

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Cristiane Fragata dos Santos**

**SIMULAÇÃO CONTÍNUA VS. SIMULAÇÃO DE EVENTOS  
PARA ESTIMATIVA DE HIDROGRAMAS DE CHEIA**

Porto Alegre  
Dezembro 2018

**CRISTIANE FRAGATA DOS SANTOS**

**SIMULAÇÃO CONTÍNUA VS. SIMULAÇÃO DE EVENTOS  
PARA ESTIMATIVA DE HIDROGRAMAS DE CHEIA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Rodrigo Cauduro Dias de Paiva**

**Coorientador: Ayan Santos Fleischmann**

Porto Alegre  
Dezembro 2018

**CRISTIANE FRAGATA DOS SANTOS**

**SIMULAÇÃO CONTÍNUA VS. SIMULAÇÃO DE EVENTOS  
PARA ESTIMATIVA DE HIDROGRAMAS DE CHEIA**

Porto Alegre, dezembro de 2018

Prof. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientador

Ayan Santos Fleischmann  
MSc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Coorientador

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Walter Collischonn (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Fernando Dornelles (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Vendo a aridez das plantas e dos bichos, Deus decidiu criar o primeiro rio. Sucedeu, contudo, que o leito teimava em espriar-se para além das margens. Pela primeira vez receou Deus que a criação desafiasse o Criador. E suspeitou que o rio tivesse aprendido a sonhar.

*Mia Couto*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Cleusa, minha mãe, pelo apoio e dedicação ao longo dessa jornada de graduação. Sem o teu carinho traduzido em palavras de incentivo e, incontáveis vezes, em caronas e térmicas de café, essa jornada não teria sido a mesma.

Ao João, meu pai, por nunca ter medido esforços para investir na minha educação, por reafirmar sempre que as coisas importantes demandam tempo e trabalho, por me incentivar a fazer o melhor.

Sou grata à minha irmã, Cristina, pelas palavras de apoio nos momentos em que as coisas ficavam difíceis, pelas conversas, pelo amparo. Obrigada por me incentivar a tomar os caminhos mais desafiadores, não os mais lógicos ou os mais simples.

Sou grata ao orientador e ao coorientador deste trabalho, Prof. Rodrigo Paiva e Ayan Fleischmann, pelos ensinamentos, pela dedicação, pela confiança depositada no meu trabalho e por estarem sempre abertos a questionamentos e conversas.

## RESUMO

Hidrogramas de cheia são informações fundamentais para estudos de controle de inundação e estudos hidrológicos em geral, especialmente para o dimensionamento e operação de estruturas hidráulicas. Nesse sentido, a modelagem hidrológica constitui uma ferramenta para avaliação de inundações e medidas de controle. Hidrogramas de cheia podem ser estimados a partir de modelos de transformação chuva-vazão utilizando diferentes metodologias de simulação hidrológica. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do emprego da metodologia de simulação contínua e de eventos em um modelo chuva-vazão para estudos de controle de cheia. As duas metodologias tradicionalmente utilizadas em estudos relacionados a inundações – contínua e de eventos – foram empregadas na aplicação de um modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, utilizando o software HEC-HMS v 4.1. Assim, verificou-se a capacidade das metodologias de simulação hidrológica empregadas na estimativa de hidrogramas de cheia e a capacidade do modelo em representar cheias de diferentes magnitudes em pontos de interesse da bacia. Com base nas métricas selecionadas para análise de desempenho dos modelos (coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, erro de vazões máximas anuais e erro do volume do hidrograma) no posto selecionado para calibração e verificação, o modelo de eventos apresentou maior acurácia para as três métricas utilizadas. A representação de vazões em postos de verificação exclusiva não mostrou um desempenho adequado das metodologias de simulação utilizadas, por isso entende-se que a etapa de calibração foi fundamental para o desempenho do modelo chuva-vazão.

***Palavras-chave:*** Hidrograma de cheia; Simulação contínua; Simulação de eventos; Modelo chuva-vazão; Modelagem hidrológica.

## ABSTRACT

Flood hydrographs are a fundamental piece of information to flood control studies and to hydrological studies in general, especially to water structures design and operation. Thus, hydrological models are seen as an assessment tool for flood related studies and for flood control measures. Flood hydrographs can be obtained by applying a rainfall-runoff model using different simulation methods. The aim of this study is to evaluate the influence of continuous simulation and event-based methods in rainfall-runoff models for flood control studies. Continuous simulation and event-based simulation are typical approaches. A continuous rainfall-runoff simulation and an event-based rainfall-runoff simulation were applied in the Itajaí-Açu river basin, using HEC-HMS v 4.1. The influence of both simulation approaches used in the estimation of flood hydrographs and the model's capacity to represent distinct flood magnitudes at different points within the basin were evaluated. Based on the metrics selected for model's performance analysis (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, annual maximum flow error and hydrograph volume error) at the calibration and verification point, the event-based model presented the highest accuracy for the three metrics used. The flow representation at exclusive verification points did not show an adequate performance for both continuous and event-base simulation approaches. Thus, the calibration process was fundamental for an adequate rainfall-runoff modelling performance.

**Key words:** Flood hydrograph; Continuous simulation; Event-based simulation; Rainfall-runoff model; Hydrological modelling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Caracterização dos fenômenos de enchente e inundação.....	22
Figura 2. Efeito de um reservatório sobre hidrograma (fonte: elaborada pela autora).....	27
Figura 3. Níveis de referência de uma barragem de usos múltiplos (fonte: elaborado pela autora) .....	27
Figura 4. Localização da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu. ....	41
Figura 5. Regiões homogêneas quanto ao comportamento da precipitação (fonte: Plano da Bacia hidrográfica do rio Itajaí <sup>2</sup> ). ....	42
Figura 6. Distribuição espacial da precipitação média anual em milímetros na bacia hidrográfica do rio Itajaí (1979-2003) (fonte: Plano da Bacia hidrográfica do rio Itajaí <sup>2</sup> ). ....	43
Figura 7. Série de níveis de inundação em Blumenau, Santa Catarina. ....	45
Figura 8. Desenho experimental da modelagem hidrológica conduzida no HEC-HMS (fonte: própria da autora).....	47
Figura 9. Representação esquemática do módulo <i>Soil Moisture Accounting</i> do HEC-HMS....	49
Figura 10. Discretização da bacia hidrográfica para o estudo de caso. ....	54
Figura 11. Mapa de classificação do uso do solo para a bacia hidrográfica de interesse. ....	57
Figura 12. Mapa de classificação do tipo de solo para a bacia hidrográfica de interesse. ....	58
Figura 13. Mapa de localização das estações fluviométricas pertinentes ao estudo. ....	60
Figura 14. Hidrogramas observados dos eventos selecionados em Indaial* nos demais postos. .....	65
Figura 15. Hidrogramas observados dos eventos selecionados em Indaial* nos demais postos. .....	66
Figura 16. Distribuição de frequência de vazões para Indaial para os períodos de calibração e verificação. ....	73
Figura 17. Hidrogramas observado e simulados dos eventos calibrados em modo de SC e EV. .....	74
Figura 18. Hidrogramas observado e simulados dos eventos de verificação em modo de SC e EV.....	74
Figura 19. Vazões máximas anuais obtidas nos eventos selecionados para Indaial em modo de SC e de EV. ....	75
Figura 20. Métricas utilizadas para comparação do modelo em modo de SC e de EV no ponto de calibração e verificação. ....	77



Figura 21. Distribuição empírica de frequência de vazões máximas anuais para os demais postos no período de calibração e verificação do modelo. ....	79
Figura 22. Análise comparativa das vazões obtidas nos eventos em modo de SC e de EV para os demais postos. ....	80
Figura 23. Métricas obtidas para comparação das metodologias em postos de verificação exclusiva. ....	81
Figura 24. Métricas utilizadas para comparação do modelo em modo de SC e de EV em postos de verificação exclusiva. ....	82
Figura 25. Análise comparativa dos hidrogramas obtidos em modo de SC e EV para os eventos selecionados para calibração. ....	83
Figura 26. Análise comparativa dos hidrogramas obtidos pelo modelo em modo de SC e EV para os eventos selecionados para verificação. ....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos desastres naturais hidrológicos segundo a COBRADE <sup>1</sup> .....	23
Tabela 2. Métodos disponíveis no HEC-HMS. ....	38
Tabela 3. Especificações técnicas do sistema de controle cheias na bacia do rio Itajaí-Açu...45	
Tabela 4. Elementos hidrológicos da bacia hidrográfica do estudo. ....	55
Tabela 5. Parâmetros estimados para implementação do modelo hidrológico da bacia hidrográfica.....	56
Tabela 6. Postos fluviométricos selecionados para calibração/verificação do modelo.....	60
Tabela 7. Equações utilizadas para caracterização dos reservatórios incorporados ao modelo hidrológico (fonte: adaptado de JICA, 2011). ....	61
Tabela 8. Caracterização dos eventos selecionados para calibração e verificação do modelo em modo de SC e de EV. ....	63
Tabela 9. Vazão de base específica por sub-bacia.....	68
Tabela 10. Valores calibrados do parâmetro CN utilizados no modelo de eventos. ....	69
Tabela 11. Parâmetros do SMA obtidos a partir da calibração manual modelo. ....	71
Tabela 12. Erro relativo das vazões máximas ( $Q_p$ ) anuais no posto de calibração e verificação. ....	75
Tabela 13. Análise comparativa do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe em Indaial. ..	76
Tabela 14. Análise comparativa do erro relativo dos volumes em Indaial. ....	76

## **LISTA DE SIGLAS**

ANA – Agência Nacional de Águas

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CEPED – Centros Universitários de Estudos e Pesquisas sobre Desastres

COBRADE – Classificação e Codificação Brasileira de Desastres

EDF – *Electricité de France*

FATMA – Fundação do Meio Ambiente

FURB – Universidade Regional de Blumenau

HEC-HMS – *Hydrologic Modeling System*

JICA – Agência de Cooperação Internacional do Japão

MDE – Modelo Digital de Elevação

MGB-IPH – Modelo de Grandes Bacias – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

NSE – Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe

PPMA/SC – Projeto de Proteção da Mata Atlântica em Santa Catarina

SCS – *Soil Conservation Service*

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SMA – *Soil Moisture Accounting*

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

URH – Unidade de Resposta Hidrológica

USACE – *U.S. Army Corps of Engineers*

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA .....	18
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	18
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	18
2.2.1 Objetivo geral .....	18
2.2.2 Objetivos específicos.....	18
2.3 JUSTIFICATIVA .....	19
2.4 DELINEAMENTO.....	20
3 REVISÃO BILIOGRÁFICA.....	21
3.1 INUNDAÇÕES .....	21
3.1.1 Conceitos .....	21
3.1.2 Urbanização e impacto dos eventos de inundação .....	24
3.1.3 Medidas de controle.....	25
3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA .....	29
3.2.1 Classificação.....	30
3.2.2 Modelos de transformação precipitação-vazão .....	31
3.2.2.1 Estrutura de modelos precipitação-vazão .....	31
3.2.3 Simulação de eventos de projeto .....	33
3.2.4 Simulação de séries contínuas .....	35
3.2.5 Etapa de calibração.....	36
3.2.6 Software de modelagem utilizado .....	37
4 METODOLOGIA.....	40
4.1 ESTUDO DE CASO .....	40
4.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA .....	46
4.2.1 Desenho experimental .....	46

4.2.2 Simulação contínua .....	47
4.2.3 Simulação de eventos .....	52
4.2.4 Aplicação na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu .....	54
4.2.5 Testes realizados e métricas de avaliação.....	62
5 RESULTADOS .....	67
5.1 DESEMPENHO NO POSTO DE CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO .....	67
5.1.1 Etapa de calibração e parâmetros utilizados.....	67
5.1.2 Eventos de calibração e verificação.....	72
5.2 DESEMPENHO EM POSTOS DE VERIFICAÇÃO EXCLUSIVA .....	78
6 DISCUSSÃO .....	85
7 CONCLUSÕES .....	90
7.1 RECOMENDAÇÕES.....	90
8 REFERÊNCIAS .....	92
ANEXO A .....	99

## 1 INTRODUÇÃO

Do Amarelo na China ao Amazonas no Brasil, os rios sempre tiveram grande importância no desenvolvimento de diversas civilizações e deram origem, às suas margens, às primeiras cidades e aos primeiros aglomerados urbanos (BRUMES, 2001). A abundância de água potável, o uso do transporte fluvial e a presença de solos férteis são alguns dos fatores que explicam o desenvolvimento do homem junto aos cursos d'água.

Dado que a maioria das metrópoles se desenvolveu junto às margens dos rios, a ocorrência de inundações oferece maior risco às pessoas do que qualquer outro tipo de desastre natural (SUNDERMANN et al., 2014). Segundo Tucci (1999), a ocorrência de inundações em áreas urbanas pode ser atribuída a dois processos distintos: as inundações ribeirinhas que ocorrem devido à dinâmica natural dos rios que extravasam e ocupam o seu leito maior durante um período de eventos chuvosos extremos ou ao processo de urbanização, devido às alterações no regime hidrológico das bacias hidrográficas ocasionadas pelo processo de ocupação e impermeabilização do solo e pelo gerenciamento da drenagem urbana.

Por exemplo, a bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu (Santa Catarina) destaca-se nacionalmente por seu longo registro de desastres associados a inundações. A bacia possui cerca de 15.000 km<sup>2</sup> e compreende importantes centros urbanos cujo processo ocupação e desenvolvimento ocorreu em áreas suscetíveis a inundações decorrentes do processo natural do ciclo hidrológico dos cursos d'água – junto às planícies de inundação.

Frente aos constantes prejuízos de ordem social e econômica, diversas medidas de proteção e controle podem ser empregadas a fim de minimizar os impactos causados pelos eventos de inundação nas bacias e permitir uma convivência harmoniosa da população com o rio. As medidas de controle podem ser classificadas em medidas estruturais e não-estruturais.

As medidas estruturais são aquelas que envolvem obras de engenharia, como a construção de diques e barragens, melhoramento fluviais locais, entre outras. As medidas não-estruturais são fundamentadas em instrumentos de gestão, como leis de uso e ocupação do solo, planos diretores municipais, seguros e sistemas de alerta de cheia.

Em grandes bacias, porém, a análise e o estudo integrado acerca das medidas de controle constituem um desafio para a gestão de inundações. Isto é, o emprego de uma dada medida de controle deve

ser avaliado de maneira integrada (TUCCI, 2007), uma vez que pode gerar impactos para cidades a montante e a jusante do ponto de implantação.

Tradicionalmente, as políticas públicas priorizam medidas de caráter estrutural que não raras vezes transferem o problema de um ponto da bacia para outro e ainda levantam incertezas quanto ao seu real benefício para a gestão integrada da bacia a longo prazo. Recentemente, porém, há que se enfatizar o esforço governamental para prevenir desastres naturais em nível nacional, buscando minimizar e evitar os prejuízos de ordem econômica e social inerentes a ocorrência desses desastres (MI, 2007). O avanço de políticas públicas e os acordos de cooperação entre órgãos públicos e comunidades acadêmicas, como a criação de Centros Universitários de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (CEPED) em nível estadual e a criação do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) em 2011, são alguns exemplos dessa política voltada para prevenção de desastres (MI, 2017).

Os processos ou componentes do ciclo hidrológico tais como a precipitação, a evaporação, a infiltração e o escoamento em rios são objetos de estudo tipicamente explorados pela hidrologia. A análise quantitativa e qualitativa desses processos é bastante complexa, considerando a variabilidade espacial e temporal de grande parte dos fenômenos hidrológicos. Comumente, esses fenômenos podem ser dependentes do tempo e/ou do espaço, apresentar mudanças de estado contínuas ou em intervalos discretos, apresentar comportamento não linear, entre outros comportamentos variados.

Os modelos hidrológicos constituem uma ferramenta que busca representar o comportamento de bacias hidrográficas (i.e. dos processos que nela ocorrem) e ainda prever sua resposta frente a condições diferentes daquelas observadas (TUCCI, 2005). Nesse sentido, os modelos hidrológicos podem ser utilizados para antecipar o comportamento de bacias diante de eventos e ações de interesse, como precipitações extremas, modificações de uso do solo e execução de obras hidráulicas. Assim, o impacto inerente à ocorrência desses eventos e/ou ações pode ser minimizado e medidas de controle adequadas podem ser empregadas.

Modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão têm por objetivo representar a complexidade dos processos do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica e sua resposta a eventos de interesse, tipicamente eventos chuvosos com alto tempo de retorno. Hidrogramas de cheia são informações fundamentais para o projeto e operação de estruturas e sistemas hidráulicos, assim como para o mapeamento de risco de inundação (GRIMALDI et al., 2012; CARVAJAL et al., 2009), estudos de controle de inundação e estudos hidrológicos em geral. Para aplicação de modelos chuva-vazão,

duas metodologias de simulação hidrológica são comumente empregadas: simulação de séries contínuas e simulação de eventos.

A simulação de eventos diz respeito à inserção de hietogramas de projeto como dado de entrada de um modelo chuva-vazão para obtenção de hidrogramas de cheia. Incertezas relacionadas a essa metodologia incidem principalmente na definição do hietograma de projeto (ALFIERI et al., 2008), na condição de umidade do solo antecedente ao evento e na equivalência do tempo de retorno da chuva de projeto e do hidrograma de projeto (CAMICI et al., 2011). Como alternativa ao modelo de eventos, a simulação contínua de longo prazo consiste na inserção de uma série longa de chuva, sintética ou observada, como dado de entrada para obtenção de uma série longa de vazão da qual as estatísticas podem ser extraídas diretamente.

De maneira geral, a metodologia de simulação contínua apresenta características desejáveis frente as lacunas do modelo de eventos. Em outras palavras, não é preciso atribuir um tempo de retorno, uma intensidade e uma duração para a chuva, assim como não é necessário definir uma condição de umidade do solo anterior ao evento (BOUGHTON & DROOP, 2003). Contudo, cabe ressaltar que estudos hidrológicos fundamentados em modelagem hidrológica incorporam incertezas em sua análise, seja pela quantidade e qualidade dos dados existentes, pela metodologia de simulação adotada, e mesmo pelas expressões matemáticas ou simplificações empregadas para representação dos processos do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica.

Nesse sentido, diversos modelos hidrológicos estão disponíveis (e.g. HEC-HMS, SWMM, HSPF, STORM, MIKE, MGB). O HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*), no entanto, destaca-se pela popularidade em estudos de engenharia. O modelo desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE – *U.S. Army Corps of Engineers*) é útil para uma gama de problemas de hidrologia, tais como estudos de qualidade d'água, controle de cheias e drenagem urbana, por exemplo. As ferramentas computacionais disponíveis, como a integração de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), assim como a documentação extensa (manual do usuário, referência técnica e guia de aplicações) justificam seu reconhecimento em diversas aplicações de engenharia.

O presente estudo tem por objetivo comparar a estrutura de um modelo chuva-vazão em modo de eventos e de simulação contínua, sobretudo para compreender as incertezas e a dificuldade de implementação inerentes às metodologias empregadas e avaliar o desempenho dessas abordagens para estimativa de hidrogramas de cheia, utilizando diferentes métricas. A bacia hidrográfica do rio



Itajaí-Açu será utilizada como estudo de caso para aplicação do modelo chuva-vazão no software HEC-HMS e para avaliação de ambas as metodologias de simulação dado seu contexto histórico de inundações, importância econômica e social e sua relevância para os estudos de controle de cheias no Brasil.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho estão subdivididas em questão e objetivo da pesquisa, justificativa e delineamento, os quais serão descritos nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

Qual a influência do emprego de simulação contínua de longo prazo e simulações de eventos em modelos “precipitação-vazão” para a estimativa de hidrogramas de cheia?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em geral e específicos e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral do trabalho consiste em avaliar a influência do emprego de diferentes metodologias de simulação hidrológica – simulação de eventos e simulação contínua - em um modelo chuva-vazão, aplicando o HEC-HMS à bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu.

#### **2.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Avaliação da capacidade do modelo precipitação-vazão implementado em modo de simulação contínua e de eventos em representar cheias de diferentes magnitudes no ponto de calibração e verificação.
- b) Avaliação da capacidade do modelo precipitação-vazão implementado em modo de simulação contínua e de eventos em representar cheias de diferentes magnitudes em pontos de verificação exclusiva.

## 2.3 JUSTIFICATIVA

Estudos de controle de inundações podem utilizar modelos hidrológicos de transformação precipitação-vazão como ferramenta para a estimativa indireta de vazões máximas. No entanto, essas vazões de máximas podem ser obtidas com base em diferentes metodologias de simulação. A simulação de eventos diz respeito à definição de eventos específicos de chuva associados a uma probabilidade de ocorrência bem definida. Para estudos hidrológicos de controle de inundações, os eventos chuvosos de interesse são aqueles considerados extremos, com alto tempo de retorno. Outra metodologia relevante é a simulação contínua de longo prazo que utiliza uma série histórica ou sintética de precipitação, a fim de gerar uma série de vazões da qual as estatísticas podem ser extraídas diretamente.

Alternativamente, modelos intitulados semi-contínuos são capazes de incorporar arbitrariamente chuvas de projeto de interesse a uma série histórica de precipitação (PAQUET et.al, 2013). Isto é, constituem um método intermediário entre as abordagens de eventos de projeto e das séries temporais de precipitação.

Nesse sentido, estudos hidrológicos para controle de inundações apresentam incertezas quanto aos prognósticos feitos e suscitam frequentes questionamentos sobre como realizá-los. Qual metodologia de simulação é mais relevante para estudos desta natureza? As metodologias comumente empregadas geram diferenças expressivas para a estimativa de hidrogramas de cheia? Quais elementos do hidrograma (vazão máxima, volume e duração) são mais afetados pela metodologia empregada? A calibração de parâmetros do modelo com base em um único posto fluviométrico de interesse (posto de calibração e verificação) é capaz de representar de maneira adequada os eventos de cheia em outros pontos da bacia hidrográfica?

Segundo um estudo feito pelo CEPED UFSC (2016), no período de 1995 a 2014, os desastres naturais de origem hidrológica (inundações, enxurradas, alagamentos, chuvas intensas e eventos relacionados a movimentos de terra) são os mais expressivos no estado de SC e representam 9,8 bilhões de reais em danos e prejuízos. Os municípios catarinenses mais atingidos por inundações são aqueles que pertencem às bacias hidrográficas dos grandes rios do estado e/ou situam-se às suas margens, nas planícies costeiras. Dentre as principais bacias hidrográficas afetadas, destaca-se a bacia do rio Itajaí-Açu, que possui um longo registro de inundações, sendo as mais devastadoras registradas em 1983, 1984 e 2008 (HERRMANN, 2014). Essas inundações tiveram como consequência dezenas de mortes, milhares de desabrigados e significativos prejuízos econômicos

para as cidades afetadas. Embora a bacia conte com um Plano de Prevenção de Desastres Naturais desenvolvido pela Agência de Cooperação Internacional do Japão (JICA) em 2011 que prevê uma série de medidas de controle para prevenir e mitigar desastres de inundações e escorregamentos na bacia, as medidas implantadas até o presente momento ainda se mostram insuficientes para a gestão de inundações na bacia. Assim, o estudo acerca da gestão de inundações na bacia do rio Itajaí-Açu constitui um cenário favorável para compreensão e análise de metodologias de simulação hidrológica frente a eventos de cheia.

## 2.4 DELINEAMENTO

Este trabalho será realizado de acordo com as etapas apresentadas a seguir:

- a) Seção de revisão bibliográfica, versando sobre inundações e modelagem hidrológica;
- b) Seção de metodologia, caracterizando o estudo de caso e a modelagem hidrológica realizada;
- c) Seção de resultados, apresentando os resultados obtidos da aplicação do modelo chuva-vazão em modo de simulação contínua e de eventos em diferentes locais da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, ponto de calibração e verificação e pontos de verificação exclusiva;
- d) Seção de discussão e conclusões.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 INUNDAÇÕES

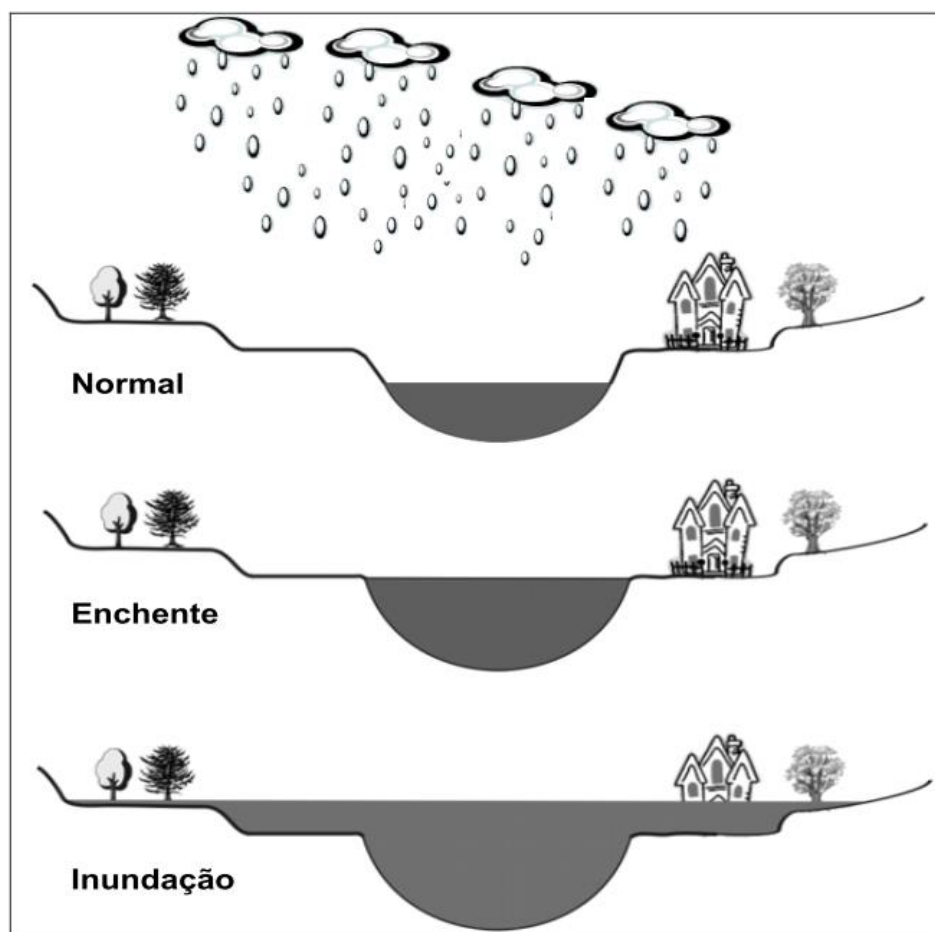
#### 3.1.1 Conceitos

No Brasil, existe uma terminologia bastante diversa acerca do fenômeno de inundações. Considerando a ampla possibilidade de caracterização dos eventos e a larga escala de ocorrência de inundações no país, diversos termos são utilizados de maneira indistinta na literatura nacional para classificar esse fenômeno. Enchente, cheia, enxurrada, alagamento, inundação gradual, inundação brusca, inundações urbanas, inundação ribeirinha - esses são alguns dos termos que compõem o acervo da terminologia utilizada para classificar os eventos de inundação no Brasil (GOERL & KOBAYAMA, 2005).

Os cursos d'água são definidos, entre outras características, pela presença de um leito menor e um leito maior, também denominado planície de inundação. O leito menor corresponde à calha principal do rio, onde a água escoar na maior parte do tempo. O leito maior, por sua vez, corresponde à calha secundária do rio associada aos níveis atingidos durante um período de vazões elevadas. Costuma-se adotar um tempo de retorno entre 1,5 e 2 anos para recorrência de inundação da calha maior (TUCCI, 1999).

Entende-se que a elevação do nível das águas dos rios até a altura das suas margens e o posterior extravasamento para as áreas adjacentes são processos predominantemente naturais e distintos - inerentes à dinâmica fluvial. Assim, quando o nível do rio se eleva até a altura das suas margens sem transbordar para as áreas adjacentes, caracteriza-se esse evento como uma enchente ou cheia (GOERL & KOBAYAMA, 2005). Contudo, ao transbordar para as áreas adjacentes, comumente denominadas de planície ou várzea de inundação, constitui-se, então, o evento de inundação. A Figura 1 ilustra a diferença entre os dois fenômenos. A partir dessa distinção, um evento de inundação pode ser classificado em diversos tipos.

Figura 1. Caracterização dos fenômenos de enchente e inundação.



