

ANA PAULA MUHLENHOFF

CALIBRAÇÃO DE MODELO HIDROLÓGICO USANDO INFORMAÇÃO "A PRIORI"
UTILIZANDO TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO ESTOCÁSTICA

CURITIBA

2023

ANA PAULA MUHLENHOFF

CALIBRAÇÃO DE MODELO HIDROLÓGICO USANDO INFORMAÇÃO “A PRIORI”
UTILIZANDO TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO ESTOCÁSTICA

Tese de Doutorado, apresentada como requisito para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cristovão V. S. Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Eloy Kaviski

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Muhlenhoff, Ana Paula

Calibração de modelo hidrológico usando informação “a priori” utilizando técnica de otimização estocástica / Ana Paula Muhlenhoff. – Curitiba, 2023.
1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes
Coorientador: Eloy Kaviski

1. Hidrologia – Modelos. 2. Bacias hidrográficas. 3. Ciclo hidrológico. 4. Modelos matemáticos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Fernandes, Cristovão Vicente Scapulatempo. IV. Kaviski, Eloy. V. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ANA PAULA MUHLENHOFF** intitulada: **Calibração de Modelo Hidrológico usando informação "a priori" utilizando Técnica de Otimização Estocástica.**, sob orientação do Prof. Dr. CRISTOVÃO VICENTE SCAPULATEMPO FERNANDES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

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

CURITIBA, 28 de Abril de 2023.

Assinatura Eletrônica

07/05/2023 22:38:07.0

CRISTOVÃO VICENTE SCAPULATEMPO FERNANDES

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

03/05/2023 11:02:25.0

ELOY KAVISKI

Coorientador(a)

Assinatura Eletrônica

02/05/2023 16:31:56.0

RODRIGO CAUDURO DIAS DE PAIVA

Avaliador Externo (UNIVER. FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

Assinatura Eletrônica

03/05/2023 19:07:37.0

JORGE ANTONIO SILVA CENTENO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

22/05/2023 17:21:48.0

JOAQUIN IGNACIO BONNECARRÈRE GARCIA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

Assinatura Eletrônica

02/05/2023 15:05:52.0

TOBIAS BERNWARD BLENINGER

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Paraná, onde tive a oportunidade de fazer toda a minha formação superior, da graduação em Engenharia Civil ao Doutorado. Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná, onde tive a possibilidade de estar como aluna de iniciação científica, mestranda e doutoranda. Ao Grupo de Pesquisa em Hidrologia de Grande Escala do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde estive para um período de aprendizado durante o doutorado.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo financiamento da bolsa de pesquisa de doutorado. Aos Professores Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes e Eloy Kaviski, pela orientação e coorientação deste trabalho, respectivamente. Agradeço pela paciência ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, pela incansável dedicação a formação de seus alunos, ao ensino e a pesquisa.

Aos professores da banca avaliadora deste trabalho: Professor Jorge Centeno e Professor Joaquin Ignacio Bonnacarrere Garcia, pela disponibilidade; ao Professor Tobias Blenninger, que acompanhou o início do desenvolvimento desta pesquisa como coorientador, e; ao Professor Rodrigo Caduro Dias de Paiva, pela oportunidade de intercâmbio no HGE (IPH/UFRGS) e acompanhamento durante este período.

A minha família e amigos, por todo suporte e paciência.

A Deus, pela graça de chegar até aqui.

*“In life, when we work with passion, respect, and love
We deserve, what we achieve in life...
Do not forget.”*

*Cristovão V. S. Fernandes
09/07/2019*

RESUMO

Os processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica são não-lineares e interdependentes. Adicionalmente, cabe destacar que ocorrem em escalas de tempo que podem variar, entre si de minutos a dias. Outro aspecto importante relacionado a complexidade de representação do sistema é o fato de todos os processos de geração, separação e transporte de fluxos são fortemente marcados pela heterogeneidade presente na topografia, na cobertura vegetal, nos diferentes tipos e usos de solo, na ação antrópica sobre as etapas do ciclo hidrológico, no clima local e até mesmo global, no caso de bacias continentais. Nesse contexto, os avanços computacionais e nas tecnologias de gerenciamento de uma grande quantidade de dados espacialmente distribuídos tem impulsionado os avanços na ciência hidrológica, em especial no que concerne a modelagem matemática dos processos hidrológicos. Especial atenção deve ser direcionada a etapa de calibração dos modelos hidrológicos, pois é a que garante a aplicabilidade desses modelos com sucesso. A partir deste cenário, o presente trabalho propõe uma nova abordagem para o processo de calibração automático de um modelo hidrológico. Esta nova abordagem parte de uma alternativa a melhor utilização das informações hidrológicas disponíveis. Desta forma, foi realizada a calibração automática do Modelo de Grandes Bacias (MBG) a partir do método do recozimento simulado (MRS). Para a definição do problema de otimização, uma análise de sensibilidade dos parâmetros hidrológicos do modelo conduziu a um critério de importância amostral que foi utilizado como uma informação associada ao processo de calibração. Os resultados obtidos demonstraram que o MRS se mostrou bastante eficiente e flexível quando da associação do critério de importância amostral, informação “a priori”, neste caso. Os resultados também sugerem que há um grande potencial para a simplificação da calibração automática de um modelo hidrológico, tornando esta etapa mais assertiva sem que se distancie tanto da realidade física, uma vez que o processo de obtenção dos parâmetros ocorre matematicamente.

Palavras-chave: *Recozimento Simulado; Calibração; Modelos Hidrológicos*

ABSTRACT

Hydrological processes are interdependent and non-linear. They occur on time scales ranging from minutes to days. Additionally, the heterogeneity of watersheds is a challenge for representing hydrological processes. This heterogeneity is in the topography, the vegetation cover, the different soil types and uses, the human action on the stages of the hydrological cycle, and the climate on local and global scales. Advances in the mathematical modeling of hydrological processes are the results of computational advances and spatially distributed data management technologies. The calibration stage of a hydrological model is what guarantees success in its application. Based on this scenario, the present work proposes a new approach to the process of automatic occurrence of a hydrological model. This new approach is an alternative for better use of available hydrological information. In this work, the Large Basin Model (MBG) automatic calibration was carried out using the simulated annealing method (MRS). A sensitivity analysis of the MGB hydrological parameters supported the optimization problem definition and a sampling importance criterion definition. The sampling importance was considered a priori information and associated with the simulated annealing method for calibrating the hydrological model. The results also suggest that there is great potential for simplifying the automatic calibration of a hydrological model. This essential step can be more assertive without distancing itself from physical reality since the calibration occurs mathematically.

Keywords: *Simulated Annealing; Calibration; Hydrological Models*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – ESQUEMA DE APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA TESE	19
FIGURA 2.1 – PERSPECTIVAS FUTURAS DA MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	23
FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PASSAÚNA NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA	33
FIGURA 3.2 – DISPONIBILIDADE DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	34
FIGURA 3.3 – DISPONIBILIDADE DE DADOS FLUVIOMÉTRICOS.....	36
FIGURA 3.4 – CLASSIFICAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PASSAÚNA.....	37
FIGURA 3.5 – DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DO MGB	38
FIGURA 3.6 – ESQUEMA CONCEITUAL DO MODELO DE GRANDES BACIAS	39
FIGURA 3.7 – ESQUEMATIZAÇÃO DA ANALOGIA ENTRE AS VARIÁVEIS DO MÉTODO DO RECOZIMENTO SIMULADO E DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO	42
FIGURA 3.8 – FLUXOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DO RECOZIMENTO SIMULADO	44
FIGURA 4.1 – BACIA HIDROGRÁFICA DO PASSAÚNA NO MGB – MINIBACIAS E SUBACIAS DE CALIBRAÇÃO	48
FIGURA 4.2 – HIDROGRAMAS SIMULADO E OBSERVADO PARA A ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 6501800, PERÍODO DE CALIBRAÇÃO (1985-1990).....	50
FIGURA 4.3 – CURVAS DE PERMANÊNCIA SIMULADA E OBSERVADA PARA A ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 6501800, PERÍODO DE CALIBRAÇÃO (1985-1990)	50
FIGURA 4.4 – HIDROGRAMAS SIMULADO E OBSERVADO PARA A ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 6501800, PERÍODO DE VALIDAÇÃO (2010-2019).....	51
FIGURA 4.5 – HIDROGRAMAS SIMULADO E OBSERVADO PARA A ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 6501800, PERÍODO DE CALIBRAÇÃO (1985-1990).....	51
QUADRO 5.1 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA OS PARÂMETROS CALIBRÁVEIS DO MGB	54
QUADRO 5.2 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O PARÂMETRO w_m EM CADA HRU NO MGB	56
FIGURA 5.1 – CONFIGURAÇÃO DO PROBLEMA A SER OTIMIZADO A PARTIR DA IMPORTÂNCIA AMOSTRAL.....	62

FIGURA 6.1 – VALORES ÓTIMOS OBTIDOS PARA W_m NOS TESTES DE 1 A 6.	68
FIGURA 6.2 – VALORES ÓTIMOS OBTIDOS PARA OS DEMAIS PARÂMETROS DO MGB NOS TESTES DE 1 A 6.	68
FIGURA 6.3 – FAIXA DE INCERTEZA PARA O HIDROGRAMA SIMULADO E HIDROGRAMA TEÓRICO PARA A SUBACIA 4 (TESTE 5).	69
FIGURA 6.4 – SUBACIAS DE CALIBRAÇÃO DEFINIDAS NO MGB PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PASSAÚNA.	71

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - RESUMO DE CARACTERÍSTICAS BÁSICAS PARA ESCOLHA DE UM MODELO HIDROLÓGICO	24
TABELA 3.1 – PARÂMETROS DE SOLO DO MODELO DE GRANDES BACIAS	40
TABELA 3.2 – PARÂMETROS DO MÉTODO DE RECOZIMENTO SIMULADO	41
TABELA 5.1 – PARÂMETROS (GERAÇÃO DO ESCOAMENTO) CALIBRÁVEIS PARA UMA SUBACIA DE CALIBRAÇÃO NO MGB IMPLEMENTADO A BACIA HIDROGRÁFICA DO PASSAÚNA	59
TABELA 5.2 – REPRESENTATIVIDADE DE CADA HRU POR SUBACIA DE CALIBRAÇÃO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PASSAÚNA	59
TABELA 5.3 – PARÂMETROS CALIBRÁVEIS PARA A SUBACIA DE CALIBRAÇÃO NÚMERO 1 NO MGB IMPLEMENTADO A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PASSAÚNA	60
TABELA 5.4 – PESOS PARA CADA PARÂMETRO A SER CALIBRADO	61
TABELA 6.1 – TESTES TEÓRICOS PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO RECOZIMENTO SIMULADO	65
TABELA 6.2 – VALORES ADOTADOS PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DO RECOZIMENTO SIMULADO	70
TABELA 6.3 – VALORES DOS PARÂMETROS (SEGUNDO CENÁRIO TEÓRICO).....	72
TABELA 6.4 – TESTES TEÓRICOS PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO RECOZIMENTO SIMULADO	73
TABELA 7.1 – TESTES COMPARANDO O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO COM E SEM O CRITÉRIO DE IMPORTÂNCIA AMOSTRAL.....	81
TABELA 7.2 – PARÂMETROS MAIS SORTEADOS DURANTE PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO	84
TABELA 7.3 – TESTES 2, IA3 E IA1	91

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.1 – PLUVIOGRAMAS DAS ESTAÇÕES NA REGIÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PASSAÚNA.....	34
QUADRO 6.1 – EVOLUÇÃO E FRENTE DE PARETO PARA OS TESTES TEÓRICOS DOS PARÂMETROS DO MRS.....	66
QUADRO 6.2 – EVOLUÇÃO E FRENTE DE PARETO PARA OS TESTES 7 (A), 8 (B) E 9 (C), SUBACIA 5, COM DIFERENTES PARÂMETROS DO MRS.....	74
QUADRO 6.3 – HIDROGRAMAS TEÓRICO E SIMULADO (TESTE 7) PARA A SUBACIA NÚMERO 4.....	75
QUADRO 6.4 – HIDROGRAMAS TEÓRICO E SIMULADO (TESTE 8) PARA A SUBACIA NÚMERO 4.....	76
QUADRO 6.5 – HIDROGRAMAS TEÓRICO E SIMULADO (TESTE 9) PARA A SUBACIA NÚMERO 4.....	77
QUADRO 6.6 – VIOLIN PLOTS PARA OS PARÂMETROS HIDROLÓGICOS	78
QUADRO 7.1 – EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO E FRENTE DE PARETO PARA OS TESTES 7 (A), IA1 (B) E IA2 (C).....	82
QUADRO 7.2 – VIOLIN PLOTS PARA OS PARÂMETROS HIDROLÓGICOS DOS TESTES 7, IA1 E IA2.....	83
QUADRO 7.3 - HIDROGRAMAS DE 2010 A 2014: VAZÃO TEÓRICA E ÓTIMA OBTIDA A PARTIR DO TESTE 7.....	85
QUADRO 7.4 - HIDROGRAMAS DE 2015 A 2019: VAZÃO TEÓRICA E ÓTIMA OBTIDA A PARTIR DO TESTE 7.....	86
QUADRO 7.5 - HIDROGRAMAS DE 2010 A 2014: VAZÃO TEÓRICA E ÓTIMA OBTIDA PARA O TESTE IA1	87
QUADRO 7.6 - HIDROGRAMAS DE 2015 A 2019: VAZÃO TEÓRICA E ÓTIMA OBTIDA PARA O TESTE IA1	88
QUADRO 7.7 - HIDROGRAMAS DE 2010 A 2014: VAZÃO TEÓRICA E ÓTIMA OBTIDA PARA O TESTE IA2	89
QUADRO 7.8 - HIDROGRAMAS DE 2015 A 2019 – VAZÃO TEÓRICA E ÓTIMA OBTIDA PARA O TESTE IA2	90
QUADRO 7.9 – <i>VIOLIN PLOTS</i> PARA OS PARÂMETROS HIDROLÓGICOS DOS TESTES 2, IA1 E IA3.....	92

QUADRO 7.10 - HIDROGRAMAS DE 2010 A 2014: VAZÃO TEÓRICA E ÓTIMA PARA O TESTE IA3.....	93
QUADRO 7.11 - HIDROGRAMAS DE 2015 A 2019: VAZÃO TEÓRICA E ÓTIMA PARA O TESTE IA3.....	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	EVIDÊNCIAS DE INTERESSE.....	16
1.2	HIPÓTESE.....	18
1.3	OBJETIVO.....	18
1.4	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	18
2	ASPECTOS CONCEITUAIS EM MODELAGEM HIDROLÓGICA	20
2.1	AVANÇOS NA MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	20
2.2	USO DE MODELOS HIDROLÓGICOS, SENSORIAMENTO REMOTO E SIG.....	23
2.3	CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS HIDROLÓGICOS.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	BACIA DO RIO PASSAÚNA.....	32
3.1.1	<i>Dados pluviométricos</i>	33
3.1.2	<i>Dados fluviométricos</i>	36
3.1.3	<i>Dados de uso e ocupação do solo</i>	36
3.2	MODELO HIDROLÓGICO DE GRANDES BACIAS – MGB-IPH.....	38
3.3	MÉTODO DO RECOZIMENTO SIMULADO APLICADO A UM MODELO HIDROLÓGICO	40
3.4	PLANO EXPERIMENTAL.....	45
3.4.1	<i>Implementação do modelo hidrológico a bacia hidrográfica</i>	45
3.4.2	<i>Definição das condições de contorno do problema de otimização</i>	45
3.4.3	<i>Calibração automática do modelo hidrológico pelo método do recozimento simulado</i> 46	
3.4.4	<i>Inserção e avaliação da informação “a priori” no processo de calibração</i>	46
4	IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO	48
4.1	IMPLEMENTAÇÃO DO MGB PARA A BACIA DO RIO PASSAÚNA.....	48
4.2	CALIBRAÇÃO MANUAL DO MGB PARA O ALTO PASSAÚNA	49
4.3	DISCUSSÃO E SÍNTESE DO CAPÍTULO	51
5	O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO E A IMPORTÂNCIA AMOSTRAL	53
5.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO MGB.....	53
5.2	DEFINIÇÃO DO CRITÉRIO DE IMPORTÂNCIA AMOSTRAL.....	58
5.3	CONFIGURAÇÃO DO PROBLEMA A SER OTIMIZADO	61
5.4	DISCUSSÃO E SÍNTESE DO CAPÍTULO	63
6	CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DO MODELO HIDROLÓGICO MGB PELO MRS . 64	
6.1	CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MRS.....	64
6.2	VALIDAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MRS.....	70

6.3	DISCUSSÃO E SÍNTESE DO CAPÍTULO	79
7	INFORMAÇÃO “A PRIORI” E CALIBRAÇÃO DE MODELO HIDROLÓGICO	81
7.1	IMPORTÂNCIA AMOSTRAL COMO INFORMAÇÃO “A PRIORI”	81
7.2	HIDROGRAMA COMO INFORMAÇÃO “A PRIORI”	91
7.3	DISCUSSÃO E SÍNTESE DO CAPÍTULO	95
8	CONCLUSÃO	99
8.1	ESTUDOS FUTUROS	100
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	ANEXO I – ARTIGO SBRH 2019	110
	ANEXO II – ESTUDO DE CASO: ESTIAGEM 2020	122
	ANEXO III – ARTIGO SBRH 2021	127
	ANEXO IV – CÓDIGO CAL_MGB (GOLANG)	142

1 INTRODUÇÃO

O advento dos recursos computacionais permitiu que a hidrologia evoluísse de uma ciência qualitativa e descritiva para uma área do conhecimento aplicada (Sivapalan, 2003; Sivapalan et al., 2003). Compreender os fenômenos hidrológicos, não só qualitativamente, mas quantitativamente se faz evidente nas diversas questões associadas a gestão de recursos hídricos. Nesse sentido, os modelos hidrológicos, cada vez mais, têm se destacado como ferramenta útil a tomada de decisão (Chlumsky et al., 2021).

No início do desenvolvimento dos modelos matemáticos aplicados à hidrologia, a complexidade dos processos físicos envolvidos na natureza era deixada em segundo plano (Tucci, 2005). Embora tal característica pudesse levar ao mal uso da ferramenta, tais simplificações se davam pelas limitações computacionais, dificuldade de obtenção de dados e representação da bacia hidrográfica, dada a variabilidade espacial e temporal associada a cada etapa do ciclo hidrológico. Atualmente, a grande disponibilidade de modelos hidrológicos existentes pode conduzir a um caminho semelhante (Merz et al., 2022).

A representação matemática conceitualmente mais próxima à realidade física de cada processo hidrológico, em geral, associa ao modelo um número elevado de parâmetros a serem determinados e calibrados. Adicionalmente, estes modelos exigem uma maior quantidade de dados de entrada, dos quais, geralmente, não se dispõe. Portanto, assumir um grau de incerteza maior na representação matemática e escolher um modelo conceitualmente mais simplificado, com menor número de parâmetros e dados de entrada, pode conduzir a resultados semelhantes com menor custo computacional e de preparação de dados (Muhlenhoff, 2016; Merz et al., 2022).

Outro aspecto igualmente importante a ser levado em conta, é a etapa de calibração. Essa etapa é a responsável pelo sucesso na aplicação prática de qualquer modelo hidrológico, quando utilizado para o planejamento e apoio a tomada de decisão na gestão de recursos hídricos (Peel e Blöschl, 2011; Beven, 2019). A calibração de modelos hidrológicos chuva-vazão, bem como os modelos hidrodinâmicos de propagação não é um processo trivial. Além de ser um problema matemático de diversas soluções igualmente possíveis, quando existem ao menos dois parâmetros a serem determinados, é função direta da disponibilidade e qualidade dos dados de entrada fornecidos aos modelos (Beven, 2006, 2019). Contudo, dispor destas informações para a calibração, especialmente em rios muito extensos e com grandes áreas de drenagem, nem sempre é possível (Tucci, 2005; Silva et al., 2013).

Dois são os processos para calibração: manual ou automático (Kan et. al., 2019). A calibração manual de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos restringe o número de tentativas utilizadas na determinação do valor ótimo dos parâmetros a serem calibrados. Isso acontece

mesmo para modelos em que há apenas um parâmetro a ser determinado. Por exemplo, nos modelos hidrodinâmicos que tomam por base as equações de Saint-Venant, o único parâmetro a ser determinado é o coeficiente de rugosidade do canal. Entretanto, inúmeras são as formas de representar a variabilidade deste coeficiente não só ao longo do canal, mas também através da seção transversal. A representação desta variabilidade da margem à existência de um extenso conjunto de combinações de valores que resolvem o problema. Testar todas essas combinações pelo método de tentativa e erro seria possivelmente inviável.

Em contrapartida, a rapidez na obtenção de resultados proporcionada pelo uso de ferramentas de calibração automática exige que se conheçam as funções-objetivo, o algoritmo de otimização, bem como o modelo a ser utilizado, pois algumas das soluções obtidas atendem somente às equações sem de fato representar a realidade física do sistema modelado (Kan et. al., 2019). Do mesmo modo, diversas soluções que respeitam os aspectos físicos de cada parâmetro no modelo são determinadas não sendo possível distinguir com exatidão a melhor entre elas (Tucci, 2005; Beven, 2006).

Cabe destacar que independentemente do método utilizado para a calibração de um modelo hidrológico a qualidade e quantidade dos dados disponíveis são fundamentais para que se obtenha sucesso nessa etapa. Adicionalmente, apesar dos ganhos na utilização de métodos automáticos, a escolha pelo melhor conjunto solução apontado pelo método automático, dentre os igualmente possíveis (Beven, 2006), é subjetiva, assim como no processo de calibração manual (Kan et. al., 2019).

Entende-se, com base no apresentado, que utilizada da maneira correta as ferramentas de calibração automática representam um importante avanço na melhor representação do sistema hidrológico simulado, à medida que permitem a avaliação de uma maior quantidade de cenários. O desenvolvimento de ferramentas para calibração automática destes modelos aliada a máxima exploração dos dados disponíveis para o estabelecimento de suas condições de contorno pode permitir a melhor compreensão das incertezas incorporadas ao valor estimado para cada parâmetro.

1.1 EVIDÊNCIAS DE INTERESSE

A variabilidade espacial de tipo e cobertura do solo em uma bacia hidrográfica dificulta a determinação *in situ* de muitos dos parâmetros comuns a modelos hidrológicos de base física. Adicionalmente, nem sempre é possível obter, em escala temporal e espacial adequadas, os dados climáticos de entrada essenciais para aplicação desses modelos (Sivapalan, 2003; Peel e Blöschl, 2011). O mesmo ocorre para os dados necessários ao sucesso da etapa de calibração (Beven, 2019). Nesse sentido, cada vez mais os dados

obtidos através das tecnologias desenvolvidas para o sensoriamento remoto têm sido explorados para aplicações em problemas de hidrologia (Ha et al., 2018; Bastiaanssen et al., 2007; Melesse et al., 2016; Serrat-Capdevila, et al., 2014; Dembele et al., 2016).

O uso dos dados de sensoriamento remoto, possibilitou a aplicação de modelos hidrológicos em regiões com ausência de dados observados *in situ*, sejam esses dados de entrada para o modelo ou mesmo dados a serem utilizados no processo de calibração. Outro aspecto associado ao uso dessas informações é a possibilidade de aliar múltiplas fontes de dados de entrada à calibração simultânea da variável de resposta do modelo (por exemplo, vazão) juntamente às variáveis de estado (utilizando, por exemplo, dados de umidade do solo). Os resultados satisfatórios dessas abordagens sugerem que o potencial de utilização dos dados de sensoriamento remoto em modelagem hidrológica ainda é um tema que não foi esgotado em suas possibilidades (Oliveira et al., 2017; Nijzink et al., 2018; Oliveira et. al., 2022).

Quanto a determinação dos valores dos parâmetros hidrológicos, além de apoiar as etapas de calibração e verificação (Nijzink et. al., 2018), os dados de sensoriamento remoto podem ajudar a compreender etapas específicas do ciclo hidrológico, como por exemplo, a fase de recessão do escoamento em uma bacia hidrográfica (Ehalt Macedo et. al., 2019). Trabalhos nesse sentido, como o de Ehalt Macedo et. al. (2019), abrem a possibilidade de utilizar esta nova fonte de dados também para a estimativa, *a priori*, do valor de um parâmetro hidrológico específico.

A estimativa 'a priori' de um parâmetro hidrológico pode ser feita a partir de relações conhecidas entre este parâmetro e características físicas da bacia hidrográfica (Peel e Blöschl, 2011); ou, pela análise de séries de dados, como as de vazão (Peel e Blöschl, 2011); ou, derivados de medidas feitas pelos sensores remotos (Ehalt Macedo et. al., 2019; Sharma et. al., 2020). Neste caso, o problema da calibração do modelo passaria a ter tantos graus de liberdade a menos quantos parâmetros fossem possíveis determinar *a priori*.

Reduzir os graus de liberdade em um problema de otimização, como são os problemas de calibração de modelos hidrológicos, é uma forma de reduzir os custos desta etapa da aplicação de um modelo hidrológico. Entretanto, há muitas questões a serem mais bem compreendidas quando se trata da melhor forma de utilizar as informações hidrológicas disponíveis a implementação de um modelo hidrológico. O presente trabalho pretende se aprofundar no processo de calibração automática de um modelo hidrológico, explorando as informações conhecidas 'a priori' para a bacia hidrográfica. Por fim, será possível avaliar os impactos desta abordagem sobre o processo de calibração automática de um modelo hidrológico.

1.2 HIPÓTESE

A fim de elucidar questões relacionadas a potencialidade de uso para as informações hidrológicas disponíveis ao processo de calibração de um modelo hidrológico, este trabalho assume como hipótese que:

Associar uma informação hidrológica “a priori” a etapa de busca dos valores ótimos dos parâmetros de um modelo hidrológico promove que o processo ocorra de forma mais assertiva, de modo a aproximar este processo da realidade física.

Cabe destacar que por informação hidrológica “a priori” entende-se: toda e qualquer informação, característica ou dado conhecido e disponível para uma bacia hidrográfica.

1.3 OBJETIVO

Esta pesquisa tem por objetivo testar a hipótese enunciada a partir da comparação entre as abordagens de calibração automática com e sem a associação de uma ou mais informações hidrológicas “a priori”. Para isso, o plano experimental proposto consta de quatro etapas desde a implementação de um modelo hidrológico a uma área de estudo; a escolha de um método de otimização e definição do problema a ser otimizado e; ao teste das diferentes abordagens de calibração automática, a convencional (sem a associação a uma informação “a priori”) e a proposta neste trabalho, associada a esta informação conhecida.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este trabalho está dividido em três partes principais. A primeira, apresentada no Capítulo 2, traz aspectos relacionados a complexidade associada a utilização de modelos hidrológicos, além de destacar a necessidade da etapa de calibração desses modelos. Em seguida, o Capítulo 3, contextualiza o estudo de caso a partir do qual esta pesquisa irá discutir a hipótese enunciada. Portanto, é neste capítulo que são apresentadas: (i) a bacia hidrográfica para a qual será aplicado um modelo hidrológico, (ii) o modelo hidrológico que será implementado e, (iii) o método de otimização para calibração automática de um modelo hidrológico.

Os Capítulos de 4 a 7 se concentram em apresentar com detalhes a implementação e os resultados para cada uma das etapas descritas no item anterior, a fim de alcançar o objetivo final do trabalho (Figura 1.1). No Capítulo 4 é apresentada a implementação do modelo

hidrológico MGB para a bacia do Rio Passaúna, bem como a calibração manual deste para a porção de montante desta bacia hidrográfica, a qual nos referimos como bacia do Alto Passaúna.

Na sequência, o Capítulo 5 aborda a importância amostral como o critério que guia a tomada de decisão acerca da forma como o problema de calibração de um modelo hidrológico é traduzido para o método de otimização. Definidos os critérios para esta tradução, o Capítulo 6 apresenta a aplicação e consolidação do Método do Recozimento Simulado (MRS) aplicado a calibração do MGB. Por fim, o Capítulo 7 apresenta os resultados da utilização de uma informação hidrológica “a priori” associada ao processo de calibração de um modelo hidrológico.

trazem para cada etapa descrita para alcançar o objetivo do trabalho, os os resultados obtidos para cada etapa do trabalho, a partir do objetivo da pesquisa. Seguindo a mesma estrutura de apresentação, por objetivos, o Capítulo 5, traz as considerações finais de cada etapa, convergindo para a verificação da hipótese enunciada no início deste trabalho. Por fim, estudos futuros, a partir dos resultados encontrados são apresentados como possibilidades para a continuação dessa pesquisa.

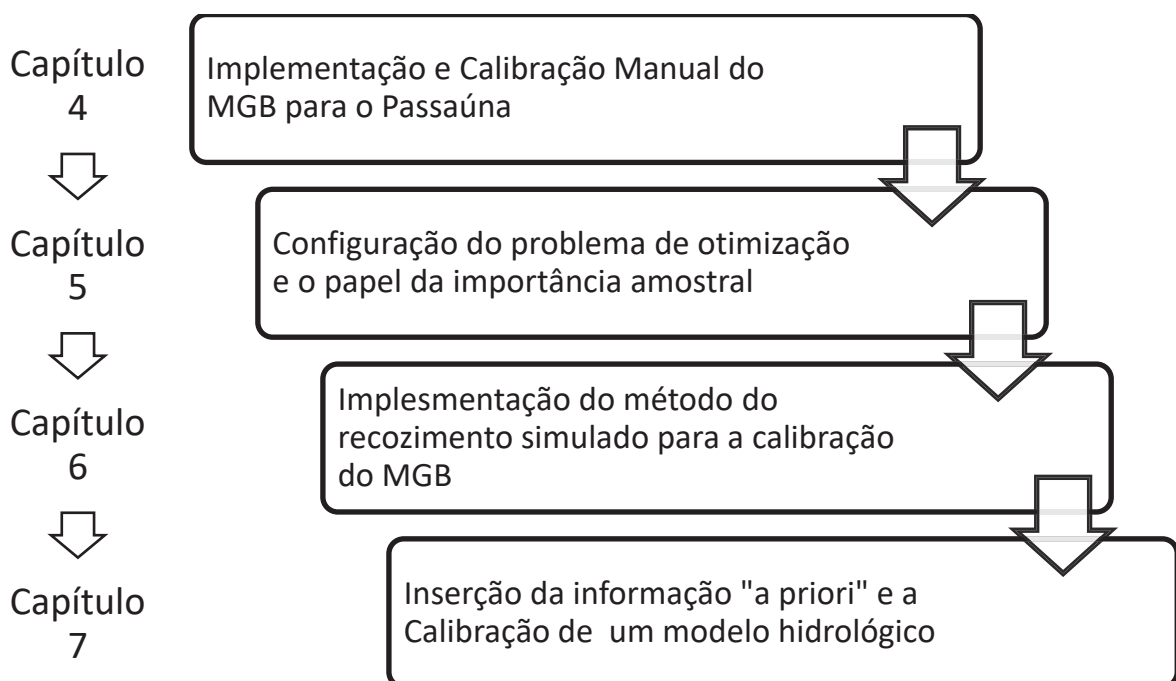


Figura 1.1 – Esquema de apresentação dos resultados da tese

2 ASPECTOS CONCEITUAIS EM MODELAGEM HIDROLÓGICA

Um modelo é uma representação do comportamento de um determinado sistema Dooge (1973). Os modelos hidrológicos são representações do sistema bacia hidrográfica, em todos os seus processos ou apenas em processos específicos (Tucci, 2005). A variabilidade espacial de tipos, uso e cobertura dos solos; a variabilidade climática que pode estar associada à extensão territorial da bacia hidrográfica e a variabilidade temporal associada aos mais diversos processos hidrológicos que ocorrem no sistema compõem um problema bastante complexo.

Os modelos matemáticos, em geral, descrevem cada processo hidrológico de forma modulada e caracterizada por parâmetros que são ajustados a partir dos dados locais de cada aplicação do modelo através do processo de calibração (Collischonn e Tucci, 2001). Com o avanço da capacidade de processamento dos computadores, a representação matemática dos processos se tornou cada vez mais fiel a realidade física. Existem hoje, uma grande quantidade de modelos hidrológicos disponíveis, cada um com características particulares e desenvolvidos com base em realidades possíveis e para a solução de diversas questões relacionadas a gestão de recursos hídricos (Horton et. al., 2022).

Neste capítulo apresentaremos aspectos importantes e fundamentais para o uso de modelos hidrológicos como ferramenta a gestão de recursos hídricos. Desde a escolha do modelo, com base no problema a ser solucionado, passando pela base de dados hidrológicos disponível e concluindo este panorama, apresentando alguns aspectos sobre a etapa de calibração. A essa etapa estão associadas ainda muitas incertezas e questionamentos, mas faz-se imprescindível, na grande maioria das vezes, para o sucesso na aplicação dos mais simples aos mais complexos modelos hidrológicos (Beven, 2006; Wheeler et. al., 2010; Serur, 2023).

2.1 AVANÇOS NA MODELAGEM HIDROLÓGICA

Para a ciência hidrológica, poder fornecer modelos de previsão desenvolvidos com base na teoria científica sólida para apoiar decisões de gestão de recursos hídricos em diferentes cenários é uma tarefa importante (Sivapalan et. al., 2003; Sivapalan, 2003). Entretanto, há muito trabalho está a ser feito para resolver esta questão e fornecer as simulações hidrológicas com a credibilidade necessária para apoiar a gestão sustentável dos recursos hídricos (Solomatine e Wagener, 2011; Kauffeldt et al., 2016; Horton et. al., 2022). São inúmeras as aplicações possíveis da modelagem nesse contexto: gestão da quantidade e qualidade da água (Ferreira, 2015; Knapik, 2009, 2014); gestão de inundações (Verwey,

2007; Merkuryeva *et al.*, 2015; Syme *et al.*, 2004); gestão e apoio a operação de reservatórios em tempo real para controle de cheias (Institutos LACTEC, 2015a, 2015b; Muhlenhoff, 2016; Uysal *et. al.*, 2019; Kuwajima *et. al.*, 2019); dentre outras aplicações.

A completa integração entre os processos de escoamento ainda é um desafio a ser vencido, especialmente em bacias urbanas (Salvadore *et al.*, 2015). Em contrapartida, o modelo mais complexo e matematicamente fiel aos processos representados nem sempre é a melhor escolha (Mertz *et. al.*, 2022). Modelos de estrutura mais complexa, além de mais parâmetros a serem calibrados, exigem, em geral, maior disponibilidade de dados de entrada. Deste modo, a escolha de um modelo hidrológico deve ser compatível com os recursos computacionais disponíveis, com a quantidade e qualidade dos dados existentes, com as características da área de estudo e, principalmente, com o objetivo da aplicação de tal ferramenta (Perrin *et al.*, 2003; Kirchner, 2006; Peel e McMahon, 2020; Mertz *et. al.*, 2022).

Apesar de todos os avanços computacionais que culminaram na existência de modelos bastante sofisticados, nos últimos anos o grande desafio permanece nas incertezas decorrentes da dificuldade de compreensão e representação da transformação chuva-vazão na bacia hidrográfica (Sivapalan *et. al.*, 2003; Peel e McMahon, 2020). Além dessa incerteza estrutural inerente a cada modelo hidrológico, existem ainda aquelas associadas aos dados de entrada, aos dados utilizados para a calibração dos parâmetros e aquela associada aos valores encontrados para cada parâmetro (Beven, 2006; Moges *et. al.*, 2021; Jarvis *et. al.*, 2022).

Deve-se destacar os avanços na capacidade de representação da heterogeneidade espacial de tipos, cobertura e usos de solo na bacia hidrográfica, especialmente nos modelos hidrológicos fisicamente baseados (Sivapalan, 2003; Kalcic *et. al.*, 2015; Peel e McMahon, 2020; Femeena *et. al.*, 2022). Sivapalan (2003) destaca que por menor que seja a escala de observação, esta heterogeneidade é onipresente, sendo que novas técnicas de medição e observação podem solucionar ou mesmo revelar maiores complexidades na descrição e representação dessa ampla gama de diferenças presente na natureza.

Da mesma forma que os modelos mais sofisticados podem ser excessivamente parametrizados (Merz *et. al.*, 2022) a progressiva subdivisão da bacia hidrográfica em unidades cada vez mais homogêneas, pode tornar o problema de calibração bastante complexo, com inúmeros parâmetros a serem determinados (Collischonn e Tucci, 2001; Sivapalan *et. al.*, 2003; Femeena *et. al.*, 2022; Jarvis *et. al.*, 2022; Narváez e Paiva, 2022). Em parte, essa subdivisão contorna a complexidade de representação integrada dos processos, todos interdependentes, em um ambiente heterogêneo. Em parte, a cada uma das unidades para as quais o balanço de massa do modelo será aplicado, estão associados parâmetros que devem ser encontrados no processo de calibração.

Em termos de evolução da modelagem hidrológica, poderosa ferramenta para a compreensão das mudanças hidrológicas (Moges et. al., 2021; Fleischmann et. al., 2021; Avila et. al., 2022), ao longo da última década um ponto essencial tem sido discutido em relação ao uso das tecnologias hoje disponíveis para uma fusão mais efetiva dos dados em modelos (Solomatine e Wagener, 2011; Merkuryeva et al., 2015).

Nesse sentido, uma abordagem avançada baseada no processamento e uso integrado de dados heterogêneos vindos dos bancos de dados convencionais e das informações de sensoriamento remoto tem sido construída (Balsamo et. al., 2018; Ma et. al., 2018; Oliveira et. al., 2020; Fleischmann et. al., 2021; Freitas et. al., 2022; Bhanja et. al., 2023).

Dentre os aspectos citados por Solomatine e Wagener (2011) e Merkuryeva et al., (2015) ilustrados na Figura 2.1, e que continuam a se destacar como desafios (Kirchner, 2006; Peel e Blöschl, 2011; Ceola et. al., 2014; Beven, 2019; Peel e McMahon, 2020), estão:

(i) Tecnologias para uma fusão mais efetiva dos dados em modelos. Um dos aspectos aqui apontados é a utilização ótima dos dados para calibração e avaliação do modelo. A possibilidade de utilização dos dados de sensoriamento remoto já permite medições precisas de parâmetros hidráulicos e hidrológicos, muitos obtidos em tempo real (com citam Merkuryeva et al., 2015), ou mesmo a calibração de modelos com base na variável de saída e considerando processos intermediários das variáveis de estado (por exemplo, em Oliveira et. al., 2020);

(ii) Maior cuidado na calibração e validação dos modelos, utilizando para tal assinaturas mais informativas do comportamento do modelo, que permitem a detecção de quão consistente esse é em relação ao sistema que representa em cada aplicação (Gupta et al., 2015). Como apontam, isso se torna particularmente crucial quando se trata da avaliação dos impactos decorrentes da mudança do clima e do uso do solo. Em cenários para os quais as previsões futuras estão fora do intervalo de variabilidade já observado de respostas do sistema, isso continua sendo um desafio (Moges et. al., 2020; Peel e McMahon, 2020).

(iii) avanço na forma como os resultados da modelagem são entregues aos decisores e a população, que interage com o recurso hídrico e deve ser inserida no processo de gestão do mesmo (Solomatine e Wagener, 2011; Lehmann et. al., 2014; Kanwar et. al., 2010).

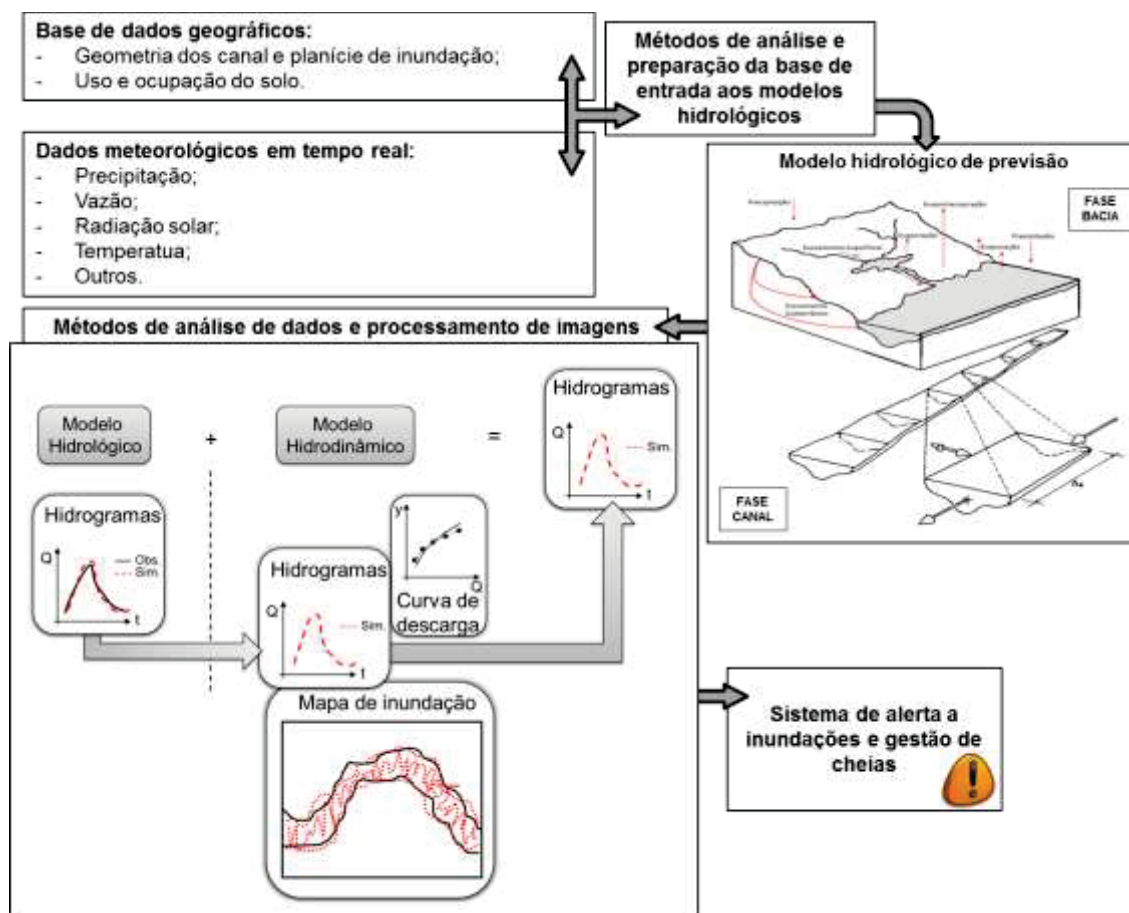


Figura 2.1 – Perspectivas futuras da modelagem hidrológica
 Fonte: Adaptado de Merkuryeva *et al.* (2015) *apud* Muhlenhoff (2016)

Nos itens seguintes os aspectos relacionados a melhor utilização das informações hidrológicas disponíveis e como esta abordagem pode favorecer a redução de incertezas no processo de calibração dos modelos hidrológicos, bem como o problema de calibração automática de um modelo hidrológico serão abordados.

2.2 USO DE MODELOS HIDROLÓGICOS, SENSORIAMENTO REMOTO E SIG

A escolha de um modelo hidrológico para aplicação a um determinado problema deve se basear em uma série de critérios (Salvadore *et al.*; 2015). A Tabela 2.1 (Ferreira *et al.*, 2018), apresenta para alguns modelos hidrológicos uma série de características que podem ser avaliadas antes da escolha destes modelos. Dentre as características listadas a possibilidade de integração com sistemas de informação geográfica (SIG's). Isso porque, como já apresentado, em termos de evolução da modelagem hidrológica, um ponto essencial a ser discutido (Solomatine e Wagener, 2011; Merkuryeva *et al.*, 2015) é a capacidade de melhor utilização das tecnologias disponíveis para completo aproveitamento das informações na implementação e aplicação dos modelos hidrológicos.

TABELA 2.1 - RESUMO DE CARACTERÍSTICAS BÁSICAS PARA ESCOLHA DE UM MODELO HIDROLÓGICO

INFORMAÇÕES GERAIS BÁSICAS		SWM *	SWAT *	HSPF *	AGNPS *	AnnAGNPS *	CE-QUAL-W2*	MIKE SHE	HEC-HMS *	STORM *	WEPP *	MGB *
Nome do software (*) Domínio Público		USEPA	Texas A&M University	USEPA	USDA-ARS	USDA-ARS / NRCS	USACE	DHI	USACE	USACE	USDA-ARS	IPH/FRGS (Grupo HGE)
Desenvolvedor												
Tipo de modelo	Coefficientes de exportação	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-
	Fisicamente baseado	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X
Discretização espacial de uso e ocupação do solo	Urbano	XXX	XX	XX	-	-	-	XXX	XXX	XXX	-	-
	Rural	XX	XXX	XXX	XXX	XXX	-	XXX	XXX	-	XXX	XX
	Agricultura	X	XXX	XXX	XXX	XXX	-	XXX	XXX	-	XXX	XX
	Floresta	X	XXX	XXX	-	-	-	XXX	XXX	-	XXX	XXX
	Rios	X	X	XXX	-	-	XXX	XXX	XXX	-	-	X
	Lagos	X	X	XX	-	-	XXX	-	-	-	-	-
Discretização temporal	Reservatórios/Barramentos	XX	X	XX	-	-	XXX	XXX	XX	-	-	-
	Orientado por eventos	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
	Contínuo	X	X	X	-	X	-	-	-	-	-	X
Discretização temporal de simulação	Sub-diário	X	-	X	X	-	X	X	X	X	-	-
	Diário	X	X	-	-	X	-	-	-	-	X	X
	Mensal	X	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
Quantidade de dados necessários	Alta	Baixa	Média	Média	Média	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Média	Baixa	Baixa
Nível de dificuldade para calibração	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
Tempo médio para implementação (meses)	< 3	> 1	> 6	> 1	> 1	> 1	> 6	> 6	> 1	< 1	< 1	< 1
Grau de experiência requerido para modelagem	Alto	Médio	Alto	Baixo	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Baixo	Médio	Baixo	Baixo
Linguagem de programação do software	C	Fortran	Fortran	Fortran	Fortran	Fortran	Fortran	-	Fortran	Fortran	Fortran	Fortran
Referência Principal	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[11]

TABELA 2.1 - RESUMO DE CARACTERÍSTICAS BÁSICAS PARA ESCOLHA DE UM MODELO HIDROLÓGICO (CONTINUAÇÃO)

Nome do software (* Dominio Público)	SWM * 1-D		SWAT * 1-D		HSPF * 1-D		AGNPS * 1-D		AnnAGNPS * 1-D		CE-QUAL-W2* 2-D		MIKE SHE 1-D		HEC-HMS * 1-D		STORM * 1-D		WEPP * 1-D		MGB * 1-D		
	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	2-D	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	1-D	
Nível de complexidade (dimensões)																							
Representação espacial da bacia (unidades de cálculo)	Concentrado	X	-	-	-	-	X	X	X	X	-	-	-	-	-	X	-	X	X	-	-	-	
	Grade regular com características hidrológicas uniformes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Áreas permeáveis e impermeáveis, canais e reservatórios	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Unidades de Resposta Hidrológica (URH)	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	-	X	X
Modelo de transformação chuva - vazão	Armazenamento não linear (e equação de Manning)	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SCS	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-	-	-	-	-	X	X	X	X	-	-	-	-
	Maximum Surface Retention	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Hidrograma Unitário	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	-	-	-	-
	Hidrograma	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-	-
	Outros	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	-	-	-	X
Modelo de EVPT	Hargreave	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Penmann	-	X	-	-	-	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Penman-Monteith	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X
	Série temporal	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-	-
	Relação Empírica	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-

BASE DO EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO

TABELA 2.1 - RESUMO DE CARACTERÍSTICAS BÁSICAS PARA ESCOLHA DE UM MODELO HIDROLÓGICO (CONTINUAÇÃO)

Nome do software (*) Domínio Público		SWM	SWAT	HSPF	AGNPS	AnnAGNPS	CE-QUAL-W2*	MIKE SHE	HEC-HMS	STORM	WEPP	MGB	
COMPUTATIONAL FEATURES													
Fontes pontuais		X	X	X	X	X	X	-	-	X	-	-	
Transporte subterrâneo		X	X	X	X	X	-	X	-	-	X	-	
Armazenamento		X	X	X	X	X	X	-	-	X	X	-	
Erosão		-	X	X	X	X	-	-	-	X	X	-	
Pollutant build up & Washoff		X	X	X	X	X	-	-	-	X	-	-	
Pollutant routing		X	X	X	X	X	X	-	-	X	-	-	
Field Practices		-	X	-	X	X	-	-	-	-	X	-	
BMP Computation		X	X	X	X	X	-	-	-	X	X	-	
Generalized BMP		-	-	X	X	X	-	-	-	-	X	-	
Detailed BMP		X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Tipos de BMP's		Bacias de detenção	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	
		Infiltration Practices	X	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-
		Vegetative Practices	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-
		Wetlands	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Outras	X	X	-	-	-	-	-	-	X	-	-

O uso de ferramentas de SIG e dos dados advindos do sensoriamento remoto aumentaram a capacidade de representação da heterogeneidade espacial das bacias hidrográficas. Para o caso de alguns tipos de dados meteorológicos, de clima e até mesmo níveis de água em grandes corpos d'água, tal tecnologia possibilitou uma melhor representação também em escala de tempo, fornecendo até dados em tempo real. Diversos autores tem utilizado com sucesso os produtos de sensoriamento remoto evidenciando a potencialidade existente para a ciência hidrológica nesta área do conhecimento (Caetano e Casaroli, 2016; Duan et. al., 2021).

A capacidade dos sensores remotos estão em constante evolução, permitindo a obtenção de imagem com cada vez melhores resoluções espaciais e temporais que podem ser aplicados nos estudos em hidrologia: (i) o SRTM com resolução espacial de 30m (Oliveira et al., 2017); (ii) TRMM (Tropical Rainfall Measurements Mission) com resolução temporal diária (Abdelmoneim et. al., 2020); (iii) produtos do ALOS-PALSAR para a estimativa e mapeamento áreas sujeitas a inundação (Chapman et al., 2015; Elmahdy et. al., 2022); (iv) SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) para a estimativa da umidade do solo (Gomis-Cebolla et. al., 2022; Hostache et. al., 2020); (v) MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) para a estimativa da evapotranspiração e qualidade da água (Rajib et. al., 2020); (vi) imagens do satélite Jason-2 para a estimativa da altimetria (Huang, et al., 2020; Bogning, et al., 2021); (vii) GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experimental*) para a estimativa de variação no armazenamento de água, a partir dos dados de gravimetria (Ehalt Macedo et. al., 2019).

Paz et. al. (2016) e Pontes et. al. (2017) afirmam que embora os modelos hidrológicos, incluindo os de grandes bacias, necessitem de uma grande quantidade de dados de entrada, a extração manual destes a partir de mapas impressos pode ser extremamente dispendiosa. Neste sentido, o uso de sistemas de informação geográfica (SIG's) para a obtenção destas informações, com base em produtos de sensoriamento remoto, apresenta uma importante contribuição (Duan, et. al., 2021).

Apesar dos dados de sensoriamento remoto representarem uma importante fonte de dados de entrada aos modelos hidrológicos (Balsamo et al., 2018), a incerteza associada a essas medições é um dos principais limitantes para a modelagem (Pontes et. al., 2017; Oliveira et al., 2020). No processo de implementação um modelo hidrológico distribuído e entrada de dados, já é consistente e bem integrado o uso das ferramentas de geoprocessamento. Trabalhos como os de Paz et. al. (2006), Buarque et. al. (2008) e Femeena et. al. (2022), por exemplo, apresentam de forma detalhada os métodos e a construção de uma metodologia para a extração de informações dos modelos numéricos de terreno, tipo e cobertura de solos necessários a modelagem hidrológica.

A entrada de dados climáticos exigida pelos modelos de transformação chuva-vazão, também já pode ser feita de forma integrada com sistemas de geoprocessamento para geração dos arquivos de entrada, como apontam os estudos elencados por Duan, et. al. (2021). Duan, et. al. (2021), enfatizam que os dados derivados do sensoriamento remoto podem ser utilizados tanto como dados de entrada aos modelos hidrológicos, como dados para a estimativa das variáveis de estado, dados para a calibração e também para a estimativa direta de parâmetros hidrológicos. Entretanto, claramente, ainda existem lacunas de pesquisa a serem exploradas quando se observa a combinação entre o processo de calibração integrado com um banco de dados abrangente e de diferentes fontes.

