



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/11.19.18.59-TDI

MODELAGEM HIDROLÓGICA DE GRANDE ESCALA APLICADA À BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL

Felício Cassalho

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Camilo Daleles Rennó,
e Benedito Cláudio da Silva,
aprovada em 04 de dezembro de
2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3UE6B55>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/11.19.18.59-TDI

MODELAGEM HIDROLÓGICA DE GRANDE ESCALA APLICADA À BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL

Felício Cassalho

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Camilo Daleles Rennó,
e Benedito Cláudio da Silva,
aprovada em 04 de dezembro de
2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3UE6B55>>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Cassalho, Felício.

C271m Modelagem hidrológica de grande escala aplicada à bacia hidrográfica do Paraíba do Sul / Felício Cassalho. – São José dos Campos : INPE, 2019.

xxii + 147 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/11.19.18.59-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadores : Drs. Camilo Daleles Rennó, e Benedito Cláudio da Silva.

1. MGB-IPH. 2. TRMM. 3. MERGE/CPTEC. I.Título.

CDU 556.013:528.8(282.281)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Felício Cassalho**

Título: "MODELAGEM HIDROLÓGICA DE GRANDE ESCALA APLICADA À BACIA
HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dra. Evelyne Márcia Leão de Moraes Novo



Presidente / INPE / SJCampos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Camilo Daleles Rennó



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Benedito Cláudio da Silva

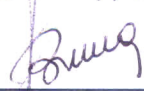


Orientador(a) / UNIFEI / Itajubá - MG

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dra. Laura de Simone Borma



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. João Bosco Coura dos Reis



Convidado(a) / CEMADEN / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

*A meus pais Claudiney Cassalho
e Rosana Lopes da Silva Cassalho*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por possibilitar mais este passo na minha formação, por me guardar e abençoar em tudo o que tenho feito.

A meus pais, Claudiney Cassalho e Rosana Lopes da Silva Cassalho, agradeço por todo o amor, pelo apoio incondicional, pelas palavras de carinho, pelos conselhos e correções. Ao meu querido irmão e melhor amigo Matheus Cassalho pela amizade e companheirismo.

Aos meus orientadores. Ao Dr. Camilo Daleles Rennó, pela paciência, motivação e confiança, por me ajudar a explorar meus potenciais e me proporcionar dois anos de profundo desenvolvimento profissional. Ao Dr. Benedito Cláudio da Silva por todos os ensinamentos e pela orientação indispensável para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. João Bosco Coura dos Reis do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) pela imensa colaboração.

Ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado (processo 130481/2018-1 e vigência de 01/03/2018 a 31/11/2019).

RESUMO

A gestão e engenharia dos recursos hídricos é intrinsecamente dependente da descrição dos processos hidrológicos. Idealmente, estes processos são avaliados em termos de dados observacionais dos componentes do ciclo hidrológico. A carência de dados, impossibilidade de monitoramento contínuo dos recursos hídricos e a necessidade de avaliação de cenários leva a utilização de modelos hidrológicos. Modelos hidrológicos de grande escala são amplamente utilizados no Brasil devido a característica de baixa densidade espaço-temporal do monitoramento hidrológico no país. A maioria das aplicações destes modelos se dão em bacias esparsamente ocupadas, cobertas por vegetação nativa ou agricultura. Neste contexto, o presente estudo propõe avaliar a aplicabilidade de modelos de grande escala em bacias urbanizadas por meio da aplicação do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH) na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHPS). Tendo em vista que a precipitação é a principal entrada desses modelos, produtos de precipitação baseados em sensores remotos, incluindo o amplamente utilizado TMPA 3B42V7 e o produto corrigido MERGE, foram validados com dados observacionais. A aplicabilidade dos produtos de precipitação por sensores remotos, assim como a do MGB-IPH na BHPS, foi então avaliada em termos da i) análise de sensibilidade do modelo, ii) calibração e validação, iii) análise dos parâmetros calibrados. A partir da análise de sensibilidade do modelo, aplicado a 16 sub-bacias da BHPS, foi possível identificar que o parâmetro de armazenamento de água no solo (W_m) é o mais influente sobre as vazões simuladas, seguido dos parâmetros de forma da curva de saturação (b), de drenagem sub-superficial (K_{int}), de escoamento subterrâneo (K_{bas}), e de propagação superficial nas mini-bacias (C_s). Além disso, foi identificado que a sensibilidade é dependente das características fisiográficas da bacia, e, nesse contexto, as vazões simuladas a partir de áreas de topografia acentuada são mais sensíveis às variações dos parâmetros quando comparadas a áreas planas. Vale destacar também que o produto de sensoriamento remoto MERGE se mostrou superior aos TMPA 3B42V7 para toda a BHPS, sendo capaz de gerar simulações da vazão satisfatórias sem a perda da representatividade hidrológica dos parâmetros calibrados, reforçando assim a importância de abordagens de correção dos produtos de chuva por sensoriamento remoto. Destaca-se também que as limitações impostas pelas seções antropizadas (seções compostas por grandes barramentos e que impossibilitam a utilização de séries históricas de vazões naturais) são um desafio para a simulação de eventos hidrológicos. Estudos futuros devem focar no desenvolvimento de abordagens para simulação das vazões em seções antropizadas, além de avaliar outras fontes de dados de precipitação potencialmente superiores ao MERGE.