(fonte: Goerl & Kobiyama, 2005)

A busca por uma padronização de nomenclaturas para definir e classificar os desastres naturais no país é objeto de interesse da Defesa Civil - único órgão capaz de gerar um levantamento oficial de registros de desastres naturais em âmbito nacional. Por isso, a Defesa Civil tem buscado atualizar e compatibilizar as terminologias e suas respectivas definições ao longo dos anos. Um acordo de cooperação entre o Ministério da Integração Nacional e a Secretaria Nacional de Defesa Civil deu origem, em 2012, à Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE<sup>1</sup>).

A COBRADE divide os desastres em naturais e tecnológicos. Dentre os desastres naturais, destacam-se os desastres de origem hidrológica. O grupo de desastres hidrológicos é subdividido em inundações, enxurradas e alagamentos. As definições dos três fenômenos supracitados são apresentadas na Tabela 1.

---

<sup>1</sup> Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/documents/3958478/>

Tabela 1. Classificação dos desastres naturais hidrológicos segundo a COBRADE<sup>1</sup>.

Grupo	Subgrupo	Definição
Hidrológico	Inundação	Submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície.
	Enxurrada	Escoamento superficial de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado. Caracteriza-se pela elevação súbita das vazões de determinada drenagem e transbordamento brusco da calha fluvial.
	Alagamento	Extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas.

(fonte: adaptado de COBRADE<sup>1</sup>)

Inundação ribeirinha e inundação gradual são termos geralmente utilizados como sinônimos para o fenômeno de inundação definido pela COBRADE, já o termo inundação brusca é geralmente utilizado como sinônimo para o fenômeno de enxurrada definido pela COBRADE.

Segundo Tucci (1999), inundações ribeirinhas são ocasionadas pela dinâmica natural dos rios de grandes bacias (> 10.000 km<sup>2</sup>) que extravasam durante eventos de chuva extremos e ocupam o seu leito maior, em média a cada 2 anos. O autor ainda afirma que as inundações graduais podem ocorrer de maneira isolada nas bacias hidrográficas ou podem ter seu impacto somado as inundações devido à urbanização, ocasionadas pelo processo de ocupação e impermeabilização do solo e pelo gerenciamento da drenagem urbana.

Embora existam diversas definições e terminologias para o fenômeno de inundação gradual, algumas características são frequentemente apontadas, tais como a elevação gradual do nível d'água e a posterior inundação das áreas do leito maior dos rios. Assim, ressalta-se que a origem das inundações graduais está associada à ocorrência de eventos de chuva extremos e demorados. Castro (2003) ainda enfatiza que o fenômeno possui uma sazonalidade e um tempo de retorno previsível nos cursos d'água, sendo característico de grandes bacias hidrográficas e de rios de planície. Dada

a evolução paulatina do nível d'água de montante para jusante, as inundações graduais geram períodos mais longos para alerta, resultando em um menor número de mortes e uma quantidade expressiva de danos devido à área de abrangência do fenômeno.

Já as inundações bruscas, segundo Tucci & Collischonn (2006), são consequência da combinação de um evento meteorológico, usualmente chuvas convectivas, associada a uma configuração hidrológica particular, como bacias pequenas com altas declividades e baixa capacidade de infiltração. Assim, as inundações bruscas constituem um desafio para os sistemas de alerta, uma vez que os eventos se desenvolvem em um curto período de tempo e geram grandes prejuízos sociais e econômicos.

Ainda que exista uma clara distinção entre inundações graduais e bruscas, a sua caracterização ainda não traz limites bem definidos. Ou seja, não existe um tempo de resposta da bacia hidrográfica que possibilite classificar o evento de inundação em brusco ou gradual com exatidão para o cenário brasileiro.

Segundo o Perfil dos Municípios Brasileiros (2013), 27,7% dos municípios foram atingidos por enchentes ou inundações graduais (1543 municípios) nos últimos 5 anos. As inundações bruscas, por sua vez, afetaram cerca de 28,3% das cidades brasileiras no mesmo período. O presente trabalho tratará daqui para frente de inundações graduais e bruscas ou, nos termos oficializados pela COBRADE, inundações e enxurradas.

### **3.1.2 Urbanização e impacto dos eventos de inundação**

O impacto socioeconômico de uma inundação está associado principalmente à frequência dos eventos de inundação e do grau de ocupação da planície de inundação (TUCCI, 2003). Tipicamente, as primeiras áreas a serem ocupadas são aquelas situadas em locais mais altos, com baixo risco de inundação. Posteriormente, são ocupadas as áreas de maior risco, situadas em locais mais baixos e planos, predominantemente pelas classes menos favorecidas. Ademais, quando há uma longa sequência de anos sem inundações em áreas ribeirinhas, a população é tomada por uma sensação de falsa segurança e acaba por ocupar áreas de risco (TUCCI, 2007). Assim, quando as inundações com maior tempo de retorno acontecem, os prejuízos e danos causados à população ribeirinha são expressivos.

Além disso, pode-se enfatizar o efeito da urbanização na ocorrência de inundações em bacias pequenas. Dado que as bacias urbanizadas apresentam maior grau de impermeabilização do solo,



há um aumento da geração de escoamento na bacia, considerando que o gerenciamento de canalizações e de estruturas de drenagem é insuficiente na maioria das grandes cidades brasileiras. Como resultado do processo de urbanização das bacias, tem-se um aumento da vazão de pico e do escoamento superficial, redução do tempo de pico e do tempo de base. Assim, a urbanização é capaz de aumentar a frequência dos fenômenos de inundação em bacias urbanas, ainda que para grandes ondas de cheia a capacidade de infiltração e armazenamento do solo seja atingida rapidamente sem apresentar grandes variações decorrentes do processo de urbanização (TUCCI, 2007).

### **3.1.3 Medidas de controle**

Frente aos constantes prejuízos de ordem social e econômica, diversas medidas de proteção e controle podem ser empregadas, a fim de minimizar os impactos causados pelos eventos de inundação nas bacias hidrográficas e permitir uma convivência harmoniosa da população com o rio. As medidas para controle de inundações podem ser classificadas quanto a sua natureza em medidas estruturais e não-estruturais (CANHOLI, 2005).

De maneira geral, as medidas estruturais estão associadas a obras de engenharia, tais como a construção de diques e barragens, enquanto as medidas não-estruturais resumem-se a medidas preventivas, tais como sistemas de alerta, zoneamento de áreas de risco e seguros contra inundações. Tucci (2007) ressalta que tanto medidas de caráter estrutural e não-estrutural têm como objetivo minimizar as consequências de eventos de inundação e que não há uma maneira de controlar totalmente as inundações. Contudo, o autor afirma que a eficiência na gestão de inundações reside na combinação de medidas estruturais e não-estruturais.

Eventos de cheia futuros são descritos em termos da probabilidade de uma dada vazão ser igualada ou excedida em um ano qualquer. Quanto maior a vazão, menor é a probabilidade de excedência (i.e. maior o tempo de retorno correspondente do evento). Tradicionalmente, estruturas hidráulicas são dimensionadas para uma vazão ou para um hidrograma de projeto com tempo de retorno bem definido. Com base no tempo de retorno requerido para dimensionamento da estrutura, determina-se a magnitude da vazão de projeto correspondente. Na modelagem de eventos, hidrogramas de projeto são utilizados para obtenção da cheia de projeto, considerando uma equivalência do tempo de retorno da chuva de projeto e do hidrograma de projeto.

Como os registros de vazão são frequentemente menores do que os registros de precipitação, e as séries de vazão ainda podem sofrer com o fenômeno de não-estacionaridade e/ou não-

homogeneidade devido a alterações antrópicas e/ou câmbio climático, os hidrogramas de projeto são frequentemente obtidos de modelos chuva-vazão.

### **Medidas de controle estruturais**

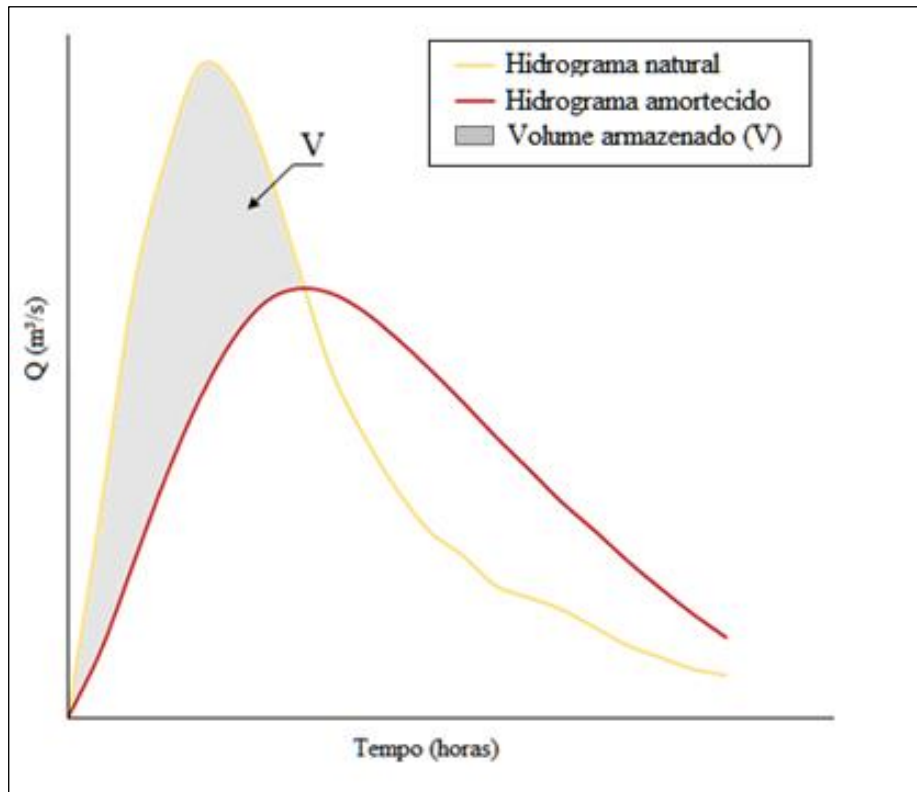
As medidas de controle estruturais são caracterizadas por obras de engenharia cujo o objetivo reside na redução do risco de inundações. Essas medidas ainda podem ser classificadas em extensivas e intensivas. As medidas extensivas promovem alterações na bacia hidrográfica e buscam modificar a relação entre precipitação e vazão, por meio de alterações na cobertura vegetal do solo, visando reduzir e retardar os picos de vazão do hidrograma. As medidas intensivas, por sua vez, agem nos rios, modificando as condições existente de escoamento. Dentre elas, destacam-se a construção de reservatórios, diques, pôlderes e modificações na morfologia dos cursos d'água, tais como aumento da seção e alteração da declividade do fundo. No presente trabalho apenas os principais reservatórios para controle de cheias em operação na bacia do rio Itajaí-Açu serão modelados nas simulações realizadas.

#### **i. Reservatórios para controle de cheias**

Esses reservatórios têm como função amortecer as ondas de cheia, retendo parte do volume durante o período de ascensão da onda de cheia que deve ser liberado durante ou após o período de recessão da onda. A Figura 2 ilustra o hidrograma natural de um rio e um volume (V) a ser retido no reservatório, de modo que o hidrograma amortecido seja caracterizado pela redução e pelo atraso da vazão de pico ou vazão máxima. Os reservatórios podem ser utilizados quando existem condições topográficas favoráveis a montante da área que se quer controlar, mas principalmente disponibilidade hídrica.

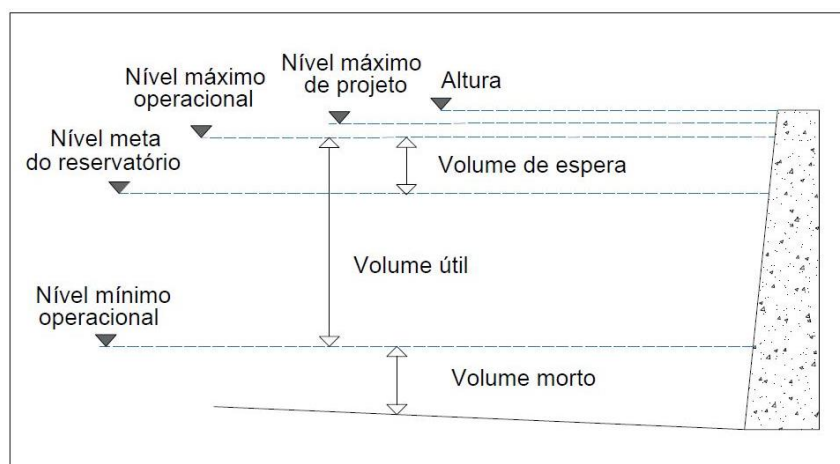
A operação de reservatórios pode se dar de diversas maneiras. De maneira geral, existem reservatórios sem controle de operação ou com controle de operação. Os reservatórios sem controle de operação são aqueles que não possuem comportas, e as cheias são reguladas por vertedores livre e descarregadores de fundo. Os reservatórios com controle de operação possuem comportas, assim deve-se estabelecer uma condição operacional que garanta a segurança do sistema hidráulico, com base no nível d'água do reservatório, afluências, capacidade dos dispositivos extravasores, entre outras condicionantes de projeto.

Figura 2. Efeito de um reservatório sobre hidrograma (fonte: elaborada pela autora).



O reservatório pode estar sempre vazio, amortecendo a primeira cheia, contudo sem capacidade para amortecer as cheias que a sucedem. Outra possibilidade é que o reservatório só entre em operação atingida uma cota limite a jusante. Assim, o reservatório serviria para manter ou reduzir a vazão limite a jusante do barramento. A regra operacional das usinas hidrelétricas no Brasil prevê a alocação de um volume vazio nos reservatórios - o chamado volume de espera, destinado a amortecer as cheias durante o período chuvoso, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3. Níveis de referência de uma barragem de usos múltiplos (fonte: elaborado pela autora)



Os principais impactos das barragens ocorrem a montante e a jusante de suas implantações. Usualmente, as áreas a jusante da barragem são aquelas em que há um risco acentuado de inundação. Assim, projeta-se que o reservatório retenha parte da onda de cheia e amortecça as inundações junto às áreas ribeirinhas. Contudo, se a área a jusante da barragem não estiver ocupada, haverá uma tendência de ocupação e reivindicações de pleno funcionamento operacional da barragem para qualquer evento de cheia. Já a montante, deve-se atentar para o assoreamento do reservatório, vazões afluentes e condições de operação da barragem, fatores capazes de gerar inundações e represamentos a montante.

#### ii. **Dique ou polder**

Os diques são estruturas de concreto, terra ou enrocamento construídas a uma certa distância das margens dos rios que as protegem do extravasamento durante eventos chuvosos extremos, capazes de ocasionar inundações. Hidraulicamente, a construção de um dique diminui a seção de escoamento, resultando em um aumento local da velocidade e do nível d'água para uma mesma vazão.

Além disso, caso a estrutura seja construída em apenas uma margem do curso d'água, as inundações podem se transferir para a margem desprotegida, do mesmo modo que se os diques forem construídos nas duas margens, é possível que a redução do tempo de viagem da onda de cheia afete as regiões a jusante do dique. Os diques são dimensionados para uma vazão de projeto, portanto são estruturas que podem colapsar se ocorrer uma vazão maior do que aquela para a qual ele foi projetado. Ademais, é preciso prever a drenagem das áreas de contribuição laterais aos diques, os polders, por meio de comportas ou sistemas de bombas, de modo que as águas não fiquem represadas.

#### iii. **Modificações nos rios**

Com o objetivo de aumentar a vazão para um mesmo nível, são possíveis diversas modificações na morfologia dos cursos d'água. Para um trecho de rio, em que escoar uma determinada vazão, o nível d'água é função dos seguintes parâmetros: rugosidade, área da seção transversal, raio hidráulico e declividade. Assim, o trecho do rio que influencia a área que se quer proteger de inundações pode ter sua seção transversal ampliada, rugosidade reduzida e declividade aumentada, diminuindo o nível d'água para uma mesma vazão. No entanto, essas medidas são onerosas para trechos muito extensos, além de provocarem alterações significativas nas condições de escoamento e energia do rio.

### **Medidas de controle não-estruturais**

As medidas de controle não-estruturais podem reduzir de maneira expressiva os danos e prejuízos causados por inundações quando associadas a medidas estruturais. Cabe ressaltar que as medidas estruturais são projetadas para um evento de cheia de certa magnitude e tempo de retorno compatíveis com um dispêndio financeiramente viável. Assim, sempre há risco de ocorrência de um evento de magnitude e tempo de retorno superior àquele para o qual a estrutura foi projetada, causando seu colapso. Enquanto as medidas estruturais podem gerar uma falsa sensação de segurança, impulsionando a ocupação de áreas inundáveis, as medidas não-estruturais têm caráter preventivo, incluindo, por exemplo, sistemas de previsão e alerta, zoneamento de áreas inundáveis e implementação de seguros contra inundações.

### **3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA**

A análise de inundações e a avaliação de medidas de controle pode ser realizada por meio de modelagem hidrológica. Os modelos hidrológicos buscam representar matematicamente um sistema hídrico (FAN & COLLISCHONN, 2014). Genericamente, um sistema é constituído por um mecanismo que tem para cada entrada uma saída associada. A bacia hidrográfica é objeto de interesse de grande parte dos estudos hidrológicos e constitui um sistema que pode ter seu comportamento representado por modelos, sendo a precipitação e a vazão exemplos típicos de variáveis de entrada e saída de modelos hidrológicos, respectivamente.

Nesse sentido, a modelagem hidrológica constitui uma ferramenta capaz de representar a resposta de bacias hidrográficas frente aos fenômenos do balanço hídrico (precipitação, infiltração, evaporação e escoamento) e ainda prever seu comportamento frente a eventos futuros, tais como eventos hidrometeorológicos extremos (TUCCI, 2005). A simulação hidrológica é relevante para diversos estudos em diferentes fases de gerenciamento de recursos hídricos como na estimativa de variáveis em locais sem dados, estimativa de disponibilidade hídrica, avaliação de impactos de mudanças de uso do solo, mudanças climáticas, compreensão de processos hidrológicos e impacto de obras hidráulicas.

Há uma variedade de modelos hidrológicos, visto que a forma de retratar os processos varia de acordo com os objetivos do modelo. Dentre os principais tipos de modelo, destacam-se os modelos hidrológicos distribuídos, concentrados, contínuos, discretos, determinísticos, estocásticos, conceituais ou empíricos. De maneira geral, as limitações dos modelos hidrológicos residem na

obtenção de dados hidrológicos (quantidade e qualidade), na representação matemática relativa a alguns processos e nas simplificações que desconsideram a variabilidade espacial e temporal de certas variáveis (TUCCI, 2005).

### **3.2.1 Classificação**

Segundo Tucci (2005), os sistemas e os modelos podem ser classificados segundo diversos fatores, com base na variabilidade espacial e temporal dos fenômenos, na probabilidade de ocorrência das variáveis e na utilização de funções que consideram ou não os processos físicos envolvidos, por exemplo. Frequentemente, variáveis que correspondem a um processo não-linear são representadas por modelos lineares, assim como um sistema que varia continuamente no tempo pode ter suas variações registradas em um intervalo de tempo. Nesse sentido, um sistema pode ser representado por um modelo com características distintas das suas. As definições que seguem servem para caracterizar modelos e sistemas.

#### **(i) Contínuo vs. discreto**

Um modelo é dito contínuo quando os fenômenos representados são contínuos no tempo, enquanto um modelo discreto é aquele caracterizado por mudanças de estado que ocorrem em intervalos discretos.

#### **(ii) Concentrado vs. distribuído**

O modelo é dito concentrado quando desconsidera a variabilidade espacial dos fenômenos, utilizando apenas o tempo como variável independente. Os modelos distribuídos, por sua vez, são aqueles em que os fenômenos dependem do espaço e/ou do tempo. Ressalta-se, porém, que em alguma escala de grandeza, o modelo distribuído torna-se concentrado, pois há sempre a necessidade criar uma subdivisão em que a variabilidade espacial do fenômeno deixa de ser considerada. Como exemplos de modelo concentrado e distribuído, temos os fenômenos de precipitação média na bacia e precipitação, respectivamente.

#### **(iii) Estocásticos vs. determinísticos**

Os modelos estocásticos e determinísticos diferenciam-se pela aplicação do conceito de probabilidade às variáveis do sistema. Se a probabilidade de ocorrência das variáveis é considerada, então o modelo é dito estocástico, isto é, para um conjunto de entradas são associadas saídas aleatórias. Os modelos determinísticos são aqueles em que a probabilidade de ocorrência das

variáveis não é relevante, ou seja, para um conjunto de dados de entrada, obtém-se sempre os mesmos dados de saída.

#### **(iv) Conceitual vs. empírico**

O modelo é dito conceitual quando as expressões e parâmetros utilizados têm relação com os processos físicos. O modelo empírico é aquele em que as saídas calculadas se ajustam aos dados observados, porém sem estabelecer uma relação entre a física do sistema e as funções utilizadas, representando apenas um ajuste estatístico.

De maneira complementar às definições acima, entende-se que o modelo é dito de simulação contínua quando um longo período de tempo é simulado, incluindo diversos eventos de cheia e estiagem. O modelo de simulação de eventos, por sua vez, caracteriza a simulação de eventos específicos de forma individual.

### **3.2.2 Modelos de transformação precipitação-vazão**

Os modelos de transformação precipitação-vazão ou chuva-vazão buscam representar os processos do ciclo hidrológico que ocorrem entre a precipitação e o escoamento de uma dada região: a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea, o escoamento superficial, sub-superficial e no rio (TUCCI, 2005). Os modelos chuva-vazão são capazes de gerar uma série de vazões mais longa e representativa, com base em séries longas de chuva, observadas ou sintéticas.

#### **3.2.2.1 Estrutura de modelos precipitação-vazão**

A estrutura básica de um modelo chuva-vazão consiste na discretização da bacia hidrográfica para modelos distribuídos, nas variáveis temporais de entrada e na integração dos processos (TUCCI, 2005). A discretização das bacias é feita de tal modo que a bacia é representada por diferentes subdivisões espaciais, de acordo com cada modelo.

No modelo concentrado, assume-se que a bacia recebe uma precipitação uniforme e que os demais processos hidrológicos também podem ser representados por variáveis concentradas. Esse tipo de modelo é compatível com bacias pequenas, em que a variação espacial das variáveis e parâmetros não é significativa a ponto de alterar os resultados.

No modelo distribuído por sub-bacias, a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias, considerando a configuração dos cursos d'água principais. Fatores tais como disponibilidade de dados e homogeneidade dos parâmetros físicos da bacia são relevantes para a subdivisão da bacia.

Por fim, o modelo distribuído por módulos tem como objetivo discretizar a bacia em formas geométricas, de modo que haja um maior grau de detalhamento do que aquele apresentado no modelo distribuído por bacias. Assim, cada módulo é composto por várias combinações, também chamadas de blocos, das características físicas da bacia. O balanço hídrico é aplicado a cada bloco, dentro dos respectivos módulos.

A precipitação é a principal variável de entrada em modelos chuva-vazão. No entanto, outras variáveis como evapotranspiração podem servir como dado de entrada para o modelo. A vazão é a variável comumente utilizada para calibração ou verificação de modelos chuva-vazão. Embora a precipitação seja a principal variável de entrada, a baixa disponibilidade temporal dos dados e a quantidade de postos pluviométricos são fatores limitantes que incorporam incertezas à simulação hidrológica. A evapotranspiração pode ser calculada com base em dados provenientes de estações meteorológicas por equações como Penman-Monteith. Finalmente, os dados de vazão têm como objetivo promover a calibração dos parâmetros do modelo. Para estimativa de vazão em cenários futuros, os dados de vazão servem para definir os parâmetros que melhor se ajustam à resposta da bacia. Duas metodologias de simulação hidrológica são tradicionalmente aplicadas aos modelos chuva-vazão no contexto de estimativa de hidrogramas de cheias: simulação contínua de longo prazo e simulação de eventos de projeto.

### **Estimativa de hidrogramas de cheia**

Hidrogramas de cheia são informações fundamentais para o projeto e operação de estruturas e sistemas hidráulicos, assim como para o mapeamento de risco de inundação (GRIMALDI et al., 2012; CARVAJAL et al., 2009), estudos de controle de inundação e estudos hidrológicos em geral. A literatura propõe aplicações de diferentes metodologias para estimativa de hidrogramas de cheia (ROGGER et al., 2012).

Métodos estatísticos podem ser utilizados para estimar hidrogramas de cheia a partir de uma curva de distribuição de frequência das vazões máximas observadas, método tradicionalmente empregado quando existem longos registros de vazão. No entanto, destaca-se a metodologia de eventos, popularmente empregada em estudos de controle de cheia e caracterizada pela utilização de hietogramas de projeto com um tempo de retorno bem definido consistente com as relações de



intensidade-duração-frequência (IDF) (ALFIERI et al., 2008). A chuva de projeto é então utilizada como dado de entrada no modelo chuva-vazão, produzindo um hidrograma de projeto.

Alternativamente, a metodologia de simulação contínua pode ser empregada em modelos chuva-vazão, utilizando séries longas de precipitação para obtenção de séries longas de vazão. O aumento da capacidade de processamento dos computadores possibilitou o uso mais difundido dessa abordagem nos estudos envolvendo modelagem hidrológica (BOUGHTON & DROOP, 2003). Diversos estudos recentes fizeram uso de modelos de geração de séries sintéticas de precipitação acoplados a modelos de chuva-vazão em modo de simulação contínua para produzir séries longas de vazão (BLAZKOVA & BEVEN, 2002; FAULKNER & WASS, 2005; SMITH et al., 2013). Contudo, nas últimas décadas, outras metodologias foram desenvolvidas combinando modelos estatísticos e determinísticos (EAGLESON, 1972; PAQUET et al., 2013).

Dado que eventos hidrológicos são processos não lineares, a extrapolação de curvas de distribuição de frequência de vazões máximas pode conduzir a erros consideráveis, especialmente quando não há registro para longos períodos (KATZ et al., 2002). Além disso, a observação de eventos extremos envolve incertezas devido à própria extrapolação da curva-chave (BRUSA; CLARKE, 1999). Essas são algumas questões capazes de suscitar debates importantes sobre a influência da metodologia de simulação empregada nos estudos hidrológicos, em quais pontos residem suas vantagens, limitações e incertezas. Ainda que simulações hidrológicas baseadas em eventos de projeto sejam amplamente utilizadas para estimativa de hidrograma de cheia devido à facilidade de aplicação, o uso de simulação contínua para esse mesmo fim tem crescido consideravelmente (BOUGHTON & DROOP, 2003). Nesse sentido, estudos recentes têm buscado avaliar o desempenho da utilização de um modelo chuva-vazão em modo de simulação contínua e em modo de eventos (CALVER et al., 2009; GRIMALDI et al., 2012; FLEISCHMANN et al., 2018a). Estabelecer métricas para avaliação de metodologias de simulação de hidrogramas de cheia ainda é uma tarefa complexa, assim como definir sistematicamente se um método ou outro é mais adequado (BOUGHTON & DROOP, 2003).

### **3.2.3 Simulação de eventos de projeto**

Os modelos chuva-vazão podem gerar hidrogramas de cheia com base em eventos de chuva. A simulação de eventos retrata períodos específicos de uma série longa de precipitação que deram origem a eventos extremos, tipicamente cheias com alto tempo de retorno. A abordagem clássica da simulação de eventos consiste na definição de um hidrograma de projeto com tempo de retorno bem

definido (consistente com curvas IDF) como variável de entrada de um modelo chuva-vazão para obtenção de um hidrograma de cheia ou de projeto (ALFIERI et al., 2008). Essa metodologia é bastante utilizada devido a sua praticidade e abordagem pragmática. A adoção de simplificações e a menor demanda de dados de entrada são características que tornam o emprego de simulação de eventos mais atrativo quando comparado com o emprego de simulação contínua.

Essa metodologia, no entanto, simplifica os processos hidrológicos do modelo de transformação chuva-vazão e incorpora incertezas aos resultados. As premissas críticas do método residem sobretudo na escolha de um hietograma de projeto (forma do hietograma e duração da chuva), na equivalência entre o tempo de retorno da chuva de projeto e do hidrograma de projeto e na definição de condições iniciais de umidade do solo que antecedem a ocorrência do evento (CAMICI et al, 2011; GRIMALDI, 2012). Outra hipótese simplificadora típica da simulação de eventos é desconsiderar a taxa de evapotranspiração durante os eventos chuvosos extremos, dado que o efeito dessa variável é normalmente desprezível frente a magnitude da precipitação ou do volume do escoamento gerado, por exemplo. Ademais, a separação subjetiva do escoamento de base é outro aspecto a ser avaliado no modelo de eventos (BROUGHTON & DROOP, 2003).