A possibilidade de estimar um parâmetro hidrológico calibrável (Ehalt Macedo et. al., 2019; Muhlenhoff et. al., 2019; Duan et. al., 2021; Fang et. al., 2022), abre caminho para explorar a ideia de incorporar ao processo de calibração, alguma informação hidrológica *a priori*, obtida diretamente ou estimada a partir de outras informações conhecidas sobre a área de estudo. Estimar o valor de um parâmetro *a priori* é uma das formas de se reduzir os graus de liberdade do problema de otimização a ser resolvido no processo de calibração. Esta estimativa direta pode ser realizada a partir de relações hidrológicas conhecidas (Sharma e Biswal, 2022), de dados de sensoriamento remoto (Ehalt Macedo et. al., 2019; Muhlenhoff et. al., 2019; Sharma et. al., 2020), ou ainda, de dados de sensoriamento remoto aliados a técnicas de Machine Learning (Fang et. al., 2022)

A hipótese enunciada por este trabalho assume que, em algum grau, há a minimização do custo computacional associado ao processo de calibração automático de um modelo hidrológico, quando este é adicionado de uma informação *a priori*. É consenso que a redução dos graus de liberdade do problema de calibração (por exemplo, pela inserção de um parâmetro obtido “*a priori*”) pode gerar ganhos nesse processo (Duan et. al., 2021; Peel e Blöschl, 2011; Fang et. al., 2022). Para além desta possibilidade, uma informação “*a priori*” de outra natureza, como por exemplo um critério de importância amostral, potencialmente, pode tornar mais assertiva busca do conjunto solução ótimo global, condicionando o caminhamento do algoritmo de otimização de acordo com características conhecidas da área de estudo. Nesse contexto, este trabalho está inserido.

2.3 CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Nos últimos anos, como resultado de técnicas computacionais aprimoradas e da disponibilidade de dados digitais espacialmente distribuídos, o detalhamento conceitual dos modelos hidrológicos aumentou dramaticamente. No entanto, modelar processos hidrológicos de forma distribuída pode ser um desafio em bacias hidrográficas fortemente heterogêneas.

A complexidade da utilização de modelos hidrológicos, em especial, na calibração de seus parâmetros, ainda requer atenção de pesquisadores (Salvadore et al., 2015).

Neste contexto, vários estudos têm-se utilizado de estratégias globais de otimização, como o método de recozimento simples (Pan e Wu, 1998), algoritmos genéticos (Ines e Droogers, 2002), otimização de colônia de formigas (Abbaspour et al., 2001), métodos complexos embaralhados (Duan et al., 1993; Vrugt et al., 2003) e otimização de enxame de partículas (Brunetti et al., 2018), dentre outros. Os resultados destas pesquisas indicam que os algoritmos de otimização global superam os métodos de pesquisa local para problemas complexos de alta dimensão.

O alto desempenho das estratégias de busca global em problemas multimodais complexos é contrabalançado por sua lenta convergência em problemas unimodais. No entanto, uma vez que a forma da superfície de resposta (dada pela função objetivo) não é conhecida a priori, ao resolver problemas do mundo real, é preferível aplicar métodos de otimização global.

Em termos de calibração de modelos hidrológicos, diversos algoritmos de otimização foram desenvolvidos (por exemplo, Beven e Binley, 1992; Duan et al., 1992; Vrugt et al., 2003; Vrugt et al., 2005; Hill e Tiedeman, 2006; Abebe et al., 2010; Moreau et al., 2013; Sen e Stoffa, 2013). Todas estas contribuições tratam conceitualmente da representação dos processos hidrológicos através de equações tradicionais e com esquemas de otimização para a calibração de seus parâmetros.

Uma discussão ainda em aberto é a viabilidade de se incluir todos os parâmetros do modelo no processo de calibração para alcançar uma otimização eficiente. Nesse mesmo sentido, a parametrização excessiva é outro problema bem conhecido na modelagem de chuva-vazão (van Griensven et al., 2006). Portanto, quando estimamos os parâmetros de um modelo, aqueles menos sensíveis, ou com baixa importância para a aplicação específica em questão (identificada através de análise de sensibilidade ou análise incerteza), devem ser bloqueados em um valor fixo a fim de promover uma calibração mais eficiente.

Os trabalhos aqui citados foram aplicados para diferentes bacias hidrográficas. Um aspecto comum de todos eles são a utilização de algoritmos computacionais de modelos hidrológicos acoplados com algoritmos de calibração. Não há evidências de análise de sensibilidade para os valores dos parâmetros otimizados e se, de fato, possuem uma representação e consistência hidrológica a partir de dados de monitoramento.

No que concerne aos objetivos deste trabalho, existe um grande interesse em buscar metodologias alternativas para calibração de modelos hidrológicos. Existem muitas técnicas heurísticas disponíveis para solução de problemas combinatórios, desde os métodos heurísticos menos convencionais até os chamados metaheurísticos (Machado, 2009;

Machado et. al., 2012). Uma técnica metaheurística muito estudada atualmente tem sido o método do recozimento simulado (MRS), mais conhecido como Simulated Annealing (AS).

A escolha do MRS (Bueno e Soeiro; 1997; Monticelli et. al., 2008) é fundamentada, não só por ser uma das mais técnicas mais flexíveis para solução de problemas complexos (Kaviski et. al., 2008; Bueno e Soeiro; 1997; Kaviski, 2022), mas também nas aplicações desenvolvidas em Machado et. al. (2009, 2012) para otimização do planejamento de sistemas regionais de tratamento de efluentes e sua expansão de capacidade; em Freitas (2016) para operação de reservatórios para controle de cheias, e; em Andia (2017) para análise operacional em estruturas hidráulicas de usinas hidrelétricas. Todos estes trabalhos produziram resultados robustos e consistentes através dos processos de otimização realizados com base na técnica do recozimento simulado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A bacia hidrográfica do rio Passaúna é um dos importantes mananciais que abastecem a Grande Curitiba, deste modo foi escolhida como uma área de estudo para o desenvolvimento desta pesquisa. Da mesma forma, o Modelo de Grandes Bacias tem sido amplamente utilizado (Oliveira *et. al.*, 2017). O método de otimização por recozimento simulado é de simples implementação (Kaviski *et. al.*, 2008; Bueno e Soeiro; 1997). Neste item, cada um destes aspectos será apresentado com mais detalhe.

3.1 BACIA DO RIO PASSAÚNA

O rio Passaúna é afluente pela margem direita do Alto rio Iguaçu e drena uma área de cerca de 217km² ao longo de seus quase 60km de extensão (Figura 3.1). Localizada no primeiro planalto paranaense, a bacia hidrográfica do Rio Passaúna tem altitude média de 900 m. O rio Passaúna tem suas nascentes no município de Almirante Tamandaré e percorre cerca de 57 km definindo o limite territorial entre Curitiba e os municípios de Campo Magro e Campo Largo. Em sua porção baixa, o rio corta parte do município de Araucária (Figura 3.1). O reservatório existente na bacia hidrográfica foi construído em 1990 e desde então, configura-se como um dos principais mananciais de abastecimento de água para Curitiba e Região Metropolitana (Silva Filho, 2010).

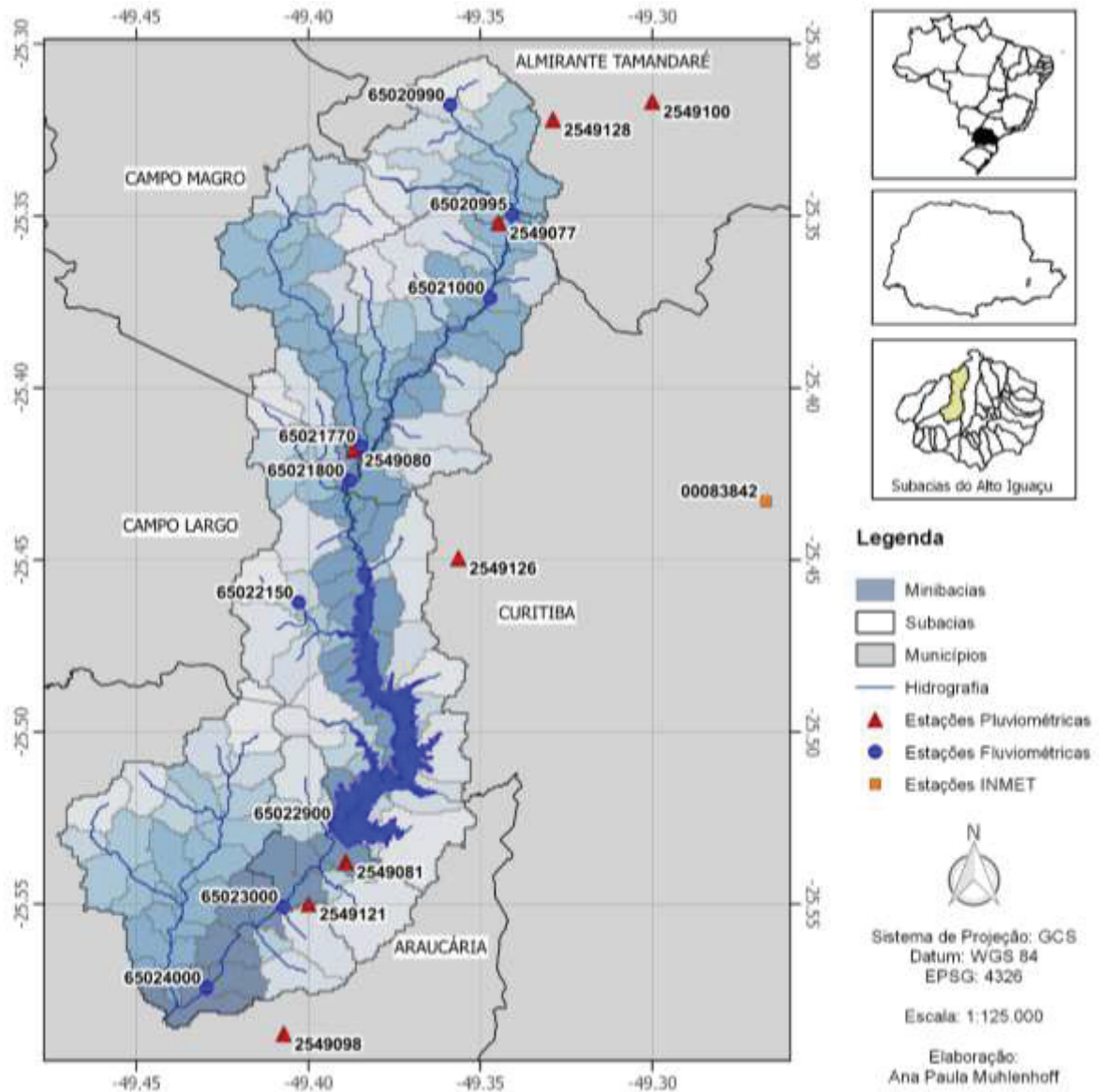


Figura 3.1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Passaúna na região metropolitana de Curitiba

3.1.1 Dados pluviométricos

Ao longo da bacia do rio Passaúna podemos encontrar nove estações de monitoramento pluviométrico (Figura 3.1). A disponibilidade de dados nestas estações está apresentada na Figura 3.2. No Quadro 3.1 é possível observar os pluviogramas de cada estação.

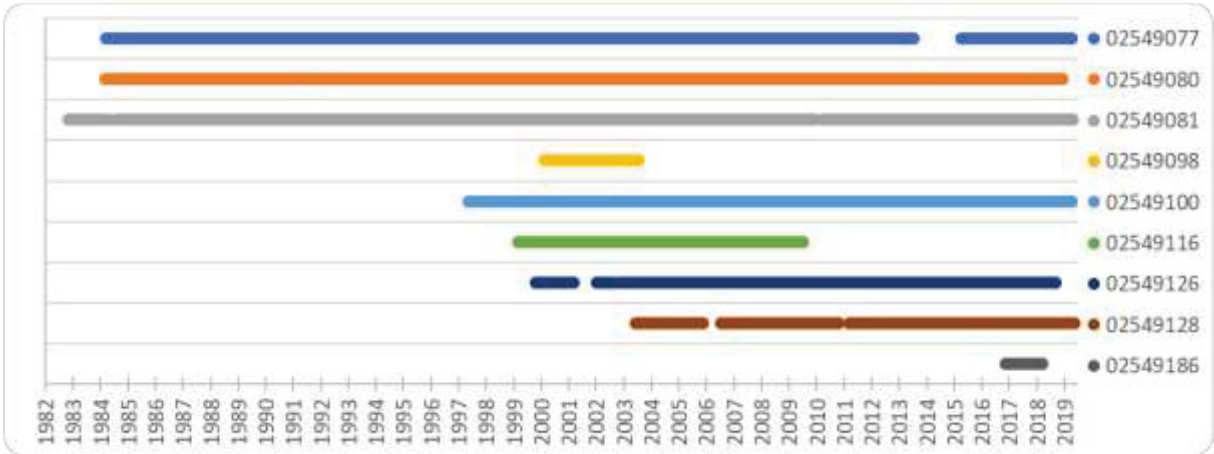
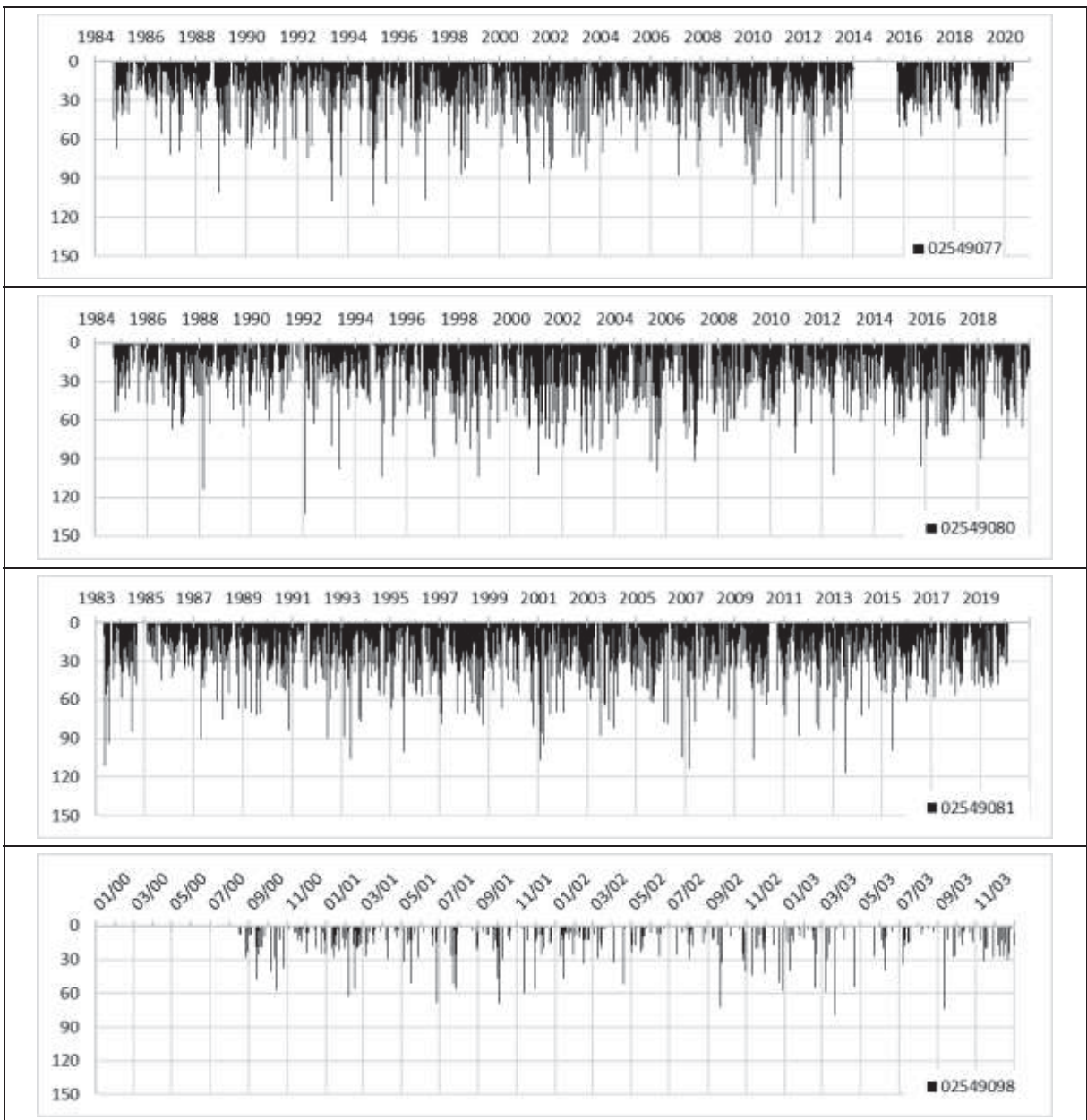
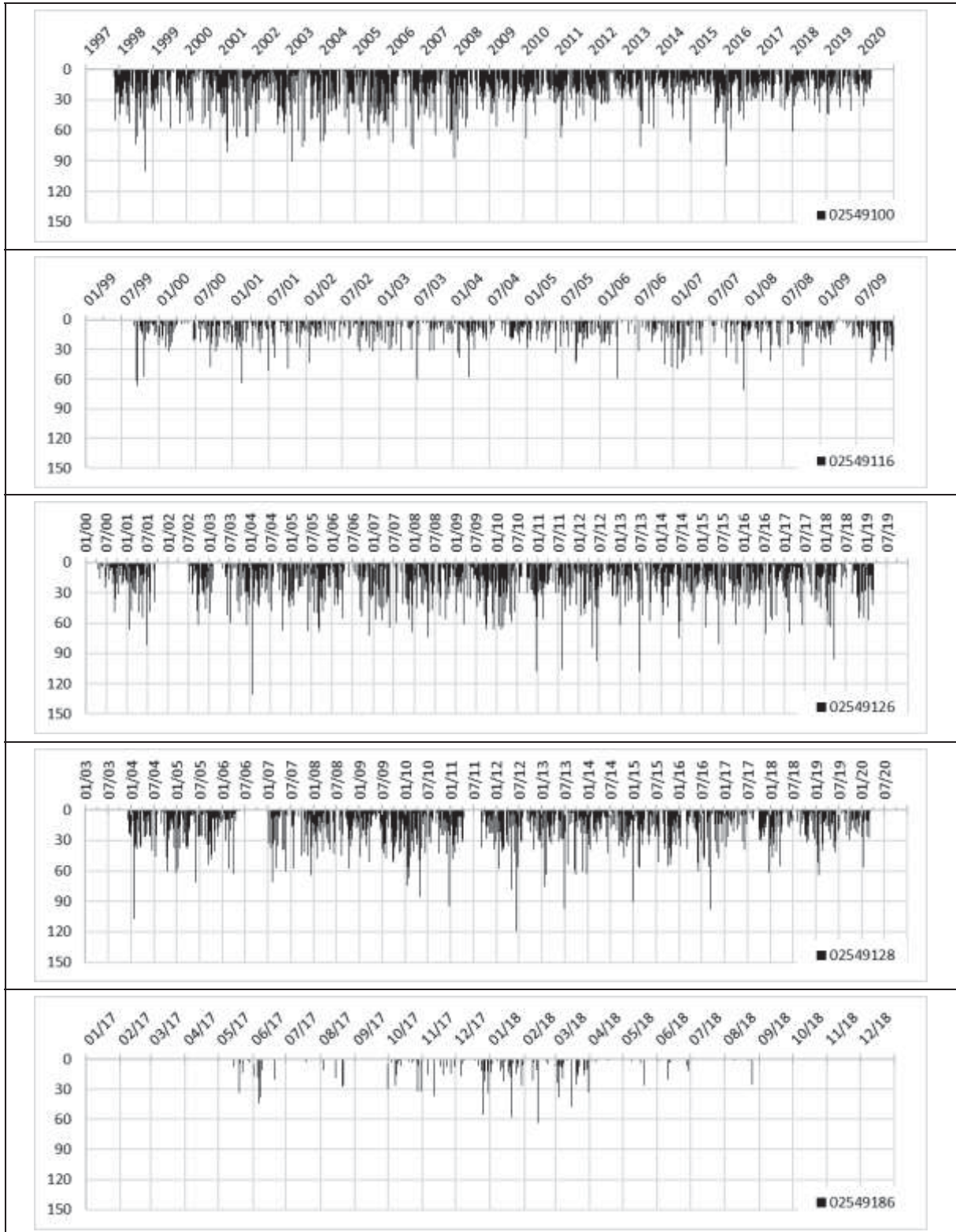


Figura 3.2 – Disponibilidade de dados pluviométricos



Quadro 3.1 – Pluviogramas das estações na região da bacia hidrográfica do rio Passaúna



Quadro 3.1 – Pluviogramas das estações na região da bacia hidrográfica do rio Passaúna (continuação)

3.1.2 Dados fluviométricos

Os pontos de monitoramento de vazões ao longo da bacia hidrográfica do rio Passaúna estão destacados na Figura 3.1. A disponibilidade de dados nestas estações de monitoramento pode ser observada na Figura 3.3, abaixo. Destaca-se que o reservatório para abastecimento de água da Grande Curitiba foi construído em 1990, sendo então que as estações a jusante do reservatório passaram a ser regularizadas por ele.

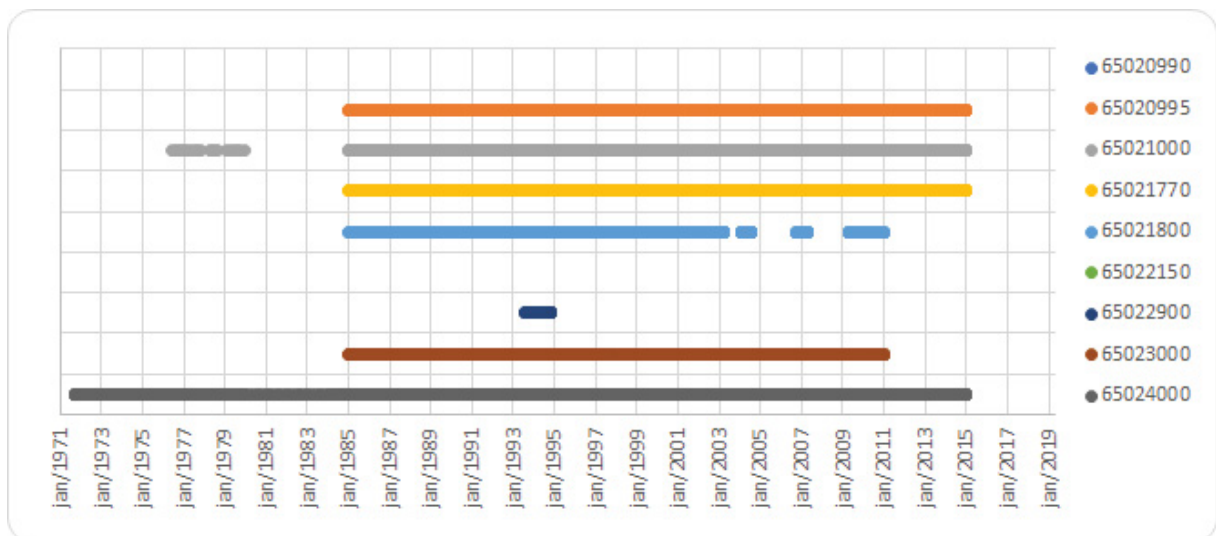


Figura 3.3 – Disponibilidade de dados fluviométricos

3.1.3 Dados de uso e ocupação do solo

O MAPBIOMAS é um projeto que disponibiliza a classificação de uso e ocupação do solo para todo o território brasileiro ano a ano, tomando por bases mosaicos construídos a partir de imagens da missão Landsat. A partir destas informações a Figura 3.4 apresenta o mapa de classificação de uso e ocupação do solo para a bacia do rio Passaúna. Foram utilizados dados da Coleção 3.0 do MAPBIOMAS (MAPBIOMAS, 2018). Informações como modelo digital de elevação, tipos de solo, declividades, foram todos utilizados da base de dados disponível para a subacia do Alto Iguaçu (SUDERSHA, 2000).

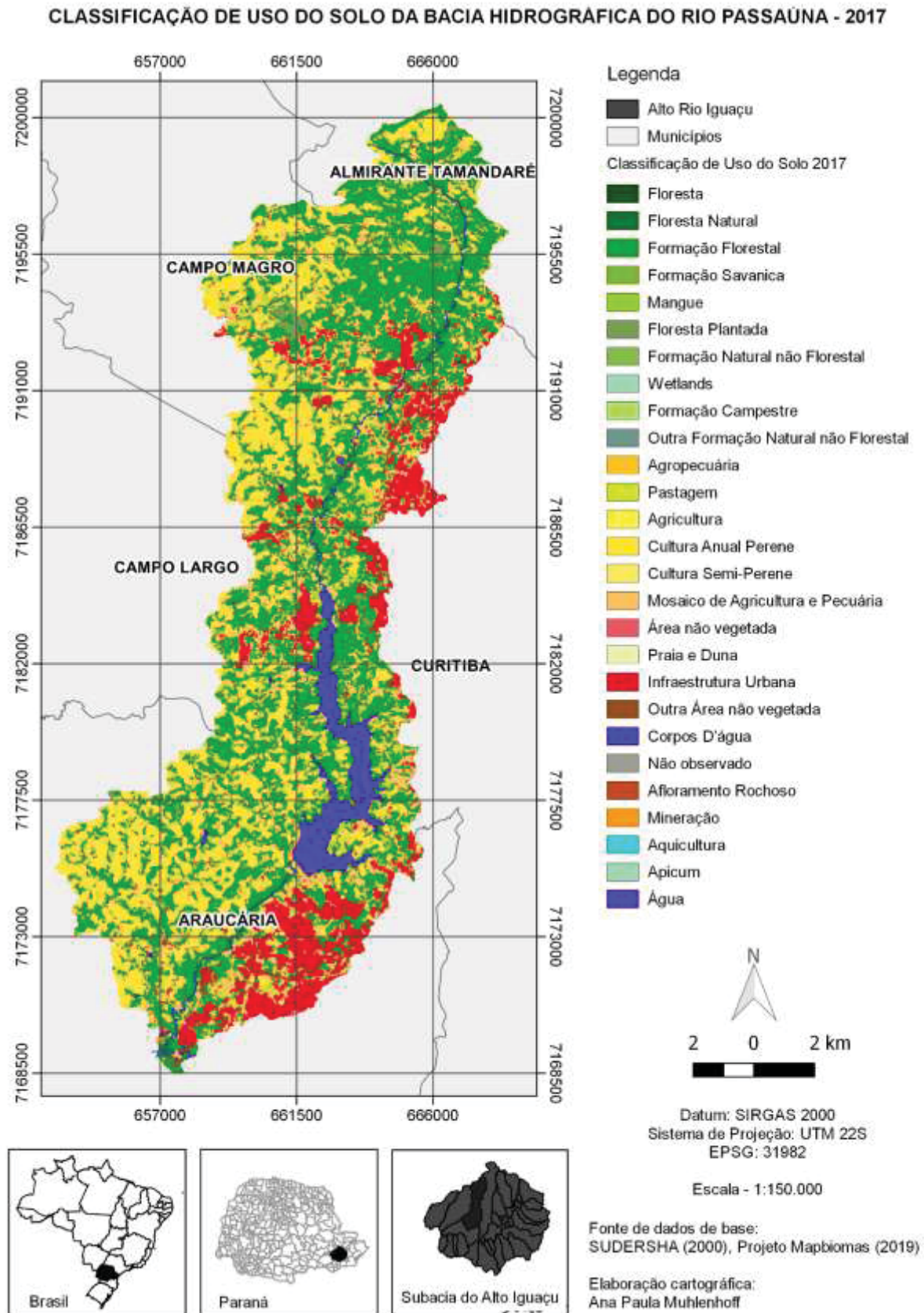


Figura 3.4 – Classificação do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Passaúna

3.2 MODELO HIDROLÓGICO DE GRANDES BACIAS – MGB-IPH

O modelo de grandes bacias – MGB (Collischonn, 2001; Collischonn *et. al.*, 2007; Pontes *et al.*, 2017) é um modelo de transformação chuva-vazão determinístico, conceitual e distribuído em células desenvolvido para a aplicação a grandes áreas. A Figura 3.5 apresenta um esquema geral da representação espacial do sistema bacia hidrográfica feita pelo MGB.

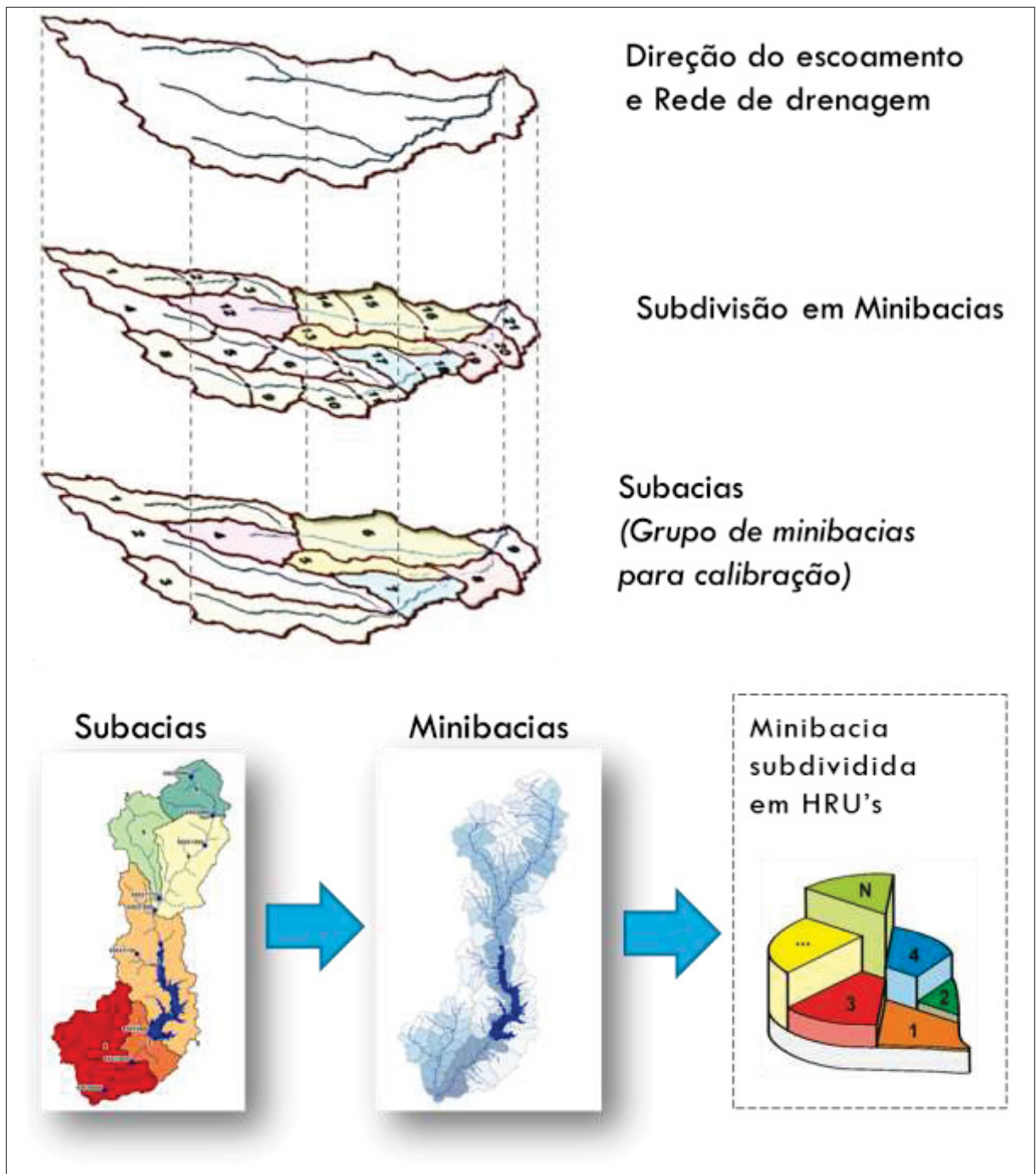


Figura 3.5 – Discretização espacial do MGB
Fonte: Adaptado de Pontes et al. (2017)

Conforme apresenta a Figura 3.5 e descrevem Collischonn *et al.* (2007); Pontes *et al.* (2017); Oliveira *et al.* (2017) a bacia hidrográfica no MGB é dividida em unidades de resposta chamadas de mini bacias. As mini bacias, por sua vez apresentam uma subdivisão em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). Estas são as unidades de cálculo onde são computados os processos hidrológicos representados pelo modelo: evapotranspiração, interceptação e geração de escoamento (Oliveira, 2017), como apresenta a Figura 3.6.

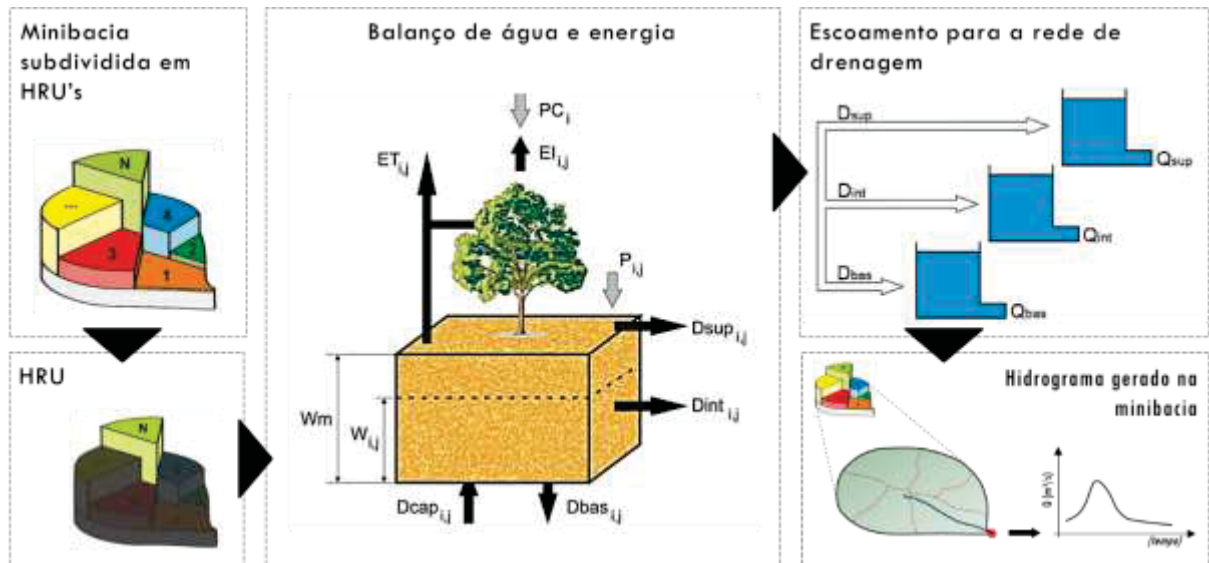


Figura 3.6 – Esquema conceitual do modelo de grandes bacias
Fonte: Adaptado de Pontes *et al.* (2017) e de Collischonn *et al.* (2020)

Para cada HRU é calculado o balanço hídrico conforme os processos hidrológicos representados pelo MGB, descritos em detalhes no manual de referência teórica do modelo (Collischonn *et al.*, 2020). O escoamento gerado em cada HRU dentro da mini bacia é acumulado e propagado como em um reservatório linear ao longo do trecho de canal da mini bacia de seu ponto inicial até seu exutório em outra mini bacia (Figura 3.6). Para a propagação ao longo do canal é possível realizá-la com base no modelo proposto por Muskingum-Cunge ou então pelo modelo hidrodinâmico inercial de vazões (Paiva *et al.*, 2013).

Cabe destacar que no MGB as HRU's são definidas a partir da combinação de duas características do solo: a profundidade (raso ou profundo) e cobertura. A cada uma dessas unidades estão associados grande parte dos parâmetros calibráveis do modelo, parâmetros de solo (Tabela 3.1). Desta forma, quanto maior o número de HRU's definidas, maior será o número de parâmetros a serem determinados durante o processo de calibração.

TABELA 3.1 – PARÂMETROS DE SOLO DO MODELO DE GRANDES BACIAS
 Fonte: Adaptado de Medeiros *et al.* (2018) e Oliveira (2017)

Parâmetro	Descrição	Valor padrão	Unidades
Wm	Capacidade de armazenamento de água no solo	50 - 1000	mm
b	Relação entre armazenamento e saturação	0.12 - 1.6	-
Kbas	Controle do escoamento subterrâneo	0.05 - 5.00	mm/dia
Kint	Controle do escoamento sub-subterrâneo	4.0 - 40.0	mm/dia
XL	Controle da curva de redução do reservatório sub-superficial	0.67	-
CAP	Controle da ascensão capilar	0.00	mm/dia
Wc	Fração de Wm abaixo da qual não há geração de escoamento	0.100	mm
CS	Correção do tempo de concentração para drenagem superficial	1.0 - 20.0	-
CI	Correção do tempo de concentração para drenagem sub-superficial	50 - 200	-
CB	Tempo associado a taxa de recessão do hidrograma	1200 - 8000	horas
QB	Parâmetro de vazão associado a condição inicial do modelo	0.010	m ³ /(s.km ²)

3.3 MÉTODO DO RECOZIMENTO SIMULADO APLICADO A UM MODELO HIDROLÓGICO

Conforme descreve Bueno e Soeiro (1997), o processo de otimização por recozimento simulado tem como fundamento a mecânica estatística e o algoritmo de simulação proposto por Metropolis *et al.* (1953). O algoritmo de busca randômica é de simples implementação se baseia em princípios termodinâmicos para avaliar a convergência (Bueno e Soeiro, 1997). O processo físico ao qual é análogo o de recozimento (recristalização) de um metal. Este processo consiste no aquecimento do material, até muito próximo de seu ponto de fusão, seguido de um lento resfriamento. A cada nova temperatura é dado um tempo para que a estrutura cristalina do material metálico chegue ao estado de menor energia, correspondente a sua configuração mais estável (Bueno e Soeiro, 1997; Kaviski *et al.*, 2008; Andia, 2017).

Deste modo, as temperaturas as quais o material é submetido em seu resfriamento correspondem a uma sequência de estágios gerada pelo algoritmo. Estes estágios podem ser entendidos como regiões no espaço de soluções possíveis do problema. Esta característica torna o método de otimização por recozimento simulado uma ferramenta de otimização global, uma vez que permite investigar diversas regiões dentro de uma superfície de soluções. Na Tabela 3.2 são apresentados os parâmetros do método de recozimento simulado que controlam a geração destes estágios.

TABELA 3.2 – PARÂMETROS DO MÉTODO DE RECOZIMENTO SIMULADO

Parâmetro	Descrição
<i>simmax</i>	Número máximo de simulações
<i>sucmax</i>	Número máximo de sucessos
<i>T</i>	Temperatura
<i>nsor</i>	Número de sorteios
<i>fat</i>	Fator de resfriamento
<i>nt</i>	Número de decréscimos a serem realizados na temperatura do metal

Para cada estágio pequenas perturbações aleatórias na configuração do sistema são produzidas em busca daquela que está associada a menor energia. É o parâmetro *nsor* que define quantos dos parâmetros do problema sofrerão esta perturbação aleatória em cada passo do processo de otimização. No caso dos modelos hidrológicos, são escolhidos aleatoriamente alguns dentre os parâmetros calibráveis do modelo que irão gerar o escoamento na bacia.

O procedimento de Metropolis, permite que eventualmente uma solução intermediária e de maior energia seja aceita, diminuindo as chances de o algoritmo ficar preso a um mínimo local no universo de soluções do problema. Conforme descrito (Kaviski *et al.*, 2007, 2008; Machado, 2009), a probabilidade com que tais soluções sejam aceitas encontra bases na mecânica estatística associada ao processo de evolução de equilíbrio térmico a uma dada temperatura, portanto, é proporcional a constante de Boltzmann e dada pela equação 3.1.

$$p = \exp\left(\frac{E_i + E_{i+1}}{kT}\right) \quad (3.1)$$

em que:

p	Probabilidade da solução ocorrer
E_i	Estado de energia no passo de otimização i
E_{i+1}	Estado de energia no passo de otimização $i + 1$
k	Constante de Boltzmann
T	Temperatura

A probabilidade p calculada é comparada a um número aleatório normalmente distribuído no intervalo de zero a um. Para que a solução seja aceita, p deve ser menor ou igual a este valor aleatório gerado. Deste modo o estado de energia é alterado para o estado que está sendo testado, caso contrário permanecemos com a melhor solução encontrada até aquele passo do algoritmo.

Quando da otimização de um modelo hidrológico, o conjunto de parâmetros deste modelo produzem a resposta da bacia hidrográfica, em geral, avaliada em termos de um hidrograma de saída. Então, a energia do sistema é análoga a métrica que se deseja minimizar. O espaço de soluções possíveis é tão mais complexo quanto maior o número de parâmetros considerados para representar o sistema hidrológico. No método de recozimento simulado, os conjuntos de parâmetros calibráveis do modelo hidrológico correspondem aqueles que simulam uma configuração da estrutura cristalina do material metálico cuja energia associada é o valor da função objetivo calculada da comparação entre os hidrogramas gerado e observado. Esta analogia é mostrada esquematicamente na Figura 3.7.

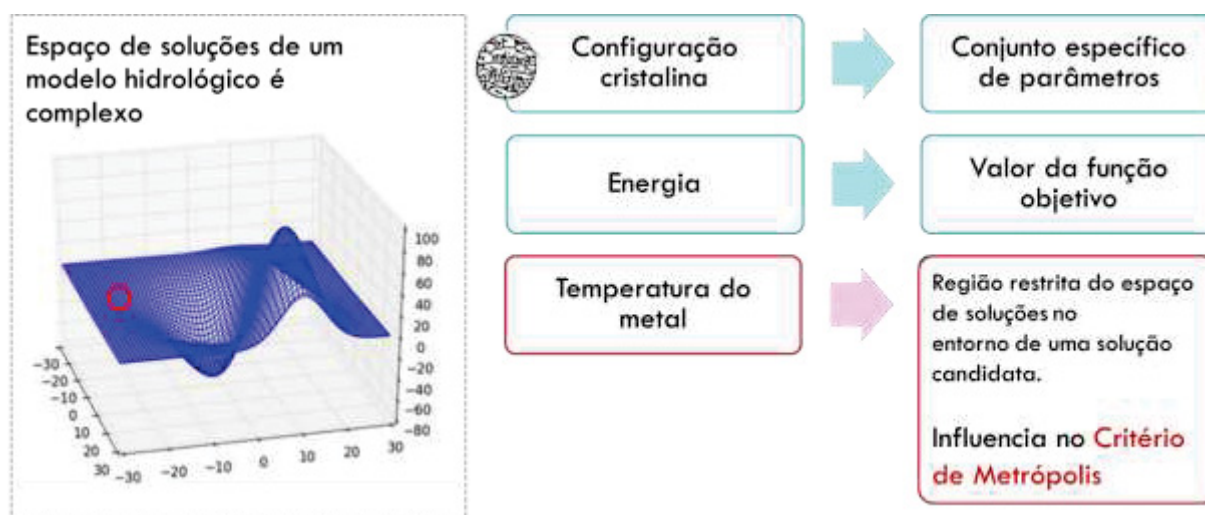


Figura 3.7 – Esquematização da analogia entre as variáveis do método do recozimento simulado e do problema de otimização de um modelo hidrológico

Além das analogias necessárias para a aplicação do método ao problema que se quer otimizar, para a implementação do algoritmo, conforme descreve Kaviski *et al.* (2007) baseado

em Press *et al.* (1992), é preciso também definir um gerador aleatório para realizar mudanças na configuração do sistema, tais que provoquem as alterações em sua energia no estágio de evolução do algoritmo.

Na implementação atual, desenvolvida na linguagem de programação Go (Anexo IV), as perturbações nos valores dos parâmetros diferem no máximo de 5% do valor do estágio anterior. Estas perturbações são realizadas com base nos intervalos de variação passados como possíveis para cada um dos parâmetros do MGB. Para que um parâmetro assuma um valor único, basta que seu intervalo de variação seja nulo, ou seja, valores dos limites inferior e superior que o parâmetro pode assumir são iguais ao valor em que desejamos fixá-lo.

Por fim, a Figura 3.8, apresenta o fluxograma da aplicação do método do recozimento simulado para a solução de um problema de otimização, neste caso, o de calibração de um modelo hidrológico.

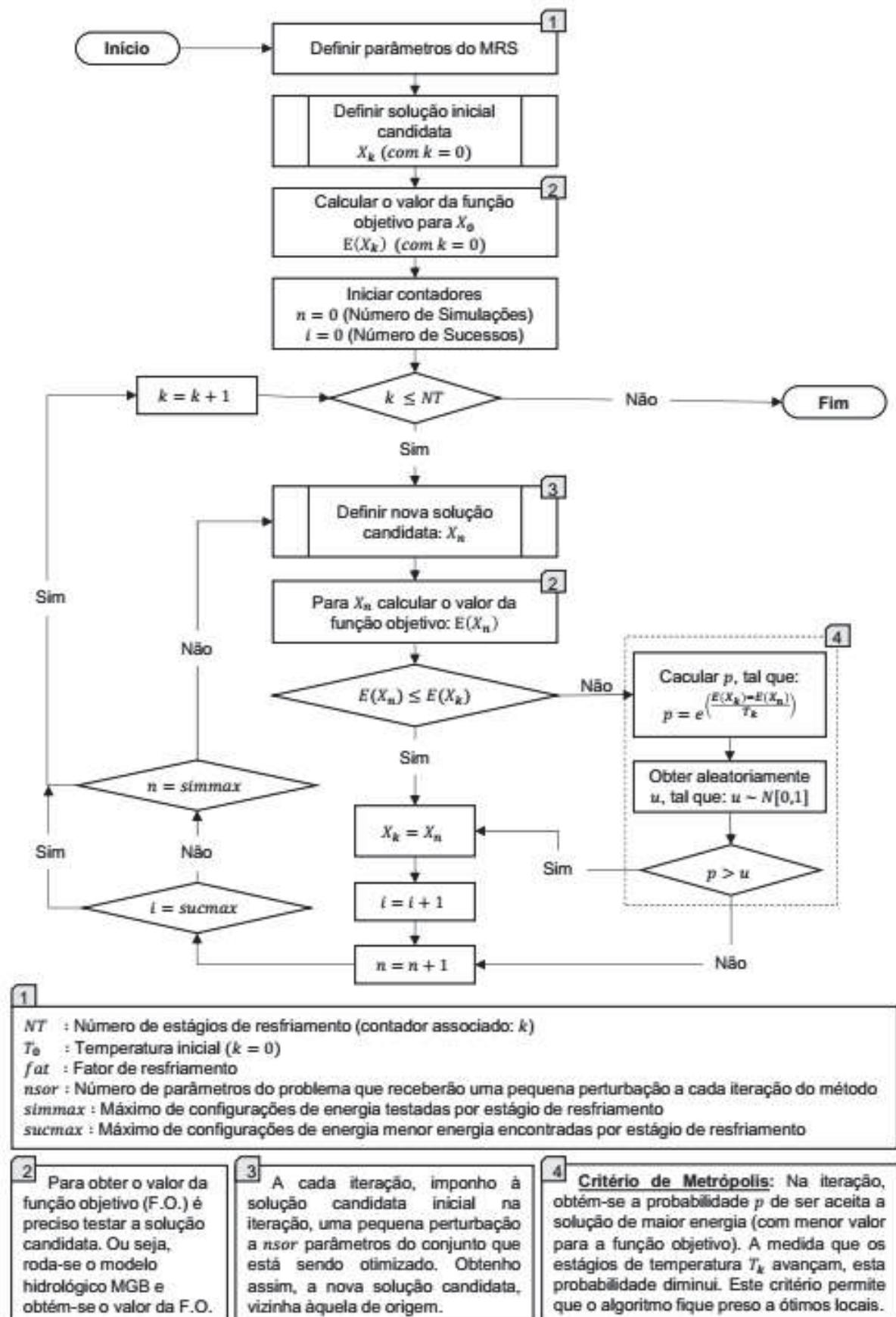


Figura 3.8 – Fluxograma de implementação do método do recozimento simulado

3.4 PLANO EXPERIMENTAL

Nos itens anteriores deste capítulo foram apresentados os materiais para atingir os objetivos desta pesquisa. A abordagem convencional de calibração automática de um modelo hidrológico aplica a este algum método de otimização a fim de minimizar uma função objetivo. A hipótese a ser testada nesta tese é a de que o processo de calibração pode se tornar mais assertivo e próximo da realidade física quando associado a uma informação hidrológica conhecida ou obtida da própria implementação do modelo hidrológico (informação “a priori”). Nesta seção, as quatro etapas definidas para construir os argumentos que permitem a comparação entre as abordagens e a verificação da hipótese são apresentadas.

3.4.1 Implementação do modelo hidrológico a bacia hidrográfica

A Bacia hidrográfica do Rio Passaúna foi escolhida como área de estudo deste trabalho pela importância que tem para o abastecimento de água para Curitiba e sua região metropolitana. Nesta etapa do trabalho, será implementado para esta bacia hidrográfica o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias. O MGB foi escolhido por se tratar de um modelo hidrológico simples e de código aberto. Como resultado para esta etapa do trabalho, espera-se concluir se o modelo hidrológico escolhido pode ser calibrado para a área de estudo proposta.

3.4.2 Definição das condições de contorno do problema de otimização

O MGB é um modelo hidrológico que baseia a representação espacial da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU). Na implementação deste modelo, a depender da quantidade de HRU's definidas e das regiões de calibração escolhidas, maior a quantidade de parâmetros a serem determinados pelo processo de calibração. Por esta razão, o objetivo desta etapa do trabalho é a de identificar à quais parâmetros do MGB o hidrograma final simulado é mais sensível.

A identificação destes parâmetros se dará a partir da análise de sensibilidade dos parâmetros do MGB implementado a Bacia Hidrográfica do Rio Passaúna. Como resultado desta etapa, espera-se definir as condições de contorno do problema de otimização para a calibração dos parâmetros, com base na importância de cada um em relação ao conjunto de parâmetros a serem determinados.

3.4.3 Calibração automática do modelo hidrológico pelo método do recozimento simulado

O Método do Recozimento Simulado (MRS) foi escolhido por sua eficiência e rápida conversão à solução ótima, bem como, por sua simplicidade e flexibilidade em termos de implementação computacional. A linguagem de programação Go foi a escolhida para a implementação do MRS. Esta linguagem alia a rapidez de processamento de uma linguagem de programação compilada a facilidade e flexibilidade de sintaxe de uma linguagem interpretada. Como resultado desta etapa, espera-se verificar a eficácia deste método de otimização para a calibração de um modelo hidrológico, seja este o MGB ou não.

3.4.4 Inserção e avaliação da informação “*a priori*” no processo de calibração

A implementação e calibração de um modelo hidrológico exige, em geral, uma grande quantidade de dados e informações hidrológicas. Além dos dados observados *in situ*, cada vez mais a capacidade de obtenção de informações a partir de tecnologias desenvolvidas para o sensoriamento remoto tem sido aplicada a problemas de hidrologia (Ha *et al.*, 2018; Bastiaanssen *et al.*, 2007; Melesse *et al.*, 2016; Serrat-Capdevila, *et al.*, 2014; Dembele *et al.*, 2016). A construção de modelos hidrológicos a partir de múltiplas fontes de dados simultâneas tem se mostrado uma alternativa satisfatória para a calibração de modelos hidrológicos no caso de ausência de dados observados *in situ* (Nijzink *et al.*; 2018). Além disso, trabalhos como o de Ehalt Macedo *et al.* (2019), abrem a possibilidade para a determinação dos parâmetros dos modelos hidrológicos ‘*a priori*’, reduzindo, portanto, os graus de liberdade do problema de otimização dos parâmetros do modelo hidrológico.

Neste trabalho, por informação hidrológica “*a priori*” entende-se qualquer informação já existente e disponível para a bacia hidrográfica em estudo, ou que possa ser estimada a partir de dados observados *in situ* ou por sensoriamento remoto. Assim, tanto a estimativa do coeficiente de recessão a partir de dados de gravimetria (Ehalt Macedo *et al.*; 2019), como a importância amostral dos parâmetros no conjunto de parâmetros a serem determinados, ou mesmo; o hidrograma afluente a região de calibração, podem ser tidas como informações “*a priori*” (conhecidas de forma anterior ao processo de calibração).

Portanto, como resultado desta etapa, espera-se a definição de qual informação conhecida “*a priori*” sobre a área de estudo será utilizada com o fim de tornar mais assertivo o processo de calibração automático do modelo hidrológico. Com a comparação entre os resultados do

processo de otimização aplicado: (i) sem a inserção de uma informação “*a priori*” e, (ii) com a inserção de uma informação “*a priori*”; se pretende responder à hipótese enunciada por este trabalho.

4 IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO

Este capítulo trata da implementação, calibração e validação manuais do modelo hidrológico MGB para a bacia hidrográfica do rio Passaúna, na região metropolitana de Curitiba-PR.

4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MGB PARA A BACIA DO RIO PASSAÚNA

O modelo MGB foi implementado para toda a bacia do rio Passaúna, conforme é possível observar na Figura 4.1.

