

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**

VITÓRIA ACHE ROCHA LOPES

MODELAGEM HIDROLÓGICA INTEGRADA DA BACIA HIDROGRÁFICA DA LAGUNA DOS  
PATOS E SEUS COMPLEXOS LAGUNARES USANDO O MODELO MGB-IPH COM  
PROPAGAÇÃO INERCIAL DE VAZÕES

Porto Alegre

2015

**VITÓRIA ACHE ROCHA LOPES**

MODELAGEM HIDROLÓGICA INTEGRADA DA BACIA HIDROGRÁFICA DA LAGUNA DOS  
PATOS E SEUS COMPLEXOS LAGUNARES USANDO O MODELO MGB-IPH COM  
PROPAGAÇÃO INERCIAL DE VAZÕES

Trabalho de Diplomação apresentado ao  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas da  
Universidade do Rio Grande do Sul, como  
parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheira Ambiental

**Orientador:** Walter Collischonn

**Co-orientador:** Fernando Mainardi Fan

Porto Alegre

2015

**VITÓRIA ACHE ROCHA LOPES**

MODELAGEM HIDROLÓGICA INTEGRADA DA BACIA HIDROGRÁFICA DA LAGUNA DOS  
PATOS E SEUS COMPLEXOS LAGUNARES USANDO O MODELO MGB-IPH COM  
PROPAGAÇÃO INERCIAL DE VAZÕES

Trabalho de Conclusão de curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 11 de dezembro de 2015 pela comissão avaliadora constituída pelos integrantes:

**Orientador:**

Prof. Walter Collischonn

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Co-orientador:**

Prof. Fernando Mainardi Fan

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Paulo Rógenes Monteiro Pontes**

Civil. Eng., M.Sc. em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH – UFRGS

**Prof. Joel Avruch Goldenfum**

Civil Eng., MSc, PhD/DIC

Professor associado IPH - UFRGS

**Daniela Bemfica**

Engenheira Civil - Diretora DOP/DEP

Para meus pais e avós

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Aos meus Pais, Eliane Ache e Mario Rocha Lopes Filho, por todo o carinho, amor, dedicação e apoio durante a minha vida e meus estudos na UFRGS, que foram fundamentais para eu me tornar quem sou hoje.

Ao meu orientador Walter Collischonn e ao meu co-orientador Fernando Mainardi Fan, pelos ensinamentos, paciência, correções, conselhos e empenho que foram de extrema importância para a realização desse estudo e para minha formação.

Aos demais integrantes do grupo HGE, em especial Paulo Pontes e Vinicius Siqueira, por todos os ensinamentos proporcionados, sem os quais esse trabalho não seria possível, assim como pela companhia e amizade.

Aos bons professores que tive o prazer de conhecer e que me proporcionaram tantos conhecimentos.

A meus colegas de faculdade por terem tornado essa jornada um grande divertimento, em especial, Ricardo Nuñez, Tabatha Machado, Pedro Jardim, Henrique Oliveira, Raul Turatti e Eduardo Rinaldi.

Ao meu namorado, Bernardo Tazoniero, pela companhia e por me apoiar incondicionalmente.

A todos os meus familiares e amigos, os que já mencionei e que não mencionei, todos que eu amo, por fazerem parte da minha vida e das minhas conquistas.

À chance de poder estar aqui, viver, crescer e ser feliz.

## RESUMO

A bacia hidrográfica da Laguna dos Patos, uma grande bacia que contempla áreas do Rio Grande do Sul e Uruguai, detém grande importância econômica, social e ambiental para o estado do Rio Grande do Sul. Apesar de existirem muitos estudos isolados das sub-bacias pertencentes a essa bacia e da hidrodinâmica de seus complexos lagunares, uma abordagem integrada ainda não foi identificada na literatura existente. Essa abordagem é necessária para o planejamento integrado, de forma a permitir avaliações de mudanças de uso do solo e climáticas, a previsão de cheias, entre outros estudos importantes no planejamento e entendimento do comportamento desse sistema complexo. O presente estudo utilizou o modelo MGB-IPH com método de propagação de vazões inercial para modelar a bacia hidrográfica completa da Laguna dos Patos e seus complexos lagunares. Simular rios e lagos com um único modelo hidrológico e hidráulico consiste em um estudo inovador e desafiador, mas que se mostrou possível. Foi possível representar de forma considerada satisfatória os principais rios da bacia e verificar qualitativamente a representação dos níveis no Guaíba e na Laguna dos Patos. Verificou-se que a média dos níveis observados foi bem representada pelos níveis simulados, principalmente nos 6 postos mais à montante, no Guaíba e na porção Lagunar da Laguna dos Patos. Isso está de acordo com a literatura, já que oscilações em escalas de tempo de alguns dias são provenientes do vento e em escalas de tempo maiores a descarga fluviométrica apresenta maior influência. Já na região estuarina, acredita-se que os resultados ainda podem ser melhorados por meio da calibração das relações geomorfológicas nessa porção da bacia, sendo que no posto mais a jusante as influências das marés são demarcadas. Por fim, verificou-se que o modelo MGB-IPH Inercial foi uma ferramenta útil na modelagem simultânea de rios e lagos e permitiu uma boa representação do sistema da bacia hidrográfica da Laguna dos Patos de forma geral. Estudos futuros incluem principalmente a análise de mudanças do solo e climáticas e a simulação de eventos extremos como a cheia de 1941 com a inclusão da influência do vento no modelo.

**Palavras chave:** Modelagem hidrológica, MGB-IPH Inercial, Bacia Hidrográfica da Laguna dos Patos

## Sumário

1	Introdução.....	8
2	Objetivos .....	11
2.1	Objetivo geral.....	11
2.2	Objetivos específicos .....	11
3	Revisão Bibliográfica .....	11
3.1	Área de estudo e pesquisas realizadas na região .....	11
3.2	Modelagem Hidrológica de bacias.....	14
3.3	Comentários finais sobre a revisão bibliográfica.....	22
4	Materiais e métodos .....	23
4.1	Banco de dados.....	24
4.1.1	Mapas: Modelo digital de elevação e batimetria.....	24
4.1.2	Mapas: Unidades de Resposta Hidrológica .....	25
4.1.3	Dados hidrológicos .....	26
4.2	Discretização e definição da rede de drenagem .....	28
4.3	Relações geomorfológicas .....	30
4.4	Minibacias com contribuição lateral.....	32
4.5	Pré-processamento.....	32
4.6	Procedimento de calibração .....	33
4.6.1	Métricas de desempenho.....	33
4.6.2	Definição dos parâmetros calibráveis iniciais .....	34
5	Resultados .....	34
5.1	Discretização final do sistema.....	34
5.2	Calibração da vazão nos rios.....	37
5.2.1	Métricas de desempenho.....	38
5.2.2	Hidrogramas .....	43
5.3	Validação da vazão nos rios .....	54
5.3.1	Métricas de desempenho.....	54
5.3.2	Hidrogramas da validação .....	58
5.4	Comparação das áreas alagadas com imagens de satélite.....	65
5.4.1	Lago Guaíba e Laguna dos Patos – Estiagem – 3 fev 2007 .....	65
5.4.2	Lago Guaíba, Laguna dos Patos e afluentes – Cheia – 1º out 2007 .....	66

5.4.3	Canal de São Gonçalo, estuário da Laguna dos Patos e norte da Lagoa Mirim – Cheia – 27 set 2000.....	68
5.4.4	Lagoa Mirim e Lagoa Mangueira – Estiagem – 3 dez 2007 .....	68
5.4.5	Lagoa Mirim e Lagoa Mangueira – Cheia – 2 jun 2007 .....	69
5.5	Avaliação da representação dos níveis na Laguna dos Patos.....	70
5.6	Comparação Muskingum-Cunge x Inercial .....	74
6	Conclusões e recomendações .....	76
7	Referências Bibliográficas.....	79

# 1 Introdução

A bacia hidrográfica da Laguna dos Patos é uma grande bacia hidrográfica brasileira localizada na metade oeste do estado do Rio Grande do Sul (RS), abrangendo também áreas do Uruguai. Ela detém grande importância econômica, ambiental e social para o estado do Rio Grande do Sul. A bacia contém 9 das 10 cidades do RS com maior PIB em 2012 (FEE, 2014): Porto Alegre, Caxias do Sul, Canoas, Rio Grande, Gravataí, Triunfo, Novo Hamburgo, Pelotas e Santa Cruz do Sul (em ordem decrescente de PIB) somando cerca de 118 milhões de reais. Além disso, na cidade de Rio Grande está localizado o Porto Internacional de Rio Grande, o qual detém importância expressiva para o comércio brasileiro. Nesse contexto, a Laguna dos Patos, com seu curso navegável de cerca de 258 km, desempenha um papel econômico fundamental como principal meio de transporte de mercadorias interligando o porto de Rio Grande a cidades como Pelotas e a Capital Porto Alegre (Barenho, 2005). Além do papel que possui na logística do comércio do RS, a bacia ainda contém importantes zonas industriais como o polo petroquímico de Triunfo e é ocupada por extensas áreas agrícolas.

Com relação a sua importância ambiental, muitas unidades de conservação como a Estação Ecológica do Taim e o Parque nacional da Ilha do Peixe, consideradas Reservas da Biosfera pela UNESCO, fazem parte da sua área. Os complexos lagunares da região, interligados por canais e banhados, constituem vasta riqueza de fauna e flora. O próprio estuário da Laguna dos Patos é uma área de grande riqueza ambiental sendo aspectos de sua fauna e flora retratados em diversos estudos (Asmus, 1985; Capitoli *et al.*, 1977; Capitoli *et al.*, 1978; Abreu *et al.*, 1995; Costa *et al.*, 1997; Garcia *et al.*, 2001; Garcia *et al.*, 2004). Tagliani *et al.* (2003) sugerem a realização da gestão integrada da zona costeira no estuário da Laguna dos Patos em função de sua importância e da degradação ambiental que ocorre na região e que afeta, por exemplo, cerca 50 mil pessoas envolvidas na atividade de pesca artesanal, uma vez que o número de peixes no estuário tem diminuído causando uma séria crise social. De fato, uma questão sócio-ambiental importante na bacia da Laguna dos Patos é a

existência de locais de pesca artesanal em seu estuário, Schafer & Reis (2008) estimaram a existência de 124 áreas de pesca artesanal na região.

Um tema muito recorrente relacionado à importância social na bacia é a questão da gestão de cheias. No mês de outubro de 2015, por exemplo, ocorreram eventos de precipitação extremos causando cheias no RS. No dia 10 de outubro de 2015 cerca de 20,2 mil pessoas haviam sido atingidas pelas enchentes no estado, entre os locais mais atingidos, estão os vales do Caí, Rio Pardo e Taquari, contidos na bacia da Laguna dos Patos (RBS, 2015). Dois dias depois esse número subiu para 25 mil pessoas, totalizando 7675 pessoas que tiveram que deixar suas casas (RBS, 2015). Em reportagem do jornal Zero Hora do dia 21 de outubro de 2015 (ZH, 2015), foi destacado que mais de 1000 pessoas estavam desalojadas apenas em Rio Grande e Pelotas.

Os estudos hidrológicos são fundamentais para o entendimento do comportamento de uma bacia hidrográfica e seus sistemas ambientais associados e, portanto, desempenham uma importante função no planejamento propiciando o desenvolvimento econômico e ambiental da região analisada.

Na atualidade existem relatos de pesquisas que contemplam isoladamente as sub-bacias contidas na área de drenagem da Laguna dos Patos, como a do Rio Taquari-Antas (Larentis *et al.*, 2008), do Rio Caí (Pedrollo & Pedrollo, 2013), do Rio dos Sinos (Pereira *et al.*, 2012), do Rio Alto Jacuí (Marangon-Lima *et al.* 2014), do Rio Camaquã (Lanna & Pedrollo, 2003) e da Lagoa Mirim (Oliveira *et al.*, 2015). Existem também muitos estudos pertinentes sobre a hidrodinâmica da Laguna dos Patos, no entanto a maioria desses estudos utiliza como vazões afluentes estimativas simplificadas baseadas em estações fluviométricas (Möller, *et al.*, 1996; Möller, *et al.*, 2001; Marques & Möller, 2008; Barros *et al.*, 2014) desconsiderando parte considerável da bacia hidrográfica que contribui à Laguna.

Apesar da importância da bacia hidrográfica da Laguna dos Patos, são escassos os estudos que a retratam inteiramente de forma integrada. Essa abordagem integrada permitiria uma melhor estimativa das vazões afluentes à Laguna dos Patos, o que contribuiria para uma maior representatividade dos resultados de modelos

hidrodinâmicos detalhados da mesma e assim melhor caracterização de seu comportamento hidrodinâmico. Outras vantagens de, com apenas um modelo hidrológico e hidráulico, simular toda a bacia e seus complexos é a possível simulação de eventos extremos, como a cheia de 1941 e a e a possibilidade de verificação da influência da vazão afluyente à laguna nos níveis da mesma, analisando, por exemplo, o quanto a vazão explica os níveis medidos na Laguna. Ademais, um modelo integrado possibilitaria o planejamento integrado da região, possibilitando o desenvolvimento de sistemas de previsão de enchentes robustos, algo fundamental na gestão de cheias, assim como a análise do transporte e deposição de sedimentos entre os rios e a Laguna e viabilizaria estudos sobre os efeitos de mudanças climáticas e de mudanças de uso do solo na bacia e nos corpos lagunares.

Para a realização desta abordagem integrada é necessário um modelo hidráulico e hidrológico que, além de ter transformação chuva-vazão, representar o comportamento hidrológico da bacia e propagar as vazões nos rios, possa representar também as planícies de inundação, incluir a influência de jusante e também computar os níveis de água em qualquer parte da bacia, esses últimos requisitos são requisitos mínimos necessários para que possa haver a simulação dos corpos lagunares.

É neste contexto de necessidade de estratégias que permitam a análise hidrológica integrada da bacia hidrográfica da Laguna dos Patos que se insere o presente trabalho. O presente trabalho se propõe a investigar a hidrologia da Laguna dos Patos através da modelagem hidrológica integrada da bacia hidrográfica e de seus complexos lagunares. É utilizado como ferramenta o modelo MGB-IPH com método inercial de propagação de vazões. Acredita-se que a representação de bacias hidrográficas, rios e lagos em apenas um modelo hidrológico e hidráulico pseudo-bidimensional, como é aqui apresentada, possui aspectos de inovação, e que os resultados obtidos com a modelagem completa da bacia da Laguna dos Patos possam servir como base para o desenvolvimento de múltiplos estudos hidrológicos na região.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo geral**

Investigar a aplicação do modelo MGB-IPH com método inercial de propagação de vazões para fazer a representação hidrológica e hidráulica da bacia hidrográfica completa da Laguna dos Patos, simulando os rios e os corpos lagunares de forma integrada com apenas um modelo.

### **2.2 Objetivos específicos**

Além do objetivo geral, o presente estudo possui os objetivos específicos detalhados a seguir:

- Avaliar a discretização da bacia hidrográfica, incluindo a representação do lago, para permitir a aplicação do modelo hidrológico na mesma;
- Avaliar a representação das vazões nos rios afluentes à Laguna, calibrando e verificando estes onde existem dados;
- Verificar se é possível avaliar os níveis na Laguna dos Patos e no Lago Guaíba com o modelo proposto;
- Verificar os benefícios da aplicação do método de propagação de vazões inercial em relação ao método Muskingum-Cunge nos principais afluentes da bacia.

## **3 Revisão Bibliográfica**

### **3.1 Área de estudo e pesquisas realizadas na região**

A bacia hidrográfica da laguna dos Patos possui cerca de 180 mil km<sup>2</sup> e localiza-se em sua maior parte no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, enquanto o restante localiza-se no Uruguai. A localização da bacia está representada na Figura 1, assim como seus principais afluentes e a capital do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

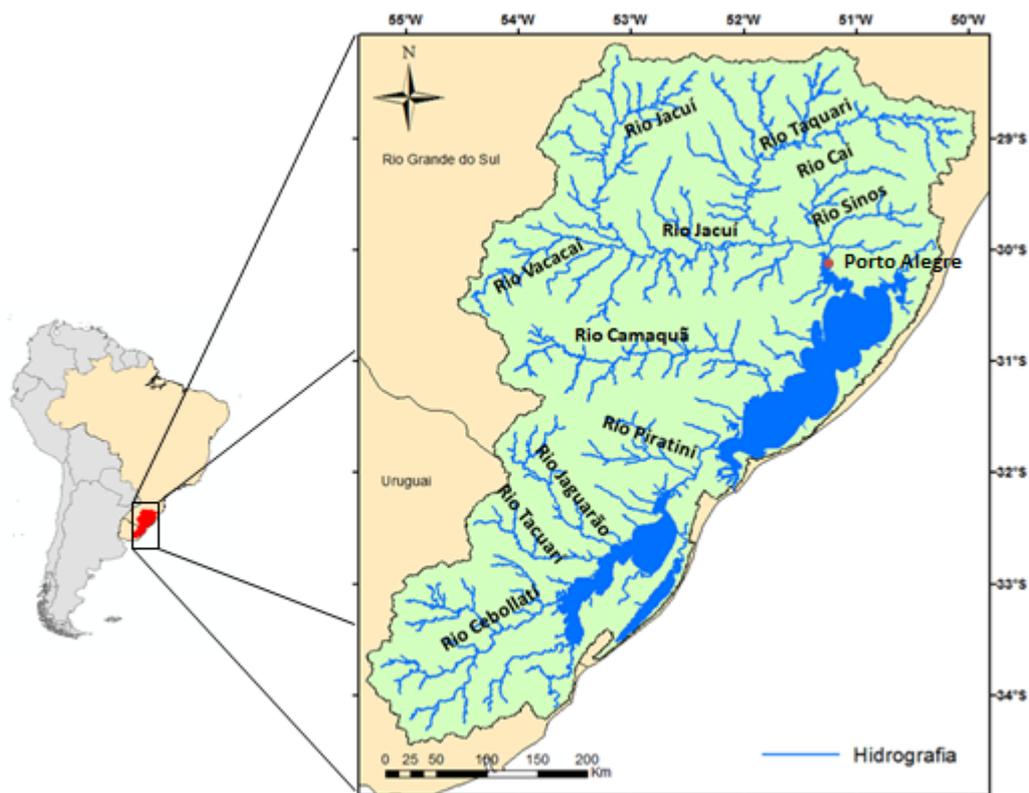


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica da Laguna dos Patos e de suas principais afluentes.

A Laguna dos Patos foi considerada por Kjerfve (1986), ao fazer um estudo comparativo de lagoas costeiras, a maior laguna estrangulada do mundo (laguna com saída controlada por um canal). Ela tem cerca de 250 km de extensão na direção NNE-SSW, com largura média de 40 km e profundidade média de 5m. A morfologia da laguna é marcada por numerosas piscinas limitadas por rasos bancos de areia e a mesma se conecta com o mar por um canal estreito de 1-2 km de largura e 20 km de comprimento, motivo de sua classificação como laguna estrangulada. Assim como a maioria das lagoas estranguladas, os efeitos das marés têm importância reduzida na circulação já que as mesmas são atenuadas pelo canal longo e estreito, sendo a circulação principalmente controlada pelo vento e vazões.

Diversos estudos hidrodinâmicos da Laguna foram realizados para detectar as influências dominantes em sua circulação. A partir de análise de séries de vento, vazão e nível e da aplicação de um modelo numérico tridimensional para simular a hidrodinâmica da Laguna, Möller *et al.* (2001) constataram que durante a maioria do

tempo, quando as vazões afluentes são relativamente baixas, a circulação é principalmente modulada pelo vento, enquanto que nos meses finais do inverno a vazão acaba sendo o principal fator na circulação em função da alta descarga nesse período. Ademais, em uma escala de tempo mais longa, a influência das vazões é demarcada pelo estabelecimento de um nível médio, que é modulado, em escalas de tempo menores, pelo vento. Esse estudo também verificou que a componente longitudinal do vento (paralela à linha da costa) é o principal fator que influencia na dinâmica da Laguna em escalas de tempo de passagem de sistemas frontais, entre 3 e 16 dias.

A dinâmica da Laguna em função dos ventos predominantes, nordeste e sudoeste está representada na Figura 2, adaptada de Möller *et al.* (2001). Para as direções predominantes de vento nordeste e sudoeste, a região correspondente à Ponta da Feitoria age como um “ponto de inflexão” onde os gradientes de pressão condicionados pelo vento mudam de sinal. Quando o vento tem direção sudoeste, o nível d’água apresenta uma depressão na Ponta da Feitoria e os níveis aumentam no norte da laguna e na região estuarina, dificultando o fluxo de água do norte na laguna para o sul e da laguna para o oceano. Quando o vento tem direção nordeste o contrário ocorre, facilitando o fluxo da laguna em direção ao oceano.

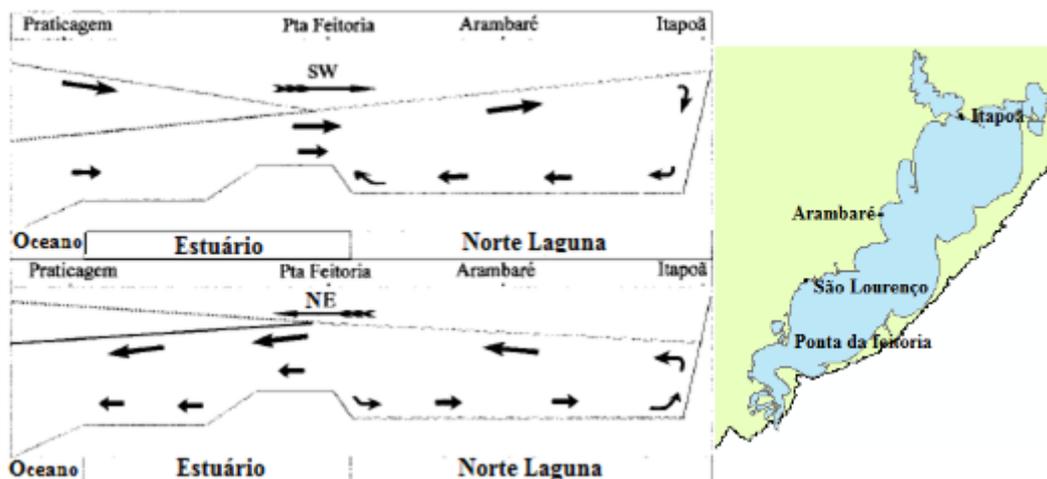


Figura 2 – dinâmica da Laguna em resposta aos ventos de sudoeste e nordeste

Marques & Möller (2008) fizeram análise de séries temporais de descarga fluvial nos 3 principais rios da bacia (Taquari, Jacuí e Camaquã), de níveis e Índice de

Oscilação Sul e determinaram que, em escala de anos, a descarga fluvial explica 80% da variabilidade dos níveis de água na região lagunar (à montante do estuário), e cerca de 50% na região estuarina. No entanto, nesse estudo não é considerada a contribuição integrada da bacia da laguna dos Patos, por exemplo, a contribuição da vazão proveniente do canal de São Gonçalo não foi considerada. Barros et al. (2014) utilizaram um modelo hidrodinâmico tridimensional para estudar a influência da descarga fluviométrica na hidrodinâmica da Laguna dos Patos. Esse estudo também concluiu que a parte lagunar da laguna dos Patos tem seus níveis influenciados mais expressivamente pela vazão que a parte estuarina, no entanto também não foi contemplada a contribuição da bacia contribuinte completa. Os resultados desse estudo sugerem ainda que a intensidade das vazões afluentes à laguna controla diretamente o fluxo de água em direção ao oceano e ao estuário.

### **3.2 Modelagem Hidrológica de bacias**

Modelos hidrológicos buscam representar os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica realizando uma transformação chuva-vazão, ou seja, esses modelos buscam simular a descarga fluvial proveniente da chuva considerando a sua interação com os diversos aspectos do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica. Tais modelos podem ser extremamente simples, como o método racional utilizado para projetos de drenagem urbana, considerando as características da bacia de forma homogênea; como podem ser complexos, considerando as características da bacia de forma distribuída contemplando sua variabilidade e simulando os processos hidrológicos de forma relativamente completa, incluindo a evapotranspiração, infiltração, interceptação, propagação de fluxo de água no solo, sub-solo e superfície. Após a simulação da vazão que entra no curso do rio, modelos hidrológicos também podem incluir modelos hidráulicos de forma a propagar a vazão pelo mesmo. Exemplos de modelos hidrológicos mais complexos são o LISFLOOD (Van Der Knijff *et al.*, 2010) modelo distribuído desenvolvido para grandes bacias europeias e o MGB-IPH modelo desenvolvido no Brasil por Collischonn (2001) também para bacias de grande escala.

Existem também modelos puramente hidrodinâmicos que não possuem módulos de transformação de chuva em vazão, mas que podem representar sistemas

hidrodinâmicos mais complexos como lagos de forma representativa. Um modelo hidráulico capaz de simular complexos lagunares e que foi desenvolvido no Brasil é o IPH-ECO (Fragoso Jr. *et al.*, 2009), modelo hidrodinâmico tridimensional detalhado que usa de entrada séries de vazão afluente e seus locais de entrada, além de outros fatores como o vento; outro exemplo de modelos que tem essa mesma finalidade é o POM (Princeton Ocean Model) utilizado por Castelão & Möller (2003 para estudar a dinâmica da Laguna dos Patos tridimensionalmente ao utilizar a vento e vazões afluentes idealizadas.

De forma a facilitar a compreensão sobre as características de modelos hidrológicos algumas classificações são pertinentes. Modelos podem ser conceituais ou empíricos; modelos conceituais se baseiam na consideração de processos físicos e na utilização de equações e relações definidas na literatura que representam os processos do ciclo hidrológico fisicamente. Modelos empíricos por sua vez ajustam os valores calculados aos dados observados sem considerar os processos físicos. A segunda abordagem pode ser aplicada quando não se tem conhecimento do funcionamento dos processos físicos relacionados à variável a ser modelada, por exemplo. No caso de modelos hidrológicos, a primeira abordagem é mais aconselhável por permitir melhor extrapolação fisicamente coerente de resultados, dado a existência de literatura sobre o funcionamento dos processos físicos e de dados.

Modelos também podem ser distribuídos, considerando a variabilidade espacial da bacia hidrográfica, ou concentrados, considerando a bacia hidrográfica homogênea em toda a sua extensão. Modelos distribuídos, em sua maioria, necessitam a discretização da bacia hidrográfica em pequenas células (quadradas por exemplo) de forma que cada célula possui suas características específicas relacionadas com o tipo de solo, vegetação, e outras características que influenciam seu comportamento hidrológico. Escolher entre modelos distribuídos e concentrados está intimamente relacionado com a escala em que se trabalha. Ao simular bacias com grandes áreas, ou seja, de grande escala, modelos concentrados não são aconselháveis pois possuem limitações para representar a variabilidade e, portanto, os processos hidrológicos que ocorrem na bacia. Enquanto ao se trabalhar em pequena escala, com bacias pequenas, modelos concentrados podem ser suficientes.

Para definir o tipo de modelo hidrológico a ser utilizado em uma bacia hidrográfica, deve-se definir a escala em que se trabalha. Grandes bacias ou bacias de grande escala podem ser entendidas (HGE, 2015) como regiões de área geralmente superior a 1000 km<sup>2</sup>, onde os processos de translação e atenuação de ondas de cheias são relevantes na compreensão de sua dinâmica, onde para efetuar a caracterização do terreno é necessário o uso de ferramentas como Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ou sensoriamento remoto em função da dificuldade de realização apenas de medições in-situ e, por fim, onde a chuva e as características físicas na bacia não podem ser consideradas homogêneas em toda a sua extensão.

A bacia hidrográfica da Laguna dos Patos, com aproximadamente 180 mil km<sup>2</sup> de área, se encaixa no contexto de uma grande bacia e, portanto, pode ser trabalhada com modelos distribuídos (ou semi-distribuídos) de grande escala. Dessa forma o modelo conceitual semi-distribuído MGB-IPH se apresenta como uma ferramenta importante na modelagem desse sistema. O modelo MGB-IPH tem seu funcionamento esquematizado na Figura 3. No processo de transformação chuva-vazão do modelo são contabilizados os processos do ciclo hidrológico, a precipitação (na Figura 3 PC é a precipitação total e P, a precipitação incidente no solo descontando a interceptação), interceptação, umidade do solo ( $W_m$ ) e infiltração. Após ocorrer infiltração o deslocamento da água pela bacia ocorre por meio de 3 reservatórios conceituais, um superficial ( $Q_{sup}$ ), um sub-superficial ( $Q_{sub}$ ) e outro subterrâneo ( $Q_{bas}$ ), representando o escoamento acima do solo ( $D_{sup}$ ), na camada superior de solo ( $D_{int}$ ) e no aquífero subterrâneo ( $D_{bas}$ ), respectivamente. Informações mais detalhadas sobre o funcionamento do modelo foram descritas por Collischonn & Tucci (2001) e Collischonn (2001).

Os dados de entrada do modelo consistem em séries hidrológicas temporais de precipitação, de vazões observadas, de variáveis climáticas, e de dados espaciais como as características topográficas, de tipo de solo, de cobertura do solo e de hidrografia da bacia. As últimas quatro características são provenientes do pre-processamento de mapas de tipo de solo, uso do solo, vegetação e modelos digitais de elevação (MDE). Por meio do processamento e reclassificação dos mapas de solo e vegetação definem-se blocos, ou classes de resposta hidrológica com comportamento hidrológico

específico definindo as características físicas da bacia de forma distribuída. Os parâmetros do modelo são definidos em função das classes de resposta hidrológica e atrelados a sub-bacias definidas pelo usuário, ou seja, os parâmetros são definidos por classe e podem ser diferentes para cada sub-bacia. Para permitir a modelagem numérica, as características físicas da bacia, assim como as séries de precipitação e clima, são discretizadas, não em células quadradas como utilizado por Collischonn & Tucci (2001), mas em minibacias definidas a partir do MDE (Fan & Collischonn, 2014). Isto é, cada sub-bacia contém diversas minibacias, sendo que as sub-bacias são definidas unicamente para permitir a variabilidade espacial dos parâmetros relacionados à classes de resposta hidrológica e sua definição é opcional; já as minibacias são as unidades de discretização do modelo. Por meio da combinação das classes de resposta hidrológica e minibacias tem-se unidades de resposta hidrológica (URH). Cada minibacia portanto funciona como um pequeno modelo concentrado, e por isso o modelo pode ser classificado como um modelo semi-distribuído.