Alfieri et al. (2008) utilizaram um modelo chuva-vazão para avaliar o desempenho de cinco hietogramas de projeto. O desenho experimental consistiu na geração de uma série sintética de precipitação transformada em uma série longa de vazão da qual se podia definir uma vazão de pico ( $Q_p$ ) associada ao tempo de retorno desejado. Curvas IDF foram extraídas da mesma série sintética de precipitação com o objetivo de definir cinco hietogramas de projeto que foram inseridos no mesmo modelo chuva-vazão. Por fim, as cinco vazões de pico dos eventos foram comparadas com a vazão de pico correspondente (mesmo TR) obtida via simulação contínua.

A principal limitação de uma simulação de eventos reside na baixa representatividade do modelo ajustado para outros períodos com condições diferentes ou para eventos muito distintos daquele que serviu para a calibração o modelo. O Método do SCS (*Soil Conservation Service*) e o Método Racional são exemplos bastante empregados nesse tipo de modelagem.

Dada a ampla utilização do método SCS em estudos de controle de cheias no Brasil, Cunha et al. (2015) realizaram uma avaliação da acurácia desse método, utilizando 190 eventos de chuva e vazão observados na bacia hidrográfica do Ribeirão Serra Azul, em Minas Gerais. O estudo realizado contempla a análise da abordagem clássica baseada no emprego da metodologia do SCS para cálculo da precipitação efetiva e na utilização do parâmetro CN fornecido pelas tabelas do SCS e do

hidrograma unitário com fator de pico adimensional correspondente ao valor clássico de 484 (SILVEIRA, 2016). Os resultados obtidos da calibração do parâmetro CN para os eventos selecionados por Cunha et al. (2015) indicaram que a abordagem clássica tende a superestimar vazões de cheia e, por consequência, podem conduzir ao superdimensionamento de obras hidráulicas.

### **3.2.4 Simulação de séries contínuas**

Uma abordagem alternativa à simulação de eventos em modelos chuva-vazão é a simulação contínua de longo prazo, que consiste na utilização de séries de dados pluviométricos sintéticos ou observados em uma bacia hidrográfica para obtenção de uma série longa de vazão simulada. A seleção de vazões máximas anuais obtidas da série simulada permite determinar o hidrograma de cheia com um tempo de retorno bem definido através de uma curva de distribuição empírica para cheias de diferentes magnitudes (SERINALDI & GRIMALDI, 2011). Conforme Boughton & Droop (2003), uma vez se disponha de uma série longa de vazão, a obtenção direta de estatísticas se mostra mais confiável para estimativa de vazões de pico.

Essa abordagem apresenta a vantagem de considerar implicitamente todos os processos hidrológicos que influenciam a geração do escoamento e o evento de inundação completo, incluindo os processos que o antecederam em toda a área da bacia hidrográfica (FALTER et al., 2014). Para Boughton & Droop (2003), o termo “simulação contínua” refere-se à estimativa das perdas da chuva incidente na bacia e à geração de escoamento através da simulação de um longo período do balanço de umidade do solo em intervalos diário, horário e eventualmente sub-horário.

A metodologia de simulação contínua apresenta características desejáveis frente as lacunas do modelo de eventos. Em outras palavras, não é preciso atribuir um tempo de retorno, uma intensidade e uma duração para a chuva, assim como não é necessário definir uma condição de umidade do solo anterior ao evento (BOUGHTON & DROOP, 2003).

Além disso, a metodologia permite representar a dinâmica temporal de reservatórios de forma direta (FLEISCHMANN et al., 2018a), uma vez que isso só seria possível em um modelo de eventos variando as condições iniciais do reservatório. Assim, verifica-se que o uso de simulação contínua para estimativa de vazões máximas tem aumentado (BOUGHTON & DROOP, 2003), tendo como desvantagem a maior complexidade de aplicação, especialmente no que diz respeito aos dados de entrada (conjunto de parâmetros) e ao esforço computacional. Ainda que a capacidade de processamento dos computadores tenha aumentado consideravelmente a ponto de viabilizar o uso

mais difundido de simulação contínua, as chuvas de projeto ainda são bastante populares devido à sua simplicidade e à baixa demanda por parâmetros (BEMFICA et al., 2000).

Outras metodologias desenvolvidas ainda são baseadas em combinações de métodos clássicos. Na França, por exemplo, o método SCHADEX foi desenvolvido pela empresa EDF (Electricité de France) e é utilizado desde 2006 (PAQUET et al., 2013) para estimativa de vazão máxima. O método consiste na aplicação de um modelo chuva-vazão dito semi-contínuo, pois apresenta a vantagem de incorporar arbitrariamente chuvas de projeto de interesse a uma série histórica de precipitação. Isto é, constitui um método intermediário entre as abordagens de eventos de projeto e das longas séries temporais de precipitação. A principal vantagem do método SCHADEX está no fato de representar de forma mais natural a umidade do solo e o armazenamento em reservatórios durante a simulação contínua.

### **3.2.5 Etapa de calibração**

A etapa de calibração tem por objetivo identificar valores razoáveis para os parâmetros do modelo de modo que se obtenha um ajuste entre dados observados e simulados. As funções objetivo são as métricas disponíveis para avaliar a qualidade do ajuste entre os dados observados e simulados. As funções objetivo, por sua vez, devem ser selecionadas de acordo com a necessidade da análise e com a qualidade dos resultados almejados.

A escolha da função objetivo deve estar alinhada com o propósito do uso do modelo, uma vez que existem funções objetivo mais sensíveis a erros nas vazões máximas (NSE e RMSE), aos erros nas vazões mínimas (RMSEI) e aos erros do volume observado e simulado (COLLISCHONN & TUCCI, 2003). Matematicamente, a calibração representa a busca por valores capazes de minimizar o valor da função objetivo.

O modelo HEC-HMS, modelo que será utilizado no presente estudo, dispõe de métricas como o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, a soma dos erros absolutos, soma do quadrado dos erros absolutos, dentre outras (USACE-HEC, 2015a).

De maneira alternativa ao método de tentativa e erro (ajuste manual), o HEC-HMS dispõe de métodos de calibração automática (*optimization trial simulation*) baseados em técnicas iterativas de dois algoritmos de mínimos locais: algoritmo de Nelder & Mead e o algoritmo do gradiente univariacional (*univariate-gradient*). Dificuldades envolvendo a utilização dessa metodologia de calibração são apresentadas por Collischonn & Tucci (2003).

### 3.2.6 Software de modelagem utilizado

Neste item será feita uma breve apresentação do software escolhido para implementação do modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu e para análise das metodologias de simulação contínua e de eventos.

#### HEC-HMS

O HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) é um software desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE – *U.S. Army Corps of Engineers*) para simular os processos de chuva-vazão de bacias hidrográficas dendríticas (USACE-HEC, 2015a). O software é aplicável a uma gama de problemas de hidrologia, tais como estudos de drenagem urbana, estudos de disponibilidade hídrica, estudos de dimensionamento de reservatórios de controle de cheias, entre outros (USACE-HEC, 2015b).

A simulação hidrológica com o HEC-HMS é realizada através da combinação dos seguintes componentes: modelo da bacia hidrográfica, modelo meteorológico e especificações de controle (USACE-HEC, 2015a). Uma breve descrição de cada componente da simulação hidrológica é apresentada abaixo:

- a) Modelo da bacia hidrográfica: neste item é realizada a discretização da geometria e da configuração da bacia por meio de elementos hidrológicos, tais como sub-bacias, trechos de rios, canais, junções, desvios de água, reservatórios, etc. Diversos modelos matemáticos estão disponíveis para simular os processos de perdas por infiltração, evaporação, interceptação, transformação chuva-vazão, de cálculo do escoamento de base e de propagação de cheias em rios e em reservatórios.
- b) Modelo meteorológico: etapa em que são inseridas as variáveis de entrada do modelo. Para simulação de eventos, apenas os dados de precipitação são necessários. A simulação contínua, requer adicionalmente a inserção dos dados de evapotranspiração.
- c) Especificações de controle: o período de tempo da simulação é definido pelas especificações de controle. As especificações de controle incluem uma data e hora de início e uma data e hora de fim do período, assim como um intervalo de computação dos dados.

Em geral, para aplicar o modelo HEC-HMS utiliza-se dados de entrada referentes à configuração da bacia hidrográfica e aos dados meteorológicos necessários. Dado que os elementos hidrológicos

(sub-bacias e trechos de rios) requerem a definição de modelos matemáticos para que os processos hidrológicos sejam representados e computados na bacia hidrográfica, muitos são os modelos matemáticos disponíveis para determinar as perdas de precipitação, transformar o excesso de precipitação em escoamento na saída da sub-bacia e adicionar o escoamento de base, por exemplo. A escolha adequada dos métodos disponíveis para a simulação hidrológica é decisiva e destaca a importância do conhecimento acerca das vantagens e limitações inerentes a cada método.

Os diferentes modelos matemáticos serão referidos neste texto como métodos e serão detalhados individualmente ao longo do texto em local adequado para a melhor compreensão do trabalho. Os métodos disponíveis para sub-bacias e trechos de rios no HEC-HMS são apresentados na Tabela 2.

A Tabela 2 apresenta os diversos métodos disponíveis para contabilizar os processos que ocorrem na bacia, nos trechos de rio ou canais e nos reservatórios. Dados acerca do dossel e/ou da superfície podem ser adicionados quando há necessidade de representar os processos de interceptação e armazenamento na bacia. Sete métodos estão disponíveis para a contabilização das perdas por infiltração, como *Green and Ampt*, *Soil Moisture Accounting (SMA)*, *SCS-CN (Soil Conservation Service – Curve Number)*, dentre outros. Para a transformação do excesso de chuva em escoamento superficial com base em hidrogramas unitários sintéticos, sete métodos estão disponíveis. Destacam-se os métodos de Snyder, Clark e SCS (*Soil Conservation Service*). Cinco métodos estão disponíveis para representar as contribuições do escoamento de base para o escoamento superficial na bacia, como a solução da equação de Boussinesq, por exemplo. Ainda, são disponibilizados métodos para a propagação de ondas de cheia em rios, como Muskingum e Muskingum-Cunge, e em reservatórios como o método de Puls modificado. Embora não conste na tabela abaixo, a evapotranspiração pode ser calculada usando expressões como a de Priestley Taylor ou Penman-Monteith. No entanto, métodos para contabilizar a evapotranspiração são requeridos apenas para simulação contínua. Opcionalmente, ainda existem métodos para computar taxas de perda/ganho, que consideram a interação dos trechos de rios ou canais com a água subterrânea e os movimentos bidirecionais de fluxo em função do método adotado.

Tabela 2. Métodos disponíveis no HEC-HMS.

Elemento hidrológico (Hydrologic element)	Modelos matemáticos (Calculation Type)	Método (Method)
Sub-bacia (Subbasin)	Dossel (Canopy)	Dinâmico (Dynamic) Simples, rasterizado (Simple, gridded)
	Superfície (Surface)	Simples, rasterizado (Simple, gridded)

	Taxa de perdas (Loss rate)	Déficit e taxa constante (Deficit and constant, gridded) Exponencial (Exponential) Green and Ampt (gridded) Perda inicial e taxa constante (Initial and constant) SCS Curve Number Smith Parlange Soil Moisture Accounting (SMA)
	Geração de escoamento superficial (Transform)	Hidrograma unitário de Clark (Clark unit hydrograph) Onda cinemática (Kinematic Wave) Clark modificado (ModClark) Hidrograma triangular do SCS (SCS unit hydrograph) Hidrograma unitário de Snyder (Snyder unit hydrograph) Gráfico S especificado pelo usuário (User-specified s-graph) Hidrograma unitário especificado pelo usuário (User-specified unit hydrograph)
	Escoamento de base (Baseflow)	Recessão alternada (Bounded recession) Recessão constante mensal (Constant monthly) Reservatório linear (Linear reservoir) Boussinesq não-linear (Nonlinear Boussinesq) Recessão (Recession)
Trechos de rios ou canais (Reach)	Routing (Propagação de ondas de cheia)  Gain/Loss (Ganho/perda)	Onda cinemática (Kinematic Wave) Lag Puls modificado (Modified Puls) Muskingum Muskingum-Cunge Straddle-stagger  Constante (Constant) Percolação (Percolation)

Adaptado de: Hydrologic Modeling System, HEC-HMS v 4.2 – User's Manual

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo, é feita a caracterização da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, estudo de caso do presente trabalho. A metodologia empregada consiste na implementação de um modelo chuva-vazão em modo de simulação contínua e de eventos em parte da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, utilizando o software HEC-HMS v 4.1, para posterior análise de desempenho de ambas as metodologias de simulação para estimativa de hidrogramas de cheia.

### 4.1 ESTUDO DE CASO

Inundações são registradas na bacia do rio Itajaí-Açu desde o período da colonização alemã, por volta de 1850, conforme registros da Defesa Civil na cidade de Blumenau (ALERTABLU, 2018). Ao longo de aproximadamente duas décadas, 480 registros de desastres associados a inundações fizeram dessa bacia a mais afetada de Santa Catarina (TASCA et al., 2017). Ao longo da história, diversas foram as tentativas de encontrar soluções para o cenário de inundações na bacia. Essas soluções ora partiam de iniciativas mobilizadas pela participação social mais ou menos intensa, ora partiam do interesse governamental, como a proposição de medidas de caráter estrutural e não estrutural (FRANK, 1995). Nesse sentido, a bacia do rio Itajaí-Açu constitui um cenário favorável para compreensão e análise de metodologias de simulação hidrológica frente a eventos de cheia.

A bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu localiza-se na região sul do Brasil, no Estado de Santa Catarina, entre as coordenadas 26°23' e 27°53' de latitude Sul e 48°38' e 50°22' de longitude Oeste, conforme apresentado na Figura 4. Apresenta uma área de drenagem de cerca de 15.000 km<sup>2</sup>, compreendendo 16,15% do território catarinense (SANTA CATARINA, 1997).

Os principais rios que compõem a bacia são o rio Itajaí-Açu, formado pela confluência dos rios Itajaí do Sul com o Itajaí do Oeste, recebendo o aporte mais a jusante do rio do Norte ou Hercílio e de outros dois cursos d'água de menor magnitude na sua margem esquerda, os rios Benedito e Luís Alves. Já no estuário, o rio Itajaí-Açu recebe o aporte de seu último afluente principal, o rio Itajaí-Mirim.



Figura 4. Localização da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu.



Fonte: própria da autora.

Atualmente, Santa Catarina divide-se em seis mesorregiões: Grande Florianópolis, Norte Catarinense, Oeste Catarinense, Serrana, Sul Catarinense e Vale do Itajaí (IBGE, 2011). A Mesorregião do Vale do Itajaí integra quatro microrregiões denominadas como Microrregião de Blumenau, Microrregião de Itajaí, Microrregião de Ituporanga e Microrregião de Rio do Sul, compreendendo o Alto, Médio e o Baixo Vale, que abrigam o maior índice populacional do Estado. No Alto Vale, o foco econômico está nas atividades agropecuárias, enquanto que no Médio e Baixo Vale destacam-se as atividades industriais (SCHETTINI, 2002). A mesorregião do Vale do Itajaí tem por característica essa convivência ambivalente do ambiente rural com as manchas urbanas em desenvolvimento ao longo dos cursos d'água. Embora a bacia contemple algumas das cidades mais importantes do Estado, com alto grau de urbanização e desenvolvimento econômico, aproximadamente 50% dos municípios são rurais<sup>2</sup>.

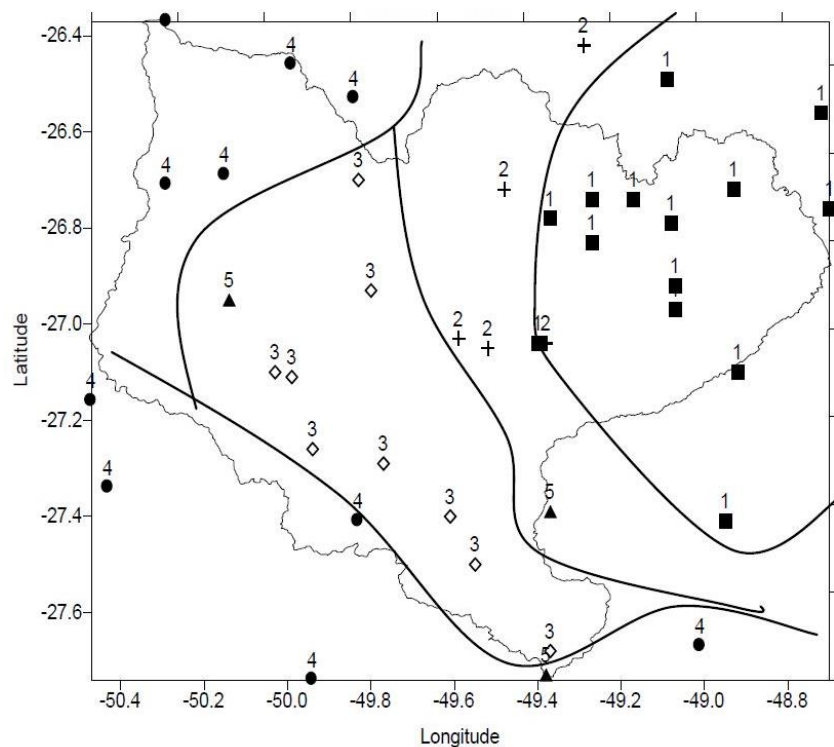
<sup>2</sup> Disponível em: <<http://www.aguas.sc.gov.br/base-documental/planos-de-bacias>>.

## Regime de chuvas

De maneira geral, três tipos de precipitação são observados na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu<sup>2</sup>: convectiva, frontal e orográfica. As chuvas convectivas na bacia são características do verão, as frontais predominam sobretudo no período da primavera e também durante o inverno. As chuvas orográficas, por sua vez, são de maior magnitude e ocorrem junto às encostas da bacia hidrográfica.

Com o objetivo de identificar o comportamento médio da chuva no Vale do Itajaí, uma análise das séries históricas de chuva dos principais postos pluviométricos da bacia hidrográfica e de seu entorno é apresentada no Plano da Bacia hidrográfica do rio Itajaí<sup>2</sup>. O Plano apresenta o estudo conduzido pelo Prof. Dirceu Severo (FURB) que analisou o comportamento da chuva com base no método de análise de agrupamentos das séries temporais de 41 postos pluviométricos situados na bacia hidrográfica e em seu entorno no período de 1979 a 2003. Cinco regiões homogêneas quanto ao comportamento da precipitação foram definidas e são apresentadas na Figura 5.

Figura 5. Regiões homogêneas quanto ao comportamento da precipitação (fonte: Plano da Bacia hidrográfica do rio Itajaí<sup>2</sup>).

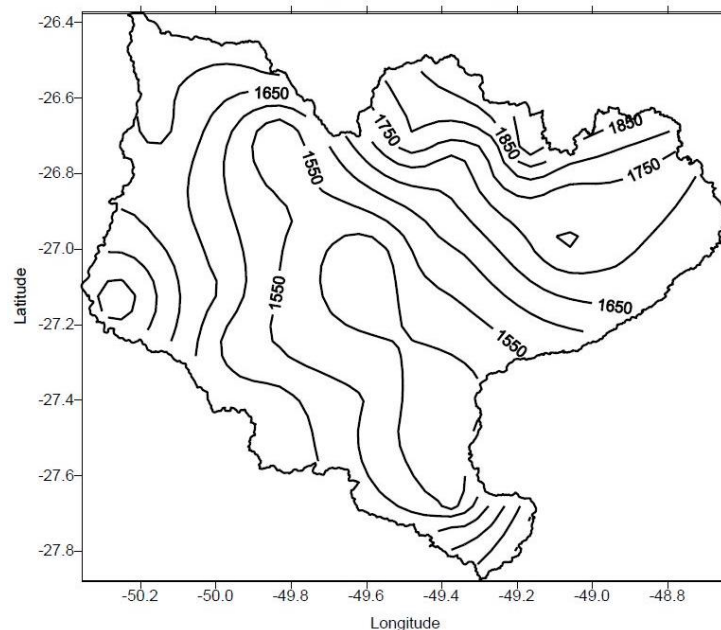


Por meio da análise realizada, verificou-se que o fenômeno de chuva apresenta uma orientação preferencial, no sentido leste-oeste, tendo em vista a influência da maritimidade e continentalidade em sua distribuição. No grupo 1 estão situados os postos pluviométricos na porção leste da bacia hidrográfica, entre o Baixo e Médio Vale, próximos ao Oceano Atlântico. Os postos do grupo 2

estão localizados na porção central e norte da bacia, representativos do Médio Vale. Pouco mais a oeste, no grupo 3, estão situados os postos representativos do Alto Vale. No extremo oeste da bacia e em seu contorno, localizam-se os postos pluviométricos do grupo 4. O grupo 5 é caracterizado apenas por três estações pluviométricas, duas na porção Sul da bacia, próximas a cidade Alfredo Wagner e a terceira situada na cidade de Rio do Campo.

Uma análise da distribuição de precipitação média anual para o período do estudo permitiu verificar uma tendência de crescimento da magnitude das precipitações médias na porção central e sul da bacia hidrográfica em direção ao extremo nordeste. Assim, as precipitações médias anuais na bacia variam de 1500 mm a aproximadamente 1900 mm, como mostra a Figura 6.

Figura 6. Distribuição espacial da precipitação média anual em milímetros na bacia hidrográfica do rio Itajaí (1979-2003) (fonte: Plano da Bacia hidrográfica do rio Itajaí<sup>2</sup>).



Contudo, essa distribuição de chuva não é uniforme ao longo do ano, apresentando variações quantitativas expressivas destacadas a seguir<sup>2</sup>:

- a) estação chuvosa principal durante o verão, representativa do período de dezembro a março (4 meses)
- b) estação chuvosa secundária durante a primavera, representativa dos meses de setembro e outubro. Novembro é um mês um pouco mais seco entre as duas estações chuvosas, principal e secundária.

- c) Período menos chuvoso de 5 meses, representativo das estações de outono e inverno, nos meses de abril a agosto. O mês de abril é o mais seco. No entanto, ressalta-se a inexistência de uma estação seca definida.

Portanto, as chuvas mais intensas podem ser observadas durante o verão e as menos intensas durante o inverno. Ademais, as médias anuais variam de 120 a 180 dias de chuva no ano. Durante as estações chuvosas, ocorrem, em média, chuvas em 15 dias no mês.

### **Histórico de inundações**

A bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu conta um longo registro de desastres associados à ocorrência de inundações. Ao longo de 21 anos, a bacia foi a mais afetada do Estado de Santa Catarina, com o registro de 480 desastres (TASCA et al., 2017). A região do Vale do Itajaí possui o maior Produto Interno Bruto (PIB) do Estado, ressaltando a relevância da bacia do rio Itajaí para a manutenção e desenvolvimento socioeconômico estadual.

Conforme a relação de picos de enchentes da Defesa Civil de Blumenau<sup>3</sup>, a bacia do rio Itajaí-Açu é afetada por inundações desde 1852, período da colonização alemã. A cidade de Blumenau tem um dos registros mais antigos de inundações no Brasil e possui a maior população da bacia.

A Figura 7 ilustra a série de níveis de inundação na cidade e exemplifica a falsa sensação de segurança gerada pela sequência de anos sem eventos extremos (TUCCI, 2003). Os três eventos de inundação de maior magnitude ocorreram entre 1852 e 1911, atingindo a cota máxima de 17,10 m. No entanto, passado esse período, nota-se uma clara predominância de eventos de menor magnitude, atingindo cotas de inundação bem menores. Assim, a população sentiu-se segura para ocupar o vale de inundação. Em 1983 e 1984, contudo, a cidade de Blumenau foi atingida por duas grandes inundações que resultaram em grandes prejuízos e danos econômicos para a população ribeirinha. Naquela época, os prejuízos das inundações em todo o Vale do Itajaí foram equivalentes 8% do PIB de Santa Catarina.

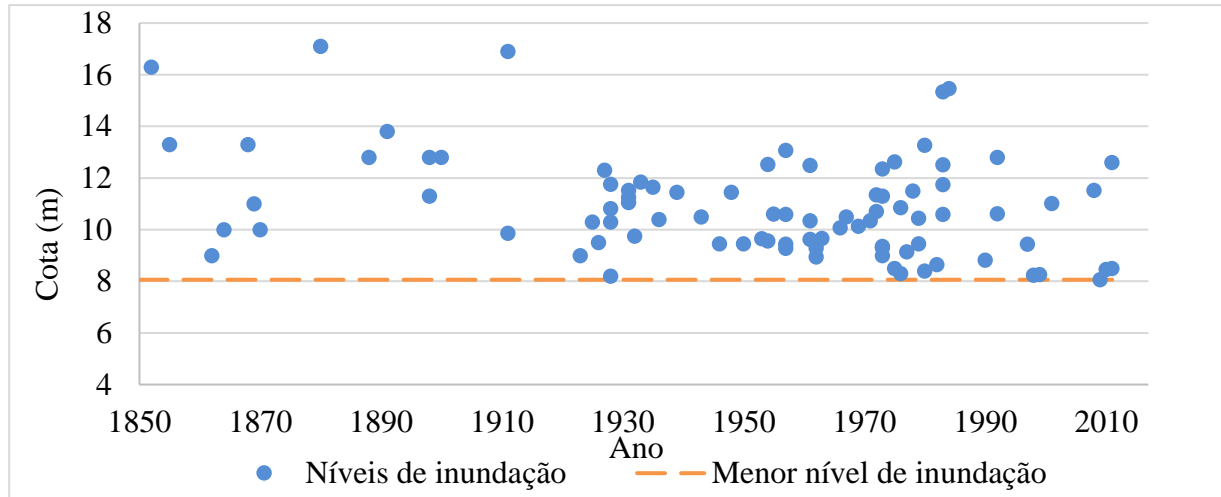
Os fenômenos de inundação continuam a afetar diversas cidades catarinenses. Recentemente, Santa Catarina sofreu sérios prejuízos com as inundações que atingiram o Estado em novembro de 2008. Os custos totais associados a essas inundações foram estimados em um estudo do Banco Mundial

---

<sup>3</sup> Disponível em: <[http://www.blumenau.sc.gov.br/downloads/sedef/relacao\\_picos\\_enchente\\_defesa.pdf](http://www.blumenau.sc.gov.br/downloads/sedef/relacao_picos_enchente_defesa.pdf)>

em R\$ 4.75 bilhões, valor que equivale a aproximadamente 2,67% do PIB estadual (CEPED UFSC, 2016).

Figura 7. Série de níveis de inundação em Blumenau, Santa Catarina.



Fonte: elaborado a partir dos dados fornecidos pela Defesa Civil de Blumenau.

### Medidas de controle existentes

Dado o histórico de eventos de inundação na bacia do rio Itajaí-Açu, a sociedade e governo catarinense se mobilizaram para avaliar medidas de controle que pudessem minimizar os impactos inerentes à ocorrência de inundações. Essa mobilização culminou na construção de um sistema de barragens com o único objetivo de controlar as cheias na bacia. Em 1973, foi concluída a Barragem Oeste, situada no rio Itajaí do Oeste, na cidade de Taió. A Barragem Sul, localizada no rio Itajaí do Sul foi concluída em 1975, na cidade de Ituporanga. Por fim, a Barragem Norte foi concluída em 1992, no rio do Itajaí do Norte ou Hercílio, em José Boiteux (TACHINI, 2010). A Tabela 3 apresenta um resumo das especificações técnicas pertinentes às barragens existentes na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu.

Tabela 3. Especificações técnicas do sistema de controle cheias na bacia do rio Itajaí-Açu.