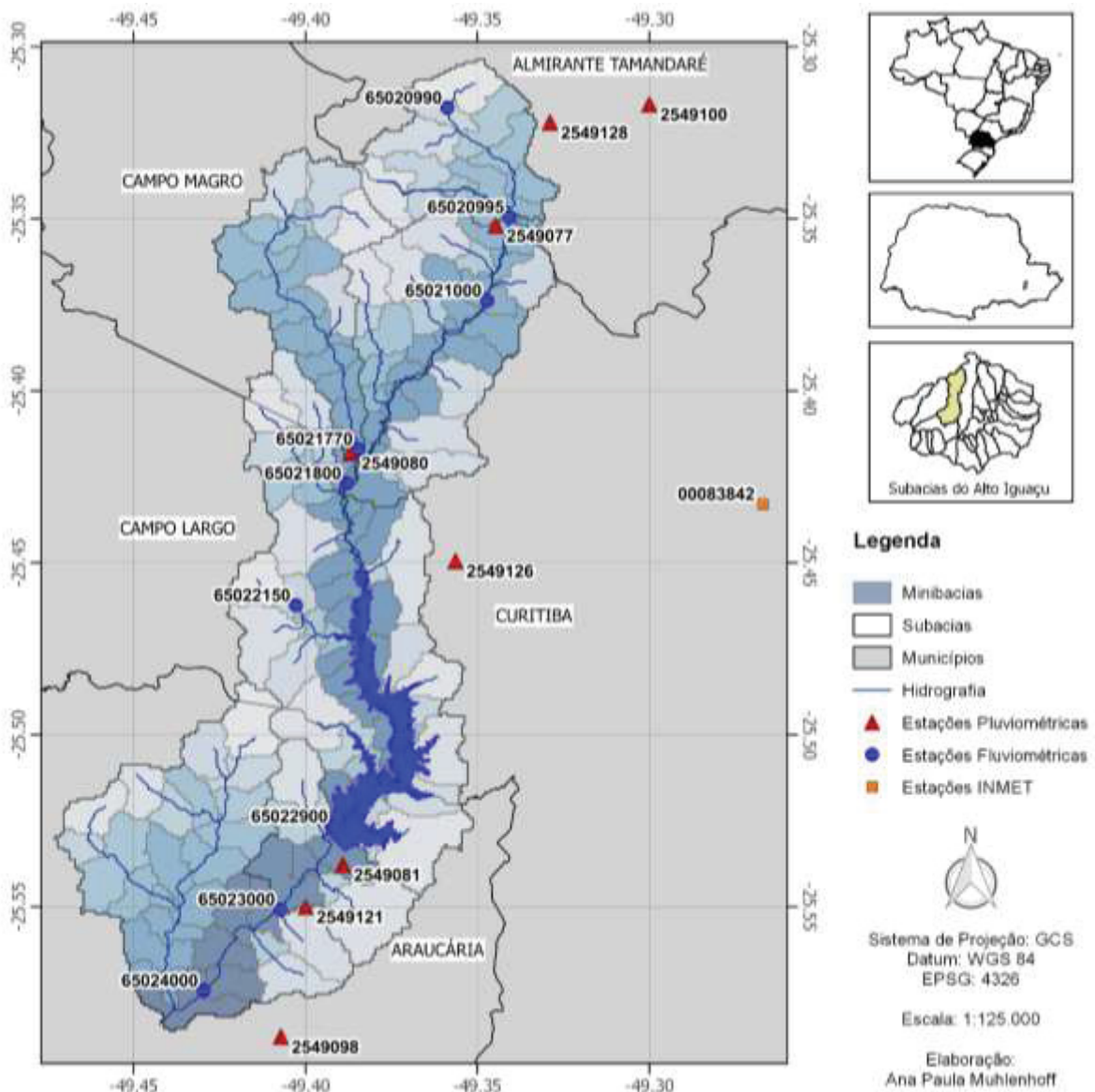


Figura 4.1 – Bacia Hidrográfica do Passaúna no MGB – minibacias e subbacias de calibração

A bacia foi discretizada em mini bacias (limiar de delimitação das minis bacias foi estabelecido em 2 km²) e os dados de chuva foram derivados para cada mini bacia a partir das estações 02549077 e 02549080, ambas localizadas na bacia hidrográfica em estudo. Os dados de clima foram retirados da estação Curitiba do INMET (00083842), localizada na bacia hidrográfica do rio Barigui.

Os parâmetros considerados no MGB como parâmetros fixos, que não entram no processo de calibração, foram mantidos como sugeridos pelo manual do modelo (Medeiros *et. al.*, 2019). A busca pela definição dos parâmetros restantes, pelo processo de calibração, se concentrou apenas para as três subacia de calibração definidas que juntas compõem a bacia de contribuição da estação fluviométrica de código 65021800 (Ponte da BR-277 – Campo Largo), localizada imediatamente a montante do reservatório do Passaúna.

Esta região tem área de drenagem não superior a 85 km². Deste modo, considerar a implementação do Modelo de Grande Bacias ao que podemos chamar bacia hidrográfica do Alto rio Passaúna, tornou-se um desafio adicional, deste trabalho. O MGB foi concebido para aplicações em grandes bacias hidrográficas, as quais em grande parte apresentam também grandes áreas de drenagem. A bacia do Alto Passaúna, embora drene uma área pequena (85 km²) apresenta grande capacidade de armazenamento de água, o que confere a esta área características hidrológicas de uma grande bacia.

4.2 CALIBRAÇÃO MANUAL DO MGB PARA O ALTO PASSAÚNA

O período de calibração escolhido para uma primeira avaliação foi o anterior a construção e enchimento do reservatório, no período de 1985 a 1990. Nesta etapa o método utilizado foi o manual, por tentativa e erro. Em etapas seguintes do desenvolvimento do trabalho o modelo MGB foi e será calibrado aplicando-se o método de otimização de recozimento simulado.

Os primeiros resultados obtidos da implementação do modelo MGB para a bacia de contribuição do reservatório do rio Passaúna são apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3, respectivamente, comparação dos hidrogramas e curva de permanência simulada e observada. Cabe destacar que este processamento utilizou a primeira versão do MGB desenvolvida para aplicação no software QGIS. O coeficiente de qualidade do ajuste obtido desta primeira calibração foi de 0,615, entretanto, o erro medido pelo BIAS ainda é de 13,7%.

Para este conjunto de parâmetros, e configuração atual do modelo implementado, o coeficiente de recessão do aquífero (C_b) não se mostrou como um dos parâmetros mais sensíveis para esta área de drenagem, uma vez que alterações no seu valor praticamente

não produziam implicações nos resultados para o hidrograma e curva de permanência simulados.

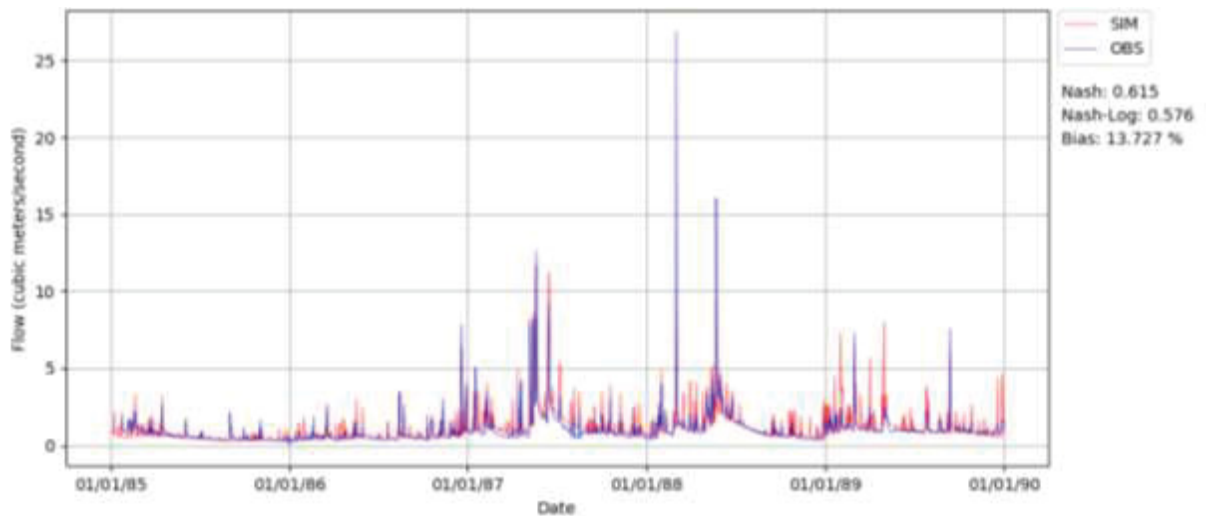


Figura 4.2 – Hidrogramas simulado e observado para a estação fluviométrica 6501800, período de calibração (1985-1990)

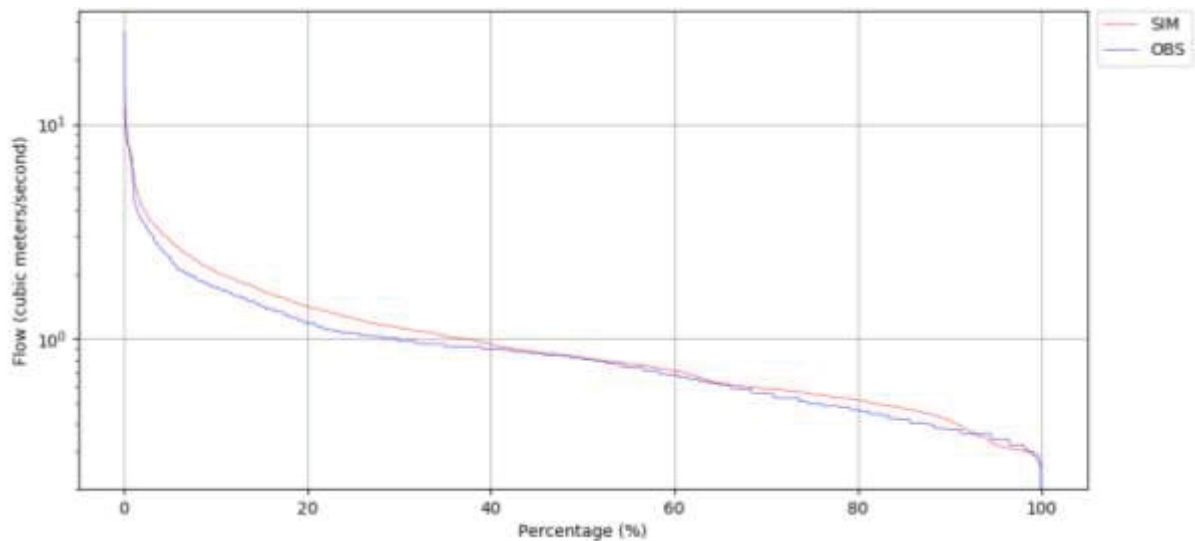


Figura 4.3 – Curvas de permanência simulada e observada para a estação fluviométrica 6501800, período de calibração (1985-1990)

Com os parâmetros determinados no período de calibração escolhido, o modelo foi aplicado para a simulação de um outro período de dados, para que fosse possível uma análise em termos de validação do conjunto de parâmetros encontrado. Este período, foi escolhido a partir dos dados mais recentes disponíveis para a região em estudo, de 2010 a 2019. Em termos das métricas avaliadas automaticamente pelo MGB, o período escolhido para a validação apresentou resultados bastante satisfatórios, uma vez que o erro de volume (*BIAS*) diminuiu, e os coeficientes de qualidade do ajuste de Nash-Sutcliffe (*NSE*) para as vazões e

para o logaritmo das vazões aumentaram de 0,615 para 0,641 e 0,576 para 0,626, respectivamente. Estes resultados estão apresentados pelas Figuras 4.4 e 4.5.

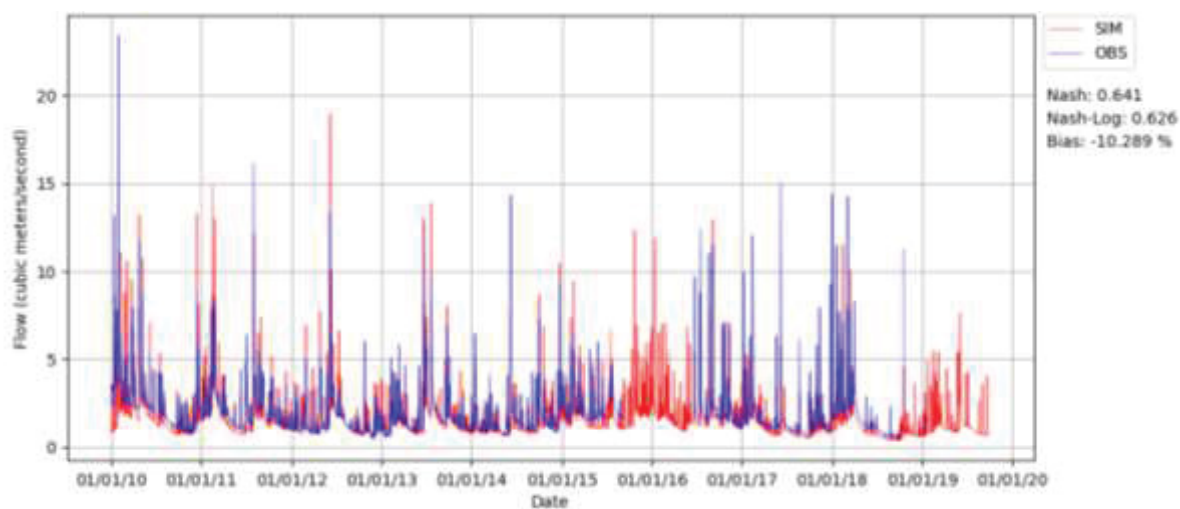


Figura 4.4 – Hidrogramas simulado e observado para a estação fluviométrica 6501800, período de validação (2010-2019)

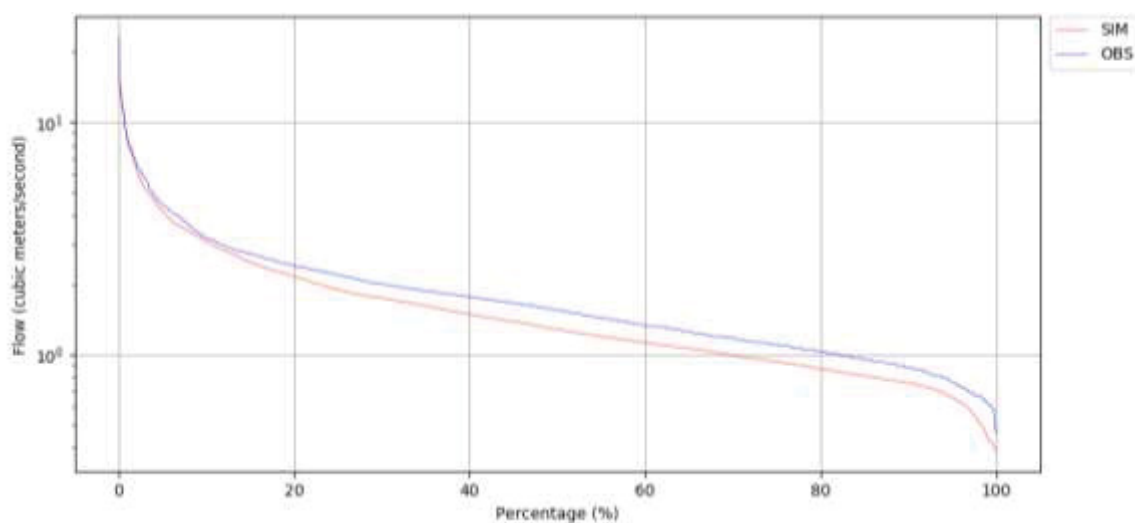


Figura 4.5 – Hidrogramas simulado e observado para a estação fluviométrica 6501800, período de calibração (1985-1990)

4.3 DISCUSSÃO E SÍNTESE DO CAPÍTULO

As vazões representam, de forma integrada, os diferentes processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica e culminam no escoamento de um rio. Todos os processos do ciclo hidrológico são não-lineares e altamente interdependentes. Modelos hidrológicos como o MGB, em que a variável de saída é a vazão, tais processos hidrológicos são representados de forma simplificada e modulada. Desta forma, existe transferência de incerteza tanto para

as respostas das variáveis de estado associadas a estes processos quanto para a variável de saída (Collischonn *et al.*, 2001).

Adicionalmente, o MGB foi concebido para a aplicação em bacias hidrográficas com grandes áreas de drenagem; ou seja, com áreas superiores a 1.000 Km² (Collischonn *et al.*, 2001; Medeiros *et al.*, 2019). Portanto, assim como outros modelos hidrológicos de grande escala, o MGB simplifica processos que ocorrem em escala de minutos ou horas para a escala diária (Collischonn *et al.*, 2001). Como consequência dessa alteração de escala temporal, tem-se a amortização de flutuações que, em geral, são tão mais importantes quanto menor é a área de drenagem a qual estão associadas (Collischonn *et al.*, 2001).

Neste trabalho a área de estudo é a bacia de contribuição do reservatório do rio Passaúna que possui área de drenagem não superior a 85 km², bastante inferior ao limite recomendado para a aplicação do MGB a uma bacia hidrográfica. Entretanto, apesar da pouca área de drenagem essa bacia hidrográfica tem vocação para o armazenamento de água, fator que lhe confere características próximas a de uma grande bacia hidrográfica, em termos de escala temporal. Desta forma o MGB pode ser aplicado a essa área de estudo.

Os resultados desta aplicação, em termos da qualidade do ajuste para as vazões, foram satisfatórios tanto para o período de calibração (*NSE* igual a 0,615, *NSELOG* igual a 0,576 e *BIAS* igual a 13,727%) quanto para o período de validação (*NSE* igual a 0,641, *NSELOG* igual a 0,626 e *BIAS* igual a -10,289%). Portanto, o MGB pode alcançar bons resultados quando aplicado e calibrado para bacias hidrográficas de pequena escala. Isso não muda a necessidade de avaliar a necessidade ou benefício do uso de um modelo hidrológico para determinado fim, uma vez que permanecem existindo incertezas sobre os parâmetros calibráveis, as variáveis de estado e a variável de saída do modelo.

5 O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO E A IMPORTÂNCIA AMOSTRAL

Os modelos hidrológicos chuva-vazão possuem como característica comum a grande quantidade de parâmetros a serem determinados durante o processo de calibração. Este problema pode ser tão maior quanto maior a discretização espacial utilizada na implementação do modelo. Dentro do conjunto de parâmetros calibráveis de um modelo hidrológico para uma determinada bacia hidrográfica, podemos separar aqueles que tem maior ou menor influência sobre o hidrograma final a partir de critérios para considerar o que chamamos: importância amostral. A observação destes critérios pode conduzir as decisões acerca da estratégia de definição do problema a ser otimizado.

Cabe destacar, que a partir deste ponto do trabalho o termo “vazão teórica” será utilizado para se referir a uma vazão conhecida e estabelecida dentro de um cenário teórico em que todas as entradas ao modelo hidrológico, bem como os parâmetros que geram esta vazão, são também conhecidos. Nas aplicações habituais de modelos hidrológicos a “vazão teórica” estaria para a vazão que é observada e com a qual se compara a vazão simulada pelo modelo hidrológico a fim de verificar o ajuste dos parâmetros do modelo.

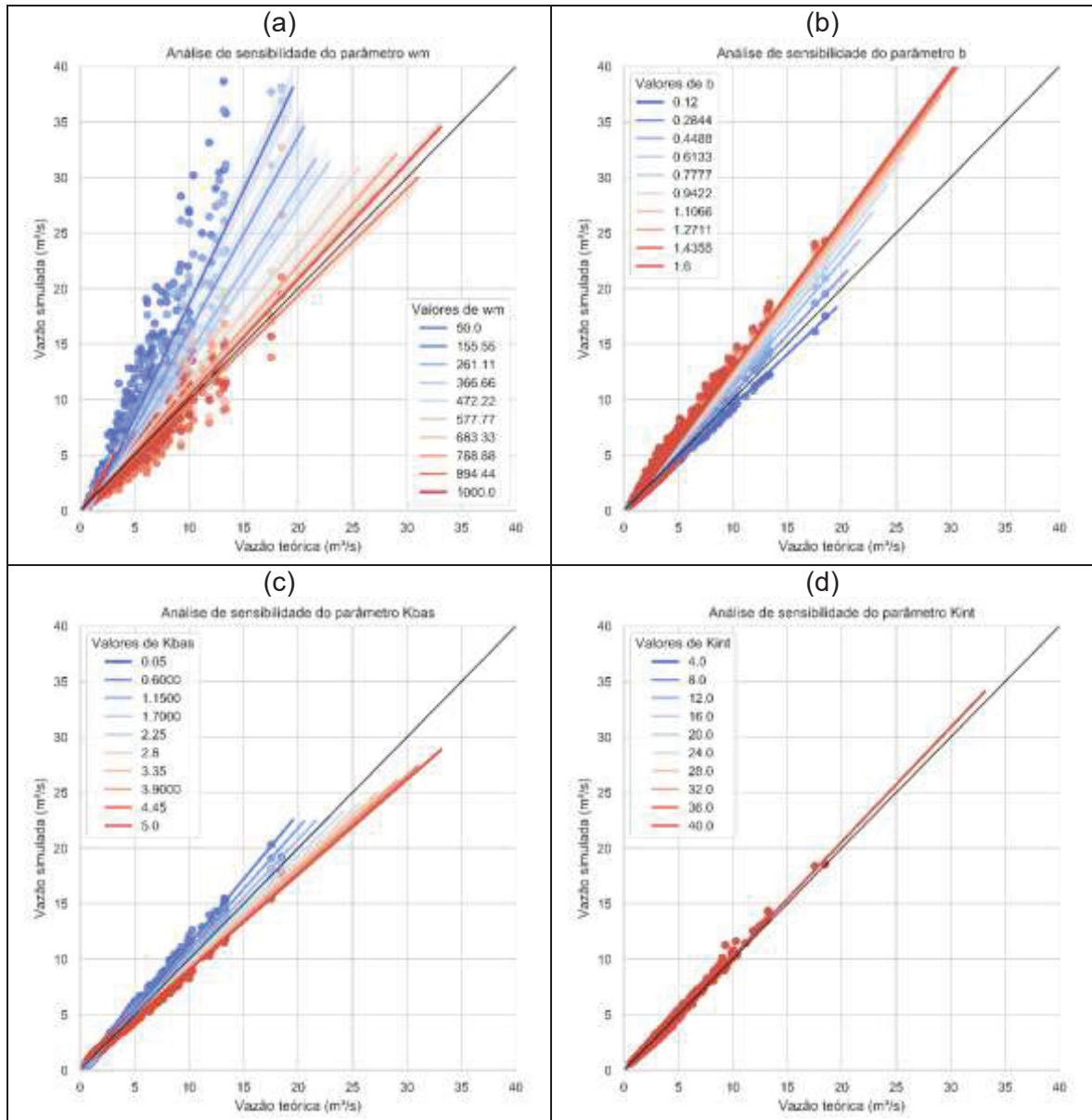
5.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO MGB

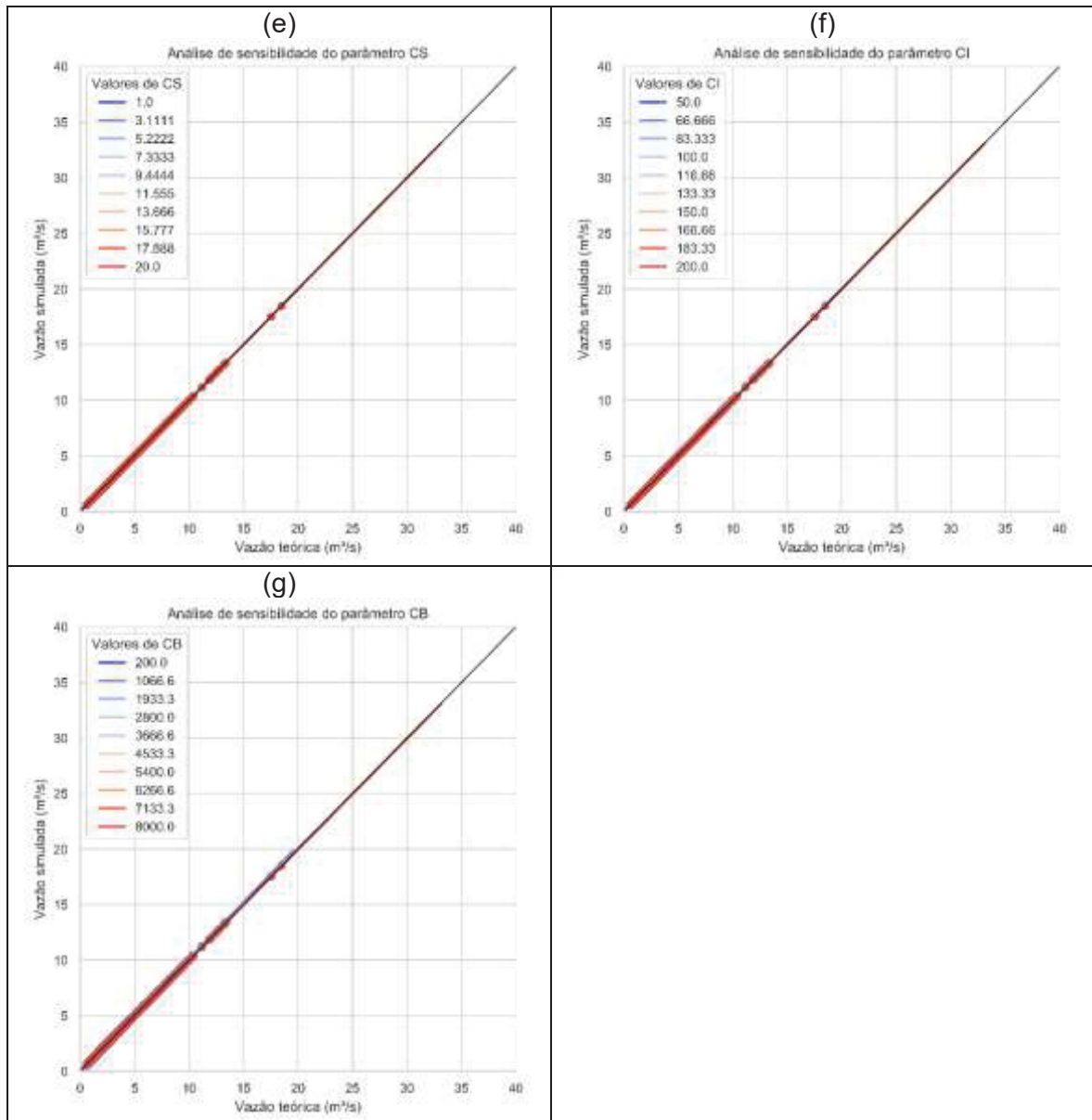
Identificar a quais parâmetros do modelo hidrológico o hidrograma resultante de uma simulação com este modelo é mais sensível permite identificar aqueles parâmetros aos quais deve ser dada maior atenção durante o processo de calibração. Para realizar esta análise de sensibilidade para o MGB aplicado a bacia hidrográfica do Passaúna, primeiramente, foram estabelecidos os intervalos de variação para cada um dos parâmetros passíveis de calibração no módulo de geração do escoamento no MGB, com exceção dos parâmetros usualmente mantidos constantes (XL , CAP , W_c), conforme Medeiros et. al., 2019.

Para cada parâmetro, além dos limites superior e inferior que definem o intervalo de valores possíveis que este pode assumir, foram definidos dentro deste intervalo outros oito valores para o parâmetro, uniformemente distribuídos ao longo do intervalo. Para cada um destes valores definidos foi realizada uma simulação, que manteve todos os valores dos outros parâmetros fixos num valor médio, a fim de obter o hidrograma para a bacia hidrográfica do Alto Passaúna.

Deste modo, comparando os hidrogramas obtidos quando da variação de um parâmetro específico, podemos avaliar quais os efeitos que a alteração do valor definido para o parâmetro, ao longo de seu intervalo de variação possível, produz no hidrograma de saída do modelo. A fim de melhor visualizar estes efeitos, os gráficos apresentados no Quadro 5.1,

plotam, para cada parâmetro, a vazão que buscamos quando da simulação contra a vazão obtida da simulação, num total de dez retas por parâmetro. Nos resultados apresentados no Quadro 5.1, os valores dos parâmetros foram mantidos constantes para todas as HRU's definidas para a bacia hidrográfica em questão.



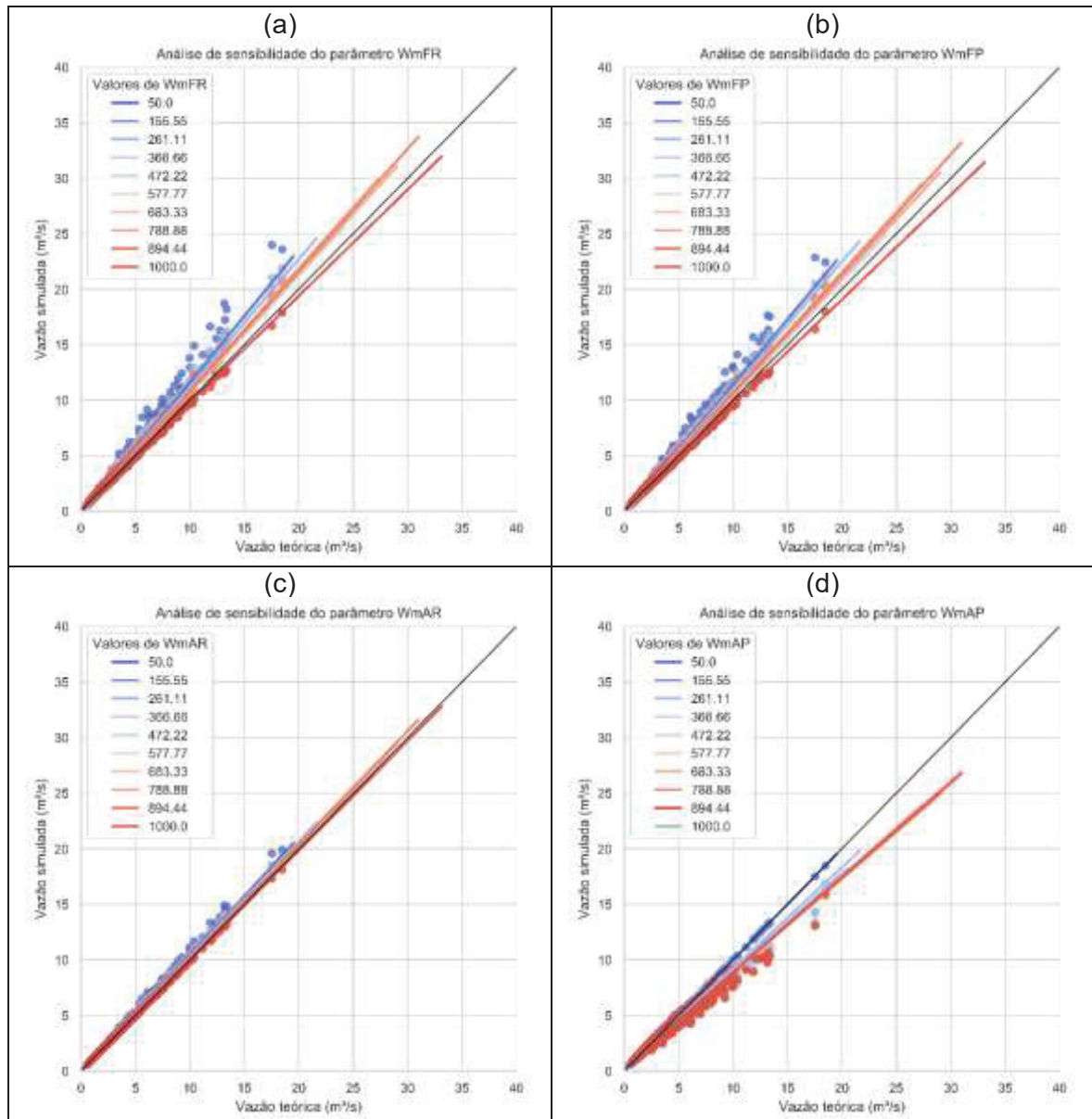


Quadro 5.1 – Análise de Sensibilidade para os parâmetros calibráveis do MGB (continuação)

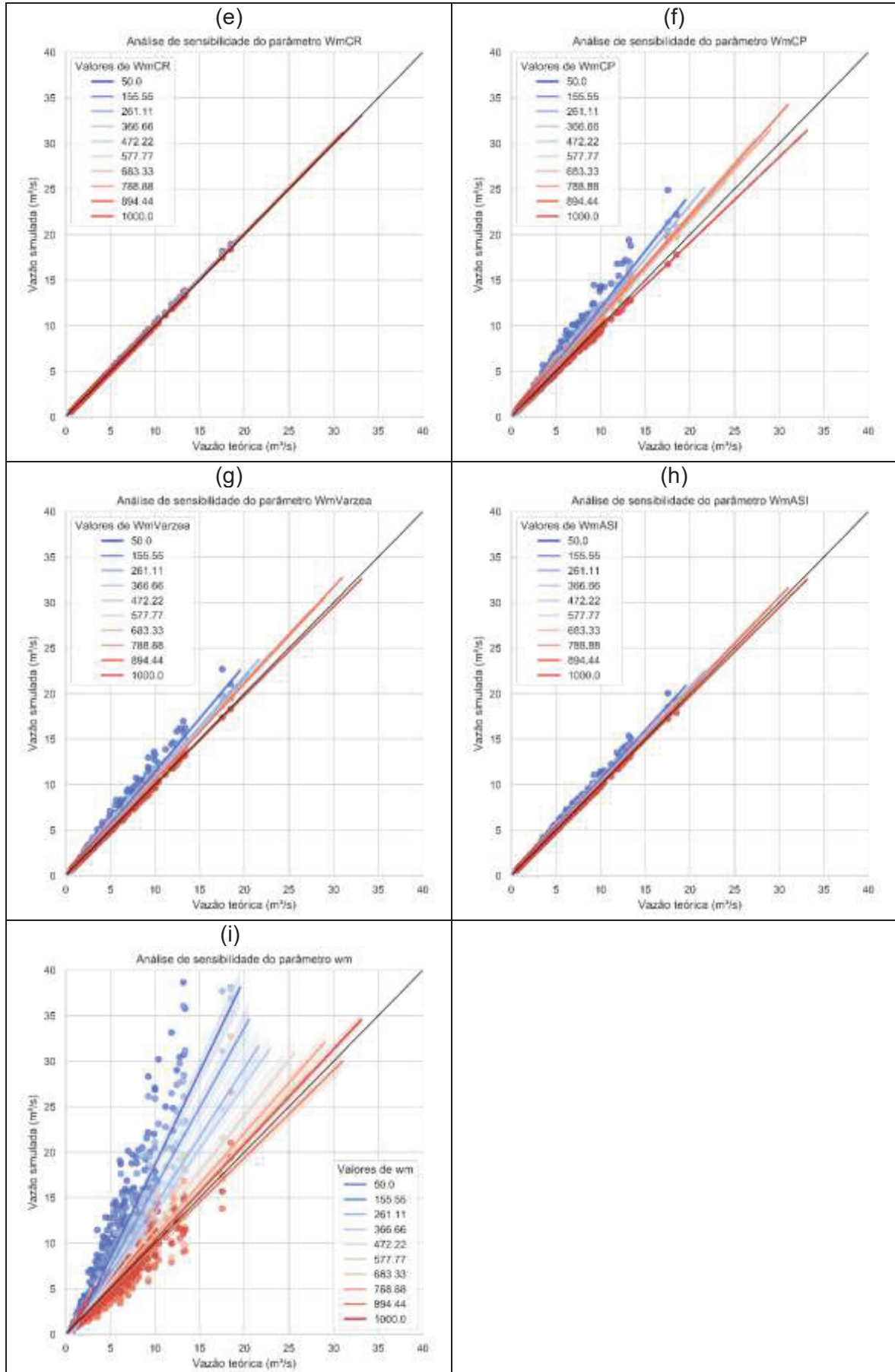
Conforme esperado (Medeiros et. al., 2019), o parâmetro que define a capacidade de armazenamento do solo em uma bacia hidrográfica (no MGB, W_m) é aquele que, quando alterado, provoca maiores efeitos sobre o hidrograma obtido da aplicação do modelo. Portanto, conforme evidencia o Gráfico (a) no Quadro 5.1, para este estudo de caso, W_m é o parâmetro mais sensível, seguido dos parâmetros b e K_{bas} .

Uma segunda etapa da análise de sensibilidade foi repetir o que foi feito na primeira etapa entre os diferentes parâmetros do MGB, cujos resultados são apresentados no Quadro 5.1, agora apenas para o parâmetro W_m , diferenciando os valores adotados para este parâmetro entre as diferentes unidades de resposta hidrológica presentes na bacia hidrográfica em estudo. Os resultados desta nova análise estão apresentados no Quadro 5.2.

Conforme mostram os Gráficos presentes no Quadro 5.2, a HRU com maior área de drenagem, conseqüentemente responsável pela maior parte da geração do escoamento dentro da bacia hidrográfica, é aquela para a qual o hidrograma é mais sensível ao valor definido para o parâmetro W_m .



Quadro 5.2 - Análise de Sensibilidade para o parâmetro W_m em cada HRU no MGB



Quadro 5.2 - Análise de Sensibilidade para o parâmetro W_m em cada HRU no MGB (continuação)

Os resultados apresentados nos gráficos dos Quadros 5.1 e 5.2, reforçam a tomada de decisão nas etapas seguintes deste trabalho. A primeira consideração possível a partir dos resultados apresentados é a respeito do uso do parâmetro CB , coeficiente de recessão da bacia hidrográfica) como um parâmetro determinado ‘*a priori*’, conforme exemplo apresentado por MUHLENHOFF et. al (2019) a partir de dados de sensoriamento remoto obtidos pela missão GRACE. Além do desafio quanto as resoluções espaciais da área de estudo e da informação derivada dos dados obtidos pela missão GRACE (cada pixel tem em torno de 300-400 km de dimensão, que resulta em uma já bastante superior a área total da Bacia do Passaúna até seu exutório, 217km²), abordado por Ali et. al (2021).

A segunda consideração possível é decorrente da primeira, uma vez que é de conhecimento prévio ao processo de otimização e busca dos valores ótimos para os parâmetros a fração de área de geração de escoamento correspondente a cada Unidade de Resposta Hidrológica na bacia hidrográfica (HRU). Portanto, considerar no processo de otimização por recozimento simulado a importância amostral, ao menos do parâmetro mais sensível quando da geração do hidrograma de saída, com base na representatividade de cada HRU dentro da subacia de calibração definida pelo MGB passa, a partir daqui a ser a estratégia de inserção de uma informação ‘*a priori*’ que permitirá tornar o processo de busca mais assertivo, mesmo mantidos os graus de liberdade do problema.

5.2 DEFINIÇÃO DO CRITÉRIO DE IMPORTÂNCIA AMOSTRAL

O MGB (Medeiros et. al., 2019; Collischonn et. al., 2020), dentro dos parâmetros relacionados ao solo (calibráveis) tem aqueles que são aplicados a toda a subacia de calibração (CS, CI, CB, QB) e aqueles que variam entre as unidades de resposta hidrológica ($W_m, b, K_{bas}, K_{int}, XL, CAP, W_c$). Desta maneira, em cada subacia de calibração definida durante a implementação do MGB, apenas para o processo de geração do escoamento, são um total de 67 valores a serem determinados no processo de calibração (Tabela 5.1).

Como apresentado anteriormente, sabe-se que o parâmetro associado a capacidade de armazenamento do solo (W_m) é o mais sensível para a implementação a bacia do rio Passaúna, seguido pelos parâmetros (b, K_{bas}). Adicionalmente, para cada subacia de calibração, podemos calcular qual a porcentagem que cada HRU representa da área total da subacia. Esta informação nos permite saber qual, dentre os valores de W_m , aquele que terá maior influência sobre o hidrograma final, uma vez que este é tanto mais sensível quanto maior a fração da HRU que representa (Quadro 5.2). Além disso, caso alguma das classes de HRU não esteja presente naquela subacia, os parâmetros associados a esta classe podem

ser desconsiderados no processo de busca pelos valores ótimos, uma vez que não terão qualquer tipo de influência sobre o hidrograma final que queremos obter.

TABELA 5.1 – PARÂMETROS (GERAÇÃO DO ESCOAMENTO) CALIBRÁVEIS PARA UMA SUBACIA DE CALIBRAÇÃO NO MGB IMPLEMENTADO A BACIA HIDROGRÁFICA DO PASSAÚNA

HRU	Parâmetros						
	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	1	2	3	4	5	6	7
FlorProf	8	9	10	11	12	13	14
AgriRas	15	16	17	18	19	20	21
AgriProf	22	23	24	25	26	27	28
CampRas	29	30	31	32	33	34	35
CampProf	36	37	38	39	40	41	42
Varzea	43	44	45	46	47	48	49
ASI	50	51	52	53	54	55	56
Agua	57	58	59	60	61	62	63
CS	64						
CI	65						
CB	66						
Qb	67						

A Tabela 5.2 apresenta qual a porcentagem que cada HRU representa da área da subacia de calibração, estas definidas na etapa de implementação do modelo MGB para a bacia hidrográfica do rio Passaúna (ver item 4.1). Podemos concluir da Tabela 5.2, que a HRU definida por um solo raso e coberto por campo (CampRas), representa apenas 2% da área total da bacia hidrográfica e está presente em apenas duas das seis subacias de calibração (subacias 4 e 5).

TABELA 5.2 – REPRESENTATIVIDADE DE CADA HRU POR SUBACIA DE CALIBRAÇÃO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PASSAÚNA

Subacia	Area (Km ²)	Classes das Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's)								
		FlorRas	FlorProf	AgriRas	AgriProf	CampRas	CampProf	Varzea	ASI	Agua
1	50.24	-	28%	-	36%	-	18%	18%	-	-
2	16.17	-	15%	-	14%	-	33%	27%	-	11%
3	67.40	-	24%	-	23%	-	21%	18%	-	13%
4	39.68	14%	19%	5%	16%	1%	18%	22%	5%	-
5	24.28	7%	35%	5%	43%	1%	9%	1%	-	-
6	20.78	13%	63%	2%	18%	-	4%	-	-	-

Da mesma forma, considerando agora a subacia número 1, concluímos que toda esta área é representada por apenas quatro das nove classes de HRU's presentes na bacia hidrográfica como um todo. Portanto, o esforço de busca dos valores ótimos dos parâmetros que variam conforme a HRU ($W_m, b, K_{bas}, K_{int}, XL, CAP, W_c$), pode concentrar-se apenas naqueles associados a unidades de resposta hidrológica presentes na subacia de calibração, reduzindo consideravelmente o número de valores a serem determinados no processo de otimização (Tabela 5.3).

TABELA 5.3 – PARÂMETROS CALIBRÁVEIS PARA A SUBACIA DE CALIBRAÇÃO NÚMERO 1 NO MGB IMPLEMENTADO A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PASSAÚNA

HRU	Parâmetros						
	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	-	-	-	-	-	-	-
FlorProf	1	2	3	4	5	6	7
AgriRas	-	-	-	-	-	-	-
AgriProf	8	9	10	11	12	13	14
CampRas	-	-	-	-	-	-	-
CampProf	15	16	17	18	19	20	21
Varzea	22	23	24	25	26	27	28
ASI	-	-	-	-	-	-	-
Agua	-	-	-	-	-	-	-
CS	29						
CI	30						
CB	31						
Qb	32						

Com o que foi descrito até aqui é possível definir duas dimensões importantes para chegar ao peso de cada parâmetro sobre a obtenção do hidrograma final. A primeira deriva da análise de sensibilidade dos parâmetros hidrológicos do modelo, no caso deste trabalho, o Modelo de Grandes Bacias (MGB). A segunda, deriva da representatividade de cada unidade de geração de escoamento (HRU's) nas regiões de calibração (no MGB, subacias).

Atribuindo-se pesos para cada HRU e cada parâmetro hidrológico é possível estabelecer facilmente uma distribuição de frequências a partir da qual saberemos o parâmetro mais sensível para aquela subacia de calibração especificamente. Por exemplo, o parâmetro hidrológico no MGB associado a capacidade de armazenamento do solo (W_m) foi identificado como o mais sensível. Como a bacia hidrográfica está descrita a partir de são nove diferentes tipos de unidades de geração de escoamento (HRU's), para uma subacia específica são nove valores de W_m a serem determinados. Sabendo qual a HRU que representa a maior fração desta região da bacia hidrográfica, sabemos ser este o valor de W_m mais sensível dentre os valores deste parâmetro específico. Da mesma forma, fazemos para os demais parâmetros que variam conforme a HRU a qual estão associados.

TABELA 5.4 – PESOS PARA CADA PARÂMETRO A SER CALIBRADO

HRU	Parâmetro	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
	Peso	5	3	4	2	-	-	-
FlorRas	4	3.9%	2.4%	3.2%	1.6%	FIXO	FIXO	FIXO
FlorProf	7	6.9%	4.1%	5.5%	2.8%	FIXO	FIXO	FIXO
AgriRas	3	3.0%	1.8%	2.4%	1.2%	FIXO	FIXO	FIXO
AgriProf	5	4.9%	3.0%	3.9%	2.0%	FIXO	FIXO	FIXO
CampRas	1	1.0%	0.6%	0.8%	0.4%	FIXO	FIXO	FIXO
CampProf	6	5.9%	3.6%	4.7%	2.4%	FIXO	FIXO	FIXO
Varzea	8	7.9%	4.7%	6.3%	3.2%	FIXO	FIXO	FIXO
ASI	2	2.0%	1.2%	1.6%	0.8%	FIXO	FIXO	FIXO
Agua	FIXO	FIXO	FIXO	FIXO	FIXO	FIXO	FIXO	FIXO
CS	0.2%							
CI	0.2%							
CB	0.2%							
Qb	0.2%							

A Tabela 5.4 apresenta esta análise para a subacia de calibração número 4 (Figura 4.1). Note que na Tabela 5.4 já estão indicados os parâmetros que habitualmente são considerados como fixos quando da implementação do MGB (Medeiros *et. al.*, 2019; Collischonn *et. al.*, 2020), embora possam variar segundo um intervalo específico. Receberam peso 1, os parâmetros hidrológicos CS , CI , CB , Q_b , pois são parâmetros calibráveis (diferentemente de XL , CAP e W_c , que muitas vezes são considerados fixos). Os parâmetros W_m , b , K_{bas} e K_{int} receberam pesos de 2 (menos sensível) a 5 (mais sensível).

Quanto a distribuição dos pesos na outra dimensão da obtenção da importância amostral, recebeu maior peso a HRU que representa a maior área desta região de calibração (Tabela 5.2) e assim sucessivamente até aquela que representa a menor fração de área na subacia. Cruzando esses pesos obtemos de um cálculo de frequência simples (Tabela 5.4) qual seria o impacto de cada um desses valores sobre o hidrograma final gerado a partir deles. Compreendendo melhor os parâmetros e a importância amostral para a simplificação do problema a ser otimizado, podemos definir qual será a configuração deste quando para sua otimização a partir do método de recozimento simulado, conforme apresentaremos na próxima seção deste trabalho.

5.3 CONFIGURAÇÃO DO PROBLEMA A SER OTIMIZADO

A partir da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo hidrológico que se pretende otimizar neste trabalho através do método de recozimento simulado (Item 5.1),

identificamos como o mais sensível o parâmetro W_m , associado a capacidade de armazenamento do solo. Seguido deste, aparecem os parâmetros b , K_{bas} e K_{int} , respectivamente. Como mostra a Tabela 5.1, o problema de otimização pode ser bastante complexo, assumindo até 67 graus de liberdade.

Os parâmetros XL , CAP e W_c embora possam assumir valores segundo um intervalo de variação estabelecido pela literatura, conforme já descrito no manual do modelo (Medeiros *et al.*, 2019) são tipicamente considerados constantes. Portanto, assim também foram considerados para a configuração do problema a ser solucionado neste trabalho. Os três parâmetros relacionados a capilaridade da água no solo, embora possam ser considerados no processo de busca, foram assumidos como constantes. Esta decisão corrobora com a escolha do método de recozimento simulado uma vez que este é bastante flexível quanto a sua implementação (Kaviski *et al.*, 2008; Machado *et al.*, 2012; Kaviski, 2022).

Ainda a fim de simplificar o processo de busca, neste trabalho, escolhemos manter uniforme para todas as HRU's os valores assumidos pelos parâmetros: b , K_{bas} , K_{int} , XL , CAP e W_c . Desta forma, apenas o valor de W_m , o mais sensível dos parâmetros hidrológicos, pode ser diferente entre diferentes HRU's. Para cada subacia de calibração definida, considerando as nove unidades de resposta hidrológica tipicamente utilizadas quando da implementação do MGB (Fan *et al.*, 2014, 2015; Siqueira *et al.*, 2018) o problema a ser otimizado passa a ter dezoito graus de liberdade, ou seja, são dezoito os valores serem buscados pelo método de otimização aplicado, conforme se observa na Figura 5.1.

Uso	W_m	b	K_{bas}	K_{int}	XL	CAP	W_c
FlorRas	1	9	10	11	12	13	14
FlorProf	2						
AgriRas	3						
AgriProf	4						
CampRas	5						
CampProf	6						
Varzea	7						
ASI	8						
Agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	15						
CI	16						
CB	17						
Qb	18						

Figura 5.1 – Configuração do problema a ser otimizado a partir da importância amostral

5.4 DISCUSSÃO E SÍNTESE DO CAPÍTULO

O MGB descreve a transformação chuva-vazão por um conjunto de equações que calculam o balanço de massa no sistema, bacia hidrográfica, a partir da definição dos valores de 12 parâmetros hidrológicos (Collischonn *et al.*, 2001, 2020; Medeiros *et al.*, 2019). A maior parte desses parâmetros estão associados, não a bacia hidrográfica como um todo, mas ao tipo e cobertura de solo presentes na bacia hidrográfica. Como o MGB é um modelo distribuído, a variabilidade espacial do sistema é representada pela subdivisão da bacia hidrográfica em minibacias, nas quais a variação de tipo e cobertura do solo são representadas pelas HRU's.

Desse modo, o total de parâmetros a serem determinados é tão maior quanto maior o número de minibacias e HRU's definidas na implementação do modelo, podendo variar de no mínimo 12 a uma quantidade quase infinita. Em geral, esta quantidade elevada de valores a serem determinados torna oneroso o método tradicional de tentativa e erro. Nesse sentido, para utilização de qualquer método de otimização é necessário definir as condições de contorno, ou seja, a quantidade de parâmetros que caracterizam o problema. Nesta pesquisa ênfase é dada no Método de Recozimento Simulado (MRS).

Neste trabalho, dos parâmetros associados a HRU ($W_m, b, K_{bas}, K_{int}, XL, CAP, W_c$), somente o valor de W_m poderá variar entre as diferentes HRU's, os demais serão mantidos iguais independente da unidade de resposta hidrológica. Essa decisão tomou por base a análise de sensibilidade dos parâmetros do MGB aplicado à Bacia do Rio Passaúna. Sendo nove as HRU's definidas neste estudo, o problema de otimização para cada região de calibração(subacia) teve um total de 18 parâmetros a serem determinados pelo MRS. Este método pode ser facilmente adaptado para outras configurações do mesmo problema, mas quanto maior o número de parâmetros a serem determinados, maior a complexidade da superfície de soluções.

6 CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DO MODELO HIDROLÓGICO MGB PELO MRS

A calibração automática de modelos hidrológicos não é um processo trivial. Muitos são os modelos hidrológicos existentes e também os métodos de otimização que podem ser aplicados a calibração destes. Para comprovar a hipótese enunciada nessa tese, a escolha de um método de otimização de rápida convergência, flexível e de fácil implementação computacional conduziu a escolha do método do recozimento simulado. Neste capítulo será apresentada a análise de sensibilidade para os parâmetros do Método de Recozimento Simulado (MRS). Esta análise de sensibilidade se deu através de duas etapas que foram chamadas de calibração e validação.

6.1 CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MRS

O método do recozimento simulado possui seis parâmetros próprios a partir dos quais é possível definir como o processo de busca dos valores ótimos que solucionam o problema que está sendo otimizado ocorrerá. Para o caso do modelo hidrológico MGB, definem quantas combinações diferentes de parâmetros hidrológicos precisam ser testadas para que se tenha maior segurança no conjunto ótimo obtido ao final do processo de busca. Efetivamente, algumas questões que a análise de sensibilidade dos parâmetros do método do recozimento simulado pode ajudar a esclarecer são: (i) quando parar de procurar o conjunto ótimo de parâmetros hidrológicos; (ii) qual seria um tempo de processamento razoável para se obter o resultado do processo de otimização; e, (iii) qual a configuração dos parâmetros do método deve ser adotada para obtenção dos resultados.

A Tabela 6.1, sintetiza alguns dos testes realizados nesse sentido. Cada configuração para os parâmetros do método foi avaliada com base no tempo de processamento para solução do problema e no valor ótimo obtido para o coeficiente de Nash-Sutcliffe (*NSE*). Todos os testes foram feitos para o mesmo cenário teórico definido para a subacia de calibração número 4 (Figura 4.1). Tal cenário mantinha fixos os parâmetros hidrológicos para a geração do escoamento nas subacias 5 e 6, ambas com afluência para a subacia 4.

