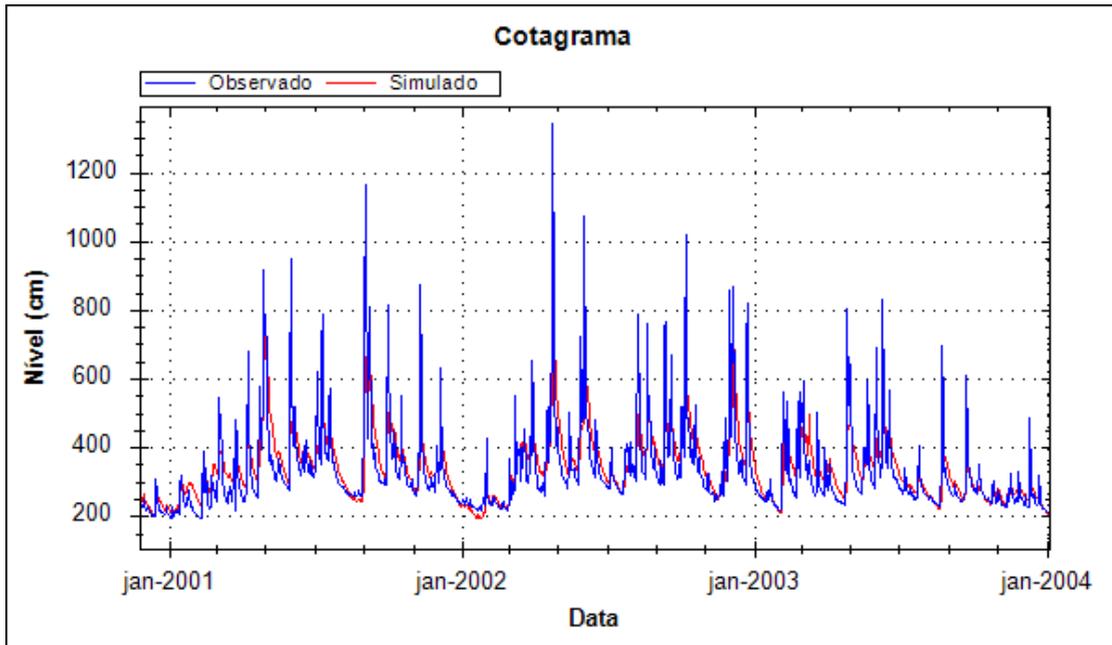


Figura 30 - Cotogramas de níveis observados na estação de Pedro Osório e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.

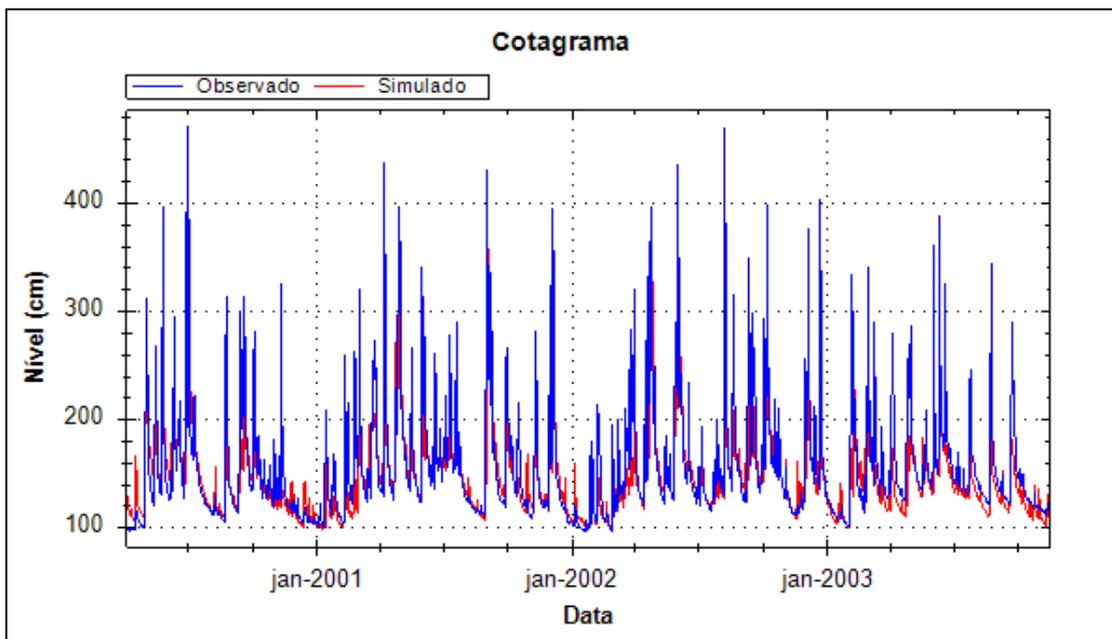


Figura 31 - Cotogramas de níveis observados na estação de Passo dos Carros e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.

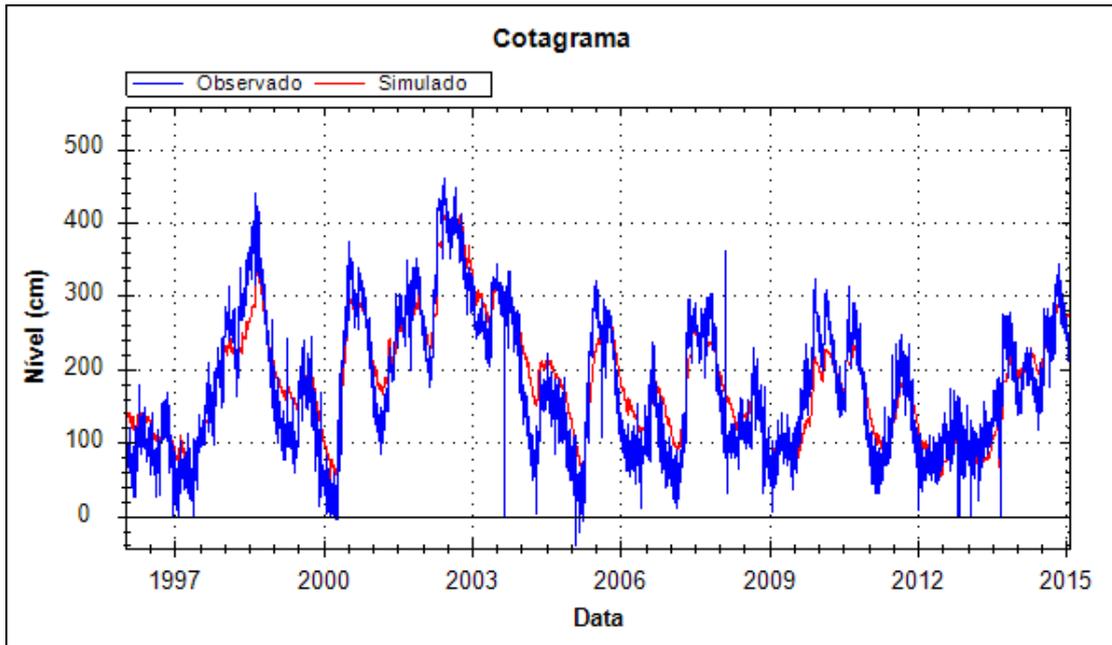


Figura 32 - Cotogramas de níveis observados na estação de Santa Isabel e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.

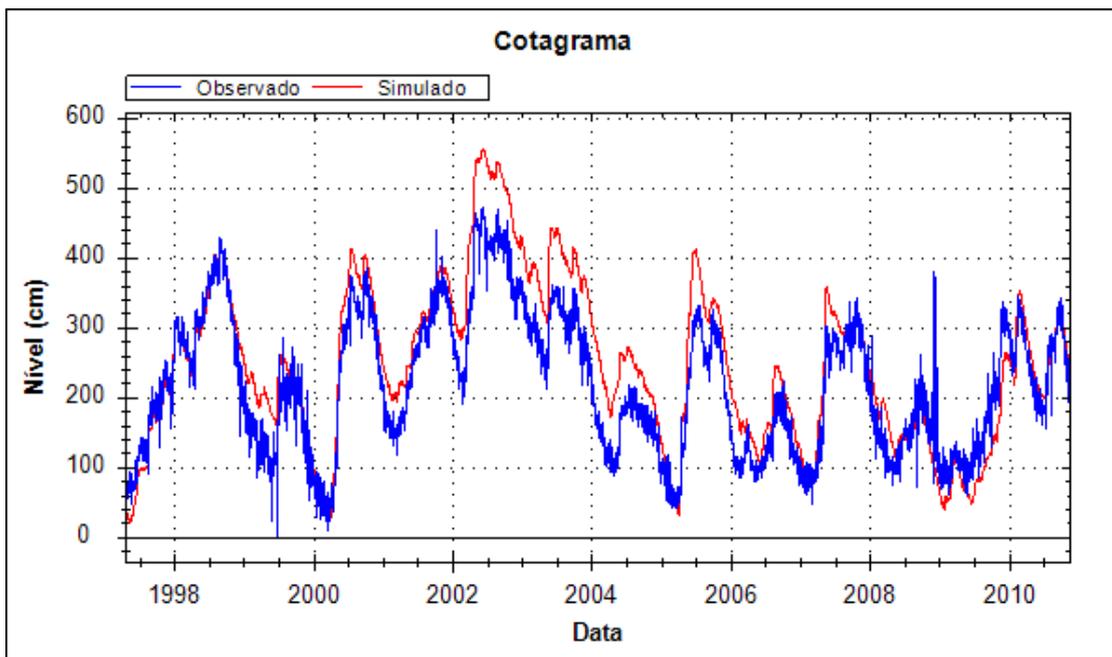


Figura 33 - Cotogramas de níveis observados na estação de Santa Vitória do Palmar e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.

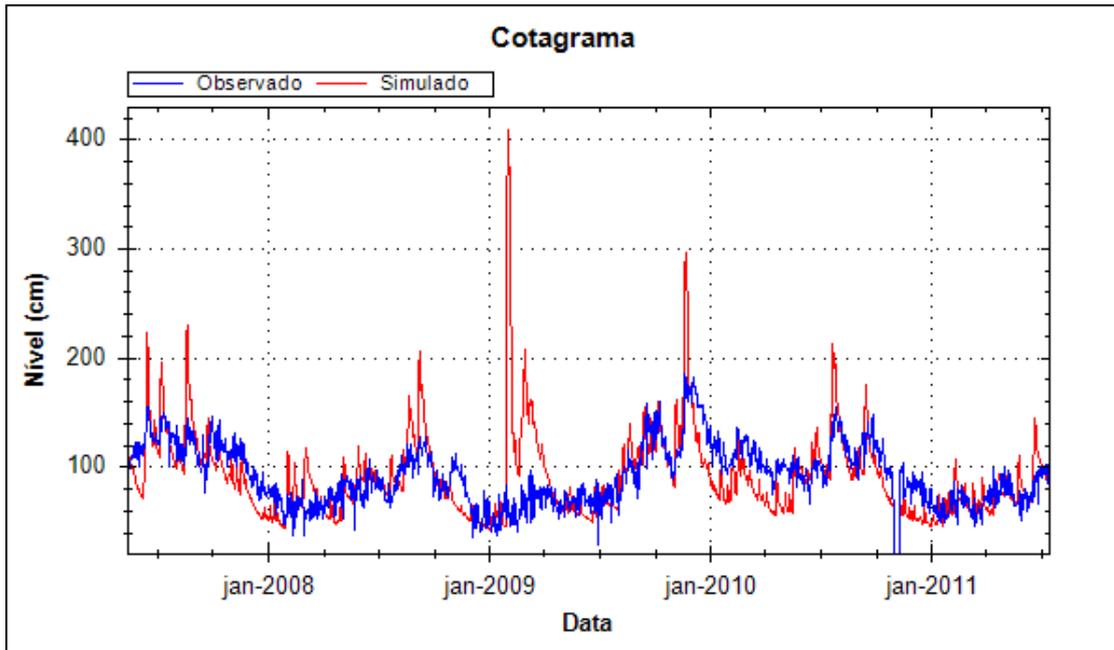


Figura 34 - Cotogramas de níveis observados na estação do Porto de Pelotas e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.

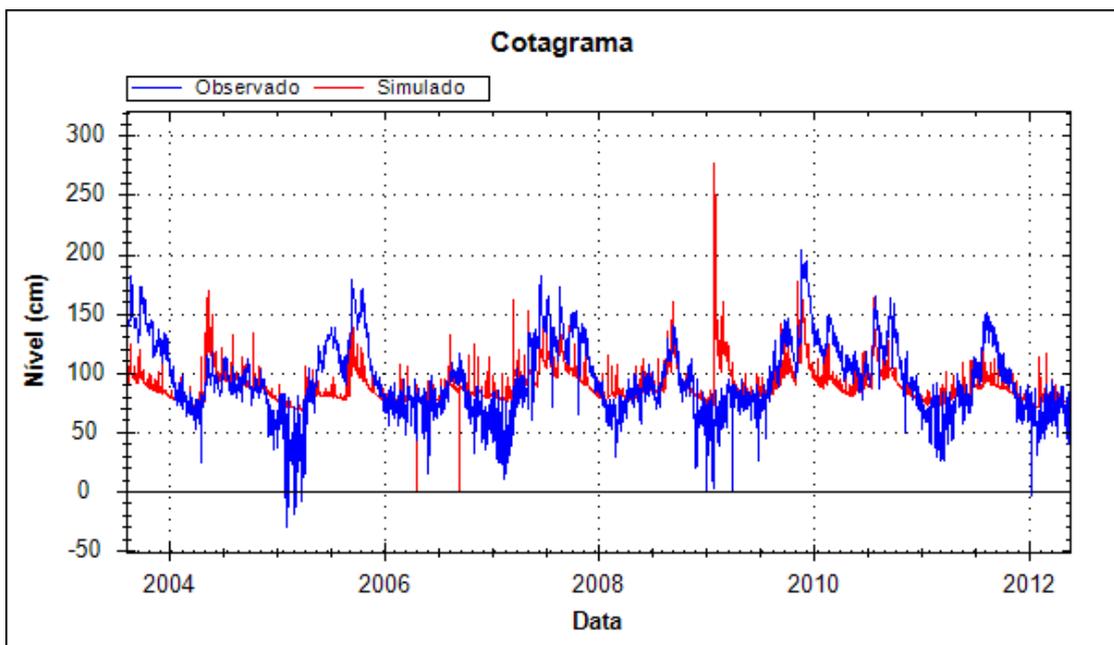


Figura 35— Cotogramas de níveis observados na estação à montante da barragem-eclusa do canal São Gonçalo e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.

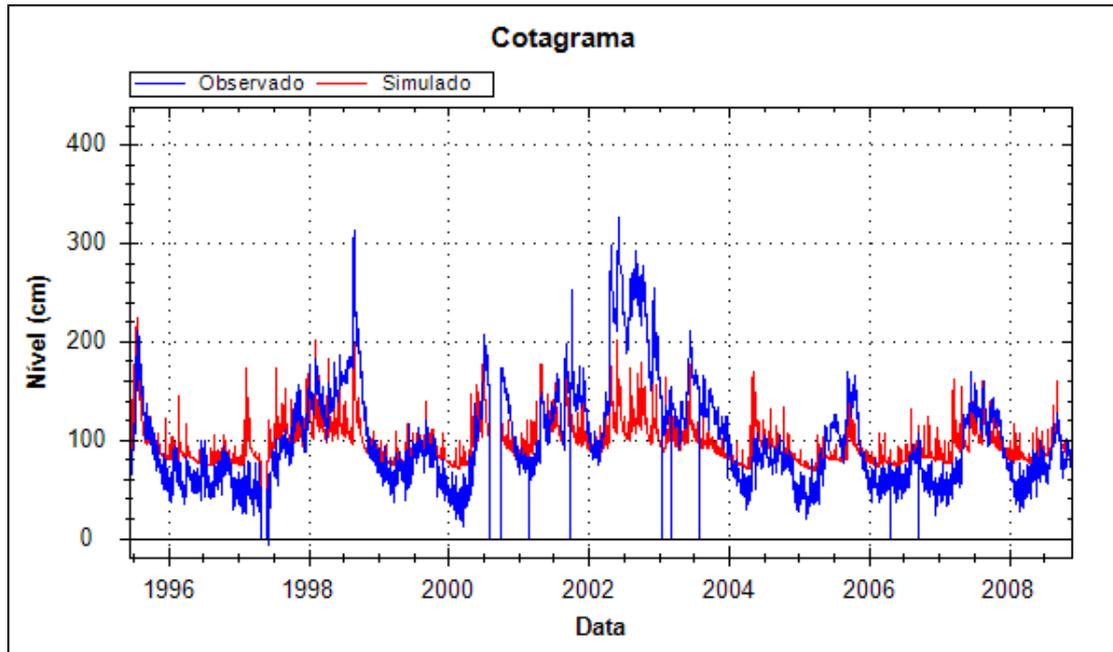


Figura 36 - Cotogramas de níveis observados na estação à jusante da barragem-eclusa do canal São Gonçalo e anomalias simuladas na minibacia onde se localiza.

5.2 Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB - IPH com conexões laterais

5.2.1 Análise de sensibilidade à largura das conexões laterais

Pode-se observar nas Tabela 6 e Tabela 7 os valores das métricas de desempenho (NS e NSlog) dos níveis observados e anomalias simuladas para os diferentes valores de larguras de conexões laterais. De acordo com os valores de NS e NSlog, pode-se perceber que para as estações à montante e jusante da barragem-eclusa os melhores resultados das métricas de desempenho ocorreram quando utilizados os valores de 10m. Valores de NS de 0,250 para a estação à montante da barragem-eclusa e 0,160 para estação à jusante da barragem-eclusa foram obtidos enquanto o NSlog para as mesmas foi de -0,181 e -0,468 respectivamente.

Para as demais os melhores resultados de NS foram observados para as larguras de 500 e 1000m, o que indica que não existe um único valor que resulte nos mesmos valores para todas as estações, simultaneamente. Percebe-se que a métrica NSlog apresentou valores melhores para a largura de 1000m no posto de Santa Isabel (0,463) e para 500m em Santa Vitória (0,792).

Tabela 6 - Nash-Sutcliffe para diferentes larguras de conexões laterais. Melhores valores das métricas para cada posto encontram-se destacado em verde.

NS	Largura das conexões laterais (b)							
	10m	25m	50m	100m	150m	250m	500m	1000m
Postos								
Barragem-eclusa montante	0,250	0,234	0,215	0,184	-0,022	0,121	0,059	-0,010
Barragem-eclusa jusante	0,160	0,144	0,124	0,093	-0,147	0,026	-0,035	-0,103
Santa Isabel	0,656	0,669	0,685	0,705	0,600	0,736	0,757	0,773
Santa Vitória	0,779	0,793	0,807	0,822	0,664	0,837	0,841	0,836
Porto	-0,192	-0,192	-0,191	-0,191	-0,218	-0,190	-0,189	-0,189

NS: Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; NSlog: Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões; ΔV : Erro de volume (%); RMSE: Raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos desvios (m).

Tabela 7 - NSlog para diferentes larguras de conexões laterais. Melhores valores das métricas para cada posto encontram-se destacado em verde.