Obras	Barragem Norte	Barragem Sul	Barragem Oeste
Localização	José Boiteux	Ituporanga	Taió
Rio	Hercílio	Itajaí do Sul	Itajaí do Oeste
Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	2318	1273	1042
Altura do barramento (m)	58,50	43,50	20,00
Cota do coroamento (m)	306,50	410,00	364,50
Cota do vertedor (m)	302,00	399,00	360,00
Nível mínimo (m)	257,00	372,90	340,00
Nível máximo (m)	304,25	408,00	363,00
Volume do reservatório (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	357,00	93,50	83,00
Tipo de barragem	Enrocamento	Enrocamento	Concreto

Fonte: Departamento de Edificações e Obras Hidráulicas de Santa Catarina (DEOH)

## 4.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

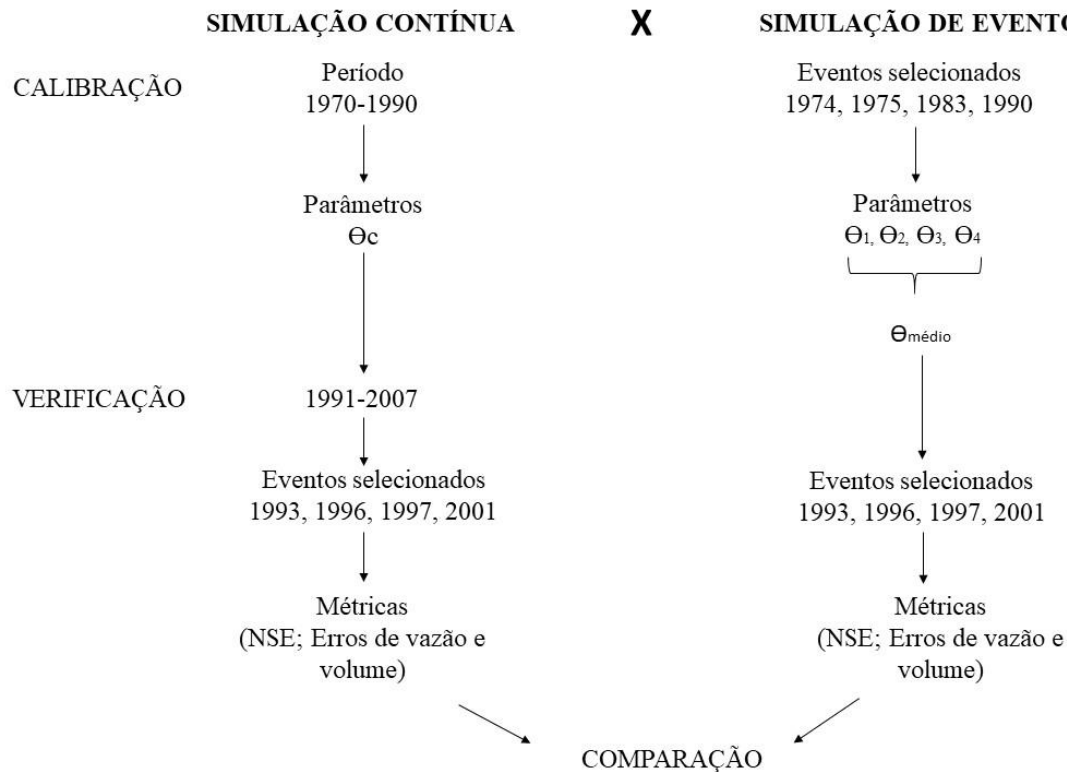
A modelagem hidrológica detalhada nos itens que seguem consiste na aplicação do modelo de precipitação-vazão em modo de simulação contínua e de eventos em parte da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu utilizando o software HEC-HMS v 4.1. No capítulo 4.2.1 é apresentado o desenho experimental do estudo, nos capítulos 4.2.2 e 4.2.3 são apresentados os métodos escolhidos para representação dos processos hidrológicos no modelo chuva-vazão para a metodologia de simulação contínua e de eventos, respectivamente. No capítulo 4.2.4 é caracterizada a aplicação do modelo HEC-HMS na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu e são apresentados os parâmetros e dados comuns a ambas metodologias, tais como postos pluviométricos, postos fluviométricos e seções topobatimétricas utilizadas no estudo. No capítulo 4.2.5 são apresentados os testes realizados e as métricas de avaliação utilizadas.

### 4.2.1 Desenho experimental

O experimento consiste na aplicação de um modelo chuva-vazão utilizando duas metodologias de simulação de distintas - simulação contínua e simulação de eventos – e duas etapas posteriores de calibração e verificação do modelo hidrológico. O modelo hidrológico chuva-vazão foi calibrado com base em dados diários de vazão observados de um único posto fluviométrico selecionado para ambas as metodologias (posto de calibração e verificação). Um período de calibração e um período de verificação do modelo hidrológico foram definidos de modo que se pudesse selecionar eventos de diferentes magnitudes e comparar a eficiência de ambas as metodologias para a estimativa de hidrogramas de cheia nos períodos de calibração e verificação do modelo.

O desenho experimental aplicado ao estudo é apresentado na Figura 8. Para a metodologia de simulação contínua, o conjunto de parâmetros calibrados ( $\Theta_c$ ) é utilizado para posterior verificação do modelo hidrológico. Para a metodologia de eventos, os eventos selecionados têm seu conjunto de parâmetros calibrados individualmente ( $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$  e  $\Theta_4$ ) de modo que a verificação do modelo de eventos é dada pela média do conjunto dos parâmetros calibrados para os eventos individuais ( $\Theta_{\text{médio}}$ ). Para fins de comparação do modelo, métricas foram selecionadas para avaliação dos eventos. As definições do período de calibração e de verificação dos eventos selecionados apresentadas antecipadamente na Figura 8 serão devidamente justificadas no item 4.2.4 referente à aplicação do modelo HEC-HMS para a área do estudo de caso. Ademais, a comparação entre as metodologias foi realizada para outros quatro postos fluviométricos situados na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu (pontos de verificação exclusiva).

Figura 8. Desenho experimental da modelagem hidrológica conduzida no HEC-HMS (fonte: própria da autora).



#### 4.2.2 Simulação contínua

Os métodos utilizados para representação dos processos hidrológicos computados no modelo em modo de simulação contínua serão descritos em detalhe no presente item, seguindo a descrição constante no manual de referência técnica do HEC-HMS (USACE-HEC, 2000). Os processos como interceptação da vegetação existente (*canopy*), armazenamento em depressões locais do terreno (*surface*), infiltração e evapotranspiração são intituladas perdas no modelo. Os demais processos representados no modelo são a geração de escoamento superficial, a adição do escoamento de base, a propagação da vazão no rio e ainda, se houver, a representação de reservatórios.

##### **Vegetação: *simple canopy method***

A seleção de um método para representação da vegetação no ambiente é opcional e é geralmente indicada para modelos em modo de simulação contínua. A precipitação é interceptada até que a capacidade de armazenamento da vegetação se esgote. Uma vez que esse limite é atingido, o volume excedente de precipitação preenche as depressões locais do terreno, caso esse processo de armazenamento (*surface*) tenha sido representado, ou atinge diretamente sobre o solo.

Assim, parte da taxa de evapotranspiração potencial é consumida até que toda a água armazenada na vegetação seja eliminada. O restante da evapotranspiração potencial pode então ser consumida



pelos processos de armazenamento das depressões locais e pelos componentes do solo. Durante eventos de chuva, a vegetação armazena água; em períodos em que não há precipitação, a vegetação esvazia seu armazenamento. O processo de evapotranspiração não é modelado quando há ocorrência de precipitação.

A condição inicial da vegetação deve ser especificada, isto é, a porcentagem do armazenamento que está comprometida no início da simulação. A capacidade máxima do armazenamento (mm) deve ser especificada como a máxima quantidade de água que pode ser armazenada nas folhas até que a precipitação atinja o terreno/solo. Ainda, um coeficiente de cultivo relativo ao tipo de vegetação ou culturas agrícolas deve ser informado para contabilizar a evapotranspiração potencial em relação à grama de referência. Finalmente, um método para extração de água do solo deve ser selecionado, o método *simple* extrai água do solo à mesma taxa da evapotranspiração potencial.

### **Depressões locais: *simple surface***

Assim como a representação da vegetação, a seleção de um método para representação das depressões locais do terreno, onde parte da precipitação pode ser armazenada, é opcional e geralmente utilizada em modelos em modo de simulação contínua. Quando se trata de uma superfície impermeável como um estacionamento, o armazenamento em depressões é inexpressivo. No entanto, quando práticas de conservação do solo são aplicadas a culturas agrícolas, esse armazenamento pode ser significativo. De maneira análoga ao método *simple canopy*, a precipitação que cai na bacia hidrográfica e que chega à superfície do terreno é armazenada nas depressões locais até que a capacidade máxima de armazenamento seja atingida. A água armazenada nas depressões é capaz de infiltrar no solo sempre que a capacidade de armazenamento do solo não foi atingida. O escoamento superficial é gerado apenas quando o solo está saturado e a intensidade da precipitação é maior que a taxa de infiltração.

A condição inicial de armazenamento na superfície do terreno deve ser identificada como a porcentagem da capacidade de armazenamento já utilizada no instante inicial da simulação. Ainda, deve-se definir a máxima capacidade de armazenamento, isto é, a máxima quantidade de água a ser armazenada na superfície do terreno até que se inicie o processo de geração de escoamento superficial.

### **Perdas e geração de escoamento superficial: *Soil Moisture Accounting (SMA)***

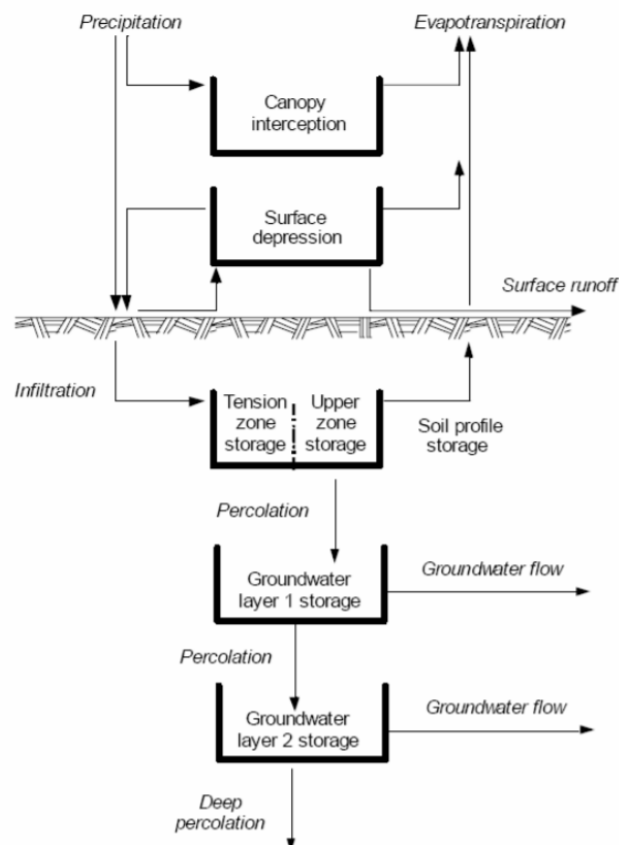
Com exceção do SMA, os demais métodos de perdas disponíveis no HEC-HMS são baseados em eventos, isto é, são capazes de simular o comportamento de um modelo hidrológico durante um



evento de precipitação desde que as condições iniciais do evento sejam especificadas. O modelo SMA é adequado ao modo de simulação contínua de longo período uma vez que simula as condições de umidade do solo em períodos chuvosos e em períodos secos.

A Figura 9 apresenta a representação esquemática do método SMA do modelo HEC-HMS. O método SMA utiliza três camadas para representar o movimento da água no solo e deve ser utilizado em conjunto com métodos capazes de representar o armazenamento proveniente da interceptação da vegetação (*canopy-interception storage*) e o armazenamento d'água na superfície do solo (*surface-interception storage*). Os métodos de representação da vegetação e das depressões locais descritos anteriormente são os mesmos utilizados em conjunto com o algoritmo do SMA.

Figura 9. Representação esquemática do módulo *Soil Moisture Accounting* do HEC-HMS.



Fonte: Hydrologic Modeling System, HEC-HMS v 4.1 – Technical Reference Manual (USACE-HEC, 2000).

As camadas de armazenamento que compõem o SMA são a camada de armazenamento do solo (*soil-profile storage*), um aquífero superior (*groundwater 1 storage*) e um aquífero inferior (*groundwater 2 storage*). Observa-se que a camada de armazenamento do solo ainda se divide em outras duas: *upper zone storage* e *tension storage*. A “porção superior” de armazenamento do solo perde água pelos processos de evapotranspiração e percolação para as camadas inferiores; a zona de

tensão representa a porção do solo em que a água está aderida às partículas do solo e é eliminada apenas por evapotranspiração. Condições iniciais de saturação das três camadas representadas no método podem ser informadas ao programa.

A taxa de infiltração no solo é função da taxa disponível para infiltração (i.e. intensidade da precipitação descontada a interceptação da vegetação), da condição de saturação do solo e da máxima taxa de infiltração definida pelo usuário. Assim, a cada intervalo a infiltração potencial de água no solo é calculada pela Equação 1.

$$PotSoilInfil = MaxSoilInfilt - \frac{CurSoilStore}{MaxSoilStore} \times MaxSoilInfil \quad 1$$

Sendo *PotSoilInfil* a infiltração potencial de água no solo; *MaxSoilInfil* a taxa máxima de infiltração definida pelo usuário; *CurSoilStore* o volume de água armazenado no solo no início do intervalo de tempo; e *MaxSoilStore* a capacidade máxima de armazenamento de água no solo. Se a taxa de infiltração for superior a infiltração potencial de água no solo, o excesso passa a contribuir para o escoamento superficial. Nos casos extremos: quando não há água armazenada no solo, a infiltração potencial de água no solo se iguala a máxima taxa de infiltração; quando a camada de solo está completamente saturada, a infiltração potencial é zero, gerando escoamento superficial.

O processo de percolação da água da camada do solo para o aquífero superior representado pela Equação 2 é função da máxima taxa de percolação definida pelo usuário e da condição de saturação da camada do solo e da capacidade de armazenamento aquífero.

$$PotSoilPerc = MaxSoilPerc - \left( \frac{CurSoilStore}{MaxSoilStore} \right) \times \left( 1 - \frac{CurGwStore}{MaxGwStore} \right) \quad 2$$

Sendo *PotSoilPerc* a taxa de percolação potencial entre o solo e o aquífero; *MaxSoilPerc* a máxima taxa de percolação definida pelo usuário; *CurSoilStore* o volume de água armazenado no solo no início do intervalo de tempo; *MaxSoilStore* a capacidade máxima de armazenamento de água no solo; *CurGwStore* é o volume de água armazenado no aquífero no início do intervalo de tempo; *MaxGwStore* o volume máximo de armazenamento no aquífero.

A taxa máxima de percolação ocorre quando o solo está praticamente cheio e o aquífero praticamente vazio, e ao passo que o aquífero começa armazenar mais água deixando a camada do solo fica mais seca, menor é a taxa de percolação. Quando um segundo aquífero é modelado, uma equação análoga a Equação 2 é aplicável.

O fluxo de saída do aquífero é dado pela soma dos fluxos de cada camada de aquífero modelada no final do intervalo, computando o escoamento de base como se os aquíferos fossem reservatórios lineares. A evapotranspiração potencial é satisfeita inicialmente pela vegetação, depois pela interceptação do terreno e finalmente do solo. Quando há água na camada superior, a evapotranspiração real é igual a potencial, e quando há água apenas na camada em que esta encontra-se aderida às partículas do solo (*tension zone*), a evapotranspiração real é uma porcentagem da evapotranspiração potencial.

### **Propagação do escoamento superficial: *SCS Unit Hydrograph***

O hidrograma unitário do Soil Conservation Service (SCS) dos EUA é um hidrograma unitário adimensionalizado no tempo pelo tempo de pico ( $T_p$ ). Ele foi originalmente apresentado em 1975 e apresenta um tempo de base igual cinco vezes o  $T_p$ , uma unidade do  $T_p$  até a vazão de pico e quatro unidades de  $T_p$  para representar a recessão. Até o tempo de pico, o hidrograma unitário escoia 37,5% do seu volume. Essa definição corresponde a um fator de pico adimensional de 484 quando utilizadas unidades americanas (*US Customary unit system*). Uma discussão aprofundada sobre o fator de pico para hidrogramas unitários pode ser encontrada em Silveira (2016). Ainda, para aplicação do método deve-se informar o tempo de retardo de cada sub-bacia calculado como 60% do tempo de concentração.

### **Escoamento de base: *Linear reservoir***

O escoamento de base é representado por um reservatório linear para modelar a recessão do hidrograma depois de um evento de chuva. O princípio de conservação de massa na bacia hidrográfica é respeitado, já que a infiltração é conectada com o fluxo de saída do aquífero. Com base na aproximação de que a curva de recessão de um hidrograma pode ser representada pela Equação 3, a constante  $k$  que caracteriza o tempo de resposta do aquífero (*GW1 Coefficient* e/ou *GW2 Coefficient*) pode ser calculada.

$$Q(t) = Q_0 \times e^{\frac{-t}{k}} \quad 3$$

Sendo  $Q(t)$  a vazão no instante  $t$ ;  $Q_0$  a vazão no instante  $t_0$ ;  $k$  uma constante com as mesmas unidade do tempo  $t$ . Ademais, uma vazão de base inicial precisa ser determinada pelo usuário. Como o período de aquecimento do modelo será descartado das análises, esse valor pode ser considerado zero.

### **Propagação no rio: *Muskingum-Cunge***

A fim de simplificar a representação da propagação de ondas de cheia em rios, métodos como o de Muskingum-Cunge podem ser empregados. O método selecionado tem como vantagem a estimativa dos parâmetros K e X de método de Muskingum através de características físicas do rio. O método é baseado na solução da equação da continuidade e da equação da difusão do momento. Os parâmetros K e X são recalculados ao longo do tempo durante o evento de cheia, com base no intervalo de tempo da simulação. As equações matemáticas do método de Muskingum-Cunge são descritas em detalhe no manual de referência técnica (USACE-HEC, 2000).

### **Propagação em reservatório: *Outflow curve***

O método utilizado para propagação em reservatórios é intitulado *outflow curve routing* por representar o reservatório em função de uma relação entre o volume e a vazão. A relação entre o volume e a vazão deve ser única. A simulação é feita utilizando o método de Puls modificado. A relação do volume pode ser expressa de três maneiras distintas: volume-vazão, cota-volume-vazão e cota-área-vazão. A relação escolhida para representar os reservatórios existentes foi elevação-área-vazão para a qual o usuário deve fornecer uma curva cota-área e cota-vazão. Com isso, o programa é capaz de transformar a curva cota-área em uma curva cota-volume. Independente da maneira selecionada para representar a relação do volume, a propagação é simulada apenas com a curva volume-vazão. Depois da propagação ter sido computada, utilizando apenas a curva volume-vazão, o programa computa a cota e a área para cada intervalo de tempo.

Ainda, uma condição inicial para computar o volume armazenado no início da simulação. A condição selecionada foi *inflow=outflow*. Essa condição computa a vazão que chega ao reservatório no início da simulação e utiliza a curva volume-vazão para determinar o volume necessário para obter a mesma vazão de saída no reservatório.

## **4.2.3 Simulação de eventos**

### **Perdas e geração de escoamento superficial: *SCS Curve Number***

O método intitulado SCS (*Soil Conservation Service*) Curve Number estima a chuva efetiva como uma função da chuva acumulada, do uso e tipo do solo e da condição antecedente de umidade do solo, usando a Equação 4.

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

Sendo  $Q$  a chuva efetiva ou escoamento superficial (mm);  $P$  a precipitação que ocorreu ao longo do evento de chuva (mm);  $I_a$  são as perdas iniciais que englobam o acúmulo d'água na superfície, interceptação e infiltração no solo antes do início da geração de escoamento superficial (mm);  $S$  é a máxima infiltração acumulada potencial (mm).

Até que a chuva acumulada supere as perdas iniciais, o escoamento superficial é zero. A máxima infiltração potencial  $S$  é função das características da bacia expressas através de um parâmetro adimensional  $CN$  e pode ser calculada pela Equação 5. O valor do  $CN$  varia de 0 a 100, sendo o limite inferior a extrapolação de um solo com capacidade de infiltração infinita, e o limite superior um solo totalmente impermeável.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad 5$$

Finalmente, o  $CN$  é função do tipo e uso do solo na bacia, parâmetro desenvolvido a partir de experimentos em bacias pequenas nos Estados Unidos. Os solos do SCS são divididos em 4 categorias: A, B, C e D, caracterizados em função do potencial para geração de escoamento superficial. Solos do tipo A possuem alta capacidade de infiltração e baixo potencial para geração de escoamento; no outro extremo, os solos do tipo D apresentam solos com capacidade de infiltração baixa e alto potencial para geração de escoamento. Collischonn & Dornelles (2015) apresentam tabelas com valores do parâmetro  $CN$  para diferentes tipos e usos do solo em bacias urbanas e rurais, assim como o próprio Manual de Referência Técnica do HEC-HMS (USACE-HEC, 2000).

### **Propagação de escoamento superficial: *SCS Unit Hydrograph***

O método utilizado para geração de escoamento superficial é o mesmo apresentado no item 4.2.2.

### **Escoamento de base: *Constant monthly***

No modelo de eventos, o método utilizado para adição do escoamento de base foi o *constant monthly baseflow* que permite especificar uma vazão de base constante para cada mês do ano. Esse método não segue o princípio de conservação de massa e tem seu uso previsto para simulação contínua, em que a vazão de base pode ser aproximada por um valor constante mensal.

### **Propagação: *Muskingum-Cunge***

O método utilizado para propagação do escoamento no rio é o mesmo apresentado no item 4.2.2.

### Reservatório: *Outflow curve*

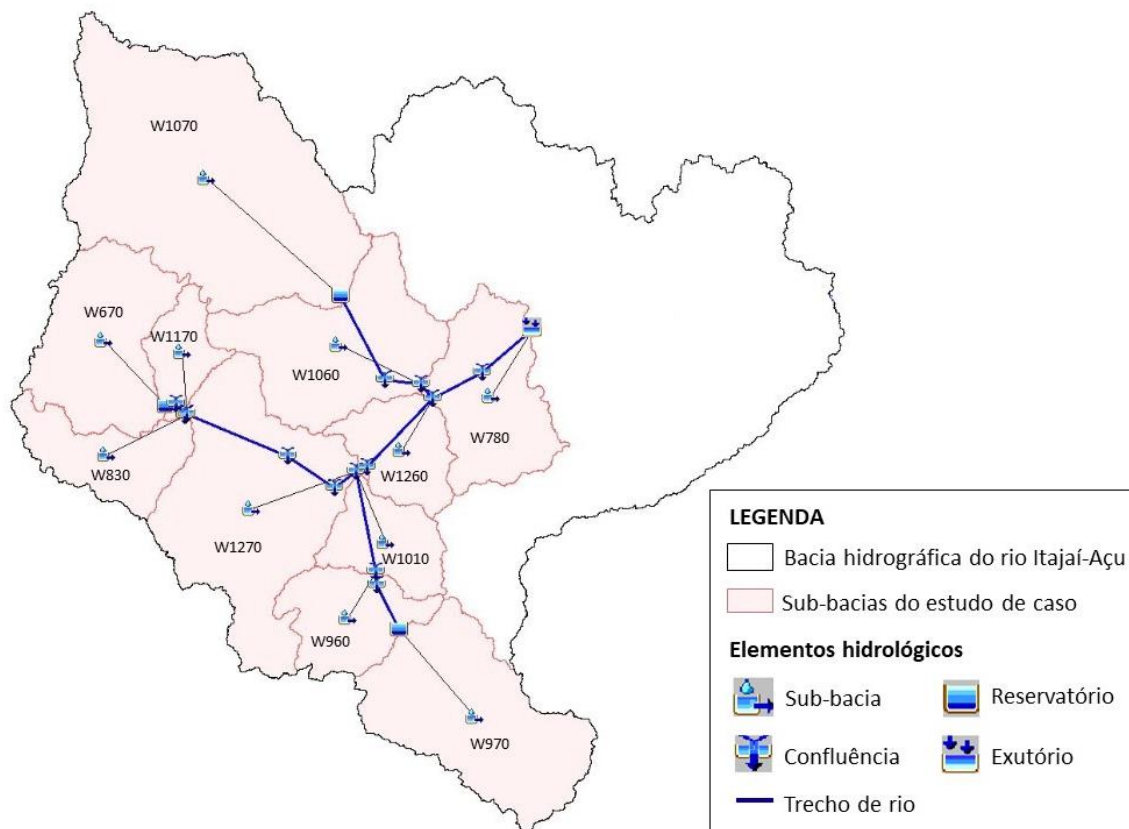
O método utilizado para propagação da onda de cheia em reservatórios é o mesmo apresentado no item 4.2.2.

#### 4.2.4 Aplicação na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu

A bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu foi discretizada com as ferramentas oferecidas pela extensão *HEC-GeoHMS* (USACE-HEC, 2009) acoplada ao software ArcGIS 10.3 (ESRI, 2014). Para delimitação da bacia hidrográfica, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina (SDS-SC) via portal SIGSC (<<http://sigsc.sds.sc.gov.br>>) cuja a resolução espacial de 1 m foi reamostrada para 30 m.

A Figura 10 apresenta a discretização da bacia hidrográfica para o presente estudo. O modelo distribuído aplicado à área de estudo é composto por onze sub-bacias, dezesseis trechos de rio, três reservatórios, quatorze confluências e o exutório principal da bacia hidrográfica de interesse.

Figura 10. Discretização da bacia hidrográfica para o estudo de caso.



As confluências ou *junctions* são criadas a cada encontro da rede de drenagem principal com os demais afluentes e podem ser adicionadas como pontos de controle, isto é, locais onde é possível

comparar os valores de vazão observados (postos fluviométricos de interesse) com os valores de vazão simulados. Novos trechos de rio são criados a cada confluência. Os reservatórios incorporados ao modelo são os três principais reservatórios para controle de cheias construídos na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu: a barragem Norte, a barragem Oeste e a barragem Sul. Assim, o modelo hidrológico compreende parte considerável da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu e de seus cursos d'água principais.

A área do estudo de caso tem aproximadamente 9.850 km<sup>2</sup> e compreende as bacias hidrográficas dos rios Itajaí do Oeste, Itajaí do Sul, Itajaí do Norte e o rio Itajaí-Açu até a estação fluviométrica de Indaial, local escolhido como exutório da bacia hidrográfica do estudo e como posto de referência para calibração do modelo chuva-vazão. A Tabela 4 apresenta os elementos hidrológicos que compõem o modelo da bacia hidrográfica (*basin model manager*). Características físicas dos elementos hidrológicos como a área e centroide das sub-bacias, comprimentos de trechos de rio e suas respectivas declividades são parâmetros obtidos diretamente das ferramentas disponibilizadas pela extensão do *HEC-GeoHMS*.

Tabela 4. Elementos hidrológicos da bacia hidrográfica do estudo.

Sub-bacia	Trecho de rio	Confluência	Reservatório	Exutório
W970	R430	J212	Barragem Sul	Indaial (83690000)
W960	R1030	J206	Barragem Oeste	
W1010	R400	J173	Barragem Norte	
W670	R300	J208		
W1170	R330	J209		
W830	R1180	J168		
W1270	R340	J180		
W1260	R380	J203		
W1070	R390	J216		
W1060	R1280	Ituporanga (83250000)		
W780	R360	Taió (83050000)		
	R310	Rio do Sul (83300002 e 83300200)		
	R220	Ibirama (83440000)		
	R1090	Indaial (83690000)		
	R1140			
	R280			

Ainda, para ambas as metodologias de simulação empregadas, características como o tempo de concentração de cada sub-bacia e sua área impermeável são requisitadas pelos métodos explicitados

nos itens 4.2.2 e 4.2.3. O tempo de concentração foi estimado pela equação de Watt e Chow (DINGMAN, 2002), conforme citado por Collischonn & Dornelles (2015), e a área impermeável foi estimada com base na mancha urbana do arquivo vetorial de uso do solo (GEOAMBIENTE, 2008) disponibilizado pela PPMA/SC (Projeto de Proteção da Mata Atlântica em Santa Catarina) em parceria com a FATMA (Fundação do Meio Ambiente). A Tabela 5 apresenta os parâmetros necessários para parte da caracterização das sub-bacias.

Tabela 5. Parâmetros estimados para implementação do modelo hidrológico da bacia hidrográfica.

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Área impermeável (%)	Tempo de concentração (h)	Tempo de retardo (h)
W970	1165,50	0,24	19	11
W960	477,98	1,50	11	7
W1010	381,86	1,17	16	9
W670	850,76	0,22	27	16
W1170	254,17	1,65	16	9
W830	461,80	0,31	27	16
W1270	1474,40	1,80	32	19
W1260	404,61	2,25	17	10
W1070	2323,40	0,15	52	31
W1060	1004,10	0,93	28	17
W780	1051,37	1,08	25	15

### Uso e tipo de solo

A classificação do uso do solo na área da bacia hidrográfica do estudo foi obtida do arquivo vetorial (GEOAMBIENTE, 2008) disponibilizado pela PPMA/SC (Projeto de Proteção da Mata Atlântica em Santa Catarina) em parceria com a FATMA (Fundação do Meio Ambiente). A classificação do tipo de solo foi obtida do arquivo vetorial disponibilizado via portal EPAGRI/CIRAM (EMPRABA, 2004).