Por se tratar de um teste teórico, conhecíamos os valores exatos dos parâmetros que estavam sendo buscados pela aplicação do método do recozimento simulado. Portanto o processo de busca é tão mais eficiente quanto mais próximo de 1 o valor obtido para o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (*NSE*). Para os testes elencados na Tabela 6.1, todas as soluções encontradas atingiram coeficientes de qualidade de ajuste dos hidrogramas superiores a 0,9, com pequenas variações entre os testes (cerca de 1%).

TABELA 6.1 – TESTES TEÓRICOS PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO RECOZIMENTO SIMULADO

TESTE	T	$nsor$	NT	$NSIM$	$NSUC$	fat	MGB sim	Tempo de simulação	NSE ótimo	Variação NSE
1	0,50	6	50	500	500	0,90	25000	Aprox. 5h30m	0,908	-
2	0,80	6	50	500	500	0,90	25000	Aprox. 5h30m	0,912	+0,4%
3	1,00	6	50	750	750	0,90	37500	Aprox. 8h30m	0,908	0,0%
4	0,50	4	50	750	750	0,95	37500	Aprox. 8h30m	0,909	+0,1%
5	0,80	4	60	750	750	0,90	45000	Aprox. 9h50m	0,919	+1,2%
6	0,80	6	60	1000	500	0,90	30 a 60 mil	Aprox. 7h45m	0,918	+1,1%

Os parâmetros do método com maior influência sobre o tempo de processamento são aqueles que efetivamente definem quantos conjunto solução serão testados para encontrar o conjunto ótimo dos parâmetros do modelo hidrológico. O valor de NT define quantas regiões do espaço de soluções serão exploradas. Os valores de $NSIM$ e $NSUC$, definem para cada uma dessas regiões quantos conjuntos soluções serão testados. Quando $NSIM$ e $NSUC$ assumem o mesmo valor, sabemos exatamente quantas vezes o modelo hidrológico será executado (Tabela 6.1).

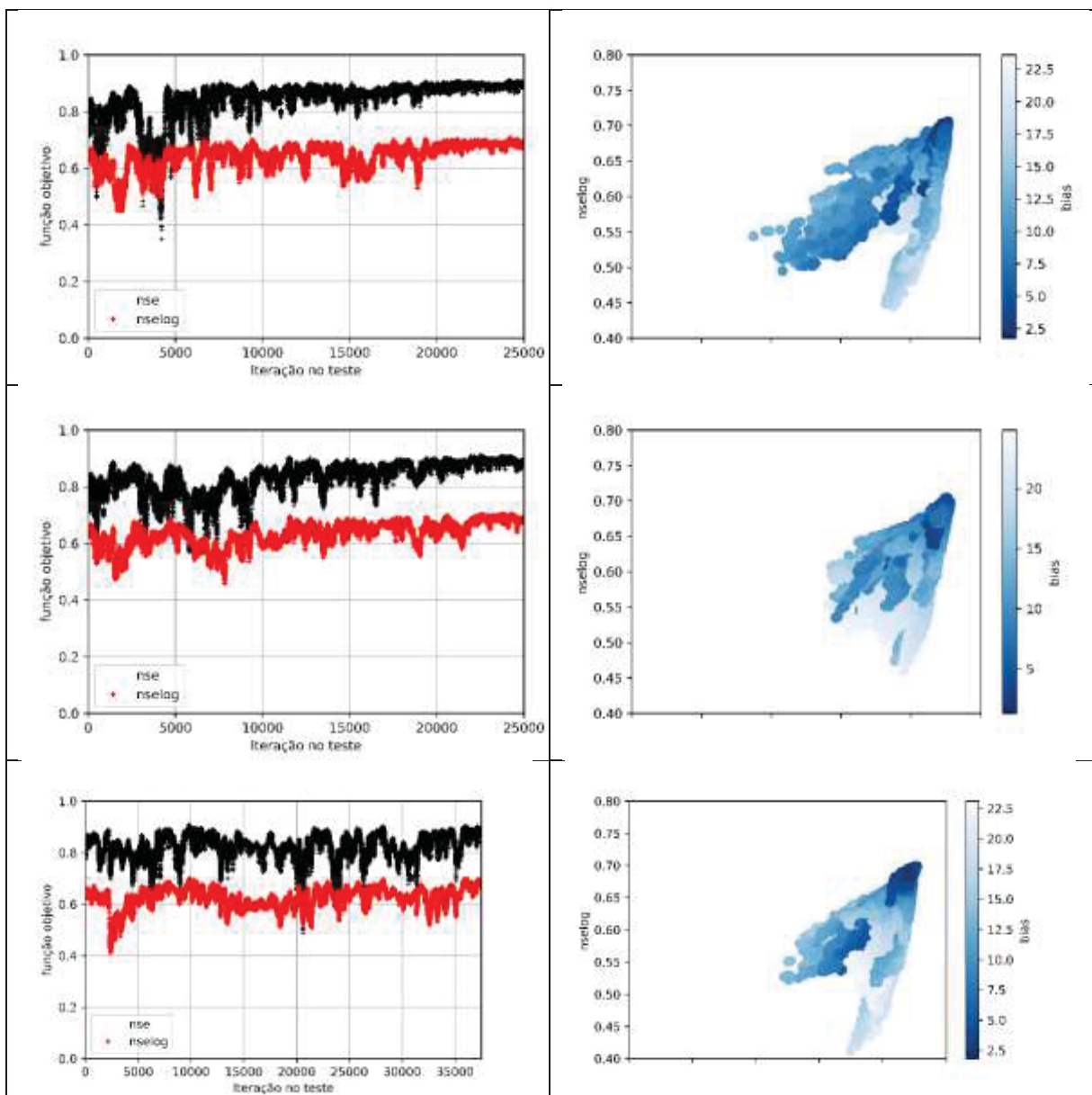
Quando esses parâmetros assumem valores diferentes (Teste 6 na Tabela 6.1), é possível passar a uma outra região de busca quando o número mínimo de sucessos é alcançado. Considera-se sucesso quando o conjunto de parâmetros, testados na iteração do processo de busca, gera um valor igual ou mais satisfatório que o já encontrado para a função objetivo que está sendo otimizada. Entretanto, o método permite que eventualmente uma solução pior seja a escolhida, a fim de fugir de possíveis ótimos locais. O parâmetro que define esta possibilidade de aceite de resultados piores é fat (fator de resfriamento).

Da Tabela 6.1, tem-se que adotar valores diferentes para $NSIM$ e $NSUC$ pode promover uma redução no tempo de processamento, sem tanto custo ao valor ótimo encontrado para a função objetivo (Testes 5 e 6). Comparando os parâmetros adotados nos testes 1 e 2 (Tabela 6.1), conclui-se que a alteração no parâmetro T (temperatura inicial), não tem impacto sobre o tempo de processamento, embora tenha promovido uma melhora de 0.4% no valor ótimo encontrado para a função objetivo. Do teste 2 para o teste 3, a alteração nos valores de $NSIM$ e $NSUC$ aumentaram consideravelmente o tempo de processamento. No teste 4, assim como em outros testes realizados, a alteração em $nsor$ não teve impacto significativo sobre o tempo de processamento e o valor encontrado para NSE .

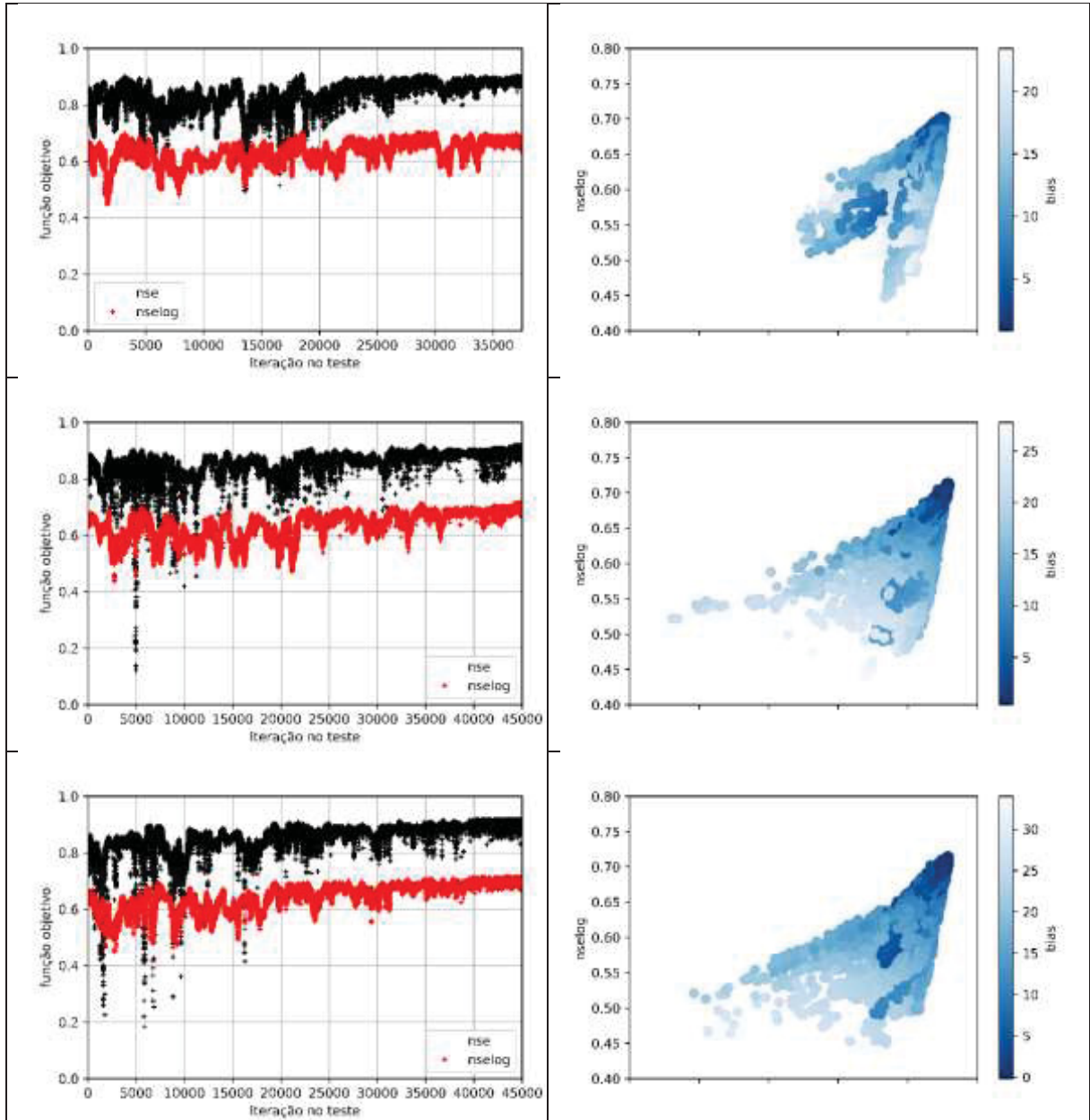
Deve-se destacar que o número de parâmetros do problema a ser solucionado pelo MRS sorteados para receberem uma pequena perturbação em seus valores a cada iteração – $nsor$, de certa forma, define quão distante a solução hipotética para o problema está em relação àquela anteriormente avaliada. Tanto maior seja o valor de $nsor$, maior pode ser a

perturbação gerada a cada conjunto solução hipotético que será avaliado durante as iterações no processo de busca do conjunto ótimo.

Adicionalmente, por se tratar de um método heurístico, quanto mais possibilidades de solução forem testadas durante o processo de busca, tão melhor será o resultado encontrado (Testes 5 e 6, Tabela 6.1 e Quadro 6.1). No Quadro 6.1, os gráficos da evolução dos valores obtidos para a função objetivo (*NSE*) e o coeficiente *NSELOG* (Coeficiente de Nash-Sutcliffe para o logaritmo das vazões), corroboram o fato de quanto maior o número de soluções testadas, mais estável o método se torna e melhor o resultado encontrado ao fim do processamento.



QUADRO 6.1 – Evolução e Frente de Pareto para os testes teóricos dos parâmetros do MRS



QUADRO 6.1 – Evolução e Frente de Pareto para os testes teóricos dos parâmetros do MRS (continuação)

Os gráficos da frente de Pareto apresentados no Quadro 6.1, para todos os seis testes (Tabela 6.1), mostram que o método do recozimento simulado convergiu para uma solução ótima não só em termos da função objetivo que estava sendo minimizada, mas também para *NSELOG* e para o *BIAS* (erro de volume). Portanto, todos os testes seis encontraram um conjunto ótimo de parâmetros para o qual o valor do coeficiente de *NSE*, *NSELOG* e *BIAS* são muito próximos aos valores ótimos esperados por se tratar de testes teóricos.

A Figura 6.1 e 6.2 apresentam os valores ótimos obtidos para cada um dos parâmetros do modelo hidrológico otimizado e o valor teórico conhecido destes parâmetros. Os valores ótimos definidos em cada teste para a capacidade de armazenamento do solo (W_m) flutuaram

em toda amplitude do intervalo de busca permitido ao parâmetro (Figura 6.1). O mesmo aconteceu aos parâmetros de bacia (CS , CI , CB), como apresentado na Figura 6.2.

Os parâmetros K_{bas} e K_{int} (taxas de transferência de fluxo entre as camadas do solo) apresentaram comportamentos opostos. Para o primeiro, todos os valores ótimos encontrados nos testes de 1 a 6 (Tabela 6.1) foram inferiores ao valor teórico determinado como verdadeiro. Para K_{int} o valor teórico está muito próximo ao limite inferior do intervalo de busca, o que pode ter tido algum impacto sobre este processo para este parâmetro, uma vez que não é a condição mais favorável para o algoritmo (Figura 6.2). Por fim, o todos os valores do parâmetro b (que ajusta a sensibilidade de resposta da HRU a um estímulo de entrada ao modelo hidrológico) encontrados como ótimos ficaram em torno do valor teórico conhecido.

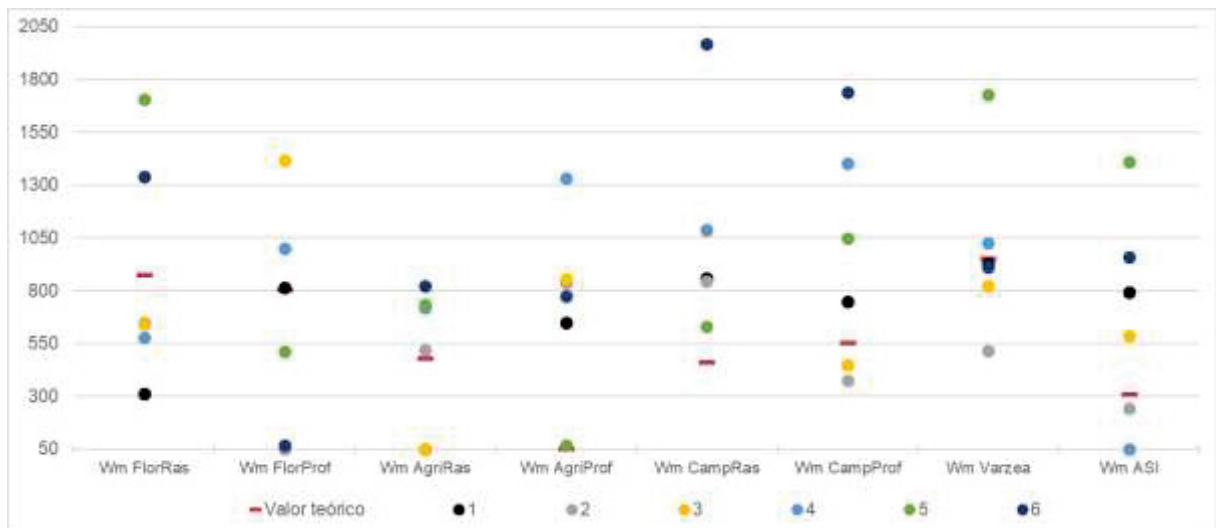


Figura 6.1 – Valores ótimos obtidos para W_m nos testes de 1 a 6.

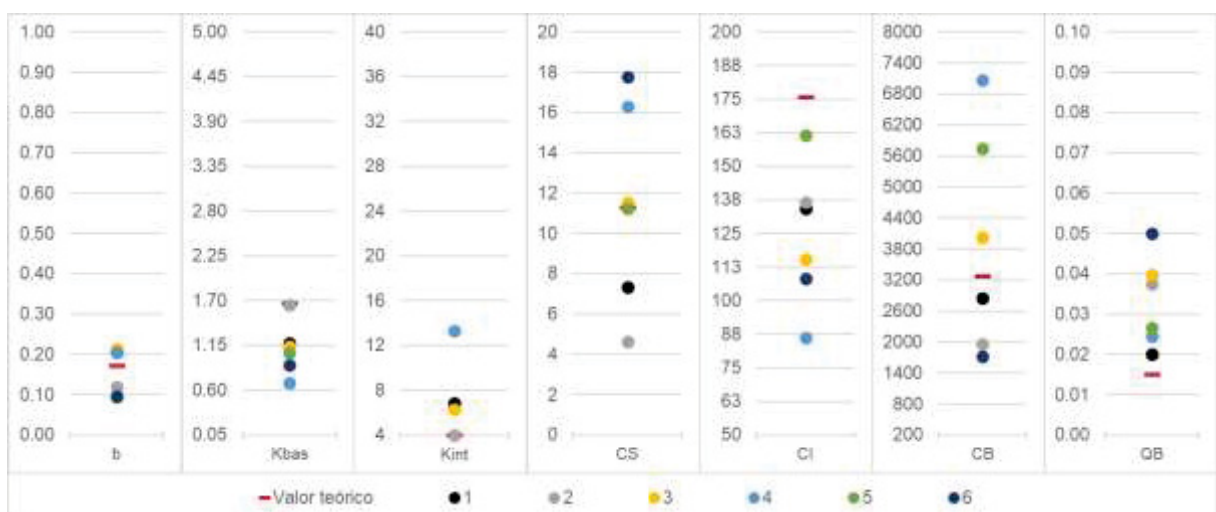


Figura 6.2 – Valores ótimos obtidos para os demais parâmetros do MGB nos testes de 1 a 6.

Os resultados apresentados até aqui demonstram que o método do recozimento simulado é eficiente para a calibração de um modelo hidrológico uma vez que para todos os

testes aqui descritos (Tabela 6.1), o algoritmo convergiu para a solução ótima (Quadro 6.1). E, embora nenhuma das aplicações do método para a calibração do MGB (testes 1 a 6) tenha chegado ao conjunto de valores teóricos conhecido (Figuras 6.1 e 6.2), como ilustra o hidrograma na Figura 6.3, o hidrograma simulado resultante está numa faixa de incerteza bastante próxima do hidrograma teórico.

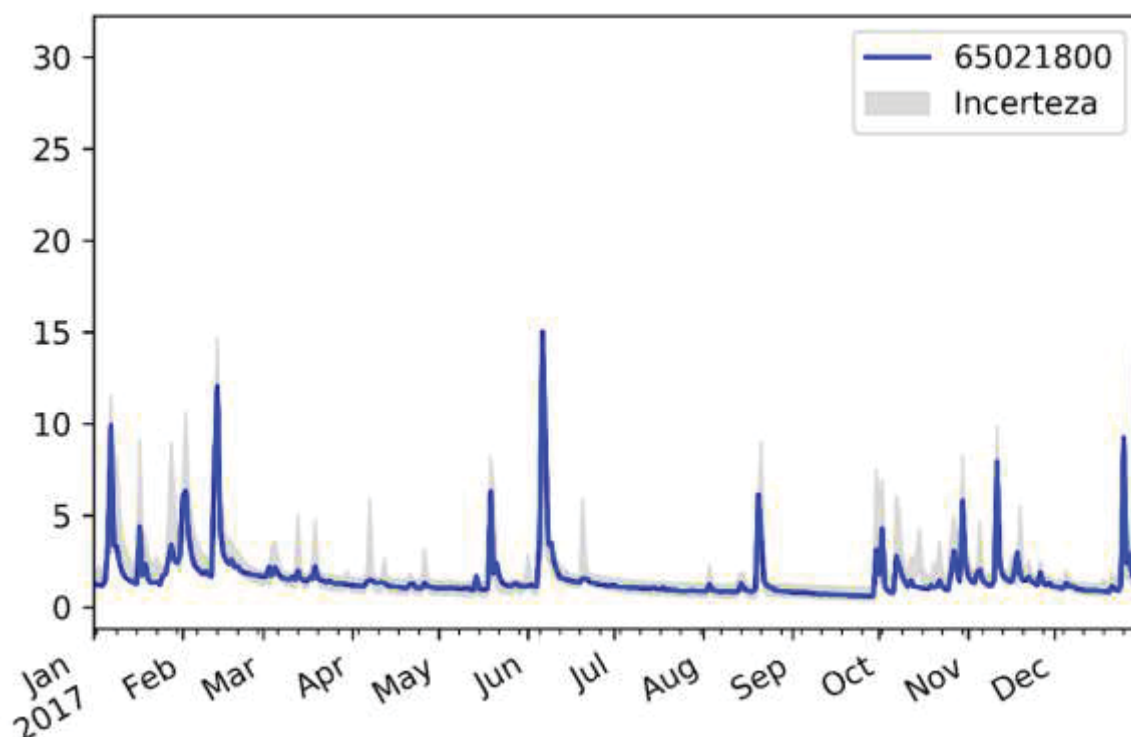


Figura 6.3 – Faixa de incerteza para o hidrograma simulado e hidrograma teórico para a subárea 4 (Teste 5).

A faixa de incerteza na Figura 6.3 é a região sombreada resultante se todos os 45.000 hidrogramas simulados ao longo do processamento no Teste 5 estivessem plotados no gráfico. Para o período de 2010 a 2019, o valor de *NSE* encontrado desta aplicação do MRS (método do recozimento simulado) foi de 0.919. Em nenhuma das aplicações do método para este cenário teórico o valor de *NSE* foi mais próximo do ideal. Entre o menor e maior valor encontrado para a função objetivo há uma variação de apenas 1,2% (Tabela 6.1). Adicionalmente, este ganho marginal no valor de *NSE* representa um custo computacional aproximadamente 80% superior (tempo de processamento sobe de 5h30 para 9h50).

Em se tratando de um cenário teórico para a calibração de um modelo hidrológico determinístico como o MGB, o fato de não se ter encontrado os valores teóricos dos parâmetros, previamente conhecidos, destaca a complexidade do problema de calibração de um modelo hidrológico. A superfície de soluções na qual a busca pela combinação ótima dos valores dos parâmetros acontece é bastante complexa. Ainda que seja possível investigar

esta superfície por completo, é provável mais de uma solução igualmente equivalentes sejam encontradas, cabendo ao hidrólogo decidir por aquela que melhor explica o processo físico da bacia hidrográfica em estudo (Beven, 2006, 2019).

A fim de dar seguimento ao trabalho, uma vez que o método do recozimento simulado se apresentou eficiente, optou-se por adotar uma configuração intermediária, de tal forma que o tempo de processamento não fosse muito superior ao de 5h30, mas que permitisse neste tempo uma busca mais eficiente em termos do valor de *NSE*. Portanto, os valores adotados neste trabalho para os parâmetros do método do recozimento simulado estão apresentados na Tabela 6.2.

TABELA 6.2 – VALORES ADOTADOS PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DO RECOZIMENTO SIMULADO

<i>T</i>	<i>nsor</i>	<i>NT</i>	<i>NSIM</i>	<i>NSUC</i>	<i>fat</i>	MGB sim	Tempo de simulação
0,8	6	60	500	250	0,90	15 a 30 mil	entre 5h e 8h

6.2 VALIDAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MRS

Conforme apresentado no item anterior, apesar dos testes terem sido realizados para um cenário teórico, o mais próximo que se obteve em termos da função objetivo que foi otimizada foi o valor de 0,92. Cabe lembrar que esses testes foram realizados para a subacia de calibração número 4. Esta subacia tem seu exutório no início do reservatório do Passaúna e recebe a contribuição de montante das áreas definidas pelas subacias de números 5 (Bacia hidrográfica do Rio Cachoeirinha, afluente ao rio Passaúna) e 6 (área de drenagem da estação fluviométrica 650217700), como apresenta a Figura 6.4.

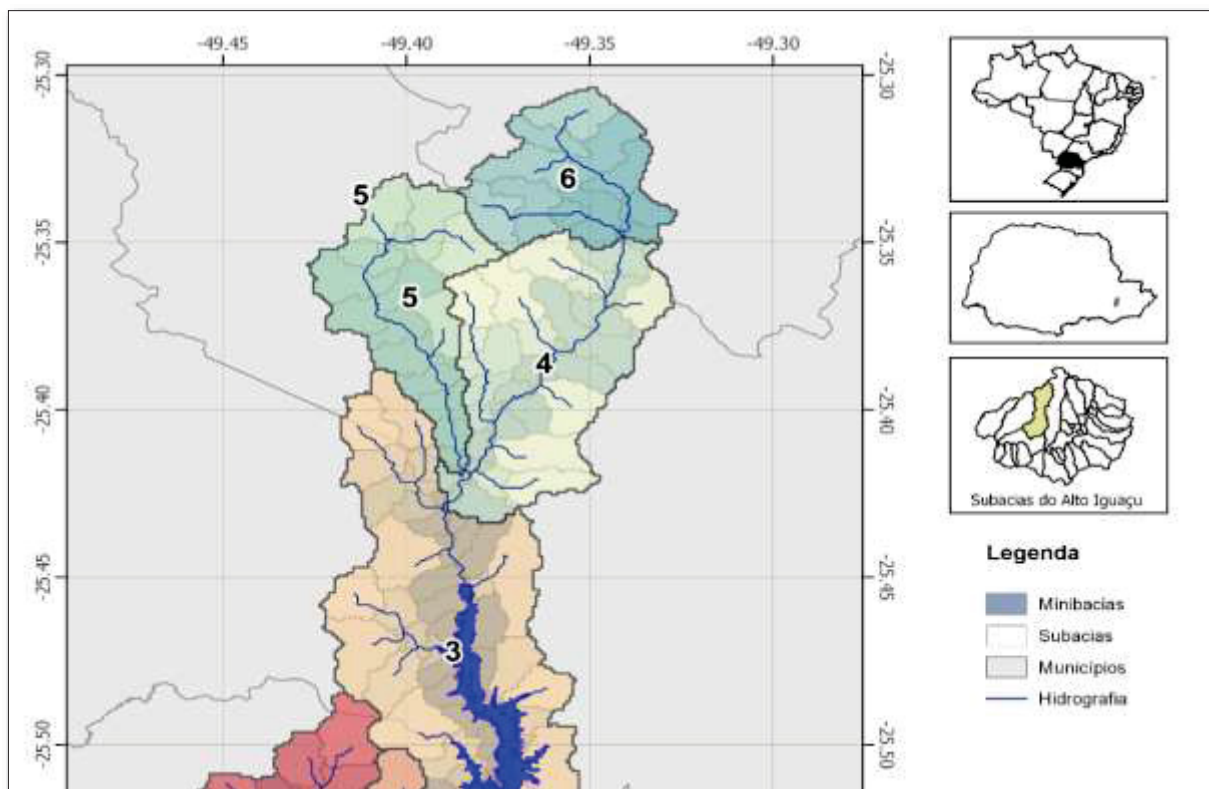


Figura 6.4 – Subáreas de calibração definidas no MGB para a bacia hidrográfica do Alto Passaúna

O MGB é um modelo determinístico; logo, se não alterados os valores dos parâmetros associados às regiões de calibração 5 e 6, os hidrogramas afluentes à subárea 4, em todas as iterações, permaneceram os mesmos. Entretanto, como forma de tirar qualquer influência destas afluições sobre o resultado, uma nova subárea de calibração foi escolhida. A subárea de calibração 5 (Figura 6.4) corresponde à bacia hidrográfica do rio Cachoeirinha. A estação fluviométrica 650217700 (Colônia Dom Pedro) próxima ao exutório deste rio, com dados observados, possibilita o processo de calibração do modelo hidrológico aplicado a esta região.

Para definir o hidrograma teórico de saída, o valor de cada parâmetro hidrológico, passível de calibração no MGB, foi escolhido com base no recomendado pela literatura. Esta escolha observou os limites, superior e inferior, que definem o intervalo de busca dos valores ótimos de cada parâmetro hidrológico. A fim de não mascarar a sensibilidade do parâmetro sobre o hidrograma final, evitou-se que o valor assumido para este coincida com uma das duas extremidades do espaço de busca. Deste modo, o intervalo de busca para o valor dos parâmetros deve dar ao algoritmo alguma “folga” para que a busca não seja prejudicada, ao menos em um cenário puramente teórico.

Os valores adotados para os parâmetros que geram o hidrograma teórico estão apresentados na Tabela 6.3.

TABELA 6.3 – VALORES DOS PARÂMETROS (SEGUNDO CENÁRIO TEÓRICO)

HRU	W_m	b	K_{bas}	K_{int}	XL	CAP	WC
FlorRas	640.0	1.1	1.5	30.0	0.67	0.0	0.1
FlorProf	800.0						
AgriRas	360.0						
AgriProf	720.0						
CampRas	285.0						
CampProf	570.0						
Varzea	950.0						
ASI	620.0						
Água	0.00						
CS	10.5						
CI	125.0						
CB	5500.0						
Q_b	0.05						

Os valores escolhidos para a capacidade de armazenamento do solo para as diferentes HRU's foram tais que aquelas definidas por solos profundos possuíssem valores maiores de W_m . Quanto aos usos do solo, áreas de várzea são as que maior tem capacidade de armazenamento, seguidas daquelas em que o solo é coberto por floresta, agricultura e campo, respectivamente. Os valores para os demais parâmetros foram definidos próximos aos pontos médios dos respectivos intervalos de busca aceitos. Desta forma, para nenhum dos parâmetros, o valor a ser encontrado como resultado da otimização estará na extremidade da região de busca, como ocorreu para os parâmetros K_{int} e W_m (HRU AgriRas – Agricultura em solo raso), quando da definição do primeiro cenário teórico (Figuras 6.1 e 6.2).

Com o novo cenário definido, as vazões teóricas foram geradas e então o processo de otimização por meio do método do recozimento simulado pode ser aplicado (Tabela 6.4). O Teste 7 adota a configuração de busca definida na Tabela 6.2, para este trabalho, e a aplica para a busca dos parâmetros teóricos definidos para a subacia de calibração 5 (subacia de montante). O coeficiente NSE obtido no teste 7 foi de 0,791. Deve-se lembrar que para o primeiro cenário teórico definido (subacia 4, intermediária) os valores de NSE obtidos foram todos muito próximos a 0,91, conforme apresentado na Tabela 6.1.

Esta diferença de desempenho da aplicação do MRS para as subacias 4 e 5 pode estar ligada a diferentes fatores. Para a subacia 4, em que o valor encontrado para o NSE foi melhor (Tabela 6.2), alguns dos valores ótimos de parâmetros coincidiam com os limites do intervalo de busca para estes mesmos parâmetros. Para a subacia 5, os parâmetros teóricos foram escolhidos de forma a evitar o que o valor ótimo a ser encontrado estivesse num desses limites do intervalo de variação adotado para cada parâmetro hidrológico.

TABELA 6.4 – TESTES TEÓRICOS PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO RECOZIMENTO SIMULADO

TESTE	T	$nsor$	NT	$NSIM$	$NSUC$	fat	MGB sim	Tempo de simulação	NSE ótimo	Variação NSE
7	0,8	6	60	500	250	0,9	≈ 19.500	≈ 5h10	0,791	-
8	0,8	6	120	500	300	0,9	≈ 52.000	≈ 13h30	0,791	0,0%
9	0,8	6	200	300	250	0,9	≈ 58.500	≈ 15h30	0,743	-6,1%

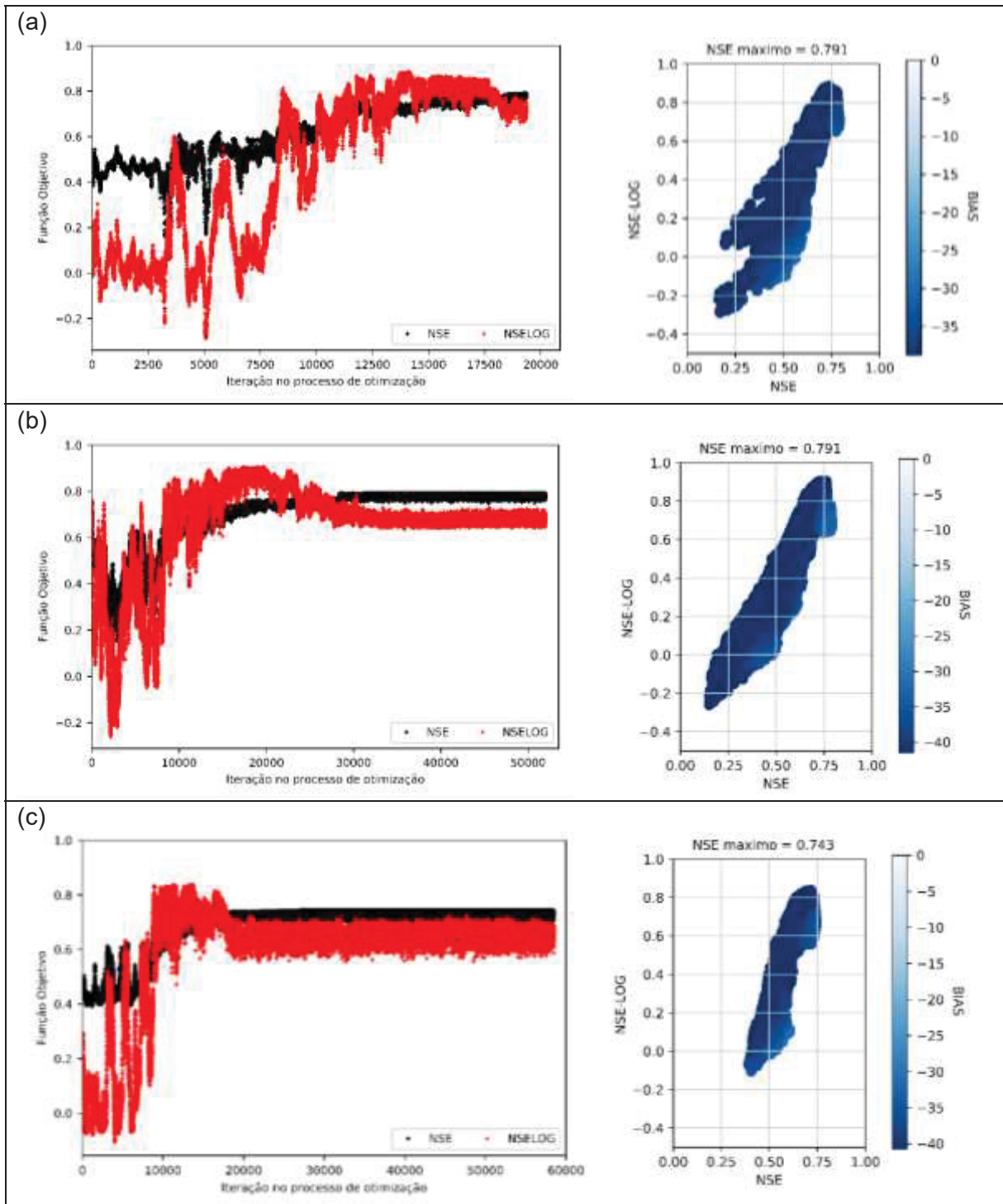
Deste modo, o cenário teórico escolhido para a subacia 5 oferece, em tese, maior liberdade quando da aplicação do procedimento de otimização e busca, pois permite que o método se aproxime do valor que busca de forma bilateral.

Outro fator importante a se considerar são as características hidrológicas próprias de cada subacia. Enquanto a subacia 4 é uma bacia hidrográfica incremental, ou seja, recebe afluências de áreas de drenagem adjacentes, a subacia 5, bacia hidrográfica de montante, não recebe este tipo de influência sobre sua vazão de exutório. Há ainda a possibilidade de que a configuração adotada para os parâmetros do método do recozimento simulado não tenha sido suficiente para garantir a convergência para a solução ótima global do problema. Os testes 8 e 9 (Tabela 6.4) permitiram ao MRS testar mais conjuntos solução para o problema hidrológico, como mostra também o Quadro 6.2.

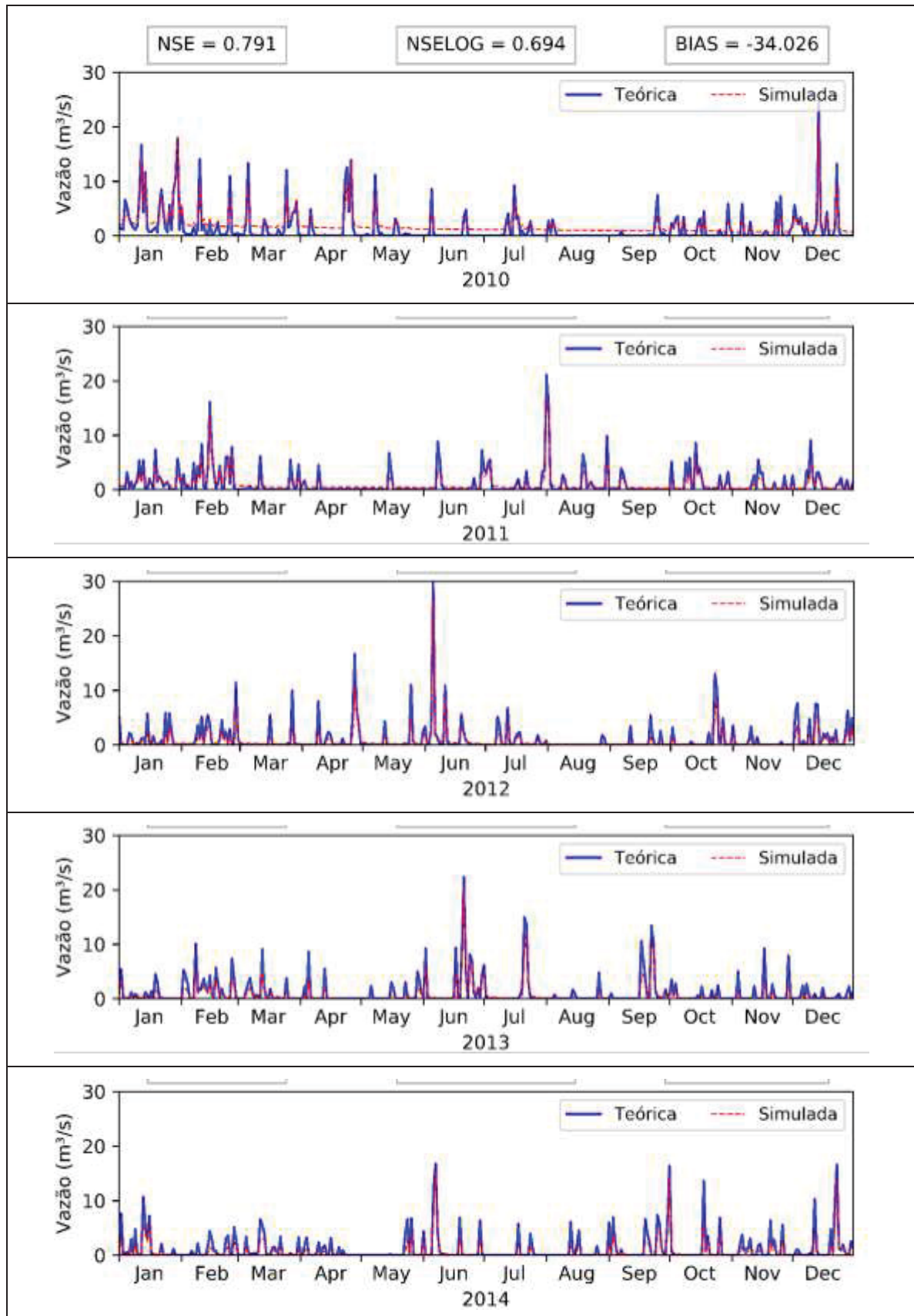
No Quadro 6.2, os gráficos da evolução dos valores obtidos para a função objetivo (NSE) e o coeficiente $NSELOG$ (Coeficiente de Nash-Sutcliffe para o logaritmo das vazões), corroboram o fato de quanto maior o número de soluções testadas, mais estável o método se torna; logo, melhor o resultado encontrado ao fim do processamento. Esta é uma das características dos métodos heurísticos (Machado, 2009; Machado et. al., 2012).

Além disso é possível observar nos gráficos para a frente de Pareto (Quadro 6.2) que o Método do Recozimento Simulado (MRS) convergiu para uma solução ótima. Os coeficientes NSE e $NSELOG$, convergiram para os respectivos valores ótimos (coeficientes iguais a 1). O oposto aconteceu para o coeficiente $BIAS$ (valor ótimo igual a zero) que nos três testes indicou um erro de volume da ordem de -30% a -40%. Este pode ter sido um fator importante para que não se tenha obtido valores de NSE mais próximos ao ótimo teórico, igual a 1, como os apresentados na Tabela 6.4.

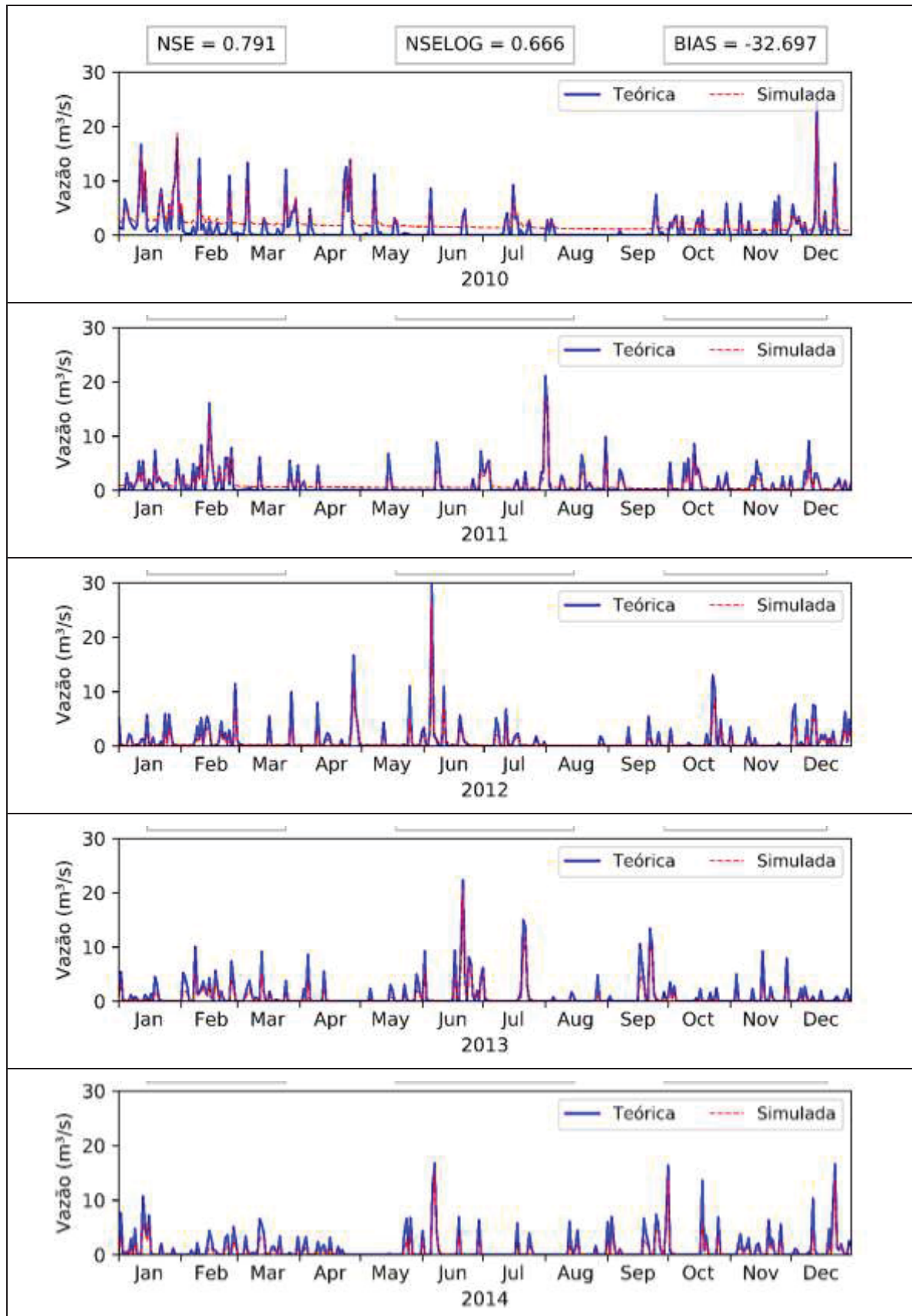
Os $BIAS$ é uma medida da capacidade do modelo em se ajustar aos dados observados da variável que pretende predizer (Collischon e Tucci, 2001). Valores muito baixos para esta estatística indicam que a capacidade de predição do modelo resulta em uma série de valores que subestima os valores da série de dados observados para a variável. Os hidrogramas apresentados nos Quadros 6.3 a 6.5 confirmam esta tendência para o conjunto de parâmetros hidrológicos obtido como ótimo para a Subacia 5 (Figura 6.4), nos testes 7, 8 e 9.



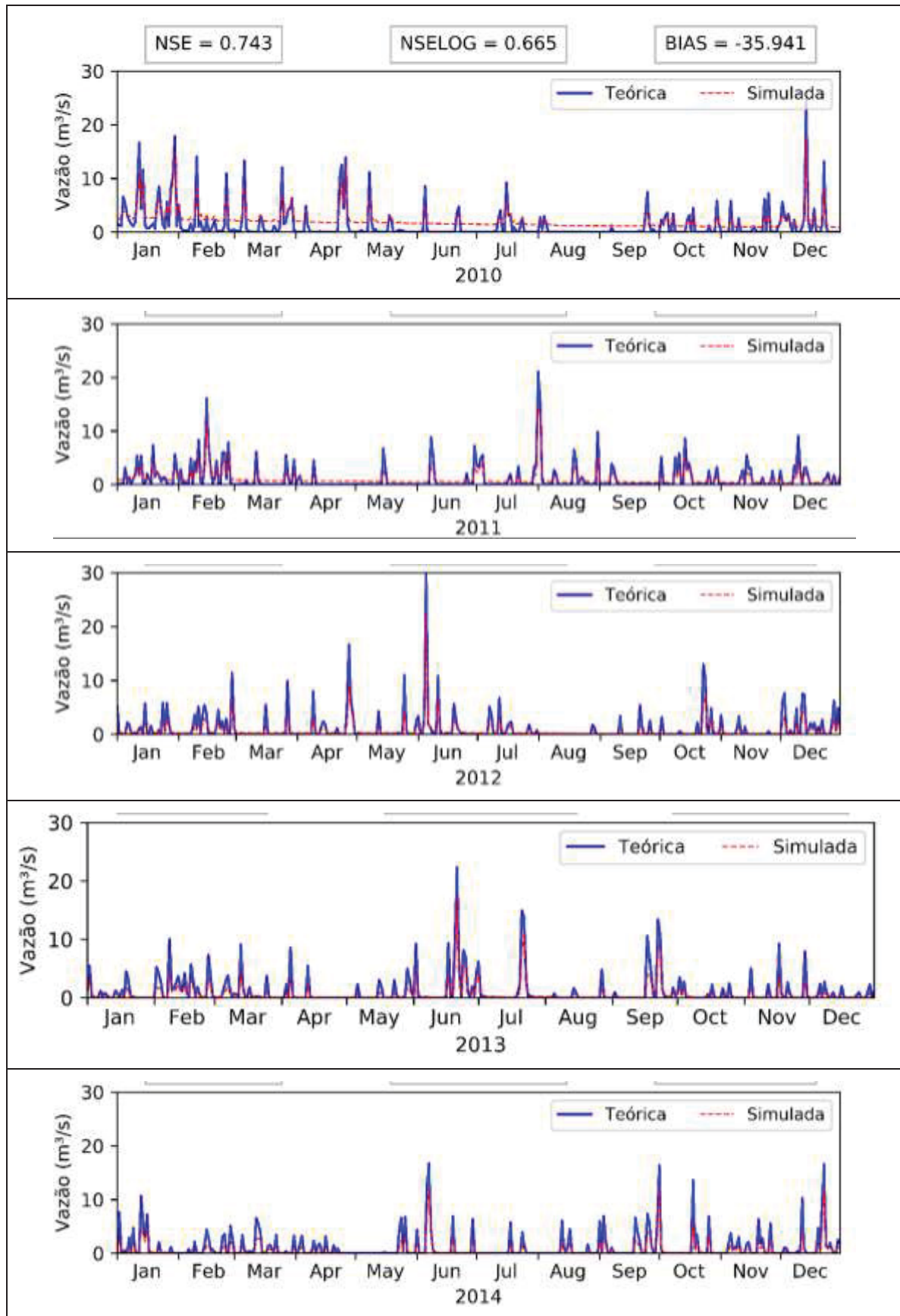
Quadro 6.2 – Evolução e frente de Pareto para os testes 7 (a), 8 (b) e 9 (c), subacia 5, com diferentes parâmetros do MRS



Quadro 6.3 – Hidrogramas teórico e simulado (Teste 7) para a subacia número 4



Quadro 6.4 – Hidrogramas teórico e simulado (Teste 8) para a subacia número 4

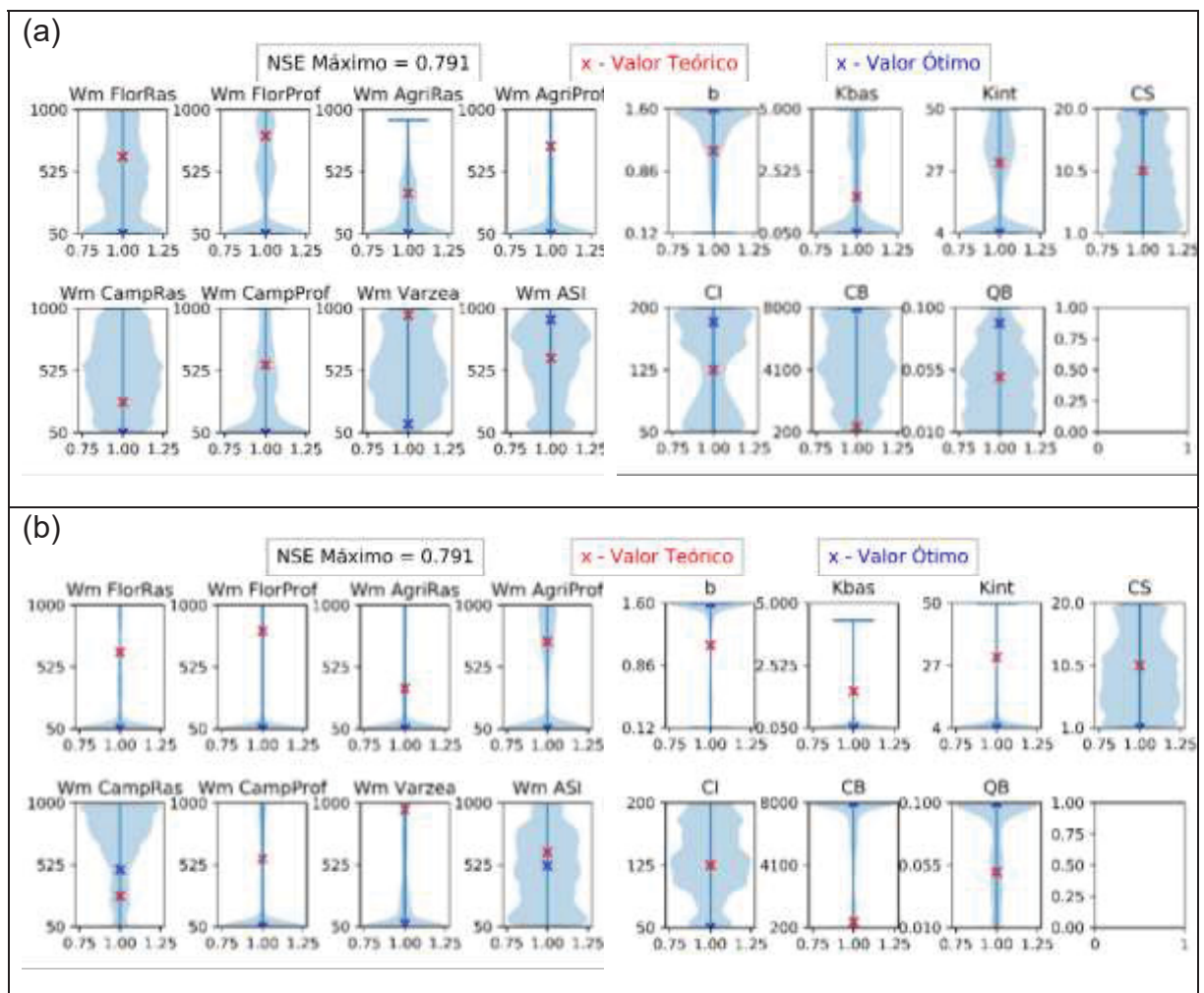


Quadro 6.5 – Hidrogramas teórico e simulado (Teste 9) para a subacia número 4

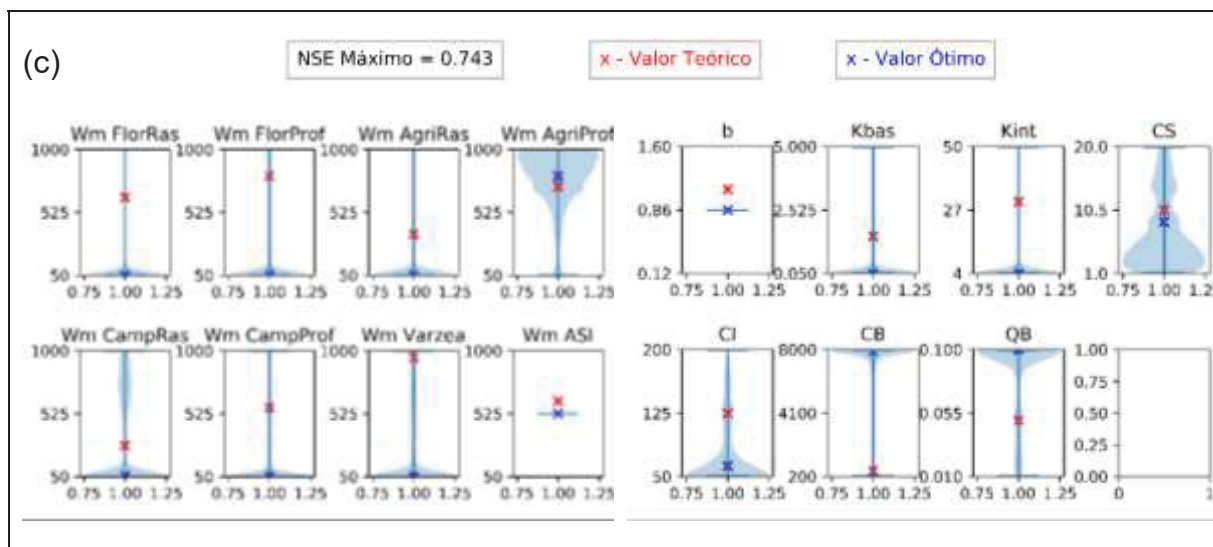
Para todos os três testes, observa-se os anos de 2010 e 2011 (Quadros 6.3 a 6.5) que nos períodos de recessão do hidrograma a vazão simulada pelo MGB é superior àquela definida como teórica. Neste mesmo período, os picos do hidrograma simulado são, em maior parte, inferiores aos teóricos. A partir de 2012, esta tendência para os picos se repete, mas para os períodos de recessão o comportamento muda e as séries se sobrepõem (Quadros 6.3 a 6.5).