NSlog	Largura das conexões laterais (b)							
	10m	25m	50m	100m	150m	250m	500m	1000m
Postos								
Barragem-eclusa montante	-0,181	-0,203	-0,228	-0,268	-1,699	-0,346	-0,417	-0,480
Barragem-eclusa jusante	-0,468	-0,491	-0,518	-0,559	-2,003	-0,642	-0,715	-0,778
Santa Isabel	0,328	0,340	0,357	0,379	-1,316	0,415	0,440	0,463
Santa Vitória	0,663	0,695	0,724	0,753	0,199	0,783	0,792	0,790
Porto	-0,055	-0,055	-0,055	-0,053	-0,078	-0,054	-0,054	-0,055

NS: Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; NSlog: Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões; ΔV : Erro de volume (%); RMSE: Raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos desvios (m).

Nas Tabela 8 e Tabela 9 são apresentados os valores das métricas de desempenho (ΔV e RMSE) dos níveis observados e anomalias simuladas para os diferentes valores de larguras de conexões laterais. Percebe-se que, para as estações barragem-eclusa montante e Porto, os melhores resultados de ΔV ocorreram quando utilizados os valores de 500m. Já nas estações Santa Isabel e Santa Vitória o melhor valor de largura para o ΔV foi de 50m. Quando utilizados valores de 250m, ocorreu uma melhora para a métrica RMSE nos postos de Santa Isabel, Santa Vitória e Porto.

Tabela 8 - Erro do volume para diferentes larguras de conexões laterais. Melhores valores das métricas para cada posto encontram-se destacado em verde.

ΔV (%)	Largura das conexões laterais (b)							
	10m	25m	50m	100m	150m	250m	500m	1000m
Postos								
Barragem-eclusa montante	-2,4E-13	-6,1E-13	7,8E-13	2,7E-13	-3,7E-13	-1,4E-12	8,9E-14	-4,1E-13
Barragem-eclusa jusante	-3,0E-13	-6,1E-13	8,4E-13	2,2E-13	1,8E-13	-1,4E-12	3,8E-13	-5,7E-13
Santa Isabel	-1,6E-13	2,0E-13	2,2E-14	2,4E-13	-2,7E-13	1,1E-13	-1,3E-13	-2,6E-13
Santa Vitória	-8,0E-13	-3,9E-13	-2,4E-13	-3,6E-13	1,7E-12	-4,6E-13	-8,4E-13	8,2E-13
Porto	-3,6E-13	1,1E-13	4,4E-14	-3,4E-13	-1,7E-13	-1,2E-13	2,2E-14	2,7E-13

NS: Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; NSlog: Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões; ΔV : Erro de volume (%); RMSE: Raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos desvios (m).

Tabela 9 - RMSE para diferentes larguras de conexões laterais. Melhores valores das métricas para cada posto encontram-se destacado em verde.

RMSE (m)	Largura das conexões laterais (b)							
	10m	25m	50m	100m	150m	250m	500m	1000m
Barragem-eclusa montante	0,373	0,377	0,382	0,389	0,435	0,404	0,418	0,433
Barragem-eclusa jusante	0,389	0,393	0,397	0,404	0,455	0,418	0,432	0,446
Santa Isabel	0,517	0,507	0,494	0,478	0,557	0,452	16,785	15,012
Santa Vitória	0,430	0,416	0,402	0,386	0,530	0,369	13,453	12,655
Porto	0,322	0,322	0,322	0,322	0,326	0,321	7,956	7,365

NS: Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; NSlog: Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões; ΔV : Erro de volume (%); RMSE: Raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos desvios (m).

Para definir o melhor valor de largura de conexão efetiva foi determinada a média de todos os valores das medidas de desempenho em cada estação, conforme mostra a Tabela 10. Na mesma tabela também são apresentados os valores das métricas de desempenho para a simulação sem conexão lateral.

Tabela 10 - Médias das métricas de desempenho para as simulações com e sem conexões laterais. Melhores resultados em verde.

Médias das métricas de desempenho				
Largura da Conexão	NS	NSlog	ΔV	RMSE
Sem conexão lateral	0,2549	-0,6336	1,33E-13	0,4206
10	0,33054	0,05743	-3,71E-13	0,40609
25	0,32978	0,05722	-2,60E-13	0,40286
50	0,32789	0,05579	2,89E-13	0,39949
100	0,32269	0,05012	6,66E-15	0,39593
150	0,17558	-0,97949	2,09E-13	0,46049
250	0,30670	0,03083	-6,39E-13	0,39308
500	0,28663	0,00894	-9,77E-14	7,80854
1000	0,26142	-0,01192	-2,89E-14	7,18196

NS: Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; NSlog: Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões; ΔV : Erro de volume (%); RMSE: Raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos desvios (m).

De acordo com os valores observados, a medida que obteve o melhor incremento com a mudança da largura foram os coeficientes NSlog e RMSE para a largura de 100m. Nesse valor, o coeficiente de Nash-Sutcliffe melhora apenas 0,008 em relação à melhor largura para essa métrica, de 10m. Todos os valores do erro de volume foram extremamente baixos. Assim, foi adotada a largura de 100m para a conexão lateral por ter resultado o melhor incremento geral para as métricas simuladas em todas estações.

A Figura 37 apresenta os hidrogramas simulados no exutório da bacia Mirim-São Gonçalo nas condições sem (azul) e com conexão lateral (vermelho) de 100m.

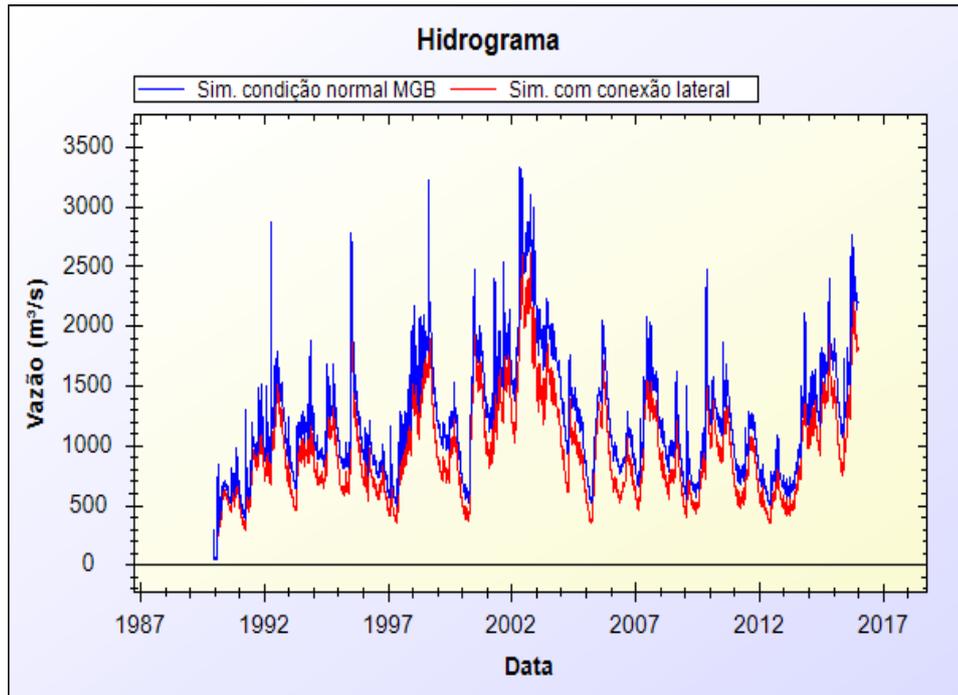


Figura 37 - Vazão simulada na condição de declividade constante de $0,005 \text{ m.km}^{-1}$ (em azul) e com a conexão lateral de 100 (em vermelho) sem a introdução do vento.

Nota-se que, apesar de o comportamento das vazões serem praticamente idênticos em termos de subidas e recessões, a inclusão das conexões laterais levou a vazões mais baixas em todos os intervalos de tempo simulados. Isto pode ser atribuído justamente às trocas laterais que ocorrem entre as minibacias, sem que a água flua diretamente para a minibacia de jusante, comportamento esperado em lagoas. Desta forma pode-se dizer, verificando-se esse comportamento e pelo observado nas estações limimétricas, que as vazões são mais bem representadas após a inclusão das conexões laterais, ainda que não exista no local uma estação fluviométrica que permita essa comprovação diretamente.

5.3 Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB - IPH com as condições de contorno

A fim de avaliar qual condição de contorno adotada gerou os melhores resultados na modelagem hidrológica, foram realizadas as comparações visuais entre as áreas alagadas pelo modelo com as observadas na realidade em imagens de satélite. Na Figura 38 são apresentadas composições das bandas 4, 5 e 6 do satélite Landsat 8 em um dia de estiagem (24/05/2018) e das bandas 3, 4 e 5 do satélite Landsat 5 em um dia de cheia (27/09/2000) para a região do entorno do canal São

Gonçalo. Já as Figuras 39, 40 e 41 mostram as áreas alagadas pelo modelo MGB-IPH para toda a bacia simulada em um dia de estiagem, em 24 de março de 2005 (imagens à direita), e um dia de cheia (imagens à esquerda) em 27 de abril de 2002.

Ao comparar os resultados à imagem apresentada na Figura 38 percebe-se que a inundação foi mais bem representada pelo modelo quando utilizada a condição de jusante da barragem-eclusa (Figura 40), apesar de ter superestimado um pouco no período de seca na região do canal. Nota-se que, em todas as condições de jusante, mesmo em dias de seca, o modelo continuou representando a área alagada da Lagoa Mirim de maneira satisfatória e dentro dos seus limites.

Através da análise visual das figuras pode-se verificar também que o modelo representa as áreas alagadas nas regiões de planícies dos rios Jaguarão, Tacuarí e Cebollatí. Devido ao bom desempenho do modelo na representação das planícies de inundação da Lagoa Mirim e seus afluentes quando considerado a condição de jusante da barragem-eclusa do canal São Gonçalo, pode-se notar a interação do maior complexo lagunar da América do Sul, o Mirim-Patos-Mangueira.

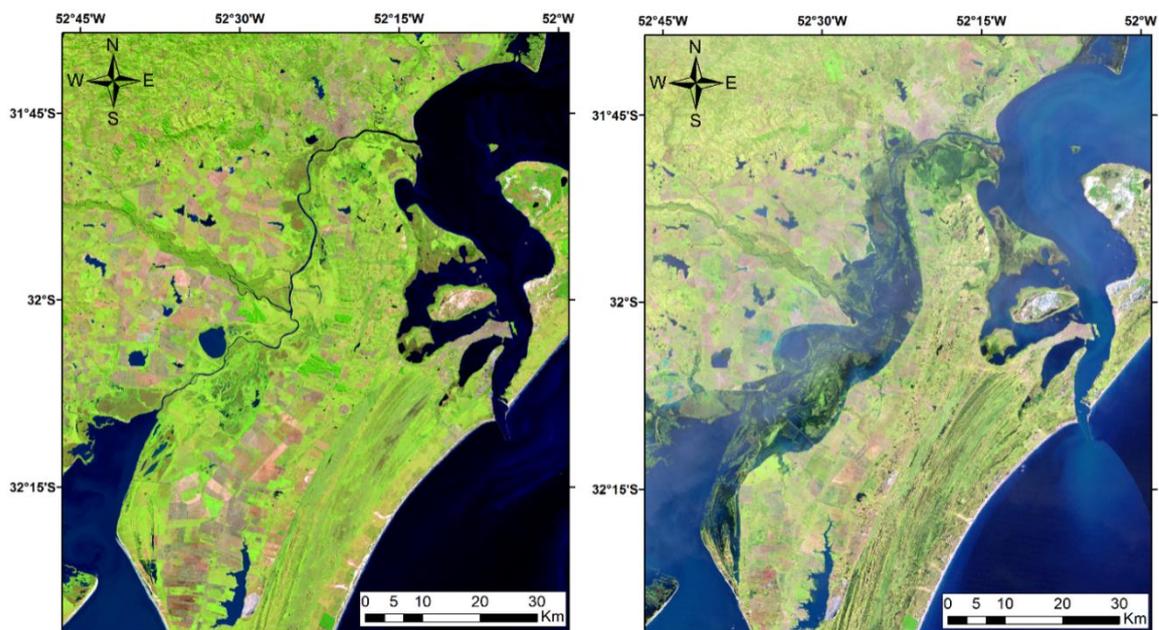


Figura 38 - Área alagada no canal São Gonçalo em um dia de seca (imagem à esquerda) e um de cheia (imagem à direita).

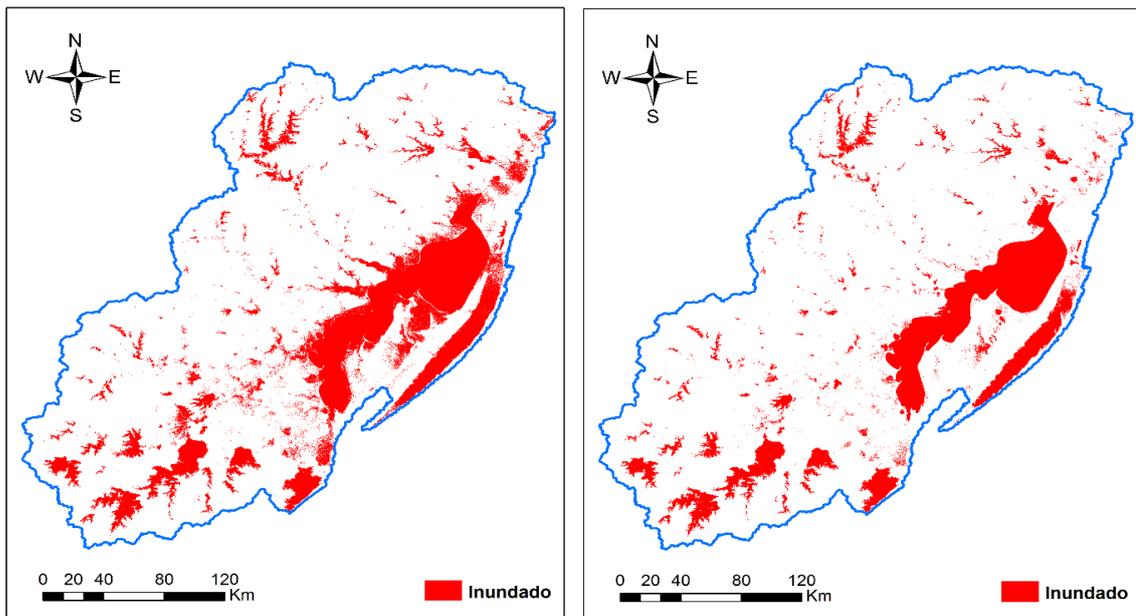


Figura 39 - Comparação área alagada na condição de declividade constante de $0,005 \text{ m.km}^{-1}$ (dia de cheia na imagem à esquerda) e dia de seca (imagem à direita) na Lagoa Mirim e seus afluentes.

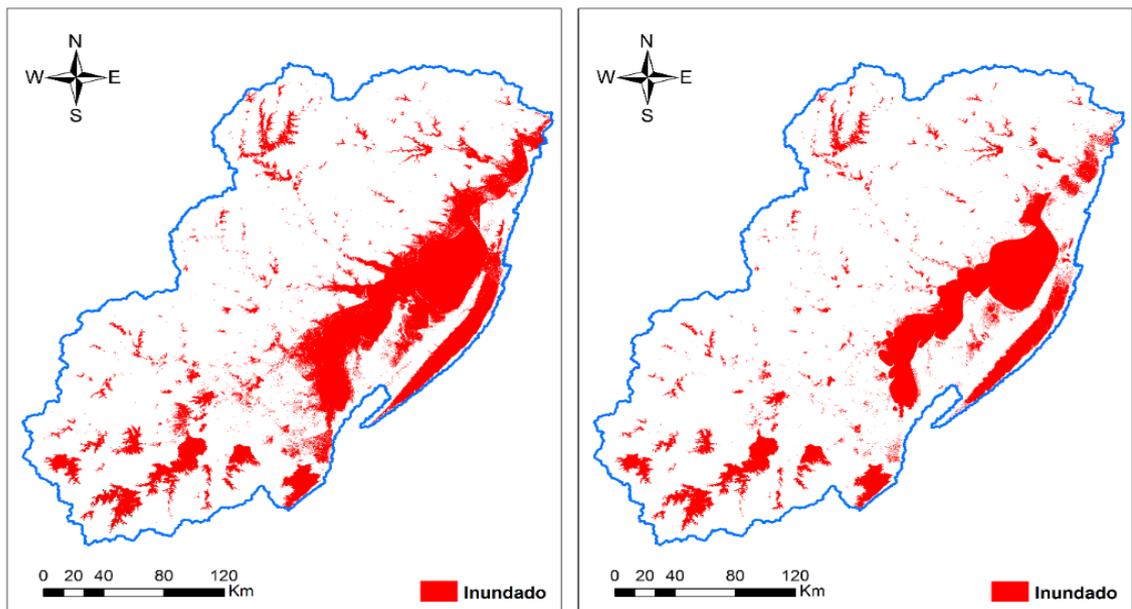


Figura 40 - Comparação área alagada simulada na condição de jusante da barragem-eclusa (dia de cheia na imagem à esquerda) e dia de seca (imagem à direita) na Lagoa Mirim e seus afluentes.

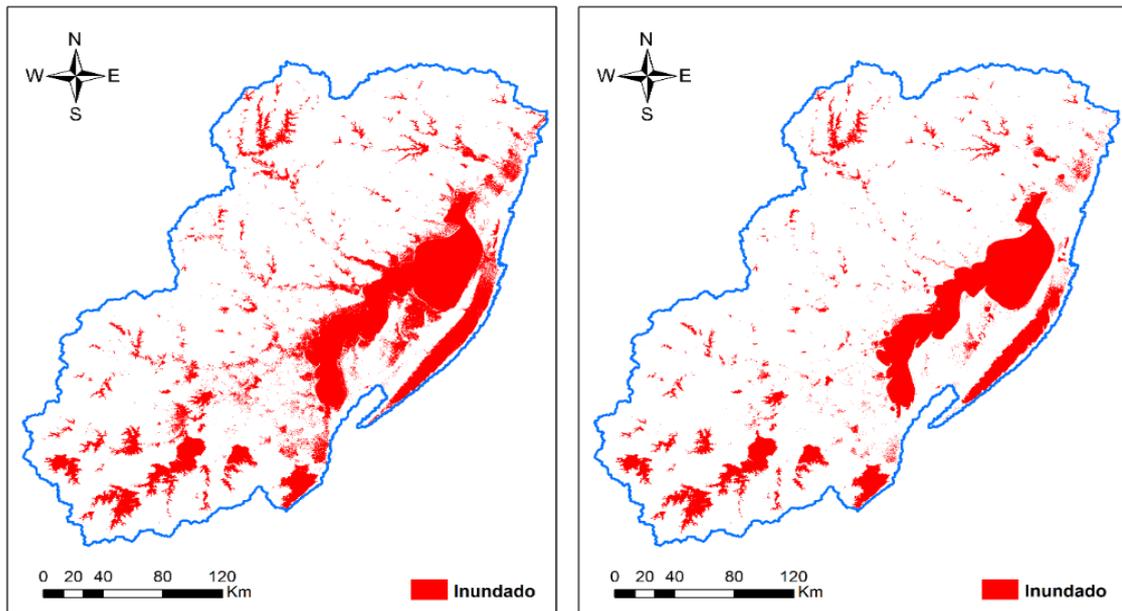


Figura 41 - Comparação área alagada simulada na condição de declividade constante de 20m (dia de cheia na imagem à esquerda) e dia de seca (imagem à direita) na Lagoa Mirim e seus afluentes.