Quanto ao uso do solo na bacia hidrográfica de interesse, verifica-se uma clara predominância de florestas em diferentes estágios, culturas agrícolas e pastagens e campos naturais. Ainda, a presença de manchas urbanas pode ser observada junto aos cursos d'água, representando cidades importantes como Taió, Ituporanga, Rio do Sul, José Boiteux, Ibirama e Indaial. Quanto à ocorrência do solo na bacia hidrográfica, verifica-se a predominância de cambissolos, solos litólicos, podzólico vermelho-amarelo e solos tipo glei. Ressalta-se a acentuada ocorrência de cambissolos e solos litólicos na bacia, solos caracterizados pelo seu alto potencial para geração de escoamento superficial e por baixas taxas de infiltração quando completamente saturados.



A Figura 11 e a Figura 12 apresentam, respectivamente, a classificação do uso do solo e a classificação do tipo de solo para a bacia hidrográfica analisada.

Figura 11. Mapa de classificação do uso do solo para a bacia hidrográfica de interesse.

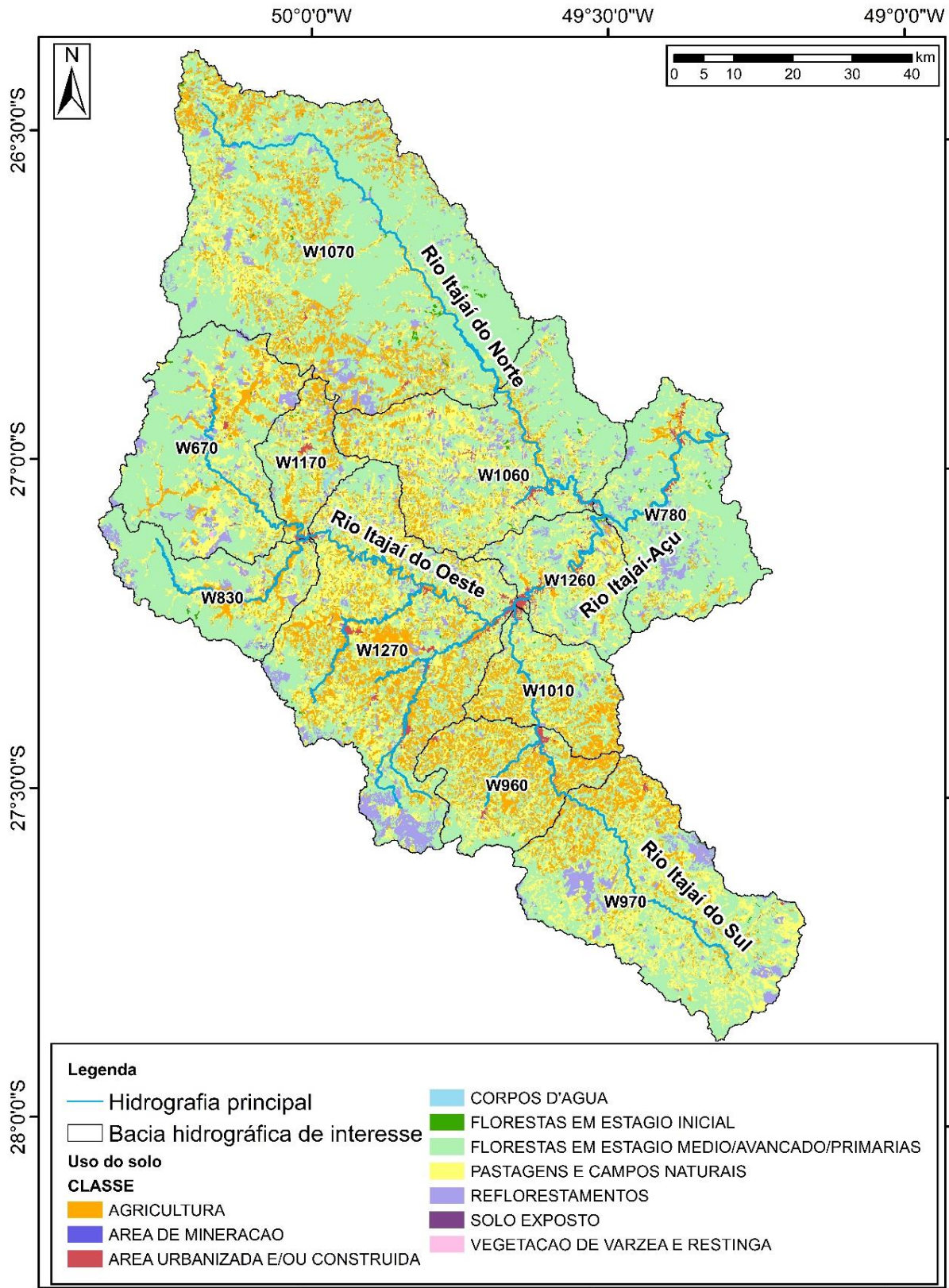
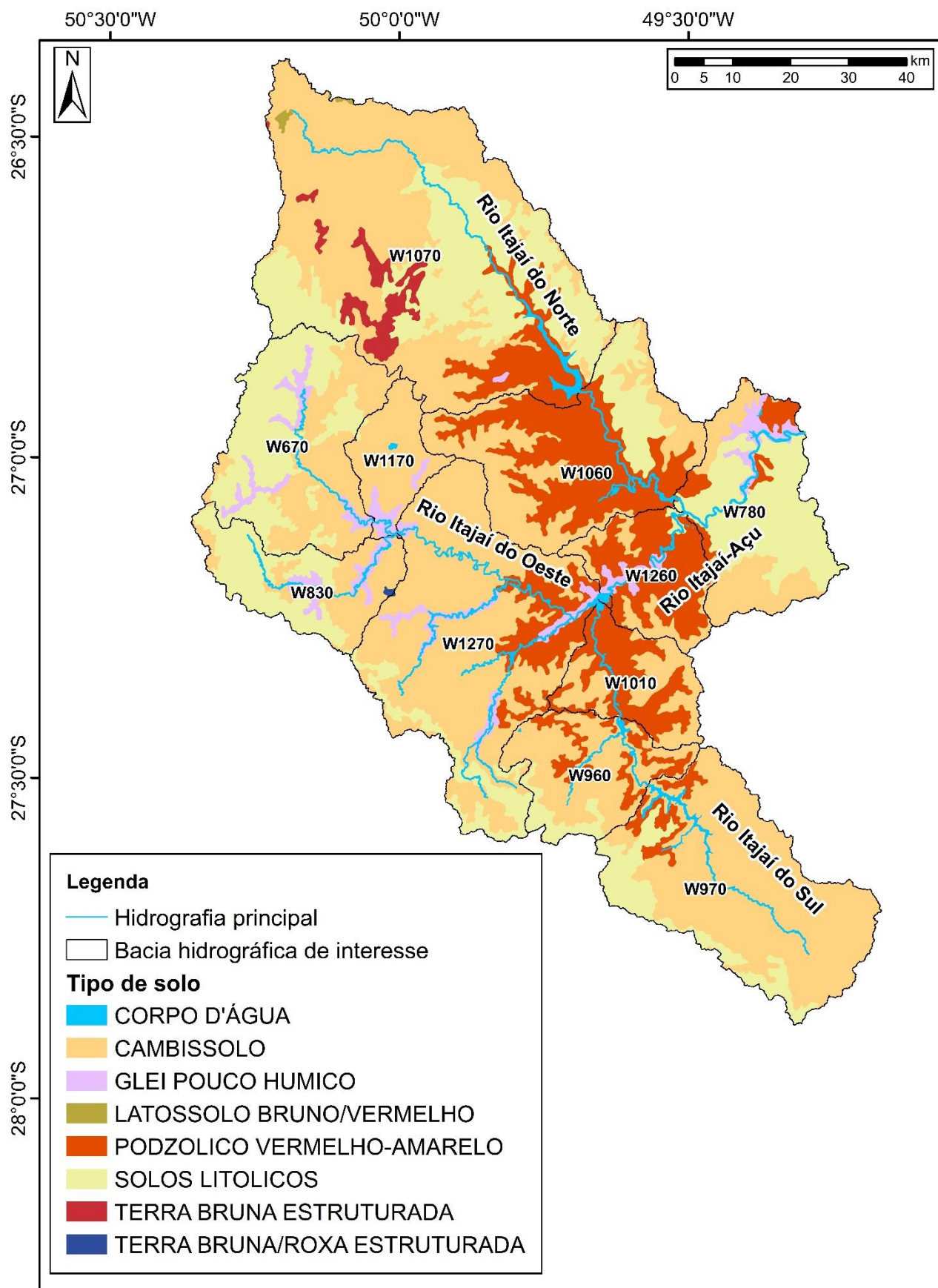


Figura 12. Mapa de classificação do tipo de solo para a bacia hidrográfica de interesse.



### **Postos pluviométricos**

Os dados de entrada de chuva no modelo foram obtidos com auxílio da ferramenta de interpolação do MGB (inverso do quadrado das distâncias). Dados diários de chuva de 129 postos pluviométricos da ANA (Agência Nacional de Águas) no interior e no entorno da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu foram interpolados pelo inverso do quadrado da distância para o centroide de cada sub-bacia (FLEISCHMANN et al., 2018a). Assim, estações virtuais fictícias com séries diárias de precipitação de 1950 a 2016 foram utilizados para espacialização da chuva no modelo meteorológico de ambas as metodologias de simulação – contínua e de eventos.

### **Postos fluviométricos**

Para avaliação do modelo hidrológico chuva-vazão foram selecionados cinco postos fluviométricos com dados diários de vazão situados em diferentes pontos da bacia hidrográfica: um único posto fluviométrico junto ao exutório da bacia de estudo utilizado para calibração do modelo hidrológico (posto de calibração e verificação) e quatro postos fluviométricos em pontos interiores da bacia para posterior análise da capacidade preditiva do modelo em representar vazões em locais que não foram utilizados para calibração (postos de verificação exclusiva).

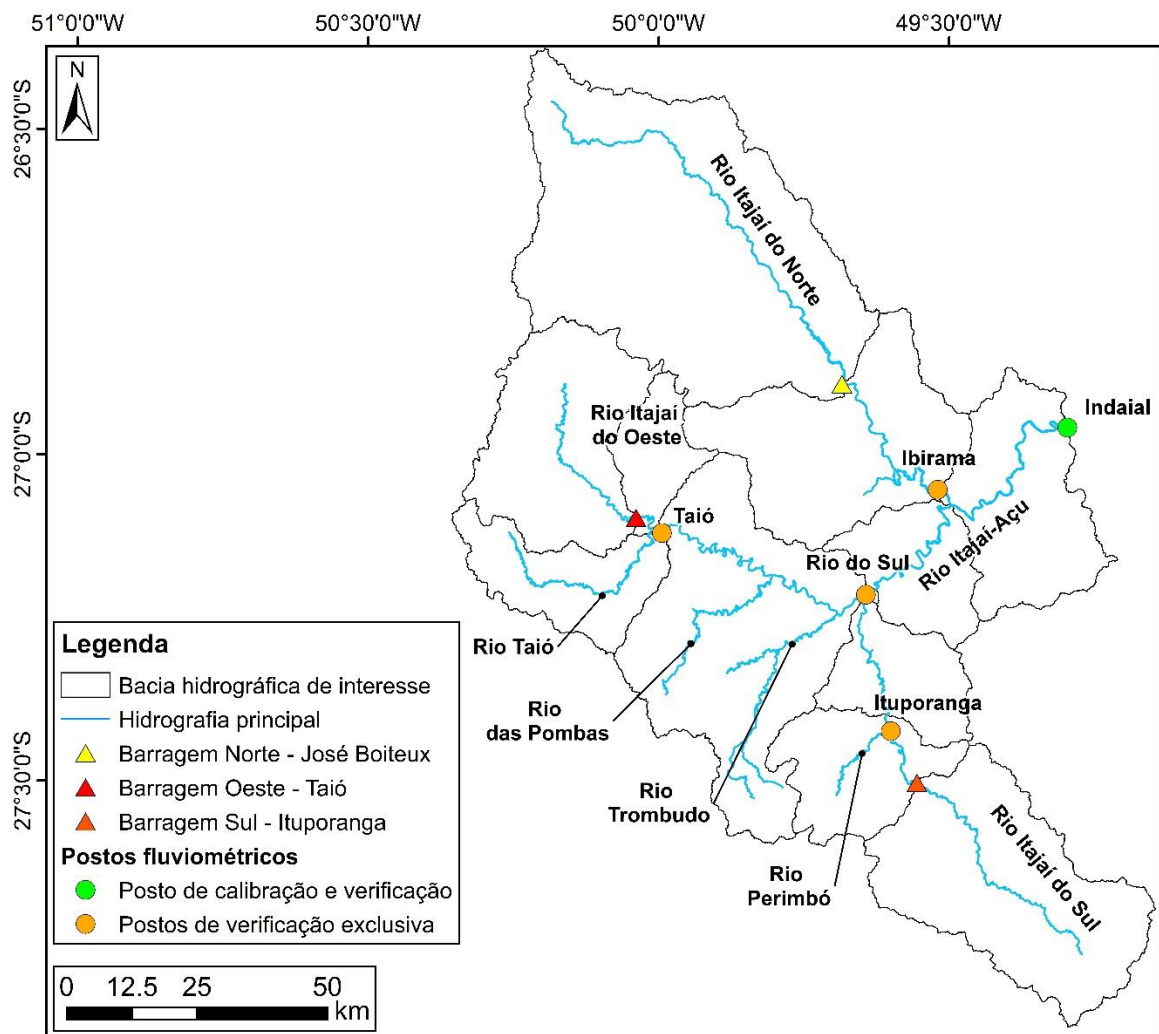
O posto fluviométrico selecionado para calibração do modelo está situado no município de Indaial, com área de drenagem (9.850 km<sup>2</sup>) suficiente para caracterização da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu (15.000 km<sup>2</sup>). Ainda, o posto fluviométrico de Indaial (código ANA 83690000) foi verificado quanto à consistência dos dados observados, constatando-se que é um posto confiável para calibração e posterior verificação dos modelos de chuva-vazão em modo de eventos e de simulação contínua.

A seleção dos demais postos fluviométricos para avaliação do modelo hidrológico tem por objetivo verificar se o modelo calibrado apenas com dados observados do posto de Indaial é capaz de representar adequadamente as vazões em outros pontos da bacia (postos de verificação exclusiva). Os postos fluviométricos de interesse para avaliação do modelo são Ituporanga, Taió, Rio do Sul e Ibirama e têm sua localização apresentada na Figura 13. A Tabela 6 apresenta informações relevantes dos postos fluviométricos pertinentes ao estudo.

Tabela 6. Postos fluviométricos selecionados para calibração/verificação do modelo.

Posto fluviométrico	Código ANA	Latitude	Longitude	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Série temporal
Ituporanga	83250000	27° 23' 54.96"	49° 36' 20.88"	1650	1929-2014
Taió	83050000	27° 6' 50.04"	49° 59' 43.08"	1570	1929-2014
Rio do Sul/Rio do Sul - Novo	83300002/ 83300200	27° 12' 28.08"	49° 37' 45.12"	5160	1941- 2014
Ibirama	83440000	27° 3' 14.04"	49° 31' 0.12"	3330	1928-2014
Indaial	83690000	26° 53' 27.96"	49° 14' 6.00"	9850	1929-2007

Figura 13. Mapa de localização das estações fluviométricas pertinentes ao estudo.



### Seções topobatimétricas

As seções topobatimétricas necessárias para a propagação da onda de cheia nos trechos de rio tiveram sua geometria estimada com auxílio de imagens de satélite para estimativa das larguras



médias da calha principal e da planície de inundação; as profundidades médias foram estimadas com base área de drenagem associada a cada seção analisada, conforme apresentado por Fleischmann et al (2018b).

As seções topobatimétricas foram representadas por uma geometria de oito pontos (*eighth-point cross section*), com o objetivo de representar as planícies de inundação presentes em trechos consideráveis dos rios simulados - sobretudo no rio Itajaí do Oeste e em parte do rio Itajaí-Açu - e reproduzir o efeito de atenuação na propagação de vazão dos modelos hidrológicos. O coeficiente de rugosidade de Manning adotado para o rio e para a planície de inundação correspondem 0,035 e 0,1 respectivamente (CHOW, 1959). As seções topobatimétricas estimadas para os trechos de rio podem ser apresentadas no Anexo A.

### Reservatórios

Os três principais reservatórios do sistema de controle cheias na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu foram incorporados ao modelo hidrológico: a barragem Oeste, a barragem Norte e a barragem Sul. Para caracterização das barragens, utilizou-se as equações das estruturas extravasoras e do volume do reservatório documentadas no Projeto de Prevenção e Mitigação de Desastres na Bacia do rio Itajaí (JICA, 2011). Ainda que as fontes consultadas apresentassem divergências acerca das características das barragens (Tabela 3), optou-se por utilizar o relatório elaborado pela JICA (2011) devido à disponibilidade das equações necessárias à incorporação dos reservatórios ao HEC-HMS. Para inserção dos dados no modelo, as relações cota-área dos reservatórios foram obtidas da derivação da equação do volume dos reservatórios, e as relações cota-vazão foram obtidas diretamente do somatório das equações das estruturas extravasoras de cada barramento apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Equações utilizadas para caracterização dos reservatórios incorporados ao modelo hidrológico (fonte: adaptado de JICA, 2011).

Barragem	Estruturas	Equação utilizada
Barragem Oeste (Taió)	Descarregador de fundo	$Q = 0,6667 \cdot 7 \cdot 1,7663 \sqrt{2g(H - 340,05)}$ , se $H < 360$ m
	Vertedouro	$Q = 2,1658 \cdot 100 \cdot (H - 360)^{1,5}$ , se $H \geq 360$ m
	Curva cota-volume	$V = 0,18192 \cdot (H - 338,64)^2 \cdot 10^6$
Barragem Sul (Ituporanga)	Descarregador de fundo	$Q = 0,8901 \cdot 5 \cdot 1,7663 \sqrt{2g(H - 368)}$ , se $H < 399$ m
	Vertedouro	$Q = 2,0758 \cdot 65 \cdot (H - 399)^{1,5}$ , se $H \geq 399$ m
	Curva cota-volume	$V = 0,17033 \cdot (H - 375,57)^2 \cdot 10^6$

Barragem Norte (José Boiteux)	Descarregador de fundo	$Q = 74.H - 19092$ , se $H < 259$ m
		$Q = 3,8.H - 910,2$ , se $259 \leq H < 264$ m
		$Q = 92.H - 24195$ , se $H < 265$ m
		$Q = 0,89513 \cdot 2 \cdot 6,76 \cdot \sqrt{2g(H - 253)}$ , se $265 \leq H < 295$ m
	Vertedouro	$Q = 2,0506 \cdot 100 \cdot (H - 295)^{1,5}$ , se $H \geq 295$ m
Curva cota-volume	$V = 0,17825 \cdot (H - 250,69)^2 \times 10^6$	

\*H é o nível da barragem (m), Q é a defluência da respectiva estrutura hidráulica ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e V é o volume ( $\text{m}^3$ ).

#### 4.2.5 Testes realizados e métricas de avaliação

Após a implementação do modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica de interesse, buscou-se analisar influência das metodologias de simulação empregadas (simulação contínua e de eventos) na modelagem hidrológica realizada no software HEC-HMS v 4.1 para estimativa de hidrogramas de cheia. Os testes realizados para a calibração e verificação do modelo em modo de eventos e de simulação contínua consistem inicialmente na definição eventos de interesse (vazões máximas anuais) e de um período longo de calibração e verificação do modelo hidrológico utilizando a estação fluviométrica de Indaial como único posto de referência para a calibração e verificação do modelo. Os demais postos fluviométricos (Taió, Ituporanga, Rio do Sul e Ibirama) – postos de verificação exclusiva - servem como pontos de avaliação da capacidade do modelo em representar os mesmos eventos de calibração e verificação selecionados para Indaial em outros pontos da bacia hidrográfica ainda que esses eventos não caracterizem eventos de máxima anual. De modo a tornar os resultados comparáveis, a seleção de eventos para calibração e verificação do modelo de eventos foi feita no mesmo período definido para calibração e verificação do modelo em simulação contínua.

O posto fluviométrico de Indaial apresenta uma série histórica de dados diários de vazão de 1929 a 2007. Devido à documentação de cheias históricas na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu nos últimos 50 anos e à disponibilidade de dados observados de vazão para os postos fluviométricos supracitados, definiu-se como período de calibração o período de 1970 a 1990 (21 anos de dados). Esse período contempla cheias históricas (e.g. evento de 1983) e possui poucas falhas nos dados observados para os outros postos analisados. O período de verificação foi definido como o restante da série de vazões registrada para Indaial: 1991 a 2007 (16 anos de dados).

A definição de eventos de interesse para calibração e verificação do modelo com base nos dados observados de Indaial teve por objetivo avaliar a capacidade do modelo em representar cheias de diferentes magnitudes. Assim, os quatro eventos selecionados para calibração do modelo correspondem às máximas diárias anuais observadas em Indaial em 1974, 1975, 1983 e 1990; e os

quatro eventos selecionados para verificação correspondem às máximas diárias anuais registradas em 1993, 1996, 1997 e 2001. Eventos de interesse, como a cheia 1992 e a cheia de 1984 foram excluídos da seleção por apresentarem falhas na série de vazão no período do evento. As vazões máximas anuais observadas nos eventos ( $Q_p$ ), o período do evento e os respectivos tempos de retorno (TR) dos eventos selecionados são apresentados na Tabela 8. A Figura 14 e a Figura 15 apresentam os hidrogramas observados para os eventos selecionados para calibração e verificação do modelo em Indaial e os respectivos hidrogramas observados nos demais postos.

Tabela 8. Caracterização dos eventos selecionados para calibração e verificação do modelo em modo de SC e de EV.

Período	Eventos selecionados	$Q_p$ observada ( $m^3.s^{-1}$ )	Período do evento	TR – Gumbel (anos)*
Calibração (1970 -1990)	EV 1974	1.174	01/01 - 25/01	1,3
	EV1975	2.533	17/09 - 17/10	4,5
	EV 1983	5.078	28/06 - 24/07	109,0
	EV 1990	2.084	06/10 - 30/10	2,8
Verificação (1991 -2007)	EV 1993	1.807	15/09 - 02/10	2,1
	EV 1996	1.116	25/06 – 25/07	1,3
	EV 1997	2.406	20/01 – 14/02	3,9
	EV 2001	3.133	26/09 – 13/10	9,2

\*A análise das vazões máximas anuais e dos respectivos tempos de recorrência (TR) foi realizada através da distribuição de Gumbel para os dados diários de vazão registrados em Indaial (1929-2007).

A análise do modelo em modo de simulação contínua permite comparar as curvas de distribuição de frequências de vazões máximas anuais observadas e simuladas para todos os postos fluviométricos pertinentes ao estudo (i.e. posto de calibração e verificação e os demais postos de verificação exclusiva). Para a análise comparativa de ambas as metodologias de simulação empregadas, os hidrogramas de cheia foram avaliados quanto a duas situações: vazões máximas anuais obtidas para os eventos selecionados no posto de calibração e verificação e vazões máximas obtidas no mesmo período dos eventos selecionados nos postos de verificação exclusiva. Assim, os hidrogramas simulados foram avaliados com base nas seguintes análises:

- i. Comparação das curvas de distribuição de frequências de vazões máximas anuais observadas e simuladas para todos os cinco postos fluviométricos pertinentes à metodologia do estudo (Indaial, Taió, Ituporanga, Rio do Sul e Ibirama);
- ii. Erro relativo percentual das vazões de pico;
- iii. Erro relativo percentual dos volumes;

iv. Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE).

Tipicamente, a avaliação do desempenho de modelos hidrológicos é feita com base na comparação dos valores das variáveis observadas e simuladas. No presente estudo, utilizou-se o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) calculado conforme a Equação 6 para avaliar o desempenho do modelo hidrológico nas fases de calibração e verificação.

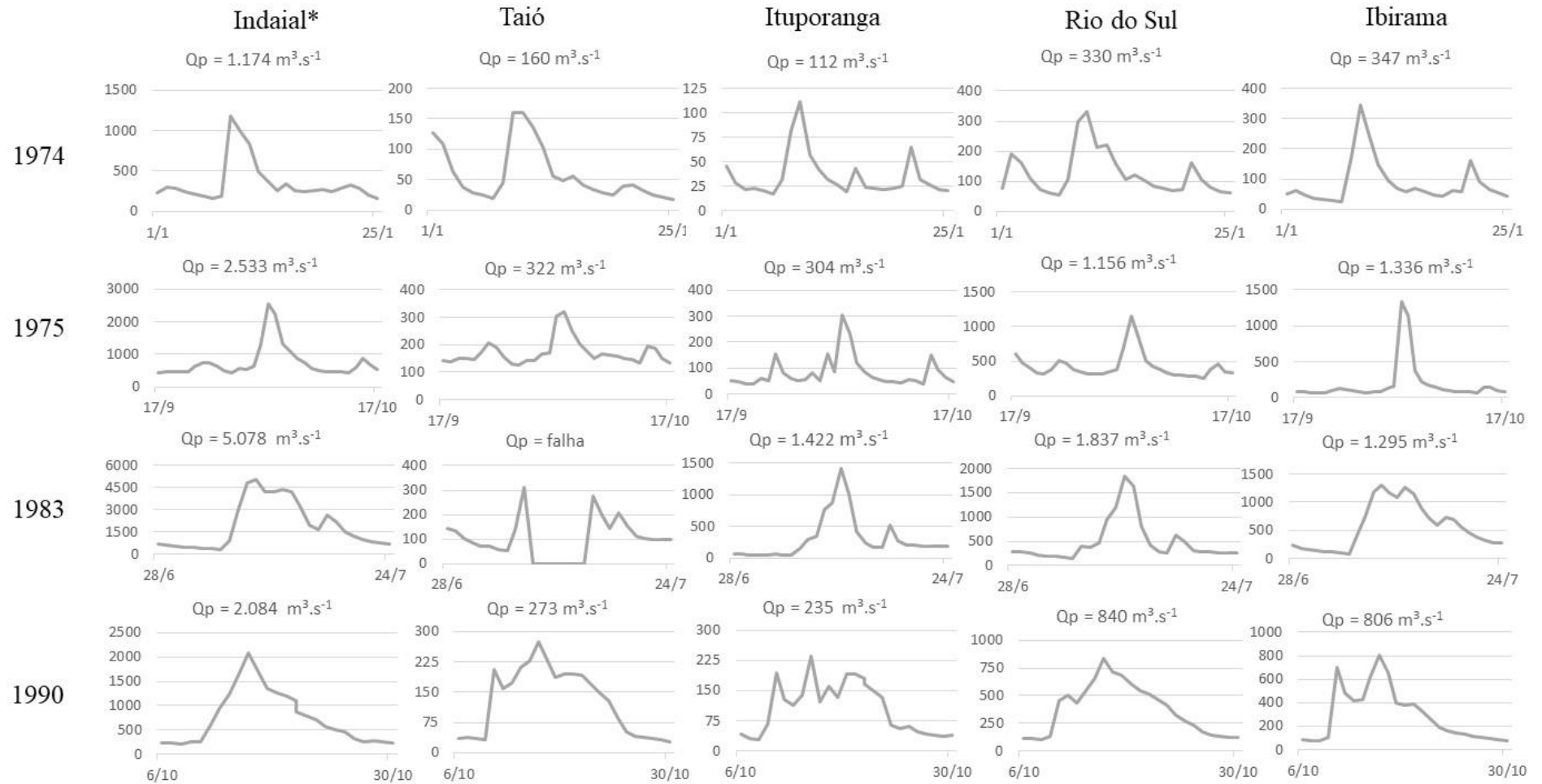
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \overline{Qobs})^2} \quad 6$$

O NSE é definido como um menos o somatório do quadrado da diferença entre os valores observados e simulados normalizado pela variância dos valores observados durante o período avaliado. O coeficiente de Nash-Sutcliffe varia de  $-\infty$  a 1, sendo 1 o valor indicativo de um ajuste perfeito entre os dados simulados e observados.