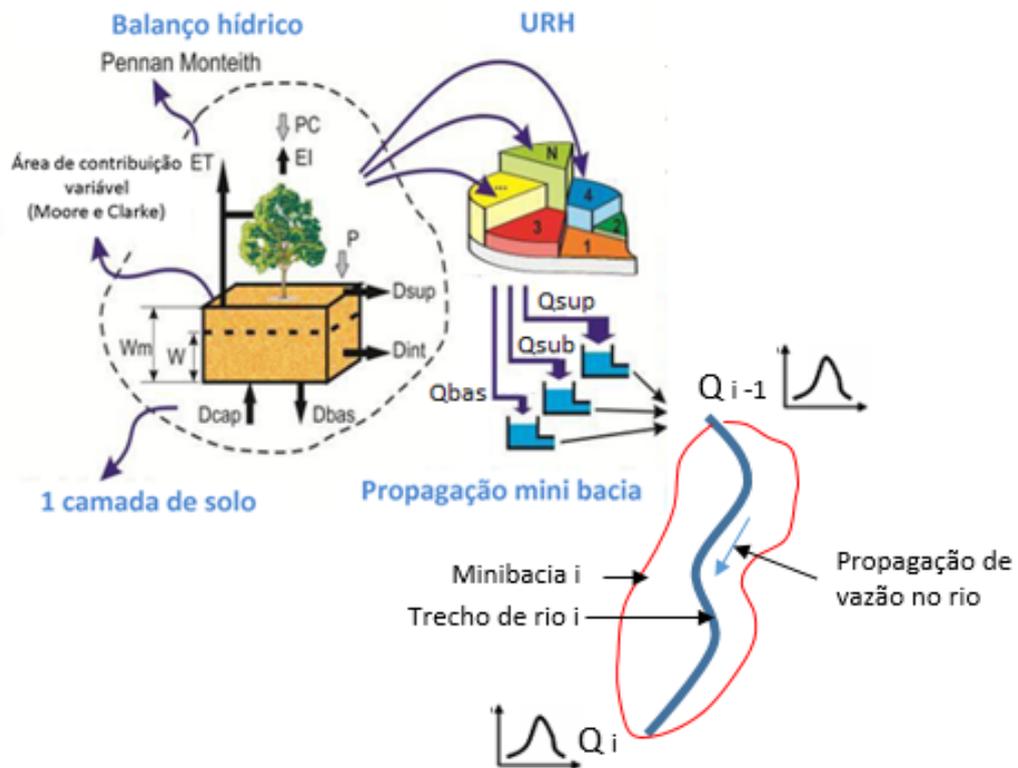


Figura 3 - Esquema do funcionamento conceitual do modelo MGB-IPH

(Adaptado de Paiva, 2009)

Após estimar a vazão que atinge o curso d'água, a vazão é propagada no mesmo. Existem muitos métodos de propagação de vazão em rios, sendo que métodos mais completos se baseiam na aplicação e na resolução das Equações de Saint-Venant. Esse conjunto de equações é composto pela equação da continuidade (Equação 1) e dinâmica (Equação 2).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (\text{Eq. 2})$$

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

O método de propagação de vazão em rios utilizado pelo modelo MGB-IPH originalmente é o método de Muskingum-Cunge, que é um método de onda cinemática com controle de difusão (Collischonn & Dornelles, 2013). O método de Muskingum-Cunge combina a equação da continuidade (aproximada por diferenças finitas, equação 3) com uma versão simplificada da equação dinâmica de Saint-Venant (sem o primeiro, o segundo e o terceiro termo da equação 2) relacionando o armazenamento às vazões de entrada e saída de um trecho de rio (Equação 4) usando uma ponderação entre a entrada e a saída.

$$\frac{S_{t+\Delta t} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+\Delta t}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+\Delta t}}{2} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$Q_{t+\Delta t} = C1 \cdot I_{t+\Delta t} + C2 \cdot I_t + C3 \cdot Q_t \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde  $Q$  é a vazão de saída ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $I$  é a vazão de entrada ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $S$  é o armazenamento ( $\text{m}^3$ ) e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo. Os sobrescritos representam os intervalos de tempo referentes a essas variáveis. Os coeficientes são calculados por meio das equações 5, 6 e 7.

$$C1 = \frac{\Delta t - 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$C2 = \frac{\Delta t + 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$C3 = \frac{2.K.(1-X)-\Delta t}{2.K.(1-X)+\Delta t} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde  $\Delta t$  é o intervalo de tempo e K e X são parâmetros calculados conforme as equações 8 e 9, respectivamente.

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{B.c.S_0.\Delta x} \right) \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde  $\Delta x$  é o comprimento do trecho de rio, K é o parâmetro de Muskingum (s), c é a celeridade da onda de cheia, Q é uma vazão de referência ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), B é a largura do rio (m) e  $S_0$  é a declividade de fundo do rio (m/m). Esse método de propagação de vazão é relativamente simples, não permitindo a simulação da influência de planícies de inundação ou a computação de níveis, operações fundamentais para se poder simular o comportamento de um lago. Portanto, o modelo MGB-IPH com esse algoritmo de propagação de vazões em rios não seria suficiente para simular o comportamento da Laguna dos Patos.

O método de propagação de vazão utilizado no presente estudo é um método mais complexo, conhecido como modelo inercial local, ou mais simplesmente modelo inercial (Fan *et al.*, 2014). A versão do modelo MGB-IPH utilizada, que pode ser chamada de MGB-IPH Inercial, foi apresentada por Pontes *et al.* (2015), que adaptaram o esquema numérico proposto por Bates *et al.* (2010). O método inercial de propagação se baseia em uma versão mais completa das equações de Saint-Venant em que apenas o segundo termo da equação 2, que representa a inércia advectiva, é desprezado. Isso pode ser feito já que o mesmo frequentemente apresenta valores muito inferiores aos dos outros termos da equação (Moussa & Bocquillon, 1996). A equação resultante da equação 2 a partir dessas hipóteses é a equação 10.

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

Na qual  $Q_i^{t+\Delta t}$  é a vazão na minibacia i no final do intervalo de tempo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), n é o coeficiente de Manning ( $\text{m}^{-1/3}.\text{s}$ ); o sobrescrito t ou t +  $\Delta t$  corresponde ao tempo e o

subscrito  $i$  corresponde ao espaço, no caso à minibacia;  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m.s^{-2}$ );  $hflow_i$  (m) corresponde à profundidade na seção transversal calculada entre a minibacia  $i$  e a minibacia  $i+1$ ;  $B$  é a largura do rio no trecho em metros;  $Sflow_i$  é a declividade da linha de água em função da perda de energia na calha do rio calculada pela equação 11, na qual  $y$  é o a cota do nível de água.

$$Sflow_i = \frac{(y_{i+1}^t - y_i^t)}{\Delta x_i} \quad (\text{Eq. 11})$$

A equação da continuidade é aproximada pela equação 12 na qual  $V$  se refere ao volume e os subscritos *in* e *out* se referem à vazão de entrada e saída, respectivamente.

$$\frac{V_i^{t+\Delta t} - V_i^t}{\Delta t} = \sum Q_{in}^{t+\Delta t} - \sum Q_{out}^{t+\Delta t} \quad (\text{Eq. 12})$$

No algoritmo do modelo, primeiramente a equação 9 é aplicada, utilizando inicialmente uma vazão de referência e cotas de níveis d'água iniciais (uma condição inicial pré-definida, como a vazão de calha cheia), para definir o valor de  $Q_i^{t+\Delta t}$  em todas as minibacias. Os valores resultantes são aplicados na equação 12 que fornece o valor de  $V_i^{t+\Delta t}$ . Esse último é utilizado para encontrar o nível d'água por meio da interpolação em uma tabela cota-volume da minibacia, obtida através da integração numérica da curva hipsométrica, que relaciona cota e área alagada, por meio do método dos trapézios. Essa curva normalmente é obtida por meio de operações com o Modelo Digital de Elevação. Cabe ressaltar que deve ser adicionado o valor da profundidade da calha do rio às cotas obtidas dessa forma já que o MDE não contempla a elevação da calha do rio e sim do nível d'água. A partir do nível d'água, os valores de profundidade são calculados e atualizados no modelo por meio da equação 13.

$$h_i^{t+1} = y_i^{t+1} - Ztab_{i,1} \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde  $h$  se refere à profundidade e  $Ztab$  corresponde ao nível do fundo do rio para cada minibacia. A Figura 4 (a), esquematiza a discretização das variáveis e minibacias, em que  $h$  é contabilizado na metade do trecho da minibacia e as vazões são contabilizadas no início e no final dos trechos ( ). A figura 4 (b) mostra um exemplo de discretização de uma bacia em minibacias.

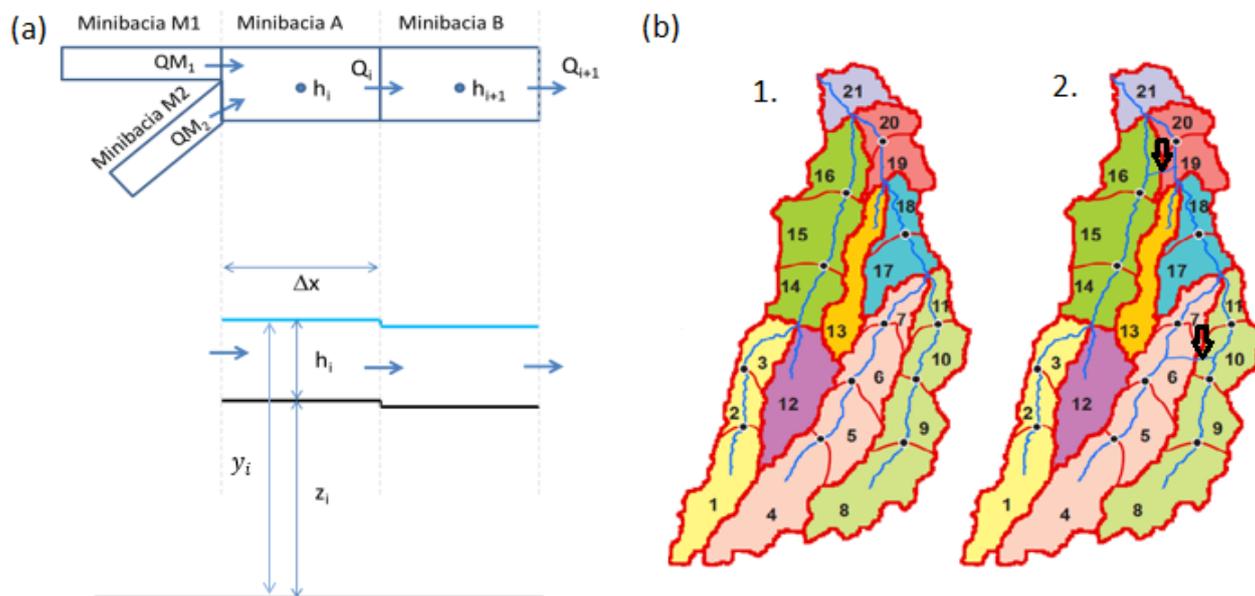


Figura 4 – (a) Discretização das minibacias e das variáveis vazão (QM e Q), nível do fundo do rio (z) e profundidade (h), adaptado de Pontes *et al.* (2015) e (b) discretização da bacia em minibacias (1.) sem contribuição lateral e (2.) com contribuição lateral

As medidas de largura e profundidade do rio são uma incógnita importante em modelos hidrológicos, as mesmas podem (a) ser medidas em campo, (b) em alguns casos estimadas por imagens de satélite ou ainda (c) por meio de relações geomorfológicas relacionam a largura e profundidade à área da bacia utilizando como exutório o local do rio onde se quer estimar esses parâmetros. Normalmente essas relações de dão por meio de equações potenciais definidas empiricamente, como a equação 14, onde  $y$  pode se referir à largura ou à profundidade, Área se refere à área de contribuição e  $a$  e  $b$  são parâmetros.

$$y = a \cdot \text{Área}^b \quad (\text{Eq. 14})$$

De forma a evitar instabilidade numérica no modelo inercial, a condição de Courant-Friedrichs-Levy (CFL) deve ser respeitada. A mesma é representada na equação 15.

$$(\sqrt{gh}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (\text{Eq. 15})$$

Na qual  $h$  continua sendo a profundidade (m);  $\Delta x$ , o comprimento do subtrecho de rio (m);  $\Delta t$ , o passo de tempo de cálculo (s) e  $g$ , a aceleração da gravidade ( $m.s^{-2}$ ). Portanto, para evitar instabilidade numérica a equação 16 deve ser satisfeita.

$$\Delta t = \alpha \frac{\Delta x}{\sqrt{gh}} \quad (\alpha \leq 1) \quad (\text{Eq. 16})$$

O modelo inercial permite ainda a inclusão de contribuição lateral de vazão nas minibacias, ou seja, a partir da definição de áreas (minibacias) sujeitas a inundação, as minibacias podem trocar água lateralmente umas com as outras sem necessariamente estarem ligadas por um trecho de rio. Isso ocorre no modelo por meio da criação de uma drenagem entre as duas bacias laterais como representado na Figura 4 (b) (2.) para as minibacias 16, 19, 6 e 10. Além disso, quando o nível d'água supera a altura da calha do rio e ocorre o extravasamento, a água invade a planície de inundação o que viabiliza a inclusão do efeito dessas planícies nos hidrogramas simulados.

Por fim o modelo MGB-IPH Inercial consiste em uma alternativa viável para representar a bacia da Laguna dos Patos de forma integrada, já que computa níveis d'água, permite a troca lateral entre minibacias e assim simula a influência de planícies de inundação, e possibilita a inclusão efeitos de jusante já que usa os níveis no cálculo da vazão. Mais detalhes sobre aplicações do modelo inercial podem ser encontrados em Fan *et al.*, (2014) e Pontes *et al.* (2015).

### **3.3 Comentários finais sobre a revisão bibliográfica**

Neste capítulo foram primeiramente apresentadas características sobre a bacia hidrográfica da Laguna dos Patos e considerações sobre a dinâmica da laguna baseada em estudos realizados na região. Não foram identificados ao longo da realização desta revisão bibliográfica estudos que contemplem a bacia de forma integrada. Também foram apresentados conceitos de modelagem hidrológica e o modelo MGB-IPH versão inercial, que é a principal ferramenta usada na simulação integrada dessa bacia.

A principal inovação deste trabalho, em comparação com a literatura revisada e as técnicas de modelagem apresentadas, é a primeira aplicação de um modelo hidrológico de grande escala, no caso o modelo MGB-IPH inercial, para a

representação do sistema completo da laguna dos patos incluindo seus corpos lagunares.

## 4 Materiais e métodos

Este capítulo apresenta a metodologia seguida neste trabalho, baseada principalmente nos passos de aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH resumidos na Figura 5.

Primeiramente é necessária a construção do banco de dados utilizado para aplicar o modelo, o qual consiste principalmente em mapas, como modelos digitais de elevação (MDE), de uso do solo e de tipo de solo e arquivos de séries de precipitação, climáticas e de vazão. O MDE é utilizado para gerar a rede de drenagem, definir a área da bacia e discretizar a bacia em minibacias enquanto que os mapas de tipo e uso do solo (e possivelmente vegetação) são combinados e reclassificados para gerar as unidades de resposta hidrológica. Os arquivos de precipitação e clima são preparados e discretizados por minibacia. Os parâmetros fixos são definidos por URH, enquanto que os parâmetros calibráveis são definidos por URH e sub-bacia. Após a simulação, verifica-se se o resultado foi satisfatório; se isso não ocorrer, os parâmetros calibráveis devem ser reajustados e o projeto deve ser simulado novamente. Esse processo deve se repetir até a obtenção de resultados satisfatórios, o mesmo corresponde à calibração do modelo hidrológico.

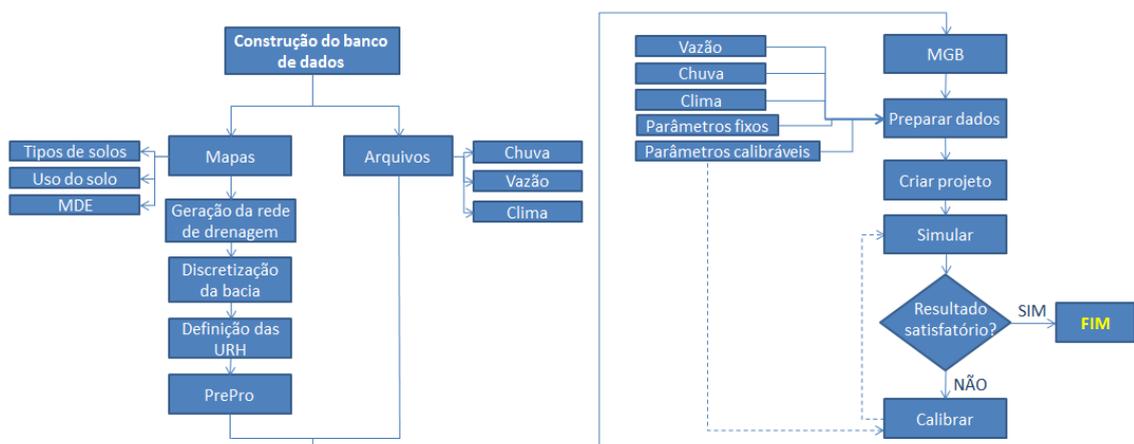


Figura 5 – Etapas de aplicação do modelo MGB-IPH

Nas próximas seções da metodologia as etapas de aplicação do modelo serão descritas, com adição de etapas referentes ao MGB-IPH Inercial que não estão representadas na Figura 5.

## **4.1 Banco de dados**

### **4.1.1 Mapas: Modelo digital de elevação e batimetria**

Os dados de relevo foram obtidos por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução espacial de 90 m e resolução vertical de 1 m. Apesar das limitações do SRTM relacionadas a erros em certos locais devido à presença de vegetação densa ou declividade demasiadamente elevada, os mesmos são apropriados aos objetivos da modelagem proposta no presente estudo em função da escala.

A Batimetria dos corpos d'água inseridos na bacia da Laguna dos Patos foi interpolada e inserida no MDE com base na carta de hidrografia e navegação da Marinha do Brasil realizada por meio de levantamentos feitos entre 1961 e 1966 e de forma a facilitar o processador de discretização feito posteriormente. Como o valor de altimetria que representava a área das lagoas no MDE era zero (onde existia), a batimetria foi somada ao MDE com valores negativos.

O MDE com a batimetria está representado na figura 6, onde a altitude não se refere ao nível do mar para evitar valores negativos que dificultariam o processamento do MDE posteriormente. Para isso foi somado 20 metros a todos os pixels da imagem.

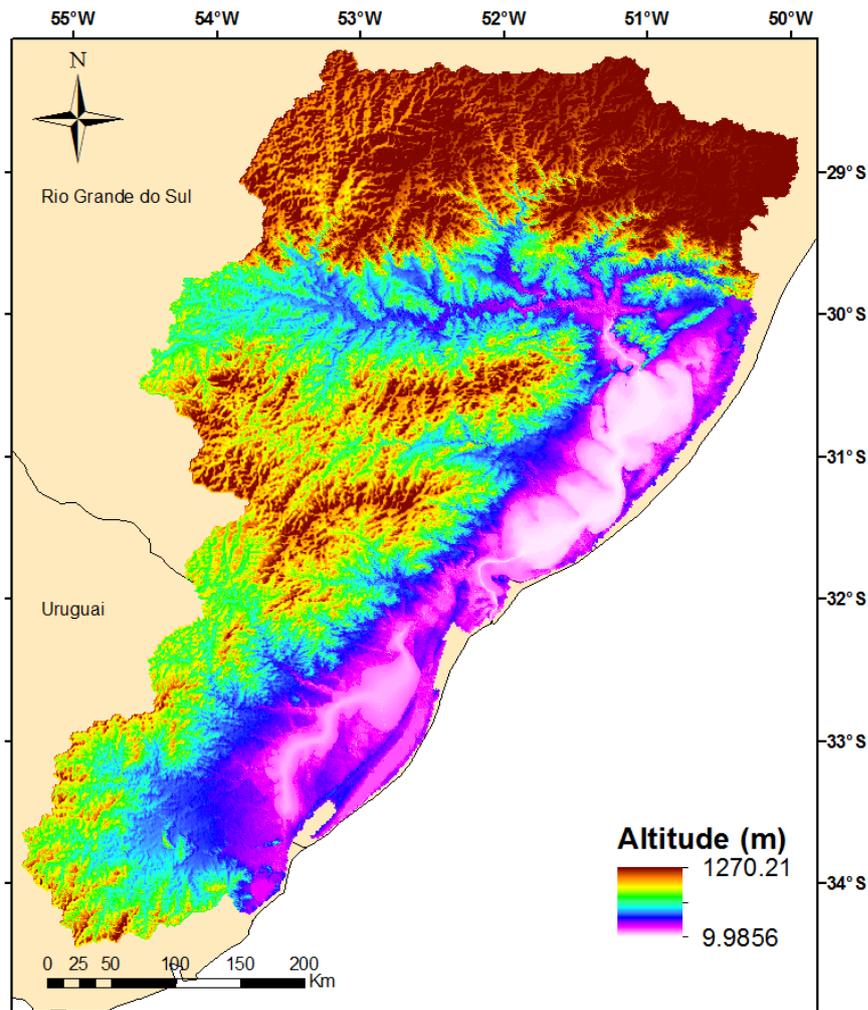


Figura 6 – Modelo digital de elevação e batimetria da bacia da Laguna dos Patos

#### 4.1.2 Mapas: Unidades de Resposta Hidrológica

As Unidades de Resposta Hidrológica representam as regiões que teoricamente possuem o mesmo comportamento hidrológico e, dessa forma, influenciam diretamente os processos hidrológicos simulados pelo modelo.

No presente trabalho foi diretamente utilizado um mapa de URHs desenvolvido por Fan *et al.* (2015a), utilizado também por Pontes *et al.* (2012). Este mapa foi elaborado com base em mapas de tipos de solo da FAO (FAO, 2003), do projeto RADAM BRASIL, e outros produtos mais detalhados de alguns estados brasileiros; e mapas de tipos de vegetação oriundos da iniciativa GlobCover (Arino *et al.*, 2009). Esses mapas foram reclassificados e combinados gerando as Unidades de Resposta

Hidrológica, as quais estão representadas para a bacia da Laguna dos Patos na Figura 7.

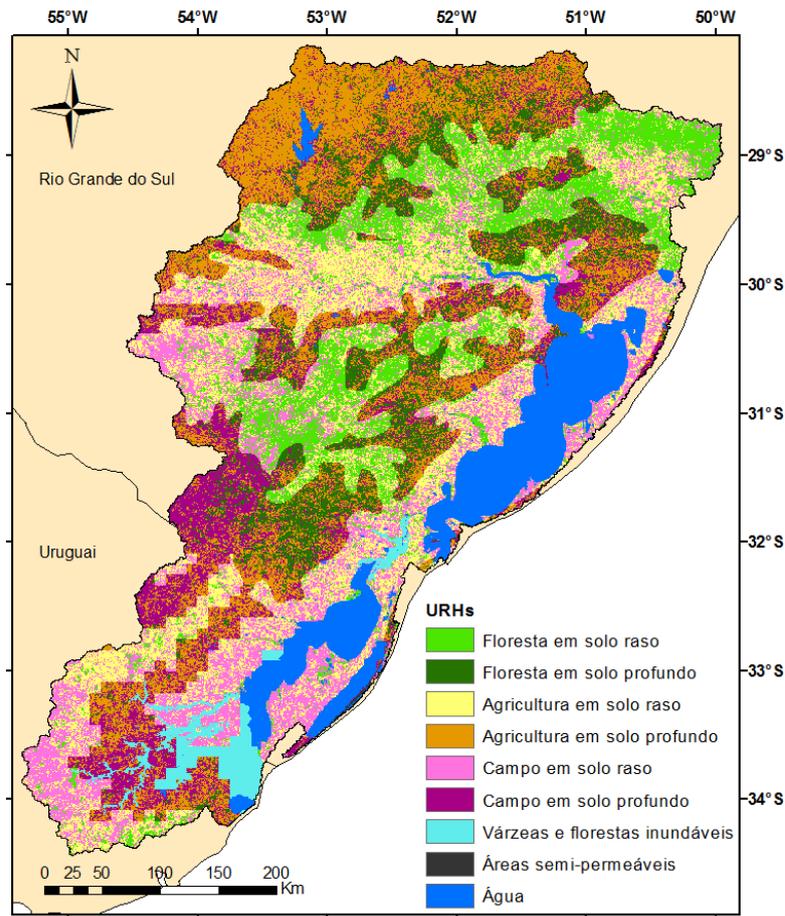


Figura 7 – Unidades de Resposta Hidrológica

#### 4.1.3 Dados hidrológicos

Grande parte dos dados diários de estações pluviométricas utilizados na simulação assim como dos dados de postos fluviométricos foram obtidos do sistema *Hidroweb* mantido pela Agencia Nacional de Águas, ANA. Foram utilizados 656 postos pluviométricos e 66 postos fluviométricos. Também foram obtidos dados de estações na região do Uruguai, 13 estações fluviométricas e 30 pluviométricas, totalizando 686 estações pluviométricas (Figura 8) e 79 fluviométricas (Figura 9).

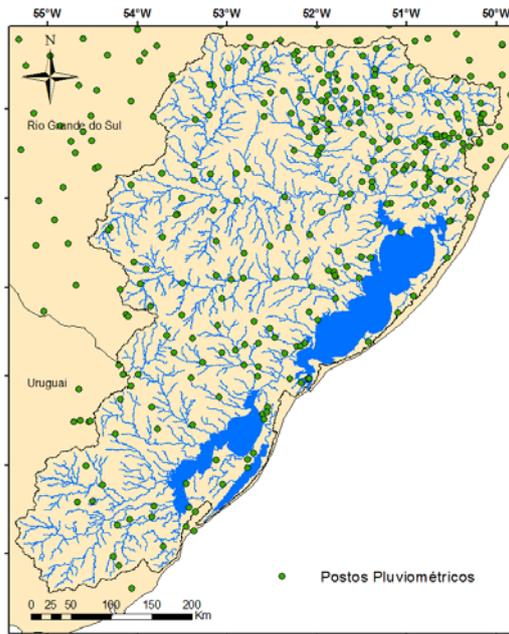


Figura 8 – Estações Pluviométricas

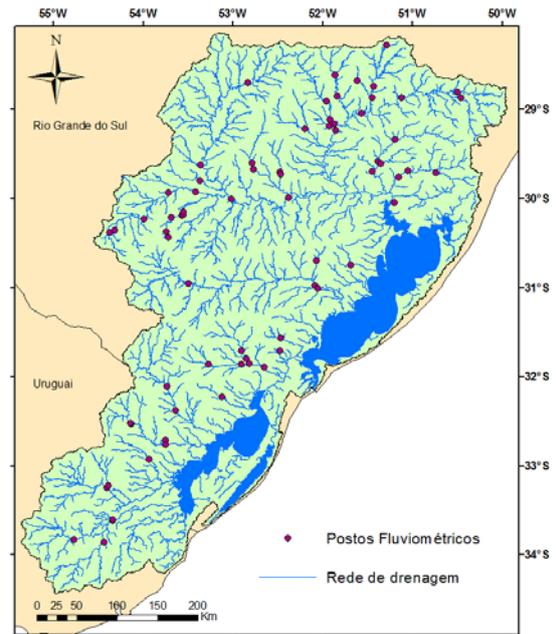


Figura 9 – Estações Fluviométricas

Os dados climatológicos de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação foram obtidos do próprio banco de dados do MGB-IPH (Fan & Collischonn, 2014), que possui dados de normais climatológicas de 1960-1990 calculadas pelo INMET para todo o Brasil. Estes dados são utilizados no cálculo da evapotranspiração nas unidades de resposta hidrológica de cada minibacia.

Também foram utilizados dados de níveis de água em 8 estações linimétricas com dados de nível também obtidos do sistema *Hidroweb* mantido pela ANA. A localização e o nome dos postos com dados de níveis estão representados na figura 10.

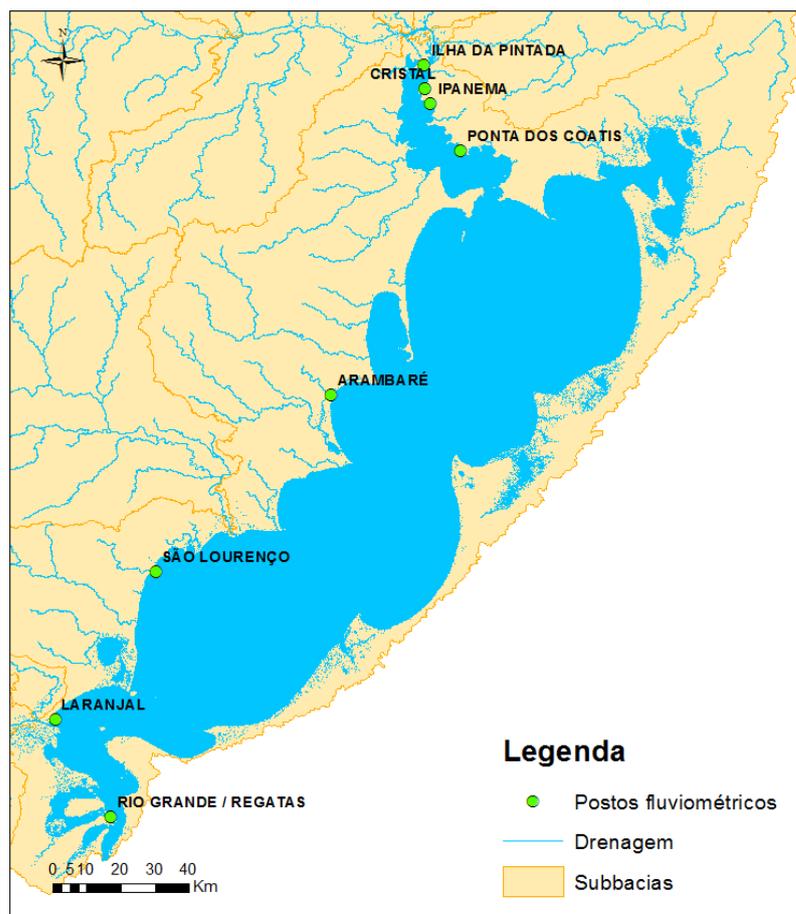


Figura 10 – Postos fluviométricos com dados de nível

## 4.2 Discretização e definição da rede de drenagem

O processo padrão de processamento do MDE para efetuar a discretização de uma bacia hidrográfica e aplicação no MGB-IPH consiste em cinco etapas (a partir do MDE com depressões removidas), a saber:

1. Definição das direções de fluxo: para cada pixel do MDE, a partir da análise do valor dos pixels imediatamente vizinhos, verificar qual a direção em que a água escoaria partindo do pixel analisado;
2. Definição das direções de fluxo acumuladas: a partir do mapa de direções de fluxo, para cada pixel contabilizar quantos pixels drenariam água para o pixel analisado;
3. Definição da rede de drenagem: partindo do mapa de direção de fluxo acumulada, definir um threshold (número de pixels que drenam para o

pixel em questão) que define o pixel como fazendo parte da drenagem. No presente trabalho esse threshold foi de 9000 pixels.