Ao analisar os gráficos dos Quadros de 6.3 a 6.5, deve-se lembrar que se trata de um teste teórico, ou seja, o hidrograma a ser obtido após a calibração do modelo hidrológico busca representar um hidrograma teórico gerado a partir de parâmetros definidos de forma arbitrária (Tabela 6.3) com base em valores disponíveis na literatura (Medeiros *et. al.*, 2019).

Por fim, os *violin plots* apresentados no Quadro 6.6 mostram que apenas para alguns parâmetros foi encontrado um valor bastante próximo ao estipulado para a geração dos hidrogramas e em muitos casos, o método fez a busca bastante próximo do dos valores do limite inferior do intervalo estipulado para esta pesquisa.



Quadro 6.6 – Violin plots para os parâmetros hidrológicos



Quadro 6.6 – Violin plots para os parâmetros hidrológicos (Continuação)

6.3 DISCUSSÃO E SÍNTESE DO CAPÍTULO

Dada a possibilidade de aplicação do MGB para a bacia hidrográfica do rio Passaúna e a definição da quantidade de parâmetros a serem calibrados através do método de otimização escolhido, foi implementado computacionalmente em linguagem Go (Anexo IV), o MRS. O código opera de forma independente ao código do MGB. O algoritmo lê os arquivos de entrada para a simulação com o MGB, chama o executável do modelo hidrológico lê arquivos de saída, avalia a resposta, rescreve arquivos de entrada, e reinicia o processo até que os critérios de parada sejam atingidos, mostrando a versatilidade de se combinar processos de otimização com algoritmos computacionais de modelos hidrológicos.

Nesta pesquisa, a fim de verificar a aplicabilidade do MRS à calibração de modelos hidrológicos foi proposto um teste teórico, no qual todos os valores de entrada, saída e parâmetros hidrológicos eram conhecidos. Os resultados desta abordagem demonstraram que o método de otimização é bastante eficaz, uma vez que atinge o resultado esperado em termos de qualidade do ajuste. Na calibração dos parâmetros do MRS, obteve-se com esta configuração, para o modelo hidrológico calibrado pelo método um *NSE* máximo igual a 0,918 (série de vazões teóricas com cinco casas decimais). Para os mesmos testes, o *NSE* vai a 0,999, se as séries de vazões “observadas” teóricas for fornecida com apenas duas casas decimais (conforme grande parte dos dados disponíveis para séries de vazões observadas). Esse detalhe confirma a eficácia do MRS em termos de convergência e reforça o fato de que, como em todo método heurístico, quanto maior o número de conjuntos solução testados, maior a chance de se atingir o ótimo global.

O tempo computacional do qual se dispõe para a busca da solução ótima tem potencial impacto sobre o resultado encontrado. Deste modo, é preciso encontrar uma configuração de parâmetros do recozimento simulado tal que se justifique o tempo empregado para a busca, dada a melhora nos valores obtidos para a função objetivo (neste trabalho, o *NSE*). Esta escolha, como todo o processo de calibração, não é trivial. Neste trabalho, foram testadas ao menos 6 diferentes configurações destes parâmetros a fim de realizar a busca do conjunto solução ótimo para os parâmetros hidrológicos do MGB (Item 6.1). Para definição da configuração ideal dos parâmetros do MRS, um segundo cenário teórico foi criado a fim de verificar se, de fato, a configuração adotada era suficiente para aplicação do MRS à outra subacia de calibração.

Do primeiro cenário teórico, utilizado para a calibração dos parâmetros do MRS (Item 6.1), se encontraram resultados ótimos (*NSE* máximo igual a 0,919) com apenas cerca de 5h30 de processamento computacional. Mesmo com configurações que permitiram testar o dobro de soluções possíveis, a melhora em termos de *NSE* foi marginal. Do segundo cenário teórico proposto, utilizado para a verificação da configuração escolhida (Item 6.2), o máximo *NSE* alcançado foi de 0,791, a partir da mesma configuração obtida na etapa de calibração.

A diferença de sucesso nas duas aplicações do MRS, dado que são simulações em cenários teóricos, pode ser explicada por diversas razões que precisam ser melhor investigadas. Cabe lembrar que toda vez que se recorre a um processo de otimização automático, o problema se torna puramente matemático e os intervalos de variação estipulados para cada parâmetro a ser determinado são, ainda, a única ligação entre o valor determinado e o significado físico dos parâmetros. Ainda assim, um problema com 18 graus de liberdade possui um espaço de soluções possíveis bastante complexo.

Tal complexidade, pode conduzir o método de otimização a um caminho de exploração do espaço de soluções em que o ótimo global está em uma região de quase descontinuidade nessa superfície de soluções possíveis. Há; portanto, muitas possibilidades de aperfeiçoamento da aplicabilidade do MRS para a calibração de modelos hidrológicos. Nesta pesquisa, foco foi dado ao problema da calibração de um modelo hidrológico. Portanto, os resultados obtidos já são suficientes para evidenciar a eficiência e potencial do MRS aplicado a problemas de calibração de modelos hidrológicos.

7 INFORMAÇÃO “A PRIORI” E CALIBRAÇÃO DE MODELO HIDROLÓGICO

A quantidade e qualidade dos dados hidrológicos disponíveis para a aplicação de modelos matemáticos, em geral, são fatores que limitam o uso e aplicação destas ferramentas, principalmente por serem decisivas ao processo de calibração de seus parâmetros (Beven, 2019). Em contrapartida, nem sempre se explora todas as possibilidades de uso das informações hidrológicas para auxiliar este processo de calibração, por exemplo, restringindo o espaço de busca do conjunto solução de valores para os parâmetros hidrológicos de uma determinada região.

Nesse sentido, este capítulo pretende explorar o uso de informações “*a priori*” como alternativas para melhora no processo de calibração de um modelo hidrológico. Tem-se por informação “*a priori*”, qualquer informação hidrológica que seja conhecida, ou facilmente obtida a partir dos dados hidrológicos disponíveis, ou mesmo, derivadas de etapas do processo de implementação do modelo hidrológico em questão.

Neste trabalho, dois tipos de informação “*a priori*” foram avaliados e serão discutidos nos próximos itens. A importância amostral como já definida e apresentada (Capítulo 5) e, um hidrograma como dado de entrada a uma subacia incremental da bacia hidrográfica para a qual se está otimizando os parâmetros hidrológicos.

7.1 IMPORTÂNCIA AMOSTRAL COMO INFORMAÇÃO “A PRIORI”

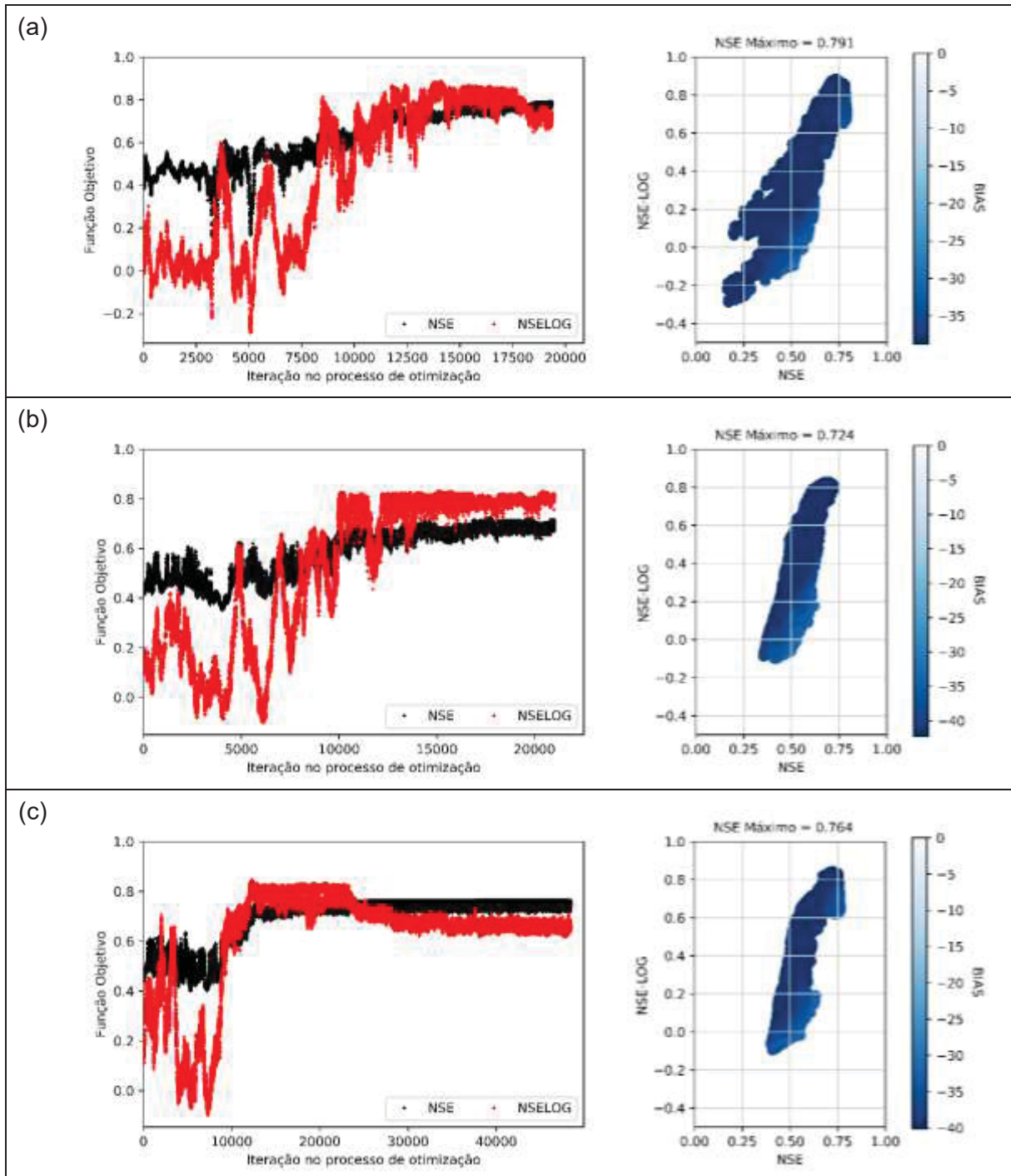
Para verificar o impacto que o critério de importância amostral teria sobre o processo de calibração podemos avaliar os resultados apresentados pela Tabela 7.1.

TABELA 7.1 – TESTES COMPARANDO O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO COM E SEM O CRITÉRIO DE IMPORTÂNCIA AMOSTRAL.

Teste	T	$nsor$	NT	$NSIM$	$NSUC$	fat	Simulações com o MGB	Tempo para otimização	NSE ótimo	Variação NSE
7	0,8	6	60	500	250	0,9	≈ 19.500	≈ 5h10	0,791	-
IA 1	0,8	6	60	500	250	0,9	≈ 21.000	≈ 5h30	0,724	-8,5%
IA 2	0,8	6	200	250	200	0,9	≈ 48.500	≈ 13h	0,764	-3,4%

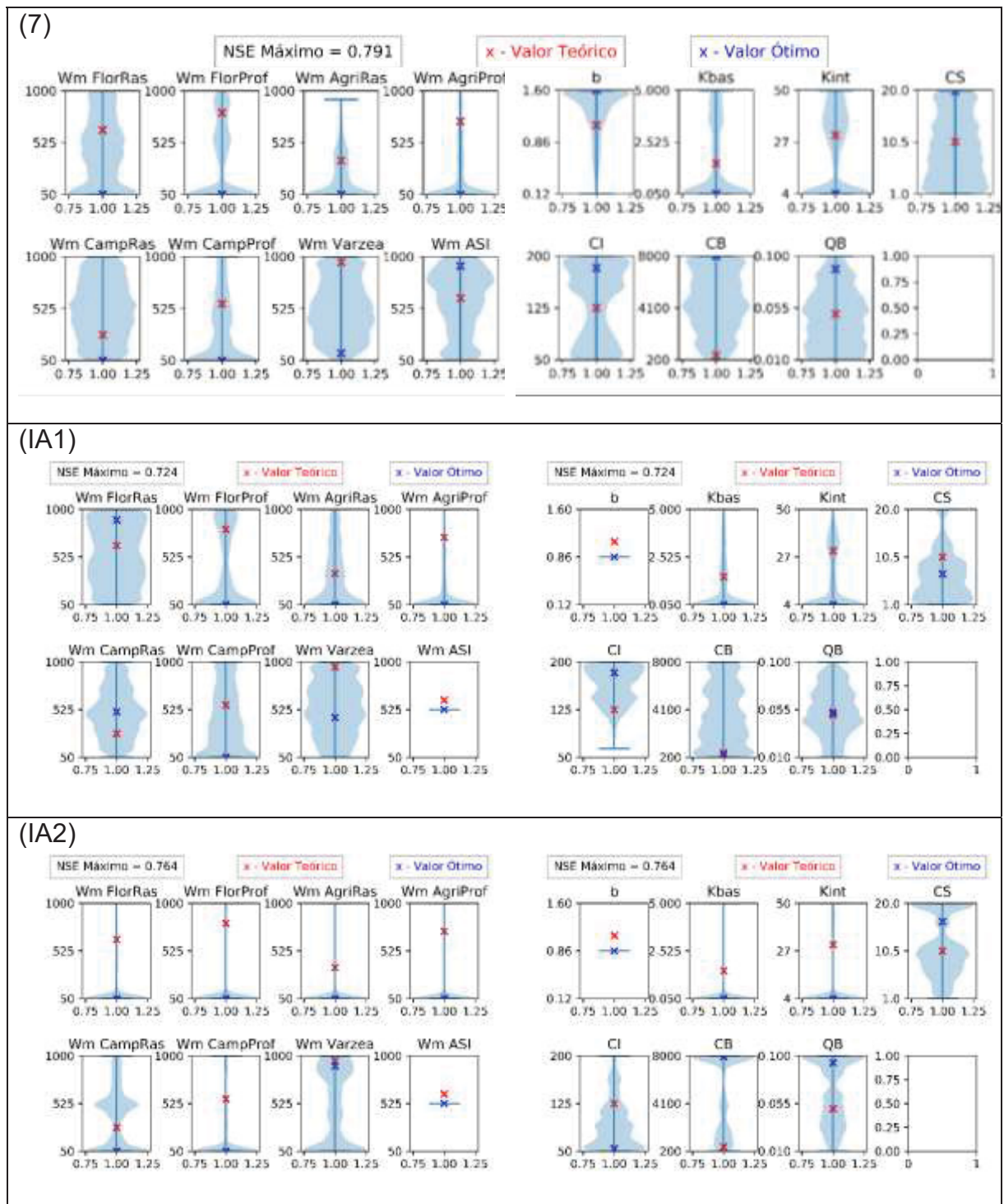
Como é possível observar (Tabela 7.1) não há impacto no tempo de processamento dos testes, se usarmos a mesma configuração para os parâmetros do método do recozimento simulado. Entretanto, com a queda do valor obtido para a função objetivo, do Teste 7 para o Teste IA 1, fez-se importante verificar se a configuração adotada para estes parâmetros do MRS era suficiente para se chegar ao valor ótimo desta função objetivo. Para isto foi realizado o Teste IA2.

Nesse sentido, olhando para os gráficos de evolução dos valores de NSE encontrados ao longo da otimização e as Frentes de Pareto geradas desta busca, podemos concluir desta análise que pouca melhora se obteve com um grande custo computacional, em termos de tempo do Teste IA1 para o Teste IA2 (Quadro 7.1).



Quadro 7.1 – Evolução do algoritmo de otimização e frente de Pareto para os testes 7 (a), IA1 (b) e IA2 (c)

Deve-se lembrar, entretanto, que se trata de um método heurístico e quanto maior o número de iterações, maior a capacidade de este atingir o valor ótimo global. Além disso, o problema em questão tem um complexo espaço de soluções. Há mais de um conjunto de parâmetros que podem ser matematicamente viáveis, como nos mostram os *violin plots* traçados para os três testes (Quadro 7.2).



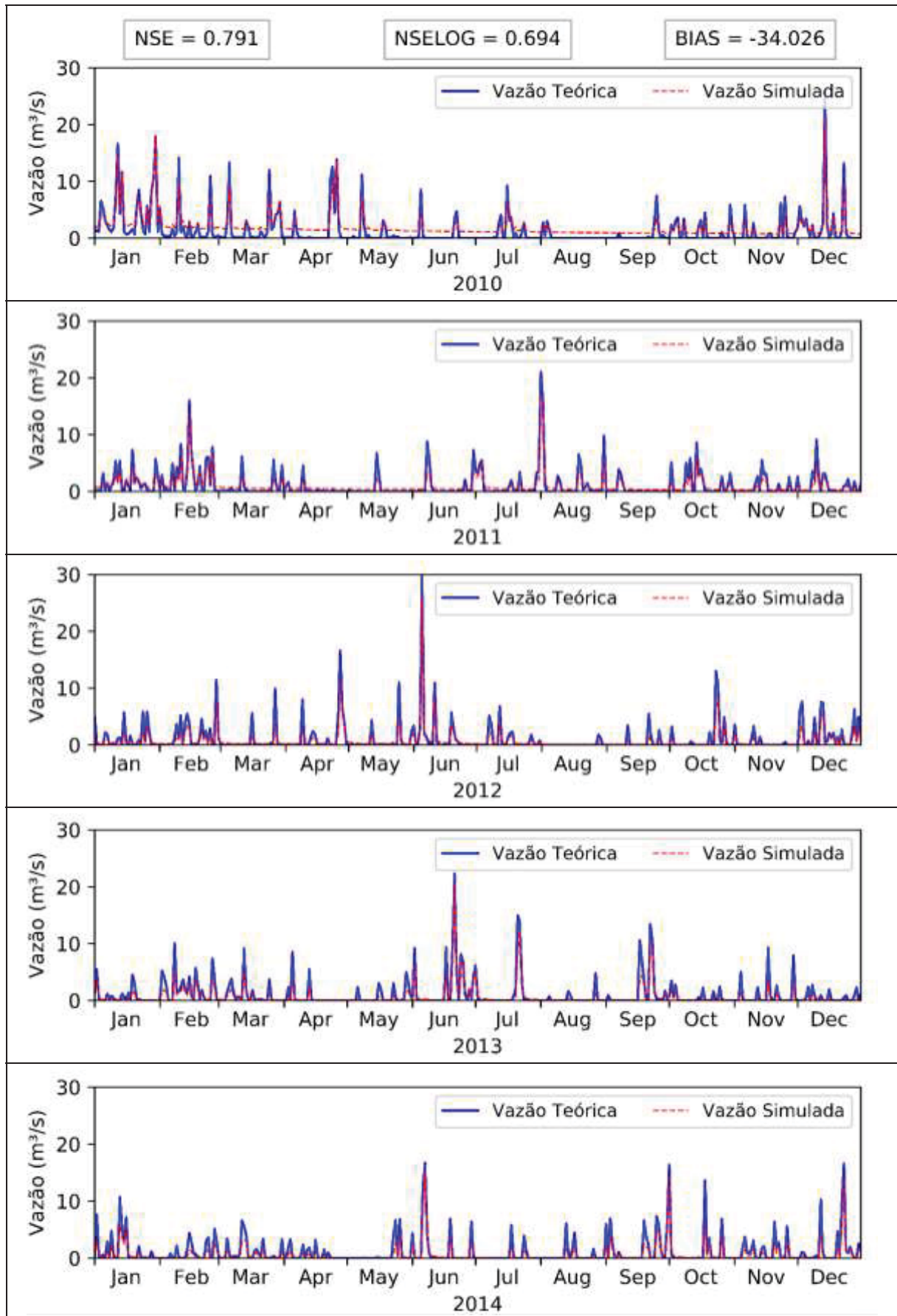
Quadro 7.2 – Violin plots para os parâmetros hidrológicos dos testes 7, IA1 e IA2

Quanto ao valor do NSE, pode-se observar uma queda de 8,5% quando se inseriu no processo o critério de importância amostral. Este critério permite aos parâmetros com maior peso a possibilidade de sofrerem um número maior de perturbações, o que aumentaria a capacidade do método de explorar todo o intervalo de busca deste parâmetro. Mas é necessário lembrar que explorar bem apenas o intervalo de busca de um parâmetro específico, sem dar a devida importância para a configuração dos demais parâmetros pode dar a falsa sensação de que todas as possibilidades para o parâmetro foram exploradas.

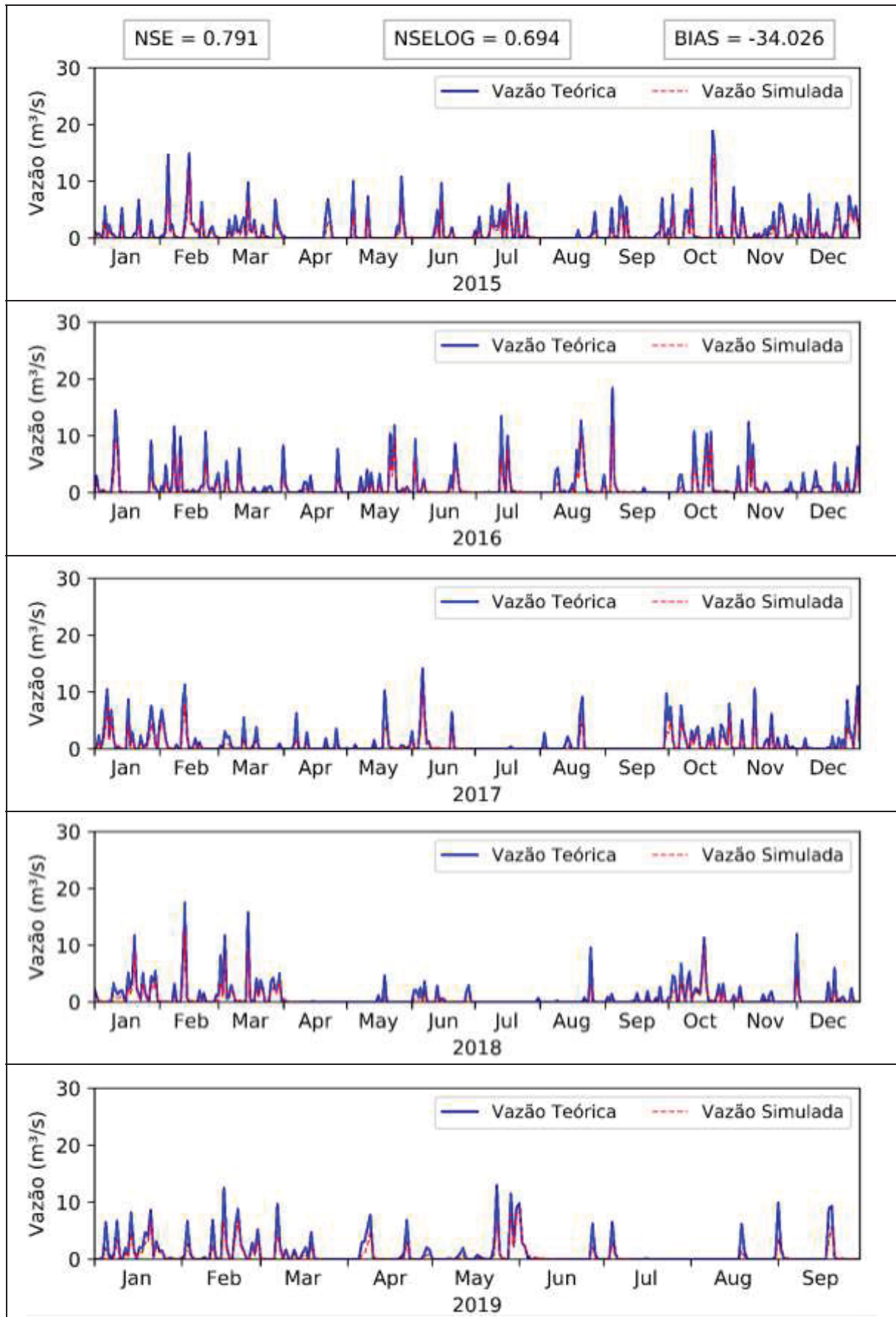
Para comparar quantas vezes cada parâmetro foi sorteado, tem-se os dados da Tabela 7.2. Da Tabela 7.2, concluímos que para o Teste 7 (sem o critério de importância amostral), como esperado, todos os parâmetros foram igualmente sorteados, com pouca diferença percentual. Para o teste IA1, este cenário muda e são privilegiados aqueles parâmetros que receberam maior peso, também como esperado. Destaca-se que para este teste o parâmetro calibrável b acabou não sendo sorteado nenhuma vez, apesar de ter recebido peso 1. Outro aspecto é que o esforço para encontrar o valor ótimo de $W_m ASI$, no teste 7, é em vão, pois não há na subárea de calibração nenhuma minibacias com este tipo de solo e cobertura. Nos Quadros de 7.3 a 7.8, pode-se observar os hidrogramas obtidos em cada um dos testes em todo o período de simulação.

TABELA 7.2 – PARÂMETROS MAIS SORTEADOS DURANTE PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

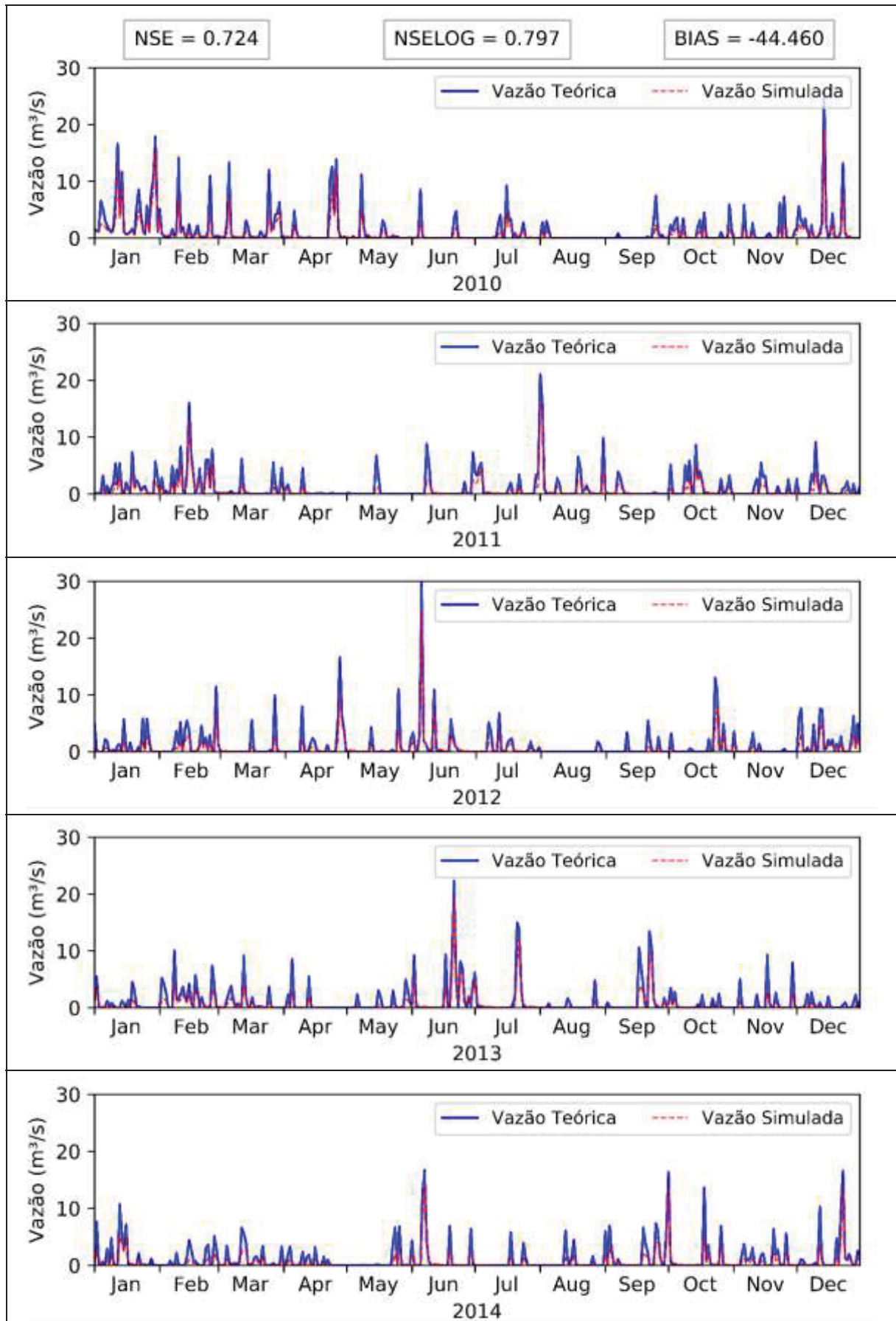
Parâmetro hidrológico	Peso atribuído ao parâmetro	Sorteios (%)	
		Teste 7	Teste IA 1
Wm FlorRas	4	6.8%	12.7%
Wm FlorProf	6	6.2%	13.2%
Wm AgriRas	3	6.5%	10.5%
Wm AgriProf	7	6.2%	12.8%
Wm CampRas	1	7.0%	5.2%
Wm CampProf	5	6.7%	13.3%
Wm Varzea	2	7.0%	8.8%
Wm ASI	0	7.2%	0.0%
b	1	6.7%	0.0%
Kbas	1	6.3%	4.3%
Kint	1	6.3%	4.5%
CS	1	6.8%	5.2%
CI	1	7.0%	5.2%
CB	1	7.0%	5.0%
QB (m ³ /s/Km ²)	1	6.2%	4.5%



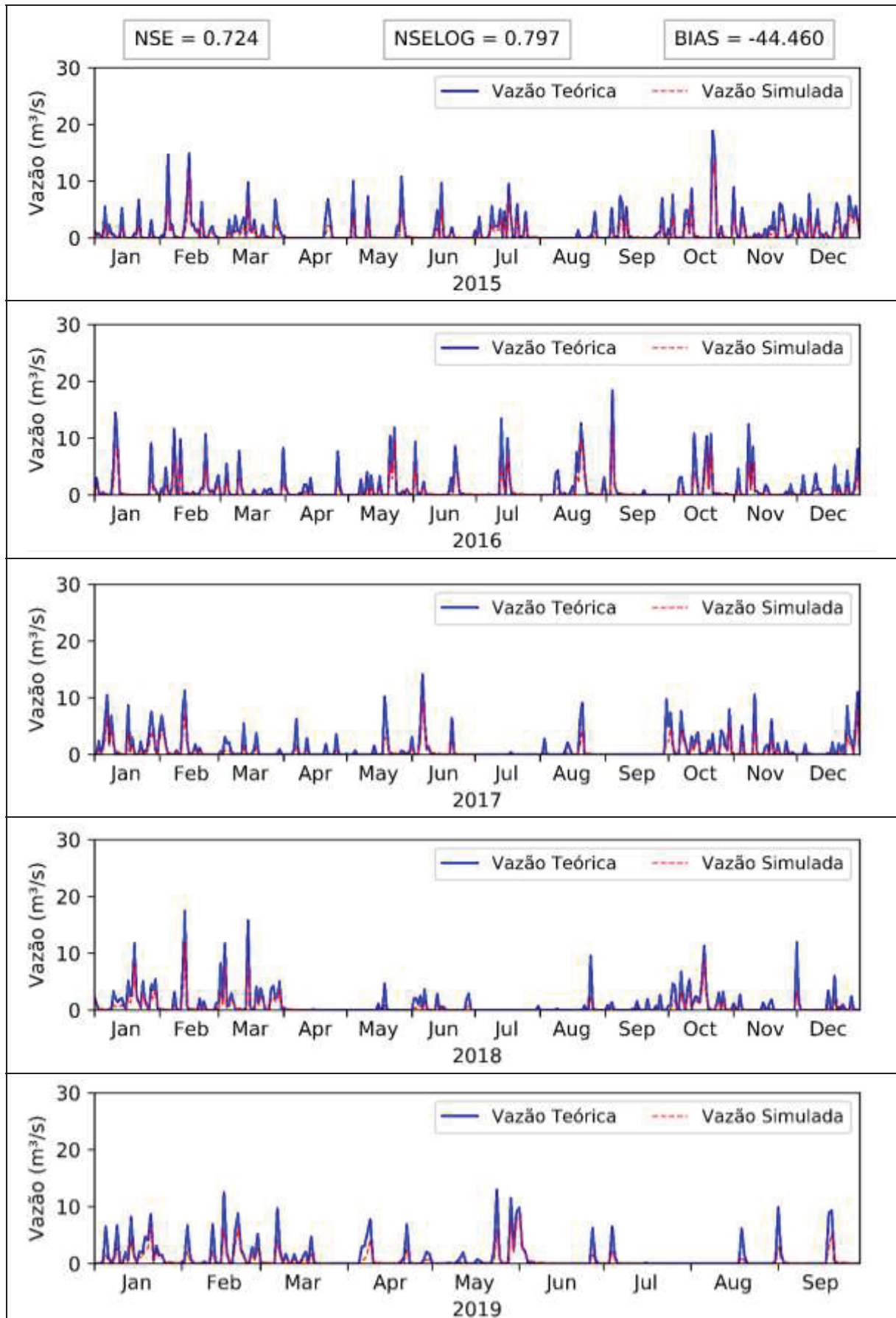
Quadro 7.3 - Hidrogramas de 2010 a 2014: Vazão teórica e ótima obtida a partir do teste 7



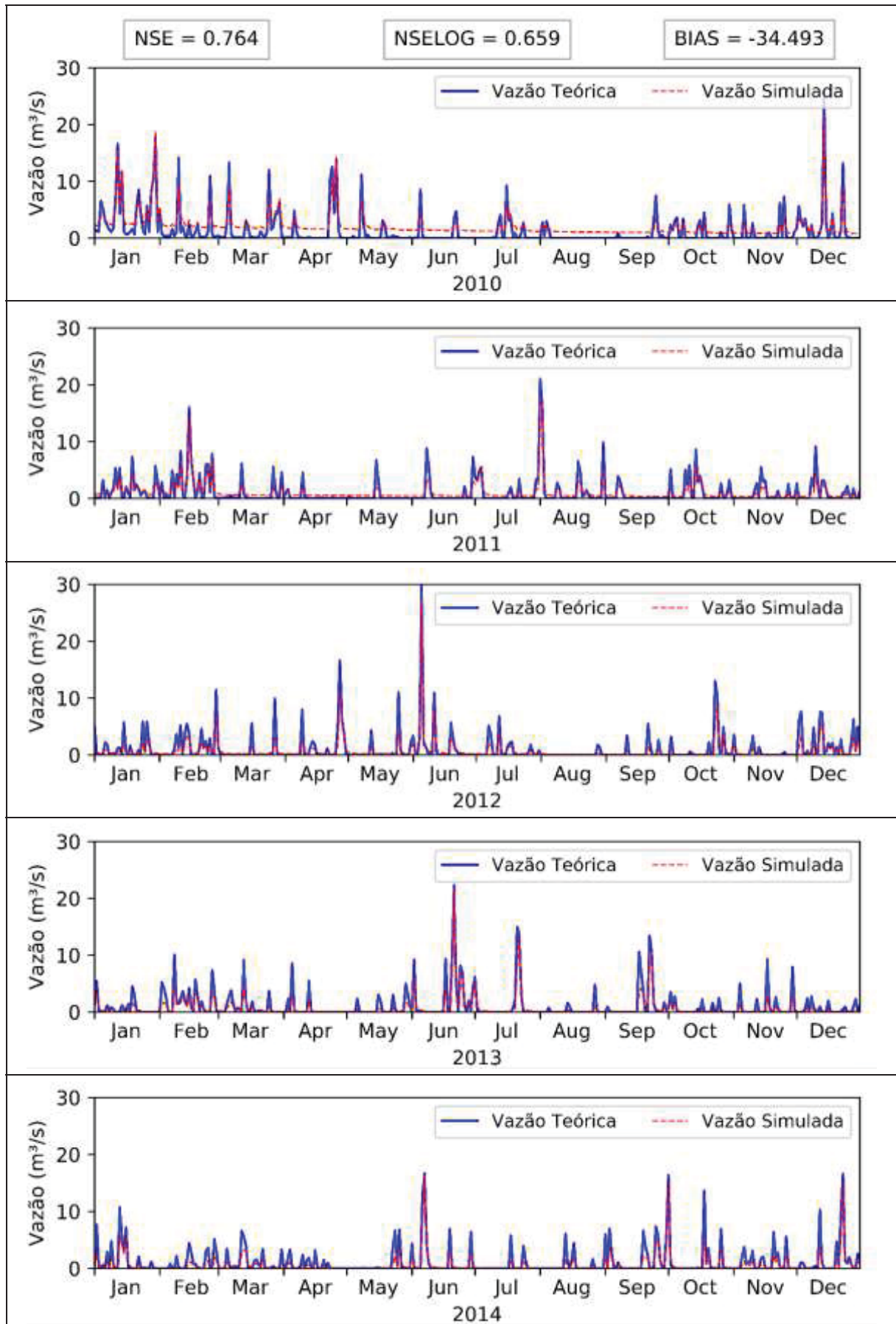
Quadro 7.4 - Hidrogramas de 2015 a 2019: Vazão teórica e ótima obtida a partir do teste 7



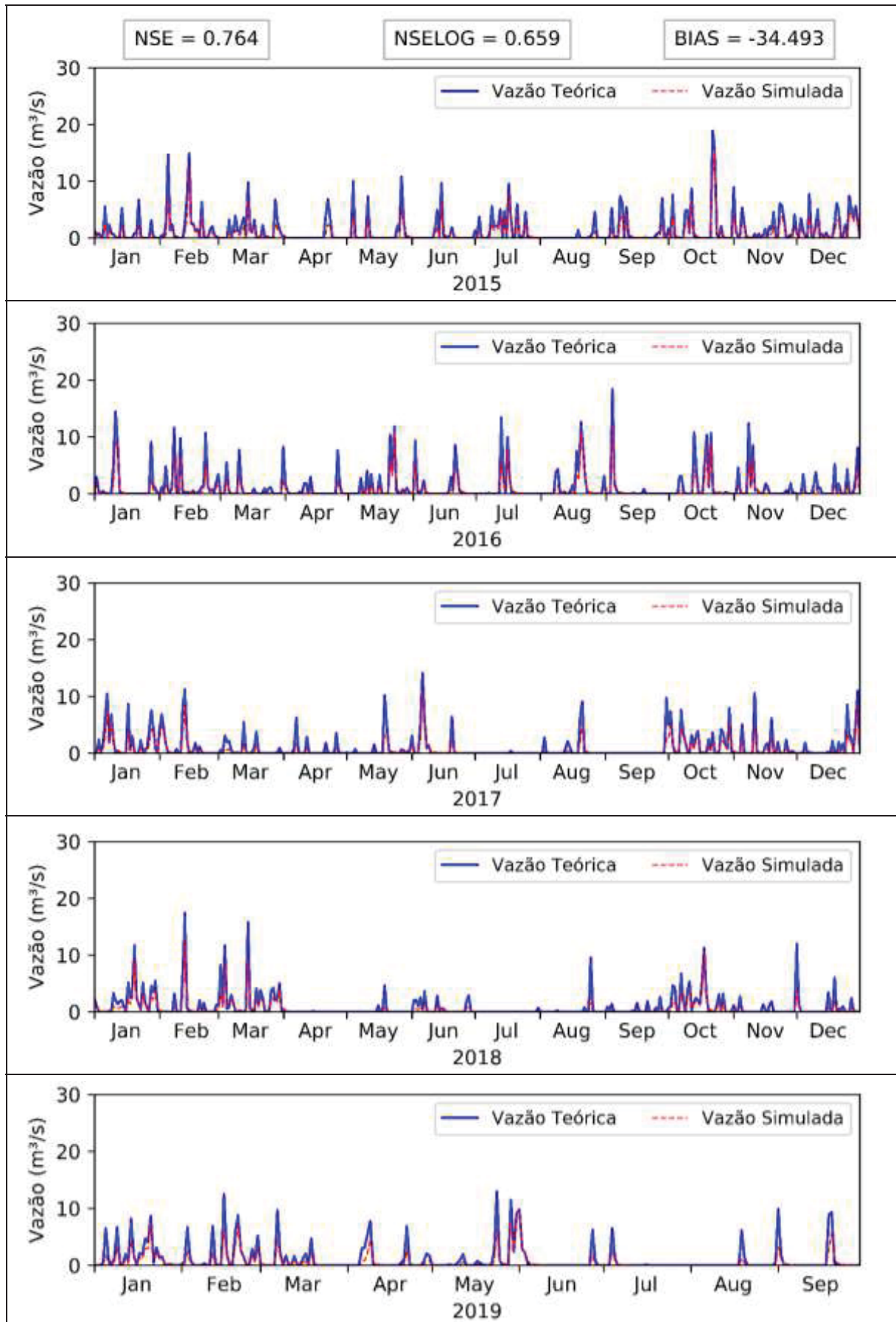
Quadro 7.5 - Hidrogramas de 2010 a 2014: Vazão teórica e ótima obtida para o teste IA1



Quadro 7.6 - Hidrogramas de 2015 a 2019: Vazão teórica e ótima obtida para o teste IA1



Quadro 7.7 - Hidrogramas de 2010 a 2014: Vazão teórica e ótima obtida para o teste IA2



Quadro 7.8 - Hidrogramas de 2015 a 2019 – Vazão teórica e ótima obtida para o teste IA2

7.2 HIDROGRAMA COMO INFORMAÇÃO “A PRIORI”

Quando comparamos os resultados entre as duas subacias de calibração para as quais o método RS foi aplicado no processo de calibração, temos o que apresenta a Tabela 7.3. Na primeira linha da Tabela 7.3 temos o teste 2, realizado na subacia de calibração número 4, que recebe a influência de dois hidrogramas de entrada de áreas subjacentes afluentes a subacia. Neste teste, o método de otimização não considerava ainda qualquer critério de importância amostral para o sorteio dos parâmetros a serem perturbados. Na segunda linha a Tabela 7.3 traz os resultados obtidos ainda para a mesma subacia (subacia 4), entretanto, já com o critério de importância amostral incorporado ao método de otimização.

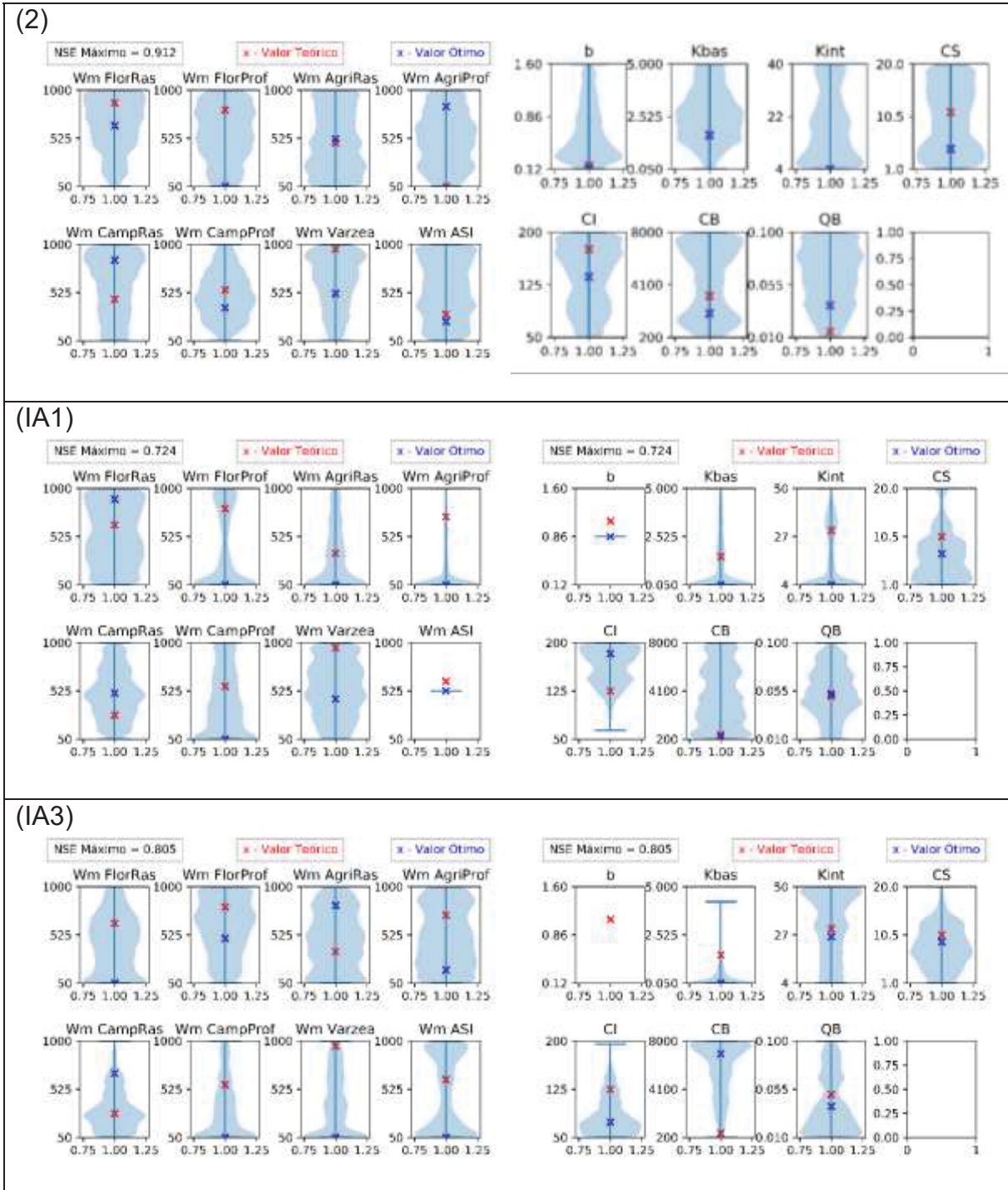
Comparando estes dois testes, para mesma subacia, subacia 4, pode-se inferir que a variação no valor obtido para o NSE igual a 13,3%, se deve a inserção do critério de importância amostral no processo de otimização, conforme discutido no item anterior, e, possivelmente, a mudança de cenário definido com teórico.

TABELA 7.3 – TESTES 2, IA3 E IA1

Bacia	Teste	T	nsor	Nt	NSIM	NSUC	fat	MGB SIM	Tempo de Simulação	NSE Ótimo	NSE Variação	Cenário Teórico
4	2	0,80	6	50	500	500	0,90	25000	≈ 5h30m	0.912	-	1
4	IA 3	0.8	6	60	500	250	0.9	17800	≈ 5h30m	0.805	-13.3%	2
5	IA 1	0,8	6	60	500	250	0.9	≈ 21.000	≈ 5h30	0.724	-11.2%	2

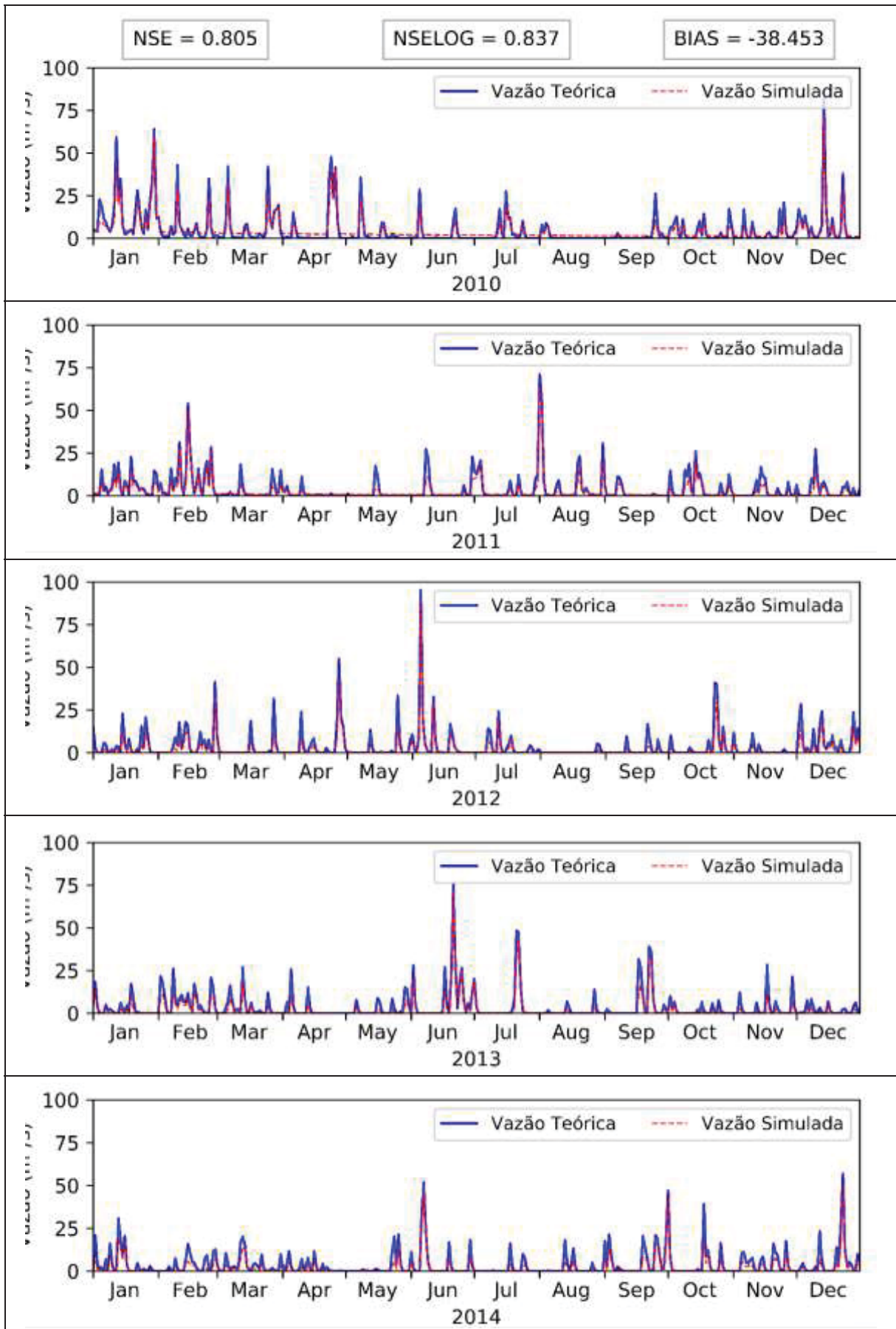
Na terceira linha, a Tabela 7.3 nos traz o teste IA1, que é correspondente ao IA3, mas aplicado a subacia 5, que não recebe a influência da entrada de nenhuma vazão afluente como a subacia 4. Comparando estes dois testes (IA1 e IA3) pode-se atribuir que a variação encontrada entre os valores de NSE, de 11%, pode estar associada a quanto da vazão no exutório da subacia 4 é representado pelas vazões afluentes a esta subacia. Por esta razão, o método do recozimento simulado em um dos testes chegou a NSE 0,805 e no outro, apenas a 0,724.