A Tabela 11 apresenta as métricas de desempenho das anomalias dos níveis com a condição de jusante da barragem-eclusa. Observa-se que houve melhoria significativa no NS das estações da barragem-eclusa montante e jusante e Porto quando comparada com as simulações apenas com as conexões laterais. Já nas estações Santa Isabel e Santa Vitória a melhoria não foi tão pronunciada. Em geral, as estações apresentaram um ótimo NSlog com o uso da condição de jusante, também com aumento se comparado com as simulações apenas com as conexões laterais. Isso evidencia a forte influência dos níveis da Laguna dos Patos sobre os níveis da Lagoa Mirim e do canal São Gonçalo.

Tabela 11 - Métricas de desempenho das anomalias dos níveis com a condição de jusante da barragem-eclusa do canal São Gonçalo.

Postos	Condição de jusante da barragem-eclusa do canal São Gonçalo			
	NS	NSlog	$\Delta V(\%)$	RMSE
Barragem-eclusa montante	0,9477	0,9189	1,31E-12	0,0985
Barragem-eclusa jusante	0,9991	0,9991	1,24E-12	0,0125
Santa Isabel	0,7953	0,7394	2,66E-13	0,3983
Santa Vitória	0,8464	0,8122	8,88E-13	0,3584
Porto	0,6515	0,5693	-9,10E-13	0,1742

NS: Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; NSlog: Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões; ΔV : Erro de volume (%); RMSE: Raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos desvios (m).

Cabe ressaltar que os mapas de inundação apresentados foram gerados com a metodologia convencional, sem a utilização do modelo HAND, mais recentemente incorporado ao MGB-IPH. Dessa forma, a fim de avaliar as diferenças entre a máxima e mínima área inundada nas duas técnicas, foram aplicadas as duas metodologias e comparadas ao produto Global Surface Water (GSW).

A Figura 42(a) apresenta o mapa referente a máxima área inundada registrada pelo GSW e a Figura 42(b) representa as áreas inundadas geradas pelo MGB-IPH nas duas técnicas distintas (convencional e HAND) em sobreposição. Através destas é possível constatar a existência de áreas inundadas equivalentes, registradas em ambas as técnicas, ainda que o modelo de terreno HAND apresente maior área inundada, conforme é apresentado na Tabela 12.

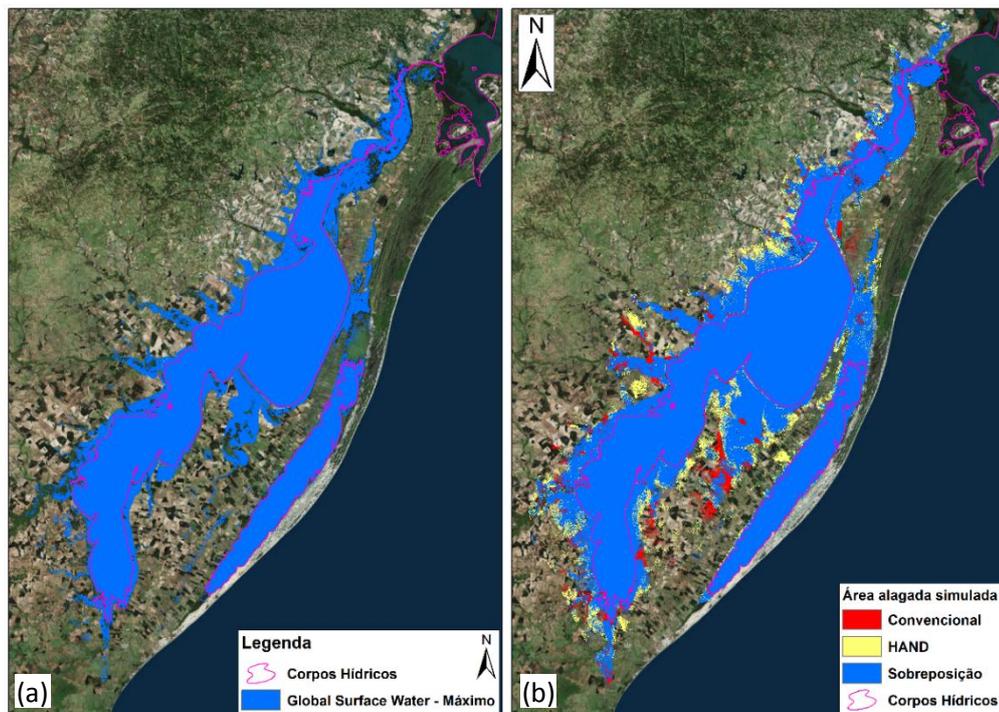


Figura 42—Mapa da máxima área inundada registrado pelo GSW (a); Máximas áreas inundadas calculadas pelo MGB-IPH sobrepostas (b) (convencional e HAND).

A Tabela 12 apresenta a porcentagem de sobreposição destas áreas geradas pelo MGB-IPH em relação ao GSW. Percebe-se que em relação a área total de cada modelo, o convencional apresentou maior porcentagem de sobreposição, de 79.18% contra 74.80% do modelo com a utilização do HAND.

Tabela 12 - Áreas totais da máxima área inundada e porcentagens de sobreposição em relação ao GSW.

Metodologias	Área total (km ²)	Sobreposição (%)
GSW	6942, 550	100
Convencional	8526, 925	79,18
HAND	8977, 157	74,80

A Figura 43(a) mostra a mínima área inundada pelo GSW e a Figura 43(b) as mínimas áreas inundadas geradas pelo MGB-IPH nas duas técnicas distintas (convencional e HAND) em sobreposição. Novamente houve grande sobreposição da área inundada entre as duas técnicas, mas, no entorno do canal São Gonçalo, o uso da metodologia com o uso do HAND alagou menos locais, ficando mais coerente com o produto GSW e o observado nas imagens de satélite. Já ao redor da lagoa, o uso do HAND alagou mais áreas.

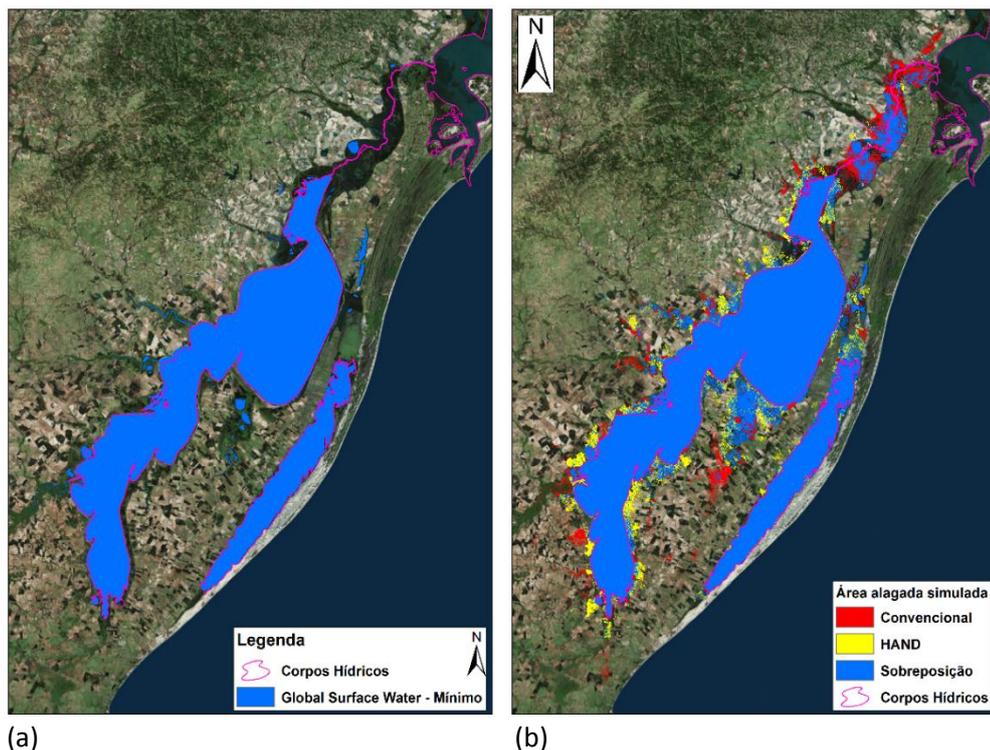


Figura 43 - Mapa da mínima área inundada registrado pelo GSW (a); Mínimas áreas inundadas calculadas pelo MGB-IPH sobrepostas (b) (convencional e HAND).

Dessa forma, ambos tiveram porcentagens semelhantes de sobreposição ao GSW, como mostra a Tabela 13.

Tabela 13 - Áreas totais da mínima área inundada e porcentagens de sobreposição em relação ao GSW.

Metodologia	Área total (km²)	Sobreposição (%)
GSW	4.850,199	100
Convencional	6.322,782	75, 92
HAND	6.251,932	76, 39

A Figura 44 apresenta os hidrogramas simulados com a condição de jusante da barragem-eclusa (vermelho) e sem a condição de jusante (azul), ambos com conexão lateral de 100m de largura. Através da análise dos hidrogramas, pode-se verificar que ao incluir a condição de jusante o hidrograma foi mais sensível aos ruídos, com alterações abruptas entre os dias simulados. Também se percebe que, no começo da simulação, a existência prévia de níveis a jusante leva a altas vazões negativas, mas que logo são normalizadas pela simulação. Os demais valores negativos indicam que haveria fluxo da Laguna dos Patos em direção à Lagoa Mirim, situação que não ocorre sem a introdução da condição de jusante.

Essa simulação confere com as condições naturais observadas, já que ocorre fluxo invertido no canal São Gonçalo, de jusante para montante (da Laguna dos Patos para Lagoa Mirim), em alguns períodos do ano, forçado pelas precipitações na bacia, pela direção dos ventos e demais influências climáticas (El Niño e La Niña). Essa foi a condição que conferiu necessidade de construção da barragem e eclusa no canal São Gonçalo, impedindo a intrusão salina para montante do canal, na direção da Lagoa Mirim, possibilitando usos múltiplos da água nessa vasta região, em especial para a irrigação e abastecimento público.

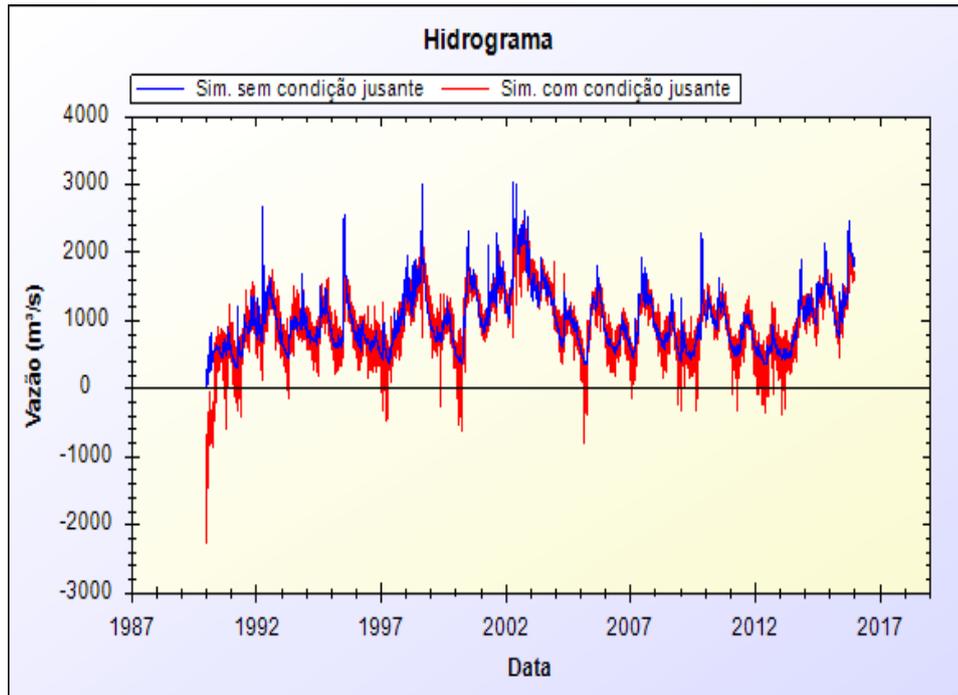


Figura 44 - Vazão simulada com a condição de jusante da barragem-eclusa (em vermelho) e sem condição de jusante (em azul).

5.4 Modelagem da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo com o MGB - IPH com a inclusão da influência do vento

5.4.1 Modelo com inclusão do vento e dados sub-diários

Os resultados referentes às métricas de desempenho obtidas no teste de sensibilidade do modelo ao coeficiente de atrito do vento C_D nas simulações com vento com informações em nível sub-diário estão apresentados nas Tabela 14 à Tabela 17. Essas simulações foram realizadas com a condição de jusante da barragem-eclusa e com conexão lateral de 100m de largura do canal fictício. Também são apresentados nessas tabelas as métricas da simulação sem vento, encontradas na etapa 2. Os valores analisados de C_D foram 2×10^{-6} , 4×10^{-6} , 10×10^{-6} , 20×10^{-6} e 40×10^{-6} . Estes valores foram escolhidos por estarem no intervalo utilizado na literatura, sendo o de 4×10^{-6} o mais observado (PAZ et al., 2005).

Conforme pode ser verificado nas tabelas, o uso do coeficiente de atrito de 2×10^{-6} foi o que resultou melhores métricas de desempenho, com exceção do erro do volume, que é extremamente baixo em todas as estações de nível. Em comparação

com a simulação sem o vento, nota-se a grande melhoria e excelentes resultados nas métricas de desempenho no modelo com a simulação do vento.

Tabela 14 - Coeficiente de Nash-Sutcliffe das anomalias dos níveis sub-diários para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.

Nash-Sutcliffe Postos	Condição jusante sem vento	Coeficiente de atrito do vento $C_D(E-06)$				
		2	4	10	20	40
Barragem-eclusa montante	0,9477	0,9921	0,9920	0,9919	0,9916	0,9908
Barragem-eclusa jusante	0,9991	0,9990	0,9990	0,9988	0,9979	0,9945
Santa Isabel	0,7953	0,9626	0,9621	0,9602	0,9571	0,9511
Santa Vitória	0,8464	0,9742	0,9738	0,9717	0,9673	0,9561
Porto	0,6515	0,9808	0,9807	0,9802	0,9787	0,9742

Tabela 15 - Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das anomalias dos níveis sub-diários (NSlog) para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.

NSlog Postos	Condição jusante sem vento	Coeficiente de atrito do vento $C_D (E-06)$				
		2	4	10	20	40
Barragem-eclusa montante	0,9189	0,8356	0,8349	0,8327	0,8291	0,8205
Barragem-eclusa jusante	0,9991	0,9988	0,9988	0,9984	0,9969	0,9913
Santa Isabel	0,7394	0,7665	0,7625	0,7489	0,7275	0,6863
Santa Vitória	0,8122	0,7903	0,7853	0,7656	0,7279	0,6367
Porto	0,5693	0,7570	0,7561	0,7487	0,7256	0,6424

Tabela 16 - Erro de volume (ΔV) das anomalias dos níveis sub-diários para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.

$\Delta V(\%)$ Postos	Condição jusante sem vento	Coeficiente de atrito do vento – $C_D (E-06)$				
		2	4	10	20	40
Barragem-eclusa montante	1,31E-12	-9,4E-13	-1,9E-13	-5,1E-12	6,7E-14	1,9E-12
Barragem-eclusa jusante	1,24E-12	-1,7E-12	-7,5E-13	-6,7E-12	7,1E-13	2,4E-12
Santa Isabel	2,66E-13	-3,0E-12	1,2E-12	1,1E-12	-7,4E-13	-9,5E-13
Santa Vitória	8,88E-13	-1,7E-12	-9,3E-13	-9,9E-13	1,7E-12	7,5E-13
Porto	-9,10E-13	-3,01	-3,01	-3,0	-2,9	-2,94

Tabela 17 - Raiz da média dos erros quadráticos (RMSE) das anomalias dos níveis sub-diários para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.

RMSE (m) Postos	Condição jusante sem vento	Coeficiente de atrito do vento – $C_D (E-06)$				
		2	4	10	20	40
Barragem-eclusa montante	0,0985	0,1010	0,1013	0,1023	0,1042	0,1089
Barragem-eclusa jusante	0,0125	0,0132	0,0133	0,0147	0,0194	0,0315
Santa Isabel	0,3983	0,3739	0,3765	0,3858	0,4006	0,4274
Santa Vitória	0,3584	0,3528	0,3555	0,3690	0,3971	0,4601
Porto	0,1742	0,1736	0,1737	0,1748	0,1783	0,1890

Da Figura 45 à Figura 54 estão apresentados os cotogramas das anomalias simuladas e ajustadas pela média dos níveis observados com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , bem como, os próprios dados observados em cada estação de nível. Também são apresentados zooms em cada estação para melhor visualização dos cotogramas.

A análise visual permite verificar que os níveis simulados com a inclusão do vento, em vermelho, acompanham muito bem os níveis observados, em azul, em todas as estações linimétricas. Os níveis simulados, porém, não apresentam o mesmo ruído que os dados observados nas estações de Santa Isabel e Santa Vitória do Palmar, ficando mais suavizados em relação a esses. Na estação da barragem-eclusa jusante, a partir do qual os níveis foram utilizados como condição de jusante, os níveis observados e simulados foram praticamente idênticos.

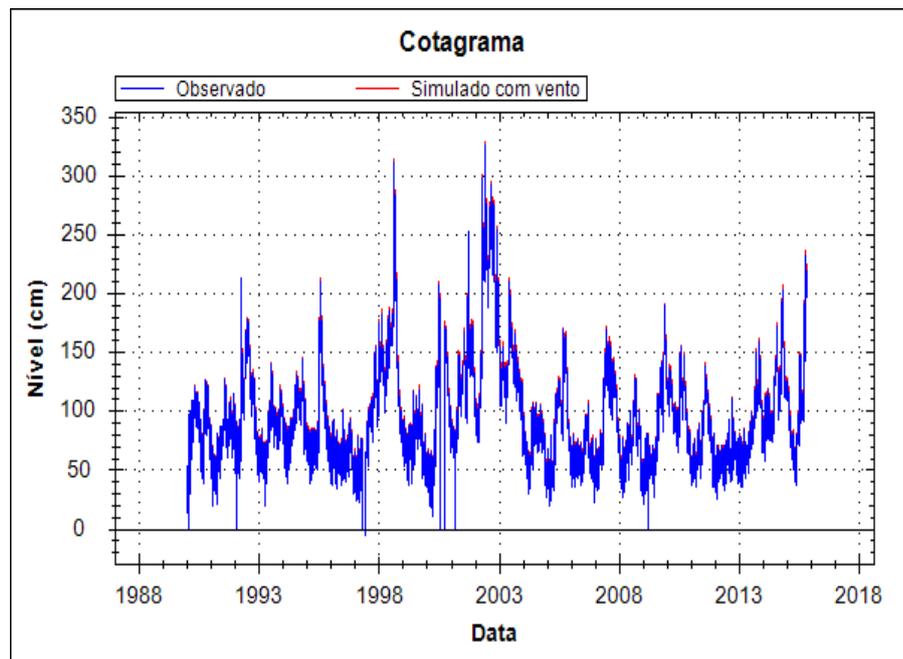


Figura 45 - Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa jusante.