4. Segmentação da rede de drenagem: segmentação da rede de forma a definir os trechos que pertencerão a cada minibacia;
5. Definir as minibacias: para cada trecho definir os pixels que drenam para os mesmos e atribuindo valor a eles de acordo com a numeração dos trechos segmentados.

O passo 4 é o passo crucial que define o método de discretização em minibacias. Em aplicação do MGB-IPH com propagação de vazão com método de Muskingum-Cunge, o método de segmentação da drenagem comumente consiste em definir o segmento como o trecho entre confluências; dessa forma as minibacias resultantes possuem valores diferentes de comprimento de trecho de rio (Fan e Collischonn, 2014).

Aplicar essa metodologia com o modelo inercial não é uma abordagem ideal já que o passo de tempo do método é estabelecido em função do comprimento do trecho (Equação 16). Nesse caso, devido à programação do código sempre o modelo opta pelo menor trecho de rio no cálculo do passo de tempo de simulação, diminuindo o passo de tempo e, portanto, aumentando o tempo de simulação.

Para contornar este problema, no presente trabalho foi aplicado um algoritmo de segmentação da drenagem disponível no pacote IPH Hydro Tools (Siqueira *et al.*, 2016, in press). Esse algoritmo consiste em, a partir do exutório da bacia, percorrer a drenagem de jusante à montante segmentando-a em comprimentos de rio fixos, que no presente trabalho utilizou-se 10 km. Esse comprimento de trecho foi definido com base em ensaios preliminares de sensibilidade do modelo inercial a valores de comprimento de trecho (Fan *et al.*, 2013). Ao encontrar uma confluência no caminho, o algoritmo reconhece o afluente com maior área de drenagem (por meio do mapa de direções acumuladas de fluxo) e segue pelo mesmo. Após percorrer o maior afluente e segmenta-lo, o algoritmo volta ou primeiro ponto de confluência, repetindo o processo, agora para o menor afluente em área de drenagem. É feito esse processo até toda a drenagem ser percorrida e segmentada. É importante ressaltar que quando cabeceira é atingida, se o trecho referente à mesma não possui o mesmo comprimento

dos demais, ela é prolongada para que tenha o mesmo comprimento dos outros segmentos. Esse processo acaba definindo um *threshold* variável para definição da rede de drenagem para poder efetuar a segmentação em trechos de igual comprimento.

Todos os passos da discretização foram efetuados com base no MDE com a batimetria acoplada, assim não foi necessária a manipulação direta do raster para definir as minibacias na Laguna. Mais especificamente, caso a batimetria não estivesse acoplada ao MDE, em função de todos os complexos lagunares conterem pixels com o mesmo valor de nível, o procedimento descrito nessa sessão não seria capaz de gerar uma drenagem hipotética e, portanto, discretizar as regiões contendo a laguna corretamente. Isso ocorreria uma vez que, no passo 1, todas as células vizinhas a uma célula dentro da laguna teriam o mesmo nível da mesma, dificultando a definição de direções de fluxo. Portanto a batimetria representou um relevo que permitiu a definição de direções de fluxo e de uma drenagem hipotética. A criação de drenagem artificial por meio da alteração do MDE foi apenas necessária para incluir o Canal de São Gonçalo e a Lagoa Mangueira, que não estavam conectados com o resto da bacia devido a erros espúrios no MDE original.

### **4.3 Relações geomorfológicas**

As definições da profundidade e largura da calha dos rios da bacia foram obtidas por meio de relações geomorfológicas (Fan *et al.*, 2015b), como exemplificado na equação 14. A equação da largura em função da área de drenagem foi obtida por meio de amostragem no Google Earth em pontos com área de drenagem conhecida. Já a equação da profundidade foi obtida por meio dos resumos de descarga das estações fluviométricas da ANA. As equações, os coeficientes de correlação e os gráficos referentes às relações geomorfológicas estão representadas na Figura 11 (largura) e 12 (profundidade).

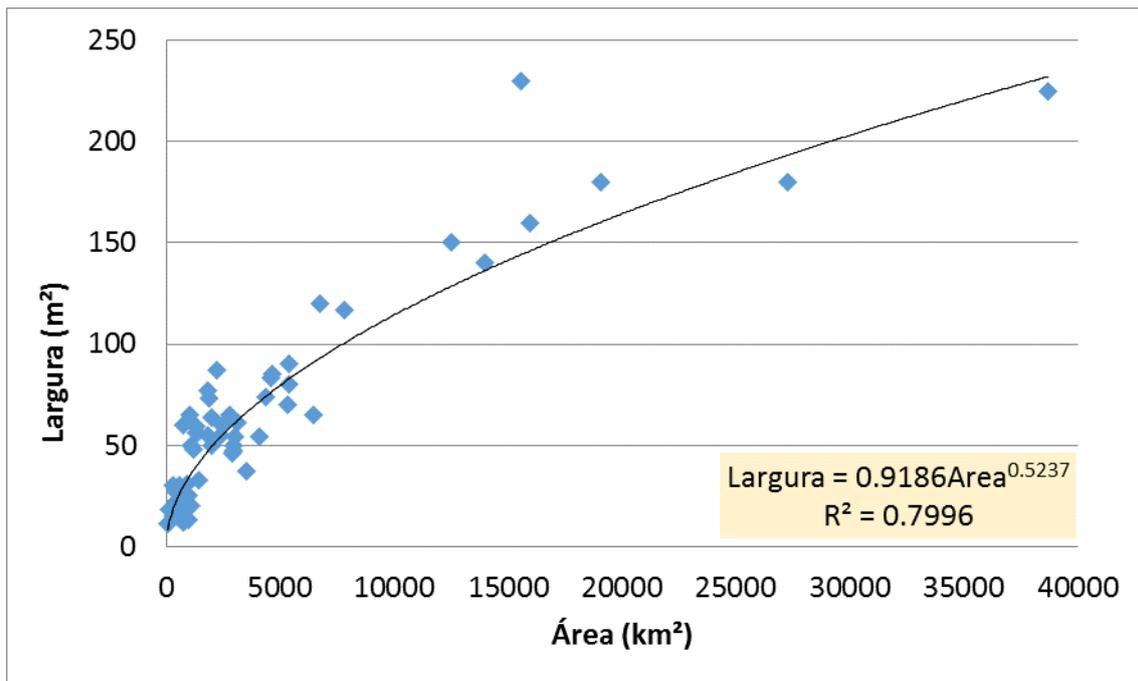


Figura 11 – Largura em função da área de drenagem

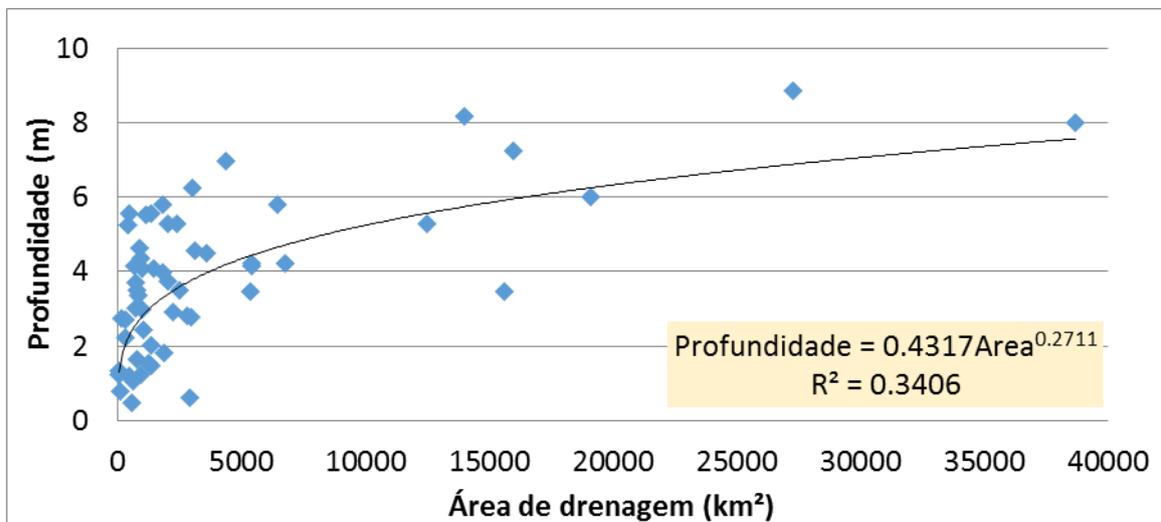


Figura 12 – Profundidade em função da área de drenagem

Verifica-se uma maior correlação entre a largura no rio com a área de drenagem em relação à correlação da profundidade com a área de drenagem. Uma possível justificativa para isso consta na maior confiabilidade dos dados de largura (com estimativa com Google Earth) em relação aos de profundidade (resumo de descarga das estações fluviométricas da ANA).

#### 4.4 Minibacias com contribuição lateral

A contribuição lateral entre minibacias dentro do MGB-IPH Inercial, segundo Pontes *et al.* (2015), se dá por meio da introdução de canais fictícios conectando-as. Primeiramente é necessário definir as minibacias que estão em área de planície e, portanto, interconectadas. Esse procedimento pode ser realizado primeiramente (1) calculando o desvio padrão médio do MDE internamente em cada minibacia e (2) verificando o menor valor de altitude inserido em cada minibacia. Com o mapa resultante do procedimento (1) é possível definir quais minibacias estão em área de planície, já que menores valores de desvio padrão são encontrados em áreas menos acidentadas. Um *threshold* de 10 metros de desvio padrão foi escolhido para definir as áreas de planície, ou seja, minibacias com desvio padrão inferior a 10 metros foram consideradas como inseridas em planície (Pontes *et al.*, 2015). O mapa resultante de (2) foi utilizado para estimar a cota de fundo do canal que interliga duas minibacias adjacentes, pois a cota de fundo do canal foi estimada com base no valor mínimo de altitude da região de fronteira entre as minibacias

A largura dos canais que interligam as minibacias de planície foi definida como 5 metros, enquanto o comprimento dos canais foi calculado conforme a equação 17.

$$L = \sqrt{\frac{A_1}{\pi}} + \sqrt{\frac{A_2}{\pi}} \quad (\text{Eq. 17})$$

Na qual L é o comprimento do canal (km) e as áreas A1 e A2 são as áreas das minibacias interconectadas pelo mesmo.

#### 4.5 Pré-processamento

O pré-processamento dos dados consiste na criação de um arquivo que possui todas as características físicas utilizadas pelo modelo na simulação relacionadas a cada minibacia definida na discretização, como: a área da minibacia, a área acumulada incluindo áreas de minibacias a montante, o comprimento do trecho de rio, a declividade, a largura e a profundidade médias da calha do trecho de rio, a porcentagem de cada URH presente na minibacia, o coeficiente de rugosidade de Manning, entre outras.

## 4.6 Procedimento de calibração

### 4.6.1 Métricas de desempenho

Para efetuar a calibração é necessário comparar os dados simulados aos observados, isso é feito por meio de funções objetivo, que podem ser chamadas de métricas de desempenho. As métricas utilizadas no presente estudo são funções objetivo comumente utilizadas para a comparação de hidrogramas: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Equação 18), o coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões (Equação 19) e o erro relativo de volume (Equação 20).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QO_i - QO_m)^2}; \quad (NS \leq 1) \quad (\text{Eq. 18})$$

$$NSlog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QC_i) - \text{Log}(QO_i))^2}{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QO_i) - \text{Log}(QO_m))^2}; \quad (NSlog \leq 1) \quad (\text{Eq. 19})$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^N QC_i - \sum_{i=1}^N QO_i}{\sum_{i=1}^N QO_i} \quad (\text{Eq. 20})$$

Onde  $QC_i$  representa a vazão simulada no intervalo  $i$ ,  $QO_i$  representa a vazão observada no intervalo  $i$ ,  $N$  representa o número total de intervalos e  $QO_m$  representa a média das vazões observadas. O coeficiente Nash-Sutcliffe (NS), por considerar o quadrado das diferenças entre as vazões observada e simulada, mede a performance do modelo ao representar os picos de vazão e possui valor ideal e máximo igual a 1. O coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões (NSlog), por considerar a diferença entre o logaritmo das vazões observada e simulada, mede a performance do modelo durante a estiagem e também possui valor ideal e máximo igual a 1. Para calibrações de modelos hidrológicos, valores de NS e NSlog acima de 0,6 podem ser considerados satisfatórios, valores acima de 0,7 podem ser considerados bons, enquanto valores acima de 0,8 seriam mais desejáveis. O erro relativo de volume contabiliza justamente se o modelo está representando o balanço hídrico corretamente, verificando se o mesmo produz o mesmo volume de vazão observada em todo o intervalo de tempo. Valores ideais desse parâmetro são iguais a zero. Valores (valor absoluto) menores que 10% são os mais desejáveis, valores entre 10% e 20% podem ser considerados satisfatórios.

#### **4.6.2 Definição dos parâmetros calibráveis iniciais**

Em função do modelo MGB-IPH Inercial ser computacionalmente mais complexo do que o modelo MGB-IPH com propagação de vazões pelo método de Muskingum-Cunge, a simulação do modelo é mais demorada. De forma a abreviar o processo de calibração do modelo inercial, os parâmetros calibráveis iniciais foram obtidos por meio da calibração prévia do modelo com o método de Muskingum-Cunge (Lopes *et al.*, 2015).

## **5 Resultados**

Os principais resultados desse trabalho são apresentados nas seções a seguir. Eles incluem primeiramente os resultados da discretização do sistema, as métricas e hidrogramas observado e simulado para o período de calibração e de validação, a avaliação das áreas alagadas pelo modelo utilizando imagens de satélite, a verificação da representação dos níveis na Laguna dos Patos e Lago Guaíba e, por fim, a comparação entre os métodos de propagação de vazão em rios Inercial e Muskingum-Cunge.

### **5.1 Discretização final do sistema**

A drenagem definida pelo procedimento descrito na seção 4.2 está representada na Figura 13.

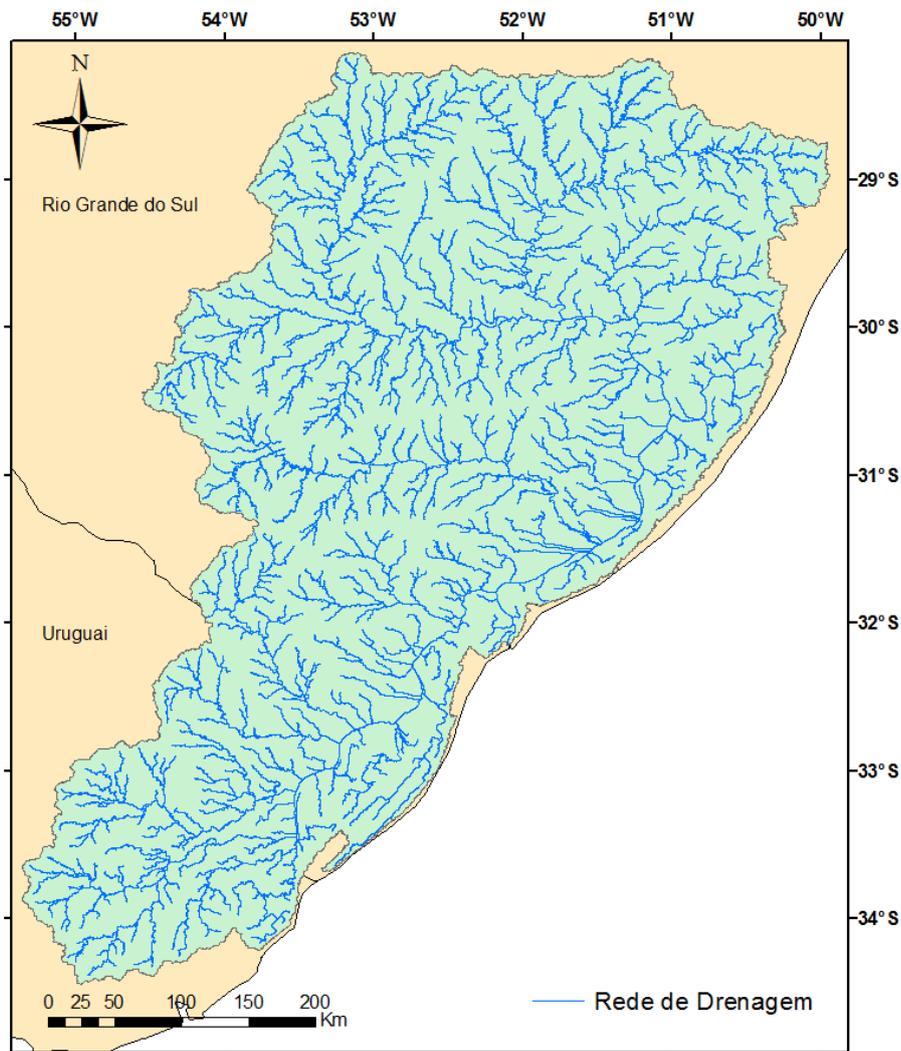


Figura 13 – Rede de drenagem obtida com o processamento do MDE e batimetria

O processo de discretização da bacia resultou em 2627 minibacias. Também foi realizada a discretização da bacia em sub-bacias, macro áreas de drenagem que abrangem uma grande quantidade de minibacias. As 31 sub-bacias foram definidas conforme as características hidrogeológicas da região de interesse com o objetivo de promover parâmetros fisicamente representativos. Ratifica-se aqui que a finalidade das sub-bacias é auxiliar na calibração permitindo a atribuição de parâmetros distintos para URH's conforme o comportamento hidrológico de diferentes regiões na bacia. A Figura 14 representa o mapa resultante da discretização.

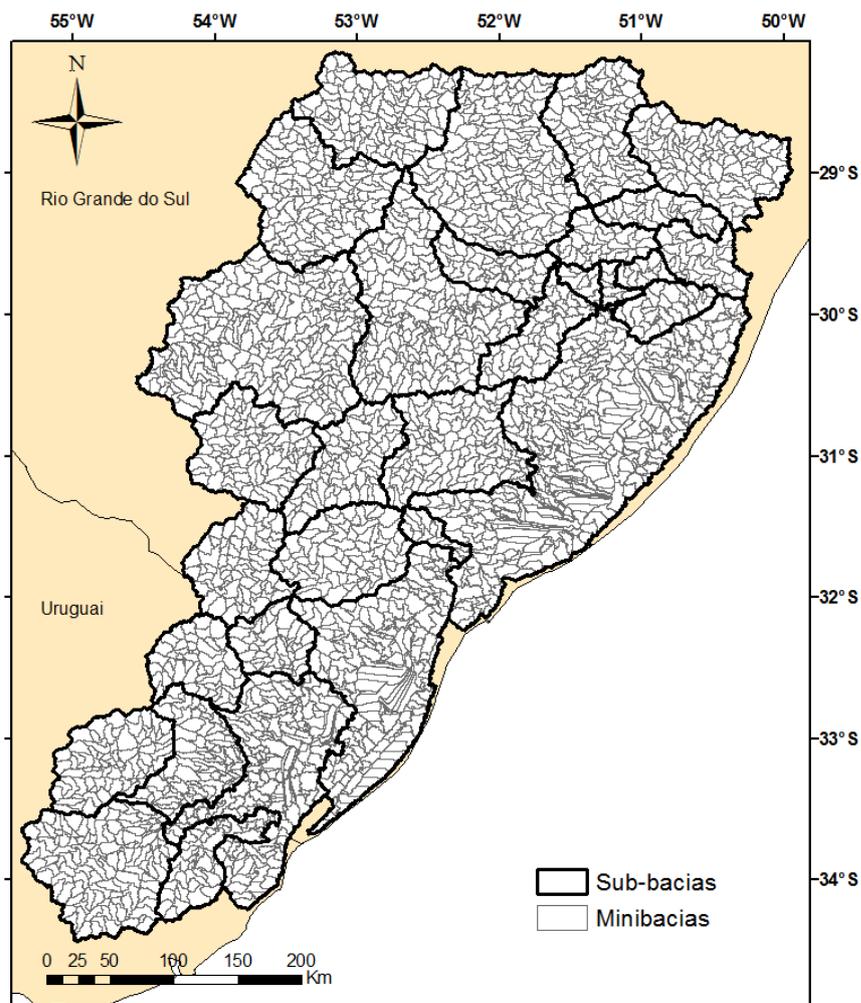


Figura 14 – Discretização da bacia em minibacias e subbacias

A Figura 15 representa as minibacias consideradas como inseridas em áreas de planície de acordo com a seção 4.4. Verifica-se que o método aqui adotado não contempla todas as áreas de planície, como a planície do baixo Jacuí e a referente ao Lago Guaíba. Todavia, a principal área de interesse para simulação com troca lateral, que é Laguna dos Patos, foi bem identificada.

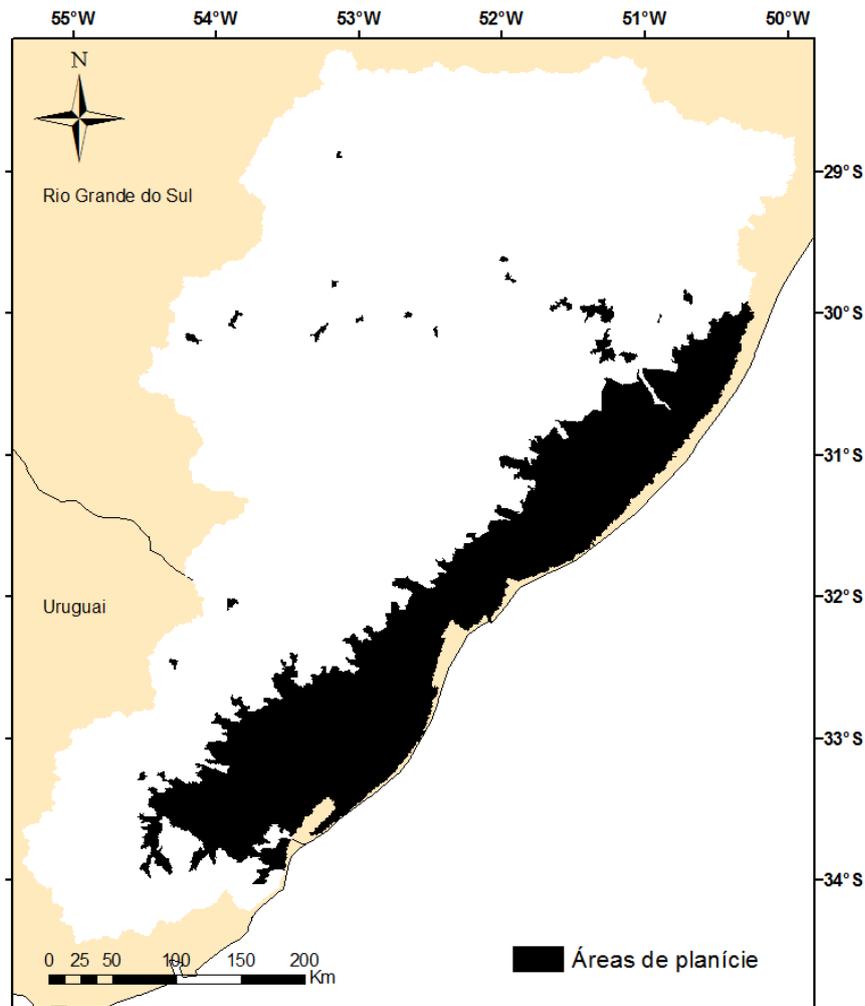


Figura 15 – Minibacias inseridas em áreas de planície

## 5.2 Calibração da vazão nos rios

A calibração do modelo foi efetuada no período de 1º de janeiro de 1990 a 31 de dezembro de 2010 totalizando 21 anos. Esse período foi selecionado em função da disponibilidade de dados fluviométricos buscando contemplar um período mais atual. Dos 79 postos fluviométricos disponíveis, 33 foram utilizados na calibração em função da disponibilidade e qualidade dos dados e de sua localização (se bem distribuídos e preferencialmente à jusante dos trechos de rio das sub-bacias). É importante ressaltar que a calibração não inclui apenas a análise e modificação dos parâmetros calibráveis, mas também parâmetros morfológicos dos corpos d'água, que, em função terem sido definidos por meio de apenas uma equação para toda a bacia e em função da incerteza relacionada a essa equação, podem limitar a representação adequada dos níveis. Esse

cuidado em relação à largura e à profundidade dos corpos d'água ao efetuar a propagação de Muskingum-Cunge não é necessário, já que as mesmas não exercem função tão expressiva nos resultados da modelagem.

### 5.2.1 Métricas de desempenho

A tabela 1 apresenta os postos fluviométricos utilizados na calibração, seu código e nome, o rio onde se encontram, sua área de drenagem e as métricas de desempenho. O resultado da calibração do modelo, para melhor visualização, também foi representado em mapas nos quais os postos fluviométricos utilizados na calibração estão coloridos conforme o valor das métricas de desempenho do modelo. A Figura 15 representa o mapa os valores do coeficiente Nash-Sutcliffe.

Tabela 1 – Postos fluviométricos e métricas de desempenho na calibração

ID	Código	Nome	Area (km <sup>2</sup> )	Rio	NS	NSlog	$\Delta V(\%)$
1	10.0	Puente Ruta 8 (Vieja)	4676	Río Olimar Grande	0.472	0.352	15.185
2	14.0	Picada de Corbo	2899	Río Cebollatí	0.404	0.487	-0.017
3	15.0	Paso Averías	7865	Río Cebollatí	0.318	0.456	12.121
4	96.0	Paso Borches	1425	Río Tacuarí	0.499	0.52	1.647
5	97.0	Paso Dragón	3540	Río Tacuarí	0.369	0.496	13.267
6	85400000	DONA FRANCISCA	14000	RIO JACUÍ	0.11	-0.024	-5.311
7	85480000	PASSO DO ROCHA	2970	RIO VACACAÍ	0.767	0.785	1.67
8	85600000	PASSO DAS TUNAS	6780	RIO VACACAÍ	0.721	0.591	4.659
9	85623000	SÃO SEPÉ - MONTANTE	690	RIO SÃO SEPÉ	0.723	0.82	-8.181
10	85642000	PASSO SÃO LOURENÇO	27300	RIO JACUÍ	0.563	0.249	-3.585
11	85900000	RIO PARDO	38700	RIO JACUÍ	0.839	0.818	-4.057
12	86100000	PASSO DO GABRIEL	1820	RIO DAS ANTAS	0.525	0.643	-25.98
13	86160000	PASSO TAINHAS	1120	RIO TAINHAS	0.711	0.764	-12.672
14	86410000	PASSO BARRA DO GUAIAVEIRA	2820	RIO TURVO	0.811	0.869	0.215
15	86440000	PASSO DO PRATA	3600	RIO PRATA	0.796	0.779	-6.046
16	86470000	PONTE DO RIO DAS ANTAS	12500	RIO DAS ANTAS	0.849	0.858	1.775
17	86480000	PASSO MIGLIAVACA	1330	RIO CARREIRO	0.698	0.774	11.506
18	86500000	PASSO CARREIRO	1820	RIO CARREIRO	0.758	0.835	7.914
19	86510000	MUÇUM	16000	RIO TAQUARI	0.839	0.852	9.557
20	86560000	LINHA COLOMBO	2030	RIO GUAPORÉ	0.742	0.817	-9.419
21	86580000	SANTA LÚCIA	2470	RIO GUAPORÉ	0.788	0.693	-11.026
22	86720000	ENCANTADO	19100	RIO TAQUARI	0.76	0.877	-4.763
23	87160000	NOVA PALMIRA	2030	RIO CAÍ	0.644	0.683	9.62
24	87170000	BARCA DO CAÍ	3030	RIO CAÍ	0.609	0.707	-2.087
25	87270000	PASSO MONTENEGRO	4360	RIO CAÍ	0.593	0.552	5.469

26	87374000	TAQUARA - MONTANTE	1460	RIO DOS SINOS	0.689	0.73	-18.619
27	87380000	CAMPO BOM	2900	RIO DOS SINOS	0.665	0.769	-16.417
28	87382000	SÃO LEOPOLDO	3130	RIO DOS SINOS	0.473	0.68	-28.825
29	87590000	PASSO DO CAÇÃO	4080	RIO CAMAQUÃ	0.401	0.645	-5.825
30	87905000	PASSO DO MENDONÇA	15600	RIO CAMAQUÃ	0.689	0.759	-1.466
31	88220000	PICADA DA AREIA	5420	RIO JAGUARÃO	0.545	0.458	16.007
32	88575000	CERRO CHATO	1050	ARROIO BASÍLIO	0.649	0.714	2.446
33	88641000	PEDRO OSÓRIO	4700	RIO PIRATINI	0.78	0.802	12.685

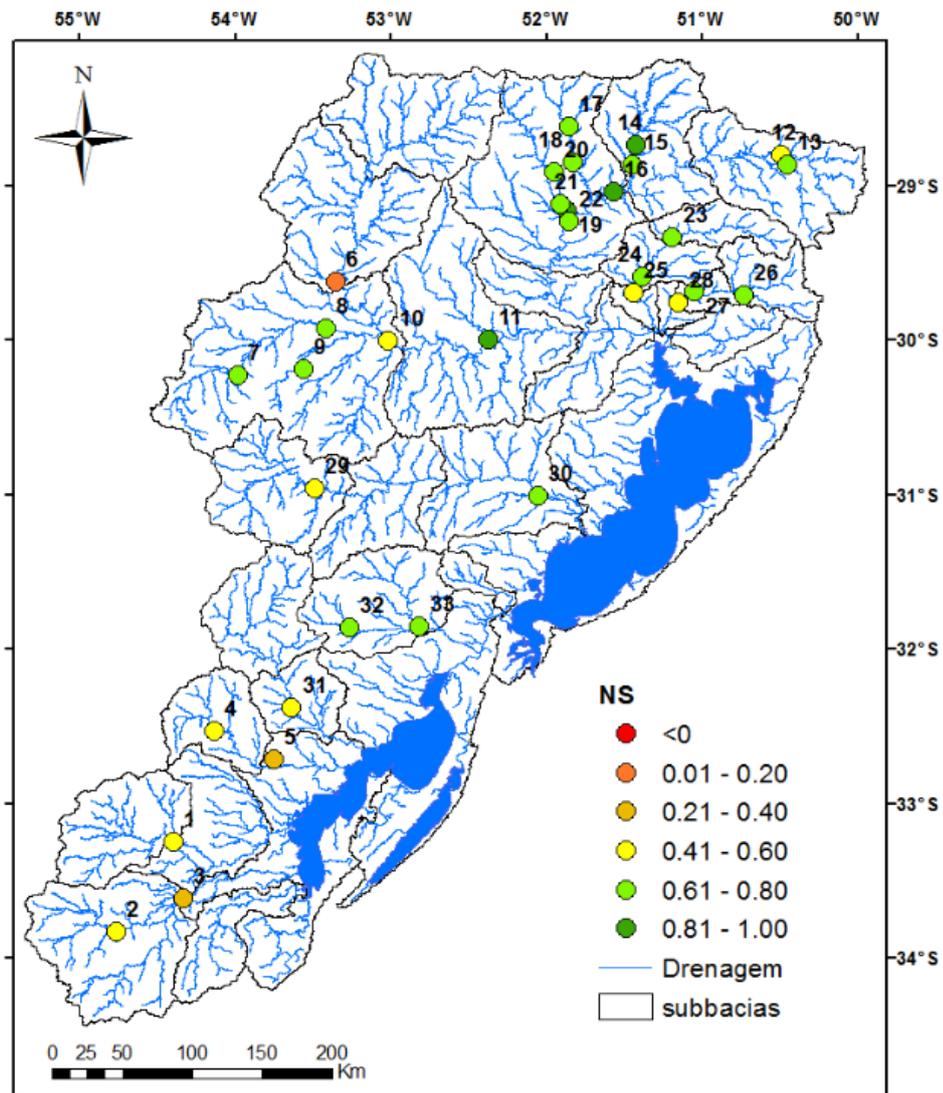


Figura 15 – Valores do coeficiente Nash-Sutcliffe das vazões

Percebe-se um bom desempenho do modelo e da calibração considerando que a maioria dos postos possui valores de NS superior a 0,6. Nota-se que à jusante dos rios Jacuí e Taquarí o coeficiente chega a apresentar valores superiores a 0,8. Os rios Caí,

Sinos, Piratini e Camaquã também apresentaram bom desempenho. No entanto, na região sul da bacia, região do Uruguai, verifica-se um pior desempenho do modelo. Isso pode ser atribuído à menor quantidade de dados pluviométricos para essa região (Figura 8) entre outros fatores, como incertezas inerentes ao processo de calibração e a menor resolução do mapa de URH na região do Uruguai.