Para obter valores mais próximos ao valor ideal esperado para um teste teórico (Igual a 1) seria preciso adotar uma configuração de parâmetros para o MRS que permita mais simulações com o MGB, mas o custo desta decisão é o aumento considerável do tempo para obtenção da resposta. Dos *violin plots* apresentados no Quadro 7.9, tem-se que mesmo obtendo um NSE de 0,912, o teste 2 chegou a parâmetros ótimos nem sempre iguais aos originais, assim como nos outros testes, IA1 e IA3. Isso se deve ao fato de o problema de calibração de um modelo hidrológico não possuir apenas uma solução ideal possível, ao menos matematicamente.

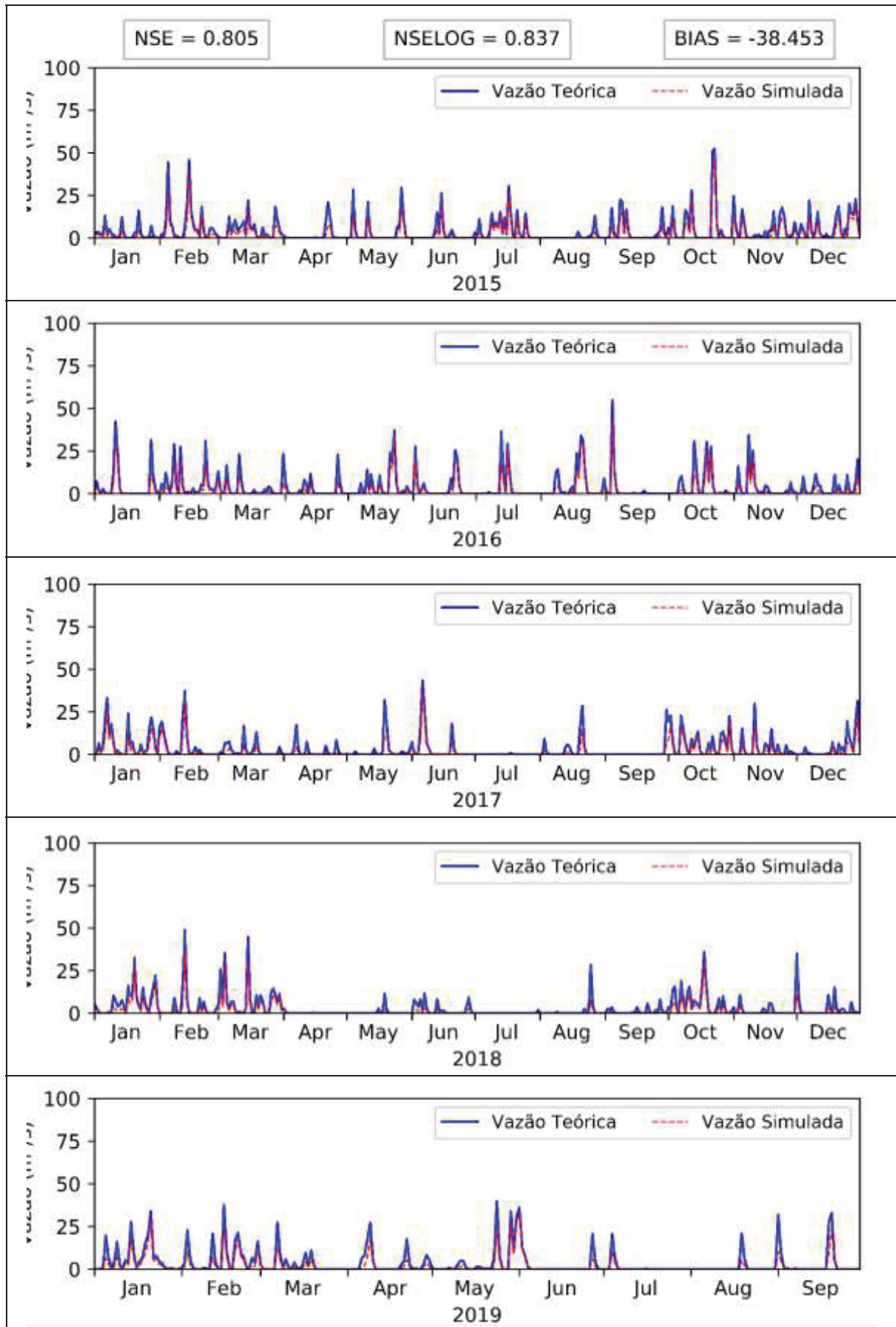


Quadro 7.9 – Violin plots para os parâmetros hidrológicos dos testes 2, IA1 e IA3

Por fim, os gráficos nos Quadros 7.10 e 7.11, apresentam os hidrogramas ótimo e teórico para o teste IA3, ainda não apresentados. Destes pode-se observar uma boa correspondência entre as duas séries, como ocorreu nos outros testes apresentados.



Quadro 7.10 - Hidrogramas de 2010 a 2014: Vazão teórica e ótima para o teste IA3



Quadro 7.11 - Hidrogramas de 2015 a 2019: Vazão teórica e ótima para o teste IA3

7.3 DISCUSSÃO E SÍNTESE DO CAPÍTULO

A calibração de qualquer modelo hidrológico exige dados em quantidade e qualidade apropriados. Entretanto a escala tanto temporal quanto espacial para obtenção destes dados *in situ* é um desafio que tem sido, cada vez mais, contornado com os avanços na obtenção de informações hidrológicas derivadas de produtos de sensoriamento remoto (Ha et al., 2018; Bastiaanssen et al., 2007; Melesse et al., 2016; Serrat-Capdevila, et al., 2014; Dembele et al., 2016; Nijzink et al., 2018). Há muito a ser explorado neste campo, e trabalhos semelhantes ao de Oliveira et al. (2017), em que o modelo hidrológico calibrado foi o MGB, mostram também resultados satisfatórios quando do uso dos dados obtidos por sensoriamento remoto para validação e calibração de um modelo hidrológico.

Outro aspecto que pode ser explorado é o de usar as informações de sensoriamento remoto para estudar processos específicos na bacia hidrográfica. Ehalt Macedo et. al. (2019), por exemplo, exploram o uso dos dados da missão GRACE para estudar a recessão na bacia do rio Mississipi. A recessão de uma bacia hidrográfica, em geral está associada a um parâmetro hidrológico comum a muitos modelos hidrológicos chuva-vazão: o coeficiente de recessão (Ferreira et. al., 2018).

Nesse sentido, Muhlenhoff, et. al. (2019) apresentam uma alternativa para a estimativa do coeficiente de recessão a partir dos dados de gravimetria disponibilizados pelos satélites da missão GRACE. Em Muhlenhoff, et. al. (2019), o conceito que permite a abordagem proposta é o de que a fase de estiagem do hidrograma pode ser aproximada por um modelo de reservatório linear simples. Este conceito é válido em bacias hidrográficas com pouca ação antrópica sobre o sistema de drenagem e em que os períodos de cheia e seca são bem definidos. Não havendo entrada de água no sistema no período de seca (pela não ocorrência de precipitação) infere-se que toda a variação de escoamento da bacia é decorrente do escoamento subterrâneo. Logo, os dados de armazenamento de água subterrânea, derivados dos dados de gravimetria, podem ter correlação com a fase de recessão dos hidrogramas observados.

A possibilidade de estimar um parâmetro hidrológico calibrável, abriu caminho para explorar a ideia de incorporar ao processo de calibração, alguma informação hidrológica, obtida diretamente ou estimada a partir de outras informações conhecidas sobre a área de estudo. A hipótese enunciada por este trabalho assume que esta informação, conhecida “a priori”, quando associada ao processo de calibração pode minimizar o custo computacional do mesmo. Isto pode se dar seja pela redução dos graus de liberdade do problema de otimização, seja pelo direcionamento do processo de calibração para os parâmetros mais sensíveis do modelo. O primeiro caso ocorrerá, por exemplo, quando da determinação “a

priori” de um parâmetro hidrológico calibrável como o coeficiente de recessão. O segundo caso, potencialmente torna mais assertivo o caminhar do algoritmo de otimização.

Portanto, testou ambos os casos a fim de verificar a hipótese, através da comparação entre os resultados da calibração do MGB através do MRS em cenários teóricos (todas as condicionantes do modelo são conhecidas). Validada a aplicabilidade do MGB a bacias hidrográficas como a do Passaúna, pelo método tradicional de calibração (tentativa e erro) e, o MRS como alternativa a calibração automática de um modelo hidrológico a etapa seguinte foi a de definição da informação hidrológica “a priori” a ser incorporada ao processo automático de calibração.

Para a bacia hidrográfica do rio Passaúna há uma dificuldade de compatibilizar a escala de informações advindas do sensoriamento remoto à escala da bacia. Nessa área de estudo a estimativa do valor de um parâmetro hidrológico a partir de dados de sensoriamento remoto, como proposto por Muhlenhoff, et. al. (2019) para o coeficiente de recessão, seria um desafio adicional ao trabalho aqui proposto. Entretanto, dos dados tipicamente necessários a implementação do modelo hidrológico é possível extrair alguma informação que possa ser associada ao algoritmo de calibração, como por exemplo, critérios de importância amostral para os parâmetros hidrológicos.

O critério de importância amostral neste trabalho foi definido por uma análise de frequências simples, que permitiu ordenar os parâmetros do modelo hidrológico de forma a conhecer aqueles que tem maior influência sobre o hidrograma final. Duas dimensões foram combinadas para definir o peso atribuído a cada parâmetro. A análise de sensibilidade sobre os parâmetros calibráveis do MGB, permitiu identificar aquele mais sensível. Esse parâmetro recebeu pesos conforme à unidade de resposta hidrológica que representava. Para a HRU (unidade de cálculo da geração de escoamento no MGB) com maior área na subárea de calibração, mais sensível o parâmetro seria quanto ao hidrograma final simulado pelo MGB.

Uma vez definida essa importância amostral dos parâmetros pode ser considerada a informação “a priori” necessária para testar a hipótese do trabalho. Em casos para os quais alguma classe de HRU não esteja presente na subárea de calibração, o critério de importância amostral já seria suficiente para restringir os graus de liberdade do problema de otimização, como ocorre para a subárea de calibração número 5 do estudo de caso deste trabalho.

A HRU correspondente a Área Semi-Impermeável (ASI) não existe na área associada a bacia do rio Cachoeirinha (Subárea 5); portanto, os parâmetros associados a ela não precisam ser calibrados. Outra subárea de calibração utilizada neste trabalho foi a de número 4, que se caracteriza como uma subárea incremental, ou seja, que recebe afluições de áreas de drenagem a montante. Para essas regiões, além da importância amostral como informação “a priori”, os próprios hidrogramas afluentes podem ser considerados informações “a priori”.

Os resultados demonstraram que, por si, a simples a inserção do critério de importância amostral orientando o algoritmo do MRS a privilegiar as perturbações nos valores dos parâmetros mais sensíveis do MGB, teve pouco impacto em termos de tempo computacional. Uma fração importante do tempo gasto durante o processo de otimização é decorrente das simulações do modelo hidrológico. A fração de tempo gasto pelo algoritmo de otimização do MRS com e sem o critério de importância amostral, foi o mesmo. Para a função objetivo, diferentemente, os resultados sugerem que a configuração de parâmetros do MRS adotada não esgotou a possibilidade de melhora do valor de *NSE*.

Do teste IA1 para o teste IA2 (Item 7.1), os parâmetros do MRS abriram a possibilidade de testar até 20 mil conjuntos solução a mais para os parâmetros do MGB. Em IA1 o universo de conjuntos solução a serem testados pode variar de 15 mil (mínimo) a 30 mil (máximo). Em IA2 este universo é de 40 mil (mínimo) a 50 mil (máximo). No teste IA1 o conjunto ótimo foi encontrado entre, aproximadamente 21 mil outros conjuntos testados, indicando um equilíbrio entre os critérios de parada utilizados pelo método ao longo do teste. No teste IA2, aproximadamente 48,5 mil conjuntos solução foram testados, de um máximo de 50 mil. Adicionalmente, o teste IA2, em relação ao teste IA1, alcançou um valor de *NSE* mais próximo ao máximo já encontrado para a subacia quando da aplicação do MRS sem o critério de importância amostral, para o qual os parâmetros do MRS foram calibrados e verificados.

Nesse caso, conclui-se que a associação da importância amostral como informação “a priori” junto ao MRS provoca uma variação relativa da ordem de 10% sobre o valor ótimo de *NSE*. Essa diferença pode ser reduzida adequando para a nova configuração de abordagem do problema (MRS associado a uma informação “a priori”) parâmetros do método de otimização que garantam uma varredura mais eficaz do espaço multidimensional de soluções matematicamente possíveis.

Quando uma segunda informação “a priori” é associada ao processo, observamos o mesmo comportamento relativo para os valores de *NSE*. Também há uma variação relativa de cerca de 10% entre os valores de *NSE* obtidos nos testes IA1 (subacia 5) e IA3 (subacia 4). Nos testes o MRS associado ao critério de importância amostral foi aplicado com os mesmos parâmetros a ambas as subacias. Enquanto o Teste IA1 traz os resultados obtidos para uma subacia de cabeceira (Subacia 5), sem interferências de montante, o Teste IA3 traz os resultados da otimização para uma subacia que recebe afluições de outras duas áreas de drenagem (Subacia 4). Os hidrogramas de entrada não se alteram ao longo do processo de otimização, pois são gerados pelo MGB para as áreas afluentes sempre com os mesmos valores atribuídos aos parâmetros do modelo, que é determinístico.

Esses resultados reforçam que a associação de uma informação “a priori” ao processo de calibração automático de um modelo hidrológico, não só é possível como, a depender da

natureza desta informação e da correta configuração dos parâmetros do método de otimização utilizado, potencialmente colaboram para que o processo de calibração ocorra de forma mais assertiva. Portanto, a contribuição deste trabalho está nas inúmeras possibilidades abertas pelas evidências apontadas nos testes teóricos sobre a abordagem proposta. Destaca-se, também pela flexibilidade que permite a abordagem proposta para o processo de calibração, a utilização do método de recozimento simulado aplicado a otimização de modelos hidrológicos como alternativa eficaz e próxima da realidade física.

8 CONCLUSÃO

O sistema, bacia hidrográfica, onde ocorre a transformação chuva-vazão é complexo e pode ser representado a partir de diferentes objetivos, privilegiando para cada caso, os processos considerados mais importantes para esta transformação. Existem, portanto, uma grande variedade de modelos hidrológicos com diferentes equacionamentos matemáticos, conforme a aplicabilidade pensada para cada modelo. Cada modelo hidrológico tem o seu conjunto próprio de parâmetros a serem determinados, embora, existam parâmetros comuns a grande parte dos modelos hidrológicos.

Dos mais simples aos mais complexos, os modelos hidrológicos são ferramentas poderosas para auxiliar na tomada de decisão em diversos problemas relacionados a gestão de recursos hídricos, desde que tenham passado pelo processo de calibração. Nesse processo, modelos distribuídos, por menos parâmetros que tenham podem gerar problemas de otimização com inúmeros graus de liberdade, a depender da área da bacia hidrográfica e de sua representação espacial. Reduzir ao menos um grau de liberdade nesse processo, pela inserção de qualquer informação hidrológica que possa ser estimada ou determinada “a priori”, ao menos para conduzir de forma assertiva o processo automático, como demonstram os resultados deste trabalho, é uma abordagem a ser mais bem explorada.

O avanço na capacidade de processamento computacional não só tem viabilizado estas novas fontes de informações hidrológicas, como permitido o desenvolvimento de técnicas de otimização e modelos hidrológicos sofisticados. Nesse contexto a presente tese se destaca, uma vez que parte da análise de sensibilidade dos parâmetros hidrológicos para estabelecer um critério de importância amostral que conduz o algoritmo de otimização a um espaço de soluções mais próximo da realidade física da bacia hidrográfica que se pretende representar.

O método de otimização por recozimento simulado foi escolhido dada a sua flexibilidade e facilidade de implementação computacional, características que permitiram associar facilmente a este o critério de importância amostral. Os resultados obtidos confirmam ainda a robustez e capacidade de convergência do método aplicado a um problema de hidrologia. Os resultados indicam ainda que o MRS responde bem a associação da informação “a priori” para a obtenção dos valores dos parâmetros hidrológicos, seja essa informação um hidrograma afluente ou o critério de importância amostral. Portanto, o plano experimental adotado cumpriu o objetivo de testar a hipótese enunciada e pode-se afirmar que a associação da informação “a priori” ao processo de calibração de um modelo hidrológico é capaz de conduzir tal processo de forma mais assertiva e muito ainda se pode melhorar nesta abordagem.

8.1 ESTUDOS FUTUROS

Para a continuidade deste estudo o uso de dados de sensoriamento remoto para a estimativa de parâmetros hidrológicos calibráveis é uma via a ser considerada para a definição de informações “a priori”. Outra, inicialmente explorada neste trabalho, é a importância amostral como critério para direcionar as perturbações, necessárias a cada iteração ao longo do processo de otimização pelo MRS, aos parâmetros mais sensíveis do MGB. Este critério pode ser incorporado ao algoritmo de diferentes maneiras que podem tornar esta solução mais eficiente.

Da forma como testamos neste trabalho, ainda é necessário que se aumente a quantidade dos conjuntos solução testados, durante o processo de calibração, para se obter resultados semelhantes aos obtidos pela aplicação do MRS sem esse critério, em termos de *NSE*. Nesse sentido, é interessante investigar alternativas que promovam uma melhor varredura da superfície multidimensional de soluções possíveis, sem acarretarem custos excessivos em termos de tempo de processamento computacional para obtenção do resultado. O método de Hipercubo-latino é uma dessas alternativas (citar trabalhos aqui como referência).

O ciclo hidrológico em todas as suas fases, como todo processo natural, é bastante complexo. É intrínseco a presença de incertezas nos resultados da implementação e uso de qualquer modelo hidrológico para o apoio a tomada de decisão. Parte destas incertezas estão associadas a capacidade de calibração dos parâmetros hidrológicos. Nesse sentido, aprofundar a análise de incerteza sobre os resultados aqui apresentados, obtidos a partir de diferentes abordagens de calibração dos parâmetros é essencial para consolidação da melhor abordagem.

Atualmente, muito se tem avançado na compreensão do impacto da ação antrópica sobre o ambiente, alterando o ciclo hidrológico natural, intensificando mudanças climáticas e potencializando a ocorrência de eventos extremos. Modelos hidrológicos cada vez mais se tornam decisivos para a gestão desses eventos. Portanto, é essencial que esforços sejam direcionados a melhor exploração das novas fontes de informação hidrológica a fim de minimizar as incertezas associadas a calibração de modelos hidrológicos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K. C.; SCHULIN, R.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization. **Advances in water resources**, v. 24, n. 8, p. 827-841, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00018-5).

ABDELMONEIM, Hadir; SOLIMAN, Mohamed Reda; MOGHAZY, Hossam Mohamed. Evaluation of TRMM 3B42V7 and CHIRPS satellite precipitation products as an input for hydrological model over Eastern Nile Basin. **Earth Systems and Environment**, v. 4, p. 685-698, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00185-3>

ABEBE, Nibret A.; OGDEN, Fred L.; PRADHAN, Nawa R. Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall–runoff model: Implications for parameter estimation. **Journal of Hydrology**, v. 389, n. 3-4, p. 301-310, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.007>.

ALI, Shoaib et al. Improving the resolution of GRACE data for spatio-temporal groundwater storage assessment. **Remote Sensing**, v. 13, n. 17, p. 3513, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13173513>.

ANDÍA, H. M. N. **Análise operacional durante transiente em usinas hidrelétricas com escoamento em canal e câmara de carga**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

ÁVILA, L.; SILVEIRA, R.; CAMPOS, A.; ROGISKI, N.; GONÇALVES, J.; SCORTEGAGNA, A.; FREITA, C.; AVER, C.; FAN, F. M.. Comparative evaluation of five hydrological models in a large-scale and tropical river basin. **Water**, v. 14, n. 19, p. 3013, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14193013>.

BASTIAANSEN, Wim GM; HARSHADEEP, Nagaraja Rao. Managing scarce water resources in Asia: The nature of the problem and can remote sensing help?. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, p. 269-284, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10795-005-5188-y>.

BEVEN, K. How far can we go in distributed hydrological modelling?. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2001. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-5-1-2001>.

BEVEN, K.; BINLEY, A.. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. **Hydrological processes**, v. 6, n. 3, p. 279-298, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305>.

BEVEN, Keith. A manifesto for the equifinality thesis. **Journal of hydrology**, v. 320, n. 1-2, p. 18-36, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.007>.

BEVEN, Keith. How to make advances in hydrological modelling. **Hydrology Research**, v. 50, n. 6, p. 1481-1494, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2019.134>.

BEVEN, Keith. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. John Wiley & Sons, 2011.

BOGNING, Sakaros et al. Hydro-climatology study of the Ogooué River basin using hydrological modeling and satellite altimetry. **Advances in Space Research**, v. 68, n. 2, p. 672-690, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.045>.

BRUNETTI, Giuseppe; PORTI, Michele; PIRO, Patrizia. Multi-level numerical and statistical analysis of the hygrothermal behavior of a non-vegetated green roof in a mediterranean climate. **Applied Energy**, v. 221, p. 204-219, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.190>.

BUARQUE, Diogo Costa; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, Walter. Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização em modelos hidrológicos. **Simpósio Sul-Sudeste de Recursos Hídricos**, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Rio de Janeiro (RJ), 2018.

BUENO, V.; SOEIRO, F. J. O Recozimento Simulado como Ferramenta de Otimização Global. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 15, n. 3, p. 8, 1997.

CAETANO, J. M. et al. Trends in hydrological models integrated with geographical information systems by scientometric. **Comunicata Scientiae**, v. 7, n. 3, p. 406-414, 2016. DOI: <https://doi.org/10.14295/cs.v7i3.1197>.

CHLUMSKY, Robert et al. Simultaneous calibration of hydrologic model structure and parameters using a blended model. **Water Resources Research**, v. 57, n. 5, p. e2020WR029229, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020WR029229>.

COLLISCHONN, W.. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS). Porto Alegre/RS, 2001. Acesso em: 2002. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10183/2500> >.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. da.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.. Simulação hidrológica de grandes bacias. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS. Vol. 6, n. 1 (jan./mar. 2001), p. 95-118, 2001. DOI: <http://doi.org/10.21168/rbrh.v6n1.p95-118>.

COLLISCHONN, W.; GAMA, C.H.A.; SIQUEIRA, V.A; PAIVA, R.C.D.; FLEISCHMANN, A.S. **Manual de Referência Teórica do MGB**. Grupo de Hidrologia de Grande Escala (HGE), Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Porto Alegre, RS. 2020.

DEMBÉLÉ, Moctar; ZWART, Sander J. Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso, West Africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 17, p. 3995-4014, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1207258>.

DOOGE, James. **Linear theory of hydrologic systems**. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1973.

DUAN, Q. Y.; GUPTA, Vijai K.; SOROOSHIAN, Soroosh. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. **Journal of optimization theory and applications**, v. 76, p. 501-521, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00939380>.

DUAN, Qingyun; SOROOSHIAN, Soroosh; GUPTA, Vijai. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water resources research**, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1029/91WR02985>.

DUAN, Weili et al. Recent advancement in remote sensing technology for hydrology analysis and water resources management. **Remote sensing**, v. 13, n. 6, p. 1097, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13061097>.

EHALT MACEDO, H., BEIGHLEY, R. E., DAVID, C. H., & REAGER, J. T.. Using GRACE in a streamflow recession to determine drainable water storage in the Mississippi River basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 8, p. 3269-3277, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-23-3269-2019>.

ELMAHDY, Samy; ALI, Tarig; MOHAMED, Mohamed. Hydrological modeling of Ar Rub Al Khali, Arabian Peninsula: a modified remote sensing approach based on the weight of hydrological evidence. **Geocarto International**, v. 37, n. 21, p. 6251-6271, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1936211>.

FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Brasília/DF. Novembro de 2015. Acesso em: 2022. Disponível em: < <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=8392> >.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.. Integração do modelo MGB-IPH com sistema de informação geográfica. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS. Vol. 19, n. 1 (jan./mar. 2014), p. 243-254, 2014. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p243-254>.

FANG, Yuanhao et al. Estimating the Routing Parameter of the Xin'anjiang Hydrological Model Based on Remote Sensing Data and Machine Learning. **Remote Sensing**, v. 14, n. 18, p. 4609, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14184609>.

FEMEENA, Pandara Valappil et al. Reconceptualizing hru threshold definition in the soil and water assessment tool. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 58, n. 4, p. 508-516, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13000>.

FERREIRA, D. M. **Simulação hidrodinâmica e de qualidade da água em rios: impacto para os instrumentos de gestão de recursos hídricos**. 2015. 126p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

FERREIRA, David Bispo; MÜHLENHOFF, Ana Paula; FERNANDES, Cristóvão Vicente Scapulatempo. Modelos de poluição difusa: desafios, estratégias e impacto para a gestão de recursos hídricos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 15, n. 2018, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21168/rega.v15e10>.

FREITAS, Camila. **Uso de técnicas de classificação de dados na operação de sistemas de reservatórios de usinas hidrelétricas durante cheias**. 2016. 256 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

GOMIS-CEBOLLA, José et al. Evaluation of Sentinel-1, SMAP and SMOS surface soil moisture products for distributed eco-hydrological modelling in Mediterranean forest basins. **Journal of Hydrology**, v. 608, p. 127569, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127569>.

GUPTA, K. et al. A critical review of hydrological models. In: Proceedings of the 20th International Conference on Hydraulics, Water Resources and River Engineering, Roorkee, India. 2015. p. 17-19.

HA, Lan Thanh et al. Calibration of spatially distributed hydrological processes and model parameters in SWAT using remote sensing data and an auto-calibration procedure: A case study in a Vietnamese river basin. **Water**, v. 10, n. 2, p. 212, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10020212>.

HILL, Mary C.; TIEDEMAN, Claire R. **Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty**. John Wiley & Sons, 2006.

HORTON, P.; SCHAEFLI, B.; KAUZLARIC, M.. Why do we have so many different hydrological models? A review based on the case of Switzerland. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 9, n. 1, p. e1574, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/wat2.1574>.

HOSTACHE, Renaud et al. Assimilation of Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) brightness temperature into a large-scale distributed conceptual hydrological model to improve soil moisture predictions: the Murray–Darling basin in Australia as a test case. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 10, p. 4793-4812, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-24-4793-2020>.

HUANG, Qi et al. Daily continuous river discharge estimation for ungauged basins using a hydrologic model calibrated by satellite altimetry: Implications for the SWOT mission. **Water Resources Research**, v. 56, n. 7, p. e2020WR027309, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020WR027309>.

INES, Amor VM; DROOGERS, Peter. Inverse modelling in estimating soil hydraulic functions: a Genetic Algorithm approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6, n. 1, p. 49-66, 2002. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-6-49-2002>.

JARVIS, N.; LARSBO, M.; LEWAN, E.; GARRE, S.. Improved descriptions of soil hydrology in crop models: The elephant in the room?. **Agricultural Systems**, v. 202, p. 103477, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103477>.

KALCIC, M. M.; CHAUBEY, I.; FRANKENBERGER, J.. Defining Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic response units (HRUs) by field boundaries. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 69-80, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150803.951>.

KAN, Guangyuan et al. Computer aided numerical methods for hydrological model calibration: an overview and recent development. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 26, p. 35-59, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-017-9224-5>.

KAUFFELDT, A., WETTERHALL, F., PAPPENBERGER, F., SALAMON, P., & THIELEN, J. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. **Environmental Modelling & Software**, v. 75, p. 68-76, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.09.009>.

KAVISKI, E. **Notas de Aula da disciplina MNUM-7123 - Tópicos Especiais em Mecânica Computacional III – Algoritmos e Modelos Computacionais em Go**. Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (PPGMNE). Universidade Federal do Paraná. Disciplina ministrada no Terceiro Trimestre de 2022. Notas de Aula. 53p. 2022.

KAVISKI, E.; CUNHA, L. M. da.; GARCIA, C. S.; LAMBROS, D.. Parametrização de curvas de intensidade de precipitação pelo método de reconhecimento simulado. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. São Paulo/SP. Novembro de 2007. Acesso em: 2020. Disponível em: < <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=9948> >.

KAVISKI, Eloy; PRADO, A. L. do.; CUMIN, Liliana Madalena Gramani. Solução de sistemas de equações não-lineares pelo método do recozimento simulado. In: **XXXI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional**. 2008. p. 375.

KIRCHNER, James W. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. **Water resources research**, v. 42, n. 3, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005WR004362>.

KNAPIK, H. G. **Reflexões sobre monitoramento, modelagem e calibração da gestão de recursos hídricos: estudo de caso da qualidade da água da Bacia do Alto Iguaçu**. 2009. 197p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

KNAPIK, H. G. **Organic matter characterization and modeling in polluted rivers for water quality planning and management**. 2014. 281 f. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

KUWAJIMA, Julio Issao et al. Climate change, water-related disasters, flood control and rainfall forecasting: a case study of the São Francisco River, Brazil. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 488, n. 1, p. 259-276, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP488-2018-128>.

LACTEC (INSTITUTOS LACTEC). **Relatório Técnico nº 10 – Calibração hidrodinâmica dos trechos principais das bacias hidrográficas do Grupo 2: Modelo Unidimensional**. Implantação de sistema para acoplamento de modelos e informação telemétrica visando a otimização da operação de reservatórios em tempo real, com foco no controle de cheias. Relatório Técnico: Curitiba. 2015a.

LACTEC (INSTITUTOS LACTEC). **Relatório Técnico nº 11 – Calibração hidrodinâmica dos trechos principais das bacias hidrográficas do Grupo 2: Modelo bidimensional**. Implantação de sistema para acoplamento de modelos e informação telemétrica visando a otimização da operação de reservatórios em tempo real, com foco no controle de cheias. Relatório Técnico: Curitiba. 2015b.

MACHADO, Enéas Souza. **Utilização da metaheurística do recozimento simulado na otimização do planejamento de sistemas regionais de tratamento de efluentes e sua expansão da capacidade**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.3.2009.tde-14092009-142616>.

MACHADO, Enéas Souza; DO AMARAL PORTO, Monica Ferreira; KAVISKI, Eloy. Otimização do Planejamento de Sistemas Regionais de Tratamento de Efluentes Através de Simulação Monte Carlo e da Metaheurística do Recozimento Simulado. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 29-38, 2012. DOI: <http://doi.org/10.21168/rbrh.v17n3.p29-38>.

MAPBIOMAS (Projeto MapBiomass) – **Coleção 3.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. Acessado em Março de 2019 através do link: < <https://brasil.mapbiomas.org/> >.

MEDEIROS, M. S.; FLEISCHMANN, A. S.; OLIVEIRA, A. M.; CORATI, B. K.; FAN, F. M.; MARTINBIANCHO, G. K.; JARDIM, P. F.; CORREA, S. W.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W.. **Manual de exemplo de aplicação do modelo MGB 2018 utilizando o IPH-Hydro Tools**. 2019. 85p. Disponível em: < <https://www.ufrgs.br/hge/wp->

content/uploads/2019/03/manual_MGB_2018_QGIS_FINAL_02.pdf >. Acesso em: Fevereiro de 2023.

MELESSE, Assefa M. et al. Remote sensing sensors and applications in environmental resources mapping and modelling. **Sensors**, v. 7, n. 12, p. 3209-3241, 2007. DOI: <https://doi.org/10.3390/s7123209>.

MERKURYEVA, Galina et al. Advanced river flood monitoring, modelling and forecasting. **Journal of computational science**, v. 10, p. 77-85, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2014.10.004>.

MERZ, Ralf et al. More Complex is Not Necessarily Better in Large-Scale Hydrological Modeling: A Model Complexity Experiment across the Contiguous United States. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 103, n. 8, p. E1947-E1967, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0284.1>.

METROPOLIS, Nicholas et al. Equation of state calculations by fast computing machines. **The journal of chemical physics**, v. 21, n. 6, p. 1087-1092, 1953. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1699114>.

MOGES, E.; DEMISSIE, Y.; LARSEN, L.; YASSIN, F.. Review: Sources of hydrological model uncertainties and advances in their analysis. **Water**. 13 (1), 28. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13010028>.

MONTICELLI, A. J.; ROMERO, R.; ASADA, E. N.. Fundamentals of simulated annealing. In: LEE, Kwang Y.; EL-SHARKAWI, Mohamed A. (Ed.). **Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. p. 123-146. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470225868.ch7>.

MOREAU, P., VIAUD, V., PARNAUDEAU, V., SALMON-MONVIOLA, J., DURAND, P.. An approach for global sensitivity analysis of a complex environmental model to spatial inputs and parameters: A case study of an agro-hydrological model. **Environmental modelling & software**, v. 47, p. 74-87, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.04.006>.

MUHLENHOFF, A. P.. **Análise comparativa de esquemas de discretização 1D e 1D/2D para a avaliação de curvas de inundação em rio com escassez de dados**. 2016. 178p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

MUHLENHOFF, A. P.; PAIVA, R. C. D. de.; BLENINGER, T. B.; FERNANDES, C. V. S.. Estimativa do coeficiente de recessão a partir de dados de gravimetria: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Passaúna-PR. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (23.: Foz do Iguaçu, 2019)**. Anais [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRH, 2019. Acesso em: janeiro de 2023. Disponível em: < <https://anais.abrhydro.org.br/job.php?Job=5836> >.

NARVÁEZ, G.; PAIVA, R. C. D.. Hydraulic zoom: a hydrological/hydrodynamic downscaling framework from regional to local scale. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**. 2022. p. EGU22-389. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-389>.

NIJZINK, R. C. et al. Constraining conceptual hydrological models with multiple information sources. **Water Resources Research**, v. 54, n. 10, p. 8332-8362, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1029/2017WR021895>.

OLIVEIRA, A. M. FLEISCHMANN, A.; PAIVA, R. C. D. de; COLLISCHONN, W. Como acertar pelos motivos certos? modelagem hidrológica-hidrodinâmica e sensoriamento remoto

visando. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017)**. Anais [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRH, 2017. Acesso em: janeiro de 2023. Disponível em: < <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=2145> >.

OLIVEIRA, A. M.. **Contribuição de observações de sensoriamento remoto para a validação de modelos hidrológicos**. 2018. 80p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2018. Acesso em 2018. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10183/179910> >.

OLIVEIRA, A. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D. On the contribution of remote sensing-based calibration to model multiple hydrological variables. **ESS Open Archive**. October 08, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/essoar.10502160.3>.

OLIVEIRA, A. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D. On the contribution of remote sensing-based calibration to model hydrological and hydraulic processes in tropical regions. **Journal of Hydrology**, v. 597, p. 126184, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126184>.

PAIVA, R. C. D. de.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; DE GONCALVES, L. G. G.; CALMANT, S.; GETIRANA, A.; SANTOS DA SILVA, J.. Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 7, p. 2929-2946, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-17-2929-2013>.

PAN, L.; WU, L.. A hybrid global optimization method for inverse estimation of hydraulic parameters: Annealing-simplex method. **Water Resources Research**, v. 34, n. 9, p. 2261-2269, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1029/98WR01672>.

PEEL, M. C.; BLÖSCHL, G.. Hydrological modelling in a changing world. **Progress in Physical Geography**, v. 35, n. 2, p. 249-261, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133311402550>.

PEEL, M. C.; MCMAHON, T. A. Historical development of rainfall-runoff modeling. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 7, n. 5, p. e1471, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/wat2.1471>.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V.. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. **Journal of hydrology**, v. 279, n. 1-4, p. 275-289, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7).

PONTES, P. R.M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S., PAIVA, R. C. D. de; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P. F., SORRIBAS, M. V.; COLLISCHONN, W. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open-source GIS. **Environmental Modelling & Software**, v. 94, p. 1-20, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>.

PRESS, W.H., FLANNERY, B.P., TEUKOLSKY, S.A., VETTERLING, W.T. **Numerical Recipes in Pascal**. Cambridge, 1992.

RAJIB, A., KIM, I. L., GOLDEN, H. E., LANE, C. R., KUMAR, S. V., YU, Z., & JEYALAKSHMI, S.. Watershed modeling with remotely sensed big data: MODIS leaf area index improves hydrology and water quality predictions. **Remote sensing**, v. 12, n. 13, p. 2148, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12132148>.

SALVADORE, E.; BRONDERS, J.; BATELAAN, O.. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. **Journal of hydrology**, v. 529, p. 62-81, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.028>.

SERRAT-CAPDEVILA, A.; VALDES, J. B.; STAKHIV, E. Z.. Water management applications for satellite precipitation products: Synthesis and recommendations. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 50, n. 2, p. 509-525, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/jawr.12140>.

SERUR, A. B.. Performance evaluation of hydrological model in simulating streamflow and water balance analysis: spatiotemporal calibration and validation in the upper Awash sub-basin in Ethiopia. **Sustainable Water Resources Management**, v. 9, n. 2, p. 48, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00827-0>.

SHARMA, D.; BISWAL, B.. Recession curve power-law exponent estimation: is there a perfect approach?. **Hydrological Sciences Journal**, v. 67, n. 8, p. 1228-1237, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2070022>.

SHARMA, D.; PATNAIK, S.; BISWAL, B.; REAGER, J. T.. Characterization of basin-scale dynamic storage–discharge relationship using daily GRACE based storage anomaly data. **Geosciences**, v. 10, n. 10, p. 404, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences10100404>.

SILVA FILHO, L. V. da. **Qualidade e percepção Ambiental: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Passaúna**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Curitiba, 2010.

SIQUEIRA, V. A.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L.; PONTES, P. R. M.; PARIS, A.; CALMANT, S.; COLLISCHONN, W.. Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 9, p. 4815-4842, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>.

SIVAPALAN, M.. Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology. **Hydrological processes**, v. 17, n. 15, p. 3163-3170, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.5155>.

SIVAPALAN, M.; TAKEUCHI, K.; FRANKS, S. W.; GUPTA, V. K.; KARAMBIRI, H.; LAKSHMI, V.; LIANG, X.; McDONNELL, J. J.; MEDIONDO, E. M.; O'CONNELL, P. E.; OKI, T.; POMEROY, J. W.; SCHERTZER, D.; UHLENBROOK, S.; ZEHE, E. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. **Hydrological sciences journal**, v. 48, n. 6, p. 857-880, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1623/hysj.48.6.857.51421>.

SOLOMATINE, D. P.; WAGENER, T. Hydrological modelling (Chapter 2.16). In: WILDERER, P. (Ed.). **Treatise on Water Science**. The Science of Hydrology, Volume 2. Elsevier, 2011. p.435-457. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00044-0>.

SUDERHSA. **Modelo Digital de Elevação (DEM) – Bacia do Alto Iguaçu**. Curitiba, 2000. Acesso em 2019. Disponível em: < <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Mapas-e-Dados-Espaciais> >.

SYME, W. J.; PINNELL, M. G.; WICKS, J. M. Modelling flood inundation of urban areas in the UK using 2D/1D hydraulic models. In: **Proceedings of the 8th National Conference on Hydraulics in Water Engineering**. The Institution of Engineers, Australia, July, 2004.

Acesso em 2022. Disponível em: <

https://downloads.tuflow.com/_archive/Publications/Modelling%20Flood%20Inundation%20of%20Urban%20Areas%20in%20the%20UK,%20Syme,%202004.pdf >.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Revisada e Ampliada. Impresso. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro). Porto Alegre: ABRHidro e Editora UFRGS, 2005.

UYSAL, G.; MONTERO, R-A.; SCHWANENBERG, D.; SENSOY, A.. Real-Time Reservoir Operation by Tree-Based Model Predictive Control Including Forecast Uncertainty. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**. 2020. p. 896. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-896>.

VERWEY, A. **Computational hydraulics**. Lecture Notes. Version 2007.

VRUGT, J. A.; DIKS, C. G.; GUPTA, H. V.; BOUTEN, W.; VERSTRATEN, J. M.. Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strengths of global optimization and data assimilation. **Water resources research**, v. 41, n. 1, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004WR003059>.

VRUGT, J. A.; GUPTA, H. V.; BOUTEN, W.; SOROOSHIAN, S.A.. Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. **Water resources research**, v. 39, n. 8, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002WR001642>.

WHEATER, H. S.; MATHIAS, S. A.; LI, X. (Ed.). **Groundwater modelling in arid and semi-arid areas**. Cambridge University Press, 2010. Acesso em 2022. Disponível em: < https://assets.cambridge.org/9780521111294/excerpt/9780521111294_excerpt.pdf >.

ANEXO I – ARTIGO SBRH 2019

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE RECESSÃO A PARTIR DE DADOS DE GRAVIMETRIA – ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PASSAÚNA – PR

*Ana Paula Muhlenhoff¹ ; Rodrigo Caduro Dias de Paiva² & Tobias Bernward Bleninger³ &
Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes⁴*

RESUMO – A modelagem hidrológica é uma ferramenta importante a tomada de decisões em termos de gestão do recurso hídrico disponível. O uso das informações obtidas a partir de sensoriamento remoto tem ganhado espaço nos trabalhos de calibração e validação de modelos hidrológicos, especialmente em regiões sem monitoramento ‘in situ’. A alternativa ainda pouco explorada é a da obtenção ‘a priori’ de parâmetros comuns a diversos modelos hidrológicos, muitas vezes características físicas da bacia, mas sem possibilidade de monitoramento, a partir dos dados de sensoriamento remoto. Neste trabalho, é apresentada uma primeira investigação sobre esta possibilidade para o coeficiente de recessão do aquífero, parâmetro comum aos modelos. A estimativa é feita a partir dos dados de armazenamento total da bacia, derivados dos dados coletados pelos satélites da missão GRACE. Os resultados obtidos desta primeira aplicação do método ainda precisam ser verificados. Outras áreas de estudo devem ser utilizadas e a comparação com resultados do parâmetro calibrado por modelos hidrológicos já implementados é uma alternativa para a futura validação da metodologia.

ABSTRACT – Hydrological modeling is an important tool towards making decisions related to the management of available water resources. Information obtained through remote sensing has been more used in researches of hydrologic models calibration and validation. This is true especially in regions without ‘in situ’ monitoring. A less explored alternative is obtaining ‘a priori’ common parameters to many hydrologic models. Frequently they are physic basin characteristics, but without monitoring possibility by remote sensing data. On this work, it is presented a first investigation about this possibility for the aquifer recession coefficient, which is a common parameter in models. The estimative is calculated through total basin storage data from numbers collected by satellites of GRACE mission. The obtained results on this first method application still need to be verified. Other areas of study must be applied. Also, the comparison with the calibrated parameter results through hydrologic model already implemented is an alternative for future validation of the methodology.

Palavras-Chave – GRACE; Recessão, Modelagem.

¹ Doutoranda no PPGERHA, Universidade Federal do Paraná. Email: anapaula.dhs@ufpr.br

² Professor no IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. E-mail: rodrigo.paiva@ufrgs.br

³ Professor no PPGERHA, Universidade Federal do Paraná. E-mail: tobias.bleninger@gmail.com

⁴ Professor no PPGERHA, Universidade Federal do Paraná. E-mail: cris.dhs@ufpr.br

INTRODUÇÃO

Cada vez mais os dados obtidos através das tecnologias desenvolvidas para o sensoriamento remoto tem sido aplicados a problemas de hidrologia (Ha et al., 2018; Bastiaanssen *et al.*, 2007; Melesse *et al.*, 2016; Serrat-Capdevila, *et al.*, 2014; Dembele *et al.*, 2016). O uso simultâneo e combinado de produtos de sensoriamento remoto para a calibração de modelos hidrológicos não somente com base nas observações de vazão ainda é um tema que não foi esgotado em suas possibilidades (Oliveira et al., 2017; Nijzink et al., 2018).

Nijzink *et al.* (2018) mostraram que a construção de modelos hidrológicos com múltiplas fontes de dados simultaneamente pode ser uma alternativa satisfatória para determinar os parâmetros do modelo utilizado numa situação em que faltem dados *in situ* para a calibração. Por resultados, obtiveram reduções significativas no espaço amostral de possibilidades de valores aos parâmetros quando da utilização conjunta de todas as informações selecionadas para este estudo, de forma especial as informações adicionais inseridas pelos dados de armazenamento total de água, TWS, disponibilizados pelo GRACE.

Os parâmetros dos modelos de base física representam uma característica da bacia que uma vez não sendo possível ser medida é determinada no processo de calibração. Desta forma, além de utilizar os dados obtidos por sensoriamento remoto no processo de validação e calibração de modelos hidrológicos (Nijzink *et al.*, 2018), trabalhos como os de Macedo *et al.* (2019) usaram os dados do GRACE também para estudar a recessão na bacia do rio Mississipi. Este trabalho (Macedo *et al.*, 2019), abre a possibilidade para a partir dos dados de sensoriamento remoto, criar alternativas para a determinação dos parâmetros dos modelos hidrológicos ‘*a priori*’.

Neste caso, o problema da calibração do modelo passaria a ter tantos graus de liberdade a menos quantos parâmetros fossem possíveis determinar a partir das observações e informações que fossem possíveis derivar das medidas feitas pelos sensores remotos. A partir desta hipótese, o presente trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia para a determinação *a priori* do coeficiente de recessão de uma bacia hidrográfica a partir de uma correlação com os dados de armazenamento total de água (TWS) disponibilizados como produtos da missão GRACE.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta consiste basicamente: (i) no estabelecimento da relação entre os valores de TWS (Total Water Storage) medidos pelo GRACE e o coeficiente de recessão da bacia hidrográfica; (ii) na comparação dos valores obtidos na etapa anterior com aqueles obtidos do procedimento usual de calibração de um modelo hidrológico. O modelo hidrológico escolhido para implementação na bacia hidrográfica do Rio Passaúna, escolhida como área de estudo, é o Modelo de Grandes Bacias – MGB, descrito a seguir, bem como cada uma das etapas para elaboração do trabalho.

Área de Estudo

O rio Passaúna é afluente pela margem direita do Alto rio Iguaçu e drena uma área de cerca de 217km². Localizada no primeiro planalto paranaense, com altitude média de 900 m, tem sua nascente no município de Almirante Tamandaré, e percorre cerca de 57 km definindo o limite territorial entre Curitiba e os municípios de Campo Magro e Campo Largo. Em sua porção baixa corta parte do município de Araucária (Figura 1). O reservatório existente na bacia hidrográfica configura-se como manancial de abastecimento de água para Curitiba e Região Metropolitana e é de responsabilidade da Companhia de Saneamento do Estado do Paraná – SANEPAR (Silva Filho, 2010).

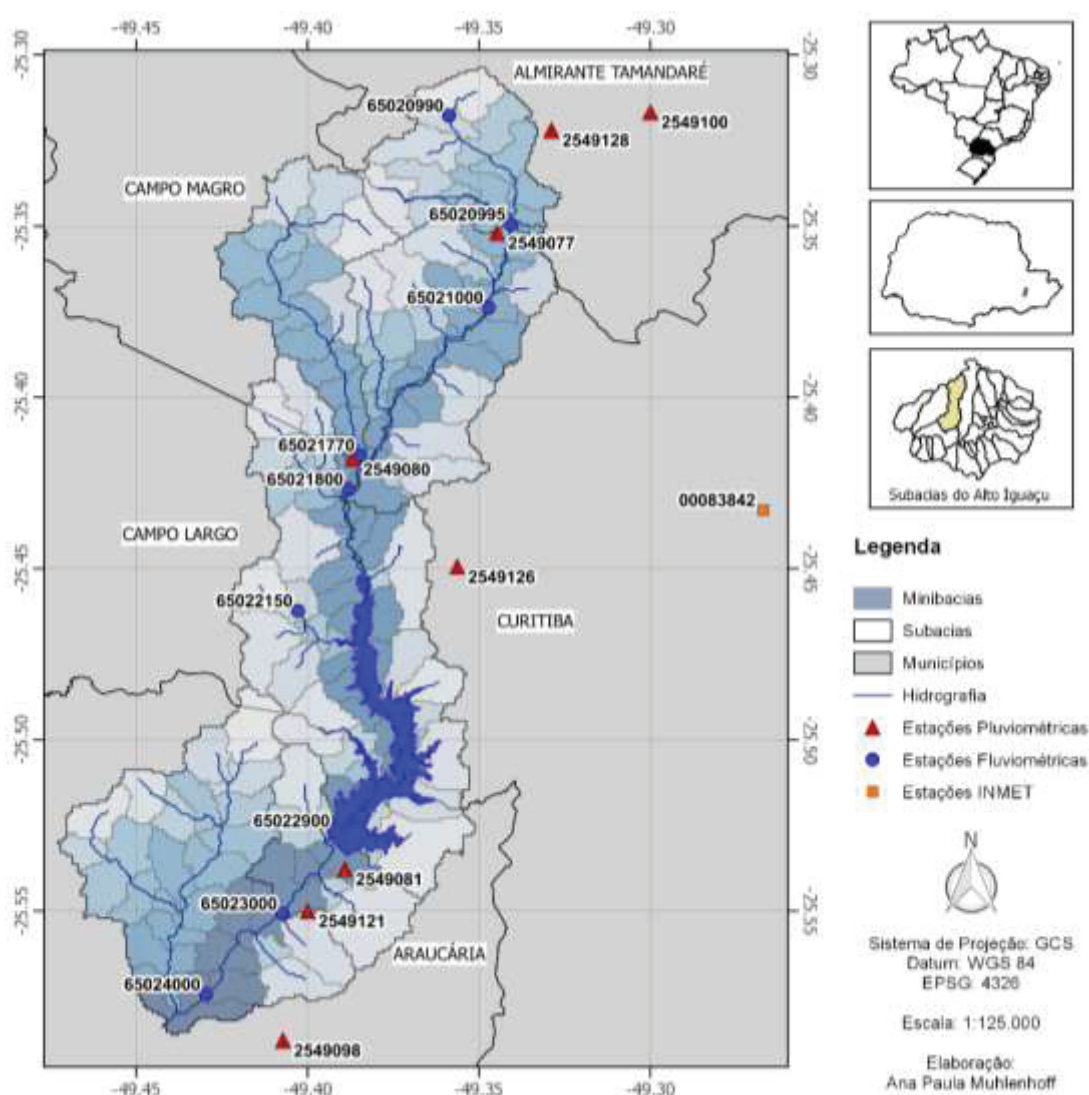


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Passaúna na região metropolitana de Curitiba

Missão GRACE e GRACE-FO (Gravity Recovery and Climate Experiment – Follow)

A missão *GRACE* foi lançada em março de 2002 pelas agências espaciais dos Estados Unidos da América (NASA) e Alemanha (DLR). A missão *GRACE-FO*, que deu continuidade à primeira, teve

início em 2018 (NASA, 2019). O objetivo principal da missão foi o de permitir a obtenção do campo gravitacional terrestre. É composta por dois satélites idênticos separados por uma distância de cerca de 220 km, numa mesma órbita polar de aproximadamente 500 km de altitude. A distância entre os dois satélites é continuamente monitorada por meio de medições de micro-ondas e com precisão de um micrômetro (WAHR *et al.*, 1998 *apud* Xavier, 2012). Os satélites sendo diferentemente atraídos pelo campo de gravidade da Terra, juntamente com medições das suas posições, permitem determinar mudanças bastante pequenas no campo de gravidade da Terra.

As variações de distância e a velocidade nestas variações correspondem aos dados brutos observados, os quais passam por etapas de processamento adicionais a fim de eliminar os efeitos não-gravitacionais (por exemplo, o efeito de marés e correntes marítimas). Desta forma, os efeitos resultantes se devem apenas às reais variações no campo gravitacional terrestre. As soluções para os dados do GRACE são calculadas para uma resolução espacial de 400 km, e distribuídas pelos centros de processamento: (i) *Center of Space Research (CRC)* da Universidade do Texas (EUA); (ii) *GeoForschungsZentrum (GFZ)* em Potsdam (Alemanha) e; (iii) *Jet Propulsion Laboratory (JPL/NASA)*. A medição das variações continentais dos volumes totais de água (*Total Water Storages – TWS*) é um dos produtos disponibilizados por estes centros.

Conforme descrito em WAHR *et al.* (1998) *apud* Xavier (2012) uma vez que possível remover dos dados brutos todos os efeitos não-gravitacionais (contaminação do sinal devido a deformações na crosta terrestre ocasionadas por terremotos, variabilidade das massas de água próximas ao mar, variações decorrentes da pressão atmosférica, marés, entre outros), o sinal restante será atribuído unicamente às mudanças nos estoques continentais de água e de neve. Desta forma, o uso desta informação (*TWS*) em termos de modelagem hidrológica está associada ao armazenamento de água nas bacias hidrográficas. Neste trabalho, foram utilizados os resultados de *TWS* disponibilizados pelo JPL/NASA.