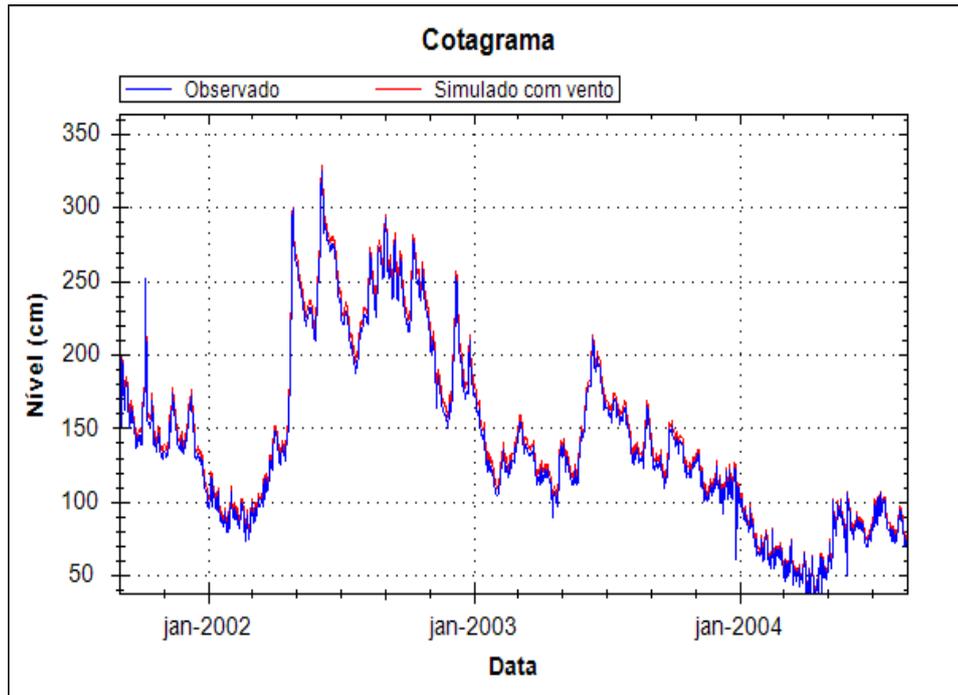


Figura 46 – Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa jusante.

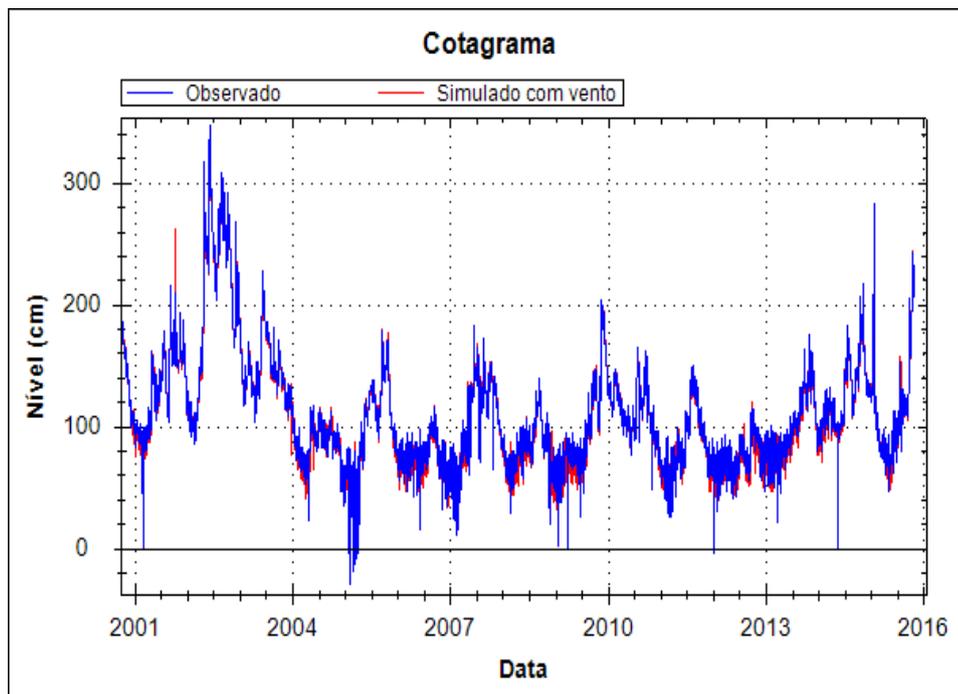


Figura 47 - Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa montante.

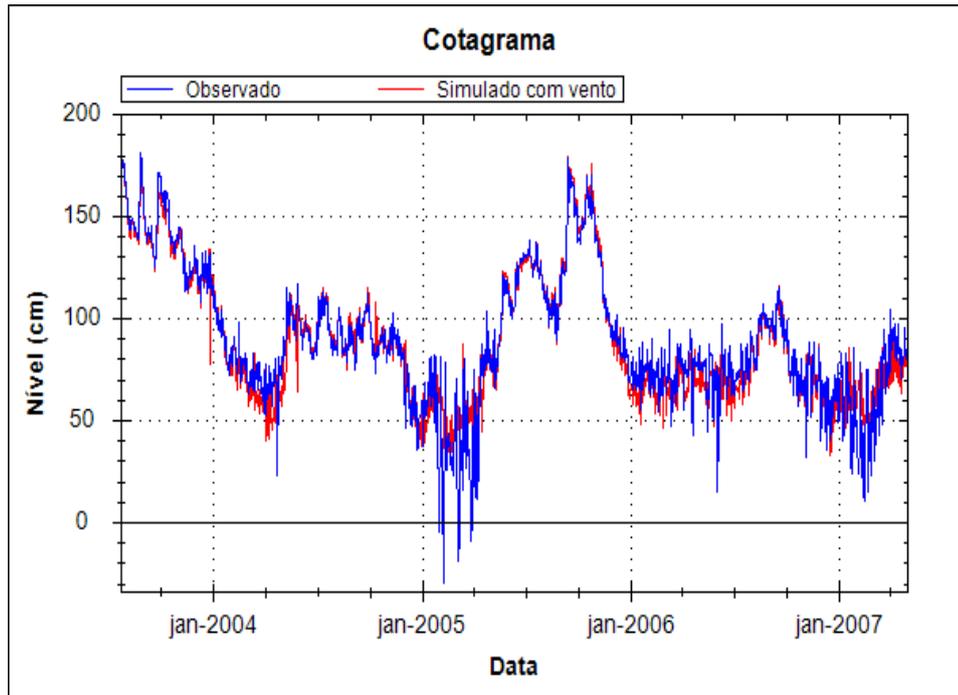


Figura 48 – Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa montante.

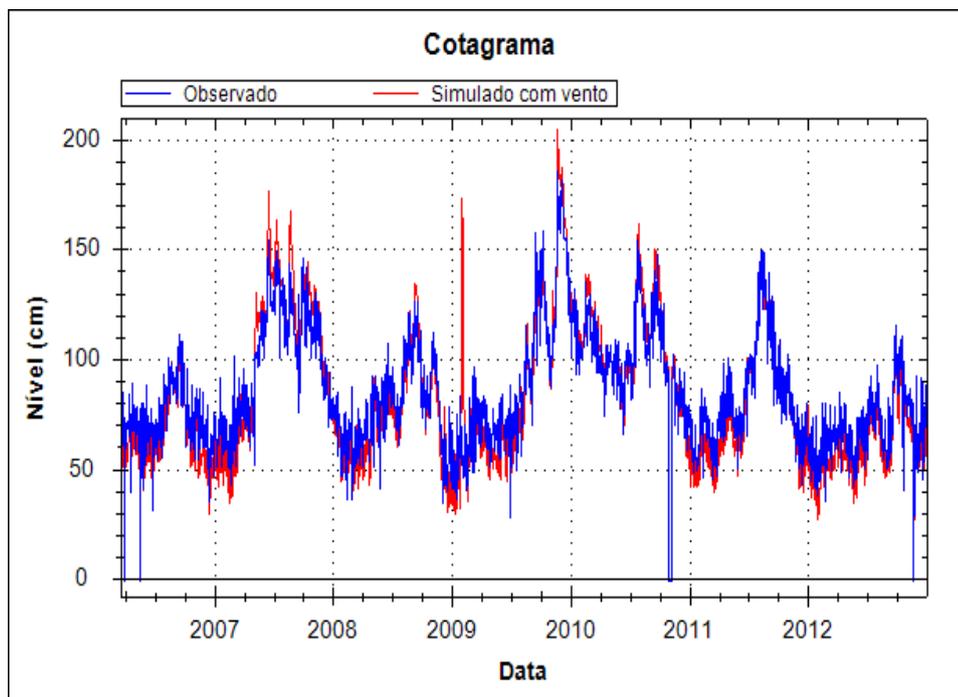


Figura 49 - Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto do Porto de Pelotas.

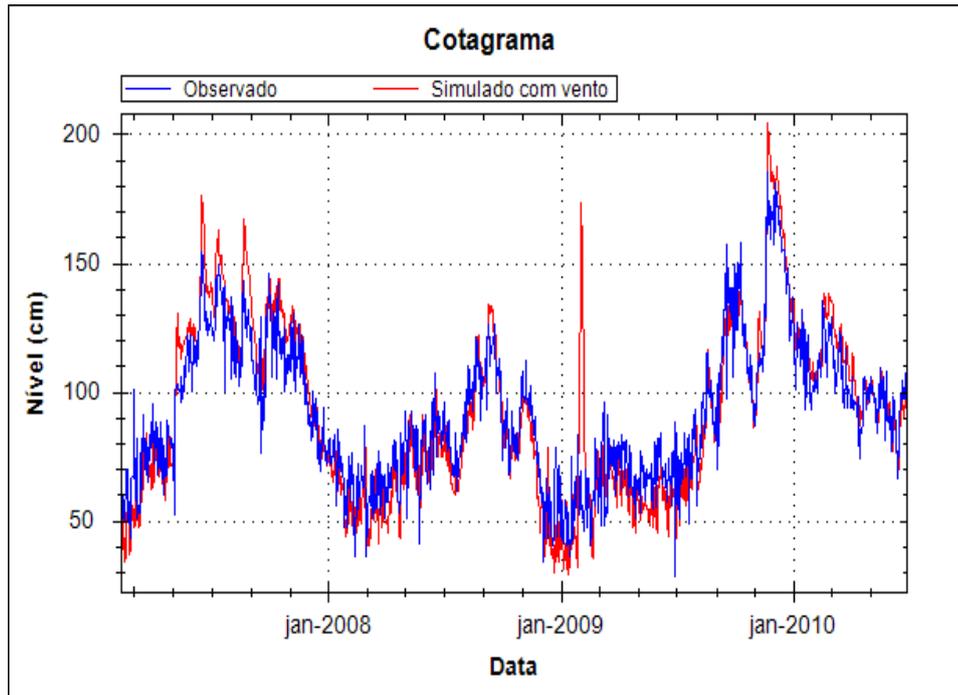


Figura 50 – Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto do Porto de Pelotas.

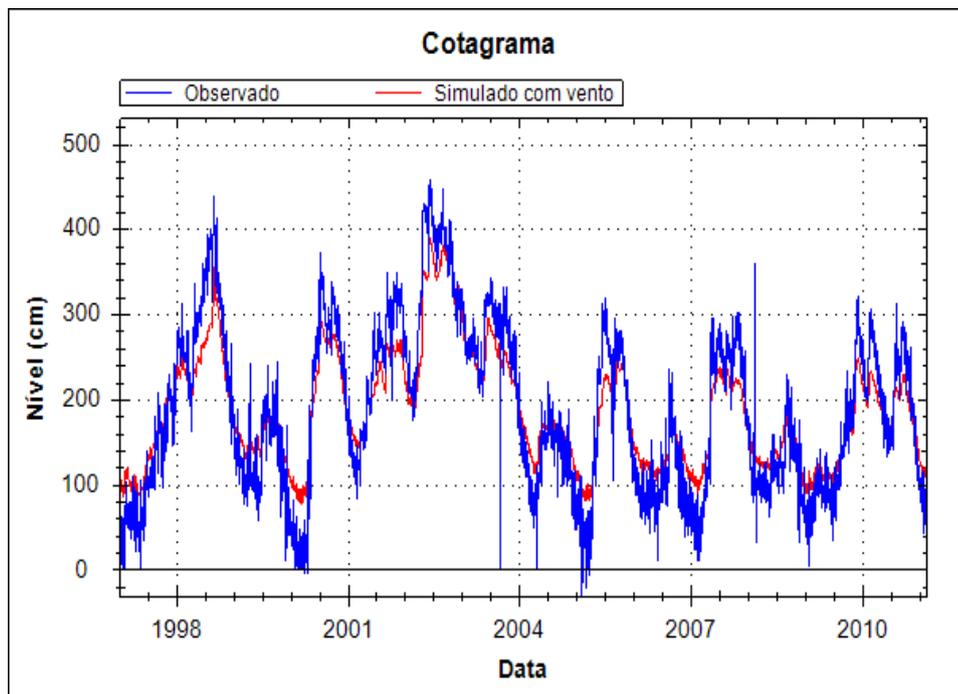


Figura 51 - Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Isabel.

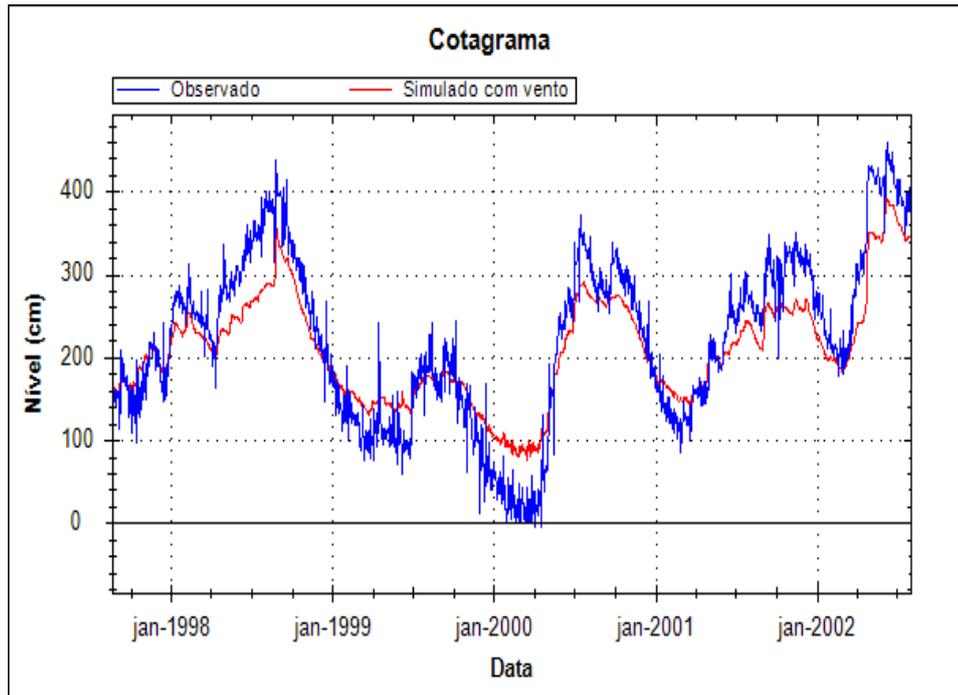


Figura 52 - Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Isabel.

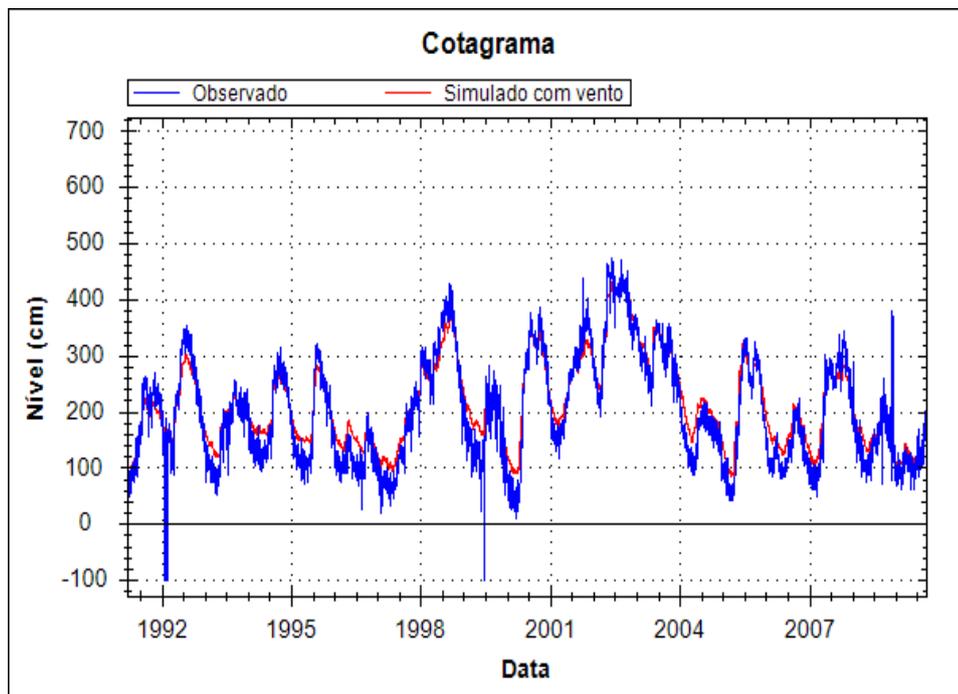


Figura 53 - Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Vitória do Palmar.

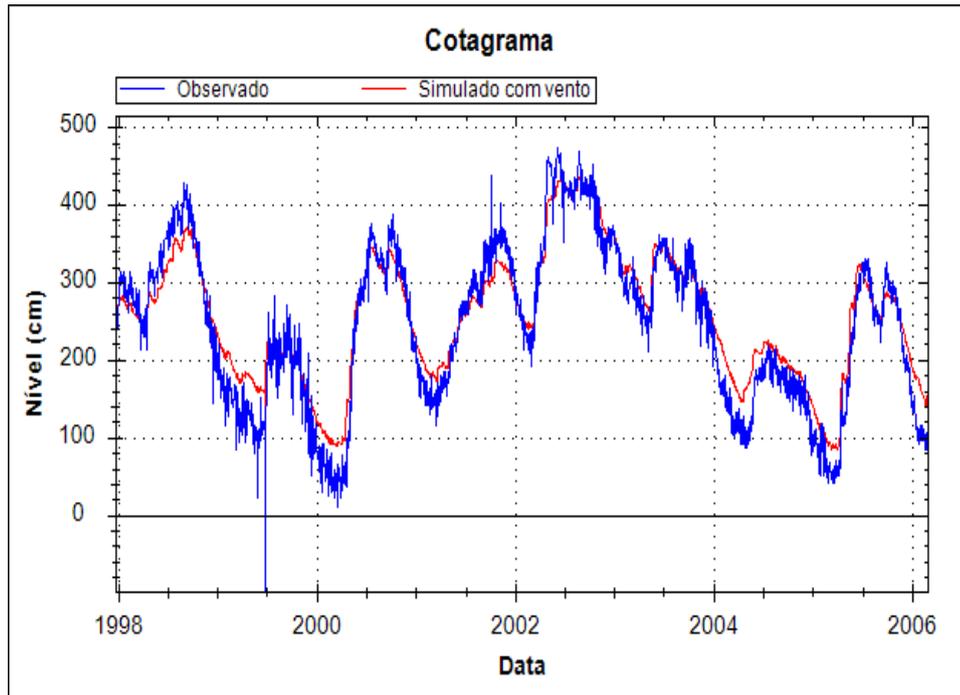


Figura 54 - Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento a partir de informações sub-diárias e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Vitória do Palmar.