Palavras-chave: MGB-IPH. TRMM. MERGE/CPTEC.

LARGE SCALE HYDROLOGICAL MODELING APPLIED TO THE PARAÍBA DO SUL RIVER BASIN

ABSTRACT

A proper water resources management and engineering is intrinsically dependent on the correct understanding of the hydrological processes. Ideally, such processes are evaluated in terms of *in situ* data. However, due to the incapability of a continuous water resources monitoring as well as the necessity of simulating scenarios, hydrological models have been used. Large-scale models are widely used in Brazil as a consequence of the sparse hydrological monitoring network available. Most applications of such models take place in low-population density watersheds, mostly covered by native vegetation and agricultural lands. In this context, the present study assesses the large-scale hydrological models' applicability in urbanized watersheds. A case study will be carried on the Paraíba do Sul River Basin (BHPS) where the MGB-IPH model will be implemented. Given the strong influence exerted by precipitation, some remote sensing-based precipitation products, including the well-known TMPA 3B42V7 and the bias-corrected MERGE, were validated against gauged precipitation measures before being used in the model. The remote sensing-based precipitation products' applicability, as well as the MGB-IPH's at the BHPS, was evaluated in terms of i) sensitivity analysis of parameters, ii) model calibration and validation, and iii) calibrated parameter analysis. Based on the sensitivity analysis, applied to 16 BHPS sub-watersheds, the water storage soil capacity parameter (W_m) is the most sensitive, followed by the parameters for the saturation curve form (b), sub superficial flow (K_{int}), ground water flow (K_{bas}), and superficial routing (C_s). Moreover, it was found that model's sensitivity is dependent on the watershed's physiographic characteristics. In this context, the simulated flows from complex terrains are more sensitive to parameters variations than those from flatter areas. In addition, it was observed that the remote sensing precipitation product MERGE is superior to the TMPA 3B42V7 for the entire BHPS. This product was also capable of generating satisfactory runoff simulations without calibrating unrealistic parameter values, thus, reinforcing the importance of precipitation bias correction methods. Finally, the limitations imposed by highly anthropized watersheds (mainly those with large dams where natural streamflow calibration is not possible) present a challenge to hydrological simulation. Future studies should focus on the development of highly anthropized watersheds simulation approaches, as well as evaluate potentially superior remote sensing-based precipitation products.

Keywords: MGB-IPH. TRMM. MERGE/CPTEC.