Coefficiente de recessão

A taxa de produção do fluxo de base, que representa a porção da vazão de um rio mantida pela restituição de águas subterrâneas, é indicada por meio do coeficiente de recessão (k). Este coeficiente é uma característica da bacia hidrográfica e pode ser obtido pela análise do hidrograma observado nos períodos de seca, nos quais é possível assegurar que toda a vazão presente no rio é devido ao escoamento de base da bacia hidrográfica. Conforme cita Silva *et al.*, (2010), alguns dos métodos para a determinação do coeficiente de recessão são os métodos de Maillet ou Barnes (Dewandel *et al.*, 2002), Boussinesq (Dewandel *et al.*, 2002), Matching Strip (Snyder, 1935, Mello *et al.*, 1994, Tallaksen, 1995), Correlação (Langbein, 1938; Nathan & McMahon, 1990; Tallaksen, 1995; Smakhtin, 2001) e Drogue (Kresic, 1997).

A forte conexão entre o regime de recarga e descarga da água subterrânea e os demais componentes do fluxo hidrológico influencia diretamente na vazão dos cursos d'água (Silva et al., 2010). Neste sentido, e como uma característica física da bacia, é um dos mais comuns parâmetros encontrados em modelos hidrológicos na fase de geração e separação dos escoamentos. É, portanto, responsável por um dos graus de liberdade no processo de calibração dos modelos hidrológicos que o possuem como parâmetro para calibração. Neste trabalho a proposta é estimar este coeficiente a partir dos dados de armazenamento de água medidos de forma indireta pelo TWS, disponibilizado pelo GRACE e comparar com o coeficiente de recessão obtido a partir da análise do hidrograma para a mesma bacia em estudo.

Relação entre *TWS* e o coeficiente de recessão da bacia hidrográfica

Em bacias hidrográficas em que os períodos de cheia e seca são bem definidos e não há muitas influências de regularização por reservatórios no sistema de drenagem natural, a fase de estiagem do hidrograma pode ser aproximada por um modelo de reservatório linear simples, conforme descreve a Equação 1, em que: S representa o armazenamento da bacia hidrográfica [volume]; Q é a vazão de saída da bacia hidrográfica [volume/tempo] e; k é o coeficiente de recessão da bacia hidrográfica em unidades de tempo [tempo].

$$S = k \cdot Q \quad (1)$$

No período de estiagem, não havendo entradas de água no sistema por meio de precipitação, toda a variação do escoamento da bacia hidrográfica é em decorrência do escoamento subterrâneo, de tal forma que a equação do balanço hídrico simplificado pode ser escrita em termos da vazão de base (Q_b) e do armazenamento total da bacia (S), conforme apresenta a Equação 2.

$$\frac{dS}{dt} = -Q_b \quad (2)$$

Da Equação 1, tem-se uma relação que expressa o armazenamento da bacia hidrográfica (S) em função de sua vazão (Q). Substituindo a vazão (Q) expressa em função de (S) na Equação 2, esta pode ser reescrita como na Equação 3.

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S}{k} \quad (3)$$

Separando as variáveis na Equação 3 e aplicando a integração em ambos os lados da equação, a solução desta equação diferencial, organizada conforme a equação geral da reta, é dada pela Equação 4, em que: S_0 representa o armazenamento da bacia hidrográfica no início da recessão [volume].

$$\ln(S) = -\frac{\Delta t}{k} + \ln(S_0) \quad (4)$$

Os dados de armazenamento total de água medidos pelo GRACE não tem um referencial, são medições, que teriam, durante o período de recessão das bacias hidrográficas o mesmo comportamento

que a fase de recessão do hidrograma, que é toda referente ao escoamento de base, conforme descrito até aqui. Estabelece-se a hipótese de que os valores do armazenamento total medidos pelo GRACE (TWS) diferem de uma constante no tempo, adimensional, (C) dos valores de armazenamento registrados na bacia hidrográfica (S), tal como expressa a Equação 5.

$$S = TWS + C \quad (5)$$

Desta forma a Equação 4, pode ser reescrita, em termos de TWS , tal como expressa a Equação 6, em que: TWS_0 representa o armazenamento total de água registrado pelo GRACE no início da recessão [volume].

$$\ln(TWS + C) = -\frac{\Delta t}{k} + \ln(TWS_0 + C) \quad (6)$$

Estimativa da constante C

Para cada par de pontos que caracterizam a recessão, seja na série de vazões ou na série de totais de água armazenados, dada a primeira ocorrência, a segunda pode ser estimada conhecendo-se o decaimento por unidade de tempo e aproximando a função a uma função linear, conforme ilustra a Figura 2 e descreve a Equação 7

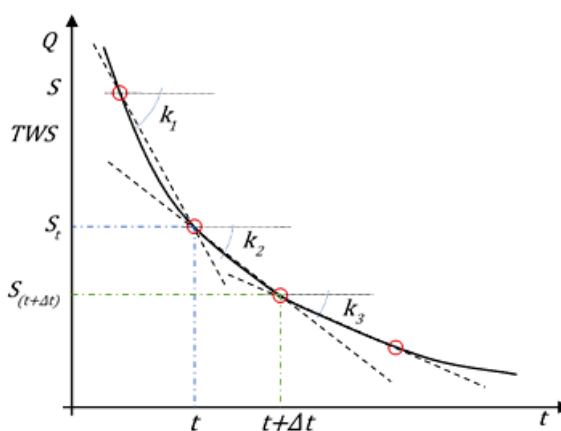


Figura 2 – Esquemática do procedimento proposto para determinação do coeficiente de decaimento e da constante C

$$S_{t+\Delta t} = S_t - \frac{\Delta t}{k} * S_t \quad (7)$$

que escrita em termos de TWS , é dada pela Equação 8.

$$\frac{TWS_{t+\Delta t} - TWS_t}{\Delta t} = -\frac{1}{k} * TWS_t - \frac{C}{k} \quad (8)$$

Definição das recessões

O início do período de recessão foi definido a partir de um limiar que tomou por base a permanência dos dados em questão, vazões médias diárias observadas (dados da estação de monitoramento fluviométrico da Agência Nacional de Águas) e armazenamento total na bacia (TWS). Foram definidos seis diferentes limiares, com valores de permanência superior a 70, 75, 80, 85, 90 e 95%, respectivamente, conforme apresentado esquematicamente pela Figura 3. Os valores registrados inferiores a este limiar e com o valor seguinte menor foram armazenados, par a par. Este procedimento foi implementado em um código Python.

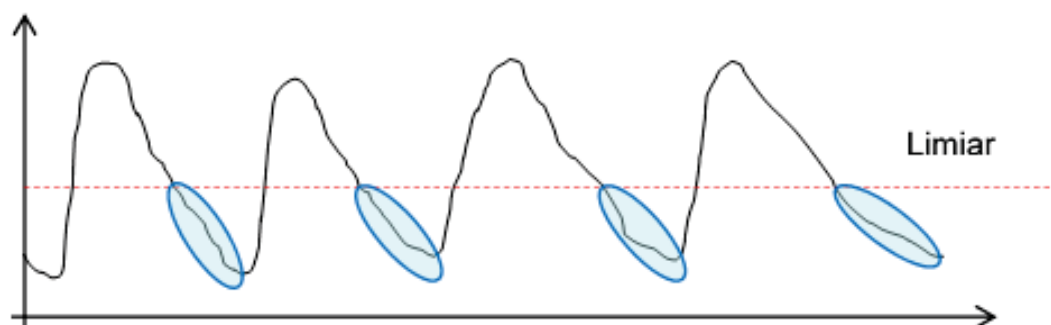


Figura 3 – Esquemática do procedimento para definição das recessões

Implementação e Calibração do Modelo de Grandes Bacias – MGB

O modelo de grandes bacias – MGB (Collischonn *et. al.*, 2007) é um modelo de transformação chuva-vazão determinístico, conceitual e distribuído em células desenvolvido para a aplicação a grandes áreas. Implementá-lo a uma bacia hidrográfica como a do rio Passaúna tornou-se um desafio adicional. O modelo foi implementado para a bacia de contribuição da estação fluviométrica de código 65021800 (Ponte da BR-277 – Campo Largo), localizada imediatamente a montante do reservatório do Passaúna, com área de drenagem não superior a 85 km². O período de calibração escolhido para esta primeira avaliação foi o anterior a construção e enchimento do reservatório, no período de 1985 a 1990.

Conforme é possível observar na Figura 1, a bacia foi discretizada em mini bacias (limiar de delimitação das minis bacias foi estabelecido em 2 km²) e os dados de chuva foram derivados para cada mini bacia a partir das estações 02549077 e 02549080, ambas localizadas na bacia hidrográfica em estudo. Os dados de clima foram retirados da estação Curitiba do INMET (00083842), localizada na bacia hidrográfica do rio Barigui. Nesta etapa de desenvolvimento do trabalho, os parâmetros considerados no MGB como parâmetros fixos, que não entram no processo de calibração, foram mantidos como sugeridos pelo manual do modelo (Medeiros *et. al.*, 2018). A calibração foi realizada por tentativa e erro, e numa próxima etapa deve ser refinada utilizando a alternativa automática disponibilizada para a calibração do MGB.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os primeiros resultados obtidos da implementação do modelo MGB para a bacia de contribuição do reservatório do rio Passaúna são apresentados nas Figuras 4 e 5, comparação dos hidrogramas e curva de permanência simulada e observada, respectivamente. O coeficiente de qualidade do ajuste obtido desta primeira calibração foi de 0,615, entretanto, o erro medido pelo BIAS ainda é de 13,7 %. Para este conjunto de parâmetros, e configuração atual do modelo implementado, o coeficiente de recessão do aquífero (C_b) não se mostrou como um dos parâmetros mais sensíveis para esta bacia, alterações no seu valor praticamente não produziam implicações nos resultados para o hidrograma e curva de permanência.

Nas próximas etapas do trabalho serão obtidos os valores do coeficiente de recessão da bacia a partir dos dados de *TWS* medidos pelo GRACE para esta mesma área, com base na proposta apresentada e estes valores serão comparados ao valor obtido para este parâmetro quando da sua obtenção da forma convencional, a partir da calibração do modelo MGB para a área em questão.

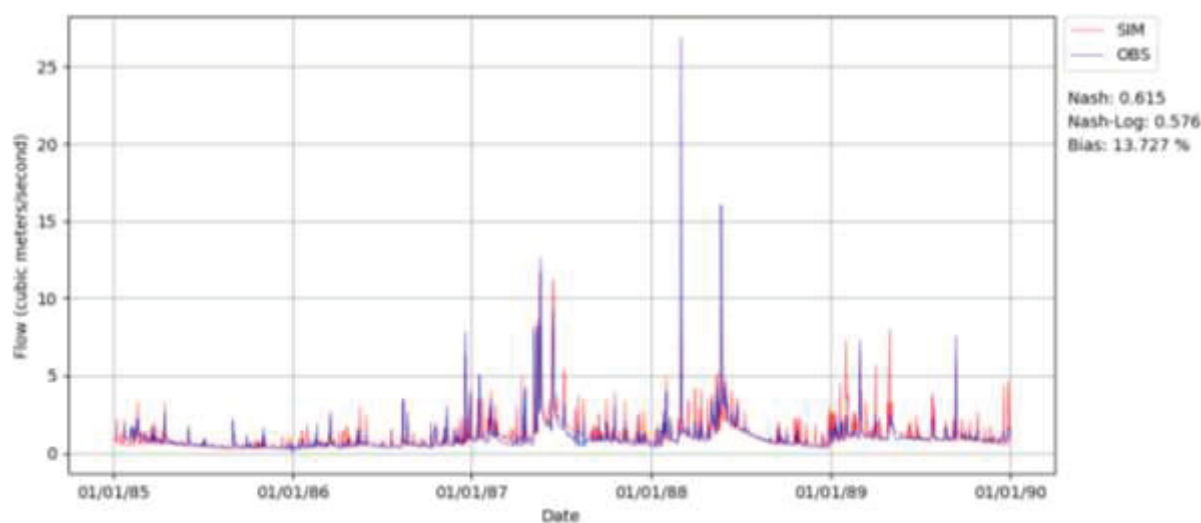


Figura 4 – Hidrogramas simulado e observado para a estação fluviométrica 6501800

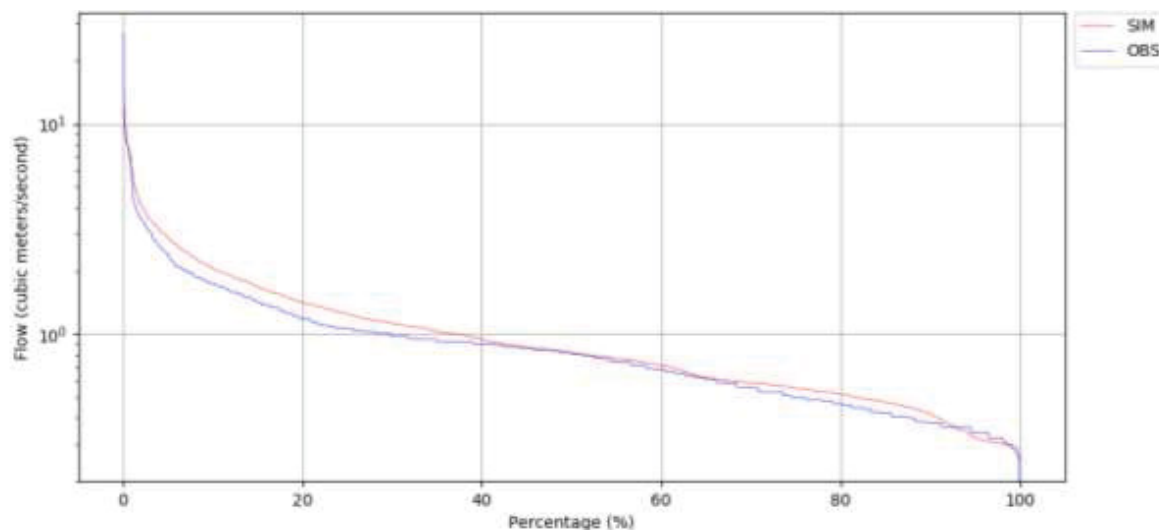


Figura 5 – Hidrogramas simulado e observado para a estação fluviométrica 6501800

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho dá início ao desenvolvimento de uma metodologia de estimativa do coeficiente de recessão do aquífero a partir dos dados de armazenamento total de água (TWS), disponibilizados do tratamento da informação coletada pelos satélites da missão GRACE. O conceito que permite esta abordagem é o de que em bacias hidrográficas em que os períodos de cheia e seca são bem definidos e não há muitas influências antrópicas no sistema de drenagem natural, a fase de estiagem do hidrograma pode ser aproximada por um modelo de reservatório linear simples. Não havendo entrada de água no sistema no período de seca (pela não ocorrência de precipitação) infere-se que toda a variação de escoamento da bacia é decorrente do escoamento subterrâneo. Portanto, os dados de TWS podem ter correlação com a fase de recessão dos hidrogramas observados.

A partir da análise das equações, é proposta uma regressão linear para a obtenção dos coeficientes de recessão a partir dos dados de TWS. A área de estudo escolhida inicialmente pode não ter sido a mais adequada em função da interferência de reservatórios na regularização das vazões e armazenamento da bacia hidrográfica. Entretanto, o assunto continua a ser estudado e os próximos passos seriam a aplicação deste método a outras áreas de estudo, atentando para as limitações inerentes ao método; a inspeção visual dos hidrogramas observados e estimativa do coeficiente de recessão a partir dos dados convencionais de vazão e estimativa do coeficiente de recessão a partir da análise da série disponível pelo GRACE para as mesmas regiões e; por fim, comparação com os resultados de modelos hidrológicos para os quais este coeficiente já tenha sido calibrado a fim de validar a metodologia de obtenção do mesmo a priori.

AGRADECIMENTOS

A CAPES pela bolsa de doutorado. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná. Ao Grupo de Hidrologia de Grande Escala do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

REFERÊNCIAS

- BASTIAANSEN, W.G.M.; HARSHADEEP, N.R. (2007) “*Managing scarce water resources in Asia: The nature of the problem and can remote sensing help?*” *Irrig. Drain. Syst.*, 19, 269–284.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. (2007) “*The MGB-IPH model for largescale rainfall-runoff modelling*”. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, p. 878-895.
- DEMBELE, M.; ZWART, J.Z. (2016) “*Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso*”. *West Africa. Int. J. Remote Sens.* V 37, 3995–4014.
- DOELL, PETRA et al. (2014) “*Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites*.” *Water Resources Research*, v. 50, n. 7, p. 5698-5720.
- HA, LAN THANH et al. (2018) “*Calibration of Spatially Distributed Hydrological Processes and Model Parameters in SWAT Using Remote Sensing Data and an Auto-Calibration Procedure: A Case Study in a Vietnamese River Basin*”. *Water*, v. 10, n. 2, p. 212.
- MACEDO, E. E.; BEIGHLEY, R. E.; DAVID, C. H.; REAGER, J. T. (2019) “*Using GRACE in a streamflow recession to determine drainage water storage in the Mississippi River Basin*”. *Journal Hydrology and Earth System Discussions*. EGU. 9p.
- MEDEIROS, M. S.; FLEISCHMANN, A. S.; OLIVEIRA, A. M.; CORATI, B.; FAN, F. M.; MARTINBIANCHO, G. K; JARDIM, P. F.; CORREA, S. W.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W. (2018) “*Manual de exemplo de aplicação do modelo MGB 2018 utilizando o IPH-Hydro Tools*”. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. IPH/UFRGS. 83p.
- MELESSE, A.M.; WENG, Q.; THENKABAIL, P.S.; SENAY, G.B. (2016) “*Remote Sensing Sensors and Applications in Environmental Resources Mapping and Modelling*”. *Sensors*, 2016, 7, 3209.
- NASA. (2019). GRACE-FO. “*Gravity Recovery and Climate Experiment – Follow*”. Disponível em: < <https://www.nasa.gov/missions/grace-fo> >. Acesso em: Abril de 2019.
- NEALE, C.M.U.; COSH, M.H. (2010). “*Remote Sensing and Hydrology*”; IAHS Red Book Series; Publ. 352; IAHS: Wallingford, UK; p. 482.
- NIJZINK, R. C. et al. (2018) “*Constraining conceptual hydrological models with multiple information sources*”. *Water Resources Research*, v. 54, n. 10, p. 8332-8362.
- OLIVEIRA, A. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. (2017) “*Como acertar pelos motivos certos? Integração de modelagem hidrológica-hidrocinâmica e sensoriamento remoto visando a calibração de modelos*.” *Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Florianópolis – SC.

SERRAT-CAPDEVILA, A.; VALDES, J.B.; STAKHIV, E.Z. (2014) “*Water Management Applications for Satellite precipitation products: Synthesis and Recommendations*”. J. Am. Water Resour. Assoc., 50, 509–525.

SILVA FILHO, L. V. da. (2010) “*Qualidade e percepção ambiental: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Passaúna*”. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Curitiba.

SILVA, R. F. G.; BACELLAR, L. DE A. P.; FERNANDES, K. N.. (2010) “*Estimativa de parâmetros de aquíferos através do coeficiente de recessão em áreas de embasamento cristalino de Minas Gerais*”. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 63(3): 465-471, jul./set. de 2010.

XAVIER, L. N. R. (2012) “*Modelagem Hidrológica com o Aporte de dados da Missão Espacial GRACE: Aplicação a Bacias Brasileiras*”. Tese de doutorado. Programa de Engenharia Civil. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.

ANEXO II – ESTUDO DE CASO: ESTIAGEM 2020

Estudos de cenários de armazenamento da bacia – Seca 2020

Tendo em vista a importância da bacia do rio Passaúna para o abastecimento de água da Grande Curitiba. Um dos exercícios para ganhar sensibilidade com os parâmetros do modelo hidrológico utilizado e com a própria bacia hidrográfica de contribuição a montante do reservatório, foram propostos cenários que avaliassem o impacto de medidas sobre o uso e ocupação do solo desta região da bacia hidrográfica sobre o armazenamento de água do sistema.

Estes cenários, descritos na Tabela 1, foram propostos com base em alterações “virtuais” do uso do solo. Por exemplo, campos em solos rasos correspondem a 1,5% da área da bacia hidrográfica do Alto Passaúna. Para o Cenário 1 (Tabela 1) os parâmetros desta região foram iguais aos valores que uma floresta em solo raso teria, de acordo com a calibração adotada. Desta forma, a resposta da bacia hidrográfica neste cenário representa a alteração, em termos de volume de água gerado pela bacia, caso as regiões de campos em solos rasos fossem recuperadas para regiões de floresta. Os outros cenários foram definidos segundo esta mesma lógica.

TABELA 1 – CENÁRIOS PARA ESTUDO DE ARMAZENAMENTO DA BACIA DO ALTO PASSAÚNA

Cenários	Alteração	Descrição
C0	Sem alteração	Cenário atual
C1	Área de floresta aumenta em torno de 1,5%	Campo em solo raso passa a ter os valores de parâmetros de floresta em solo raso
C2	Área de floresta aumenta perto de 5%	Agricultura em solo raso passa a ter os parâmetros de floresta em solo raso
C3	Área de floresta aumenta perto de 6,5%	Campo e Agricultura em solo raso passam a ter os parâmetros de floresta em solo raso
C4	Área de floresta aumenta em torno de 14%	Campo em solo profundo passa a ter os valores de parâmetros de floresta em solo profundo
C5	Área de floresta aumenta perto de 23%	Agricultura em solo profundo passa a ter os parâmetros de floresta em solo profundo
C6	Área de floresta aumenta perto de 37%	Campo e Agricultura em solo profundo passam a ter os parâmetros de floresta em solo profundo
C7	Área semi impermeável (urbana)	Área semi impermeável recebe os valores de parâmetro de floresta em solo raso (conservador)

A Figura 1 apresenta os hidrogramas simulados para todos os cenários. Conforme apresenta, para a configuração de parâmetros adotada para fazer estes testes, há pouca alteração dos hidrogramas gerados em cada um dos cenários propostos.

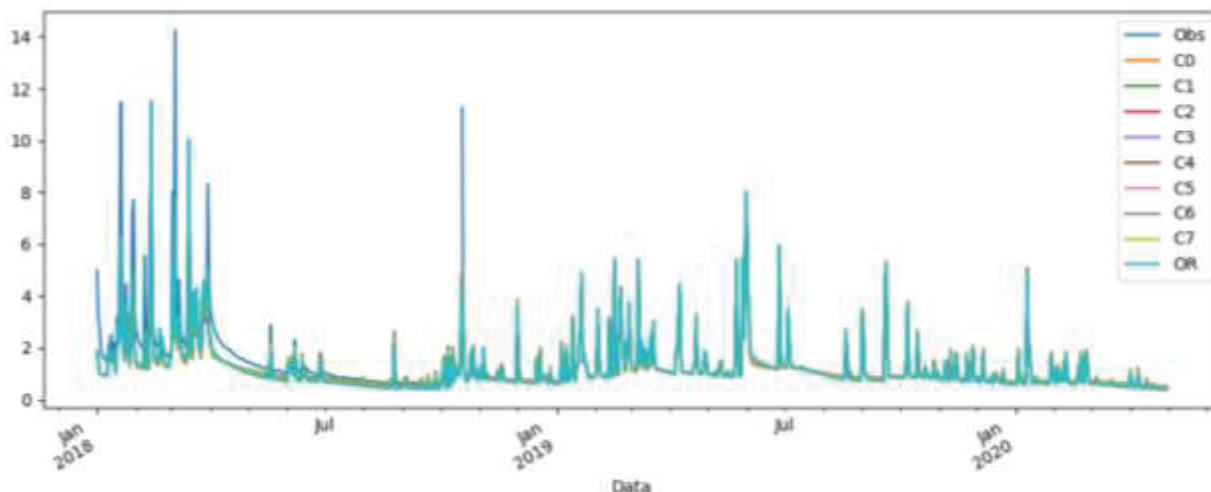


Figura 1 – Hidrogramas simulados para os cenários de alteração de cobertura do solo da bacia hidrográfica do Alto Passaúna

As Figuras 2 e 3, respectivamente, apresentam os valores médios mensais das vazões e volumes observados e o intervalo de valores simulados que é coberto pelos cenários considerados.

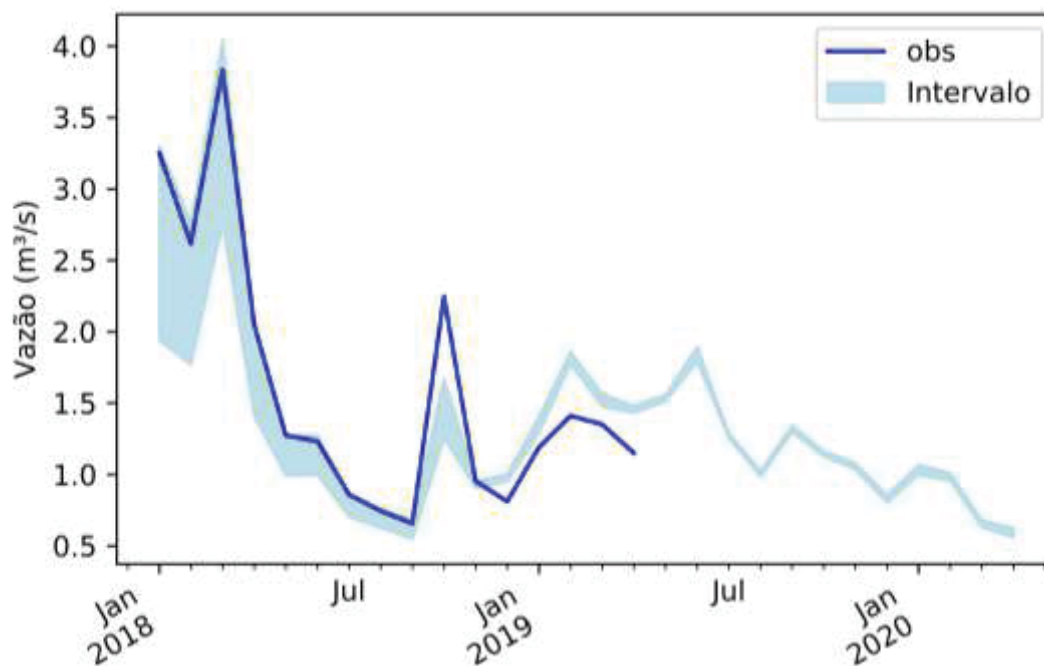


Figura 2 – Vazões médias observadas e intervalo de vazões médias simuladas

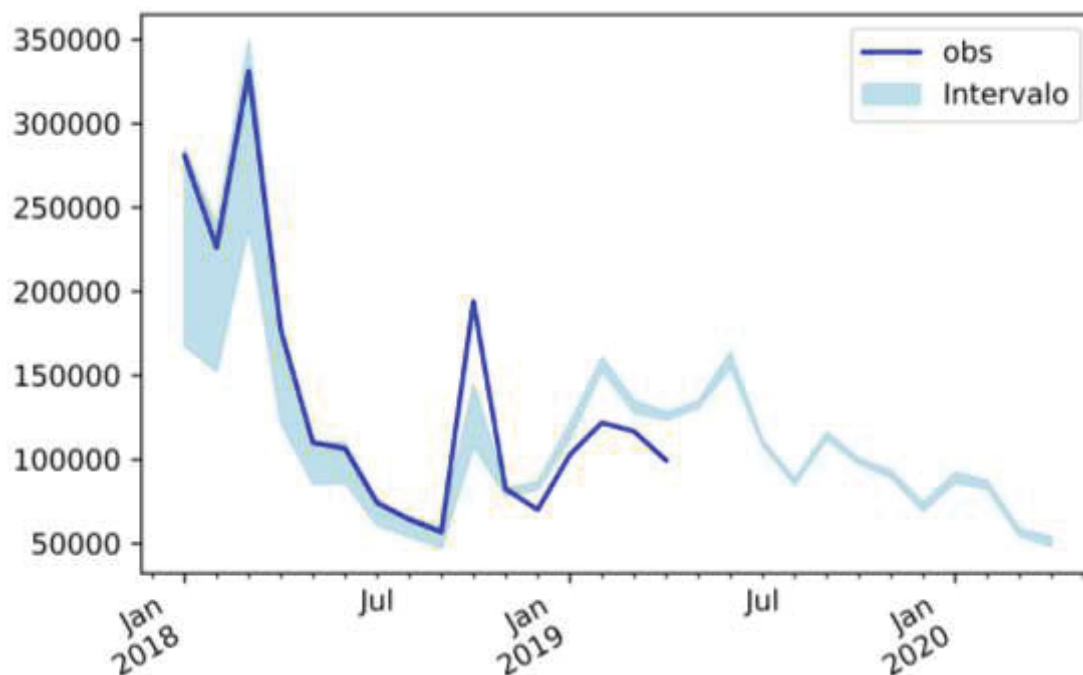


Figura 3 – Volumes médios observados e intervalo volumes médios simulados

A Tabela 2 apresenta os volumes acumulados totais para cada um dos cenários avaliados e o erro relativo ao volume acumulado observado. É possível observar que os cenários superestimam em cerca de 10-11% o volume total gerado pela bacia hidrográfica. O Cenário 6, para o qual a bacia voltaria a não possuir nenhuma área urbana, é o que mais próximo fica do cenário observado. O Cenário 4, em contrapartida, aquele que gera maior volume de escoamento.

TABELA 2 – VOLUMES TOTAIS ACUMULADOS PARA CADA CENÁRIO

Cenário	Volume Acumulado (hm ³)	Erro relativo
Observado (1985-2019)	1.531,776	-
C0 (simulação sem alteração - atual)	1.702,120	11.12%
C1 (recuperação de 1,5% de área)	1.701,194	11.06%
C2 (recuperação de 5% de área)	1.700.580	11.02%
C3 (recuperação de 6,5% de área)	1.699,654	10.96%
C4 (recuperação de 14% de área)	1.705,595	11.35%
C5 (recuperação de 23% de área)	1.697,364	10.81%
C6 (recuperação de 37% de área)	1.700,838	11.04%
C7 (retirada de toda área urbana)	1.690,040	10.33%

Cabe destacar que, conforme apresentado pela Figura 4, de 1990 a 2017 a bacia hidrográfica apresentou pouca alteração em termos de uso do solo. Na Figura 4, é possível

destacar que em 2017 aparece uma região de floresta plantada não observada nos anos anteriores apresentados. Observa-se também que a área urbana presente na bacia hidrográfica não se expandiu consideravelmente. Outras análises, em termos percentuais, desta evolução do uso do solo da bacia do rio Passaúna estão em desenvolvimento.

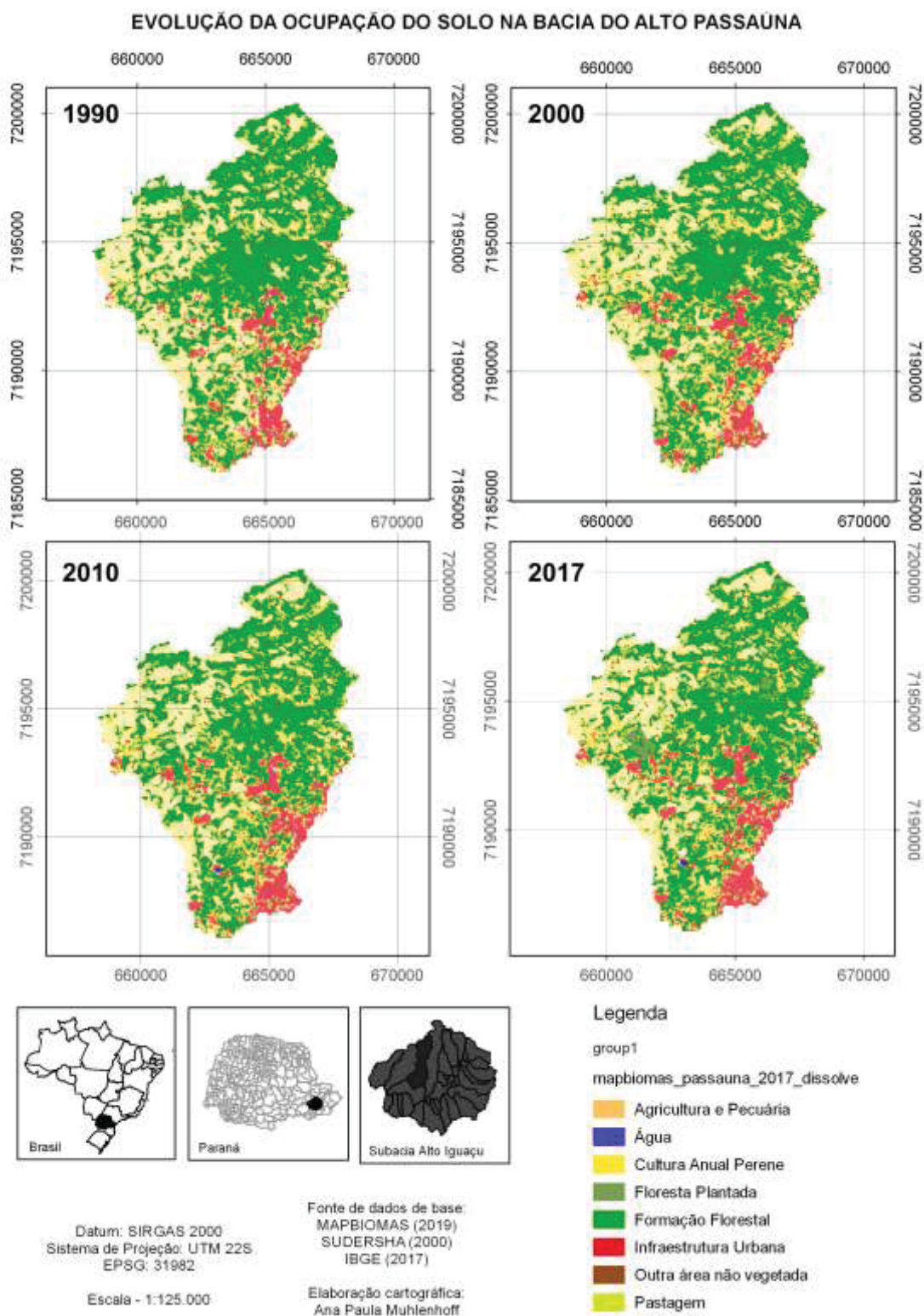


Figura 4.8 – Evolução do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Alto Passaúna

ANEXO III – ARTIGO SBRH 2021

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MÉTODO DE RECOZIMENTO SIMULADO APLICADO A CALIBRAÇÃO DE PARÂMETROS HIDROLÓGICOS

*Ana Paula Muhlenhoff⁵; Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes⁶; Eloy Kaviski³ & Tobias
Bernward Bleninger⁴*

Resumo – A etapa de calibração dos parâmetros de um modelo hidrológico é a responsável pelo sucesso da aplicação prática destes modelos como ferramentas para a tomada de decisões em gestão de recursos hídricos. Embora importante para assegurar o sentido físico dos valores determinados no processo, a calibração manual restringe a quantidade de conjuntos ótimos testados para a solução do problema. Nesse sentido processos automáticos baseados em algoritmos de otimização se apresentam como alternativas cada vez mais eficazes para auxiliar nesta etapa. O método de recozimento simulado (MRS) se baseia no processo de resfriamento de um material metálico para propor a busca por um ótimo global em qualquer problema de otimização. É um método simples, de baixo custo computacional e de rápida convergência que considera, a uma dada probabilidade, a possibilidade de aceite de soluções piores como forma de diminuir as chances do algoritmo ficar preso a ótimos locais. Deste modo, este trabalho propõe a utilização do MRS para a calibração dos parâmetros hidrológicos, como uma alternativa acessível de se implementar a qualquer modelo hidrológico. O MGB (Modelo de Grandes Bacias) já implementado a bacia hidrográfica do rio Passaúna foi escolhido como estudo de caso. Os resultados preliminares demonstram não apenas que o MGB apresentou resultados satisfatórios aplicado a uma área de cerca de 85km² como o MRS é eficaz para o processo de calibração dos parâmetros hidrológicos, alcançando índices de qualidade do ajuste superiores a 0,7 (Nash-Sutcliffe).

Palavras-Chave – MGB, Recozimento Simulado, Rio Passaúna

Abstract – The step of calibrating the parameters of a hydrological model is responsible for the successful practical application of these models as tools for decision-making in water resources management. At this stage, ensuring the physical sense of the values determined for the hydrological parameters is very important. The manual calibration process restricts the number of optimal sets tested to solve the problem. In this sense, automatic processes based on optimization algorithms are increasingly effective alternatives to assist in this step. The simulated annealing method (MRS) is based on the cooling process of a metallic material. From this physical process, the MRS proposes the search for a global optimum in any optimization problem. Simulated annealing is simple, with low computational cost and fast convergence method. The method considers the possibility of accepting worse solutions than the one previously found. This way, the chances of the algorithm getting stuck in great places are reduced. This work proposes that the MRS is an affordable alternative to implement any hydrological model for the calibration process. The case study chosen is MGB (Large Basin Model) implemented in the Passaúna River watershed. Preliminary results demonstrate that the MGB presented satisfactory results applied to an area of about 85km². Additionally, MRS is effective for the calibration process of hydrological parameters, reaching Nash-Sutcliffe indices above 0.7.

⁵) Doutoranda no PPGERHA/UFPR, anapaula.dhs@ufpr.br

⁶) Professor titular DHS/UFPR, Professor no PPGERHA/UFPR, cris.dhs@ufpr.br

³) Professor no DHS/UFPR e no PPGERHA/UFPR, eloy.dhs@ufpr.br

⁴) Professor no DEA/UFPR e no PPGERHA/UFPR, tobias.bleninger@gmail.com

Keywords – MGB, Simulated Annealing, River Passaúna

INTRODUÇÃO

O uso do modelo conceitualmente mais próximo à realidade física na representação matemática de cada processo hidrológico, insere incertezas aos resultados gerados na medida em que não só exige maior quantidade de dados de entrada, dos quais, geralmente, não se dispõe, como, em geral, associa ao modelo um número elevado de parâmetros a serem determinados. Portanto, assumir um maior grau de incerteza na representação matemática e escolher um modelo conceitualmente mais simplificado, com menor número de parâmetros e dados de entrada, pode conduzir a resultados semelhantes com menor custo computacional e de preparação de dados (Muhlenhoff, 2016). Outro aspecto igualmente importante, quando se pretende dispor dos recursos da modelagem matemática com o propósito de auxiliar o processo de tomada de decisão é a etapa de calibração. Esta etapa é a responsável pelo sucesso na aplicação prática desses modelos. Além de ser um problema matemático de diversas soluções igualmente possíveis, quando existem ao menos dois parâmetros a serem determinados, é função direta da disponibilidade e qualidade dos dados de entrada fornecidos aos modelos.

Contudo, dispor destas informações para a calibração, especialmente em rios muito extensos e com grandes áreas de drenagem, nem sempre é possível (Tucci, 2005). Dois são os processos para calibração: manual ou automático. A calibração manual de modelos hidrológicos ainda é muito importante para garantir a manutenção do significado físico dos parâmetros nos valores determinados neste processo, mas restringe o número de tentativas para encontrá-los. Em contrapartida, a rapidez na obtenção de resultados proporcionada pelo uso de ferramentas de calibração automática exige que se conheçam as funções-objetivo, o algoritmo de otimização, bem como o modelo a ser utilizado, pois algumas das soluções obtidas atendem somente às equações sem de fato representar a realidade física do sistema modelado. Do mesmo modo, diversas soluções que respeitam os aspectos físicos de cada parâmetro no modelo são determinadas não sendo possível distinguir com exatidão a melhor entre elas (Tucci, 2005).

Deste modo, entende-se, que se utilizada da maneira correta, as ferramentas de calibração automática representam um importante avanço na melhor representação do sistema hidrológico simulado, à medida que permitem a avaliação de uma maior quantidade de cenários. O desenvolvimento de ferramentas para calibração automática aliada a máxima exploração dos dados disponíveis para o estabelecimento de suas condições de contorno pode permitir a melhor compreensão das incertezas incorporadas ao hidrograma simulado. Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar o método de recozimento simulado (MRS) como uma alternativa eficiente e de simples implementação para a calibração de um modelo hidrológico (Sivakumar e Berndtsson, 2010). O MRS (Pontes *et al.*, 2017) foi aplicado para calibrar o modelo hidrológico MGB, implementado para a bacia hidrográfica do rio Passaúna.

MATERIAIS E MÉTODOS

A bacia hidrográfica do rio Passaúna é um dos importantes mananciais que abastecem a Grande Curitiba, deste modo foi escolhida como uma área de estudo para o desenvolvimento desta pesquisa. Neste item serão descritos os modelos e métodos usados na pesquisa: modelo de Grandes Bacias - MGB (Pontes et al., 2017); e o MRS (Pereira e Vasconcelos, 2013; Bueno e Soeiro; 1997).

Área de estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Passaúna

O rio Passaúna é afluente pela margem direita do Alto rio Iguaçu e drena uma área de cerca de 217km². Localizada no primeiro planalto paranaense, com altitude média de 900 m, tem sua nascente no município de Almirante Tamandaré, e percorre cerca de 57 km definindo o limite territorial entre Curitiba e os municípios de Campo Magro e Campo Largo. Em sua porção baixa corta parte do município de Araucária (Figura 1). O reservatório existente na bacia hidrográfica configura-se como manancial de abastecimento de água para Curitiba e Região Metropolitana e é de responsabilidade da Companhia de Saneamento do Estado do Paraná – SANEPAR (Silva Filho, 2010).

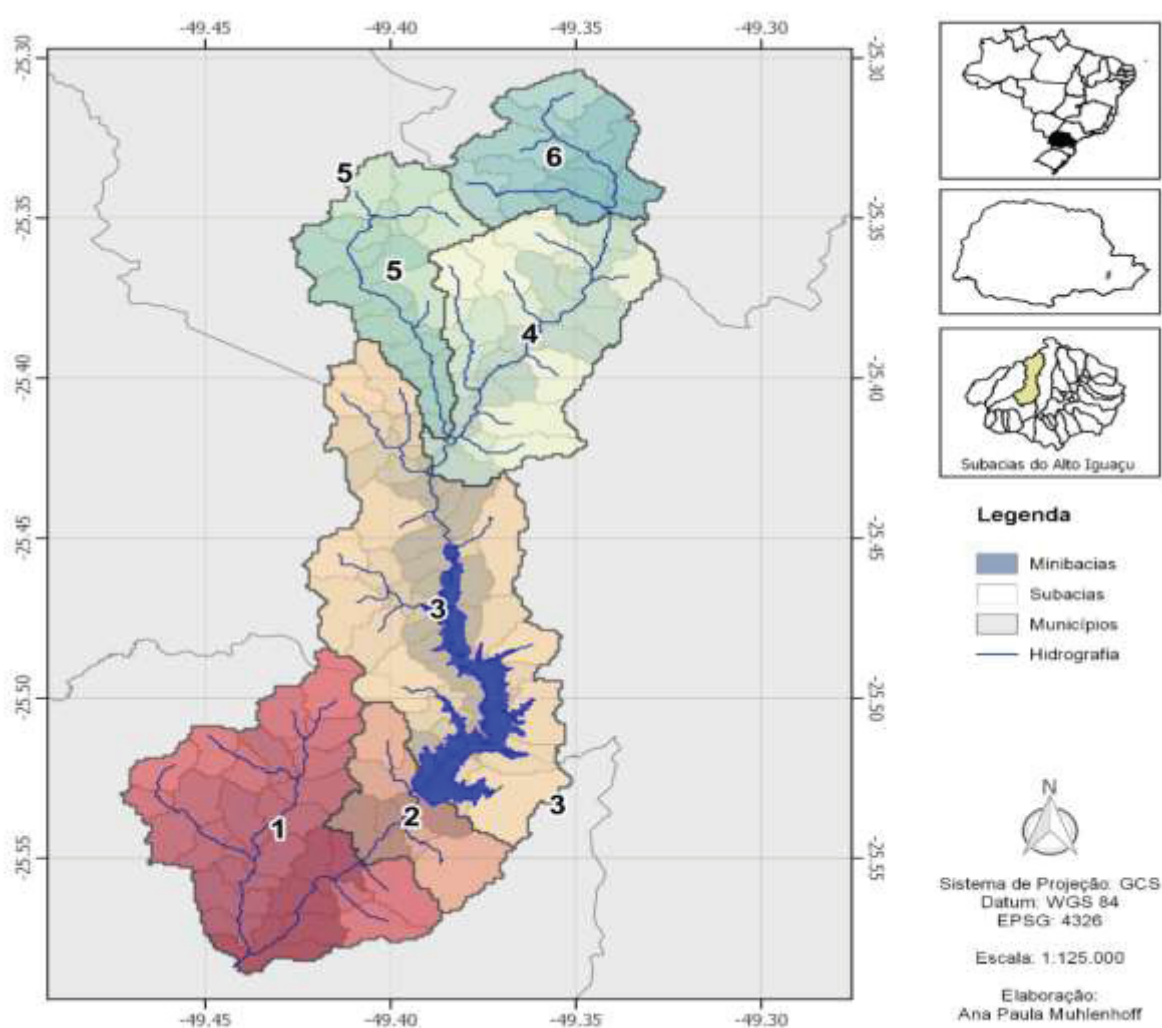


Figura 1 – Bacia hidrográfica do rio Passaúna com a indicação das subbacias de calibração no MGB

Modelo Hidrológico: Modelo de Grandes Bacias (MGB)

O modelo de grandes bacias – MGB (Collischonn et. al., 2007; Pontes et al., 2017) é um modelo de transformação chuva-vazão determinístico, conceitual e distribuído em células desenvolvido para a aplicação a grandes áreas. A Figura 2 apresenta um esquema geral da representação do sistema bacia hidrográfica feita pelo MGB.

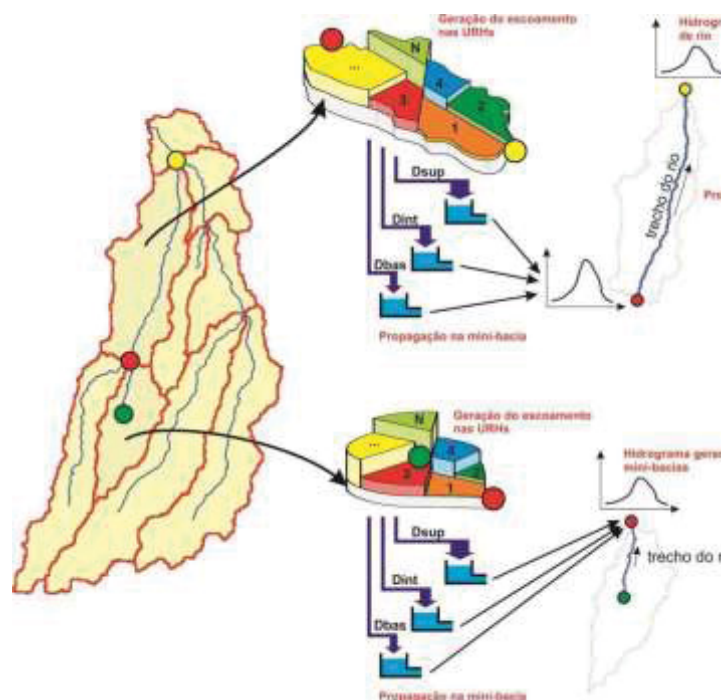


Figura 2 – Esquema conceitual do modelo de grandes bacias
Fonte: Adaptado de Pontes et al. (2017)

Tabela 1 – Parâmetros de solo do MGB
Fonte: Adaptado de Medeiros *et al.* (2018) e Oliveira (2017)

Parâmetro	Descrição	Valor padrão	Unidades
Wm	Capacidade de armazenamento de água no solo	50 - 1000	mm
b	Relação entre armazenamento e saturação	0.12 - 1.6	-
Kbas	Controle do escoamento subterrâneo	0.05 - 5.00	mm/dia
Kint	Controle do escoamento sub-subterrâneo	4.0 - 40.0	mm/dia
XL	Controle da curva de redução do reservatório sub-superficial	0.67	-
CAP	Controle da ascensão capilar	0.00	mm/dia
Wc	Fração de Wm abaixo da qual não há geração de escoamento	0.100	mm
CS	Correção do tempo de concentração para drenagem superficial	1.0 - 20.0	-
CI	Correção do tempo de concentração para drenagem sub-superficial	50 - 200	-
CB	Tempo associado a taxa de recessão do hidrograma	1200 - 8000	horas
QB	Parâmetro de vazão associado a condição inicial do modelo	0.010	m ³ /(s.km ²)

Conforme descrevem Collischonn et. al. (2007); Pontes et al. (2017); Oliveira et al. (2017) a bacia hidrográfica é dividida em unidades de resposta chamadas de mini bacias. As mini bacias, por sua vez apresentam uma subdivisão em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). Estas são as unidades de cálculo onde são computados os processos hidrológicos representados pelo modelo: evapotranspiração, interceptação e geração de escoamento (Oliveira, 2017). As HRUs são obtidas a partir de características do solo (no MGB, a profundidade do solo) e da cobertura associada. São a estas unidades que estão relacionados grande parte dos parâmetros calibráveis do modelo, parâmetros de solo, conforme apresentado na Tabela 1.

O escoamento gerado em cada HRU dentro da mini bacia é acumulado e propagado como em um reservatório linear ao longo do trecho de canal da mini bacia de seu ponto inicial até seu exutório em outra mini bacia (Figura 2). Para a propagação ao longo do canal é possível realizá-la com base no modelo proposto por Muskingum-Cunge ou então pelo modelo hidrodinâmico inercial de vazões (Paiva et al., 2013).

O Método do Recozimento Simulado

Conforme descreve Bueno e Soeiro (1997), o processo de otimização por recozimento simulado tem como fundamento a mecânica estatística e o algoritmo de simulação Monte Carlo proposto por Metropolis et al. (1953). O algoritmo de busca randômica é de simples implementação se baseia em princípios termodinâmicos para avaliar a convergência (Bueno e Soeiro, 1997). O processo físico ao qual é análogo o de recozimento (recristalização) de um metal. Este processo consiste no aquecimento do material, até muito próximo de seu ponto de fusão, seguido de um lento resfriamento. A cada nova temperatura é dado um tempo para que a estrutura cristalina do material metálico chegue ao estado de menor energia, correspondente a sua configuração mais estável (Bueno e Soeiro, 1997; Kaviski et al., 2008; Andia, 2017).

Deste modo, as temperaturas as quais o material é submetido em seu resfriamento correspondem a uma sequência de estágios gerada pelo algoritmo. Estes estágios podem ser entendidos como regiões no espaço de soluções possíveis do problema. Esta característica torna tal método de otimização uma ferramenta de otimização global, uma vez que permite investigar diversas regiões dentro de uma superfície de soluções.

Os parâmetros do MRS que controlam a geração destes estágios são: a temperatura do material metálico (T); o fator de resfriamento (fat) e o número de decréscimos que serão realizados na temperatura do material (nt). Os parâmetros $simmax$ e $sucmax$ definem a quantidade de testes de configurações possíveis serão feitos em cada estágio (temperatura). Em cada estágio são produzidas pequenas perturbações aleatórias na configuração do sistema em busca daquela que está associada a menor energia.

O parâmetro *nsor* define quantos dos parâmetros do modelo que representa a configuração cristalina do material sofrerão esta perturbação aleatória em cada passo do processo de otimização. No caso dos modelos hidrológicos, são escolhidos aleatoriamente alguns dentre os parâmetros calibráveis do modelo que irão gerar o escoamento na bacia.

O critério de Metropolis, permite que eventualmente uma solução intermediária e de maior energia seja aceita, diminuindo as chances do algoritmo ficar preso a um mínimo local no universo de soluções do problema. Conforme descrito (Kaviski et al., 2008; Machado, 2009), a probabilidade com que tais soluções piores sejam aceitas encontra bases na mecânica estatística associada ao processo de evolução de equilíbrio térmico a uma dada temperatura, portanto, é proporcional a constante de Boltzman e dada pela equação 1.

$$p = \exp \left(\frac{E_i - E_j}{kT} \right) \quad (1)$$

em que: p é a probabilidade do estado j ser aceito; E_i é a energia no estado corrente; E_j é a energia em um novo estado, obtido com a aplicação de uma perturbação no estado corrente; k é a constante de Boltzman ($1,380658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) e; T é a temperatura.

A probabilidade p calculada é comparada com um número aleatório uniformemente distribuído no intervalo de zero a um. Para que a solução seja aceita, p deve ser menor ou igual a este valor aleatório gerado. Deste modo o estado corrente de energia é alterado para o estado, j , que está sendo testado, caso contrário o sistema permanece no estado corrente, i .

Na otimização de um modelo hidrológico, o conjunto de parâmetros deste modelo produzem a resposta da bacia hidrográfica, em geral, avaliada em termos de um hidrograma de saída. A energia do sistema é análoga a métrica que se deseja minimizar. O espaço de soluções possíveis é tão mais complexo quanto maior o número de parâmetros considerados para representar o sistema hidrológico. No MRS, os conjuntos de parâmetros calibráveis do modelo hidrológico correspondem aqueles que simulam uma configuração da estrutura cristalina do material metálico cuja energia associada é o valor da função objetivo calculada em função dos hidrogramas gerado e observado.