A Figura 55 apresenta o hidrograma das vazões simuladas na condição da barragem-eclusa jusante, em azul, e com a inclusão do vento sub-diário para a mesma condição, em vermelho. A Figura 56 mostra um zoom deste hidrograma a fim de facilitar a visualização. Observa-se que, de maneira geral, as vazões simuladas são muito parecidas entre si. Entretanto, ao incluir o vento, houve um leve aumento das vazões máximas e uma diminuição das vazões mínimas.

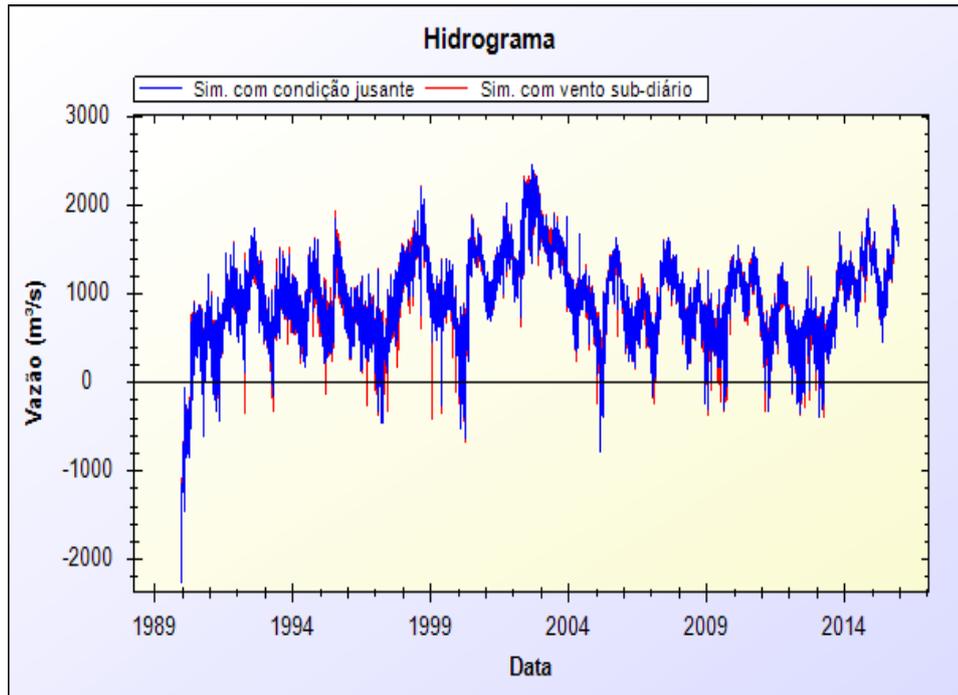


Figura 55 - Vazões simuladas na condição de jusante da barragem-eclusa (em azul) e com a introdução do vento sub-diário (em vermelho).

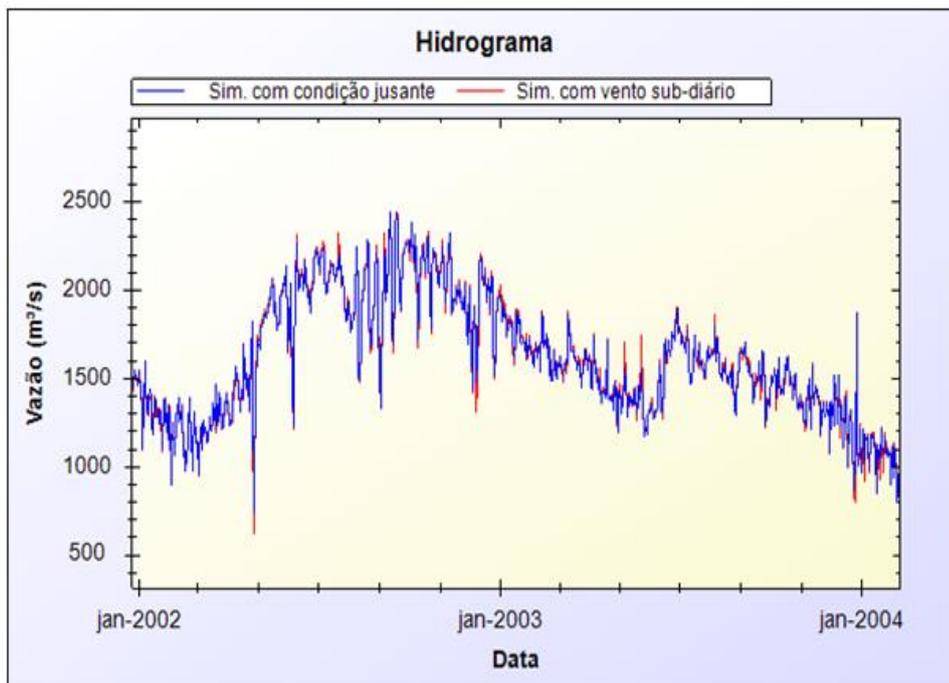


Figura 56 - Zoom sobre a vazões simuladas na condição de jusante da barragem-eclusa (em azul) e com a introdução do vento sub-diário (em vermelho).

5.4.2 Modelo com inclusão do vento e dados horários disponíveis em estações automáticas

Os resultados referentes às métricas de desempenho obtidas no teste de sensibilidade do modelo ao coeficiente de atrito do vento C_D nas simulações com vento com informações em nível horário disponível em estações automáticas estão apresentados na Tabela 18 à Tabela 21. Essas simulações foram realizadas com a condição de jusante da barragem-eclusa e com conexão lateral de 100 metros de largura do canal fictício. Também são apresentados nessas tabelas as métricas da simulação sem vento, encontradas na etapa 2. Os valores analisados de C_D foram 2×10^{-6} , 4×10^{-6} , 10×10^{-6} , 20×10^{-6} e 40×10^{-6} .

Da mesma forma que nas simulações com informações de vento sub-diário o melhor coeficiente de atrito do vento foi 2×10^{-6} , também foi observado este mesmo resultado no modelo com inclusão do vento e dados horários. A única estação em que isso não ocorreu foi a de Santa Vitória do Palmar, na qual o maior coeficiente NS e RMSE foi o de 4×10^{-6} , com valores de 0,8526 e 0,3511, respectivamente.

Diferentemente do que foi observado na modelagem da bacia Mirim-São Gonçalo com o uso de dados sub-diários, a inclusão de informações horárias não acarretou uma melhora tão pronunciada quanto na simulação anterior. Cabe ressaltar que o modelo apresenta vazões e níveis em intervalo de tempo diário, assim como os dados observados, o que pode explicar porque a maior discretização das informações do vento não ocasionou melhores resultados, além de o fato de não serem os mesmos conjuntos de estações em ambas simulações.

Lopes et al. (2018) mostraram que a inclusão do coeficiente do atrito do vento no módulo de propagação inercial de vazão do modelo hidrológico-hidráulico de grande escala (MGB-IPH) trouxe benefícios na representação dos níveis d'água simulados na bacia hidrográfica da Laguna dos Patos. No entanto, o melhor valor de C_D avaliado no teste de sensibilidade foi o de 10×10^{-6} , com melhorias associadas a todos os postos modelados com o uso de dados horários do vento, o que indica a importância de testar outras configurações no sistema como o coeficiente de atrito do vento ou outras fontes de dados de vento.

Tabela 18 - Coeficiente de Nash-Sutcliffe para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.

Postos	NS	Condição jusante sem vento	Coeficiente de atrito do vento C_D (E-06)				
			2	4	10	20	40
Barragem-eclusa montante	0,9477	0,9477	0,9464	0,9463	0,9458	0,9448	0,9416
Barragem eclusa jusante	0,9991	0,9991	0,9990	0,999	0,9988	0,9981	0,9953
Santa Isabel	0,7953	0,7953	0,8216	0,8201	0,8139	0,8007	0,7694
Santa Vitória	0,8464	0,8464	0,8523	0,8526	0,8509	0,8393	0,7962
Porto	0,6515	0,6515	0,8002	0,7989	0,7911	0,7702	0,7094

Tabela 19 - Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das anomalias dos níveis horários(NSlog) para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.

Postos	NSlog	Condição jusante sem vento	Coeficiente de atrito do vento - C_D (E-06)				
			2	4	10	20	40
Barragem-eclusa montante	0,9189	0,9189	0,8362	0,8360	0,8353	0,8338	0,8298
Barragem-eclusa jusante	0,9991	0,9991	0,9985	0,9984	0,9980	0,9965	0,9912
Santa Isabel	0,7394	0,7394	0,7628	0,7609	0,7529	0,7372	0,7017
Santa Vitória	0,8122	0,8122	0,7900	0,7918	0,7935	0,7866	0,7510
Porto	0,5693	0,5693	0,7567	0,7549	0,7441	0,7130	0,6119

Tabela 20 - Erro de volume (ΔV) das anomalias dos níveis horários para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.

Postos	$\Delta V(\%)$	Condição jusante sem vento	Coeficiente de atrito do vento - C_D (E-06)				
			2	4	10	20	40
Barragem-eclusa montante	1,31E-12	1,31E-12	-3,3E-12	-8,3E-12	-1,9E-12	1,3E-13	2,0E-12
Barragem-eclusa jusante	1,24E-12	1,24E-12	-3,3E-12	-9,1E-12	-2,2E-12	3,3E-13	2,0E-12
Santa Isabel	2,66E-13	2,66E-13	-1,8E-13	-5,1E-13	-1,8E-13	-1,7E-13	9,5E-13
Santa Vitória	8,88E-13	8,88E-13	1,5E-12	9,1E-13	-1,1E-14	-9,5E-13	1,4E-12
Porto	-9,10E-13	-9,10E-13	-3,019	-3,008	-2,977	-2,933	-2,868

Tabela 21 - Raiz da média dos erros quadráticos (RMSE) das anomalias dos níveis horários para diferentes valores de C_D . Melhores resultados de cada estação destacados em verde.

Postos	RMSE (m)	Condição jusante sem vento	Coeficiente de atrito do vento - C_D (E06)				
			2	4	10	20	40
Barragem-eclusa montante	0,0985	0,0985	0,1008	0,1009	0,1013	0,1023	0,1052
Barragem-eclusa jusante	0,0125	0,0125	0,0132	0,0133	0,0144	0,0185	0,0292
Santa Isabel	0,3983	0,3983	0,3735	0,3750	0,3815	0,3948	0,4246
Santa Vitória	0,3584	0,3584	0,3515	0,3511	0,3532	0,3666	0,4129
Porto	0,1742	0,1742	0,1736	0,1738	0,1751	0,1793	0,1914

A Figura 57 apresenta o hidrograma das vazões simuladas na condição da barragem-eclusa jusante, em azul, e com a inclusão do vento horário para a mesma condição, em vermelho. A Figura 58 mostra um zoom deste hidrograma a fim de facilitar a visualização. A partir da análise visual das figuras, nota-se um comportamento similar aos hidrogramas simulados com o vento sub-diário, ou seja, vazões simuladas semelhantes com um leve aumento das vazões máximas e uma diminuição das vazões mínimas com a inclusão do vento.

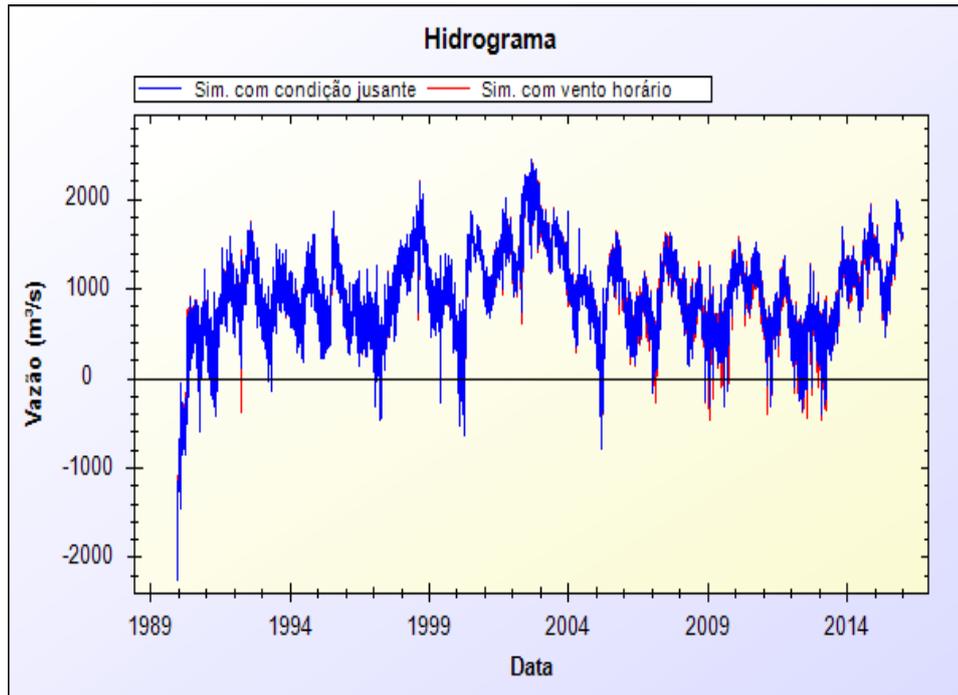


Figura 57 - Vazões simuladas na condição de jusante da barragem-eclusa (em azul) e com a introdução do vento horário (em vermelho).

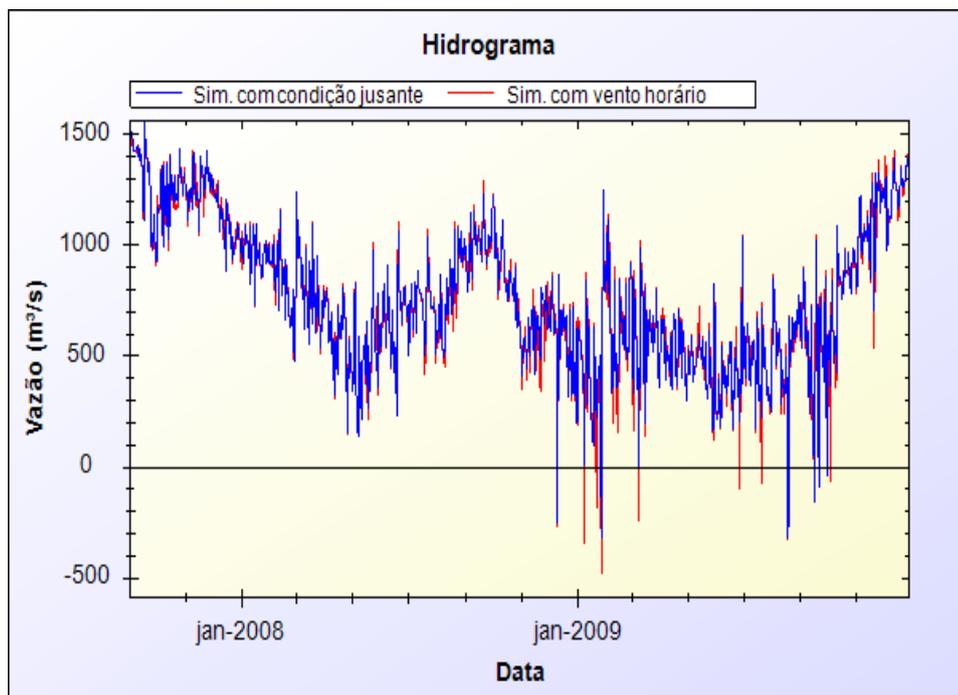


Figura 58 - Zoom das vazões simuladas na condição de jusante da barragem-eclusa (em azul) e com a introdução do vento horário (em vermelho).

Da Figura 59 à Figura 68 estão plotados os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando o uso do melhor coeficiente de atrito, 2×10^{-6} , assim como, o zoom dos respectivos cotogramas de cada estação. Os níveis simulados no modelo com vento

horário apresentaram melhor concordância para as estações à montante e a jusante da barragem-eclusa. Já no posto de Porto de Pelotas os níveis foram superestimados nas máximas e subestimados nas mínimas. Em Santa Isabel e Santa Vitória do Palmar ocorreu o oposto, com atenuação das máximas e aumento das mínimas.

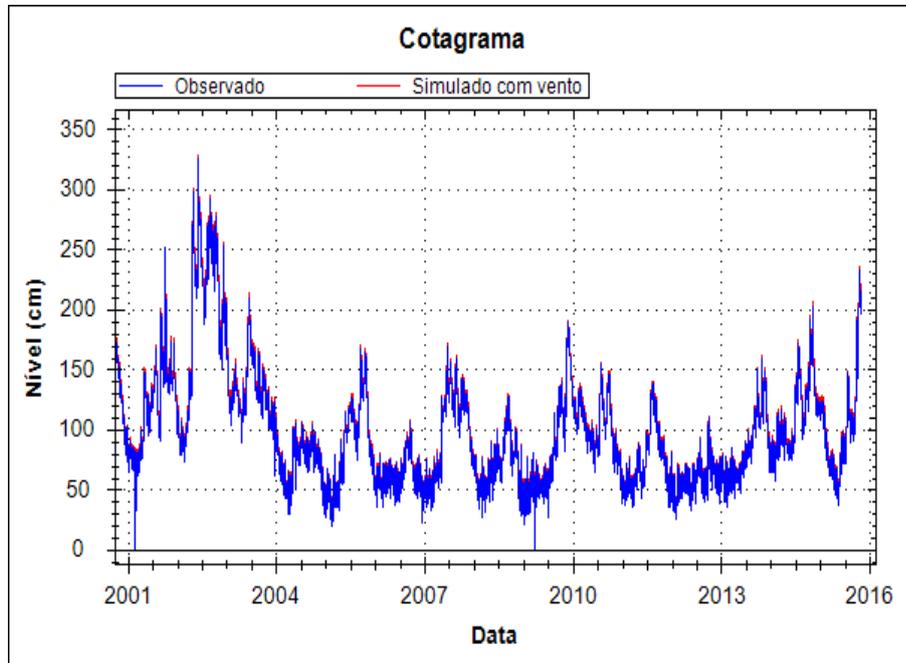


Figura 59 - Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa jusante.

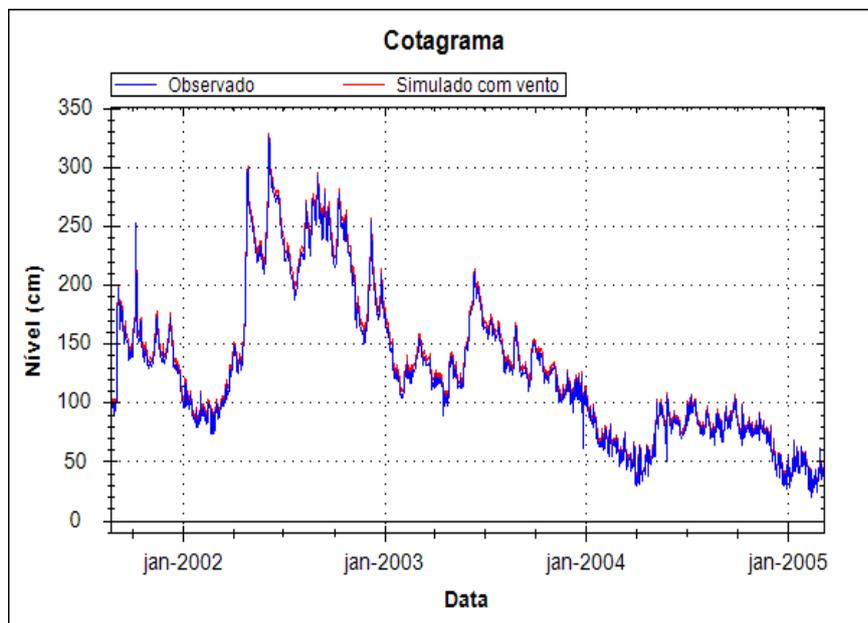


Figura 60—Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa jusante.