O Rio Taquari de modo geral apresentou ótimos resultados durante praticamente toda a sua extensão com Nash-Sutcliffe superior a 0,8. O Rio Jacuí por sua vez apresentou ótimo valor de NS (0,84) no posto mais a jusante e bons resultados no rio Vacacaí. No entanto o trecho do Alto Jacuí apresentou o pior valor de NS, entre 0,01 e 0,2. Isso ocorre pelo fato da existência de um reservatório a montante que modifica o regime de vazões do Alto Jacuí. Esse distúrbio é, portanto, atenuado à medida que se percorre o Jacuí para jusante.

A Figura 16 apresenta o mapa com os valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões que fornece o desempenho do modelo em reação a momentos de estiagem.

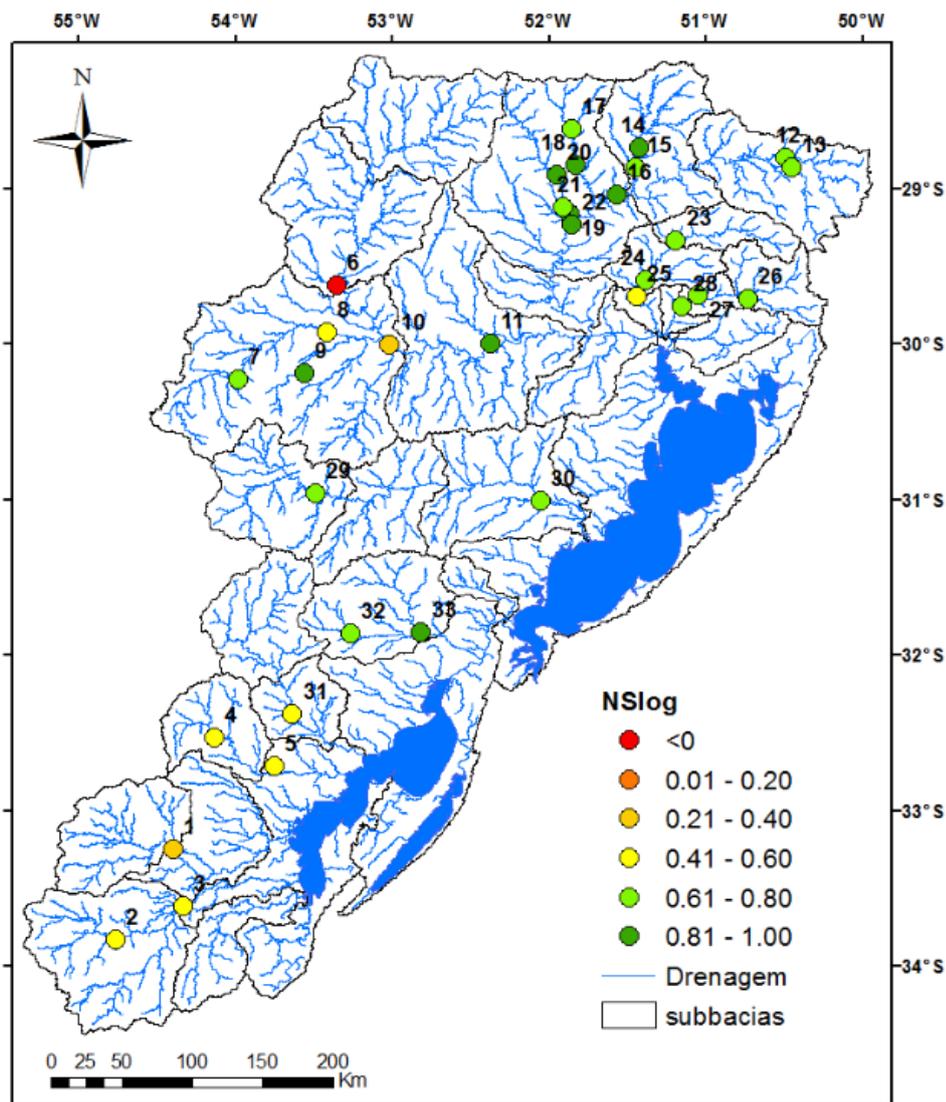


Figura 16 – Valores do coeficiente Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões

Os valores do coeficiente NSlog estão distribuídos de forma semelhante aos de NS. A partir dos resultados de NSlog verifica-se que o modelo possui bom desempenho de forma geral já que na maioria dos postos os valores do coeficiente são superiores à 0,6. Verifica-se ainda ótimo desempenho à jusante do Rio Jacuí, Taquari e Piratini. Sendo que o rio Taquari apresentou ótimo desempenho em praticamente toda a sua extensão. Novamente o desempenho à montante do Rio Jacuí foi prejudicado em função do represamento no alto Jacuí. Distúrbio novamente atenuado à jusante do rio. Os rios Camaquã, Sinos e Caí apresentaram bom desempenho, enquanto novamente a região sul teve desempenho comprometido com a maioria dos valores de NSlog entre 0,4 e 0,6 em função da razão comentada anteriormente.

A Figura 17 apresenta o mapa com os valores de erro relativo de volume. Novamente constata-se que de modo geral o modelo apresentou bom desempenho. Os valores de erro de volume são inferiores a 10% na grande maioria dos postos fluviométricos, sendo que os maiores erros (entre 21 e 30%) ocorrem apenas em dois postos, na cabeceira do Rio Taquari e no Rio Sinos.

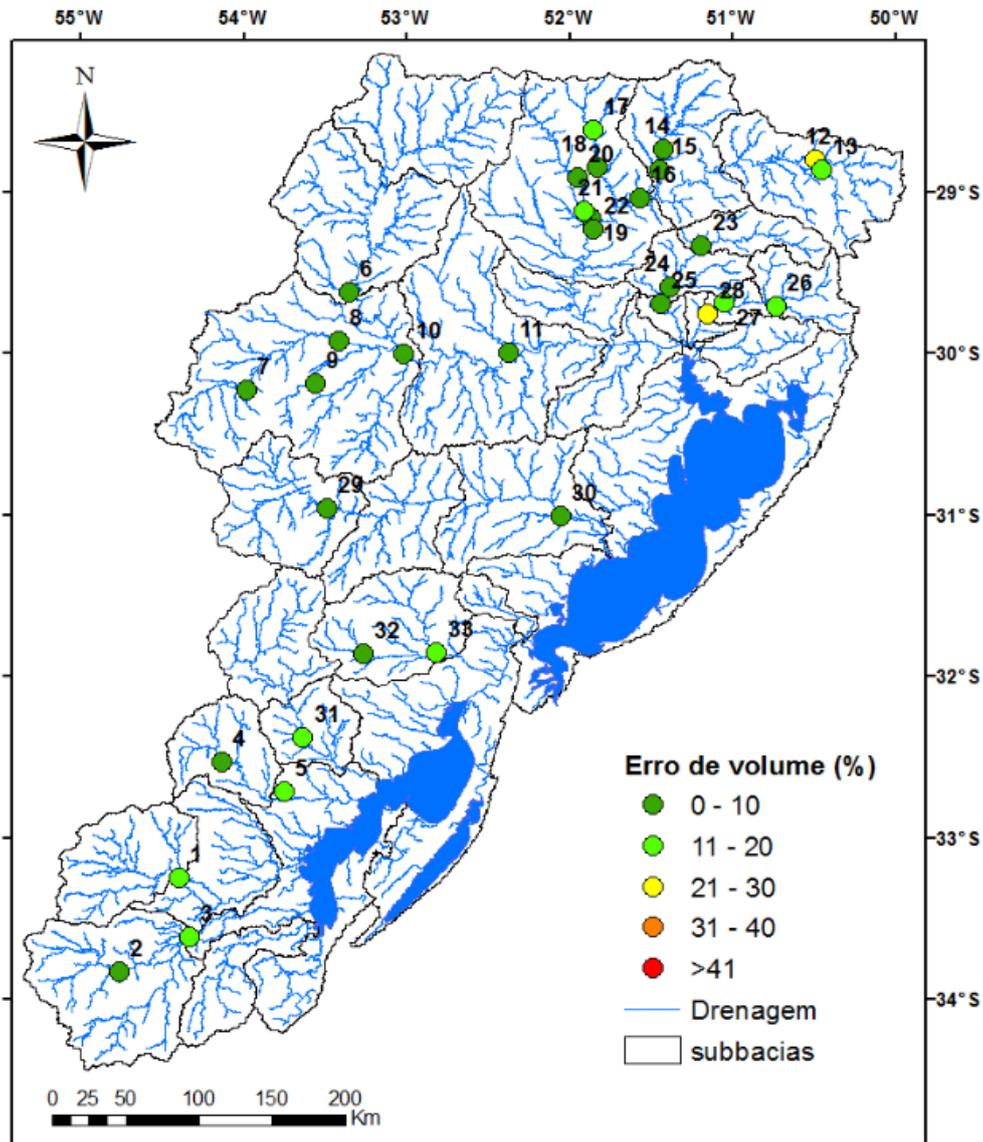


Figura 17 – Valores do erro relativo de volume

A partir da observação das métricas de desempenho do modelo durante a calibração, acredita-se que foi obtida uma boa performance na representação da bacia da Laguna dos Patos. Talvez esta performance ainda possa ser melhorada em algum

momento no futuro, com a obtenção de mais dados na região correspondente ao Uruguai.

## 5.2.2 Hidrogramas

Nessa seção serão apresentados os hidrogramas de vazões simuladas e observadas de alguns dos postos fluviométricos utilizados na calibração do modelo, buscando mostrar os resultados em um posto de cada afluente principal da Laguna, sendo que em rios maiores mais de um posto será apresentado. Os valores observados estão em azul enquanto os valores simulados estão representados em vermelho. Cabe ressaltar que é visível nos hidrogramas que o regime hidrológico em geral é bem representado em todos os rios a seguir, com destaque para aqueles na região norte da bacia.

### 5.2.2.1 Rio Caí

A Figura 18 representa os hidrogramas observado (azul) e simulado (vermelho) com o modelo inercial para o posto mais à jusante do Rio Caí. Verifica-se em alguns pontos tanto a superestimação dos picos de vazão assim como a subestimação. Talvez isso esteja relacionado a algumas singularidades, como reservatórios e transposições existentes na região, que não estão sendo devidamente representadas.

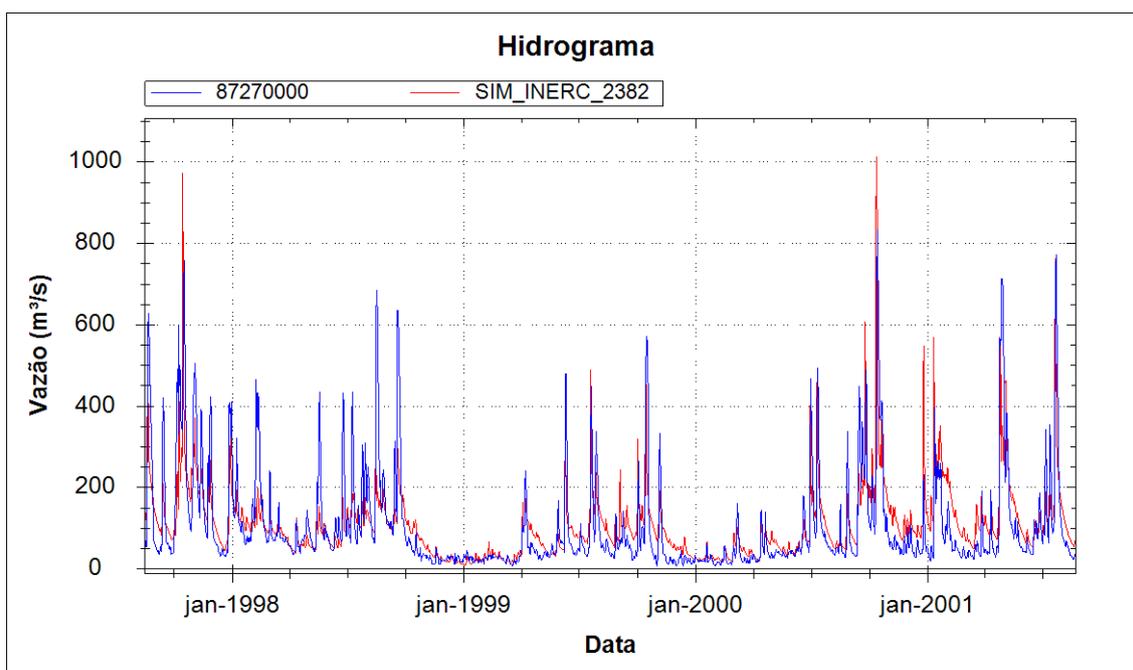


Figura 18 – Hidrogramas simulado e observado no rio Caí posto de código 87270000

### 5.2.2.2 Rio Camaquã

As Figuras 19 e 20 apresentam os hidrogramas calculados e observados do Rio Camaquã no posto mais a jusante. O rio é um dos principais afluentes que deságua na Laguna dos Patos. A Figura 20 representa o mesmo posto da figura 19, no entanto o intervalo mostrado é menor. Verifica-se também nos hidrogramas, bom desempenho do modelo no Rio Camaquã. Apesar de em alguns pontos os picos do hidrograma simulado superestimarem um pouco os picos do observado, de modo geral os hidrogramas concordam, sendo o regime hidrológico bem representado tanto para os picos de vazão quanto para a vazão de base.

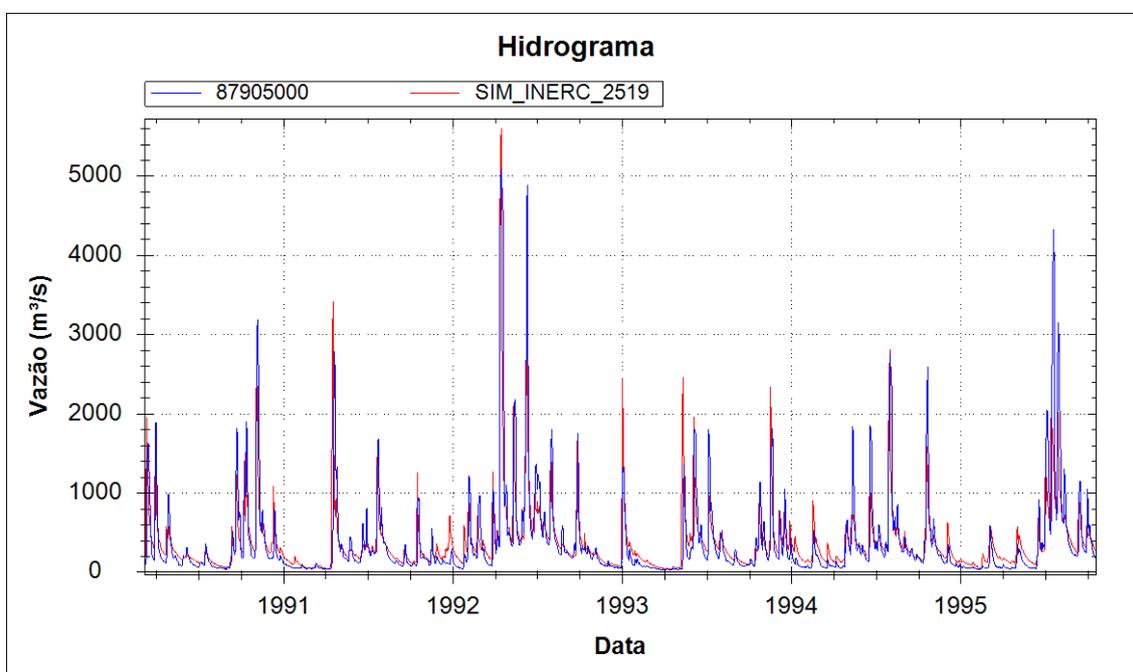


Figura 19 – Hidrogramas simulado e observado no rio Camaquã no posto de código 87095000

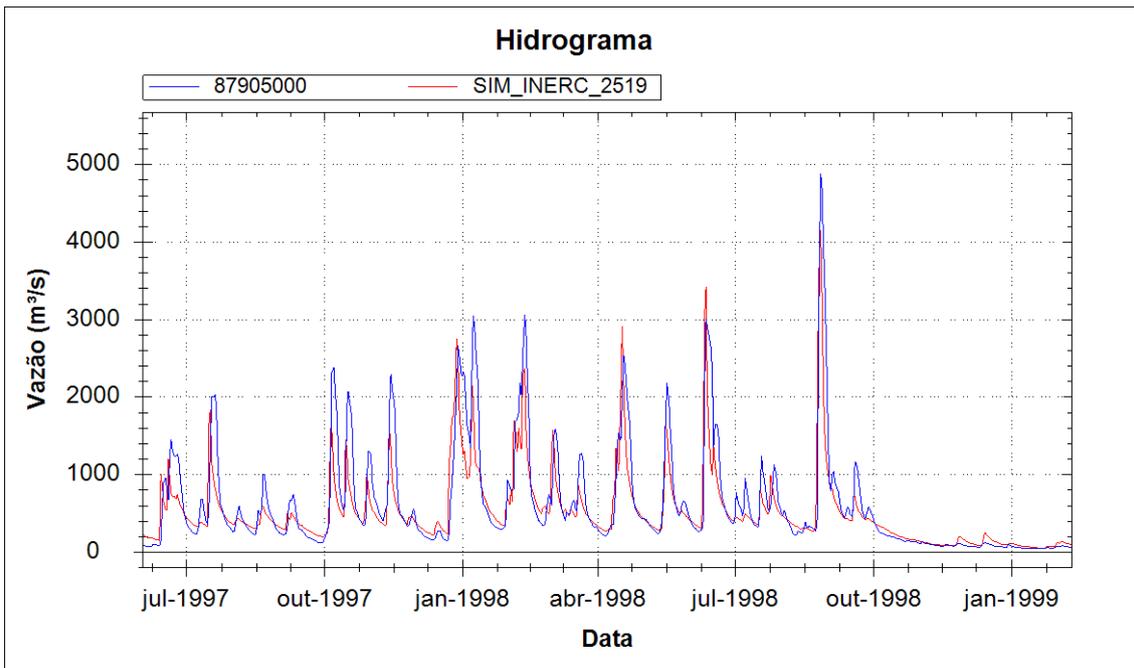


Figura 20 – Hidrogramas simulado e observado no rio Camaquã (zoom)

### 5.2.2.3 Rio Cebollati

O Rio Cebollati é um dos principais afluentes da Lagoa Mirim e se localiza no Uruguai (Figura 1). Os hidrogramas simulado e observado no posto mais a jusante do Rio Cebollati então representados na Figura 21. Apesar do hidrograma simulado em alguns pontos superestimar o hidrograma observado, observa-se uma boa concordância em muitos períodos o que é particularmente positivo considerando a menor quantidade de dados pluviométricos para a região sul da bacia.

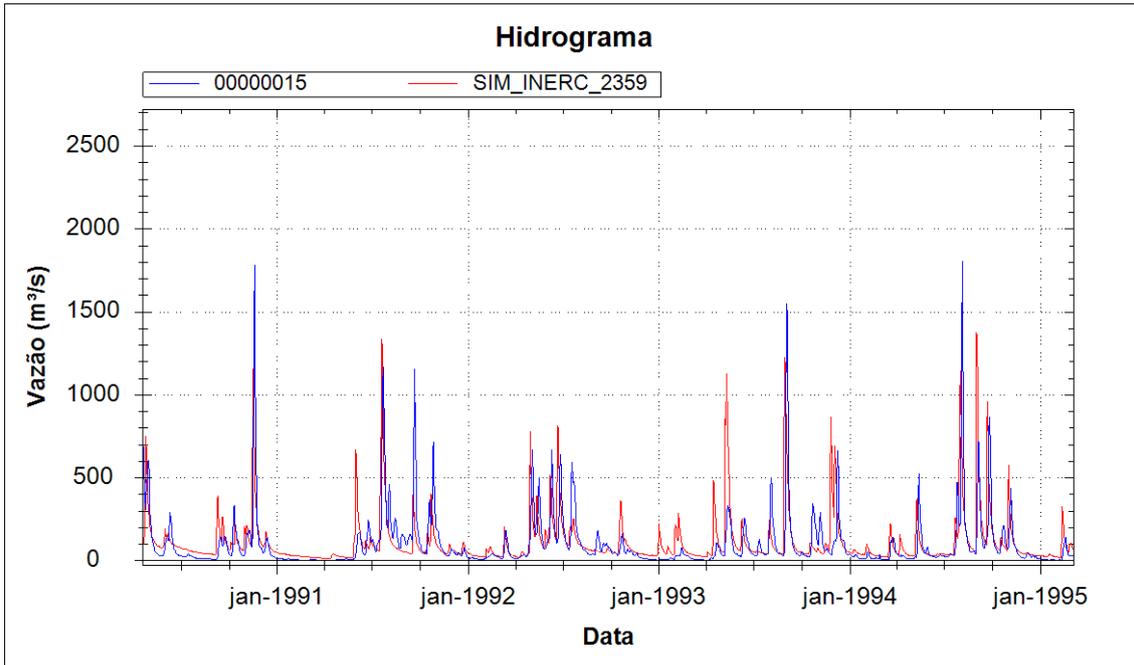


Figura 21 – Hidrogramas calculados e observados no Rio Cebollati posto 15.0

#### 5.2.2.4 Rio Jacuí

Os hidrogramas da Bacia do Rio Jacuí serão apresentados de montante para jusante. Na Figura 22 estão representados os hidrogramas simulado e observado do Rio Vacacaí, posto de código 85600000. O próximo posto a ser apresentado, de código 85642000, (Figura 23) corresponde ao rio Jacuí logo após a confluência do Alto Jacuí com o Rio Vacacaí. O último posto a ser apresentado (Figura 24) corresponde ao posto mais a jusante no Rio Jacuí disponibilizado pela ANA de código 85900000.

Verifica-se claramente a influência das barragens do Alto Jacuí nas vazões observadas no posto 85642000. Dessa forma, as vazões simuladas superestimam os picos de vazão e subestimam a vazão durante a estiagem. Em função dos bons resultados no posto mais a jusante do Rio Jacuí ainda se observa que os efeitos dos reservatórios à montante são atenuados em direção à jusante.

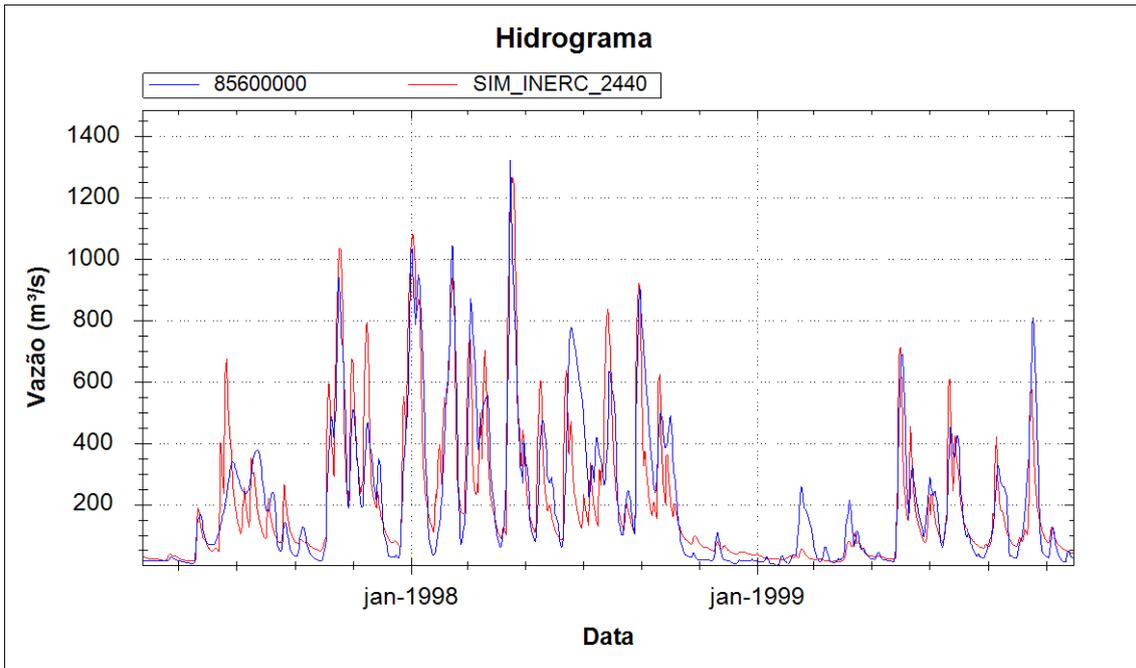


Figura 23 – Hidrogramas simulado e observado no Rio Vacacaí no posto de código 85600000

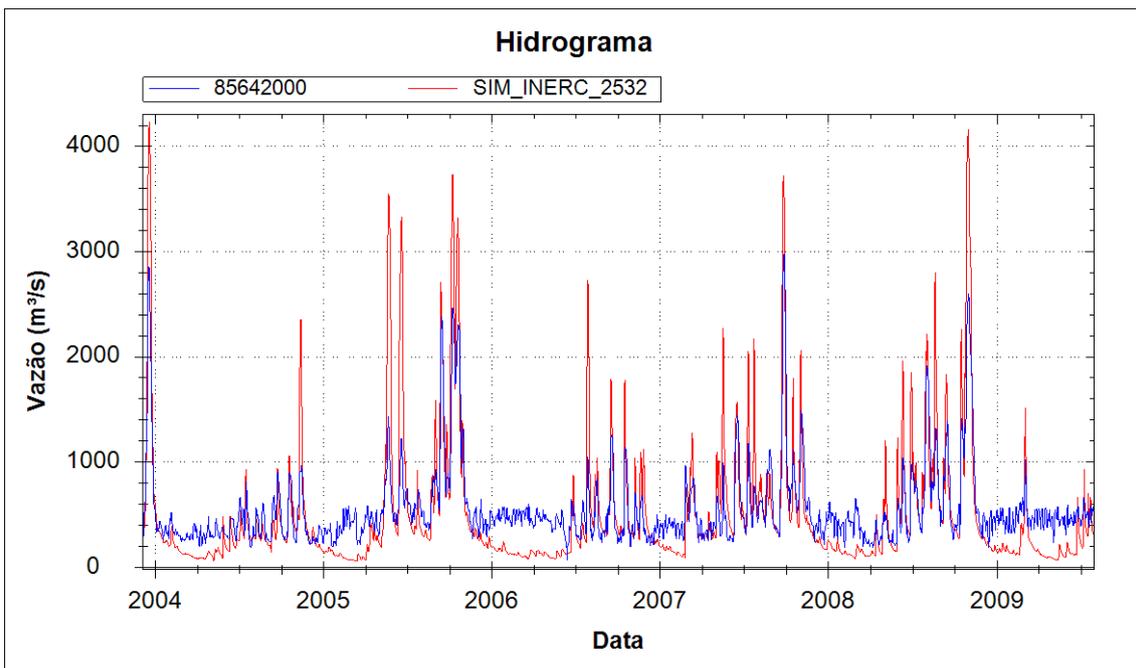


Figura 23 – Hidrogramas simulado e observado no Rio Jacuí no posto de código 85642000

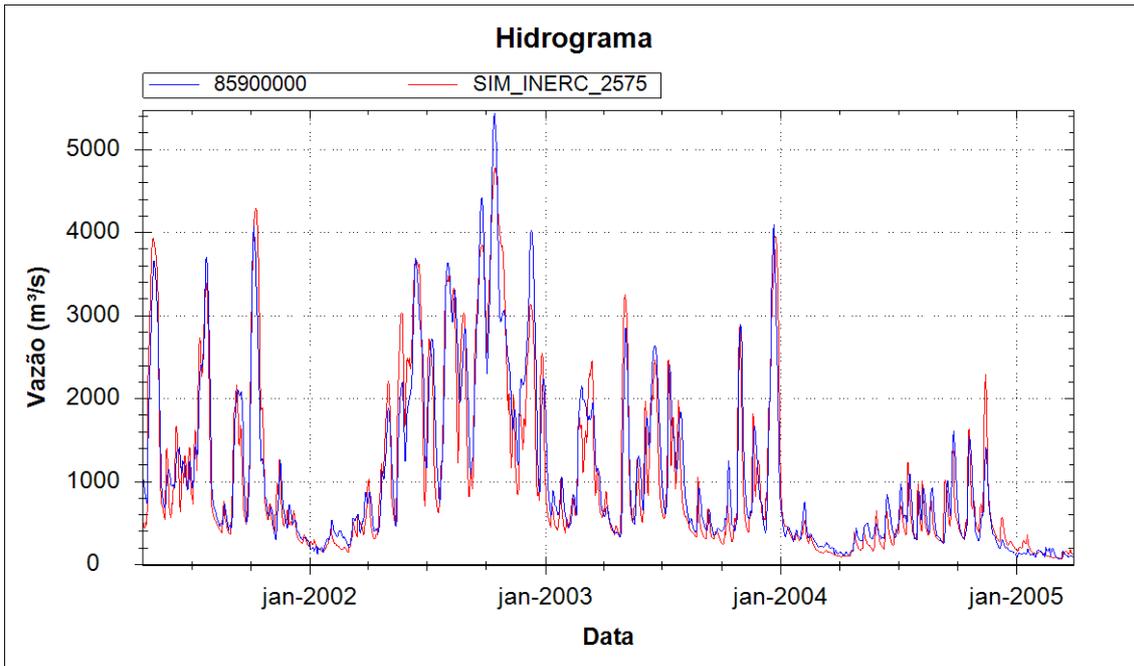


Figura 24 – Hidrogramas simulado e observado no Rio Jacuí no posto de código 85900000

Ressalte-se que os hidrogramas da Figura 24 representam um resultado muito positivo pois o simulado acompanha muito bem os dados observados, o que mostra o bom desempenho do MGB-IPH Inercial para regiões de planície de inundação.