A fim de comparar as metodologias de simulação de forma global, definiu-se a mediana como medida do conjunto de dados obtidos para os diferentes eventos. Diferentemente da média, a mediana do conjunto de valores para os eventos selecionados tem a vantagem de não ser distorcida por valores extremamente altos ou baixos. Visto que a análise das metodologias de simulação consiste nas métricas obtidas para quatro eventos de calibração e quatro eventos de verificação, análises estatísticas dos dados não foram aplicadas ao estudo.

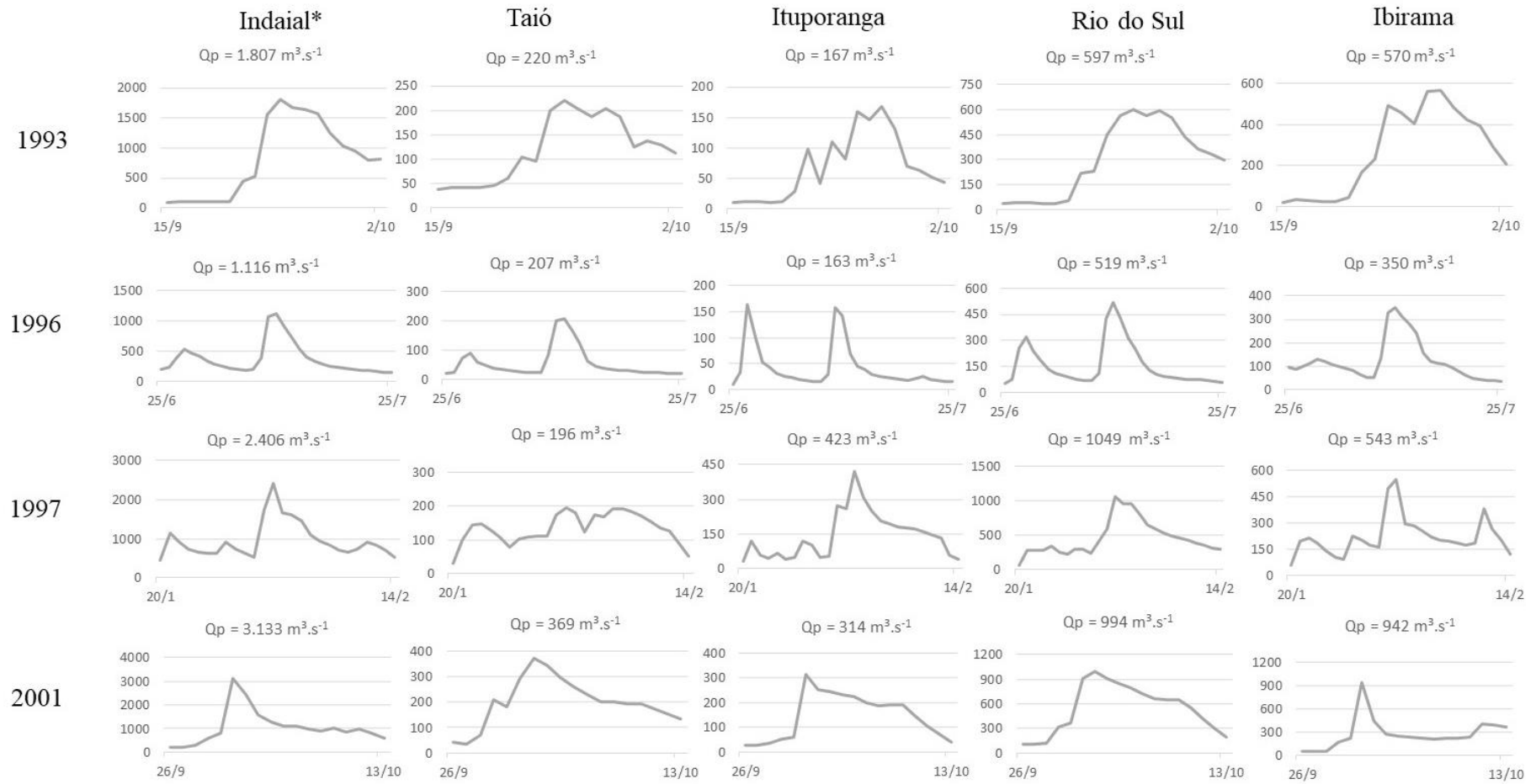


Figura 14. Hidrogramas observados dos eventos selecionados em Indaial\* nos demais postos.



\*Posto utilizado para calibração do modelo.

Figura 15. Hidrogramas observados dos eventos selecionados em Indaial\* nos demais postos.



\*Posto utilizado para calibração do modelo.

## **5 RESULTADOS**

Os resultados para o ponto de calibração e verificação, para o qual pode-se analisar a eficiência de ambas as metodologias para a estimativa de hidrogramas de cheia serão descritos no item 5.1. Os parâmetros utilizados para obtenção dos resultados do modelo chuva-vazão em modo de simulação contínua e de eventos serão descritos no item 5.1.1. Os resultados obtidos para os eventos selecionados para calibração e verificação em Indaial serão apresentados no item 5.1.2. Por fim, os resultados para os postos de verificação exclusiva, para os quais se pode avaliar a capacidade do modelo em representar vazões em pontos não calibrados da bacia, serão descritos no item 5.2. Representações gráficas referentes a valores observados serão apresentados em cinza, os resultados referentes à modelagem em modo de simulação contínua (SC) serão apresentados em amarelo e os resultados referentes ao modelo de eventos (EV) serão apresentados em azul.

### **5.1 DESEMPENHO NO POSTO DE CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO**

A análise no posto de calibração e verificação (Indaial) tem como objetivo permitir a avaliação do desempenho de ambas as metodologias na estimativa de hidrogramas de cheia e de vazões máximas anuais.

#### **5.1.1 Etapa de calibração e parâmetros utilizados**

A definição do intervalo da simulação da modelagem hidrológica foi baseada no compromisso entre o esforço computacional, a representatividade dos processos hidrológicos (i.e. intervalo de tempo da mesma ordem de grandeza do tempo de concentração das sub-bacias) e na compatibilidade do intervalo temporal dos dados de entrada, dados diários de precipitação, e dos dados de saída com os dados observados (vazões diárias). Assim, o intervalo diário foi estabelecido para o modelo de eventos e de simulação contínua.

Quanto à etapa de calibração do modelo, dificuldades apresentadas por Collischonn & Tucci (2003) para o método de calibração automática com uso de algoritmos de mínimos locais tais como: interdependência entre os parâmetros, obtenção de mínimos locais para funções não lineares ou descontínuas em vez de mínimos globais e o fato de que um número elevado de

parâmetros associado a uma discretização detalhada da bacia pode conduzir a um processo lento e desorientado de calibração – tornaram preferível o uso da calibração manual para o modelo de simulação contínua.

Para o modelo de eventos, cuja a aplicação envolve uma quantidade menor de variáveis de estado, apenas o CN foi objeto de calibração automática. Os parâmetros calibrados para o modelo de eventos e simulação contínua – serão apresentados a seguir, assim como os demais parâmetros e dados requeridos de acordo com a especificidade das metodologias de simulação.

### **Modelo de eventos**

O modelo de eventos consiste nos métodos escolhidos para representar as perdas, geração de escoamento, a propagação da onda cheia no rio e nos reservatórios e o escoamento de base. As perdas e a geração de escoamento superficial representadas com o método do SCS dependem tipicamente do valor adotado para o CN e para o percentual da área impermeável; a propagação do escoamento superficial representada pelo hidrograma unitário adimensional do SCS tem como parâmetros o tempo de retardo e o fator de pico adimensional fixo; os coeficientes do método de Muskingum-Cunge são recalculados a cada intervalo de tempo e o escoamento de base foi adicionado de modo a representar não apenas a vazão de pico do hidrograma, mas o evento, por isso determinou-se uma vazão específica constante ao longo dos meses para cada sub-bacia.

Para adição do escoamento de base, determinou-se uma vazão de base média para o registro de vazões disponível do posto de Indaial de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Assim, cada sub-bacia teve uma vazão de base específica mensal constante (igual para todos os meses) conforme a Tabela 9.

Tabela 9. Vazão de base específica por sub-bacia.

Sub-bacias	$Q_{\text{base}} (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
W780	10,67
W1260	4,11
W1060	10,19
W1070	23,59
W1010	3,88
W960	4,85
W970	11,83
W1270	14,97

W830	4,69
W1170	2,58
W670	8,64

Assim, o único parâmetro calibrado no modelo de eventos foi o valor adimensional CN. O fator de pico adimensional adotado para todas as sub-bacias corresponde ao valor clássico de 484 (SILVEIRA, 2016). Para o cálculo do CN, considerou-se duas simplificações: apenas os três principais usos do solo na sub-bacia foram contabilizados (florestas, pastagens e agricultura) e o tipo de solo (C ou D) predominante na bacia foi considerado integralmente na sub-bacia. A classificação hidrológica dos solos brasileiros para o método do SCS foi realizada conforme Sartori et al (2005). O  $CN_{inicial}$  para cada sub-bacia foi calculado através da Equação 7 e inserido como valor inicial no método de calibração automática com a função objetivo NSE para cada evento de calibração.

$$CN_{inicial} = \frac{\sum A_i \times CN_i}{A_{total}} \quad 7$$

A Tabela 10 apresenta o valor de  $CN_{inicial}$  e os parâmetros CN calibrados individualmente para os eventos selecionados. Os valores de CN obtidos da calibração são, de modo geral, maiores do que os valores médios estimados, possivelmente para retratar de forma mais representativa as condições de umidade antecedentes ao evento ou ainda a duração das cheias que ocorrem na bacia do rio Itajaí-Açu formadas por cerca de 4 ou 5 dias de chuva. As métricas resultantes da etapa de calibração e posterior verificação do modelo serão apresentadas no capítulo 5.1.2.

Tabela 10. Valores calibrados do parâmetro CN utilizados no modelo de eventos.

Sub-bacias	$CN_{inicial}$	$CN_{1974}$	$CN_{1975}$	$CN_{1983}$	$CN_{1990}$	$CN_{médio}$
W780	78	76	99	79	78	83
W1260	73	99	99	99	81	95
W1060	76	72	53	76	75	69
W1070	79	70	79	79	79	77
W1010	75	49	49	99	52	62
W960	82	99	99	97	63	90
W970	80	49	99	99	80	82
W1270	81	74	82	82	80	80
W830	78	99	99	99	98	99
W1170	80	78	84	80	98	85
W670	79	45	76	99	79	75

### **Simulação contínua**

O modelo em modo de simulação contínua consiste nos métodos selecionados para representação dos processos hidrológicos de perdas e geração de escoamento, propagação do escoamento, adição do escoamento de base, propagação da vazão no rio e dinâmica de reservatórios. Ressalta-se que o método adotado para perdas em simulação contínua – *Soil Moisture Accounting* - engloba processos como a interceptação da vegetação existente (*canopy*), armazenamento em depressões locais do terreno (*surface*), infiltração e evapotranspiração. Em função da discretização da bacia hidrográfica, da grande quantidade de parâmetros necessários para representação dos processos hidrológicos e das limitações dos algoritmos de mínimos locais, a calibração do modelo em modo de simulação contínua foi feita manualmente, utilizando o mesmo conjunto de parâmetros para todas as sub-bacias. Apenas parâmetros do método SMA foram calibrados.

### **Vegetação e armazenamento em depressões**

Os parâmetros requeridos para representação da vegetação e do armazenamento na superfície do terreno foram estimados e não foram calibrados. A definição da máxima capacidade de armazenamento da vegetação foi estimada em 4 mm considerando o tipo de cobertura da bacia (florestas, campos e culturas agrícolas) e uma capacidade de interceptação específica entre 0,7 e 1,0 (COLLISCHONN & DORNELLES, 2015). O coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) para a vegetação existente (culturas agrícolas) foi definido como 1,1, coeficiente cuja faixa de valores varia de valores inferiores a 1 a valores pouco superiores a 1. O método *simple uptake* foi selecionado para extração de água do solo à mesma taxa da evapotranspiração potencial. A capacidade máxima de armazenamento na superfície do terreno foi estimada em 1 mm.

### **Perdas: Soil Moisture Accounting**

Dos parâmetros apresentados no capítulo 4.2.2 para o método do SMA, foram calibrados manualmente os seguintes parâmetros:

- i. Taxa máxima de infiltração de água no solo (*MaxSoilInfil*);
- ii. Capacidade máxima de armazenamento no solo (*MaxSoilStore*);
- iii. Capacidade máxima de armazenamento na zona de tensão (*MaxTenStore*);
- iv. Taxa máxima de percolação no solo (*MaxSoilPerc*);
- v. Capacidade do aquífero superior (*GWISore*);
- vi. Coeficiente do fluxo lateral do aquífero 1 (*GWl coefficient*).

As condições de saturação do solo e do aquífero no início da simulação foram ajustadas para zero, pois o período de aquecimento do modelo foi desconsiderado em análises posteriores. Apenas a camada superior do aquífero foi modelada (GW1), assim a taxa de percolação do aquífero 1 para o 2 (*GW1 percolation*), a capacidade de armazenamento da camada inferior do aquífero (*GW 2 storage*), a taxa de percolação do aquífero inferior (*GW2 percolation*) e o coeficiente do fluxo lateral do aquífero 2 (*GW2 coefficient*) foram ajustados para zero. A Tabela 11 apresenta os parâmetros obtidos por calibração manual.

Tabela 11. Parâmetros do SMA obtidos a partir da calibração manual modelo.

Sub-bacia	MaxSoilInf (mm.h <sup>-1</sup> )	MaxSoilStore (mm)	Tension Storage (mm)	Soil Percolation (mm.h <sup>-1</sup> )	GW 1 Storage (mm)	GW1 Coefficient (h)
W1260	45	200	100	0,04	1100	1000
W1060	45	200	100	0,04	1100	1000
W1070	45	200	100	0,04	1100	1000
W1270	45	200	100	0,04	1100	1000
W1010	45	200	100	0,04	1100	1000
W960	45	200	100	0,04	1100	1000
W970	45	200	100	0,04	1100	1000
W1170	45	200	100	0,04	1100	1000
W830	45	200	100	0,04	1100	1000
W670	45	200	100	0,04	1100	1000
W780	45	200	100	0,04	1100	1000

### Evapotranspiração

A evapotranspiração é modelada pelo método do *Soil Moisture Accounting* apenas quando não há ocorrência de precipitação na bacia. Considerando que a ocorrência de chuva anual na bacia do rio Itajaí-Açu varia em média de 120 a 180 dias e que durante as estações chuvosas ocorrem, em média, chuvas em 15 dias no mês, a evapotranspiração real na bacia incorreu em subestimações expressivas. Duas tentativas de compensação dessa condição foram feitas: aumentar o coeficiente de cultivo e aumentar a evapotranspiração potencial calculada por Penman Monteith. A alteração do coeficiente de cultivo não modificou a evapotranspiração real nas análises conduzidas, por isso a evapotranspiração potencial foi multiplicada por um fator de 2, a fim de compensar o balanço hidrológico das sub-bacias nos dias em que a evapotranspiração não foi modelada.

A evapotranspiração foi calculada por Penman Monteith utilizando as normais climatológicas da estação meteorológica de Indaial (código INMET 00083872) com base no registro das seguintes variáveis: velocidade do vento, umidade relativa do ar, insolação, pressão atmosférica e temperatura do ar.

### **Geração de escoamento**

Para geração do escoamento através do método do hidrograma unitário adimensional do SCS, utilizou-se apenas os tempos de retardo apresentados na Tabela 5 do item 4.2.4, referente à aplicação do modelo HEC-HMS na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu. O fator de pico adimensional fixo corresponde ao valor clássico de 484 para todas as sub-bacias.

### **Escoamento de base**

Para o escoamento de base representado através do método do reservatório linear, são requeridos o tempo de resposta do reservatório (*GWl coefficient*) que corresponde ao mesmo coeficiente calibrado no método do SMA apresentado na Tabela 11. Ainda, uma vazão inicial é requerida e deve ser definida pelo usuário. Entende-se que a definição de uma vazão de base no início da simulação não compromete os resultados, pois o período de aquecimento do modelo é descartado das análises.

## **5.1.2 Eventos de calibração e verificação**

O modelo chuva-vazão em modo de simulação contínua (1970<sup>4</sup>-1990) apresentou NSE de 0,62 e erro relativo percentual de volume do hidrograma de 8% para o período de calibração. Durante o período de verificação (1991<sup>5</sup>-2007), o modelo apresentou NSE de 0,48 e erro relativo percentual de volume do hidrograma de 11%. A Figura 16 apresenta a distribuição empírica de frequência de vazões máximas anuais com a fórmula de plotagem de Weibull para os dois períodos. Durante o período de calibração, verifica-se que a curva de frequência de vazões simuladas apresentou comportamento próximo da curva de frequência para os dados observados. Vazões máximas com baixo tempo de retorno tendem a ser superestimadas pelo

---

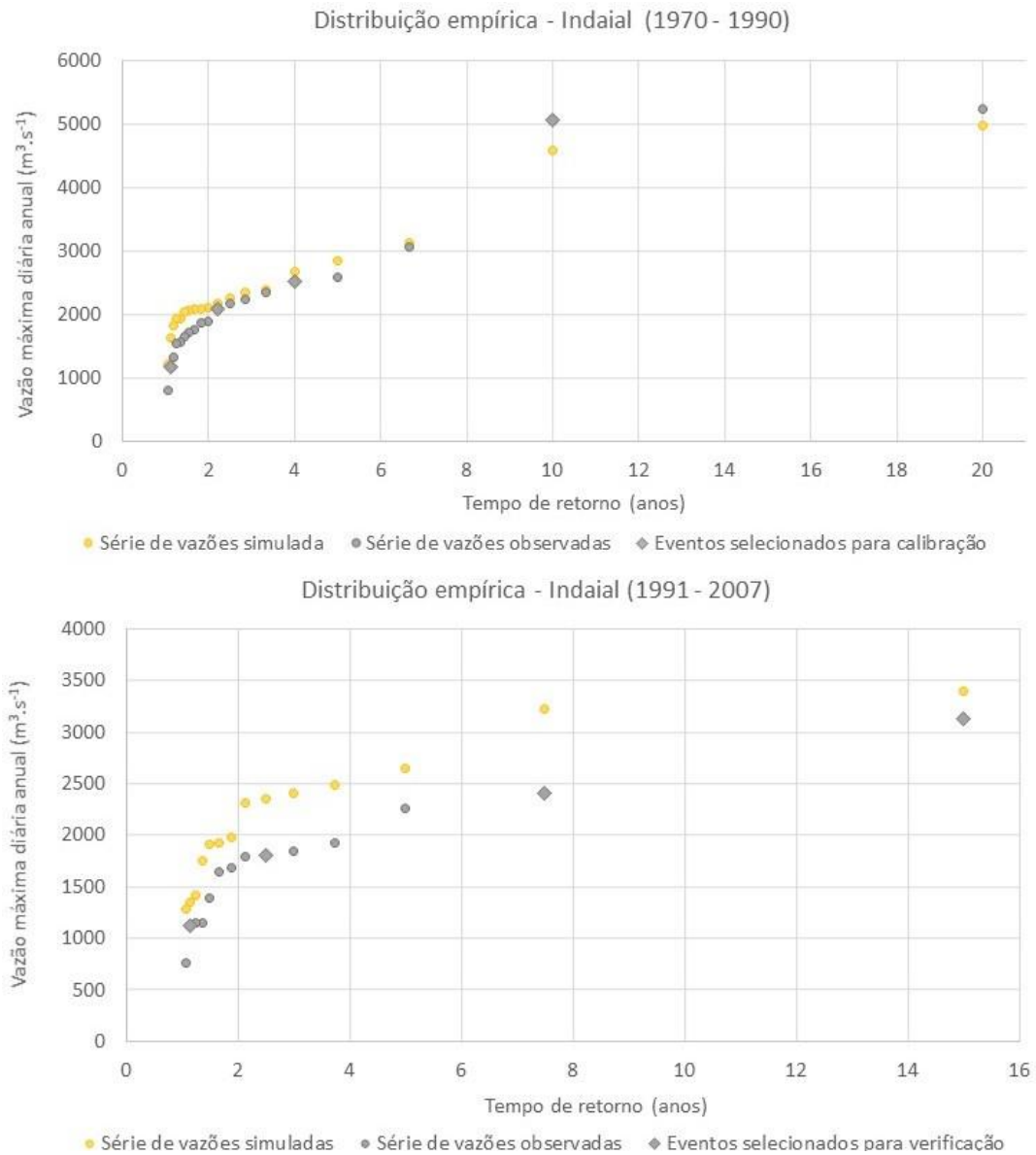
<sup>4</sup> As vazões simuladas para o ano de 1970 foram excluídas do cálculo do NSE por caracterizarem um período de aquecimento do modelo durante a calibração.

<sup>5</sup> As vazões simuladas para o ano de 1991 foram excluídas do cálculo do NSE por caracterizarem um período de aquecimento do modelo de verificação, já que as reais condições iniciais de saturação do solo e do aquífero não foram especificadas.



modelo neste ponto. No período de verificação, observa-se novamente a tendência de superestimação das vazões simuladas em modo de SC.

Figura 16. Distribuição de frequência de vazões para Indaial para os períodos de calibração e verificação.



Para comparação das metodologias empregadas, os eventos utilizados para calibração e verificação do modelo de eventos foram localizados na série simulada em modo de simulação contínua. A Figura 17 apresenta uma análise comparativa dos hidrogramas observado e simulados dos eventos selecionados para calibração do modelo. De maneira análoga, a Figura 18 apresenta os hidrogramas observado e simulados dos eventos selecionados para verificação do modelo hidrológico.

Figura 17. Hidrogramas observado e simulados dos eventos calibrados em modo de SC e EV.

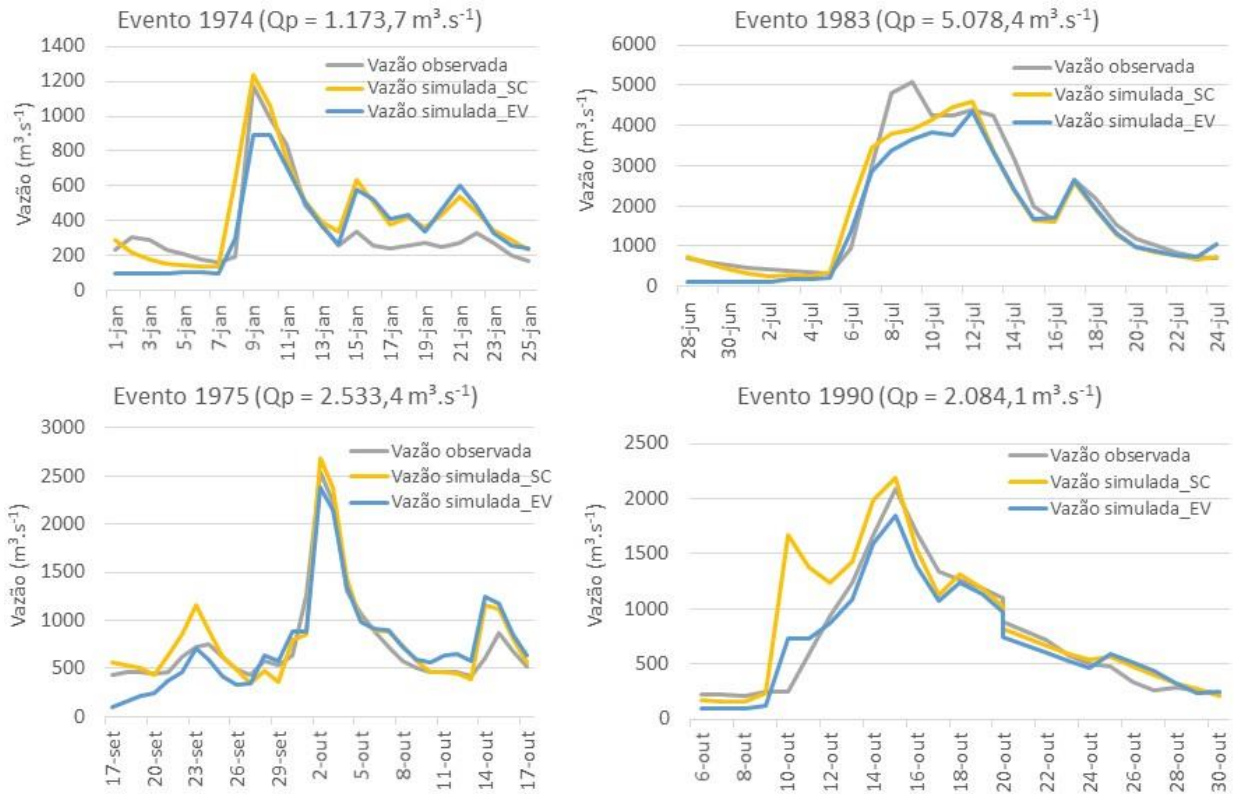
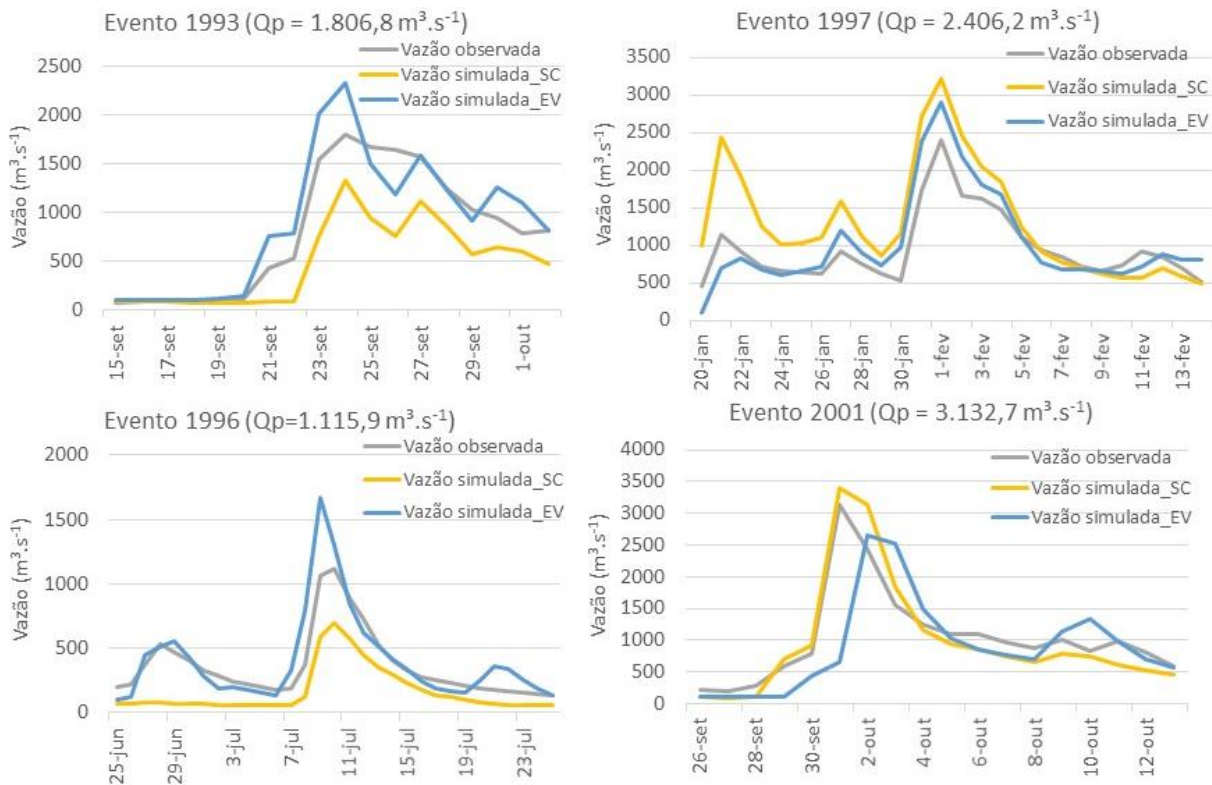


Figura 18. Hidrogramas observado e simulados dos eventos de verificação em modo de SC e EV.