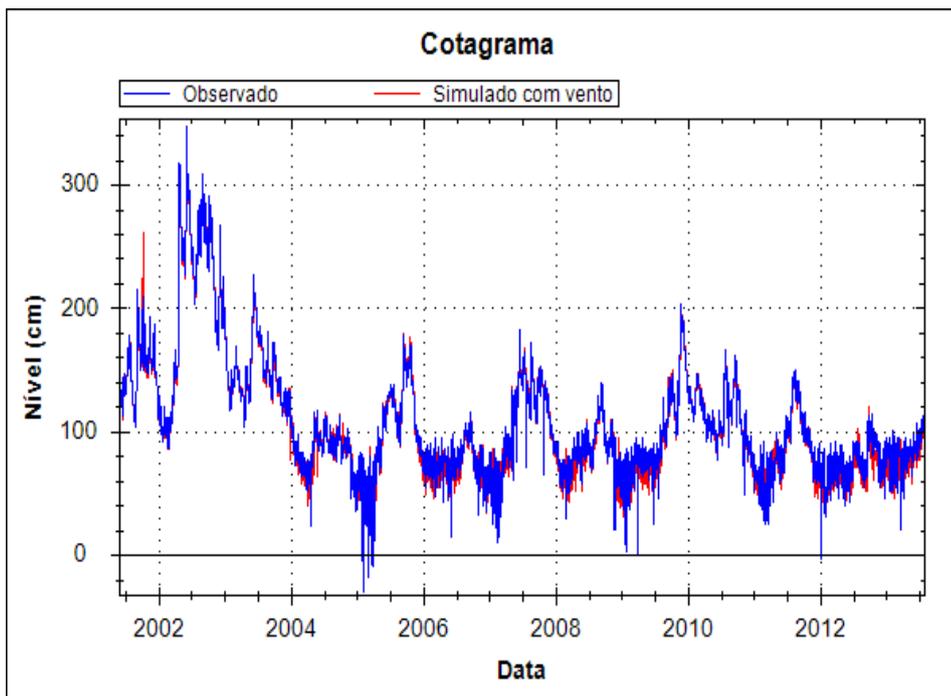


Figura 61 - Cotagramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa montante.

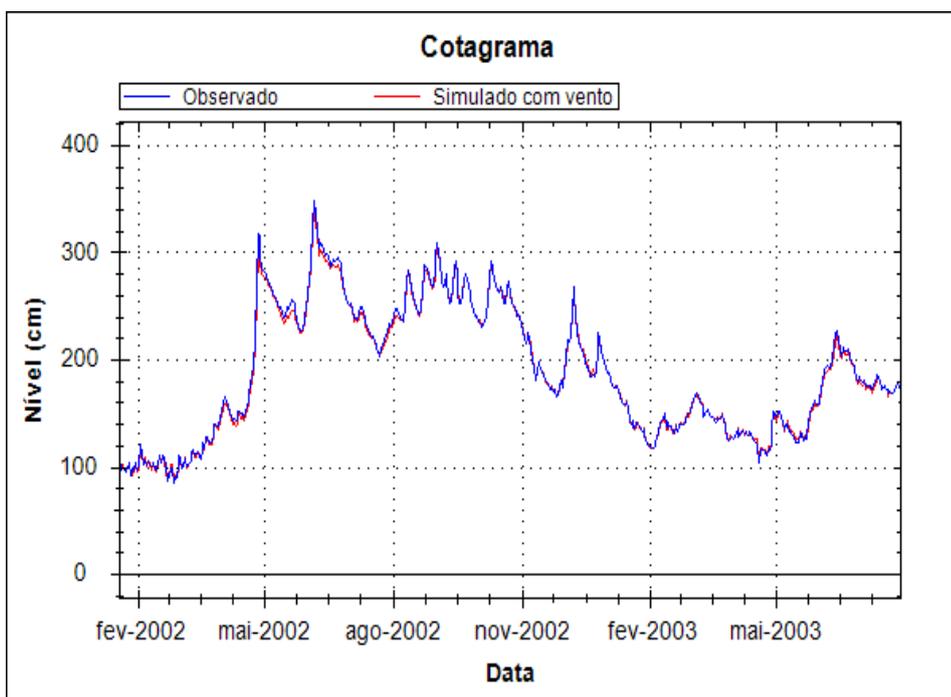


Figura 62- Zoom sobre os cotagramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto da barragem-eclusa montante.

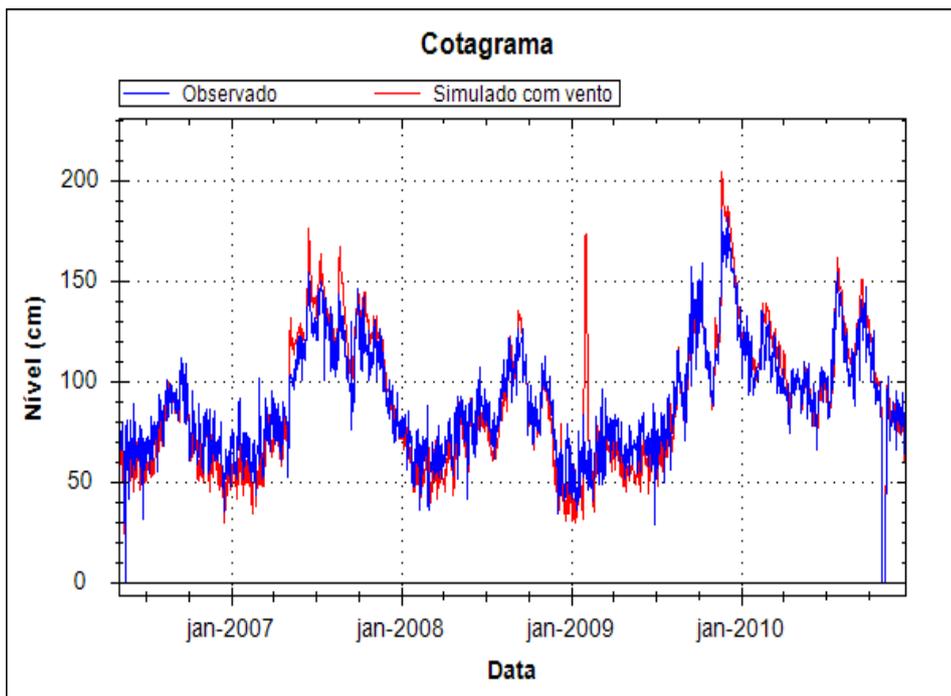


Figura 63 - Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto do Porto de Pelotas.

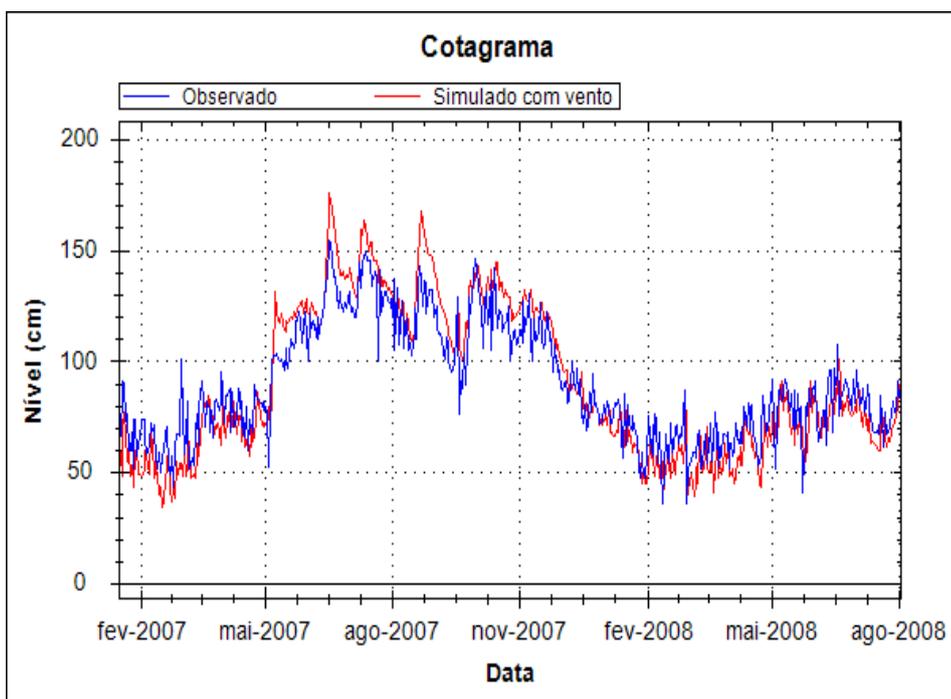


Figura 64—Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto do Porto de Pelotas.

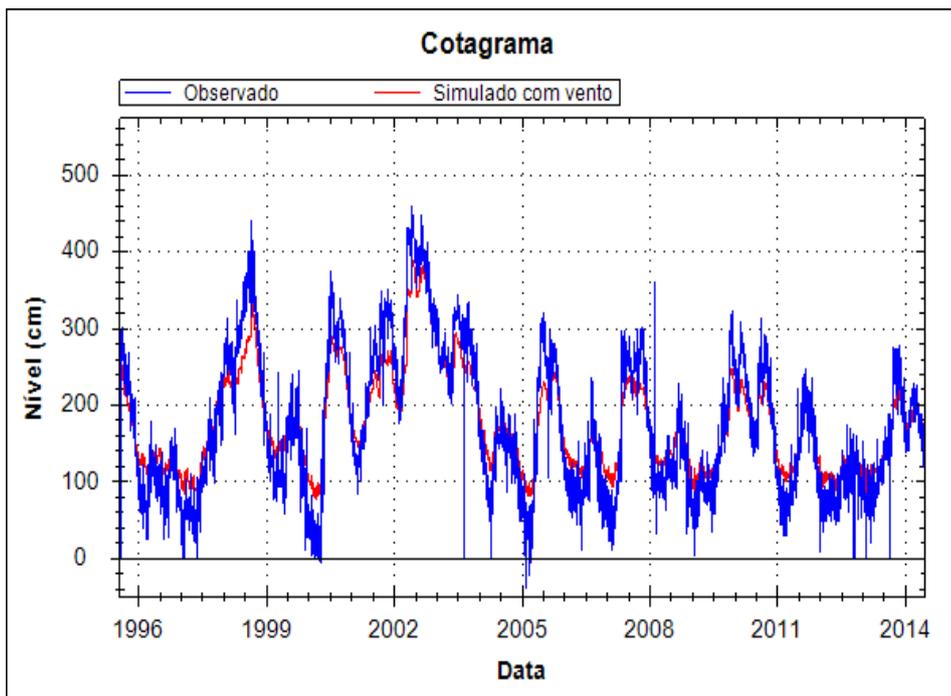


Figura 65 - Cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Isabel.

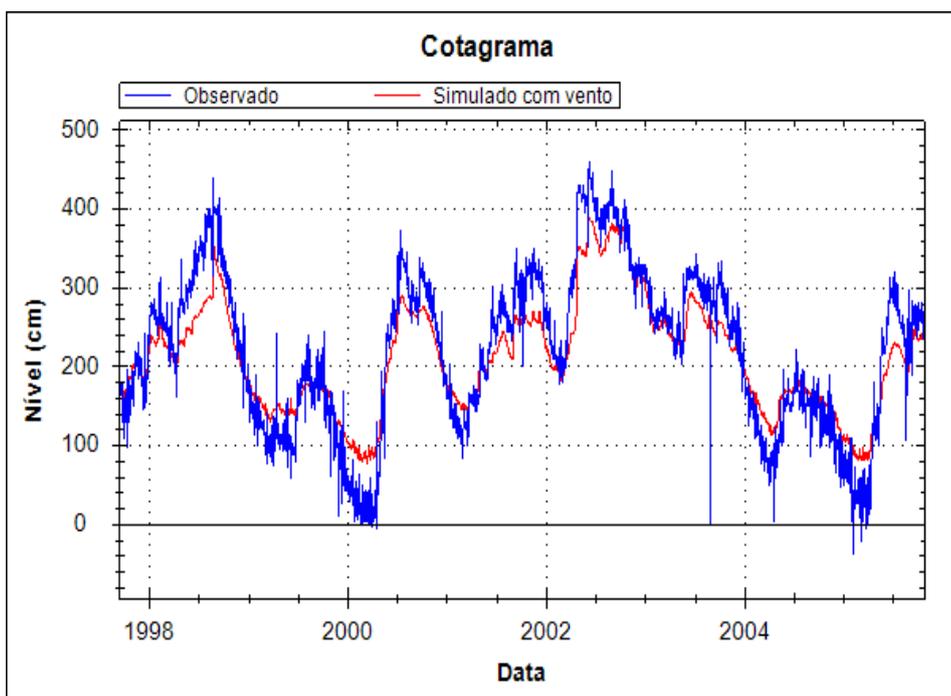


Figura 66 - Zoom sobre os cotogramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Isabel.

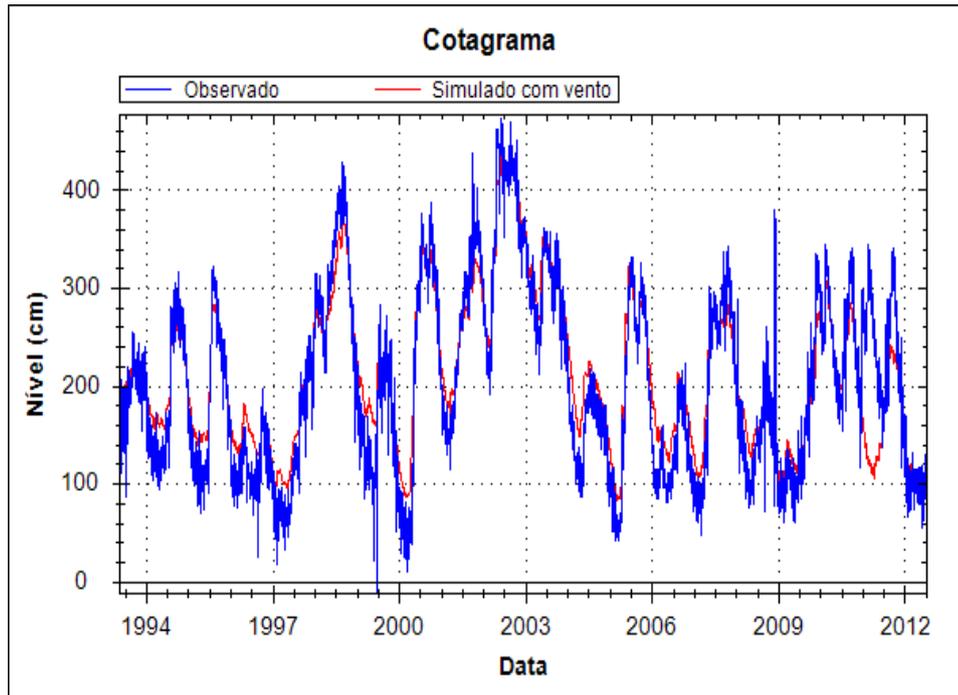


Figura 67 - Cotagramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Vitória do Palmar.

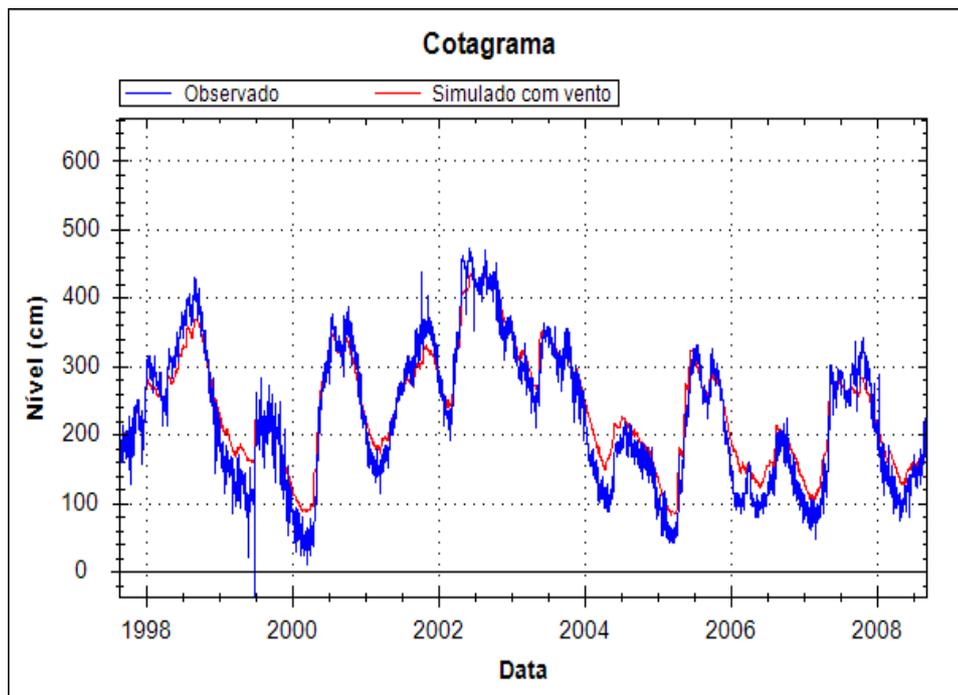


Figura 68 - Zoom sobre os cotagramas das anomalias simuladas com a inclusão do efeito do vento horário e níveis observados, considerando C_D igual a 2×10^{-6} , no posto de Santa Vitória do Palmar.

Da Figura 69 à Figura 73 podem ser observadas as evoluções das métricas de desempenho NS, NSlog e RMSE nas diferentes estações limimétricas ao longo das diferentes modelagens realizadas. De acordo com os valores apresentados, a gradual incorporação de complexidade e informações ao modelo trouxe benefícios na

representação dos níveis d'água da bacia nos locais analisados. A melhora mais pronunciada ocorreu quando inserida a condição de jusante da barragem-eclusa do canal São Gonçalo. A partir daí, o melhor desempenho foi observado com a inclusão do efeito do vento em informações sub-diárias. Houve ainda uma melhora menos significativa nos valores referentes a simulação com o uso de dados de vento horário.

Diferentemente do que foi observado por Munar et al. (2018), que realizaram o acoplamento de um modelo hidrológico (MGB-IPH) com um modelo hidrodinâmico (IPH-ECO) para avaliar a influência de forças externas como descarga fluvial e vento na bacia da Lagoa Mirim, foi obtido no presente estudo um melhor desempenho na representação dos níveis d'água para a estação de medição de Santa Vitória do que para a estação de medição de Santa Isabel. De acordo com os autores, os níveis d'água foram melhores estimados na estação de Santa Isabel, em função da forte influência das grandes descargas fluviais de um dos principais tributários da Lagoa Mirim, o rio Cebollati, que elevam o nível d'água na estação de Santa Vitória, conforme observado anteriormente por Oliveira et al. (2015). Por esse motivo, o modelo acoplado utilizado por eles não conseguiu representar tão bem os níveis em Santa Vitória, ao contrário, do modelo integrado do presente estudo.