#### 5.2.2.5 Rio Jaguarão

O Rio Jaguarão se localiza na fronteira do Rio Grande do Sul com o Uruguai e deságua na Lagoa Mirim. A Figura 25 apresenta os hidrogramas do único posto nesse Rio utilizado na calibração. Observa-se que mesmo com a escassez de dados de chuva na região, apesar do hidrograma simulado superestimar um pouco as vazões observadas, o regime hidrológico também é bem representado de forma geral nesse hidrograma.

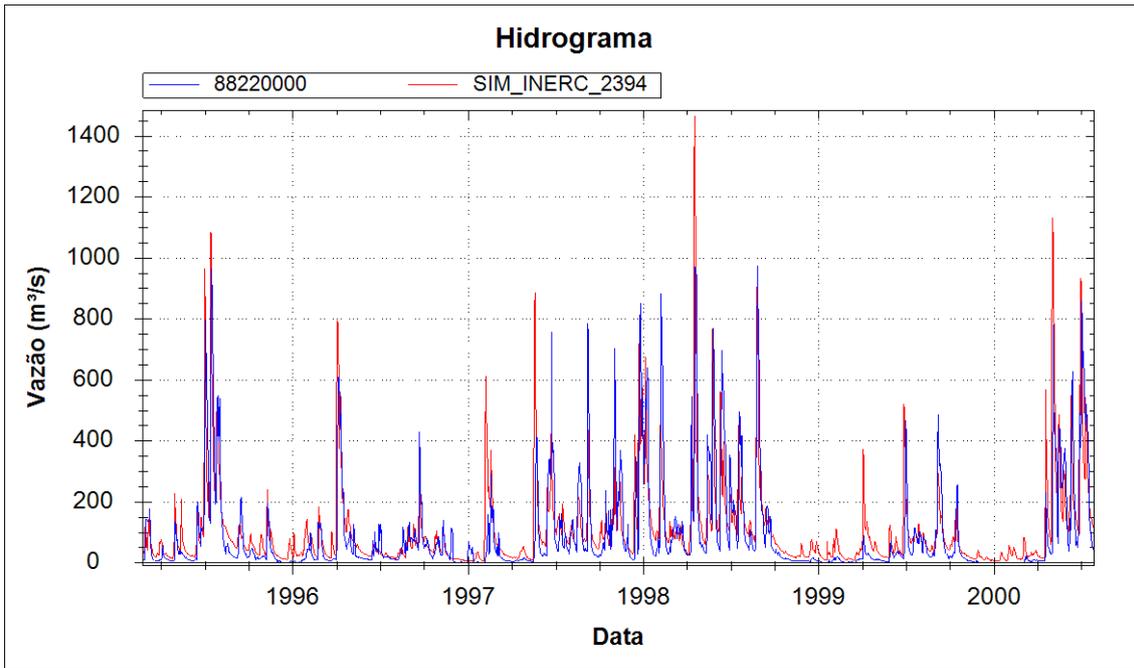


Figura 25 - Hidrogramas simulado e observado no Rio Jaguarão no posto 88220000

#### 5.2.2.6 Rio Piratini

O Rio Piratini deságua no Canal de São Gonçalo e é um dos principais fatores que controla a vazão do canal em direção a Laguna dos Patos (Hartmann & Harkot, 1990). Os hidrogramas observado e calculado no posto mais à jusante do Rio Piratini estão representados na Figura 26. Verifica-se ótima compatibilidade entre os valores simulados e observados no Rio Piratini, isso é muito positivo já que um dos principais fatores que controlam o fluxo do canal de São Gonçalo para o estuário da Laguna dos Patos é a vazão nesse rio.

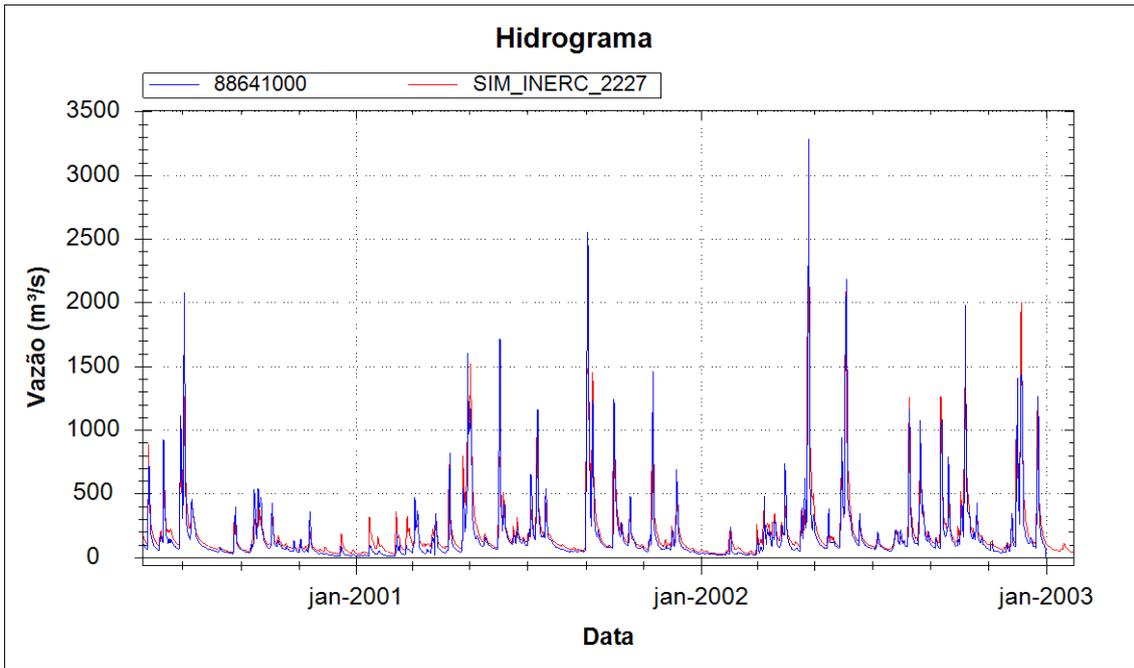


Figura 26 - Hidrogramas simulado e observado no Rio Piratini no posto 88641000

#### 5.2.2.7 Rio dos Sinos

Os hidrogramas simulado e observado no posto mais à jusante no Rio dos Sinos estão representados na Figura 27. Destaca-se um bom desempenho do modelo para esse rio principalmente nos anos entre jan-1999 e jan-2001. Apesar das dificuldades que fazem com que o Rio dos Sinos seja de difícil calibração, como a existência de barragens e de múltiplas captações de água e lançamentos, o regime hidrológico é bem representado. Destacam-se possíveis efeitos de inconsistência de dados de chuva (período de 1998-99).

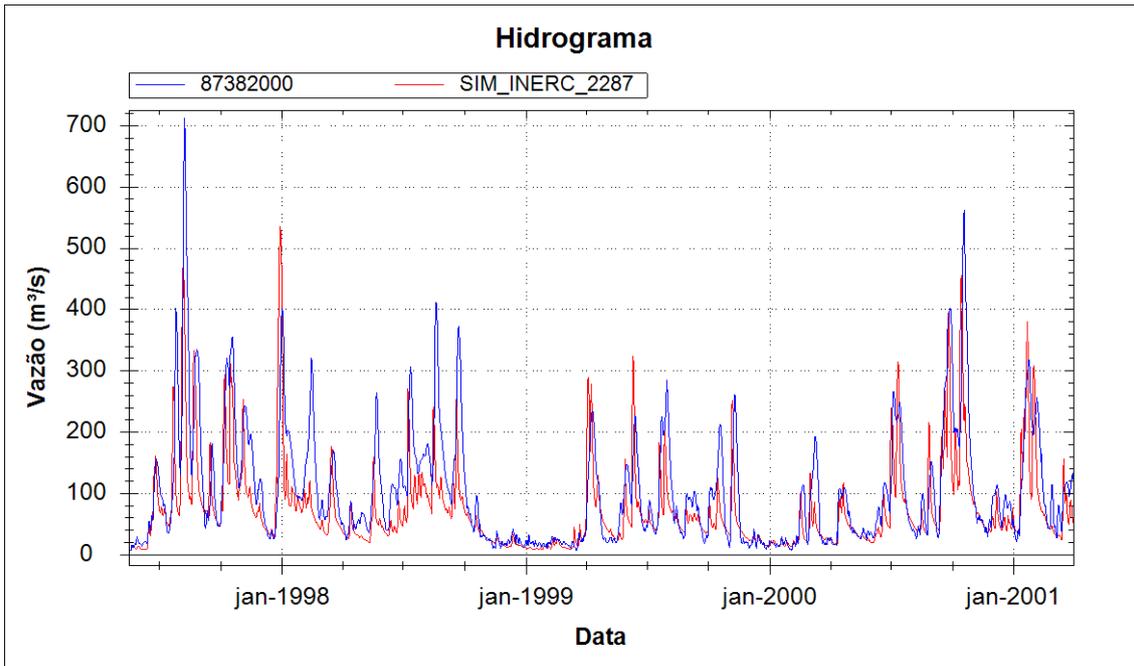


Figura 27 - Hidrogramas simulado e observado no Rio dos Sinos no posto 87382000

#### 5.2.2.8 Rio Tacuarí

O Rio Tacuarí é outro afluente da Lagoa Mirim contido na região do Uruguai. A Figura 28 representa os hidrogramas referentes ao ponto mais à jusante nesse rio. O modelo para esse rio teve um desempenho semelhante ao Rio Cebollati, houve boa representação das vazões em alguns pontos enquanto em outros o desempenho foi prejudicado possivelmente em função da menor quantidade de dados de chuva. A vazão simulada pelo modelo é influenciada diretamente pela chuva incidente na bacia. Em alguns períodos os postos disponíveis provavelmente conseguiram captar de forma satisfatória a chuva incidente na bacia enquanto em outros isso não aconteceu. Quando maior a quantidade de postos disponíveis, maior a probabilidade de representar a chuva que realmente atingiu a área da bacia e, conseqüentemente, a vazão resultante.

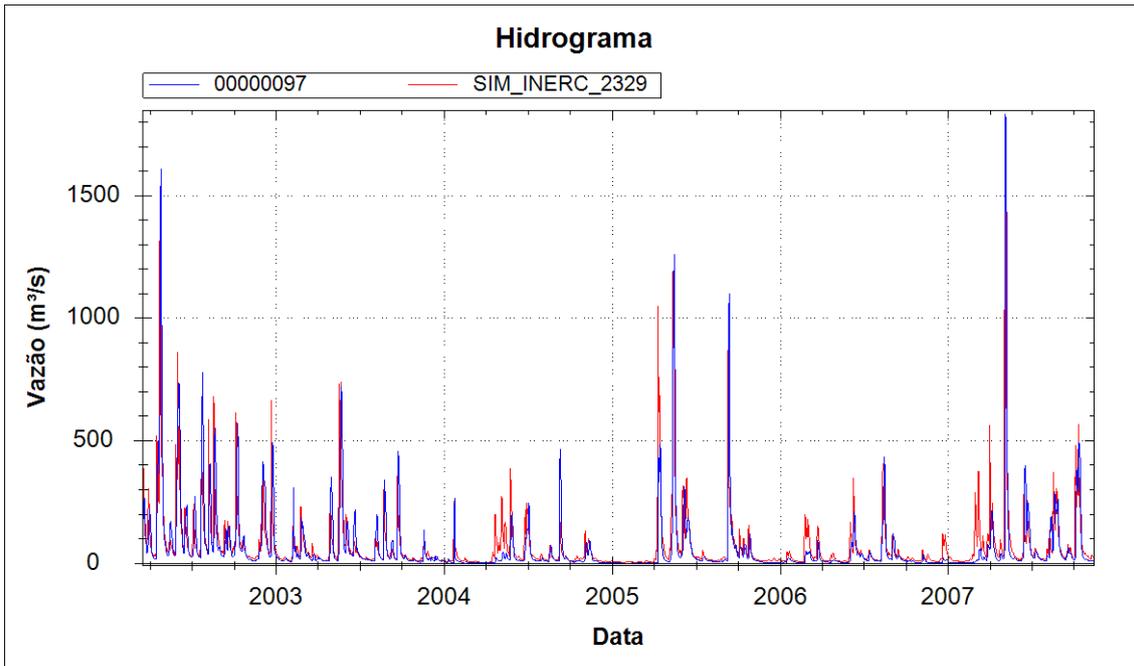


Figura 28 - Hidrogramas simulado e observado no Rio Tacuarí no posto 97.0

### 5.2.2.9 Rio Taquari

O Rio Taquari é um dos principais afluentes da Laguna dos Patos, representando um comportamento hidrológico, em função das características físicas de sua bacia, muito diferente ao do Rio Jacuí. Enquanto o primeiro se encontra em uma região declivosa e com solos rasos o que torna sua bacia de resposta muito rápida a eventos de chuva, o segundo tem uma vasta área de planície apresentando assim hidrogramas mais suaves com picos mais arredondados. Novamente os hidrogramas serão apresentados de montante para jusante da bacia. O primeiro posto na ponte do Rio das Antas (Figura 29) e o segundo em Encantado (Figura 30), sendo este o ponto mais à jusante disponível da bacia do Rio Taquari.

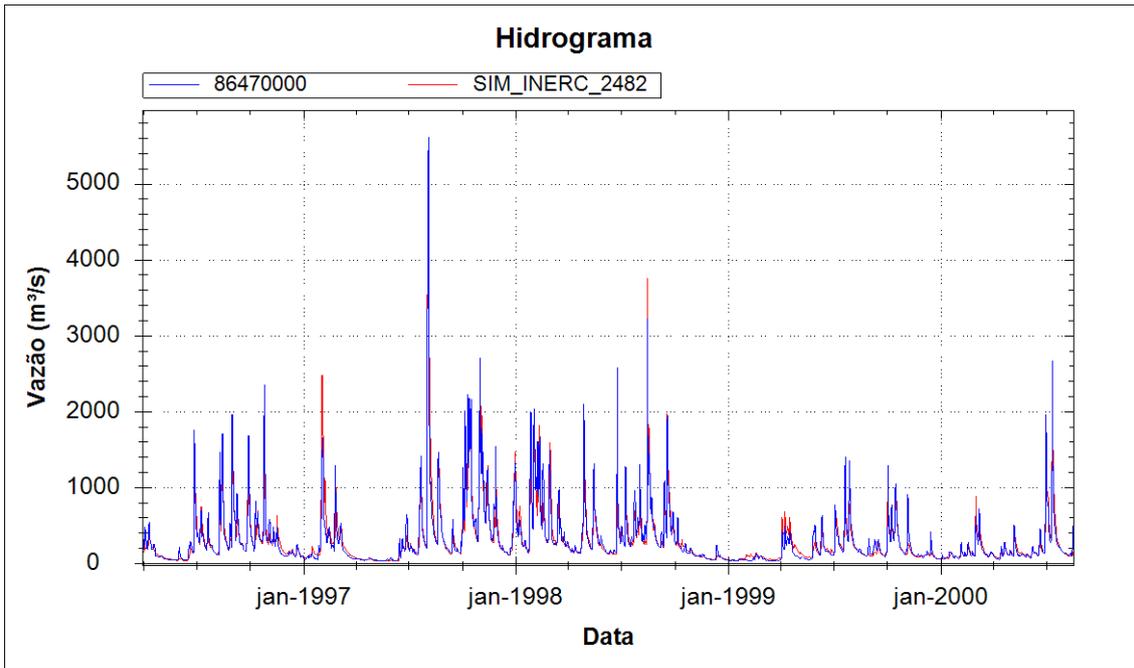


Figura 29 - Hidrogramas simulado e observado no Rio das Antas no posto 86470000

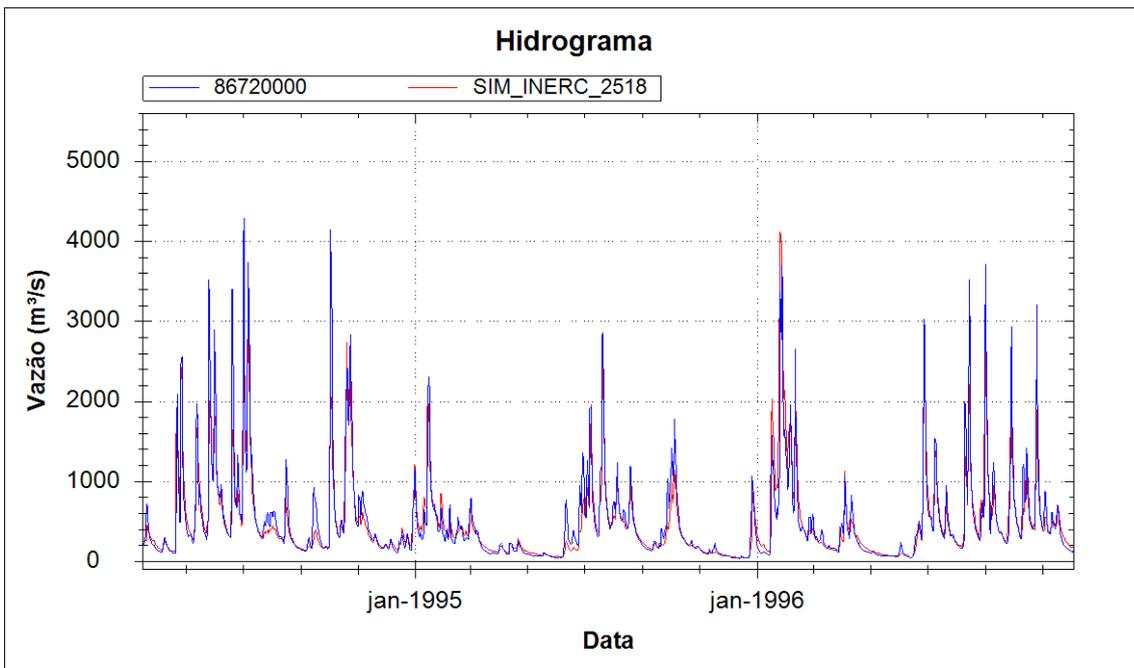


Figura 30 - Hidrogramas simulado e observado no Rio Taquari no posto 86720000

Verifica-se nos dois postos uma ótima correlação entre os dados observados e simulados com o modelo nos dois postos fluviométricos.

### 5.3 Validação da vazão nos rios

A validação do modelo foi efetuada no período de 1º de janeiro de 1970 a 31 de dezembro de 1989 totalizando 20 anos. Esse período foi selecionado em função da disponibilidade de dados pluviométricos. Dos 33 postos fluviométricos utilizados na calibração, 30 continham informações no período de validação.

#### 5.3.1 Métricas de desempenho

A Tabela 2 apresenta as métricas de desempenho para todos os postos analisados no período de validação, assim como informações sobre os postos. Os mapas com as métricas de desempenho resultantes do processo de validação então representados nessa seção. A Figura 31 apresenta os coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe relativos à comparação entre a simulação e os dados observados nos postos fluviométricos durante o período de validação.

Tabela 2 – Postos e métricas correspondentes no período de validação

ID	Código	Nome	Area (km <sup>2</sup> )	Rio	NS	NSlog	$\Delta V(\%)$
1	10.0	Puente Ruta 8 (Vieja)	4676	Río Olimar Grande	0.515	0.43	16.03
2	14.0	Picada de Corbo	2899	Río Cebollatí	0.387	0.431	6.232
3	15.0	Paso Averías	7865	Río Cebollatí	0.398	0.2	40.24
4	96.0	Paso Borches	1425	Río Tacuarí	0.466	0.452	-5.094
5	97.0	Paso Dragón	3540	Río Tacuarí	0.4	0.499	-3.861
6	85400000	DONA FRANCISCA	14000	RIO JACUÍ	0.481	0.369	-3.007
7	85480000	PASSO DO ROCHA	2970	RIO VACACAÍ	0.631	0.655	-5.589
8	85600000	PASSO DAS TUNAS	6780	RIO VACACAÍ	0.733	0.666	3.599
9	85623000	SÃO SEPÉ - MONTANTE	690	RIO SÃO SEPÉ	0.706	0.836	-15.346
10	85642000	PASSO SÃO LOURENÇO	27300	RIO JACUÍ	0.607	0.598	4.237
11	85900000	RIO PARDO	38700	RIO JACUÍ	0.875	0.82	-4.012
12	86100000	PASSO DO GABRIEL	1820	RIO DAS ANTAS	0.519	0.71	8.552
13	86160000	PASSO TAINHAS	1120	RIO TAINHAS	0.731	0.722	0.943
14	86410000	PASSO BARRA DO GUAIAVEIRA	2820	RIO TURVO	0.796	0.873	-11.316
15	86440000	PASSO DO PRATA	3600	RIO PRATA	0.789	0.871	-14.897
16	86470000	PONTE DO RIO DAS ANTAS	12500	RIO DAS ANTAS	0.757	0.799	-0.915
17	86480000	PASSO MIGLIAVACA	1330	RIO CARREIRO	0.79	0.853	-3.944
18	86500000	PASSO CARREIRO	1820	RIO CARREIRO	0.765	0.852	-3.884
19	86510000	MUÇUM	16000	RIO TAQUARI	0.86	0.824	11.81
20	86560000	LINHA COLOMBO	2030	RIO GUAPORÉ	0.809	0.83	-9.506
21	86580000	SANTA LÚCIA	2470	RIO GUAPORÉ	0.807	0.872	-10.655
22	86720000	ENCANTADO	19100	RIO TAQUARI	0.847	0.898	-8.494

23	87160000	NOVA PALMIRA	2030	RIO CAÍ	0.693	0.548	26.789
24	87170000	BARCA DO CAÍ	3030	RIO CAÍ	0.631	0.683	0.037
25	87270000	PASSO MONTENEGRO	4360	RIO CAÍ	0.63	0.546	9.572
26	87380000	CAMPO BOM	2900	RIO DOS SINOS	0.561	0.794	-4.957
27	87382000	SÃO LEOPOLDO	3130	RIO DOS SINOS	0.536	0.737	-12.45
28	87590000	PASSO DO CAÇÃO	4080	RIO CAMAQUÃ	0.487	0.646	-5.334
29	87905000	PASSO DO MENDONÇA	15600	RIO CAMAQUÃ	0.663	0.69	6.368
30	88575000	CERRO CHATO	1050	ARROIO BASÍLIO	0.608	0.719	-15.401

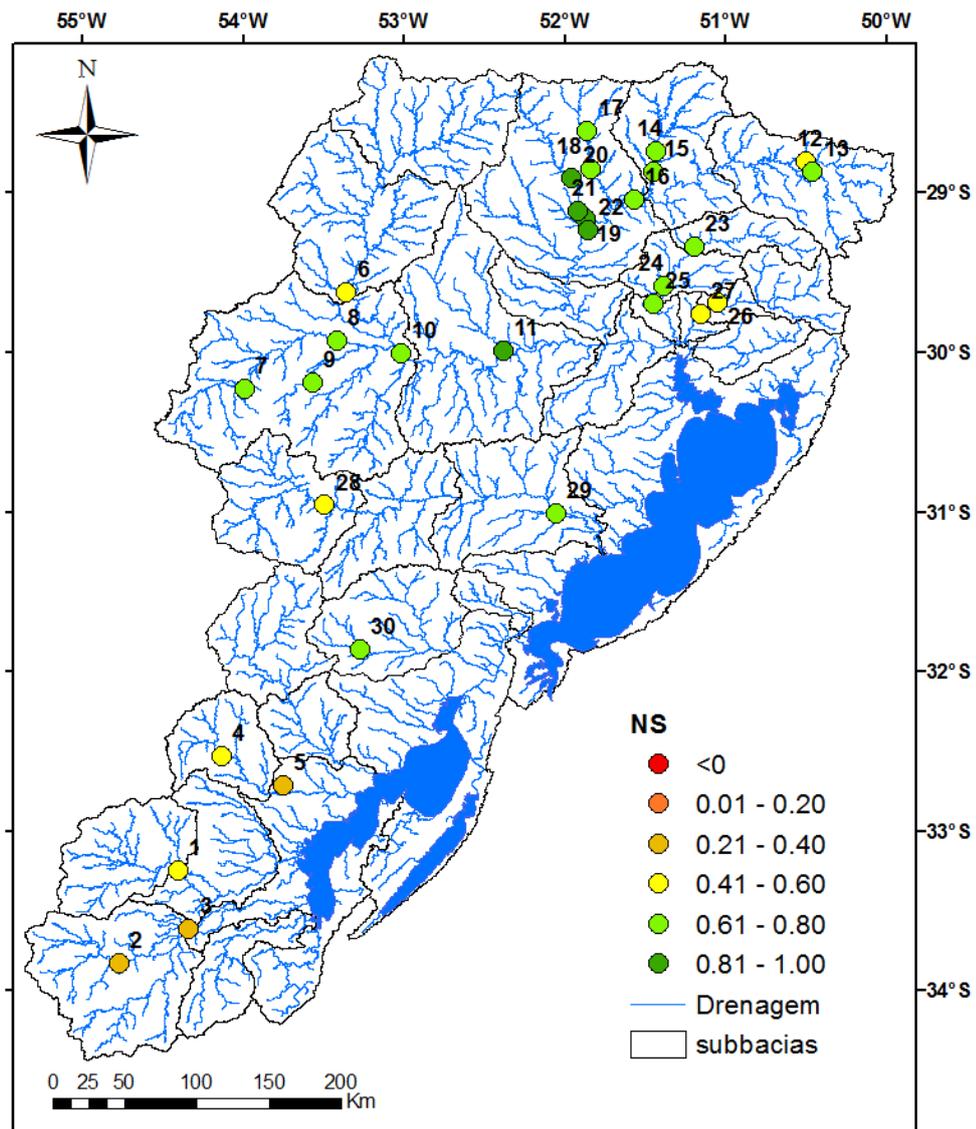


Figura 31 – Coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS) para o período de validação

Os coeficientes NS no período de validação resultaram em valores muito semelhantes aos da calibração, tendo boa performance na maioria dos postos

fluviométricos. Houve ainda uma melhora nos valores referentes ao Alto Jacuí. Os pontos mais a jusante nos principais rios continuam com bons resultados (jusante do Jacuí e Taquari acima de 0,8), sendo que o Rio Taquari continua com bons valores de NS em toda a sua bacia. O sul da bacia por sua vez continua com desempenho prejudicado.

A figura 32 apresenta os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSlog) do logaritmo das vazões para o período de validação.

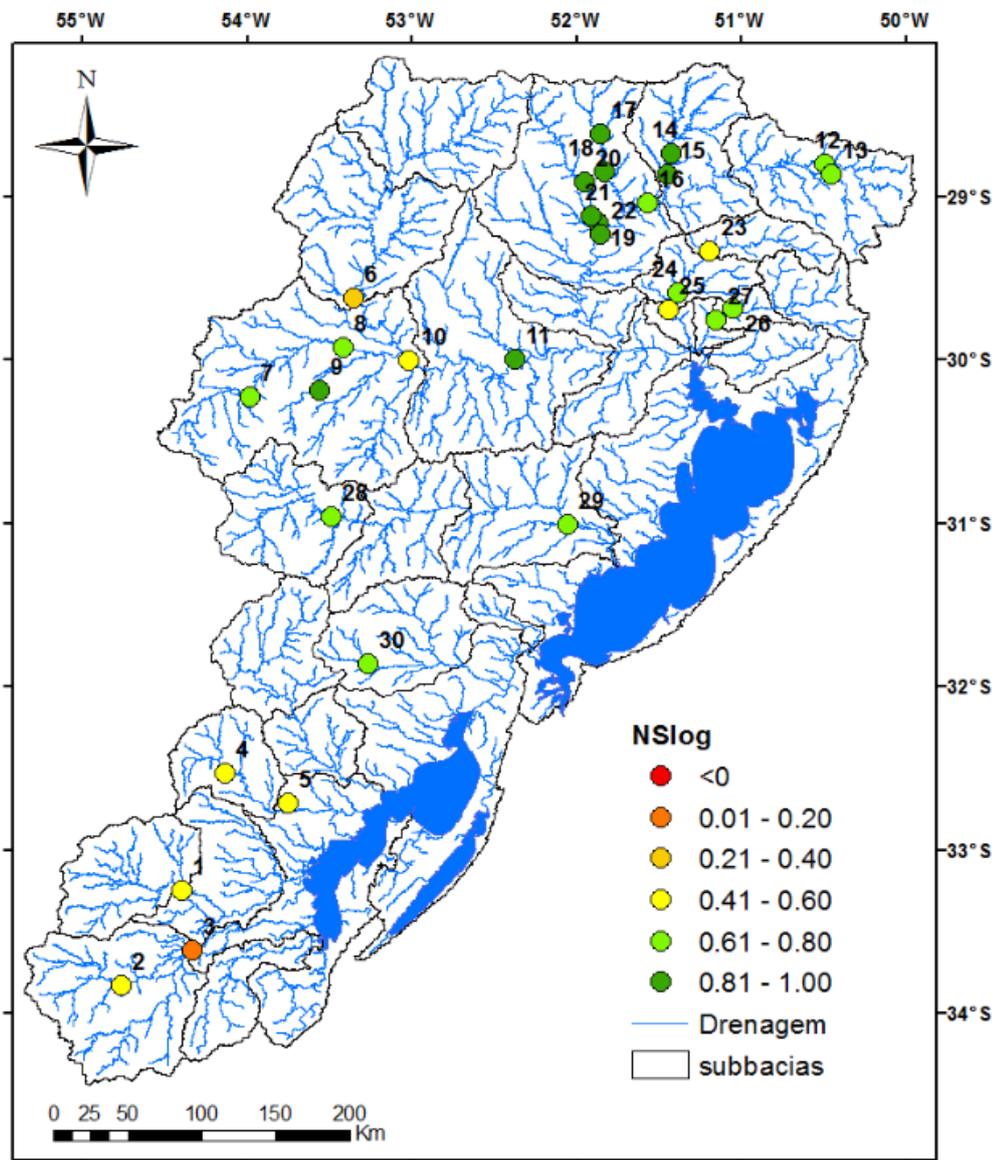


Figura 32 – Coeficientes de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões para o período de validação

Novamente os resultados da validação foram muito semelhantes aos da calibração, os valores de NSlog continuam bons para a maioria dos postos fluviométricos analisados. Assim como o coeficiente NS, o NSlog apresentou grande melhora na validação em relação à calibração para a região do Alto Jacuí. Novamente o Rio Taquari e Jacuí apresentaram ótimos resultados dessa métrica na porção mais à jusante (acima de 0,8). A região do Uruguai continua com desempenho prejudicado, sendo que o posto no Rio Cebollati apresentou piora.