A implementação do MRS para calibração do MGB, foi escrito um código na linguagem Go (Donovan e Kernighan, 2017). Além das analogias necessárias para a aplicação do método ao problema que se quer otimizar, para a implementação do algoritmo, conforme descreve Kaviski et al. (2008) é preciso também definir um gerador aleatório para realizar mudanças na configuração do sistema, tais que provoquem as alterações em sua energia no estágio de evolução do algoritmo.

Na implementação atual, as perturbações nos valores dos parâmetros diferem no máximo de 5% do valor do estágio anterior. Estas perturbações são realizadas com base nos intervalos de variação passados como possíveis para cada um dos parâmetros do MGB. Para que um parâmetro assuma um

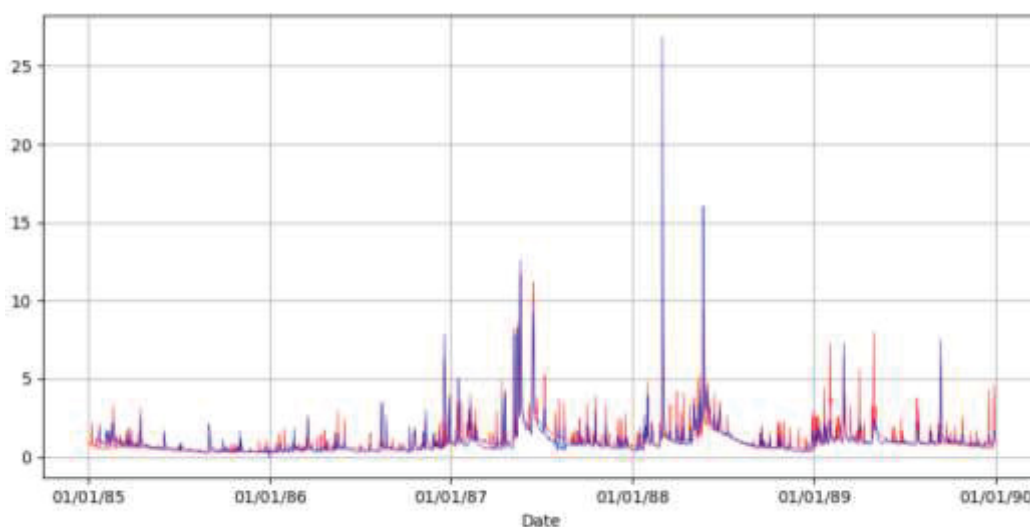
valor único, basta que seu intervalo de variação seja nulo, ou seja, valores dos limites inferior e superior que o parâmetro pode assumir são iguais ao valor em que desejamos fixá-lo.

RESULTADOS

Implementação do MGB para o Passaúna e calibração manual

Em Muhlenhoff et al. (2019), o modelo MGB foi implementado para toda a bacia do rio Passaúna (Figura 1). Entretanto, cabe destacar que a calibração dos parâmetros se concentrou apenas na bacia de contribuição da estação fluviométrica de código 65021800 (Ponte da BR-277 – Campo Largo), localizada imediatamente a montante do reservatório, com área de drenagem não superior a 85 km², conforme é possível observar na Figura 1 (subbacias de calibração 4, 5 e 6).

O período de 1985 a 1990, anterior a construção e enchimento do reservatório, foi escolhido para uma primeira calibração. Nesta etapa o método utilizado foi o manual, por tentativa e erro. O coeficiente de qualidade do ajuste de Nash-Sutcliffe obtido para o hidrograma resultante foi de 0,615, entretanto, o erro medido pelo BIAS (erro de volume) foi de 13,7 % (Figura 3a).



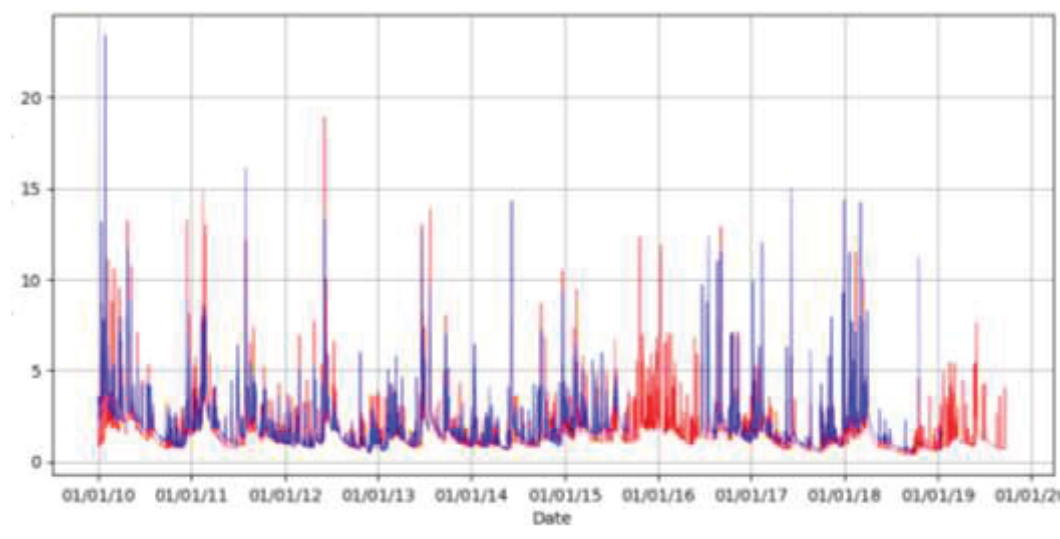


Figura 3 – Hidrogramas simulado e observado para a estação fluviométrica 6501800: (a) período de calibração (1985-1990); (b) período de validação (2010-2019)

Numa segunda etapa, o modelo foi aplicado para a simulação de um outro período de dados, a fim validar o conjunto de parâmetros ótimo encontrado. Este período, foi escolhido a partir dos dados mais recentes disponíveis, de 2010 a 2019. Em termos das métricas avaliadas automaticamente pelo MGB, o período escolhido para a validação apresentou resultados bastante satisfatórios, uma vez que o erro de volume (BIAS) diminuiu, e o coeficiente de qualidade do ajuste de Nash-Sutcliffe para as vazões e para o logaritmo das vazões aumentaram de 0,615 para 0,641 e 0,576 para 0,626, respectivamente (Figuras 3a e 3b).

Calibração pelo MRS e análise de sensibilidade do método de otimização

A calibração do MGB através do MRS foi aplicado para as três subacias (4, 5 e 6) que juntas compõe a região correspondente ao Alto Passaúna (Figura 1). As duas subacias de cabeceira, 5 e 6, apresentaram resultados pouco satisfatórios em termos do coeficiente de Nash-Sutcliffe. Em ambas, as estações fluviométricas consideradas (65020995 e 65021000) possuíam poucos dados observados disponíveis. Destaca-se, preciso uma análise da curva de descarga destas estações para verificar possíveis problemas na conversão das cotas para vazões, uma vez que há um descolamento quase linear entre os hidrogramas observado e simulado, conforme apresenta a Figura 4, com os hidrogramas observado e simulado para o ano de 2010 nestes dois pontos de exutório, respectivamente.

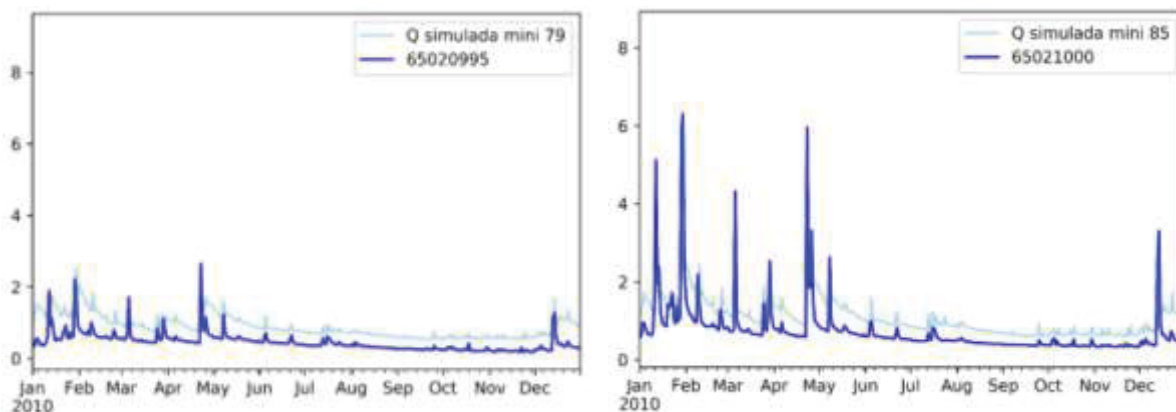


Figura 4 – Hidrograma Simulado e observado para a subacia de calibração número (a) 6 e (b) 5

Para a subacia 4, que tem como exutório a entrada do reservatório do rio Passaúna e é a estação com melhor qualidade de dados disponível, o hidrograma obtido da simulação está apresentado na Figura 5. Para esta região de calibração o coeficiente de qualidade do ajuste de Nash-Suftcliffe igual 0,710 numa primeira aplicação do método.

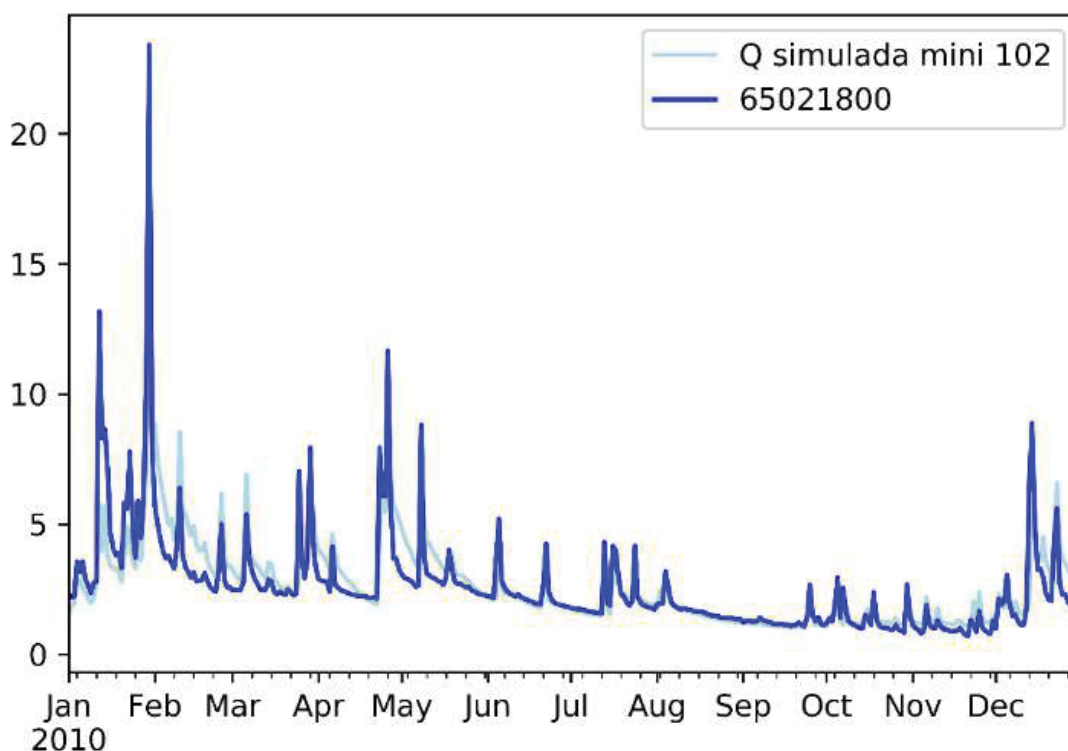


Figura 5 – Hidrograma simulado e observado para a subacia de calibração número 4 (exutório na entrada do reservatório do Passaúna)

Tabela 2 – Testes para sensibilidade dos parâmetros do método de recozimento simulado (MRS)

Teste	Subacia	NT	NSIM	NSUC	Sorteios	Nº de rodadas do MGB	Tempo de simulação	NSE ótimo
-------	---------	----	------	------	----------	----------------------	--------------------	-----------

1	4	50	150	150	2	7500	1h58m48.57s	0.710
2	4	50	150	150	4	7500	1h58m38.25s	0.716
3	4	50	150	150	6	7500	1h57m31.86	0.713
4	4	50	250	250	2	12500	3h24m18.75s	0.720
5	4	50	250	250	4	12500	3h17m1.22S	0.716
6	4	50	250	250	6	12500	3h16m49.89s	0.718
7	4	50	500	500	2	25000	-	0.720
8	4	50	500	500	4	25000	6h26m7.06s	0.725
9	4	50	500	500	6	25000	6h30m7.50s	0.723
10	4	30	500	500	2	15000	3h32m10.26	0.720
11	4	30	500	500	4	15000	3h32m49.46s	0.707
12	4	30	500	500	6	15000	3h35m36.50s	0.701
13	4	30	250	250	2	7500	1h48m25.915	0.702
14	4	30	250	250	4	7500	1h48m5.026s	0.703
15	4	30	250	250	6	7500	1h46m45.124s	0.677

A Tabela 2 sintetiza os testes realizados para avaliar a sensibilidade dos parâmetros do MRS. Os parâmetros utilizados para a geração dos hidrogramas apresentados nas Figuras 4 e 5, foram obtidos da aplicação do método do recozimento para cada uma das subacias de calibração indicadas na Figura 1 (6, 5 e 4, respectivamente) na configuração descrita pelo teste 1, na Tabela 2. Os testes seguintes (2 a 15) foram aplicados apenas para a subacia 4. Admitiram, portanto, os parâmetros do modelo hidrológico obtidos nas subacias 5 e 6 (que geraram os hidrogramas da Figura 4) como ótimos, para proceder as simulações de busca pelo conjunto ótimo de parâmetros do MGB apenas na subacia de calibração 4 (Figura 1).

Em termos do coeficiente de bondade do ajuste dos hidrogramas, Nash-Sutcliffe, todas as soluções encontradas resultaram satisfatórias com valores em torno de 0.7, como apresentado na Tabela 2. Cada teste resultou num conjunto ótimo de parâmetros do modelo hidrológico. Com esses valores foi possível traçar os boxplots com a variação dos valores ótimos encontrados para cada um destes parâmetros, conforme apresentado pela Figura 6.

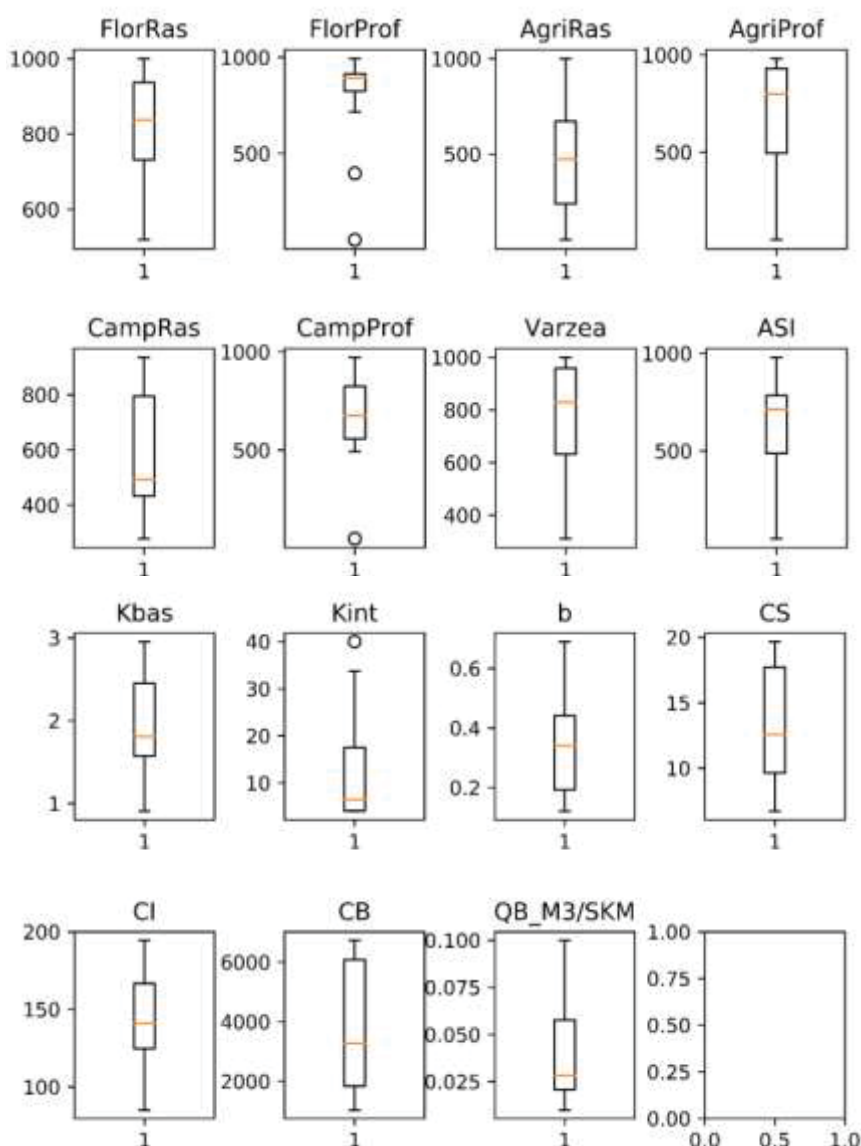


Figura 6 – Boxplots da variação dos valores ótimos obtidos para os parâmetros do MGB

Conforme a Tabela 2 evidencia, em cada teste o MGB foi rodado de 7.500 a 25.000 vezes, ou seja, conforme a configuração estabelecida pelos parâmetros do MRS, o modelo hidrológico era executado a partir de um possível conjunto solução ótimo de valores para seus parâmetros. A Figura 7 pretende evidenciar para cada um dos testes elencados na Tabela 2, a quantidade de conjuntos soluções para os parâmetros do modelo hidrológico que durante o processo de busca atingiram determinadas faixas de valores para o coeficiente Nash-Sutcliffe. As frequências nestas faixas de valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe estão normalizadas pela quantidade de execuções do MGB referente a cada teste, de forma a permitir a comparação entre todos os testes realizados. Podemos concluir, por exemplo, que para a configuração de parâmetros do MRS testado no teste de número 9 (Tabela 2) o algoritmo encontrou conjuntos de parâmetros para o modelo hidrológico que resultariam em um valor de Nash-Sutcliffe superior a 0,70 em, aproximadamente, 30% das execuções do MGB para este teste.

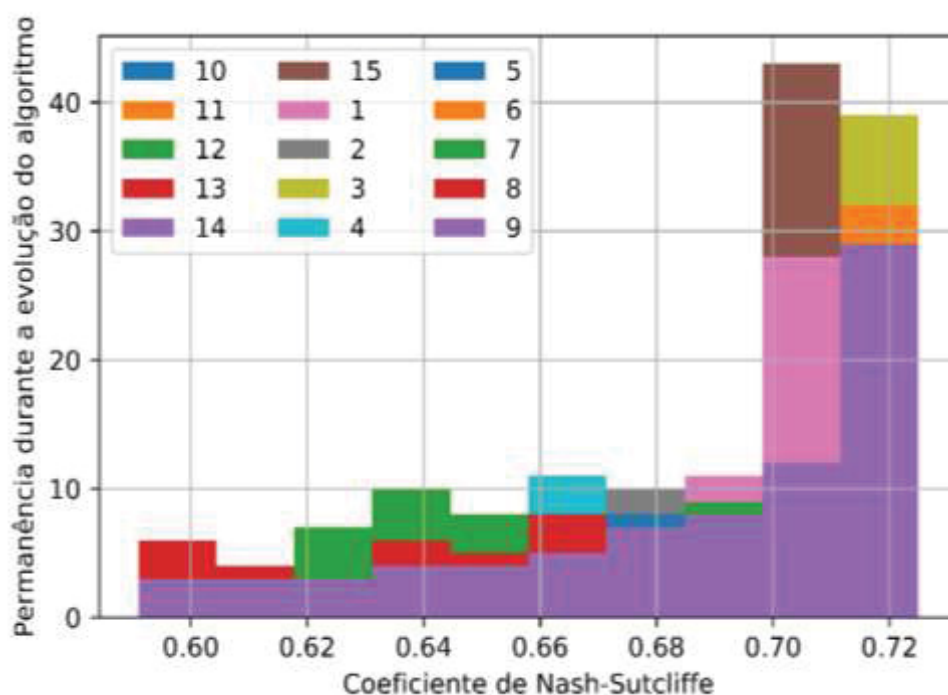


Figura 7 – Permanência das soluções durante a evolução do algoritmo para os testes realizados

CONCLUSÃO

A implementação do Modelo de Grande Bacias (MGB) a bacia hidrográfica do Alto rio Passaúna, com cerca de apenas 85km², tornou-se um desafio adicional, uma vez que o MGB foi concebido para aplicações em grandes áreas. Entretanto, os resultados desta aplicação se mostraram promissores quando do coeficiente de Nash-Sutcliffe (sempre superior a 0,6 para o ponto de entrada no reservatório do Passaúna). Ainda com base nessas métricas se pode concluir que a utilização do o MRS para a calibração dos parâmetros de um modelo hidrológico, como o MGB, se mostrou eficiente (coeficiente de Nash-Sutcliffe subiu para 0,72) e com baixo custo de implementação, uma vez que pode ser facilmente adaptado para a calibração de outro modelo hidrológico. Adicionalmente, deve-se ressaltar que os resultados apresentados quando da análise da eficiência de busca do algoritmo com base no MRS estão limitados por terem sido obtidos para uma bacia incremental, de modo que em estudos futuros serão considerados.

AGRADECIMENTOS

A CAPES pela bolsa de doutorado. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná. A Universidade Federal do Paraná. Ao CNPq pelas bolsas produtividade dos Professores Cristovão Fernandes, Eloy Kaviski e Tobias Bleninger.

REFERÊNCIAS

- ANDÍA, H. M. N. (2017). “Análise operacional durante transiente em usinas hidrelétricas com escoamento em canal e câmara de carga”. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 98 f.
- BUENO, V. de C.; SOEIRO, F. J. da C. P. (1997). “O Recozimento Simulado como ferramenta de otimização global.” *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, 9p.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. (2007). “The MGB-IPH model for largescale rainfall-runoff modelling”. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, p. 878-895.
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. (2013). “Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter.” *Hydrological Processes*, v. 27, n. 18, p. 2614-2622.
- DONOVAN, A.A.A., KERNIGHAN, B.W. (2017). “The Go Programming Language”. Addison-Wesley, New York.
- FREITAS, C. (2016). “Uso de técnicas de classificação de dados na operação de sistemas de reservatórios de usinas hidrelétricas durante cheias”. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 256 f.
- KAVISKI, E.; DO PRADO, A. L.; CUMIN, L. M. G. (2008). “Solução de sistemas de equações não-lineares pelo método do recozimento simulado”. In: XXXI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional. p. 375.
- MACHADO, E. S. (2009). “Utilização da metaheurística do recozimento simulado na otimização do planejamento de sistemas regionais de tratamento de efluentes e sua expansão da capacidade”. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- MEDEIROS, M. S.; FLEISCHMANN, A. S.; OLIVEIRA, A. M.; CORATI, B.; FAN, F. M.; MARTINBIANCHO, G. K; JARDIM, P. F.; CORREA, S. W.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W. (2018). “Manual de exemplo de aplicação do modelo MGB 2018 utilizando o IPH-Hydro Tools”. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. IPH/UFRGS. 83p.
- METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, M.; ROSENBLUTH, A.; TELLER, A.; TELLER, E. (1953). “Equations of the state calculations by fast computing machines”. *Journal of Chemical Physics*, vol 21, p. 1087 - 1092.
- OLIVEIRA, A. M.; FLEISCHMANN, A.; PAIVA, R. C. D. de; COLLISCHONN, W. (2017). “Como acertar pelos motivos certos? Integração de modelagem hidrológica-hidrodinâmica e sensoriamento remoto visando a calibração de modelos”. In: Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis - SC. Novembro, 2017.
- MUHLENHOFF, A. P. (2016). “Análise comparativa de esquemas de discretização 1D e 1D/2D para a avaliação de curvas de inundação em rio com escassez de dados.”. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR. 178p.
- MUHLENHOFF, A. P.; PAIVA, R. C. D.; BLENINGER, T. B.; FERNANDES, C. V. S.. (2019). “Estimativa do coeficiente de recessão a partir de dados de gravimetria – Estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Passaúna – PR”. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu/PR.
- OLIVEIRA, A. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. (2017). “Como acertar pelos motivos certos? Integração de modelagem hidrológica-hidrodinâmica e sensoriamento remoto visando a calibração de modelos”. In: Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis/ SC.
- PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.; TUCCI, C. E. M. (2013). “Hydrological and sediment transport modeling of the Amazon Basin”. In: Rui Carlos Vieira Da Silva,

Carlos Eduardo Morelli Tucci, Christopher A. Scott. (Org.). Water and Climate modeling of large basins 2. 1 ed., 2013, v. 2, p. 119.

PEREIRA, M.A., VASCONCELOS, J.A. (2013). “Recozimento Simulado”. In.: Gaspar-Cunha, A., Takahashi, R., Antunes, C.H. Manual de Computação Evolutiva e Metaheurística, Editora UFMG, Belo Horizonte.

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

SILVA FILHO, L. V. da. (2010). “Qualidade e percepção ambiental: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Passaúna”. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Curitiba, 2010.

SIVAKUMAR, B., BERNDTSSON. (2010). “Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting”. World Scientific, Singapore.

TUCCI, C. E. M. (2005). Modelos hidrológicos. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. 2. ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2005.

ANEXO IV – CÓDIGO CAL_MGB (GOLANG)

```

1  package main
2
3  // cal_mgb - Recozimento simulado - Calibracao parametros do MGB
4
5  // Importando pacotes
6  import (
7      "bufio"
8      "fmt"
9      "io/ioutil"
10     "math"
11     "math/rand"
12     "os"
13     "os/exec"
14     "strconv"
15     "strings"
16     "time"
17 )
18
19 // Declarando variaveis globais
20 var a, b [20]float64 // lim. inf. e sup. de variaçao dos parâmetros no MGB
21 var vfix [20]bool    // se parâmetro fixo é True, se não é False
22 var (
23     simmax, // parâmetros do método de recozimento simulado
24     sucmax,
25     nt, nsor int64
26 )
27 var t, fat float64
28 var (
29     dirout,
30     pasta,
31     bacia, // qual a bacia que vai ser calibrada
32     paruso, // caminho do arquivo PARUSO.cal
33     ajuste, // caminho do arquivo AJUSTE.fob
34     ajuste_legenda, // caminho do arquivo AJUSTE.fob
35     pesos, // Caminho do arquivo com os pesos para cada parâmetro
36     programa string // Caminho do arquivo MGB.exe
37 )
38 var nv int64 = 19 // O problema foi escrito com base em 18 variáveis de
39 decisão com índices variando de 1 a nv-1
40
41 // Define qual a subacia a ser calibrada
42 var subcal int64
43 var nmini int64
44 var linhas []string
45 var e error
46 var nmax int64
47
48 // Variaveis para o gerador da semente
49 var arqg *os.File
50 var errg error
51
52 // !!! IMPORTÂNCIA AMOSTRAL
53 var p [20]int64 // Pesos para cada um dos parâmetros calibráveis
54
55 // $$$ variaveis definidas em "read_IA" e usadas em "sorte"
56 var dvp []int64 // distribuicao das variaveis em funcao dos pesos
57 var ndvp int64 // número de elementos da distribuição
58 // $$$
59
60 // Funcao - gerador da semente
61 func inic(ig int64) {

```



```

62
63     fmt.Println(ig)
64
65     if ig < 0 {
66         return
67     }
68
69     if ig == 0 {
70         ig = int64(time.Now().Nanosecond())
71     }
72
73     rand.Seed(ig)
74 }
75
76 func read_IA(path string, sub int64, vfixo [20]bool) ([20]int64, [20]bool)
77 {
78
79     /*
80     Função para ler o arquivo com os pesos de cada parâmetro calibrável
81     Retorna: p (pesos) e atualiza vfix (parametro fixo ou não)
82     */
83
84     var i, j int64 //contadores
85
86     // $$$ Inicializa a variável peso em toda a sua amplitude
87     for i = 1; i < nv; i++ {
88         if vfixo[i] {
89             p[i] = 0
90         } else {
91             p[i] = 1
92         }
93     }
94     // $$$
95     // Abre o arquivo a ser lido: "pesos.prn"
96     arq, err := os.Open(path)
97     check(path, err)
98
99     // Lê todo o conteúdo do arquivo "pesos.prn" como uma única string
100     scanner := bufio.NewScanner(arq)
101
102     for scanner.Scan() {
103
104         // Corta a string em '\n'
105         l := scanner.Text()
106
107         // Converte a string em Slice (lista com cada valor na linha)
108         linha := strings.Fields(l)
109
110         // Converte o primeiro valor na lista 'linha' de string para
111         inteiro 64 bits
112         subasin, err := strconv.ParseInt(linha[0], 10, 64)
113
114         if subasin == sub && err == nil {
115
116             // Armazena os pesos de cada "Wm"
117             i = 1
118             for i < 10 {
119                 p[i], err = strconv.ParseInt(linha[i+1], 10, 64)
120
121                 if p[i] == 0 {

```

```

122                                     // Considerar que o parâmetro representado pelo índice
123 'i' É CONSTANTE!
124                                     vfixo[i] = true
125                                     }
126
127                                     fmt.Println("i = ", i, ", p[i] = ", p[i], ", vfix[i] = ",
128 vfixo[i])
129                                     i++
130                                     }
131                                     // Sai do loop, que lê linha a linha o arquivo 'pesos.prn'
132                                     break
133                                     }
134     }
135
136     // $$$ Montagem da distribuicao das variaveis de decisao em funcao dos
137 pesos
138     for i = 1; i < nv; i++ {
139         // i é o índice que representa o parâmetro a ser calibrado.
140         for j = 0; j < p[i]; j++ {
141             dvp = append(dvp, i)
142         }
143     }
144     ndvp = int64(len(dvp)) // ndvp é o número de elementos da distribuicao
145     // $$$
146     return p, vfixo
147 }
148
149 // Funcao para ler os arquivos de entrada
150 func ler() {
151
152     /*
153     Funcao não tem argumentos de entrada e nao tem saida
154     As únicas saídas são as definições das variaveis globais
155     (bacia, paruso, ajuste, programa)
156
157     A funcao tem as seguintes variaveis locais:
158     limites          > caminho do arquivo limites_PARUSO.prn
159
160     z                > matriz cada elemento é uma linha
161                     do arquivo limites_PARUSO.prn
162
163     s                > matriz, cada elemento é uma das linhas
164                     (da 6 a 11) do arquivo 'cal_MGB.txt'
165
166     i, j, m          > contadores
167
168     n                > comprimento de cada elemento em 'z'
169
170     A chamada da função ler no corpo principal do programa
171     cria um arquivo de saída: "cal_mgb.rel". As linhas neste
172     arquivo estão associadas aos seguintes Prints ao longo
173     da função ler: VER LINHAS 128 e 198
174     */
175
176     var limites string
177     var z [20]string
178     var s [10]string
179     var i, j, m int64
180     var n int
181
182     // Cria o relatório de saída da função ler (args = arquivo de saida)

```

```

183     arqs, errs := os.Create("cal_mgb.rel")
184
185     // Verificação: criação do arquivo de saída "cal_mgb.rel"
186     if errs != nil {
187         fmt.Println("erro - txt cal_mgb.rel")
188         os.Exit(1)
189     }
190
191     // Abre o arquivo a ser lido: "cal_mgb.txt" (arqe = arquivo de entrada)
192     arqe, err := os.Open("cal_mgb.txt")
193
194     // Verificação: Arquivo encontrado e aberto corretamente
195     if err != nil {
196         fmt.Println("erro - cal_mgb.txt")
197         os.Exit(1)
198     }
199
200     // Início da leitura do arquivo "cal_MGB.txt" (arqez = conteúdo do
201     arquivo de entrada)
202     arqez := bufio.NewReader(arqe)
203
204     // Lê as linhas de 1 a 8 do arquivo "cal_MGB.txt"
205     dirout, err = arqez.ReadString('\n') //linha 1 de "cal_MGB.txt"
206     pasta, err = arqez.ReadString('\n') //linha 2 de "cal_MGB.txt"
207     limites, err = arqez.ReadString('\n') //linha 3
208     paruso, err = arqez.ReadString('\n') //linha 4
209     ajuste_legenda, err = arqez.ReadString('\n') //linha 5
210     ajuste, err = arqez.ReadString('\n') //linha 6
211     pesos, err = arqez.ReadString('\n') //linha 7
212     programa, err = arqez.ReadString('\n') //linha 8
213
214     // Corrige as strings, eliminando os últimos dois caracteres de quebra
215     de linha ('\n')
216     dirout = dirout[:len(dirout)-2]
217     pasta = pasta[:len(pasta)-2]
218     limites = limites[:len(limites)-2]
219     paruso = paruso[:len(paruso)-2]
220     ajuste_legenda = ajuste_legenda[:len(ajuste_legenda)-2]
221     ajuste = ajuste[:len(ajuste)-2]
222     pesos = pesos[:len(pesos)-2]
223     programa = programa[:len(programa)-2]
224
225     // Cria o diretório de saída do teste a partir das variáveis 'dirout' e
226     'pasta'
227     dirout = dirout + pasta
228     erro := os.MkdirAll(dirout, os.ModePerm)
229     check(dirout, erro)
230     bacia = dirout + "\\log_" + pasta
231
232     //Imprime o diretório de saída criado
233     fmt.Fprintln(arqs, "DIRETORIO DE SAIDA:")
234     fmt.Fprintln(arqs, bacia, "\r\n")
235
236     // Leitura das linhas 9 a 17 em "cal_MGB.txt"
237     for i = 0; i < 10; i++ {
238         // lê as linhas 9 a 17 do arquivo "cal_MGB.txt" (i = 0 >> linha 9,
239         e assim por diante)
240         s[i], err = arqez.ReadString('\n')
241     }
242

```

```

243     // Define função para eliminar espaços em branco, fica só o valor
244     numérico da variável
245     busca_zero := func(j int64) {
246         i = 7
247         for s[j][i:i+1] == " " {
248             i++
249         }
250     }
251
252     // Aplico a função 'busca_zero' para eliminar os espaços nas strings
253     armazenadas em s
254     // Armazeno o VALOR NUMERICO correspondente a cada variável de entrada
255     busca_zero(0)
256     simmax, err = strconv.ParseInt(s[0][i:13], 10, 64)
257
258     busca_zero(1)
259     sucmax, err = strconv.ParseInt(s[1][i:13], 10, 64)
260
261     busca_zero(3)
262     nt, err = strconv.ParseInt(s[3][i:13], 10, 64)
263
264     busca_zero(4)
265     nsor, err = strconv.ParseInt(s[4][i:13], 10, 64)
266
267     busca_zero(2)
268     fat, err = strconv.ParseFloat(s[2][i:13], 64)
269
270     busca_zero(5)
271     t, err = strconv.ParseFloat(s[5][i:13], 64)
272
273     busca_zero(6)
274     subcal, err = strconv.ParseInt(s[6][i:13], 0, 64)
275
276     busca_zero(7)
277     nmini, err = strconv.ParseInt(s[7][i:13], 0, 64)
278
279     busca_zero(8)
280     nmax, err = strconv.ParseInt(s[7][i:13], 0, 64)
281
282     // Fim da leitura do arquivo "cal_MGB.txt" - fecha o arquivo
283     arqe.Close()
284
285     ///### Imprime no arquivo "cal_mgb.rel" valores dos parametros do rec.
286     sim.
287     fmt.Fprintln(arqs, "simmax ", "sucmax ", "nt ", "nsor", "fat ", "t")
288     fmt.Fprintln(arqs, simmax, sucmax, nt, nsor, fat, t)
289
290     // Abre o arquivo "limites_PARUSO.prn" para leitura
291     arqe, err = os.Open(limites)
292
293     // Verificação: Arquivo encontrado e aberto corretamente
294     if err != nil {
295         fmt.Println("erro - ", limites)
296         os.Exit(1)
297     }
298
299     // Inicio da leitura de "limites_PARUSO.prn"
300     argez = bufio.NewReader(arqe)
301
302     // Registro no relatório de saída
303     fmt.Fprintln(arqs)

```

```

304
305 // Lê a primeira linha (cabeçalho) do arquivo "limites_PARUSO.prn"
306 z[0], err = arqez.ReadString('\n')
307
308 m = 7
309 /*
310 Os valores do parâmetro 'Wm' do MGB variam conforme:
311 I) o tipo de cobertura (floresta, agricultura, campo)
312 II) a profundidade do solo para estas coberturas citadas (solo raso
313 ou profundo)
314 III) Áreas semi-impermeáveis e Água.
315 Portanto, na lista de limites INF e SUP de variação de cada
316 parâmetro para cada HRU,
317 Para "Wm" as HRU's FlorRas, FlorProf, AgrRas, AgrProf, CampRas,
318 CampProf, ASI, Agua
319 terão o mesmo intervalo de variação. por esta razão o contador m
320 inicia em 7.
321 */
322
323 // Loop para separar os limites inferior (a) e superior (b)
324 for j = 1; j < 12; j++ {
325
326     m++
327
328     z[j], err = arqez.ReadString('\n') //Cada linha em
329 "limites_PARUSO.prn"
330
331     n = len(z[j]) // Comprimento da string (n = 39)
332
333     // Print das linhas
334     fmt.Println(j, z[j], n)
335
336     i = 5 // i = 5 primeiro caracter numérico da coluna de lim INF
337     for z[j][i:i+1] == " " {
338         i++
339     }
340
341     // Armazena o valor do limite INFERIOR do parâmetro na lista "a"
342     a[m], err = strconv.ParseFloat(z[j][i:21], 64)
343
344     i = 21 // i = 21 último caracter numérico da coluna de lim INF
345     for z[j][i:i+1] == " " {
346         i++
347     }
348
349     // Armazena o valor do limite SUPERIOR do parâmetro na lista "b"
350     b[m], err = strconv.ParseFloat(z[j][i:n-2], 64)
351
352     // Registros da leitura de "limites_PARUSO.prn" no arquivo
353 "cal_mgb.rel"
354     fmt.Fprintln(arqs, m, " ", a[m], " ", b[m], "\r\n")
355 }
356
357 for j = 1; j < 8; j++ {
358     //Variáveis com índices de 1 a 7 >> valores de 'Wm',
359     a[j] = a[8]
360     b[j] = b[8]
361 }
362
363 // Loop para identificar se há parâmetros fixos
364 for j = 1; j < nv; j++ {

```

```

365         if math.Abs(a[j]-b[j]) < 1.0e-5 {
366             // Parâmetro com o índice j é considerado constante
367             vfix[j] = true
368             fmt.Fprintln(arqs, "vfix ", j, vfix[j]) // Registro em
369 "cal_mgb.rel"
370         } else {
371             vfix[j] = false
372             fmt.Fprintln(arqs, "vfix ", j, vfix[j]) // Registro no arquivo
373 de saída "cal_mgb.rel"
374         }
375     }
376
377     // Fecha arquivos de entrada e saída abertos para leitura e registros.
378     arqe.Close()
379     arqs.Close()
380
381     linhas, e = read_paruso(paruso)
382     check(paruso, e)
383
384     // !!! Leio os pesos e armazeno em 'p', atualizo 'vfix'.
385     p, vfix = read_IA(pesos, subcal, vfix)
386
387     // PARA O TESTE DA ETAPA 3 - CALIBRAR SOMENTE OS PARÂMETROS MAIS
388 IMPORTANTES
389     /*vfix[2] = true
390     vfix[3] = true
391     vfix[4] = true
392     vfix[5] = true
393     vfix[6] = true
394     vfix[7] = true
395     vfix[8] = true*/
396 }
397
398 func check(path string, e error) {
399
400     // Função para checar os erros nos arquivos de entrada/saída
401     if e != nil {
402         fmt.Println("Erro - ", path)
403         os.Exit(1)
404     }
405 }
406
407 func read_paruso(path string) ([]string, error) {
408
409     /*
410     Função específica para ler o arquivo com os valores de parâmetros
411     para cada subácia em um projeto mgb.
412
413     var arq *os.File //variável armazena o conteúdo do arquivo a ser lido
414     var err error //variável de erro
415     var lines []string //Linhas do arquivo PARUSO.cal
416
417     //Abrindo e fechando o arquivo a ser lido
418     arq, err = os.Open(path)
419     check(path, err)
420     defer arq.Close()
421
422     // Escaneando o conteúdo do arquivo PARUSO.cal como string
423     scan := bufio.NewScanner(arq)
424     scan.Split(bufio.ScanLines)
425

```



```

426 // Adicionando cada linha de PARUSO.cal como um elemento na lista lines
427 for scan.Scan() {
428     lines = append(lines, scan.Text())
429 }
430
431 //Retorno da função
432 return lines, scan.Err()
433 }
434
435 func write_paruso(path string, sub int64, xr [20]float64, lines []string) {
436
437     /*
438     Função para sobrescrever o arquivo de parâmetros calibráveis do MGB
439     (PARUSO.cal)
440
441     Argumentos de entrada:
442     > path (string) - caminho do arquivo PARUSO.cal
443         (deve ser sempre: C:\mgb\Input\PARUSO.cal)
444     > sub (int64) - subacia a ser calibrada
445     > xr ([20]float64) - valores dos parâmetros já atualizados
446
447     Saída da função:
448     > A função salva o novo arquivo PARUSO.cal
449
450     */
451
452     // f armazena o formato da impressão da linha de parâmetros em
453     PARUSO.cal
454     var f string = "%8.1f%8.2f%8.2f%8.2f%8.2f%8.2f%8.2f\r\n"
455
456     // Abre novo arquivo PARUSO.cal
457     arq, err := os.Create(path)
458     check(path, err)
459
460     // Total de subacias possíveis de calibração
461     tsub := len(lines) / 15
462
463     // String que identifica a subacia a ser calibrada
464     s := "Watershed " + strconv.FormatInt(sub, 10)
465
466     // Início e fim do loop que percorre linha a linha do arquivo
467     i := 0
468     fim := tsub * 15
469
470     // Início da reescrita do arquivo PARUSO.cal
471     for i < fim {
472
473         if lines[i] != s {
474
475             // Para as linhas que permanecem idênticas ao arquivo anterior
476             fmt.Fprintf(arq, lines[i]+"\r\n")
477             i++
478
479         } else {
480
481             // Para as linhas referentes a subacia que está sendo calibrada
482             fmt.Fprintf(arq, s+"\r\n")
483             fmt.Fprintf(arq,
484 "           use      Wm      b      Kbas      Kint      XL      CAP      Wc\r\n")
485             fmt.Fprintf(arq, "FlorRas      "+f, xr[1], xr[9], xr[10], xr[11],
486 xr[12], xr[13], xr[14])

```

```

487         fmt.Fprintf(arq, "FlorProf "+f, xr[2], xr[9], xr[10], xr[11],
488 xr[12], xr[13], xr[14])
489         fmt.Fprintf(arq, "AgriRas "+f, xr[3], xr[9], xr[10], xr[11],
490 xr[12], xr[13], xr[14])
491         fmt.Fprintf(arq, "AgriProf "+f, xr[4], xr[9], xr[10], xr[11],
492 xr[12], xr[13], xr[14])
493         fmt.Fprintf(arq, "CampRas "+f, xr[5], xr[9], xr[10], xr[11],
494 xr[12], xr[13], xr[14])
495         fmt.Fprintf(arq, "CampProf "+f, xr[6], xr[9], xr[10], xr[11],
496 xr[12], xr[13], xr[14])
497         fmt.Fprintf(arq, "Varzea "+f, xr[7], xr[9], xr[10], xr[11],
498 xr[12], xr[13], xr[14])
499         fmt.Fprintf(arq, "ASI "+f, xr[8], xr[9], xr[10], xr[11],
500 xr[12], xr[13], xr[14])
501         fmt.Fprintf(arq, "Agua "+f, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
502 0.0)
503         fmt.Fprintf(arq, "CS %8.2f\r\n", xr[15])
504         fmt.Fprintf(arq, "CI %8.2f\r\n", xr[16])
505         fmt.Fprintf(arq, "CB %8.2f\r\n", xr[17])
506         fmt.Fprintf(arq, "QB_M3/SKM2%10.4f\r\n", xr[18])
507
508         i = i + 15
509
510     }
511
512 }
513
514 // Fecha e salva o arquivo atualizado PARUSO.cal
515 arq.Close()
516
517 }
518
519 func ler_ajuste(path string, fobc string, mini int64) (float64, string) {
520
521     /*
522     Função para ler os dados do arquivo de saída do mgb
523     'ajuste_corr.fob'
524
525     Argumentos:
526     path - caminho do arquivo com os valores das funções objetivo
527     fobc - qual função objetivo vou otimizar "nse" "nselog" "bias"
528     mini - qual minibacia é o exutório da subacia que está sendo
529     calibrada
530
531     Retornos:
532     value - valor da função objetivo
533     saida - string contendo a linha de estatísticas correspondente
534     a subacia que está sendo calibrada no arquivo
535     "AJUSTE_corr.fob"
536
537     */
538
539     // Variáveis locais da função
540     var saida string
541     var value, nse, nselog, bias float64
542
543     // Abre o arquivo a ser lido: "AJUSTE_corr.fob"
544     arqe, err := os.Open(path)
545     check(path, err)
546

```

```

547     // Lê todo o conteúdo do arquivo "AJUSTE_coor.fob" como uma única
548     string
549     scanner := bufio.NewScanner(arqe)
550
551     for scanner.Scan() {
552
553         // Corta a string em '\n'
554         l := scanner.Text()
555
556         // String para Slice, lista com cada palavra/valor na linha
557         linha := strings.Fields(l)
558
559         // Converte o primeiro valor na lista 'saida' de string para
560         inteiro 64 bits
561         minibasin, err := strconv.ParseInt(linha[0], 10, 64)
562
563         //Testa se o número em minibasin corresponde a linha com os
564         resultados da subacia que procuro 'mini'
565         if minibasin == mini && err == nil {
566
567             // Armazena os valores das estatísticas nas variáveis
568             correspondentes
569             nse, err = strconv.ParseFloat(linha[1], 64)
570             nselog, err = strconv.ParseFloat(linha[2], 64)
571             bias, err = strconv.ParseFloat(linha[3], 64)
572
573             /* Armazena a linha toda para escrever no arquivo de saída com
574             todas as estatísticas ao longo do processo de busca do algoritmo.
575             */
576             saida = l
577
578             //Encerra a busca no arquivo "AJUSTE_corr.fob"
579             break
580         }
581
582         //fmt.Println("Fim da leitura do arquivo: AJUSTE_corr.fob")
583     }
584
585     // Escolhe o valor da estatística a ser usada como Função Objetivo
586     if fobc == "nse" {
587         value = nse
588     } else if fobc == "nselog" {
589         value = nselog
590     } else if fobc == "bias" {
591         value = bias
592     }
593
594     // Retorna o valor da Função Objetivo e uma string contendo
595     // todas as estatísticas da simulação neste passo da busca
596     return value, saida
597 }
598
599 func salvehidrograma(mini, out string) {
600
601     caminput := "C:\\mgb\\Output\\SIM_MC_" + mini + ".txt"
602
603     camoutput := dirout + "\\\" + out + ".txt"
604
605     b, err := ioutil.ReadFile(caminput) // just pass the file name
606     check(caminput, err)
607

```

```

608     err = ioutil.WriteFile(camoutput, b, 0777)
609     check(camoutput, err)
610 }
611
612 func fob(sub int64, xr [20]float64) (float64, string) {
613
614     var c *exec.Cmd
615     var saida float64 //valor da função objetivo
616     var metricas string
617
618     parusopath := paruso
619     write_paruso(parusopath, sub, xr, linhas)
620
621     //fmt.Println("Paruso atualizado")
622     c = exec.Command("C:/MGB/MGB.exe")
623     //fmt.Println("MBG encontrado")
624
625     c.Run()
626
627     //fmt.Println("MBG rodou")
628
629     saida, metricas = ler_ajuste(ajuste_legenda, "nse", nmini)
630     saida = 1.0 - saida
631
632     return saida, metricas
633 }
634
635
636 func sorte(vfix [20]bool, x [20]float64) (int64, float64, float64) {
637
638     // vfix é a lista que indica se o parâmetro tem intervalo de variação
639     ou é considerado fixo (true)
640     // x é uma lista de valores aleatórios float64 no intervalo de [0, 1)
641
642     var i int64
643     var aux float64
644     var dx float64 = 0.05 // amplitude da perturbacao
645
646     i = -1
647     for i < 0 {
648
649         // $$$
650         // Força i a ser um valor inteiro positivo entre [0, nv)
651         // i = rand.Int63n(nv)
652
653         i = rand.Int63n(ndvp)
654         i = dvp[i]
655         // $$$
656
657         // se i escolhido aleatoriamente vfix[i] for True (par. fixo)
658         if vfix[i] {
659             // volto a forçar i a ser igual a -1
660             // e reinicio o processo até que encontre um valor de i entre
661             [0,nv)
662             // que corresponda a um parâmetro com intervalo de variação
663             possível
664             i = -1
665         }
666     }
667 }
668

```

```

669     /*
670         x[i] é um valor aleatório no intervalo [0,1) aplicado sobre a
671         amplitude de variação específico
672         do parâmetro (b[i]-a[i])
673
674         depois do teste se este valor continua pertencendo ao intervalo
675         entre 0 e 1,
676         a função chega ao último return
677     */
678     aux = x[i] + dx*(2.0*rand.Float64()-1.0)
679
680     // fmt.Println(i,aux)
681     if aux < 0.0 {
682         return i, 0.0, a[i]
683     }
684
685     if aux > 1.0 {
686         return i, 1.0, b[i]
687     }
688     return i, aux, a[i] + aux*(b[i]-a[i])
689 }
690
691 func metropolis(t, df float64) bool {
692
693     var aux float64
694
695     if df < 0.0 {
696         return true
697     }
698
699     aux = df / t
700     if aux < 200.0 {
701         if rand.Float64() < math.Exp(-aux) {
702             return true
703         }
704     }
705     return false
706 }
707
708 func anneal() {
709
710     var (
711         x, xr,
712         y, yr,
713         xm [20]float64
714     )
715     var (
716         df,
717         fxr,
718         fyr, fm float64
719     )
720     var p [10]int64
721     var (
722         yp,
723         yrp [10]float64
724     )
725     var (
726         i, j,
727         nsim,
728         nsuc int64
729     )

```

```

730
731     var metricas string
732     var (
733         n_vr = [20]string{"", "Wm FlorRas", "Wm
734 FlorProf", "Wm AgriRas",
735 "Wm AgriProf", "Wm CampRas", "Wm CampProf", "Wm
736 Varzea",
737 "Wm ASI", "b", "Kbas",
738 "Kint",
739 "XL", "CAP", "Wc", "Wm
740 CS",
741 "Wm CI", "Wm CB", "Wm QB_M3/SKM2"}
742     )
743
744     // TESTE TEÓRICO ETAPA 3 - VARIANDO SOMENTE WmFLORRAS
745     /*xr[2] = 803.413
746     xr[3] = 479.947
747     xr[4] = 50.00
748     xr[5] = 458.488
749     xr[6] = 551.418
750     xr[7] = 953.338
751     xr[8] = 309.800*/
752
753     // Arquivo de saída com informações sobre o processo de otimização
754     nome_saida := bacia + strconv.FormatInt(subcal, 10) + ".txt"
755     arqsaida, err := os.Create(nome_saida)
756     arqfobs, err := os.Create(bacia + "_fob_todos.txt")
757     arqpar, err := os.Create(bacia + "_parametros.txt")
758
759     defer arqsaida.Close()
760     defer arqfobs.Close()
761     defer arqpar.Close()
762
763     fmt.Fprintf(arqpar,
764 "WmFlorRas WmFlorProf WmAgriRas WmAgriProf WmCampRas WmCampProf WmVar
765 zea WmASI b Kbas Kint XL CAP Wc CS CI CB QB_M3/SKM2 \r\n")
766
767     if err != nil {
768         fmt.Println("erro - txt " + bacia)
769         os.Exit(2)
770     }
771
772     // Início do trecho inserido - busca ale. da sol. inicial
773     for i = 1; i < nv; i++ {
774         x[i] = 0.5
775         xr[i] = x[i] * (a[i] + b[i])
776     }
777
778     fxr, metricas = fob(subcal, xr)
779
780     for j = 0; j < nmax; j++ {
781         for i = 1; i < nv; i++ {
782             if !vfix[i] {
783                 y[i] = rand.Float64()
784                 yr[i] = a[i] + y[i]*(b[i]-a[i])
785             }
786         }
787         fyr, metricas = fob(subcal, yr)
788         if fyr < fxr {
789             x = y
790             xr = yr

```