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| Figura 2.1 – Ciclo hidrológico global. | 6 |
| Figura 2.2 – Distribuição da precipitação no ciclo hidrológico. | 7 |
| Figura 2.3 – Escala temporal e espacial dos processos hidrológicos. | 8 |
| Figura 2.4 – Discretização das HRUs por minibacias. | 23 |
| Figura 2.5 – Estrutura do modelo MGB-IPH. | 24 |
| Figura 3.1 – Representação esquemática das etapas do trabalho. | 29 |
| Figura 3.2 – BHPS com seção de controle em São Fidelis -RJ. | 30 |
| Figura 3.3 – Modelo digital de elevação da BHPS. | 35 |
| Figura 3.4 – Uso e cobertura da BHPS. | 36 |
| Figura 3.5 – Classes de solo da BHPS. | 37 |
| Figura 3.6 – Estações hidrometeorológicas da BHPS. | 38 |
| Figura 3.7 – Relações topológicas das sub-bacias da BHPS. | 43 |
| Figura 3.8 – HRUs definidas da BHPS. | 45 |
| Figura 3.9 – Característica temporal das fontes de dados de precipitação. | 47 |
| Figura 4.1 – Resolução espacial das fontes de dados de precipitação. | 56 |
| Figura 4.2 – Precipitação acumulada das sub-bacias da BHPS. | 58 |
| Figura 4.3 – Precipitação acumulada das sub-bacias da BHPS. | 59 |
| Figura 4.4 – Erro diário da precipitação dos produtos TRMM 3B42V7. | 63 |
| Figura 4.5 – Erro diário da precipitação dos produtos TRMM 3B42V7. | 64 |
| Figura 4.6 – Erro diário da precipitação dos produtos MERGE. | 65 |
| Figura 4.7 – Erro diário da precipitação dos produtos MERGE. | 66 |
| Figura 4.8 – Médias mensais dos produtos de precipitação. | 68 |
| Figura 4.9 – Médias mensais dos produtos de precipitação. | 69 |
| Figura 4.10 – Validação dos produtos de precipitação para a BHPS. | 73 |
| Figura 4.11 – Sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação ao <i>NS</i> | 79 |
| Figura 4.12 – Sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação ao <i>NS</i> | 80 |
| Figura 4.13 – Sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação ao <i>NSlog</i> | 83 |
| Figura 4.14 – Sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação ao <i>NSlog</i> | 84 |
| Figura 4.15 – Sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação ao ΔV | 86 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.16 – Sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação ao ΔV | 87 |
| Figura 4.17 – Resultados das simulações a partir das estações pluviométricas convencionais..... | 90 |
| Figura 4.18 – Resultados das simulações a partir do MERGE..... | 94 |
| Figura 4.19 – Curvas de permanência observadas e simuladas..... | 97 |
| Figura 4.20 – Curvas de permanência observadas e simuladas..... | 98 |
| Figura 4.21 – Parâmetro W_m calibrado para as estações convencionais (a) e para o MERGE (b)..... | 100 |
| Figura 4.22 – Parâmetro b calibrado para as estações convencionais (a) e para o MERGE (b)..... | 101 |
| Figura 4.23 – Parâmetro K_{int} calibrado para as estações convencionais (a) e para o MERGE (b)..... | 102 |
| Figura 4.24 – Parâmetro K_{bas} calibrado para as estações convencionais (a) e para o MERGE (b)..... | 103 |
| Figura 4.25 – Parâmetros C_s , C_s e C_s calibrados para as estações convencionais (a) e para o MERGE (b)..... | 103 |
| Figura D.1 – Dispersão das precipitações TMPA 3B42V7..... | 126 |
| Figura D.2 – Dispersão das precipitações TMPA 3B42V7..... | 127 |
| Figura D.3 – Dispersão das precipitações MERGE..... | 128 |
| Figura D.4 – Dispersão das precipitações MERGE..... | 129 |
| Figura F.1 – Vazões simuladas e observadas..... | 131 |
| Figura F.2 – Vazões simuladas e observadas..... | 132 |
| Figura F.3 – Vazões simuladas e observadas..... | 133 |
| Figura F.4 – Vazões simuladas e observadas..... | 134 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|--------------------|
| Tabela 3.1 – Dados utilizados. | 33 |
| Tabela E.1 – Porcentagem das HRUs nas sub-bacias. | 130 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-------------|--|
| AMSR | <i>Advanced Microwave Scanning Radiometer</i> |
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| ANSWERS | <i>Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response System</i> |
| API | Interface de Programação de Aplicações |
| ASI | Agência Espacial Italiana – <i>Italian Space Agency</i> |
| Aw | Clima tropical de inverno seco |
| BHPS | Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul |
| CAMS | <i>Climate Assessment and Monitoring System</i> |
| CDR | <i>Climate Data Record</i> |
| CMORPH | <i>Climate Prediction Center morphing technique</i> |
| CN-SCS | Curva Número – Serviço Americano de Conservação do Solo |
| CPTEC | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos |
| CRU | <i>Climate Research Unit</i> |
| Cw | Clima sub-tropical de inverno seco |
| DHSVM | <i>Distributed Hydrology Soil Vegetation Model</i> |
| DLR | Centro Aeroespacial Alemão |
| D8 | <i>Eight-node</i> |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| ESMA | <i>Explicit soil moisture accounting</i> |
| ETM+ | <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i> |
| GOES/GOE IR | <i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i> |
| GPCC | <i>Global Precipitation Climatology Centre</i> |
| GPM | <i>Global Precipitation Measurement</i> |
| GPL | <i>General Public License</i> |
| GRACE | <i>Gravity Recovery and Climate Experimental</i> |