A Figura 33 apresenta os valores de erro relativo de volume (valor absoluto) para o período de validação.

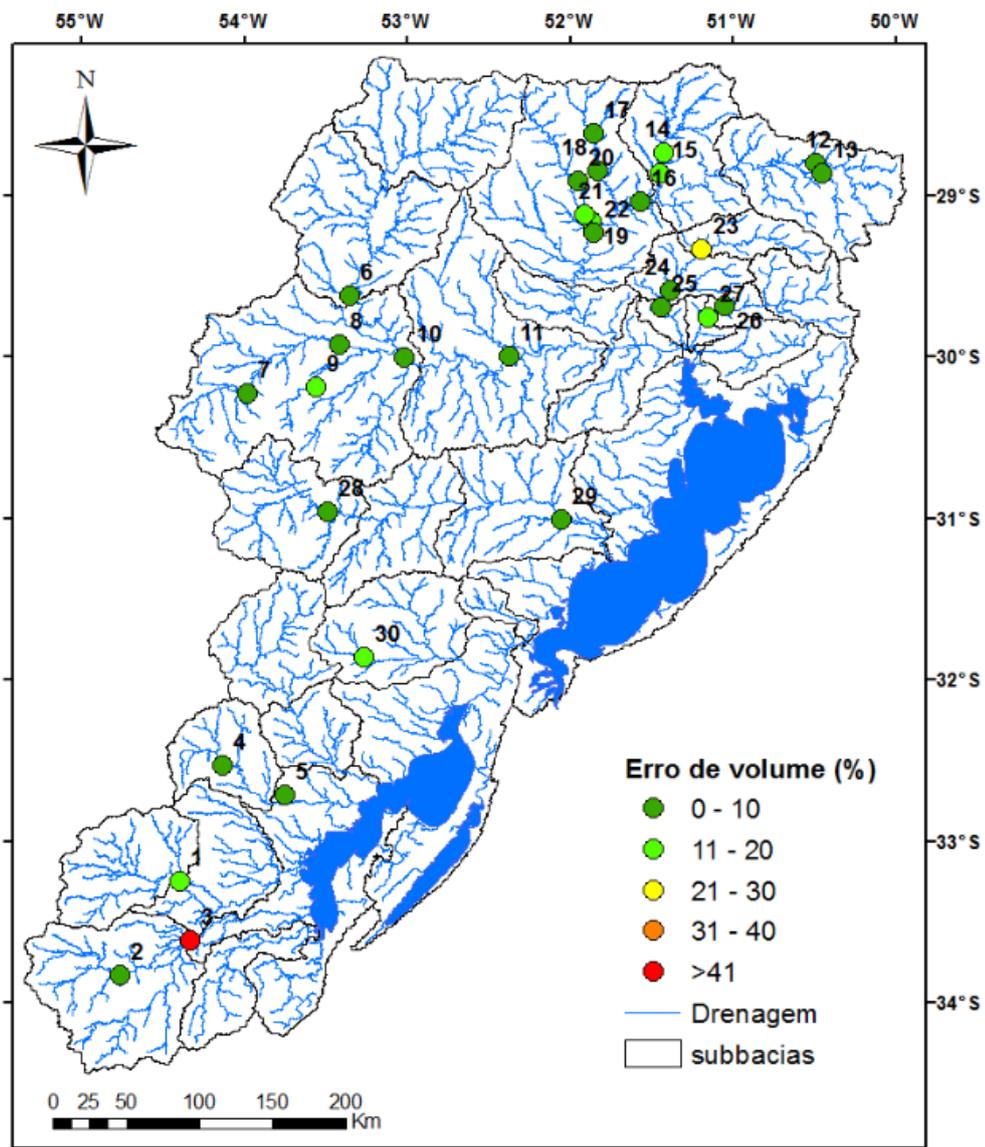


Figura 33 – Erro de volume para o período de validação

Assim como na calibração, os erros de volume na validação apresentaram bons resultados. Na maior parte dos pontos o erro de volume ficou abaixo de 10%. Aqui também houve uma piora para o rio Cebollati, onde o erro está entre 31 e 41%.

Verifica-se um bom desempenho do modelo de forma geral para o período de validação, apresentando métricas similares às obtidas durante a calibração. Esse resultado sugere que o modelo foi calibrado de forma fisicamente coerente e, portanto, está apto para ser utilizado em qualquer período.

### 5.3.2 Hidrogramas da validação

Nessa seção serão apresentados os hidrogramas de validação dos mesmos postos apresentados na calibração, com exceção daqueles que não possuem dados no período de validação, no caso os postos do rio Piratini e Jaguarão.

#### 5.3.2.1 Rio Caí

Os hidrogramas simulado e observado no posto mais a jusante do Rio Caí estão representados na Figura 34. Observa-se que os hidrogramas de validação e calibração são muito semelhantes, em alguns pontos superestimando as vazões e as subestimando em outros.

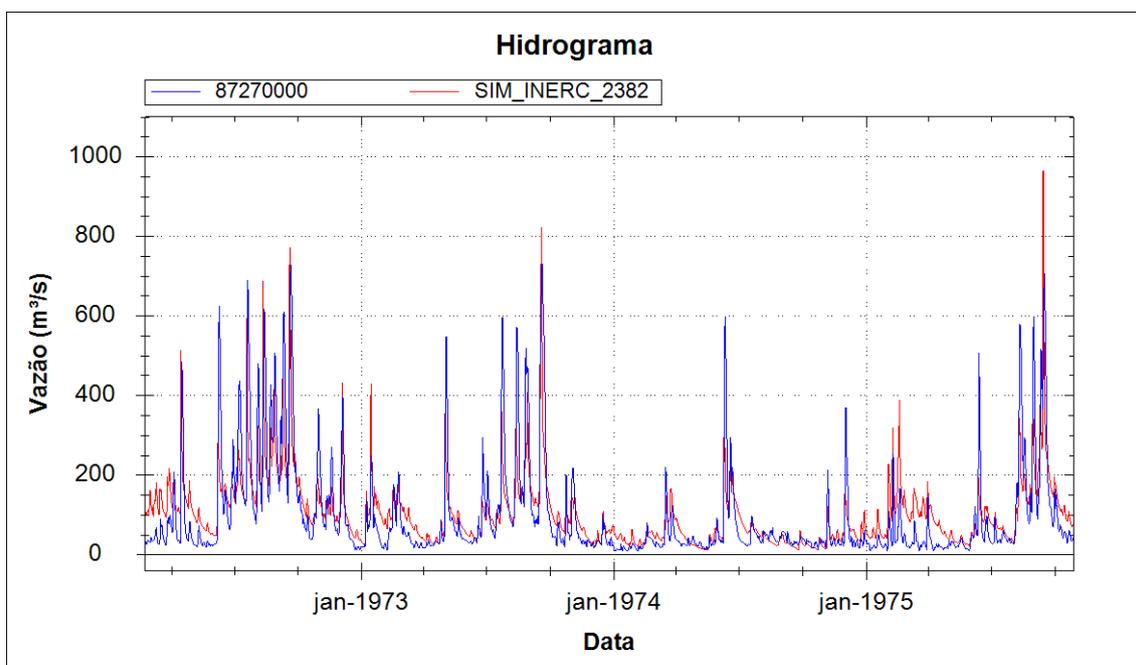


Figura 34 – Hidrogramas simulado e observado no Rio Caí posto 87270000

### 5.3.2.2 Rio Camaquã

As figuras 35 e 36 representam os hidrogramas referentes ao mesmo posto no Rio Camaquã sendo que a Figura 36 representa um intervalo de tempo inferior ao da Figura 35.

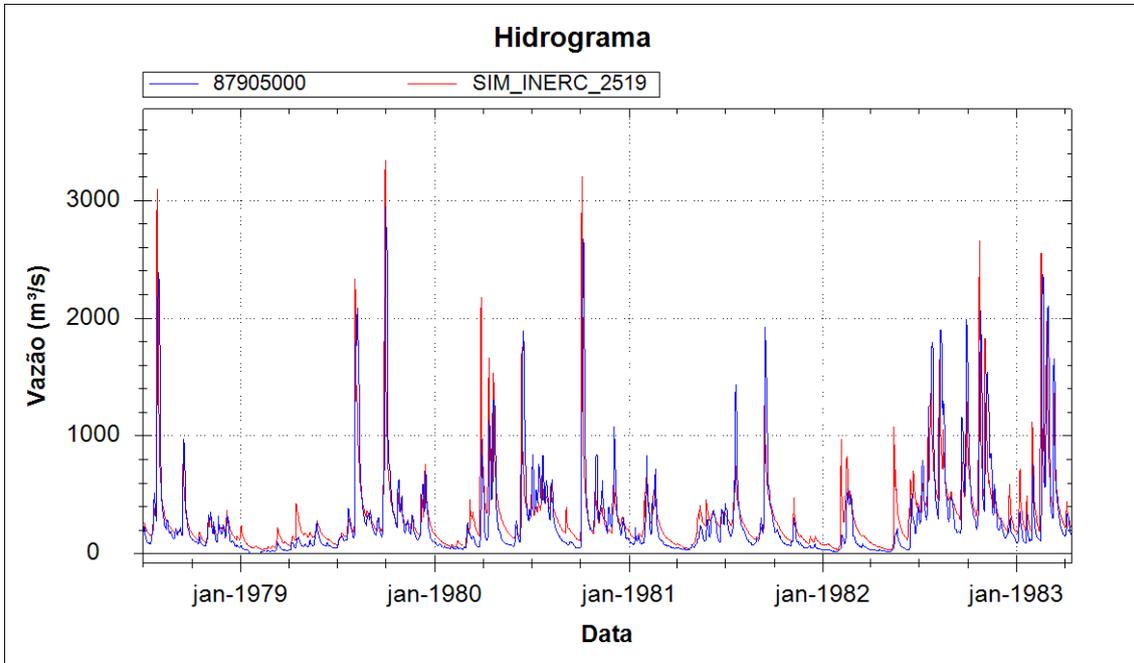


Figura 35 – Hidrogramas simulado e observado no Rio Camaquã no posto de código 87905000

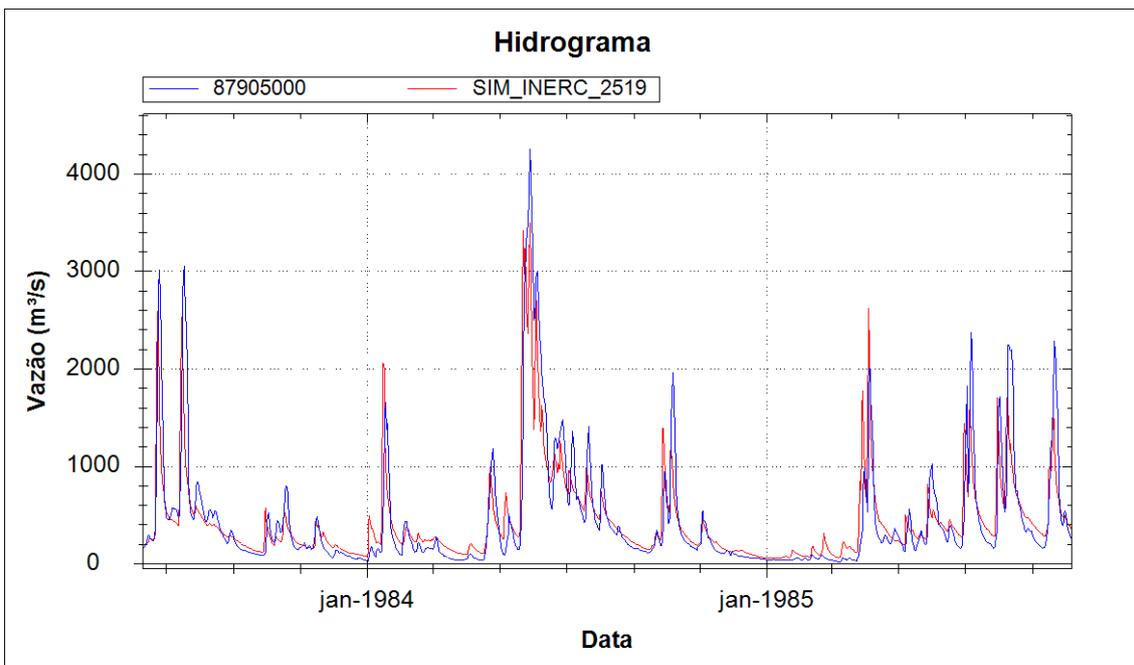


Figura 35 – Hidrogramas simulado e observado no Rio Camaquã no posto de código 87905000 (zoom)

Verifica-se novamente bom desempenho do modelo, no entanto é possível perceber uma leve decaída de performance em relação ao período da calibração para esse posto, o que é confirmado pelos valores de NS e NSlog representados nas tabelas 1 e 2.

### 5.3.2.3 Rio Cebollati

A Figura 36 ilustra os hidrogramas observado e simulado no período de validação para o Rio Cebollati. Verifica-se uma leve piora do desempenho do modelo que pode ser confirmada pelas métricas nas tabelas 1 e 2. Essa piora possivelmente pode ser devido ao fato da calibração ser de mais difícil execução em função da menor quantidade de dados de chuva nessa região da bacia, o que acaba afetando a validação e o desempenho do modelo em geral para essa região.

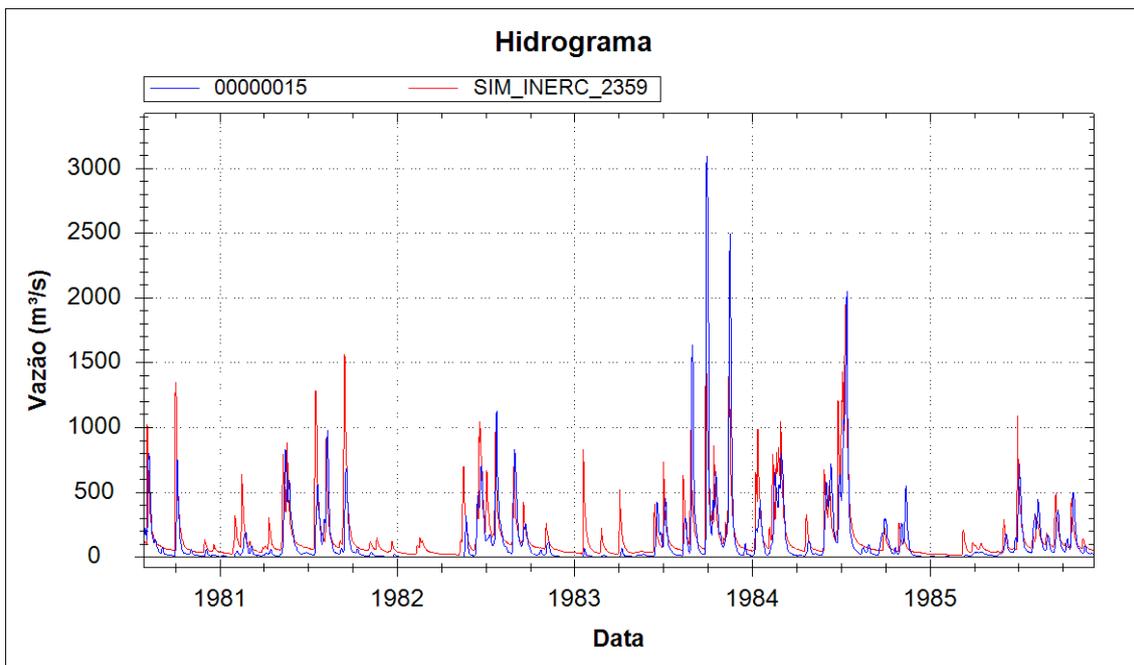


Figura 36 – Hidrogramas simulado e observado no Rio Cebollati no posto 15.0

### 5.3.2.4 Rio Jacuí

Novamente os hidrogramas da bacia do rio Jacuí serão apresentados aqui de montante para jusante. Na Figura 37 estão representados os hidrogramas referentes ao Rio Vacacaí. Na Figura 38 os hidrogramas do rio Jacuí, logo após a confluência com

o Vacacaí estão representados. Por fim, na Figura 39 são apresentados os hidrogramas referentes ao posto mais à jusante do rio.

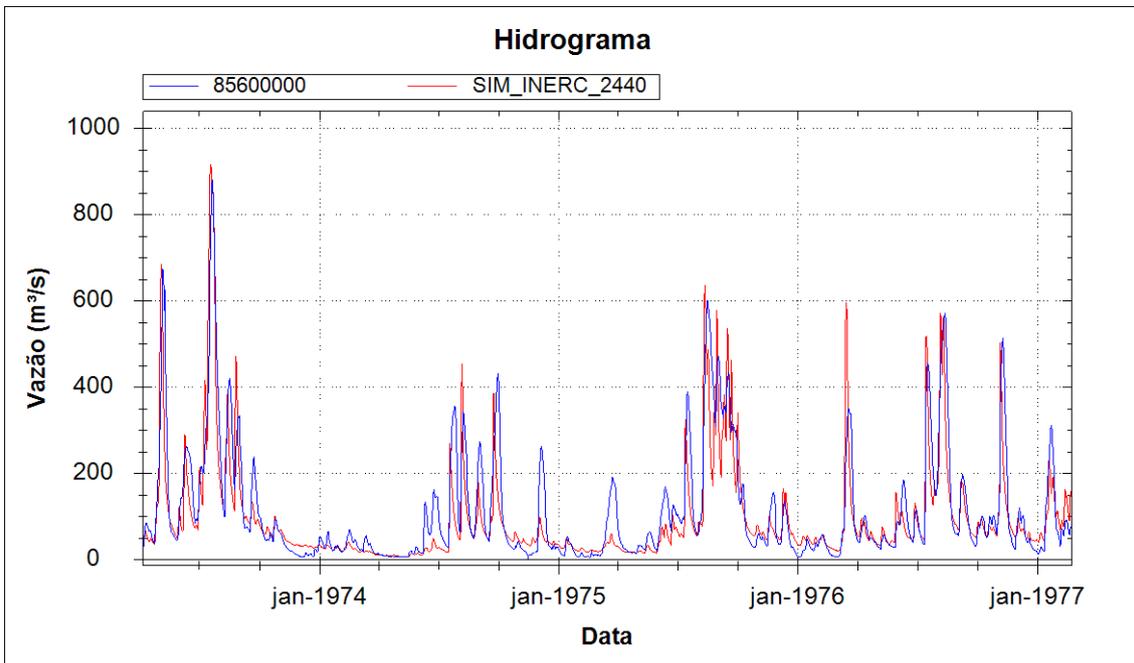


Figura 37 - Hidrogramas simulado e observado no Rio Vacacaí no posto de código 85600000

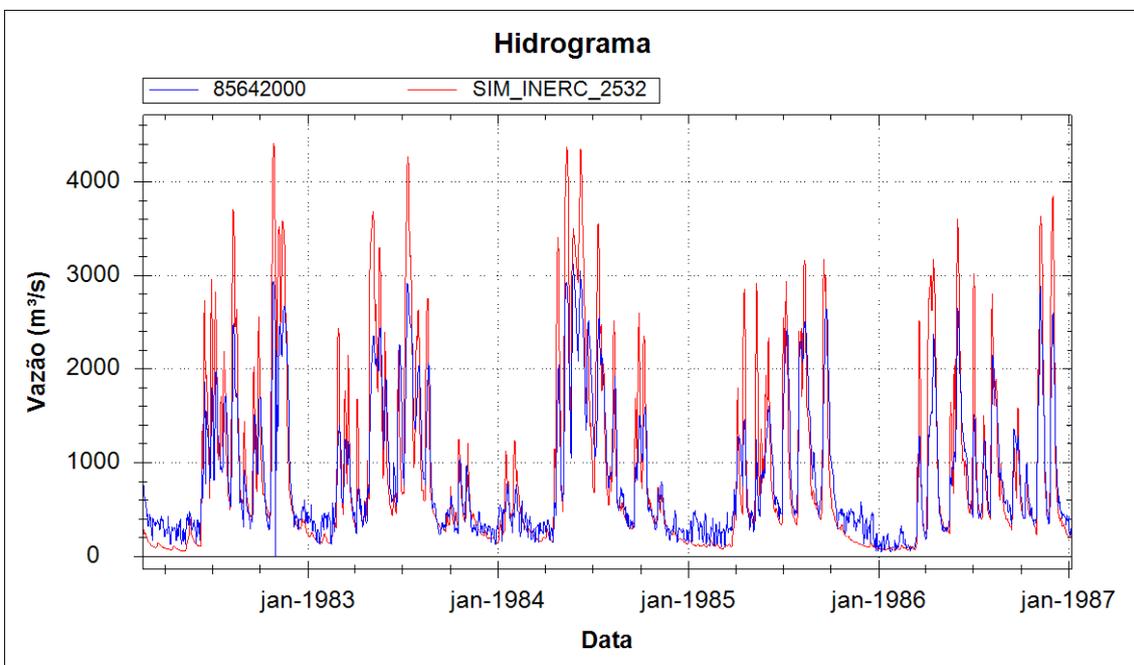


Figura 38 - Hidrogramas simulado e observado no Rio Jacuí no posto de código 85642000

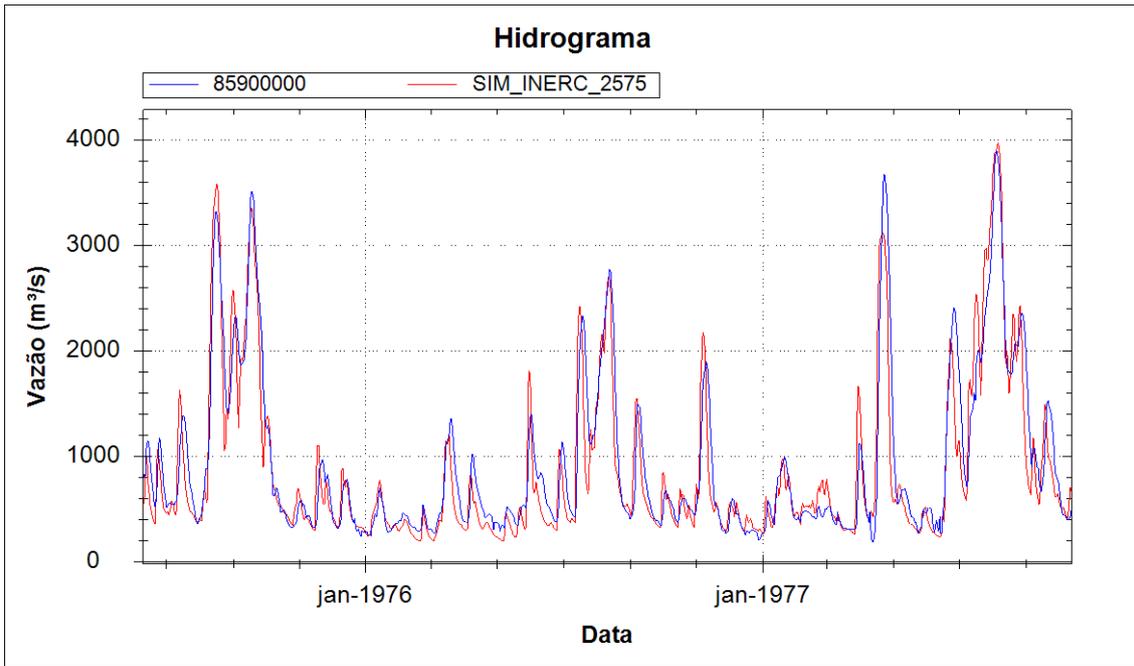


Figura 39 - Hidrogramas simulado e observado no Rio Jacuí no posto de código 85900000

Verifica-se um aumento no desempenho do modelo no período e validação principalmente referente ao posto localizado logo após a confluência do Alto Jacuí com o Rio Vacacaí. Uma melhor performance, portanto, também ocorre no posto mais a jusante do rio (85900000). Essas afirmativas podem ser justificadas não só pela análise qualitativa dos hidrogramas, mas pelas métricas apresentadas nas tabelas 1 e 2.

### 5.3.2.5 Rio Sinos

A Figura 40 representa os hidrogramas simulado e observado no período de validação no Rio dos Sinos. Verifica-se aqui uma melhora sutil no desempenho do modelo no período de validação em relação ao de calibração, afirmativa que pode ser confirmada por meio da análise das tabelas 1 e 2.

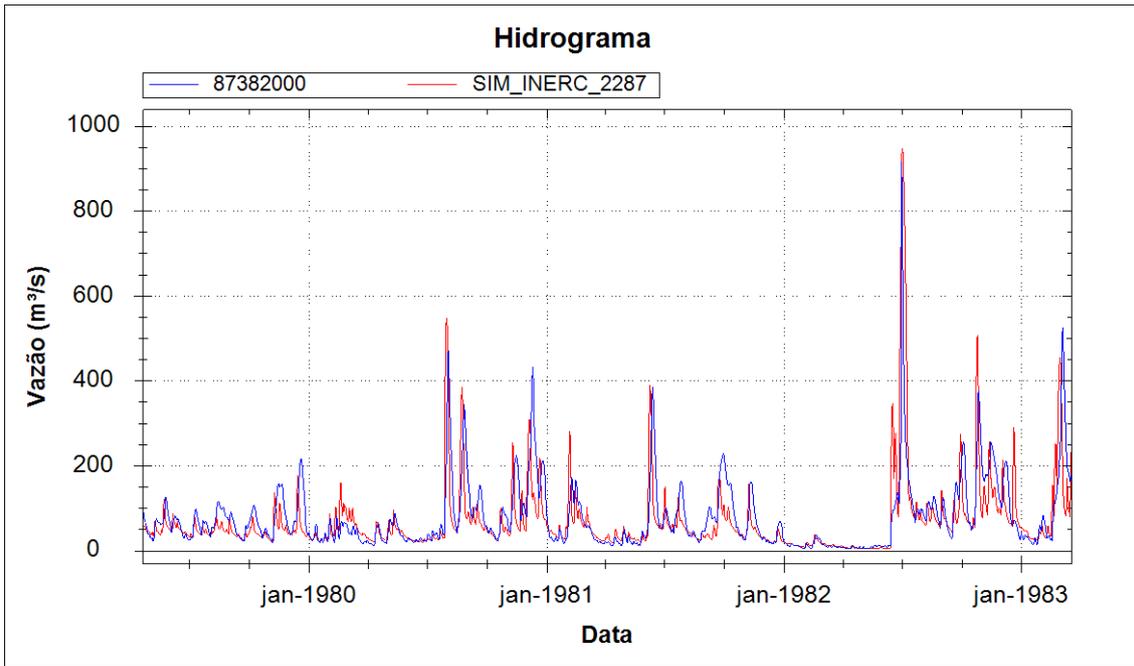


Figura 40 - Hidrogramas simulado e observado no Rio dos Sinos no posto 87382000

### 5.3.2.6 Rio Tacuarí

A Figura 41 apresenta os hidrogramas simulado e observado no Rio Tacuarí no período de validação. Os resultados de validação nesse rio são muito semelhantes aos de calibração.

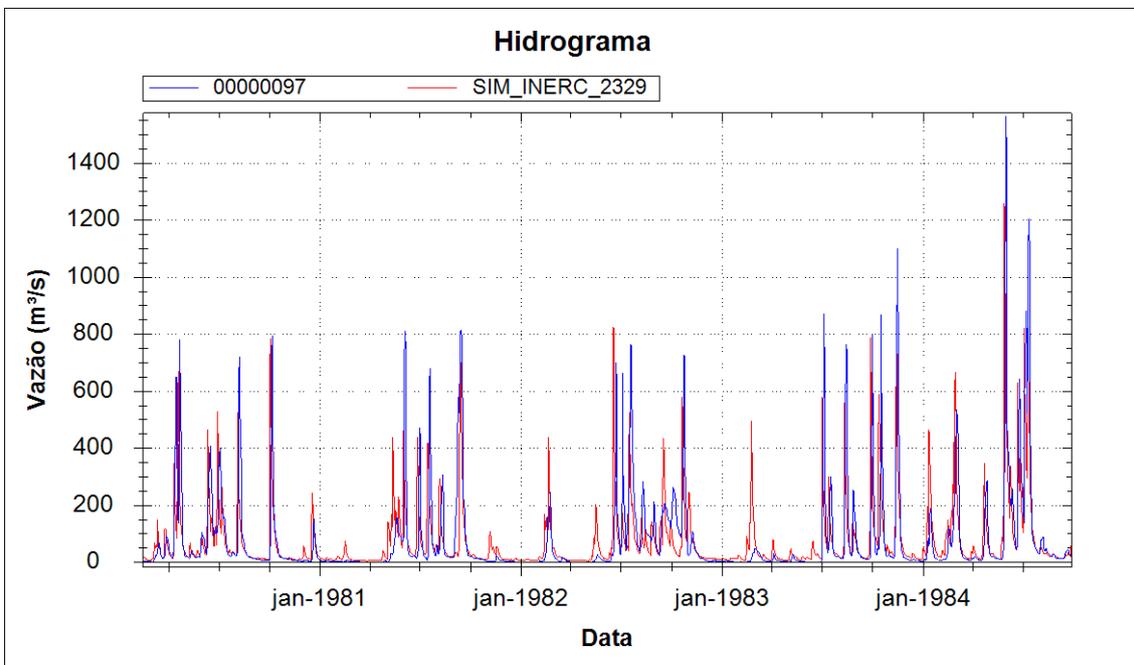


Figura 41 - Hidrogramas simulado e observado no Rio Tacuarí no posto 97.0

### 5.3.2.7 Rio Taquari

Novamente os hidrogramas serão apresentados de montante para jusante da bacia. O primeiro posto na ponte do Rio das Antas (Figura 42) e o segundo em Encantado (Figura 43).