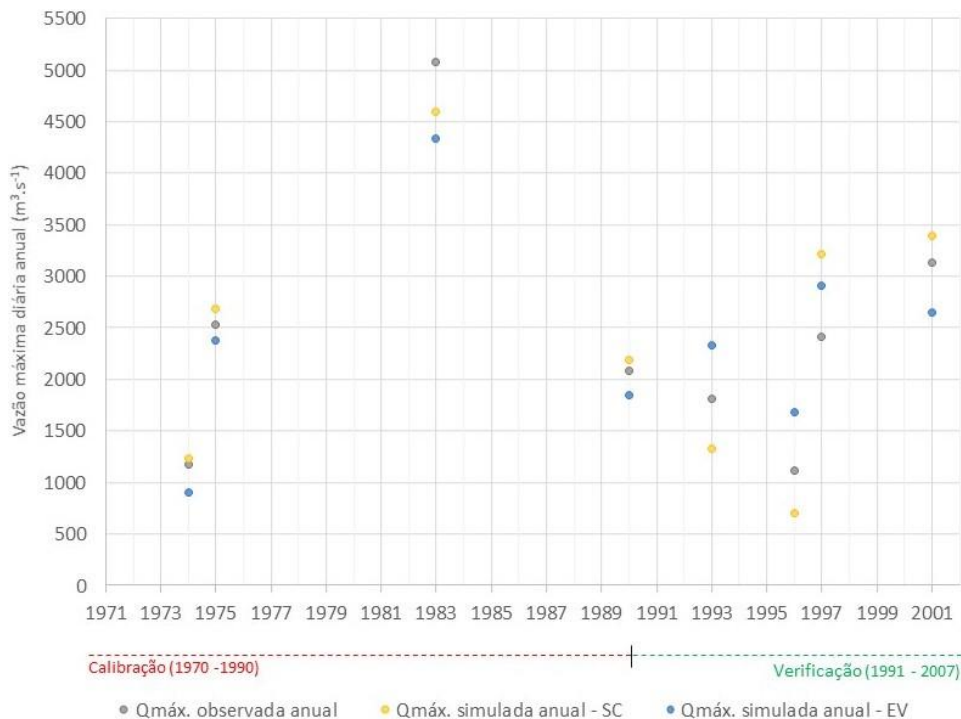
A Tabela 12 apresenta as vazões máximas ( $Q_p$ ) anuais obtidas em Indaial para ambas as metodologias e a mediana do erro relativo percentual correspondente para os períodos de calibração e verificação.

Tabela 12. Erro relativo das vazões máximas ( $Q_p$ ) anuais no posto de calibração e verificação.

	CALIBRAÇÃO				VERIFICAÇÃO			
	1974	1975	1983	1990	1993	1996	1997	2001
$Q_p$ observada ( $m^3.s^{-1}$ )	1174	2533	5078	2084	1807	1116	2406	3133
$Q_p$ simulada – SC ( $m^3.s^{-1}$ )	1233	2682	4596	2186	1327	699	3217	3395
$Q_p$ simulada – EV ( $m^3.s^{-1}$ )	896	2378	4335	1851	2327	1675	2909	2650
Erro relativo – SC (%)	5,08	5,86	9,50	4,89	26,57	37,37	33,69	8,39
Erro relativo – EV (%)	23,66	6,14	14,65	11,20	28,77	50,10	20,88	15,42
Mediana do erro relativo - EV (%)	13				25			
Mediana do erro relativo - SC (%)	5				30			

A Figura 19 apresenta uma análise gráfica da Tabela 12, caracterizando as vazões máximas anuais obtidas via simulação para o ponto de calibração e verificação.

Figura 19. Vazões máximas anuais obtidas nos eventos selecionados para Indaial em modo de SC e de EV.



Durante o período de calibração do modelo, observa-se uma tendência de subestimação das vazões máximas no modelo de eventos. Ainda para o mesmo período, as vazões máximas anuais obtidas em modo de SC apresentam mediana dos erros relativos menores (5%) que o modelo

de EV (13%). Para o período de verificação, a mediana dos erros relativos percentuais aumenta consideravelmente em ambas as metodologias, 25% para o modelo de EV e 30% para o modelo em SC.

As demais métricas calculadas no posto de calibração e verificação – mediana do NSE e mediana dos erros relativos percentuais do volume do hidrograma - são apresentadas na Tabela 13 e na Tabela 14 respectivamente. Na análise do NSE, verifica-se um melhor desempenho geral do modelo de eventos. Bons resultados para o NSE do modelo de eventos durante a calibração eram esperados (0,85), já que os eventos foram calibrados individualmente. Na verificação, no entanto, a análise da Tabela 13 demonstra que a utilização de parâmetros médios dos eventos calibrados ainda é capaz de apresentar um NSE maior (0,64) do que aquele obtido em modo de SC (0,37), considerando a mediana do conjunto. Quanto à análise da mediana dos erros relativos percentuais do volume para os eventos analisados, o modelo de eventos apresenta erros menores do que aqueles obtidos para SC, sobretudo no período de verificação.

Tabela 13. Análise comparativa do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe em Indaial.

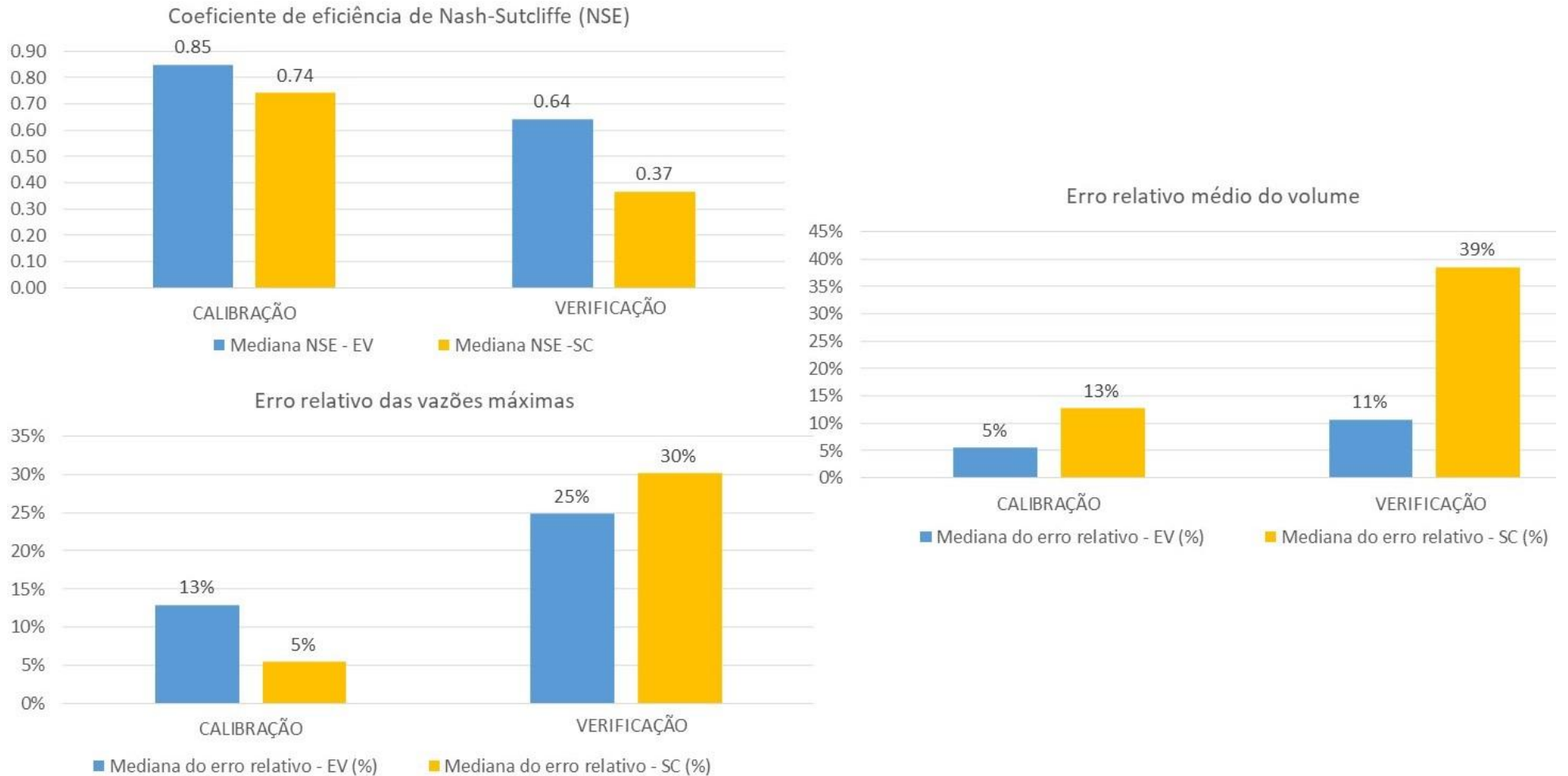
	CALIBRAÇÃO				VERIFICAÇÃO			
	1974	1975	1983	1990	1993	1996	1997	2001
NSE - EV	0,61	0,81	0,89	0,90	0,84	0,63	0,66	0,14
NSE - SC	0,63	0,85	0,92	0,59	0,53	0,20	-0,41	0,86
Mediana NSE - EV	0,85				0,64			
Mediana NSE -SC	0,74				0,37			

Tabela 14. Análise comparativa do erro relativo dos volumes em Indaial.

	CALIBRAÇÃO				VERIFICAÇÃO			
	1974	1975	1983	1990	1993	1996	1997	2001
Erro relativo do volume – EV (%)	5,51	0,22	16,31	5,40	10,28	11,04	7,78	13,24
Erro relativo do volume - SC (%)	22,48	10,07	7,75	15,31	40,30	54,47	36,74	5,05
Mediana do erro relativo - EV (%)	5				11			
Mediana do erro relativo - SC (%)	13				39			

A Figura 20 sintetiza o desempenho de ambas as metodologias para os eventos analisados em Indaial. De maneira geral, verifica-se maior acurácia do modelo de eventos para as métricas utilizadas. Para estimativa de vazões máximas anuais, a diferença entre as medianas dos erros percentuais não justificaria o uso de uma metodologia ou outra. No entanto, para a análise do erro do volume, o modelo de eventos tende a possuir maior acurácia que o modelo em modo de simulação contínua.

Figura 20. Métricas utilizadas para comparação do modelo em modo de SC e de EV no ponto de calibração e verificação.



## 5.2 DESEMPENHO EM POSTOS DE VERIFICAÇÃO EXCLUSIVA

A análise do desempenho dos modelos nos postos fluviométricos de verificação exclusiva (Taió, Ituporanga, Rio do Sul e Ibirama) permite avaliar a capacidade preditiva em pontos não utilizados para calibração. Os resultados obtidos para o posto de calibração e verificação (Indaial\*) serão apresentados nas análises gráficas apenas como referência para o leitor.

O modo de simulação contínua permite comparar as curvas de distribuição empírica de frequência de vazões máximas anuais simuladas e observadas para os postos não calibrados. A Figura 21 apresenta a distribuição empírica de frequência de vazões com a fórmula de plotagem de Weibull para esses postos durante o período de calibração (1970-1990) e verificação (1991-2007) do modelo. De maneira geral, verifica-se que durante o período de calibração os postos fluviométricos de Taió e Rio do Sul superestimam os eventos observados em todos os pontos, tendência que se acentua ainda mais no período de verificação. Durante o período de calibração, o posto de Ibirama subestima as vazões observadas enquanto Ituporanga superestima cheias com baixo tempo de retorno e subestima cheias com maior tempo de retorno. Durante o período de verificação, Ituporanga passa a superestimar as vazões simuladas enquanto Ibirama passa a superestimar eventos com baixo tempo de retorno e superestimar eventos com alto tempo de retorno.

A Figura 22, a Figura 23 e a Figura 24 permitem uma análise do comportamento dos modelos em modo de eventos e de simulação contínua para os demais postos na representação de vazões. A Figura 23 apresenta uma análise do posto calibrado frente ao comportamento conjunto dos postos de verificação exclusiva. A Figura 24 apresenta análises individuais para o posto de calibração e verificação e para os postos de verificação exclusiva. De maneira geral, a análise do NSE para o período de calibração e de verificação apresentada na Figura 23 demonstra que o modelo apresenta um desempenho aceitável apenas para o posto calibrado. A análise dos erros relativos das vazões máximas para os postos não calibrados para ambos os períodos (calibração e verificação) apresentam erros expressivos. Ainda, a análise do erro do volume do hidrograma para os demais postos corrobora a hipótese de que o modelo de eventos tende a ser mais adequado para representar os volumes dos hidrogramas, conforme a análise no ponto de calibração. A Figura 25 e a Figura 26 apresentam os hidrogramas observados e simulados para todos os eventos analisados no estudo.

Figura 21. Distribuição empírica de frequência de vazões máximas anuais para os demais postos no período de calibração e verificação do modelo.

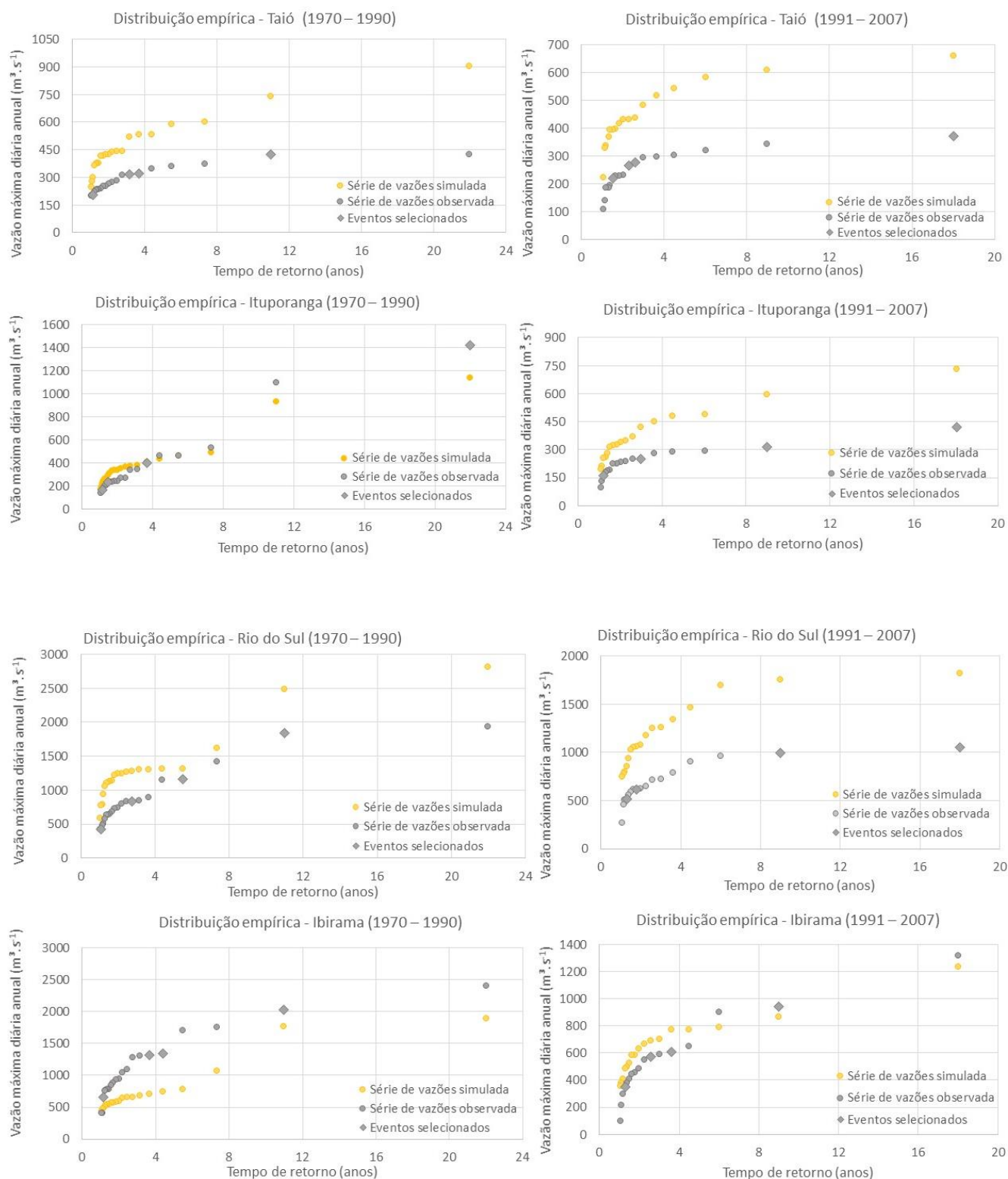




Figura 22. Análise comparativa das vazões obtidas nos eventos em modo de SC e de EV para os demais postos.

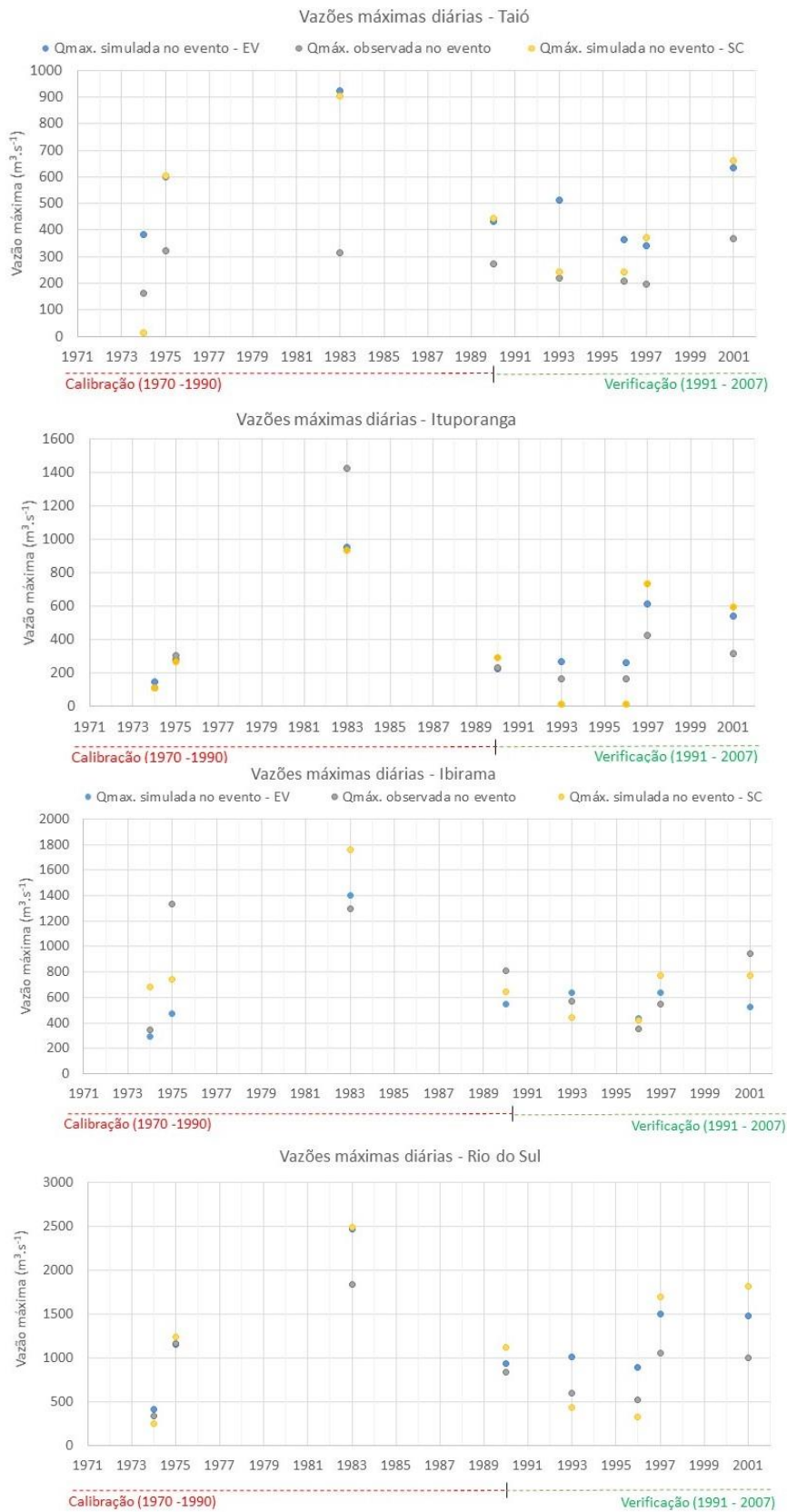


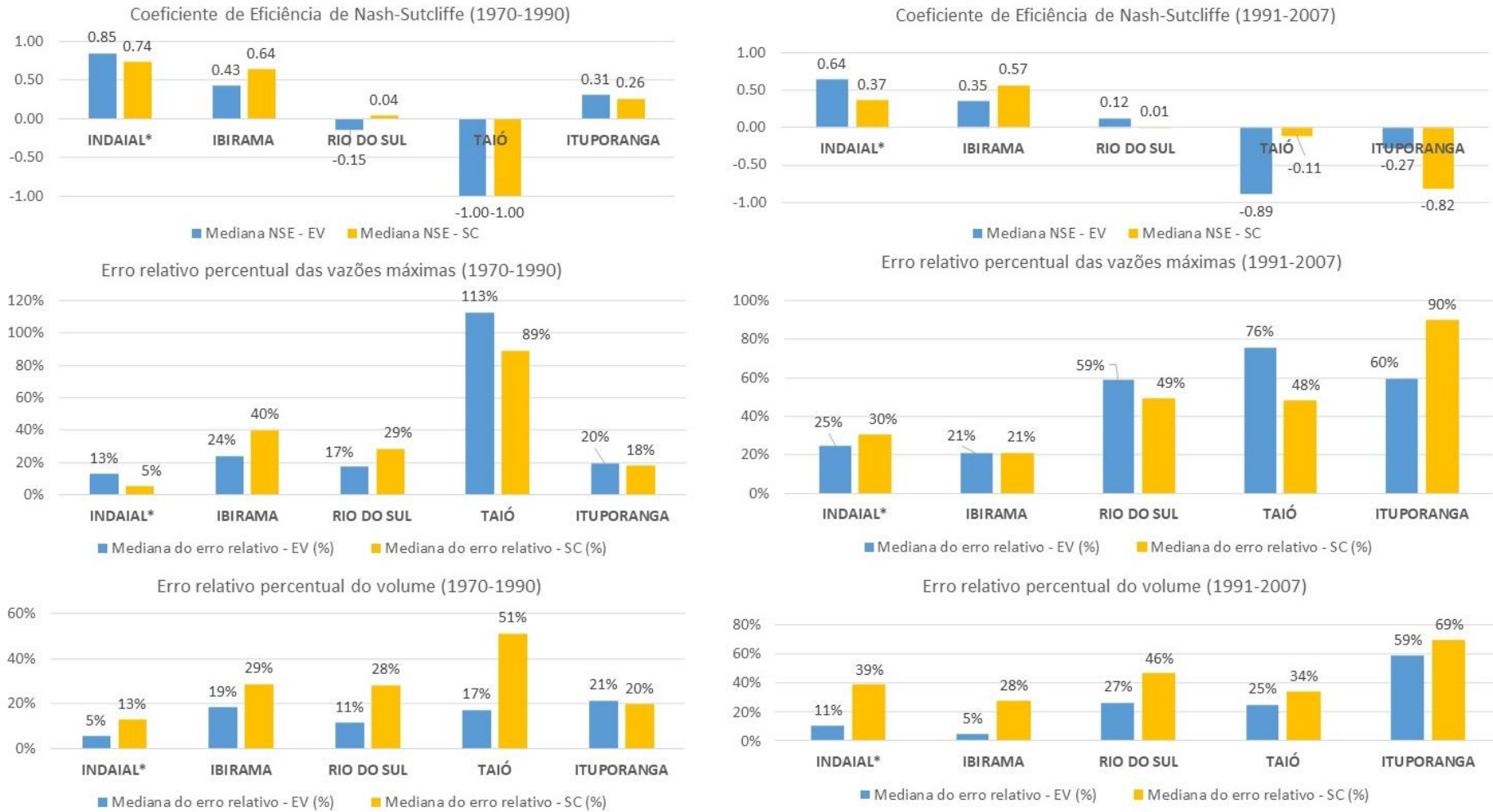


Figura 23. Métricas obtidas para comparação das metodologias em postos de verificação exclusiva.



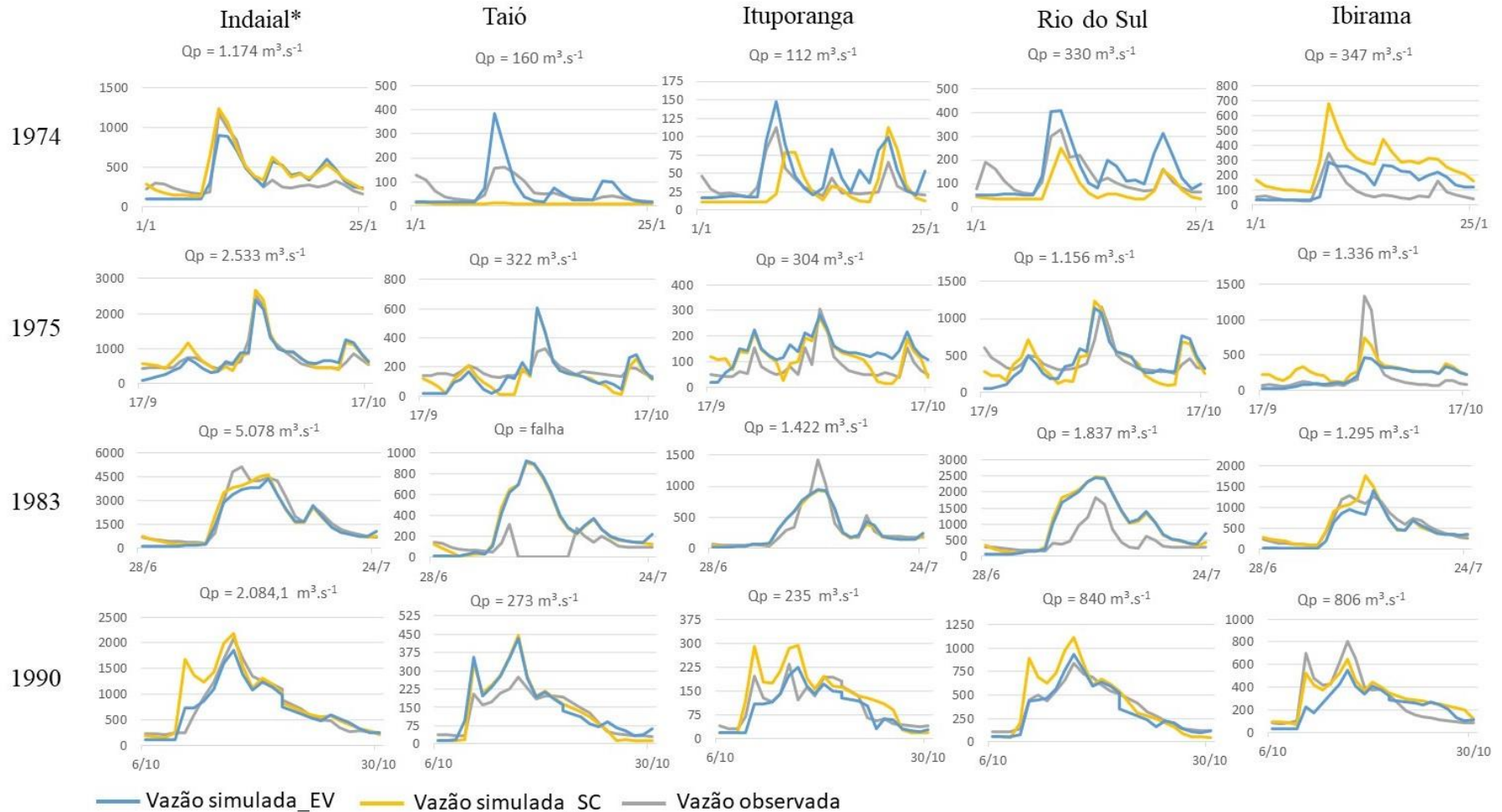
\* Posto utilizado para calibração.

Figura 24. Métricas utilizadas para comparação do modelo em modo de SC e de EV em postos de verificação exclusiva.