| | |
|----------|---|
| GSMaP | <i>Global Satellite Mapping of Precipitation</i> |
| GTS | <i>Global telecommunication System</i> |
| HBV | <i>Hydrologiska Byrans Vattenavdelning model</i> |
| HRU | <i>Hydrological Response Units - Unidades de Resposta Hidrológica</i> |
| HTA | Histograma tempo-área |
| HU | Hidrograma unitário |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IDE | Ambiente de Desenvolvimento Integrado |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| IPH | Instituto de Pesquisas Hidráulicas |
| MDE | Modelo digital de elevação |
| MGB-IPH | Modelo de Grandes Bacias – Instituto de Pesquisas Hidráulicas |
| MOCOM-UA | <i>Multiple-Objective Complex Evolution – University of Arizona</i> |
| MHS | <i>Modify Heuristic Search</i> |
| MVIRI | <i>Meteosat Visible and Infra-Red Imager</i> |
| NASA | <i>National Aeronautics and Space Administration</i> |
| NASDA | <i>Agência de Desenvolvimento Espacial do Japão</i> |
| OLI-TIRS | <i>Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor</i> |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| PCH | Pequena Central Hidrelétrica |
| PERSIANN | <i>Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks</i> |
| PFS | <i>Priority-First-Search</i> |
| PR | <i>Precipitation Radar</i> |
| RT | <i>Real time</i> |

| | |
|-------------|--|
| RTC | <i>Radiometric Terrain Correction Product</i> |
| SAR | <i>Radar de Abertura Sintética</i> |
| SCE-UA | <i>Shuffled Complex Evolution – University of Arizona</i> |
| SHE | <i>Système Hydrologique Européen</i> |
| SIGs | <i>Sistemas de informações geográficas</i> |
| SRTM | <i>Shuttle Radar Topographic Mission</i> |
| SSM/I | <i>Special Sensor Microwave Imager</i> |
| SSMIS | <i>Special Sensor Microwave Imager/Sounder</i> |
| Stanford IV | <i>Stanford Watershed Model</i> |
| TMI | <i>Tropical Rainfall Measuring Mission Microwave Imager</i> |
| TMPA | <i>Tropical Rainfall Measure Mission Multisatellite Precipitation Analysis</i> |
| TRMM | <i>Tropical Rainfall Measure Mission</i> |
| UTC | <i>Coordinated Universal Time</i> |
| VIRS | <i>Visible and Infrared Sensor</i> |
| VIC | <i>Variable Infiltration Capacity</i> |