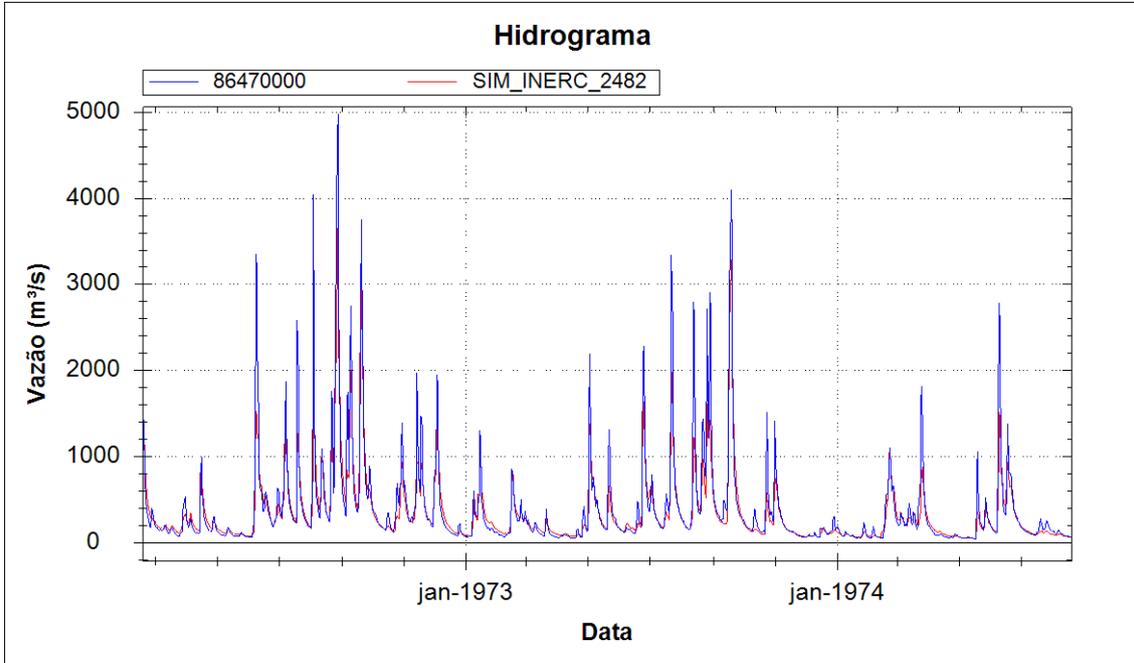


Figura 43 - Hidrogramas simulado e observado no Rio das Antas no posto 86470000

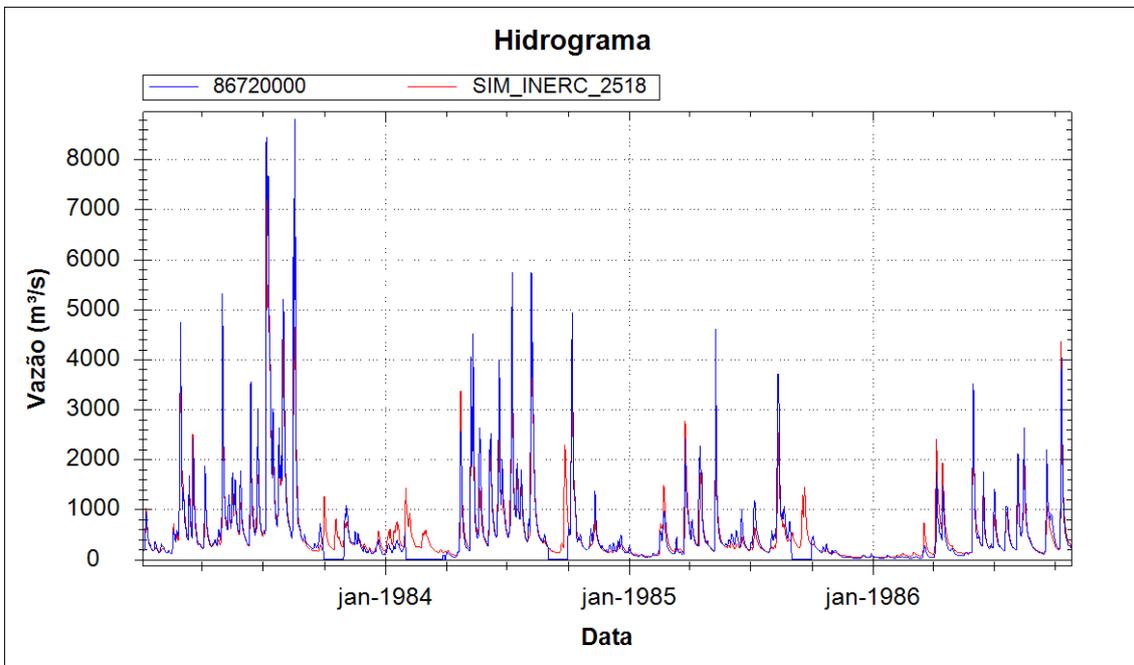


Figura 44 - Hidrogramas simulado e observado no Rio Taquari no posto 86720000

Os ótimos resultados na bacia do Rio Taquari permaneceram, assim como na calibração, com uma melhora de desempenho com relação às métricas (tabelas 1 e 2) no período de validação no posto de Encantado. Cabe ressaltar que existem falhas nos dados observados no posto Encantado no período de validação visíveis na Figura 44.

#### **5.4 Comparação das áreas alagadas com imagens de satélite**

Este trabalho foi a primeira aplicação do modelo MGB-IPH com propagação de vazão inercial com trocas laterais em uma região lagunar, e graças a essa abordagem pode-se obter informação de mapas de áreas alagadas em planícies de inundação e dos corpos lagunares. Essas representações são avaliadas nessa seção.

O modelo ajustado para a Laguna dos Patos foi avaliado para a representação de áreas alagadas comparando as áreas alagadas obtidas com o modelo e as de imagens de satélite referentes ao mesmo dia. As áreas alagadas pelo modelo foram obtidas a partir dos níveis referentes às minibacias e do MDE. As imagens de satélite Landsat 5 foram adquiridas do site do USGS na plataforma Earth Explorer (USGS, 2015). Ao buscar as imagens buscou-se dias de cheia e estiagem visíveis nas imagens para comparar a performance nos dois tipos de condição e verificar se a área do Lago foi totalmente alagada pelo modelo. Como uma imagem Landsat não abrange toda a região da bacia, buscou-se contemplar imagens de todos os corpos d'água em todas as situações possíveis (durante cheias e estiagens). As imagens aqui serão apresentadas conforme a data, a região e a situação. Nas Figuras apresentadas a imagem à esquerda representa a imagem de satélite sobreposta pela profundidade da área alagada obtida pelo modelo (em vermelho). A imagem no meio é a composição em cor verdadeira da imagem Landsat 5 enquanto a imagem à direita representa a localização da imagem de satélite na bacia.

##### **5.4.1 Lago Guaíba e Laguna dos Patos – Estiagem – 3 de fevereiro de 2007**

A Figura 45 representa a área alagada durante a estiagem, tanto do Lago Guaíba quanto da Laguna dos Patos para o dia 3 de fevereiro de 2007. Verifica-se que, mesmo em um período de estiagem, o modelo inundou toda a área da Laguna dos

Patos e do Lago Guaíba o que mostra uma representação realista do sistema. A região próxima ao Canal de São Gonçalo foi inundada apesar de isso não ter ocorrido de acordo com a imagem de satélite, nesse caso uma calibração mais a fundo da morfologia do canal deve ser levada em consideração em aplicações futuras. Ainda para esse período verificou-se que a lagoa mangueira não foi devidamente inundada, fato que pode ser corrigido com a calibração das características morfológicas dos corpos d'água nessa região.

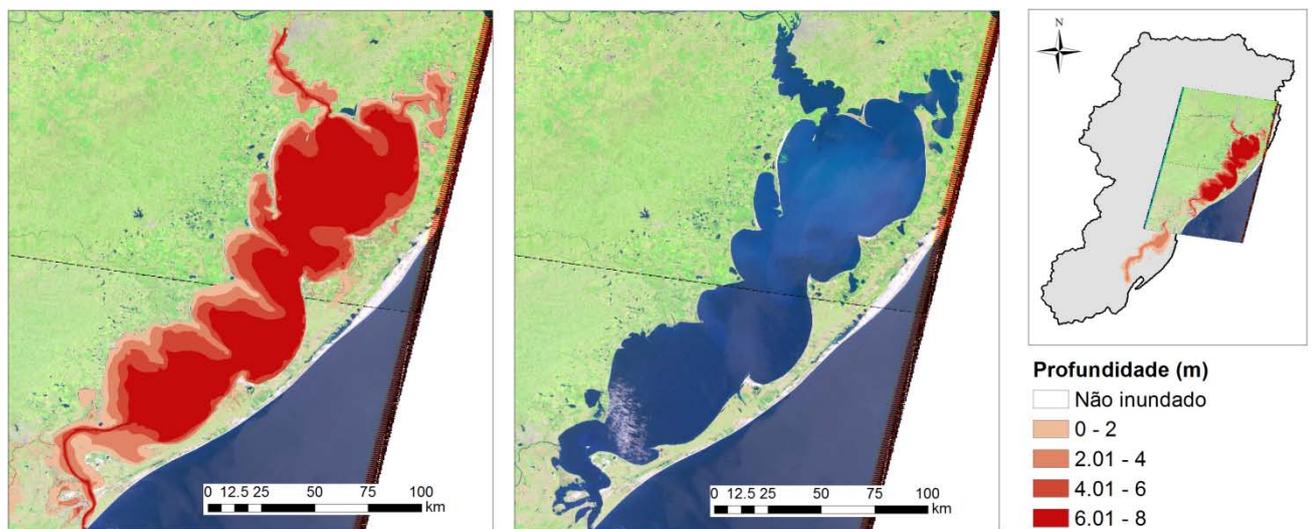


Figura 44 – Comparação área alagada simulada (em vermelho na imagem à esquerda) x imagem de satélite (imagem à direita) para o dia 3 de fevereiro de 2007 na Laguna dos Patos e Lago Guaíba

#### 5.4.2 Lago Guaíba, Laguna dos Patos e afluentes – Cheia – 1º de outubro de 2007

As figuras 45 e 46 representam a porção norte da Laguna dos Patos, o lago Guaíba e os seus afluentes para um período de cheia, sendo que a Figura 46 apresenta a Figura 45 com foco nos afluentes do lago Guaíba.

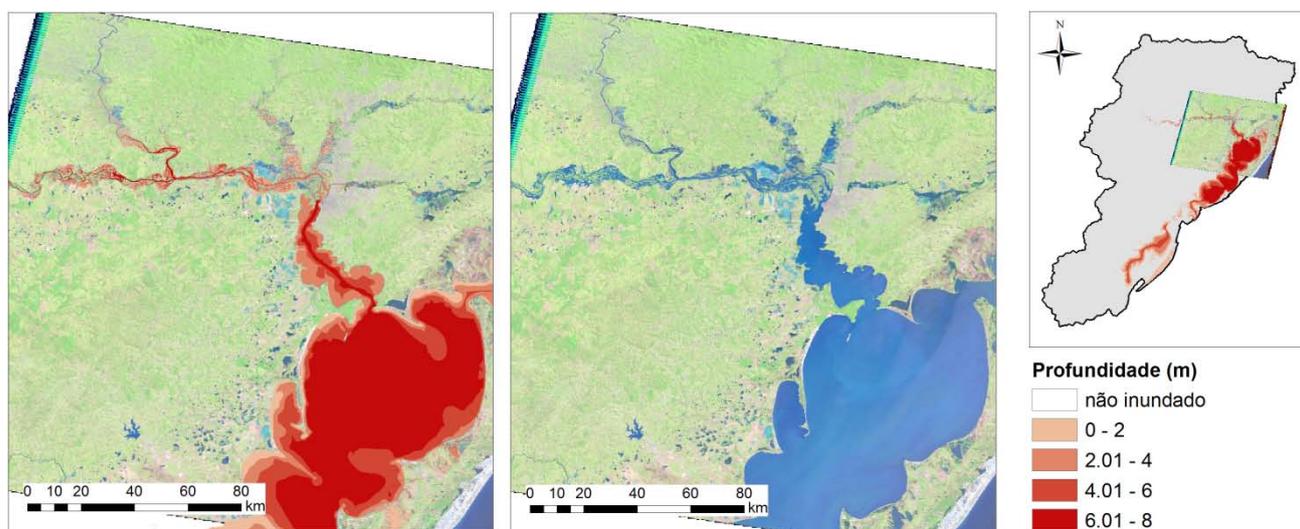


Figura 45 – Comparação área alagada simulada (em vermelho na imagem à esquerda) x imagem de satélite (imagem à direita) para o dia 1º de outubro de 2007 no Lago Guaíba e afluentes e Laguna dos Patos

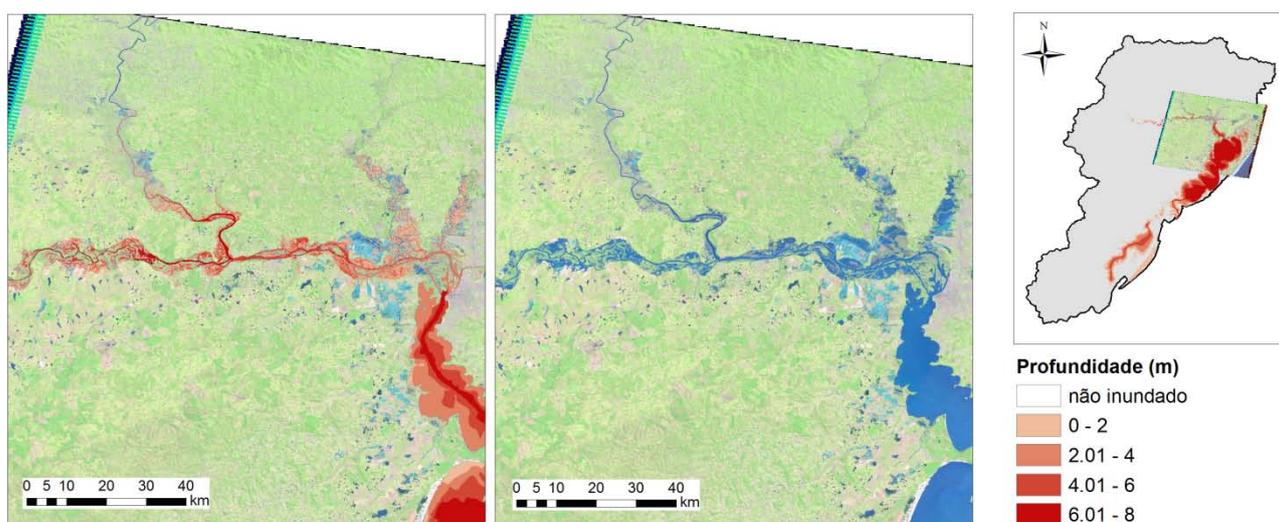


Figura 46 – Comparação área alagada simulada (em vermelho na imagem à esquerda) x imagem de satélite (imagem à direita) para o dia 1º de outubro de 2007 no Lago Guaíba e afluentes

Por meio das imagens 45 e 46 verifica-se que o modelo representa de forma satisfatória as áreas alagadas nos rios Jacuí e Taquari e também na porção à jusante do Rio dos Sinos e Rio Caí. No entanto, a representação das porções mais a montante do Rio dos Sinos e a representação no Rio Gravataí nãoa extensão da área alagada

esperada, aspecto que pode ser ainda melhorado com a calibração mais detalhada das relações geomorfológicas nesses dois rios.

#### 5.4.3 Canal de São Gonçalo, estuário da Laguna dos Patos e norte da Lagoa Mirim – Cheia – 27 de setembro de 2000

A imagem 47 representa um período de cheia na região que engloba o estuário da Laguna dos Patos e o norte da Lagoa Mirim. Observa-se que a área alagada no estuário está representada de forma satisfatória enquanto que no Canal de São Gonçalo e no norte da Lagoa Mirim a área alagada pelo modelo não foi suficiente para abranger as áreas alagadas na imagem de satélite.

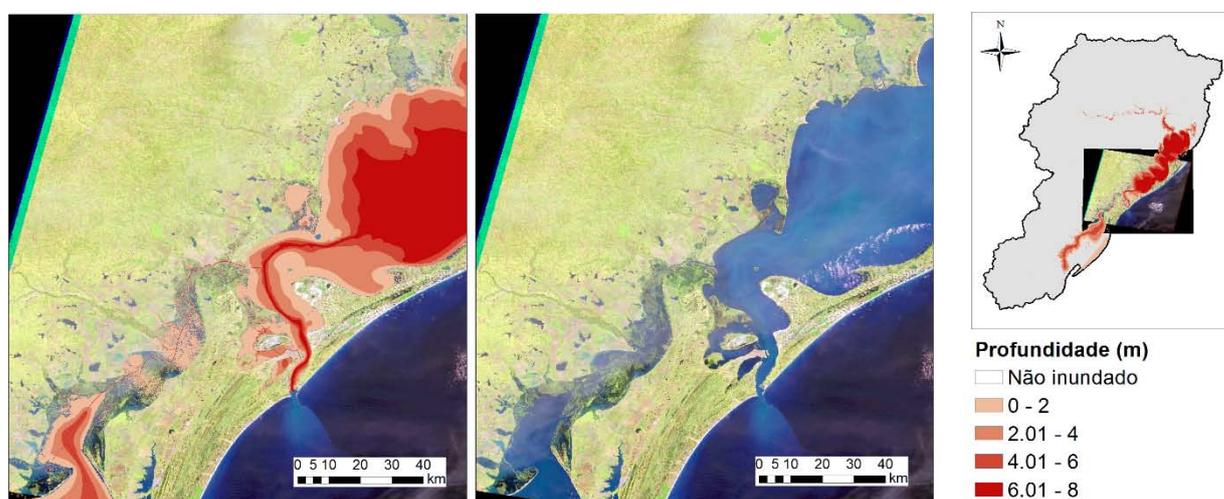


Figura 47 – Comparação área alagada simulada (em vermelho na imagem à esquerda) x imagem de satélite (imagem à direita) para o dia 27 de setembro de 2000 a região entre o estuário da Laguna dos Patos e norte da Lagoa Mirim

#### 5.4.4 Lagoa Mirim e Lagoa Mangueira – Estiagem – 3 de dezembro de 2007

A Figura 48 ilustra a área alagada pelo modelo e a imagem de satélite referente ao dia 3 de dezembro de 2007 em um período de estiagem. Verifica-se a qualitativamente a representação satisfatória das áreas alagadas nos dois corpos d'água, já que a área inundada pelo modelo abrange a extensão do espelho d'água das duas lagoas.



Figura 48 – Comparação área alagada simulada (em vermelho na imagem à esquerda) x imagem de satélite (imagem à direita) para o dia 3 de dezembro de 2007 na região da Lagoa Mirim e Mangueira

#### 5.4.5 Lagoa Mirim e Lagoa Mangueira – Cheia – 2 de junho de 2007

A Figura 49 mostra a comparação entre as áreas alagadas pelo modelo e as imagens de satélite obtidas no dia 2 de junho de 2007 durante um período de cheia. Verifica-se que as áreas alagadas na imagem de satélite não parcialmente alagadas pelo modelo. Essa situação pode ser melhorada com a calibração mais detalhada das relações geomorfológicas dessa região.

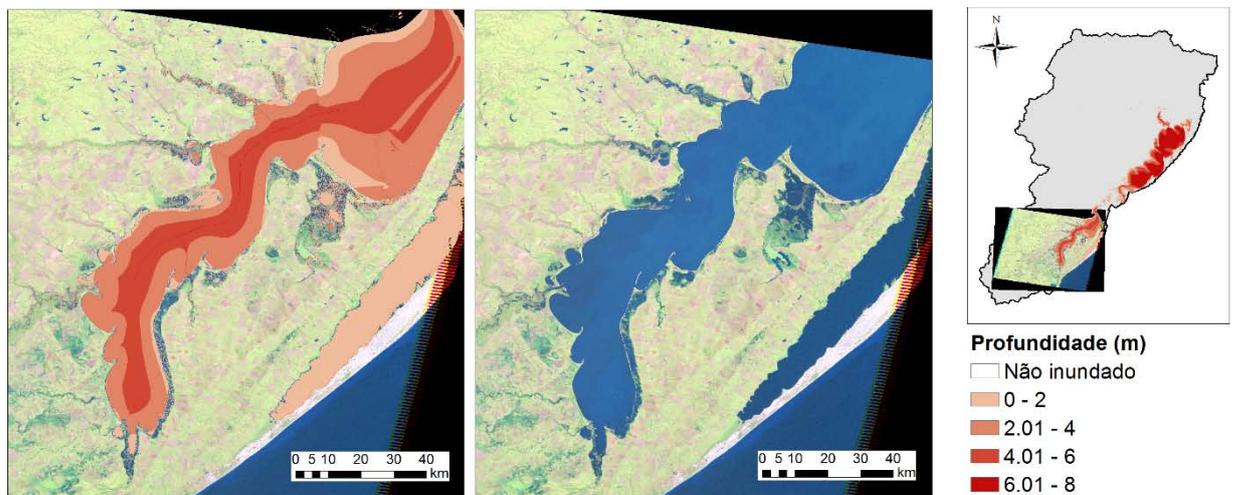


Figura 49 - Comparação área alagada simulada (em vermelho na imagem à esquerda) x imagem de satélite (imagem à direita) para o dia 2 de junho de 2007 na região da Lagoa Mirim e Mangueira

## **5.5 Avaliação da representação dos níveis na Laguna dos Patos**

Os cotogramas dos níveis simulados e observados para as 8 estações linimétricas com localização apresentada na Figura 10 estão representados nas Figuras 50 a 57, na ordem de montante para jusante do complexo do Lago Guaíba e Laguna dos Patos. O mesmo período foi considerado para todos os postos para permitir a comparação direta entre eles. Ressalta-se que esses são os primeiros cotogramas gerados pela aplicação do modelo MGB-IPH em lagos e representando um dos aspectos inovadores desse estudo.

Existe a dificuldade de referenciar os dados observados de níveis e os dados simulados a uma mesma cota de referência (acertar zero da régua), já que nos postos linimétricos a altitude do zero da régua não está disponível na fonte (no caso no Hidroweb). Dessa forma, o zero da régua foi inferido manualmente através de uma análise visual qualitativa, portanto, a comparação dos níveis poderá ser feita apenas dessa forma. Apesar disso, por meio da análise dos cotogramas, nota-se a correspondência direta entre os níveis simulados e observados principalmente nos 6 primeiros postos. Considerando os três primeiros postos à montante, os resultados apresentaram-se muito semelhantes, com boa representação média dos níveis observados. O posto de Arambaré visualmente se destacou com a melhor correspondência.

Uma vez que a influência do vento e das marés ainda não é contemplada no presente estudo, os níveis simulados pelo modelo servem para estimar a influência das vazões nos níveis da laguna de forma isolada. Verifica-se que os resultados estão de acordo com a literatura, já que a descarga fluviométrica também nesse estudo é responsável pela variação dos níveis em escala mensal e anual, representando a média, enquanto que oscilações em escala de tempo menor são causadas pelo vento e, portanto, não podem ser representadas por esse modelo.

Para os últimos dois postos a correspondência entre níveis simulados e observados é aparentemente menor, principalmente para o posto mais à jusante, Rio Grande Regatas, que tem seus níveis claramente controlados pela variação de marés. No entanto acredita-se que adoção de uma morfologia mais adequada no futuro permita atingir a representação dos valores médios dos níveis em escalas de tempo mensais e anuais nesses dois últimos postos (principalmente em Laranjal). A contribuição lateral entre minibacias também deve ser avaliada, já que, por exemplo, a forma como as áreas de contribuição lateral foram definidas ainda pode ser melhorada. Essa hipótese ainda deve ser comprovada em trabalhos futuros. Verifica-se ainda amplitude decrescente dos níveis conforme percorre-se a laguna em direção a desembocadura, o que é visível tanto nos dados observados quanto nos simulados.

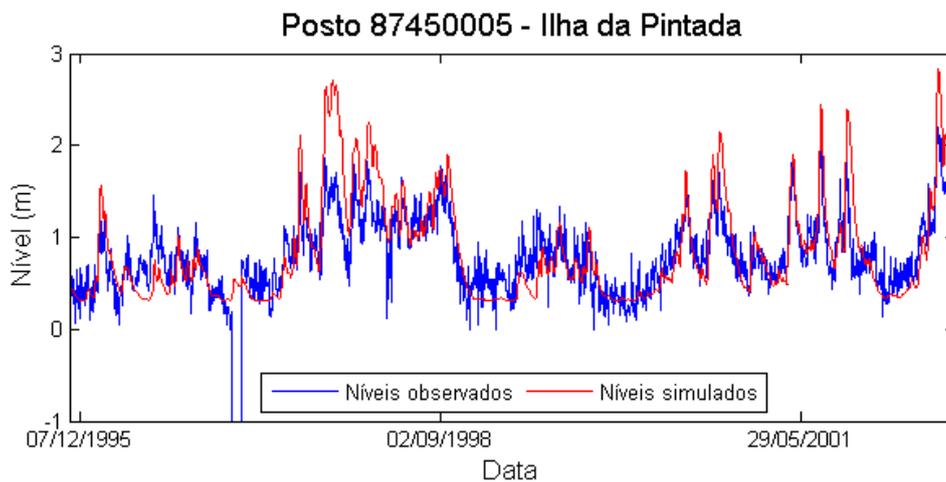


Figura 50 – Níveis simulados e observados no Posto na Ilha da Pintada

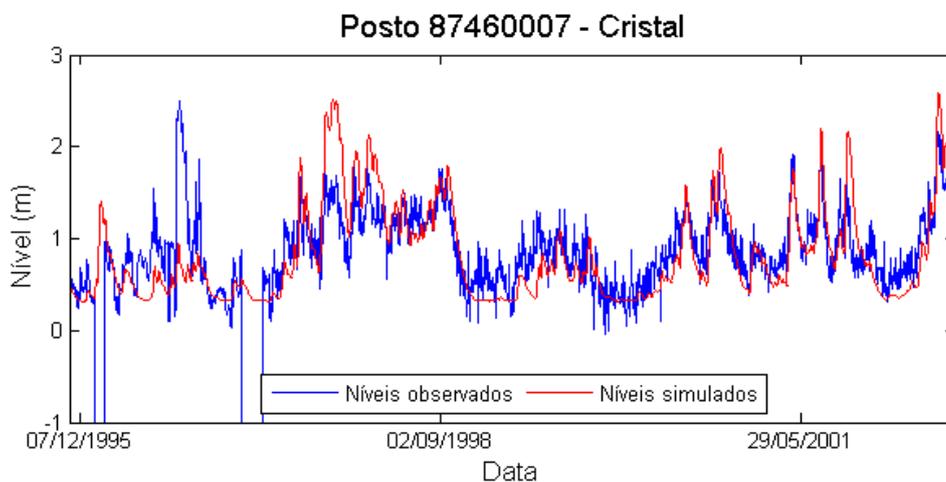


Figura 51 – Níveis simulados e observados no Posto no bairro Cristal em Porto Alegre

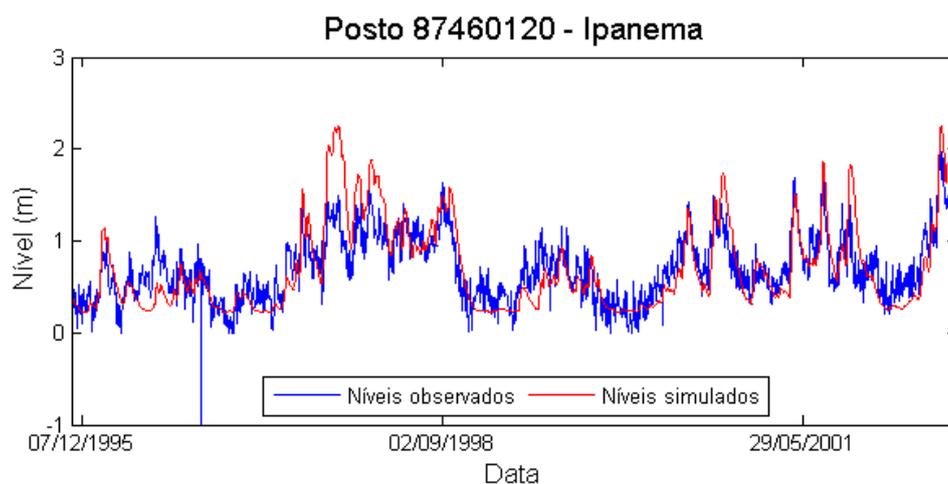


Figura 52 – Níveis simulados e observados no Posto no bairro Ipanema em Porto Alegre