Möller et al. (2001) modelaram a Laguna dos Patos para simular a sua hidrodinâmica, aplicando um modelo numérico tridimensional. Os autores analisaram diferentes dados de vento, vazão e nível, e concluíram que, na maior parte do tempo, quando a descarga fluvial é baixa, a Laguna tem sua circulação influenciada pelo vento. No entanto, também foi observado que nos últimos meses do inverno, em que há uma alta descarga, a circulação é principalmente modulada pela vazão. Já sazonalmente, a influência das vazões define um nível d'água médio, cuja modulação é dada, principalmente, pelo vento. Através desses resultados também pode-se verificar o comportamento da Laguna do Patos com a influência do vento, sendo o componente longitudinal o principal fator de influência em escalas de tempo de passagem de sistemas frontais, entre 3 e 16 dias.

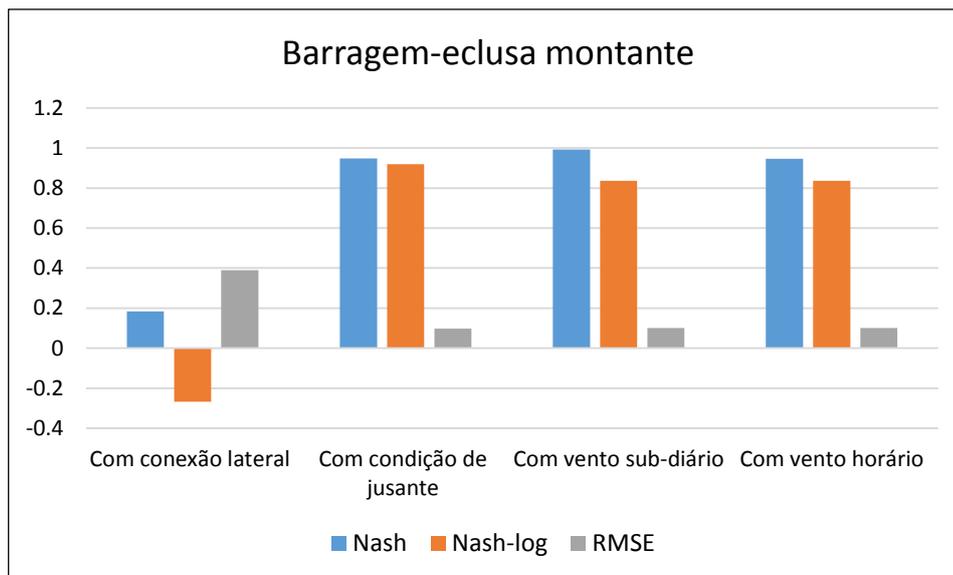


Figura 69 -NS, NSlog e RMSE para a estação linimétrica da barragem-eclusa montante nas diferentes simulações realizadas.

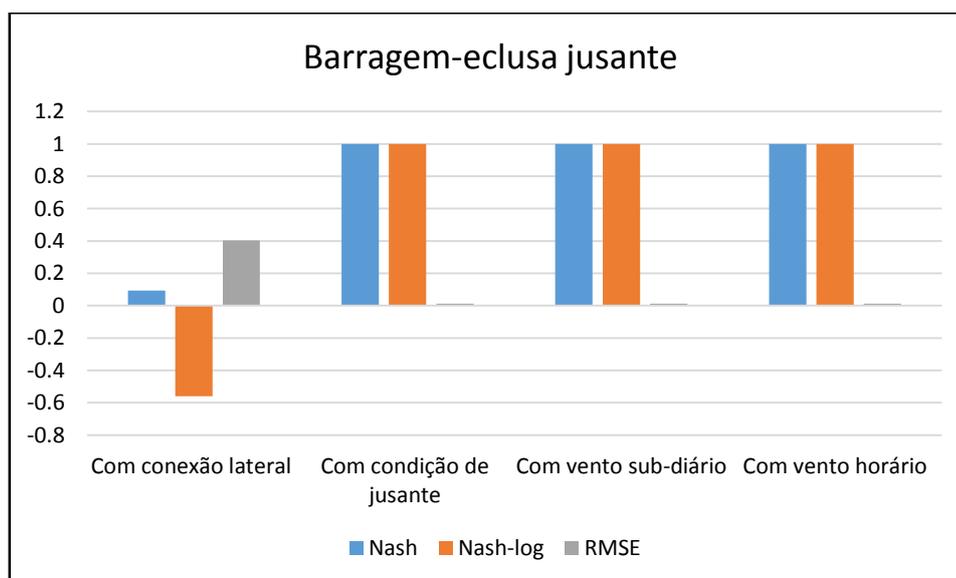


Figura 70 - NS, NSlog e RMSE para a estação linimétrica da barragem-eclusa jusante nas diferentes simulações realizadas.

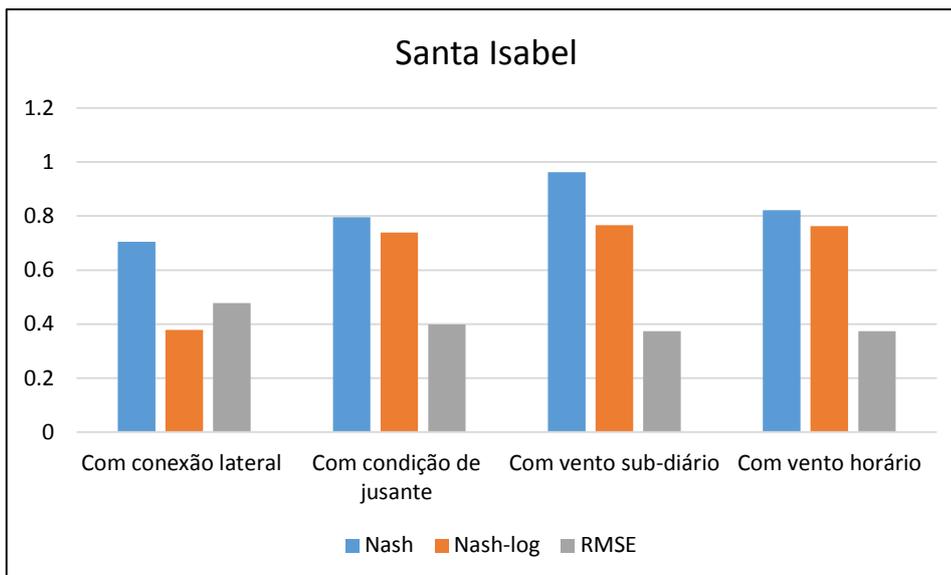


Figura 71 - NS, NSlog e RMSE para a estação linimétrica de Santa Isabel nas diferentes simulações realizadas.

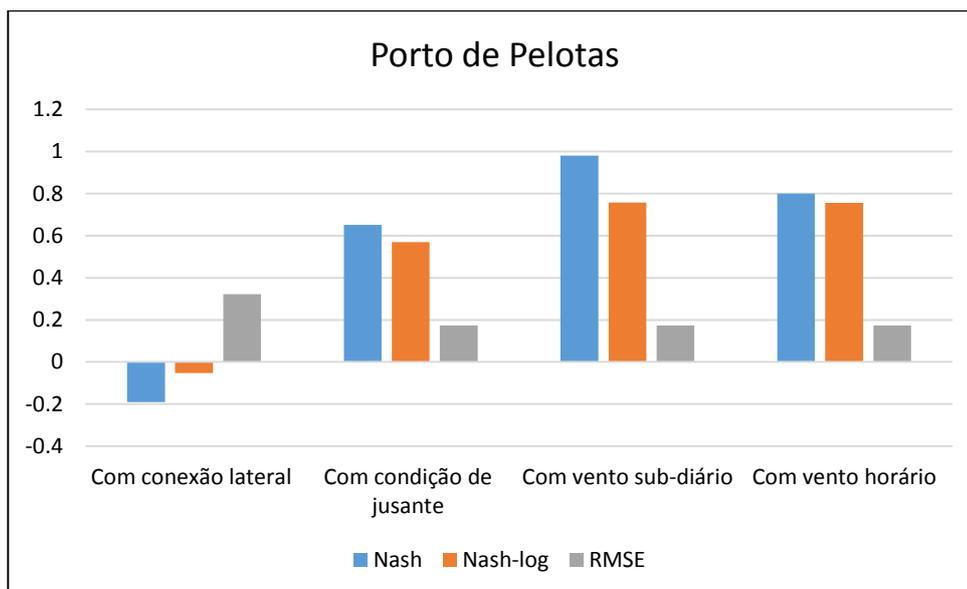


Figura 72 - NS, NSlog e RMSE para a estação linimétrica de Porto de Pelotas nas diferentes simulações realizadas.

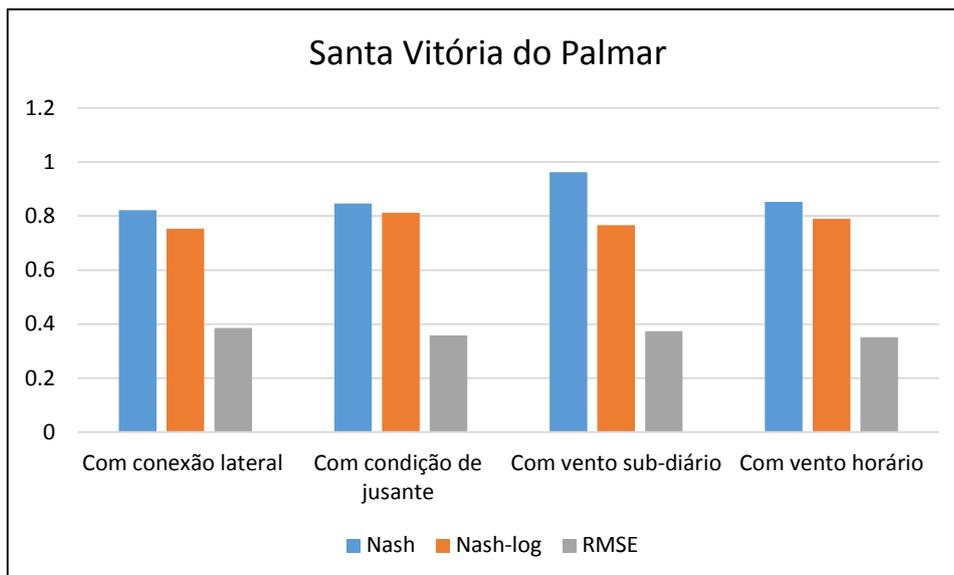


Figura 73 - NS, NSlog e RMSE para a estação linimétrica de Santa Vitória do Palmar nas diferentes simulações realizadas.

6 Considerações Finais e Conclusão

A bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo possui grande importância ambiental, econômica e social, sendo que 47% de sua área total pertence ao território brasileiro e 53% ao território uruguaio. Sua importância se deve em parte ao fornecimento de água para o cultivo do arroz irrigado, abastecimento humano e a dessedentação de animais. O estudo das variações de níveis e vazões que ocorrem no sistema lagunar e no canal São Gonçalo, que liga a Lagoa Mirim à dos Patos, aponta grande importância para compreender a hidrodinâmica de um sistema complexo como este, bem como as interações entre as duas lagoas. Esta interação é influenciada diretamente pela ação do vento na Lagoa Mirim e na Laguna dos Patos. Este tipo de atuação causa desníveis entre as extremidades do sistema, levando a rebaixamentos ou elevações dos níveis dependendo da direção e magnitude do vento.

Assim, o presente trabalho teve o propósito de melhor compreender os efeitos do vento sobre a bacia Mirim-São Gonçalo através da aplicação do modelo MGB-IPH bem como aferir se esse traria resultados satisfatórios para a modelagem desse grande sistema lagunar. Para isso o trabalho foi dividido em 4 etapas. Primeiramente o modelo foi aplicado conforme disponibilizado para os usuários e calibrado. Após, foi incorporado ao modelo a possibilidade de trocas laterais entre as minibacias que compuseram a porção lagunar. Os resultados dessa etapa permitiram obter o valor de 100 metros como o melhor para a largura entre as conexões. Assim pode-se baixar consideravelmente as vazões de saída no canal São Gonçalo e obter melhores métricas de desempenho em relação às estações limimétricas no entorno da Lagoa Mirim e no canal.

A seguir foi avaliada qual condição de jusante forneceria os melhores resultados à modelagem dos níveis da Lagoa. Os resultados dessa etapa demonstraram que o melhor cenário para simulação do sistema foi com a inclusão dos níveis observados na estação à jusante da Barragem-Eclusa. Isto foi constatado após a comparação entre as manchas de inundação geradas pelo modelo com aquelas observadas através do sensoriamento remoto.

Por fim, foi incorporado ao modelo a representação do efeito do vento sobre a geração de vazão e níveis da bacia. A incorporação de níveis sub-diários melhorou substancialmente o desempenho da modelagem. Todas as estações ao entorno da bacia apresentaram coeficientes de Nash-Sutcliffe superiores a 0,96 e dos logaritmos

das vazões de 0,76. Já com os dados horários a mesma melhora não foi observada, ainda que em algumas estações tenha ocorrido a melhoria dos níveis simulados. Isso pode ser atribuído a diferença entre a forma de obtenção dos dados, por não serem o mesmo conjunto de postos em ambas as simulações e pelo modelo apresentar saídas em intervalo de tempo diário.

De maneira geral, com os resultados obtidos pode-se concluir que:

a. A inclusão das conexões laterais entre as minibacias inseridas na Lagoa Mirim faz com que haja transferência de água entre elas, diminuindo a vazão na foz da bacia Mirim-São Gonçalo e melhorando a simulação dos níveis d'água.

b. Ao inserir como condição de jusante os níveis observados na estação limimétrica da barragem-eclusa do canal São Gonçalo, foi possível melhorar não só os níveis simulados nas estações do próprio canal, como também no restante da lagoa, demonstrando a influência da Laguna dos Patos sobre os níveis da Lagoa Mirim.

c. A partir da introdução do vento na simulação e com uso de informações de estações convencionais, os resultados das métricas de desempenho das anomalias dos níveis simulados em relação aos níveis observados melhoraram significativamente, com resultados que podem ser considerados excelentes. Com o uso de informações horárias das estações automáticas o mesmo resultado não foi obtido.

d. O modelo MGB-IPH se mostrou capaz de simular com sucesso os níveis d'água na bacia Mirim-São Gonçalo e demonstrou a importância da inclusão do efeito do vento em modelos hidrológicos quando pretende-se representar os processos hidrodinâmicos de grandes ambientes lacustres, como é o caso da região de estudo.

7 Recomendações

Apesar dos resultados obtidos no presente trabalho, recomenda-se ainda que outros estudos sejam aplicados a fim de melhor descrever e representar esse sistema lagunar e suas relações com o ambiente, podendo inclusive auxiliar na simulação de outros locais que possuam mesmas características, ampliando assim o uso do modelo aplicado.

Dentre as recomendações pode-se destacar:

- Teste de outros conjuntos de dados de vento e de diferentes fontes para analisar a disponibilidade, os impactos e possíveis melhorias da utilização destes;
- Verificação da importância da inserção de dados de batimetria recentes da Lagoa Mirim para a modelagem e quais benefícios seu uso trariam em relação as estratégias empregadas no presente trabalho;
- Inclusão de diversos usos da água na bacia, tais como a irrigação, que demanda grande volume e pode influenciar os níveis e vazões.
- Considerar regras de operação da barragem-eclusa do canal São-Gonçalo, incorporando ao modelo MGB-IPH e, com isso melhor representar as trocas entre a Lagoa Mirim e a Laguna dos Patos;
- Empregar a influência do vento sobre a Lagoa Mirim para simular o sistema da bacia da Laguna dos Patos como um todo.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Bacia Hidrográfica Amazônica**.2018.

Disponível em:

<<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/amazonica.aspx>>Acesso em: 28 dez. 2018.

AJAMI, N. K.; GUPTA, H.; WAGENER, T.; SOROOSHIAN, S. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. **Journal of Hydrology**, v. 298, n. 4, p. 112-135, 2004.

AMARÍS CASTRO, G. E.; GUERRERO BARBOSA, T. E.; SÁNCHEZ ORTIZ, E. A. Comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable. **Revista Tecnura**, v. 19, n. 45, p. 75-87, 2015.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; FEWTRELL, T. J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. **Journal of Hydrology**, v. 387, n. 1, p. 33-45, 2010.

BATHURST, J.C. Physically-Based Distributed Modelling of an Upland Catchment Using the Système Hydrologique Européen. **Journal of Hydrology**, v. 87, n. 1-2, p. 79-102, 1986.

BATHURST, J.C.; WICKS, J.M.; O'CONNELL, P.E. The SHE/SHESED Basin Scale Water Flow and Sediment Transport Modelling System. In: V.P. Singh (editor). **Computer Models of Watershed Hydrology**. **Computer models of watershed Hydrology**, 1995. p. 563-594.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J.; SCHOFIELD, N.; TAGG, A. F. Testing a Physically-based flood forecasting model (Topmodel) for three U.K. catchments. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 69, p. 119-143, 1984.

BRÊDA, J. P. L. F. **Assimilação de altimetria espacial para estimativa de batimetria e rugosidade efetivas para modelagem hidrodinâmica**. 2017. 91f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BUARQUE, D. C. **Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: Estudo de caso do rio Madeira**. 2015. 182f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

CESTARI JUNIOR, E.; SOBRINHO, M. D.; OLIVEIRA, J. N. Estudo de propagação de ondas para auxiliar a elaboração do Plano de Ação Emergencial Externo, PAE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 3, p. 689-697, 2015.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill Inc., 1988.

CIGAGNA, C.; BONOTTO, D. M.; STURARO, J. R. Batimetria e estudo de parâmetros morfométricos do reservatório da floresta estadual “edmundo navarro de andrade” (FEENA) Rio Claro/SP. **Geociências (São Paulo)**, v. 33, n. 4, p. 720-732, 2014.

CLARK, M.P.; BIERKENS, M. F.; SAMANIEGO, L.; WOODS, R. A.; UIJLENHOET, R.; BENNETT, K. E.; PAUWELS, V. R. N.; CAI, XITITAN; WOOD, A. W.; PETERS-LIDARD, C. D. The evolution of process-based hydrologic models: Historical challenges and the collective quest for physical realism. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, p. 3427–3440, 2017.

COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. 2006. 128f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica em grandes bacias**. 2001. 194f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Hydrological simulation of large drainage basins. **Brazilian J. Water Resour**, v. 6, n. 1, p. 15-35, 2001.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; DA SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. The MGB-IPH model for large-scale rainfall - runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.

COLLISCHONN, B.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; MEIRELLES, F. S. C.; SCHETTINI, E. B. C.; FAN, F. M. Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: Caso do Rio Quaraí-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 119-134, 2011.

COSTI, J.; MARQUES, W. C., DE PAULA KIRINUS, E., DE FREITAS DUARTE, R.; ARIGONY-NETO, J. Water level variability of the Mirim-São Gonçalo system, a large, subtropical, semi-enclosed coastal complex. **Advances in Water Resources**, v. 117, p. 75-86, 2018.