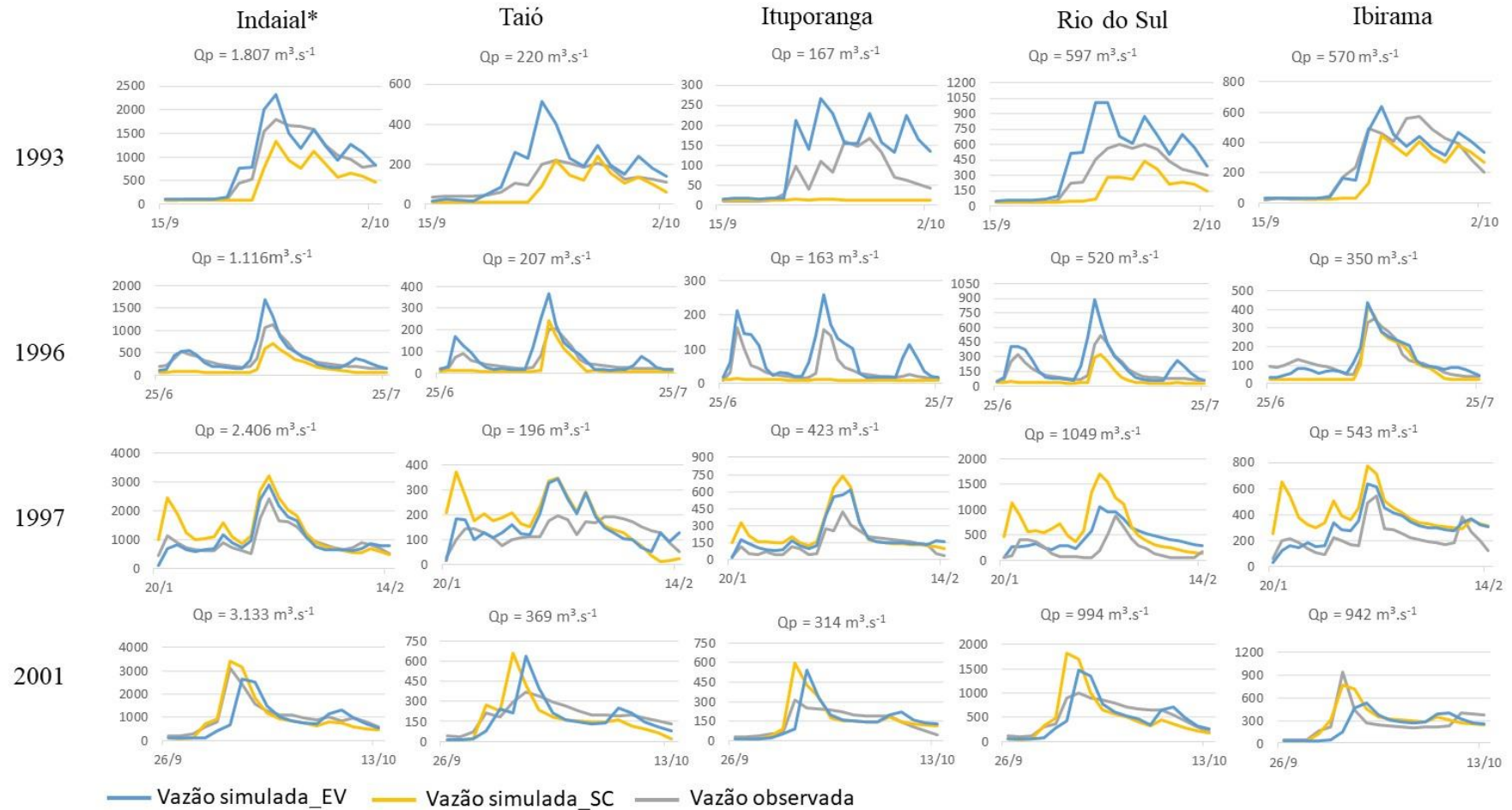
\*Posto utilizado para calibração.

Figura 25. Análise comparativa dos hidrogramas obtidos em modo de SC e EV para os eventos selecionados para calibração.



\*Posto utilizado para calibração.

Figura 26. Análise comparativa dos hidrogramas obtidos pelo modelo em modo de SC e EV para os eventos selecionados para verificação.



\*Posto utilizado para calibração.

## 6 DISCUSSÃO

Estudos hidrológicos para controle de inundações apresentam incertezas quanto aos prognósticos feitos e suscitam frequentes questionamentos sobre como realizá-los. Tradicionalmente, a modelagem hidrológica é uma ferramenta utilizada em estudos dessa natureza. Por isso, compreender a influência das metodologias de simulação hidrológica empregadas em modelos chuva-vazão é de extrema importância, sobretudo na estimativa de hidrogramas de cheia.

Ainda que a metodologia de eventos seja bastante reconhecida em função de sua facilidade de implementação e premissas simplificadoras, o uso da metodologia de simulação contínua tem aumentado consideravelmente (BOUHGTON & DROOP, 2003). Os processos hidrológicos dessa abordagem permitem uma representação mais consistente e dinâmica dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica quando comparada à abordagem de eventos - especialmente na representação das condições de umidade do solo. Em contrapartida, a metodologia de simulação contínua requer um número considerável de variáveis de estado e um esforço computacional superior ao da abordagem de eventos (ROGGER et al., 2012).

O presente estudo avaliou a estrutura da metodologia de eventos e de simulação contínua em modelos chuva-vazão, verificando a influência dessas na estimativa de hidrogramas de cheia. Os hidrogramas foram avaliados através das seguintes métricas: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, erro relativo percentual dos volumes e erro relativo percentual das vazões. Ressalta-se que ambas as metodologias incorporam incertezas aos resultados, seja pela qualidade dos dados de entrada, seja pelos métodos utilizados para representação dos processos hidrológicos.

A avaliação da estrutura de modelos chuva-vazão em modo de eventos e simulação contínua é apenas uma das partes da cadeia típica “precipitação – modelo chuva-vazão – hidrograma de projeto – análise de medidas de controle”. Diferentes abordagens dessa cadeia de análise como a incerteza associada à definição de hidrogramas de projeto, por exemplo, teriam vantagens e desvantagens para trabalhos desta natureza.

Por exemplo, Grimaldi et al. (2011) avaliaram a influência da metodologia de eventos e simulação contínua para a estimativa de hidrogramas de projeto em pequenas bacias sem monitoramento. A partir de uma série sintética de chuva, hidrogramas de projeto com diferentes

tempos de retorno foram definidos. O efeito sobre os elementos do hidrograma (vazão de pico, volume e duração) foi avaliado. Os resultados obtidos corroboram a premissa de que as diferenças entre as metodologias residem no efeito conjunto da representação do processo de infiltração e da distribuição temporal da chuva. Isto é, conforme o estudo de Grimaldi et al. (2011), a distribuição temporal realística da chuva influencia as perdas iniciais, preservando as vazões de pico. Em contrapartida, a definição do hietograma de projeto gera padrões de infiltração e conduz a uma subestimação das vazões de pico.

Fleischmann et al. (2018c) aplicaram o Modelo de Grandes Bacias (MGB) em um estudo hidrológico para a bacia do rio Itajaí-Açu. O estudo tinha por objetivo comparar os resultados obtidos com o emprego da metodologia de simulação contínua e de eventos utilizando um mesmo modelo chuva-vazão. Foram analisadas as vazões máximas obtidas e discutiu-se ainda o papel de atenuação de cheias da planície de inundação e dos reservatórios, assim como as diferenças na estimativa de vazões na bacia hidrográfica. O modelo de eventos permitia avaliar a incerteza associada às condições antecedentes ao evento, já que um hietograma de projeto foi inserido em 730 dias diferentes ao longo de uma série de chuva de dois anos. Os resultados indicaram que a incerteza associada às condições iniciais de umidade do solo é expressiva, pois obteve-se uma ampla faixa de valores de vazão de projeto. Da análise dos hietogramas com diferentes tempos de retorno, Fleischmann et al. (2018c) verificaram que para cheias com maior tempo de retorno, as condições antecedentes do solo não desempenham um papel tão importante na definição das vazões de pico devido à rápida saturação do solo.

O presente trabalho permitiu avaliar a influência das metodologias de simulação hidrológica empregadas na estimativa de hidrogramas de cheia e a capacidade do modelo em representar cheias de diferentes magnitudes em pontos de interesse da bacia (ponto de calibração e verificação e pontos de verificação exclusiva). Considerando o total de oito eventos de máximos anuais no posto utilizado para calibração e verificação, sendo quatro de calibração e quatro de verificação, observou-se maior acurácia do modelo de eventos para as métricas utilizadas. Para os postos de verificação exclusiva, ambos os modelos apresentaram incertezas expressivas na representação de vazões.

Em contraste aos resultados obtidos da aplicação do método do SCS como modelo chuva-vazão à bacia do ribeirão Serra Azul por Cunha et al. (2015), os quatro eventos selecionados para calibração do parâmetro CN no modelo de eventos aplicado à bacia do rio Itajaí-Açu conduziram a uma subestimativa das vazões de cheia no ponto de calibração. Ainda que ambos

os estudos tenham utilizado a abordagem clássica proposta pelo SCS, existem diferenças expressivas entre as áreas de estudo avaliadas, sobretudo em relação à escala das bacias (113 km<sup>2</sup> e 9.850 km<sup>2</sup>), mas também em relação ao clima, por exemplo. Por isso, análises isoladas podem não ser representativas do método de eventos do SCS, indicando a necessidade de avaliação de um número maior de bacias hidrográficas com características distintas.

O estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu é relevante por se tratar de uma bacia de grande escala (> 10.000 km<sup>2</sup>) no Brasil que dispõe de um sistema de controle de cheias e estudos mais detalhados dessa natureza, em função de seu histórico de inundações. A área de estudo, no entanto, apresenta condições bastante específicas, caracterizada por relevo montanhoso junto às cabeceiras dos rios e trechos acentuados de planície, com efeito considerável sob a atenuação de cheias. Nesse sentido, a bacia hidrográfica apresenta processos complexos, de difícil representação por métodos simplificados, especialmente o processo de propagação na planície de inundação que não pode ser representado pelos métodos de propagação disponíveis no HEC-HMS (USACE-HEC, 2000).

As limitações do presente trabalho incidem principalmente nas incertezas relativas à modelagem hidrológica, seja pela qualidade dos dados de entrada, seja pelos métodos utilizados para representação dos processos hidrológicos ou ainda pelas limitações do modelo escolhido (HEC-HMS). Além disso, a definição de uma metodologia para avaliação dos modelos de eventos e de simulação contínua é uma tarefa complexa, dependente de diversas premissas como a seleção de métricas adequadas e a definição de um tamanho da amostra suficientemente representativo, por exemplo.

A amostra selecionada para calibração e verificação do modelo chuva-vazão em modo de eventos e simulação contínua contempla um total de oito eventos de cheia, quatro selecionados para a etapa de calibração e quatro selecionados para a etapa de verificação dos modelos. Nesse sentido, o tamanho da amostra utilizada impossibilitou uma análise mais detalhada, com base estatística.

Os três principais reservatórios de controle de cheia na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu foram incorporados ao modelo durante as etapas de calibração e verificação. No entanto, para alguns dos eventos selecionados para a etapa de calibração, os três reservatórios ainda não operavam de maneira conjunta. Assim, a consideração da operação simultânea dos três



reservatórios para todos os eventos de calibração pode resultar em uma tendência de subestimação das vazões máximas simuladas para ambas as metodologias.

As limitações provenientes do emprego do HEC-HMS - modelo chuva-vazão escolhido para aplicação na bacia do rio Itajaí-Açu - residem, sobretudo, na representação do processo de evapotranspiração no método *Soil Moisture Accounting* (SMA), na inserção de dados meteorológicos e na utilização dos métodos de calibração automática. As dificuldades aqui relatadas têm por objetivo informar futuros usuários do modelo HEC-HMS a respeito das limitações associadas aos métodos utilizados no presente trabalho.

Observou-se que o método *Soil Moisture Accounting* empregado para contabilizar as perdas no modelo chuva-vazão em modo de simulação contínua apresenta limitações na representação do processo de evapotranspiração. Quando há ocorrência de chuva, a evapotranspiração não é modelada (USACE-HEC, 2000). Em bacias onde a média de dias com chuva no ano é alta, característica que pode ser verificada na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, o método de perdas não representa adequadamente o processo de evapotranspiração. Uma tendência de superestimação das cheias poderia ser avaliada, verificando qual a influência da evapotranspiração em análises de cheia. Por isso, entende-se que a representação da evapotranspiração do SMA pode ser mais adequada a bacias que apresentem um regime de chuva sazonal ou solos que sequeem mais rapidamente. Ainda, a representação matemática dos processos hidrológicos do SMA está ligada ao intervalo de tempo da simulação. Nesse sentido, o intervalo diário de simulação adotado pode incorporar incertezas aos resultados.

Em relação aos dados meteorológicos, a representação da precipitação adotada no HEC-HMS pode requerer um manejo considerável dos dados, principalmente quando se pretende utilizar séries de precipitação de diversos postos pluviométricos. O software não é capaz de interpolar dados de chuva, mas apenas de identificar falhas e preenchê-las com um valor padrão (i.e. zero). Essa simplificação é capaz de afetar a principal variável de entrada no modelo, especialmente porque não há uma compatibilidade da extensão temporal da série de chuva com o período simulado (*control specifications*), o que resultaria em longos períodos de chuva zero. Contudo, além da consistência prévia dos dados pluviométricos utilizando outras ferramentas, tal como realizado nesse estudo, outras possibilidades de representação da precipitação são possíveis e podem garantir maior confiabilidade a estudos que utilizam o modelo HEC-HMS.



Considerando a grande quantidade de parâmetros necessários (catorze parâmetros por sub-bacia para o método de perdas) à metodologia de simulação contínua, a calibração automática do HEC-HMS com o uso de algoritmos de mínimos locais apresenta problemas conhecidos na literatura. Nesse sentido, a calibração automática para grandes bacias se torna bastante complexa e ineficiente. Contudo, para o modelo de eventos em que apenas dois parâmetros por sub-bacia são suficientes para contabilizar as perdas, a calibração automática se mostrou útil.

A maior acurácia do modelo de eventos para alguns dos postos de verificação exclusiva se deve, em parte, ao emprego da calibração automática do parâmetro CN, capaz de prover maior liberdade de ajuste desse parâmetro nas sub-bacias, ainda que um único posto fluviométrico tenha sido utilizado para calibração do modelo. Na simulação contínua, no entanto, a calibração manual foi realizada variando o conjunto de parâmetros calibrados igualmente nas sub-bacias.

## 7 CONCLUSÕES

Neste trabalho, avaliou-se a influência do emprego de diferentes metodologias de simulação hidrológica – simulação de eventos e simulação contínua - em um modelo chuva-vazão para a estimativa de hidrogramas de cheia. Ambas as metodologias foram empregadas na aplicação do modelo chuva-vazão HEC-HMS na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu. Verificou-se a influência das metodologias de simulação hidrológica empregadas na estimativa de hidrogramas de cheia e a capacidade do modelo em representar as vazões máximas anuais no posto de calibração e verificação e as vazões observadas em outros pontos da bacia (postos de verificação exclusiva).

A estrutura de um modelo chuva-vazão em modo de simulação contínua representa de maneira mais consistente a dinâmica dos processos hidrológicos do que o modelo eventos, sobretudo por simular um longo período do balanço de umidade do solo. No entanto, para o presente estudo de caso, a simulação contínua não apresentou resultados que justificassem a representação mais detalhada dos processos hidrológicos e o esforço computacional requerido para sua aplicação. Com base nas métricas selecionadas para análise no posto de calibração e verificação, o modelo de eventos apresentou maior acurácia para as três métricas utilizadas (coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, erro de vazões máximas anuais e erro do volume do hidrograma).

A representação de vazões em postos de verificação exclusiva não mostrou um desempenho adequado das metodologias de simulação utilizadas. Ainda que para alguns postos e eventos as estimativas do modelo sejam próximas às vazões observadas, a incerteza apresentada nos resultados para os diferentes postos não permite extrapolar o desempenho da metodologia do ponto calibrado para os demais pontos avaliados na bacia hidrográfica. Entende-se que para utilização de ambas as metodologias, a etapa de calibração foi fundamental para o desempenho do modelo chuva-vazão.

### 7.1 RECOMENDAÇÕES

O modelo HEC-HMS dispõe de diversos módulos de simulação de processos hidrológicos, como por exemplo os variados modelos matemáticos disponíveis para determinar as perdas, computar o escoamento superficial e propagar ondas de cheia em rios e reservatórios. A escolha

adequada dos métodos disponíveis para a simulação hidrológica é parte fundamental de estudos baseados em modelagem hidrológica, por isso as vantagens e limitações inerentes a cada método devem ser reconhecidas e utilizadas em favor do usuário. A combinação de métodos diferentes destes empregados no presente trabalho para representação dos processos hidrológicos pode conduzir a resultados mais ou menos adequados, deixando aberta a possibilidade da análise da influência dos métodos selecionados para a avaliação de metodologias de simulação hidrológica.

A influência dos métodos escolhidos para representação da propagação em rios e reservatórios na análise de cheias não foi avaliada no presente trabalho. A análise realizada teve como foco principal a representação das perdas e da geração de escoamento superficial. Assim, entende-se que um estudo acerca da influência dos métodos de propagação em rios e reservatórios ainda pode ser relevante para estudos de controle de cheias, bem como a avaliação do papel dos reservatórios e das planícies de inundação.

Ademais, limitações do presente trabalho residem no estudo de caso de apenas uma bacia hidrográfica. Entende-se que para extrapolar os resultados aqui obtidos, análises semelhantes a essa podem ser realizadas em outras bacias. Ainda, a utilização de outros modelos hidrológicos disponíveis para estudos dessa natureza pode agregar para os resultados aqui apresentados.

O estudo de caso desse trabalho avaliou as diferenças na estrutura de modelos de eventos e de simulação contínua, isto é, a influência de ambas as metodologias na estimativa de hidrogramas de cheia. A estimativa de hidrogramas de projeto com base na definição de hietogramas de projeto, abordagem bastante popular do modelo de eventos, poderia ser avaliada posteriormente com base no ajuste de curvas IDF dos registros de chuva.

## 8 REFERÊNCIAS

ALERTABLU. (2018). **Sistema de Monitoramento e Alerta de Eventos Extremos em Blumenau.** Defesa Civil de Blumenau. Disponível em: <http://alertablu.cob.sc.gov.br/p/enchentes>. Acesso em: novembro de 2018.

ALFIERI, L.; LAIO, F.; CLAPS, P. (2008). **A simulation experiment for optimal design hyetograph selection.** Hydrological Processes. 22, 813-820. Published online 25 September 2007 in Wiley InterScience ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)) DOI: 10.1002/hyp.6646

BEMFICA, D.C.; GOLDENFUM, J.A; SILVEIRA, A.L.L. (2000). **Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 5 n.4 Out/Dez 2000, 5-16.

BLAZKOVA, S.; BEVEN, K. (2002). **Flood frequency estimation by continuous simulation for a catchment treated as ungauged (with uncertainty).** Water Resources Research, v. 38, n. 8, 2002.

BOUGHTON, W. DROOP, O. (2003). *Continuous simulation for design flood estimation—a review.* Journal: Environmental Modelling and Software. Volume 18. Issue 4. Pg 309-318.

BRUMES, K. R. (2001). **Cidades:(re)definindo seus papéis ao longo da história.** Caminhos de Geografia, v.2, n.3, p. 47-56.

BRUSA, L.C.; CLARKE, R.T. (1999). **ERROS ENVOLVIDOS NA ESTIMATIVA DA VAZÃO MÁXIMA UTILIZANDO CURVA-CHAVE. CASO DE ESTUDO: BACIA DO RIO IBICUÍ-RS.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). ISSN 2318-0331. Vol.4 – Nº.3 – JUL/SET – 1999.

CALVER, A.; STEWART, E.; GOODSSELL, G. (2009). **Comparative analysis of statistical and catchment modelling approaches to river flood frequency estimation.** J. Flood Risk Manage., v. 2, p. 24–31.

CAMICI, S., TARPANELLI, A., BROCCA, L., MELONE, F., MORAMARCO, T. (2011). **Design soil moisture estimation by comparing continuous and storm-based rainfall-runoff modelling.** Water Resour. Res. 47, W05527. <http://dx.doi.org/10.1029/2010WR009298>.

CANHOLI, A.P. (2005). **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. Sao Paulo: Oficina de Textos.

CARVAJAL, C.; PEYRAS, L.; ARNAUD, P.; BOISSIER, D.; ROYET, P. (2009). **Probabilistic Modeling of Floodwater Level for Dam Reservoirs**. Journal of hydrologic engineering, ASCE. March 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:3(223).

CASTRO, A. L. C. (2003). **Manual de Desastres: desastres naturais**. Brasília: Ministério da Integração Nacional. 174 p.

CEPED UFSC (2016). **Relatório dos danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais em Santa Catarina: 1995 – 2014**. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres [Organização Rafael Schadeck]- Florianópolis. 72p.

CHOW, V.T. (1959). Open-channel hydraulics. New York, McGraw-Hill, 680 p.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. (2003). **Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos Brazilian Journal of Water Resources. VOLUME. 8 - Nº. 3 - JUL/SET – 2003. ISSN 2318-0331.

COLLISCHON, W.; DORNELLES, F. (2015). **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: 2ª Edição revisada e ampliada. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).

CUNHA, S.F.; SILVA, F.E.O.; MOTA, T.U.; PINHEIRO, M.C. (2015). **Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia**. VOLUME. 20 - Nº. 4 - OUT/DEZ – 2015. ISSN 2318-0331.

\_\_\_\_\_. DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES E OBRAS HIDRÁULICAS – DEOH. (2001). **10º Relatório Semestral de Atividades nas Barragens do Alto Vale do Itajaí**. SETO. Florianópolis.

EAGLESON, P.S. (1972). **Dynamics of flood frequency**. Water Resour. Res. 8 (4), 878–898. <http://dx.doi.org/10.1029/WR008i004p00878>

EMBRAPA (2004). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Solos do Estado de Santa Catarina**. - Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 1 CD-ROM.; mapa color. - (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 46). ISSN 1678-0892.

ESRI. (2014). Environmental Systems Research Institute. ArcGIS Desktop 10.3 Student Edition.

FALTER, DANIELA & NGUYEN, DUNG & VOROGUSHYN, SERGIY & SCHRÖTER, KAI & HUNDECHA, YESHEWATESFA & KREIBICH, HEIDI & APEL, HEIKO & THEISSELMANN, FALKO & MERZ, BRUNO. (2014). *Continuous, large-scale simulation model for flood risk assessments: Proof-of-concept*. Journal of Flood Risk Management. 9.. 10.1111/jfr3.12105.

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

FAULKNER, D., WASS, P. 2005. **Flood estimation by continuous simulation in the Don catchment, South Yorkshire, UK**. Water Environ. J. 19 (2), 78–84.

FLEISCHMANN, A.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R.C.D. (2018a). **Integrando reservatórios e planícies de inundação para a simulação de cheias em grandes bacias: aplicação na bacia do rio Itajaí-Açu**. I Encontro Nacional de Desastres. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).

FLEISCHMANN, A.; PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. (2018b). **Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison**. Submetido ao Journal of Hydrology.

FLEISCHMANN, A.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R.C.D. (2018c). **Estimating design hydrographs at the basin scale: from event-based to continuous hydrological simulation**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). *In press*.

FRANK, B. (1995). **Uma abordagem para o gerenciamento ambiental da bacia hidrográfica do rio Itajaí, com ênfase no problema das enchentes**. Tese submetida à UFSC para obtenção do grau de Doutor em Engenharia. Florianópolis.

GEOAMBIENTE. (2008). Projeto de Proteção da Mata Atlântica em Santa Catarina (PPMA/SC). **Relatório Técnico do Mapeamento Temático Geral do Estado de Santa Catarina**. Geoambiente Sensoriamento Remoto Ltda São José dos Campos, 90 p.

GOERL, R. F.; KOBAYAMA, M. (2005). **Consideração sobre as inundações no Brasil**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa: ABRH. Disponível em: <[http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005\\_inunda%E7%F5es.pdf](http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005_inunda%E7%F5es.pdf)>. Acesso em: 9 novembro de 2017.

GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; SERINALDI, F.(2012). **Design hydrograph estimation in small and ungauged watersheds: continuous simulation method versus event-based approach**. *Hydrological Processes*, v. 26, n. 20, p. 3124-3134, 2012.

HERRMANN, M.L.P. (2014). **Atlas de desastres naturais do Estado de Santa Catarina: período de 1980 a 2010**. 2ed. atual e rev. Florianópolis: IHGSC/Cadernos geográficos. 219p.

IBGE (2013). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Perfil dos Municípios Brasileiros**. Rio de Janeiro. 285 p.

JICA, 2011. **Estudo Preparatório para o Projeto de Prevenção e Mitigação de Desastres na Bacia do Rio Itajaí**. Relatório Final. AGÊNCIA DE COOPERAÇÃO INTERNACIONAL DO JAPÃO (JICA). Novembro de 2011.

KATZ, R.W., PARLANGE, M.B., NAVEAU, P. (2002). **Statistics of extremes in hydrology**. *Adv. Water Resour.* 25 (8–12), 1287–1304.

MI. (2007). Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. **Política Nacional de Defesa Civil**. Brasília.

MI. (2017). Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. Departamento de Prevenção e Preparação. **Módulo de formação: noções básicas em proteção e defesa civil e em gestão de riscos: livro base**. Ministério da Integração Nacional, Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, Departamento de Minimização de Desastres. - Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2017.

PAQUET, E.; GARAVAGLIA, F.; GARÇON, R.; GAILHARD, J. (2013). *The SCHADEX method: a semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation*. Journal of Hydrology v. 495(12), p. 23-37.

ROGGER, M.; KOHL, B.; PIRKL, H.; VIGLIONE, A.; KOMMA, J.; KIRNBAUER, R.; MERZ, R.; BLÖSCHL, G. (2012). **Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria – Do they tell a consistent story?** Journal of Hydrology 456-457 (2012) 30-4.

SANTA CATARINA. (1997). Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. **Bacias Hidrográficas de Santa Catarina: Diagnóstico Geral**. Florianópolis.

SARTORI, A.; NETO, F.L.; GENOVEZ, A.M. (2005). **Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 10 n.4 Out/Dez 2005, 05-18.

\_\_\_\_\_. **Sinopse Censo Demográfico 2010**. (2011). Rio de Janeiro: IBGE. 261p.

SCHETTINI, C, A, F. (2002). **Caracterização física do estuário do Rio Itajaí-açu, SC**. Revista brasileira de recursos hídricos, v. 7, n.1, p. 123- 142.

SERINALDI, F.; GRIMALDI, S. (2011). **Synthetic design hydrographs based on distribution functions with finite support**. Journal of Hydrologic Engineering, 16 (5), 434.

SIGSC. (2018). **Sistema de Informações Geográficas**. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina. Governo de Santa Catarina. Disponível em: sigsc.sds.sc.gov.br. Acesso em: julho de 2018.

SILVEIRA, A.L.L (2016). **Fator de Pico para Hidrogramas Unitários Sintéticos Triangulares**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Versão On-line ISSN 2318-0331. RBRH vol. 21 no.1 Porto Alegre jan./mar. 2016 p. 46 – 52

SMITH, A.; FREER, J.; BATES, P.; SAMPSON, C. (2014). **Comparing ensemble projections of flooding against flood estimation by continuous simulation**. Journal of Hydrology 511 (2014) 205-219.



SUNDERMANN, L., SCHELSKE, O., & HAUSMANN, P. (2014). *Mind the risk—A global ranking of cities under threat from natural disasters*. Zurich, Switzerland: Swiss Reinsurance Company

TACHINI, M. (2010). **Avaliação de danos associados às inundações no município de Blumenau**/Mario Tachini; orientador: Masato Kobiyama – Florianópolis, 2010.xx, 179 f.: il.Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Bibliografia: f. 151-161.

TASCA, F.A; FINOTTI, A.R.; POMPEO, C.A.; GOERL R.F. (2017). **O papel da drenagem urbana na prevenção de desastres hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Itajaí-açu**. Revista Brasileira de Cartografia, Nº 69/1, Edição Especial Geotecnologias e Desastres Naturais: 129-142 Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto ISSN: 1808-0936

TUCCI, C. E. M. ; COLLISCHONN, W. (2006). *Flood forecasting*. WMO Bulletin, v. 55, p. 179-184.

TUCCI, C.E.M e BERTONI, J.C. (Org). (2003). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

TUCCI, C.E.M. (2007). **Inundações Urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA.393 p.

TUCCI, C.E.M. (1999). **Aspectos Institucionais no Controle de Inundações**. I Seminário de Recursos Hídricos do Centro- Oeste. Brasília.

TUCCI, E. M. T. (2005). **Modelos Hidrológicos**. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. 2ª edição. Porto Alegre, Editora da UFRGS.

USACE-HEC. (2000). *“Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Technical Reference Manual”*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

USACE-HEC. (2009). **HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modelling Extension**. User’s Manual. US Army Corps of Engineers. Version 4.2.

USACE-HEC. (2015a). *“Hydrologic Modeling System, HEC-HMS v 4.1 – User’s Manual”*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

USACE-HEC. (2015b). *“Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Applications Guide”*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

# ANEXO A