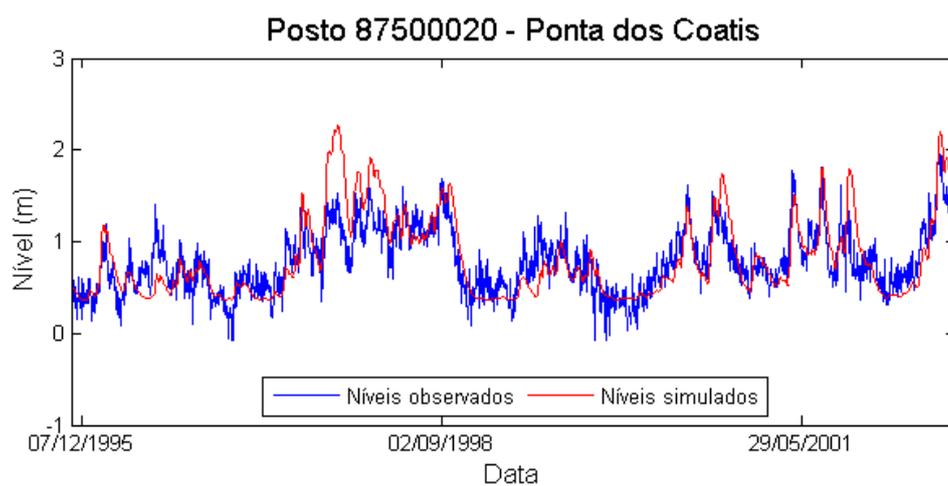


Figura 53 – Níveis simulados e observados no Posto referente à Ponta dos Coatis

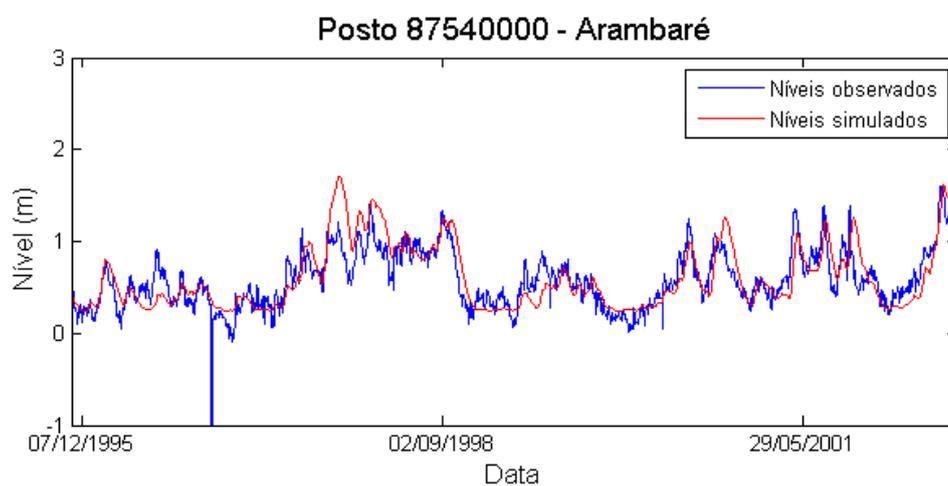


Figura 54 – Níveis simulados e observados no Posto referente à Arambaré

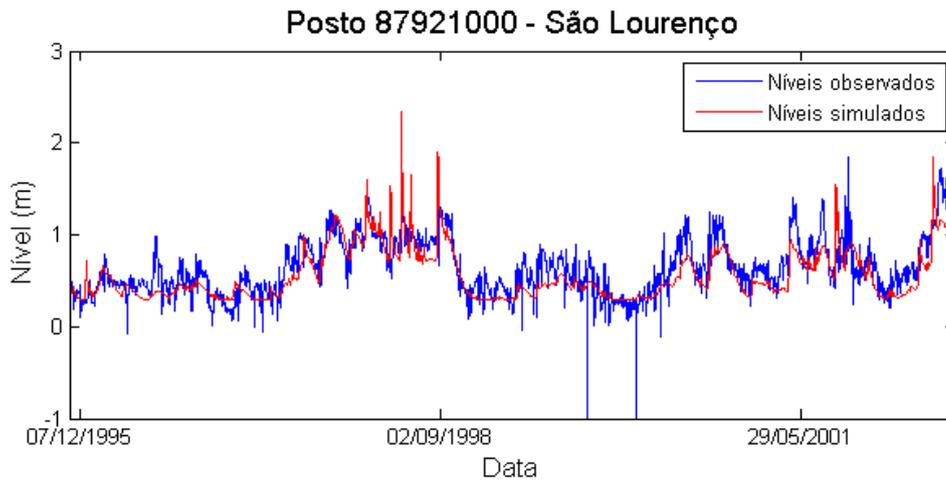


Figura 55 – Níveis simulados e observados no Posto em São Lourenço

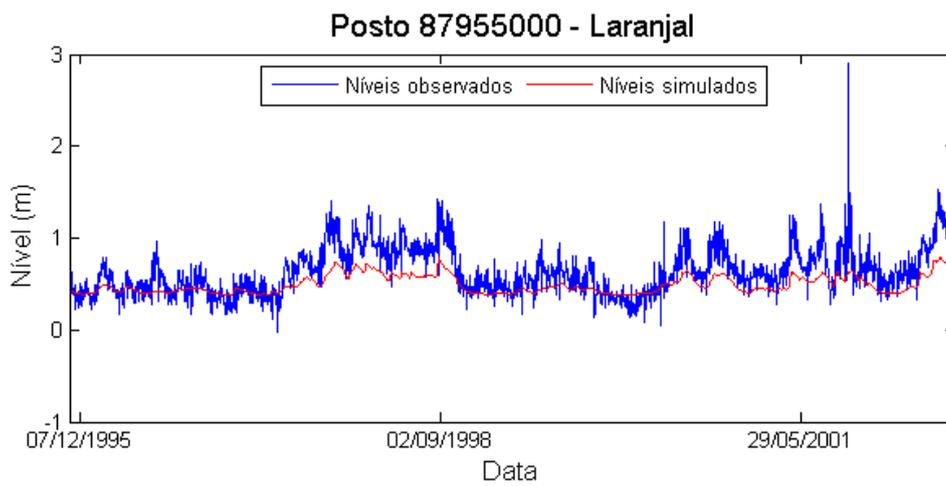


Figura 56 – Níveis simulados e observados no Posto em Laranjal

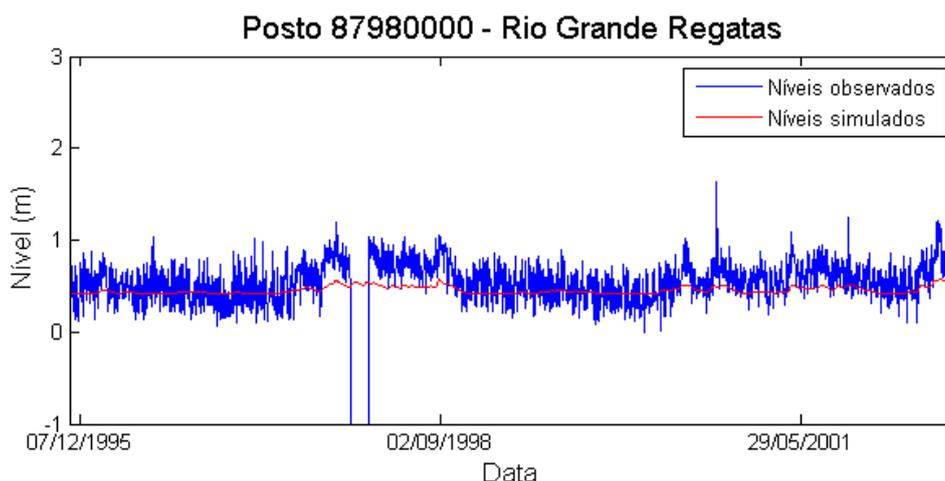


Figura 57 – Níveis simulados e observados no Posto de Rio Grande Regatas

## 5.6 Comparação Muskingum-Cunge x Inercial

Nessa seção serão comparados os métodos de propagação de vazão Muskingum-Cunge e Inercial. Essa comparação foi feita por meio da análise de métricas de desempenho e hidrogramas simulados e observados para os três principais afluentes da Laguna dos Patos. A Tabela 3 representa as métricas de desempenho do modelo MGB-IPH Inercial e MGB-IPH com propagação Muskingum-Cunge de vazões para os rios Camaquã, Taquari e Jacuí, em seus postos mais à jusante. As figuras 58, 59 e 60 representam os hidrogramas observado (azul), simulado com propagação inercial (vermelho) e com propagação Muskingum-Cunge (verde) para os postos da Tabela 3.

Tabela 3 – Métricas de desempenho do modelo MGB-IPH com os métodos de propagação de vazões Inercial e Muskingum-Cunge

Posto		NS		NSlog		$\Delta V(\%)$	
Código	Nome / Rio	MC	Inercial	MC	Inercial	MC	Inercial
87905000	Passo do Mendonça / Rio Camaquã	0.7	0.69	0.8	0.76	-4.8	-1.47
86720000	Encantado / Rio Taquari	0.79	0.76	0.88	0.88	-6.8	-4.76
85900000	Rio Pardo / Rio Jacuí	0.25	0.84	0.73	0.82	-3.0	-4.06

Verifica-se com a Tabela 3 um desempenho semelhante dos dois métodos de propagação de vazões para os rios Camaquã (Passo Mendonça) e Taquari (Encantado), afirmação que pode ser confirmada por meio da observação dos hidrogramas representados nas figuras 58 e 59. Observa-se também que o método Muskingum-Cunge teve desempenho sutilmente superior para esses dois rios, o que pode ser em

função da sua menor sensibilidade à precisão das relações geomorfológicas e do coeficiente de Manning ou inclusive de uma maior facilidade de calibração em função do tempo substancialmente inferior de processamento do modelo.

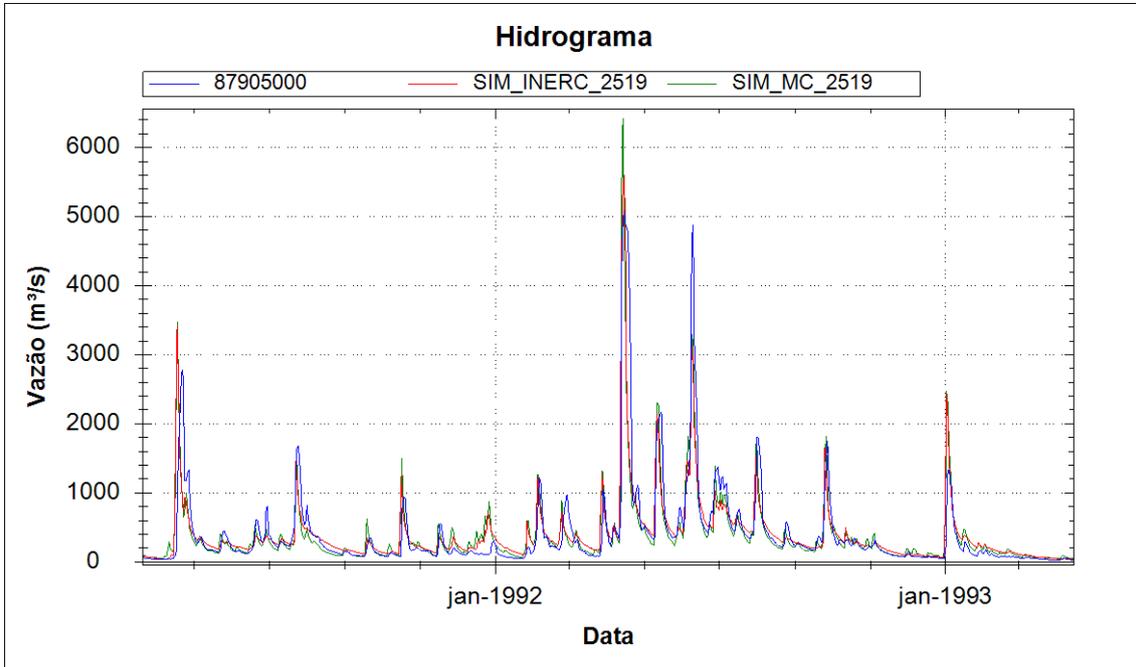


Figura 58 – Hidrogramas observado e simulado, Muskingum-Cunge e Inercial no Rio Camaquã

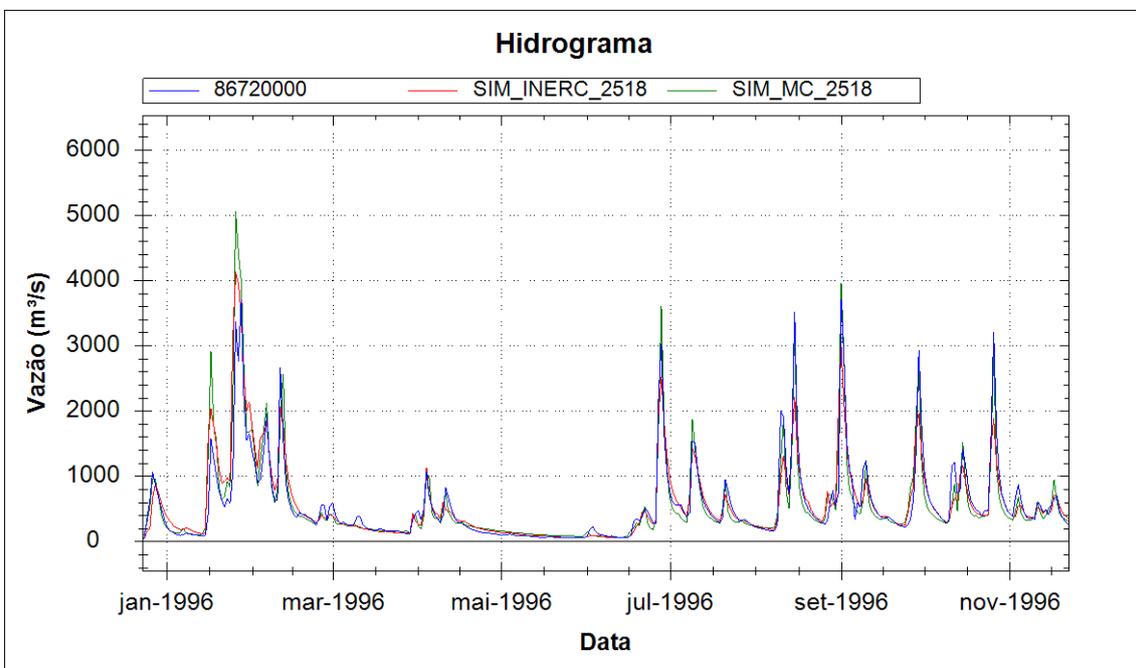


Figura 59 – Hidrogramas observado e simulado, Muskingum-Cunge e Inercial no Rio Taquari

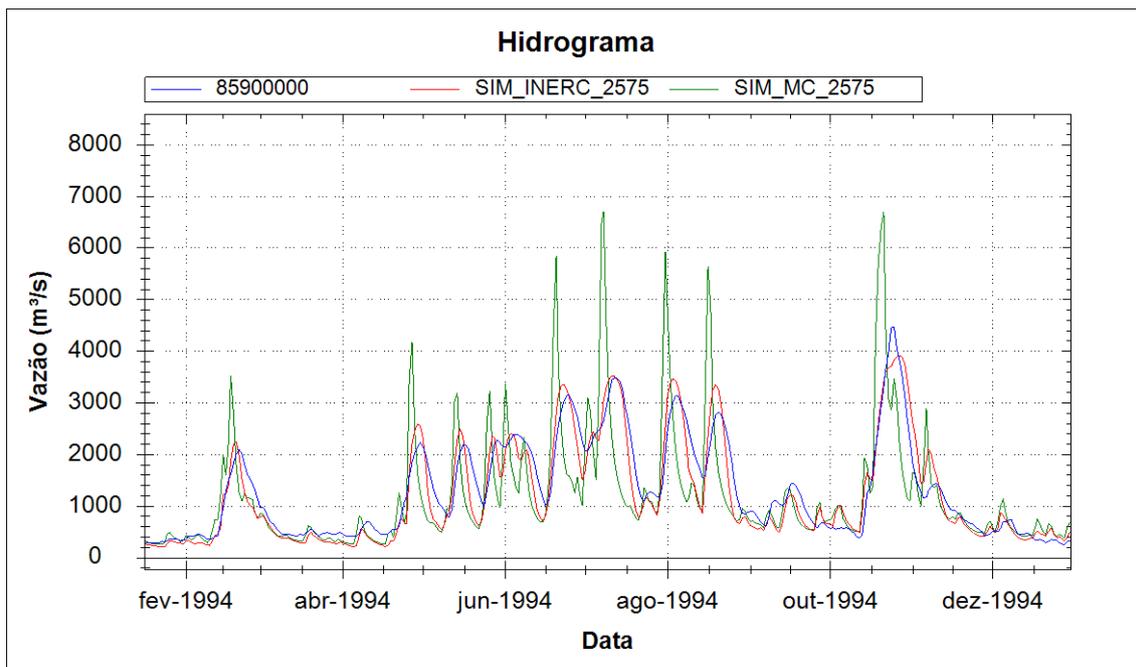


Figura 60 – Hidrogramas observado e simulado, Muskingum-Cunge e Inercial no Rio Jacuí

Esse comportamento semelhante entre a propagação Muskingum-Cunge e a Inercial para os rios Taquari e Camaquã pode ser justificado pelo fato de que estes rios não possuem grandes áreas de planície, tendo perfil mais acidentado. Já no Rio Jacuí verifica-se um grande benefício da aplicação do método inercial, já que o mesmo contempla a propagação e o maior tempo de residência da água quando o rio invade a planície de inundação. Verifica-se que o coeficiente NS apresenta resultado substancialmente melhor para o método Inercial (0,84) quando comparado ao Muskingum-Cunge (0,25). Isso pode ser visualizado diretamente na Figura 60, na qual é especialmente perceptível a falta de sensibilidade da propagação Muskingum-Cunge a áreas de planície, representando os picos de vazão adiantados no tempo e superestimados em relação ao observado. Confirma-se por meio da Figura 60, a capacidade do método inercial de simular planícies de inundação.

## 6 Conclusões e recomendações

A utilização do modelo MGB-IPH Inercial se apresentou como uma ferramenta útil na modelagem integrada da bacia da Laguna dos Patos e seus complexos lagunares. Foi possível efetuar a calibração do modelo para os afluentes, obtendo resultados

satisfatórios na maioria dos postos analisados. Obteve-se resultados muito bons à jusante do Rio Jacuí e no Rio Taquari, assim como bons resultados no Rio Camaquã, isso é particularmente positivo uma vez que estes são os principais afluentes da Laguna em descarga fluviométrica. O desempenho mais desfavorecido foi referente à região da bacia inserida no Uruguai, o que pode estar relacionado, por exemplo, a menor quantidade de dados de chuva na cabeceira destes rios, à resolução mais baixa do mapa de URH na região do Uruguai e às incertezas inerentes ao processo de calibração.

O processo de validação gerou resultados muito semelhantes aos de calibração (inclusive melhores em alguns postos), principalmente no norte da bacia, onde a calibração pôde ser feita com mais representatividade em função da maior disponibilidade de dados de chuva e vazão. Esses resultados positivos obtidos no período de validação sugerem que o modelo está fisicamente de acordo com a realidade da bacia.

A análise de área alagada pelo modelo utilizando imagens de satélite para diferentes períodos de cheia e estiagem permitiu a verificação qualitativa das áreas alagadas obtidas pelo modelo. Primeiramente verificou-se que, com as técnicas adotadas, foi possível inundar toda a extensão da Laguna dos Patos, Lago Guaíba e Lagoa Mirim mesmo em épocas de estiagem. Essas áreas inundadas relacionadas aos espelhos d'água desses corpos d'água ainda se mantiveram constantes mesmo em períodos de cheia, não ocorrendo inundação excessiva da região. Em períodos de cheia ainda ocorreu a boa representação de áreas alagadas no rio Jacuí e Taquari. Notadamente, melhorias ainda podem ser feitas no modelo de forma a promover a inundação em áreas ainda não inundadas como no médio Rio dos Sinos, no Rio Gravataí e no Canal de São Gonçalo.

Com relação aos níveis simulados pelo modelo nos 8 postos fluviométricos analisados qualitativamente no Guaíba e na Laguna dos Patos, verificou-se a boa representação dos níveis médios principalmente nos 6 postos mais à montante, o que está de acordo com a literatura. Estima-se uma possível melhoria nos dois postos mais à jusante, principalmente no posto em Laranjal, por meio de calibração mais detalhada da morfologia da drenagem hipotética nessa região. Se essa hipótese se confirmar,

possivelmente os níveis médios na região estuarina poderão ser explicados em grande parte pela descarga fluviométrica na laguna. Conclui-se, nesse primeiro momento, que com um modelo simplificado da circulação da Laguna pode-se estimar os níveis médios no Guaíba e na Laguna dos Patos, já que os mesmos dependem em grande parte da descarga fluviométrica.

Ao comparar a performance do modelo MGB-IPH com método de propagação de vazões Muskingum-Cunge e Inercial para os três principais afluentes da Laguna dos Patos, verificou-se que para rios sem áreas extensas de planície de inundação (Camaquã e Taquari), os dois métodos obtiveram desempenho muito semelhante. No entanto no Rio Jacuí, com suas extensas planícies de inundação, o método inercial apresentou desempenho muito superior, pois contempla o maior tempo de residência da água nas planícies de inundação. É importante ressaltar que o método de propagação Inercial é muito mais sensível às reações geomorfológicas e a valores de coeficiente de Manning fazendo seu processo de calibração mais complexo, demandando assim informações ou estimativas de maior qualidade. Análises de sensibilidade ainda devem ser feitas para quantificar a influência das variáveis do modelo nos resultados, como, por exemplo, a forma como são feitas as conexões laterais entre minibacias, as relações geomorfológicas utilizadas e o coeficiente de rugosidade de Manning.

O estudo apresentado tem potencial para fomentar diversos outros estudos na região, como de mudanças de uso do solo e de mudanças climáticas, assim como para aperfeiçoar estudos da dinâmica da Laguna dos Patos. Além disso o modelo apresentado tem aplicação prática em sistemas de previsão de cheias no Guaíba e na Laguna dos Patos e no planejamento integrado da Região. Este pode ser ainda aperfeiçoado com a aquisição de mais dados na região do Uruguai e com uma calibração mais detalhada da morfologia dos corpos d'água que é fundamental para a melhor representação desse grande sistema hidrológico de importância incontestável que é a bacia hidrográfica da Laguna dos Patos.

Recomendações de estudos futuros incluem a simulação de eventos extremos como a cheia de 41 com a inserção da influência do vento e das marés no modelo MGB-IPH Inercial, a análise detalhada das vazões afluentes à bacia e a influência dos

rios afluentes, a verificação quantitativa da representação dos níveis da laguna e do quanto a descarga fluviométrica explica os níveis observados e a análise de mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia.

## 7 Referências Bibliográficas

- Abreu, P. C., Hartmann, C., & Odebrecht, C. (1995). Nutrient-rich saltwater and its influence on the phytoplankton of the Patos lagoon estuary, Southern Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, Volume 40, Issue 2*, 219-229.
- Arino, O. R., Kalogirou, V., Bontemps, S., Defourny, P., & Van Bogaert, E. (2009). Global Land Cover Map for 2009 (GlobCover 2009). © European Space Agency (ESA) & Université catholique de Louvain (UCL), doi:10.1594/PANGAEA.787668.
- Asmus, M. L. (1985). Pradarias de gramíneas marinhas (*Ruppia maritima*) como áreas vitais na região estuarial da Lagoa dos Patos. In: *Encontro Brasileiro de Gerenciamento Costeiro, vol. 3. Fortaleza, CE*.
- Barenho, C. (2005). As Zonas Úmidas no contexto da Agenda 21: O estudo do Núcleo de Educação Ambiental da orla da Laguna dos Patos como instrumento de educação ambiental. *Biologia/UFPEL Pelotas-RS, Monografia (Graduação)*.
- Barros, G. P., Marques, W. C., & Kirinus, E. P. (2014). Influence of the Freshwater Discharge on the Hydrodynamics of Patos Lagoon, Brazil. *International Journal of Geosciences. 5*, 925-942.
- Bates, P. D., Horritt, M. S., & J, F. T. (2010). Simple Inertial Formulation Of The Shallow Water Equations For Efficient Two-Dimensional Flood Inundation Modelling. *Journal of Hydrology. Volume 387*, 33-45.
- Capitoli, R. R., Bemvenuti, C. E., & Gianuca, N. M. (1977). Occurrence and bio-ecologic observations on *Metasesarma rubripes* crab in the estuarine region of Lagoa dos Patos. *Atlântica (Rio Grande)*, 50-62.
- Capitoli, R. R., Bemvenuti, C. E., & Gianuca, N. M. (1978). Estudos de ecologia bentônica na região estuarial da Lagoa dos Patos. I—As comunidades bentônicas. *Atlântica (Rio Grande)*, 5-22.
- Castelão, R. M., & Möller, O. O. (2003). Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos. *Atlântica, Rio Grande, 25(2)*, 91-106.
- Collischonn, W. (2001). Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. *Tese de doutorado - (Tese em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – UFRGS, Porto Alegre, 270p*.

- Collischonn, W., & Dornelles, F. (2013). *Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais*. Porto Alegre: ABRH.
- Collischonn, W., & Tucci, C. E. (2001). Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Volume 6. No1, 95-118.
- Costa, C. S., Seeliger, U., Oliveira, C. P., & Mazo, A. M. (1997). Distribuição, funções e valores das marismas e pradarias submersas no estuário da Lagoa dos Patos (RS, Brasil). *Atlântica (Rio Grande)*, 65-83.
- Fan, F. M., & Collischonn, W. (2014). Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Volume 19, 243-254.
- Fan, F. M., Buarque, D. C., Pontes, P. R., & Collischonn, W. (2015a). UM MAPA DE UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA PARA A AMÉRICA DO SUL. *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, DF. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 8pg.
- Fan, F. M., Collischonn, W., Pontes, P. R., & Paiva, R. C. (2013). Avaliação da aplicabilidade de um modelo simplificado inercial para propagação de vazão em canais. *In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves - RS. Anais XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Fan, F. M., Fleischmann, A. S., Collischonn, W., Ames, D. P., & Rigo, D. (2015b). Large-scale analytical water quality model coupled with GIS for simulation of point sourced pollutant discharges. *Environmental Modelling & Software*. Volume 64, 58-71.
- Fan, F. M., Pontes, P. R., Paiva, R. C., & Collischonn, W. (2014). Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Volume 19, n. 4, 137-147.
- FAO. (2003). 'The Digitized Soil Map of the World and Derived Soil Properties' (version 3.5). *FAO Land and Water Digital Media Series 1*, (FAO: Rome).
- FEE. (2014). Fonte: Site da Fundação de Economia e Estatística: <http://www.fee.rs.gov.br/indicadores/pib-rs/municipal/destaques/>
- Fragoso Jr., C. R., Nes, E. V., Jense, J. H., & Marques, D. M. (2009). IPH-TRIM3D-PCLake: A three-dimensional complex dynamic model. *Environmental Modelling & Software*, 1347-1348.
- Garcia, A. M., Vieira, J. P., & Winemiller, K. O. (2001). Dynamics of the shallow-water fish assemblage of the Patos Lagoon estuary (Brazil) during cold and warm ENSO episodes. *Journal of Fish Biology*, 1218-1238.

- Garcia, A. M., Winemiller, K. O., & Grimm, A. M. (2004). Comparison of 1982–1983 and 1997–1998 El Niño effects on the shallow-water fish assemblage of the Patos Lagoon estuary (Brazil). *Estuaries, Volume 27, Issue 6*, 905-914.
- Hartmann, C., & Harkot, P. F. (1990). INFLUÊNCIA DO CANAL SÃO GONÇALO NO APORTE DE SEDIMENTOS PARA O ESTUÁRIO DA LAGUNA DOS PATOS - RS. *Revista Brasileira de Geociências*, 329-332.
- HGE. (2015). *Página do Grupo de Hidrologia de Grande Escala do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS*. Fonte: Site do HGE-IPH-UFRGS: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb-iph/o-que-e/>
- Kjerfve, B. (1986). Comparative oceanography of coastal lagoons. In: WOLFE, D. A. ed. *Estuarine variability*. New York, Academic, 63-81.
- Lanna, A. E., & Pedrollo, O. C. (2003). Previsão de Cheias em Tempo Atual com Sistema Especialista Difuso. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 8 n.1*, 45-60.
- Larentis, D. G., Collischonn, W., & Tucci, C. E. (2008). Simulação da Qualidade de Água em Grandes Bacias: Rio Taquari-Antas, RS. *RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 13 n.3*, 05-22.
- Lopes, V. A., Fan, F. M., Collischonn, W., Pontes, P. R., & Siqueira, V. A. (2015). Aplicação Preliminar do Modelo MGB-IPH para a Bacia Hidrográfica Completa da Laguna dos Patos. In: *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília - DF. Anais XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Marangon-Lima, J. W., Colischonn, W., & Marengo, J. A. (2014). *Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica. 1. ed.* São Paulo: Hunter Books Editora.
- Marques, W. C., & Möller, O. O. (2008). Variabilidade Temporal em Longo Período da Descarga Fluvial e Níveis de Água da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil. *RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 13 n.3*, 155-163.
- Möller, O. O., Castaing, P., Salomon, J., & Lazure, P. (2001). The Influence of Local and Non-Local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon. *Estuaries Vol. 24, No. 2*, 297-311.
- Möller, O. O., Lorenzenti, J. A., Stech, J. L., & Mata, M. M. (1996). The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Continental Shelf Research, Vol. 16, No. 3*, 335-351.
- Moussa, R., & Bocquillon, C. (1996). Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels. *Journal of Hydrology, v.186*, 1-30.
- Oliveira, H. A., Fernandes, E. H., Möller Jr, O. O., & Collares, G. L. (2015). Processos Hidrológicos e Hidrodinâmicos da Lagoa Mirim. *RBRH- Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 20 n.1*, 34-45.

- Paiva, R. C. (2009). Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: bacia do rio Solimões. *Dissertação (Dissertação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Ufrgs, Porto Alegre.*, 182p.
- Pedrollo, O. C., & Pedrollo, M. C. (2013). Sistema de alerta de cheias da bacia do rio Caí: previsão de níveis com redes neurais artificiais. *Eventos Extremos no Rio Grande do Sul: Inundações e Movimentos de Massa. 1ed. Porto Alegre: Evangraf. V. 1, 102-120.*
- Pereira, M., Kayser, R. B., & Collischonn, W. (2012). Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB-IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água. *In: Rega: revista de gestión del agua de America Latina. Porto Alegre, RS. Vol. 9, n. 2, 21-33.*
- Pontes, P. R., Collischonn, W., Fan, F. M., Paiva, R. C., & Buarque, D. C. (2015). Modelagem Hidrológica e Hidráulica de Grande Escala com Propagação Inercial de Vazões. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos.*
- Pontes, P. R., Fan, F. M., Collischonn, W., Buarque, D. C., & Sorribas, M. V. (2012). Calibração e Verificação do Modelo Hidrológico MGB-IPH para a Bacia do Paraná. *In. XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2012, João Pessoa. Anais do XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.*
- RBS. (2015a). *G1 - RBS TV - RS.* Fonte: <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2015/10/sobe-para-43-cidades-e-202-mil-pessoas-atingidas-pela-chuva-no-rs.html>
- RBS. (2015b). *G1 - RBS TV - RS.* Fonte: <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2015/10/sobe-para-53-cidades-e-25-mil-pessoas-atingidas-pela-chuva-no-rs.html>
- Schafer, A. G., & Reis, E. G. (2008). Artisanal fishing areas and traditional ecological knowledge: The case study of the artisanal fisheries of the Patos Lagoon estuary (Brazil). *Marine Policy. Vol 32, 283–292.*
- Siqueira, V. A., Fleischmann, A. S., Jardim, P. F., Fan, F. M., & Collischonn, W. (2016 in press). IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.*
- Tagliani, P. R., Landazuri, H., Reis, E. G., Tagliani, C. R., Asmus, M. L., & Sánchez-Arcilla, A. (2003). Integrated coastal zone management in the Patos Lagoon estuary: perspectives in context of developing country. *Ocean & Coastal Management*, 807-822.
- USGS. (2015). *Earth Explorer.* Fonte: USGS - U. S. Geological Survey: <http://earthexplorer.usgs.gov/>

Van Der Knijff, J. M., Younis, J., & De Roo, A. P. (2010). LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*. Vol. 24, No.2, 189-212.

ZH. (2015). *ZH notícias*. Fonte: Zero Hora: <http://zh.clicrbs.com.br/rs/noticias/noticia/2015/10/cheia-na-lagoa-dos-patos-desaloja-mais-de-mil-pessoas-em-rio-grande-e-pelotas-4882801.html>