COVE, K.; HOGGARTH, A. Bathymetry data and metadata migration techniques. **IEEE Oceans**, p. 1-7, 2010.

CUNGE, J. A.; HOLLY JR, F. M.; VERWEY, A. Practical aspects of computational river hydraulics. [S.l.]: **Pitman Advanced Publishing Program**, 1980.

CURTARELLI, M.P.; OGASHAWARA, I.; ALCÂNTARA, E.H.; STECH, J.L. Coupling remote sensing bio-optical and three-dimensional hydrodynamic modeling to study

the phytoplankton dynamics in a tropical hydroelectric reservoir. **Remote Sensing of Environment**, v. 157, p. 185-198, 2015.

DARGAHI, B.; SETEGN, S. G. Combined 3D hydrodynamic and watershed modelling of Lake Tana, Ethiopia. **Journal of Hydrology**, v. 398, p. 44–64, 2011.

DE SOUZA VIANA, J. F.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; DA SILVA, B. B., DA SILVA, R. M.; DOS SANTOS SOUSA, W. Modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama-PE utilizando o modelo SWAT. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 1, p. 155-172, 2018.

DEMLIE, M.; AYENEW, T.; WOHNLICH, S. Comprehensive hydrological and hydrogeological study of topographically closed lakes in highland Ethiopia: The case of Hayq and Ardibo. **Journal of Hydrology**, v. 339, p. 145-158, 2007.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Estudo Ambiental. **Dragagens do canal do Sangradouro e do canal de Santa Vitória do Palmar, visando a reativação da hidrovia da Lagoa Mirim**. 2014.

DOTTORI, F.; TODINI, E. Testing a simple 2D hydraulic model in an urban flood experimente. **Hydrological Processes**, v. 27, p. 1301-1320, 2013.

DUNNE, T.; BLACK, R. D. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. **Water Resources Research**, Washington, v. 6, p. 1296-1311, 1970.

ESRI. “Arc Hydro Tools version 1,2 for ArcGIS 9,2 Tutorial”. Califórnia. 2007, 110 p.

FAN, F. M. **Acoplamento entre modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica**: integração do modelo MGB-IPH. 2011. 186f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre

FAN, F. M. **Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras**. 2015. 424f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R.; COLLISCHONN, W. Um mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para a América do Sul. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Brasília, DF, 2015.

FAN, F. M.; COLLISCHONN W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v,19, n,1, p. 243-254, 2014.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D.; PAIVA, R.; KAYSER, R. **Manual ArcHydro para aplicação do modelo MGB-IPH**. Versão 1.2. Porto Alegre: IPHUFGRS, 2010.

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 137-147, 2014.

FAN, F.M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n.1, p. 243-254, 2013.

FAN, F.M.; COLLISCHONN, W.; SORRIBAS, M. V.; PONTES, P. R. M. Sobre o início da rede de drenagem definida a partir dos modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 241-257, 2013.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 2007.

FASSONI-ANDRADE, A. C.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; FASSONI, A. C.; PAIVA, R. C. D. D. Comparison of numerical schemes of river flood routing with an inertial approximation of the Saint Venant equations. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 10, p. 1-16, 2018.

FELIX, V. S.; PAZ, A. R. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.21, n.3, p. 556-569, 2016.

FERNANDES, E. H. **Modelling the Hydrodynamics of the Patos Lagoon, Brazil**. 2001. 215 f. Tese (Doutorado), University of Plymouth.

FERNANDES, E.H.L.; DYER, K.R.; NIENCHESKI, L.F.H. TELEMAC-2D calibration and validation to the hydrodynamics of the Patos Lagoon (Brazil). **Journal of Coastal Research**, p. 470-488, 2001.

FERNANDES, E.H.L.; DYER, K.R.; MÖLLER, O.O.; NIENCHESKI, L.F.H. The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Niño event. **Continental Shelf Research**, v. 22, n. 11-13, p. 1699-1713, 2002.

FERREIRA, H. P. L. **Variação dos níveis de base do Sistema Laguna Barreira nas adjacências da Laguna Mirim**. 2009. 121f. Dissertação (Mestrado) em Geociências – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FIGUEIREDO, E. E.; BATHURST, J. C. Effects of rainfall variability and land-use change on sediment yield simulated by SHETRAN, 2006, Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems. **Proceedings**....Symposium held in Dundee. Reino Unido, 2006.

FLEISCHMANN, A. S. **Processos hidrológicos e hidráulicos em grandes áreas inundáveis: assimetria de hidrogramas e simulação matemática**. 2017. 121f.

Dissertação (Mestrado) em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GOUVÊA, T.; ZARNOT, D. H.; ALBA, J. M. F. Caracterização geoambiental e histórico do processo de desenvolvimento da bacia da Lagoa Mirim. In: FILIPPINI ALBA, J. M. (Ed.). **Sustentabilidade socioambiental da bacia da Lagoa Mirim**. 2010. p. 19-30. Pelotas: Embrapa Clima Temperado.

HARTMANN, C.; HARKOT, P. F. C. Influência do canal São Gonçalo no aporte de sedimentos para o estuário da Laguna dos Patos – RS. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 20, p. 329-332, 1990.

HARTMANN, C.; LAMPARELLI, R. A. C.; ROSA, R.; SANO, E. E. Avaliação da área e inundação do canal de São Gonçalo, através de imagens TM-Landsat 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 4. (SBSR)., 1986, Gramado. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1986. v. 2, p. 654-659

HARTMANN, C.; SANO, E. E. Contribuição ao estudo da hidrodinâmica e evolução das massas de água na laguna dos Patos através de imagens MSS-Landsat no período de 1979 a 1983. **Revista Brasileira de Geofísica**, p. 43, 1986.

HIRATA, F. E.; MÖLLER JR, O.O.; MATA, M. M. Regime shifts, trends and interannual variations of water level in Mirim Lagoon, Southern Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 254-266, 2010.

HUTCHINSON, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v. 106, n. 3, p. 211-232, 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa exploratório de solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. Escala 1:1.000.000.

JI, Z. G. **Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. 2017. 577 p.

JORGE, A. A. S.; CRUZ, A. C. S.; ANAYA, L. M.; RODRIGUES, J.; SANTOS, L. B. L. Classificação de Strahler para hidrografias brasileiras relacionadas a desastres naturais. **Modelling in Science Education and Learning**, v. 8, n. 1, 2015.

KARSBURG, R. M. **Precipitação e velocidade do vento na oscilação dos níveis d'água do canal São Gonçalo-RS**. 2016, 79f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

KHAKBAZ, B.; IMAM, B.; HSU, K.; SOROOSHIAN, S. From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 418–419, p. 61–77, 2012.

KJERFVE, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. In D. A. Wolfe (ed.). 1986. p. 63-81. **Estuarine Variability**. Academic Press, New York.

KOTZIAN, H. B.; MARQUES, D. M. Lagoa Mirim e a convenção Ramsar: um modelo para ação transfronteiriças. **REGA**, v. 1, n. 2, p. 101-111, 2004.

KRUG, L. A.; NOERNBERG, M. A. Extração de batimetria por sensoriamento remoto de áreas rasas dos sistemas estuarinos do Estado do Paraná-Brasil. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 12, p. 3077-3084, 2005.

LEON, A. S; GOODELL, C. Controlling HEC-RAS using MATLAB. **Environmental Modelling & Software**, v. 84, p. 339-348, 2016.

LERAT, J.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V.; LOUMAGNE, C.; RIBSTEIN, P. Towards robust methods to couple lumped rainfall-runoff models and hydraulic models: A sensitivity analysis on the Illinois River. **Journal of Hydrology**, v. 418, p. 123-135, 2012.

LI, Y.; ZHANG, Q.; YAO, J.; WERNER, A.D.; LI, X. Hydrodynamic and hydrological modeling of the Poyang Lake catchment system in China. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 3, p. 607-616, 2014.

LIANG, X.; WOOD, E.; LETTENMAIER, D. P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification. **Elsevier Science – Global and Planetary Change**, v. 13, p. 195-206, 1996.

LOPES, V. A. R. **Modelagem hidrológica integrada da bacia hidrográfica da Laguna dos Patos e seus complexos lagunares usando o modelo MGB-IPH com propagação inercial de vazões**. 2015. 84f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia.

LOPES, V. A. R. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do vento**. 2017. 194f. Dissertação (Mestrado) em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOPES, V. A. R.; FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W.; DA MOTTA MARQUES, D. A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes. **Journal of hydrology**, v. 565, p. 177-196, 2018.

MAIDMENT, D. R. **Arc Hydro: GIS for water resources**. ESRI, Inc., 2002.

MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L. R. D.; MELO, D. C. R. Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 4, p. 793-04, 2011.

MARQUES, W. C.; MÖLLER, O.O. Variabilidade temporal em longo período da descarga fluvial e níveis de água da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 3, p. 155-163, 2008.

MARQUES, W.C. **Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil**. 2005. 87f. Dissertação (Mestrado) em Oceanografia Física, Química e Geológica, Rio Grande.

MEJIA, A. I.; REED, S. M. Role of channel and floodplain cross-section geometry in the basin response. **Water Resources Research**, v. 47, n. 9, 2011.

MENDES, C. A. B. Integração de modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: Fundamentos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.1, n.1, p. 47-66, 1996.

MERWADE, V. Effect of spatial trends on interpolation of river bathymetry. **Journal of Hydrology**, v. 371, p. 169-181, 2009.

MÖLLER JR, O. O., CASTAING, P.; SALOMON, J. C.; LAZURE, P. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. **Estuaries**, v. 24, n. 2, p. 297-311, 2001.

MÖLLER JR, O.O. **Hydrodynamique de lalagune dos Patos (30°S, Brésil): mesures et modélisation**. 1996. 204 f. Tese (Doutorado). França, Universidade de Bordeaux 1.

MÖLLER JR, O. O.; STECH, J.; MATA, M. M. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. **Continental Shelf Research**, v.16, n. 3, p. 335-351, 1996.

MONTEIRO, L. R.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; SCHETTINI, E. B. C. Simulação da onda superficial provocada pelo fechamento de comportas utilizando uma aproximação inercial da Equação de Saint-Venant. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 927-936, 2015.

MUNAR; A. M.; CAVALCANTI, J. R.; BRAVO, J. M.; FAN, F. M.; MARQUES, D. D.; FRAGOSO JR.; C. R. Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling: Toward a better comprehension of watershed-shallow lake processes. **Journal of Hydrology**, v. 564, p. 424-441, 2018.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NEAL, J.; SCHUMANN, G.; BATES, P.D. A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas. **Water Resources Research**, v. 48, n. 11, 2012.

NICKUS, U.; BISHOP, K.; ERLANDSSON, M.; EVANS, C.; FORSIUS, M.; LAUDON, H.; LIVINGSTONE, D.; MONTEITH, D.; AND H., T. Direct impacts of climate change

on freshwater ecosystems. In: M. KERNAN, R.; BATTARBEE, B. MOSS (Eds.), **Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems**, v. 38, n. 4, 2010.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height above the Nearest Drainage, a hydrologically relevant new terrain model. **Journal Hydrology**, v. 404, n. 1-2, p.13-29, 2011.

NIMER, Edmon. **Climatologia do Brasil**. IBGE, 1989.

OLIVEIRA, H. A.; FERNANDES, E. H. L.; MÖLLER JÚNIOR, O. O.; COLLARES, G. L. Processos Hidrológicos e Hidrodinâmicos da Lagoa Mirim. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos Versão (RBRH)**, v. 20, n,1, p. 34-45, 2015. Porto Alegre.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, v. 406, n. 3-4, p. 170-181, 2011.

PAIVA, R. C.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.-P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; MENDES, C. A. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, p. 1-18, 2013.

PAZ, A. R.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; VICTORIA, D. D. C.; ANDRADE, R. G. Discretização de modelos hidrológicos de grande escala: grade regular x mini-bacias. In: Embrapa Monitoramento por Satélite-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió, AL. **Anais...** Maceió: ABRH, 2011.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. **Journal of Hydrology**, v. 343, n. 3-4, p. 127-139, 2007.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; SILVEIRA, A. L. L. Improvements in large scale drainage networks derived from digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 42, n. 8, p. 1-7, 2006.

PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; BRAVO, J.M.; BATES, P.D.; BAUGH, C. The influence of vertical water balance on modelling Pantanal (Brazil) spatio-temporal inundation dynamics. **Hydrological processes**, v. 28, n. 10, p. 3539-3553, 2014.

PAZ, A. R.; REIS, L. G.; LIMA, H. V. Uso de modelagem hidrodinâmica visando a segmentação de corpos d'água rasos para enquadramento: o caso do Lago Guaíba (RS). In: XVI Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABRH, 2005.

PEKEL, J. F.; COTTAM, A.; GORELICK, N.; BELWARD, A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, v. 540, n. 7633, p. 418, 2016.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. p. 478.

PEREIRA, J. P. G.; BARACUHY, J. G. de V. **Ecobatimetria- Teoria e Prática**. Campina Grande: Gráfica Agenda, 2008. 84p.

PETRUCCI, G.; BONHOMME, C. The dilemma of spatial representation for urban hydrology semi-distributed modelling: trade-offs among complexity, calibration and geographical data. **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 997-1007, 2014.

PHLEGER, F.B. Some general features of coastal lagoons. In: AYALA-CASTABNERES, A. (Ed.). **Lagunas costeras**. México: Univ. Nac. Autonomus de México, 1969. p. 5-25

PINARDI, M.; FENOCCHI, A.; GIARDINO, C.; SIBILLA, S.; BARTOLI, M.; BRESCIANI, M. Assessing potential algal blooms in a shallow fluvial lake by combining hydrodynamic modelling and remote-sensed images. **Water**, v. 7, n. 5, p. 1921-1942, 2015.

PONCE, V. M. **Engineering Hydrology, Principles and practices**. 1989. Ed: Prentice Hall. 640p.

PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; DE PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P. F.; SORRIBAS, M. V.; COLLISCHONN, W. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, v. 94, p. 1-20, 2017.

PONTES, P. R. M. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia do Rio da Prata**. 2016. 210f. Tese (Doutorado) em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C.; BUARQUE, D. C. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.20, n.4, p. 888-904, 2015. Porto Alegre.

RENNÓ, D. C; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Relatório Técnico Parcial “Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental”. Brasília: MCTI; INPE, 2000. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf>. Acesso em: 05 set. 2017.

RENNÓ, C.; NOBRE, A.D; CUARTAS, L.A.; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-

DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.

RESCK, R. P.; NETO, J. F. B.; COELHO, R. M. P. Nova batimetria e avaliação de parâmetros morfométricos da Lagoa da Pampulha (Belo Horizonte, Brasil). **Revista Geografias**, v. 3, n. 2, 24-37, 2007.

SAMBONÍ, A. M. M. **Pareamento bacia-lagoa usando modelagem hidrológica-hidrodinâmica e sensoriamento remoto**. 2017. 139 f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

SHERMAN, L.K. Streamflow from rainfall by the unit graph method. **Engineering News Record**, v. 108, p. 501-505, 1932.

SHUTTLEWORTH, W.J. (1993). "Evaporation". In: Maidment, D.R. (Editor in Chief). *Handbook of Hydrology*, 1 ed., Capítulo 4, New York, EUA, McGraw-Hill Inc.

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.

SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M. Simulação da Bacia do Rio São Francisco através do modelo hidrológico MGB-IPH. 2004. In.: VII Congresso de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís – MA.

SILVA, R.V.; KOBIYAMA, M. TOPMODEL: teoria integrada e revisão. **RAEGA**, n. 14, p. 97-110, 2007. Curitiba.

SIMON, A. L. H.; SILVA, P. F. da. Análise geomorfológica da Planície Lagunar sob influência do canal São Gonçalo – Rio Grande do Sul – Brasil. **Geociências**, São Paulo, UNESP, v. 34, n. 4, p. 749-767, 2015.

SINGH, V. P.; FREVERT, D. *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. **Water Resources Publications**, LLC. 891 p. 2002.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, p. 274-287, 2016.

SORRIBAS, M. V.; PAIVA, R. C. D.; MELACK, J. M.; BRAVO, J. M.; JONES, C.; CARVALHO, L.; BEIGHLEY, E.; FORSBURG, B.; COSTA, M. H. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. **ClimaticChange**, p. 1-16, 2016.

SOUTH. **Manual SDE 28-S**. Guangzhou, China, 2013. Disponível em:< <http://en.southinstrument.com/userfiles/upload/28S.pdf>>. Acesso em 22 de abril de 2018.

SOUZA, A. V. de; KRUEGER, C. P. **Avaliação da qualidade das profundidades coletadas por meio de ecobatímetro multifeixe**. In. Revista anual da diretoria de hidrografia e navegação, Rio de Janeiro. *Anais eletrônicos...* Rio de Janeiro: Marinha do Brasil, 2009. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/>>. Acessado em: 14 jun. 2018.

STECH, J. L.; LORENZETTI, J. A. The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. **Journal Geophysical Research**, v. 97, n. 66, p. 9507-9520, 1992.

TARBOTON, D. G. 2002. "Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (Taudem)," Utah Water Research Laboratory, Utah State University. Acessado em Maio de 2013: <http://www.engineering.usu.edu/dtarb>

TELLES, R. M. **Inundações urbanas nos municípios de Pedro Osório e Cerrito-RS**. 2002. 74 f. Dissertação (Mestrado) em Geociências – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TRIGG, M. A.; BIRCH, C. E.; NEAL, J. C.; BATES, P. D.; SMITH, A.; SAMPSON, C. C.; YAMAZAKI, D.; HIRABAYASHI, Y.; PAPPENBERGER, F.; DUTRA, E.; WARD, P. J.; WINSEMIUS, H. C.; SALAMON, P.; DOTTORI, F.; RUDARI, R.; KAPPES, M. S.; SIMPSON, A. L.; HADZILACOS, G.; FEWTRELL, T. J. The credibility challenge for global fluvial flood risk analysis. **Environmental Research Letters**, v. 11, 2016.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS. 2005. 678 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p.

TURCOTTE, R.; FORTIN, J. P.; ROUSSEAU, A. N.; MASSICOTTE, S.; VILLENEUVE, J. P. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. **Journal of Hydrology**, v. 240, n. 3, p. 225–242, 2001.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **Mapa de URHs da América do Sul**. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/sensoriamento-remoto/mapa-de-urhs-da-america-do-sul/>. Acesso em: 10 nov. 2017.

USACE. (2010). HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual Ver. 4,1. 609 Second Street, Davis, CA 95616: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

VIEIRA, E. F.; RANGEL, S. R. S. **Planície Costeira do Rio Grande do Sul: geografia física, vegetação e dinâmica sócio demográfica**. Porto Alegre: Sagra, 1988.

VIOLA, M. R. et al. Modelagem hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 581-591, 2009.

WIGMOSTA, M.S.; VAIL, L.W.; LETTENMAIER, D.P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1665-1679, 1994.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JÚNIOR, C.; DE ALMEIDA, I. R. **Atlas climático da Região sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Floresta, 2011. 336 p.

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 vector-based river network map. **Water Resour. Res.**, v. 49, p. 1–15, 2013.

YAMAZAKI, D.; KANAE, S.; KIM, H.; OKI, T. A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model. **Water Resources Research**, v. 47, n. 4, 2011.