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Justificativa | 3 |
| 1.2 Objetivos..... | 4 |
| 1.2.1 Objetivo geral | 4 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 4 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 5 |
| 2.1 Processos hidrológicos | 5 |
| 2.2 Hidrologia aplicada e disponibilidade de dados | 8 |
| 2.2.1 Estimativa indireta da precipitação..... | 10 |
| 2.3 Aplicações de sensores orbitais para a estimativa da precipitação | 14 |
| 2.4 A estimativa da vazão..... | 15 |
| 2.5 Escolha do modelo hidrológico | 17 |
| 2.6 Modelos determinísticos do tipo chuva-vazão | 18 |
| 2.6.1 Modelos baseados em evento | 18 |
| 2.6.2 Modelos contínuos | 20 |
| 2.6.3 Modelos desenvolvidos no Brasil | 21 |
| 2.7 Estrutura do MGB-IPH..... | 22 |
| 2.8 Aplicações do MGB-IPH | 27 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 29 |
| 3.1 Área de estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul | 29 |
| 3.2 Material | 32 |
| 3.2.1 Dados de entrada do modelo | 34 |
| 3.2.2 Programas computacionais e linguagens de programação..... | 41 |
| 3.3 Métodos..... | 43 |
| 3.3.1 Pré-processamento de dados espaciais | 44 |
| 3.3.2 Processamento de dados hidrológicos..... | 45 |
| 3.3.2.1 Preparo dos dados de chuva | 46 |
| 3.3.2.2 Validação da precipitação | 47 |
| 3.3.2.3 Preparo dos dados de vazão | 50 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.3.2.4 | Preparo dos dados de clima e vegetação | 50 |
| 3.3.3 | Análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo..... | 51 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 55 |
| 4.1 | Precipitação por sensores remotos | 55 |
| 4.1.1 | Avaliação dos produtos de precipitação..... | 57 |
| 4.1.2 | Validação dos produtos de precipitação..... | 71 |
| 4.2 | Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo..... | 76 |
| 4.2.1 | Influência sobre as vazões máximas..... | 77 |
| 4.2.2 | Influência sobre as vazões mínimas | 81 |
| 4.2.3 | Influência sobre as vazões médias | 85 |
| 4.3 | Calibração e validação..... | 89 |
| 4.3.1 | Análise da curva de permanência | 95 |
| 4.3.2 | Análise dos parâmetros calibrados | 99 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 104 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 107 |
| | APÊNDICE A – LISTA DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS CONVENCIONAIS | 123 |
| | APÊNDICE B – LISTA DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS..... | 124 |
| | APÊNDICE C – LISTA DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS..... | 125 |
| | APÊNDICE D – ANÁLISE DE DISPERSÃO DAS PRECIPITAÇÕES | 126 |
| | APÊNDICE E – PORCENTAGEM DAS HRUs NAS SUB-BACIAS..... | 130 |
| | APÊNDICE F – VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS..... | 131 |
| | APÊNDICE G – PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO | 135 |

1 INTRODUÇÃO

A influência exercida pelo ser humano nos ciclos biogeoquímicos do planeta é potencializada pelo crescimento populacional, aumento na demanda por recursos naturais, desenvolvimento de tecnologias e consequente aumento da capacidade de geração de impactos. Dentre estes grandes ciclos, o hidrológico se mostra particularmente sensível aos processos de rápida urbanização, industrialização, mudanças de uso e cobertura da terra etc., observados nas últimas décadas (DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015). Além disso, questões ambientais como a falta ou má distribuição da água para consumo, mitigação e previsão de eventos hidrológicos extremos e potenciais desastres estão entre os tópicos de crescente interesse pela a sociedade (FAN; COLLISCHONN, 2014; FAN et al., 2015). Neste contexto, modelos hidrológicos são utilizados como ferramenta de gestão e engenharia dos recursos hídricos e na avaliação dos impactos das mudanças climáticas, mudanças de uso e cobertura do solo, dos desastres naturais, dos eventos extremos e da qualidade da água sobre os processos hidrológicos (LOPES et al., 2018).

Os modelos hidrológicos utilizam representações simplificadas dos processos hidrológicos, permitindo que sejam realizadas estimativas das variáveis hidrológicas a partir de generalizações derivadas de dados observacionais e parâmetros representativos. Beskow et al. (2013) destacam que o monitoramento hidrológico no Brasil se limita, em sua maioria, a grandes bacias hidrográficas com elevado potencial econômico, especialmente no que diz respeito a geração de energia, irrigação e abastecimento urbano. Esta característica do monitoramento, aliada a escassez de dados e ao princípio da parcimônia, faz com que modelos hidrológicos de grande escala sejam uma alternativa para o desenvolvimento de estudos dos recursos hídricos no país. No Brasil, o Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) (COLLISCHONN; TUCCI, 2001; COLLISCHONN et al. 2007; PAIVA et al. 2013) vem sendo extensivamente utilizado para a simulação hidrológica.

O MGB-IPH foi desenvolvido com base nos modelos de grandes bacias LARSIM e VIC, com adaptações nas formulações da evapotranspiração, percolação e

propagação das vazões (GETIRANA et al., 2010). O modelo é composto por 4 módulos principais, sendo o primeiro utilizado para o cálculo do balanço hídrico, o segundo para o cálculo da evapotranspiração, seguido da propagação do escoamento até a rede de drenagem e da propagação do escoamento na rede de drenagem até o exutório (COLLISCHONN et al., 2007; PAIVA et al., 2013); todos eles integrados a Sistemas de Informações Geográficas (FAN; COLLISCHONN, 2014; SIQUEIRA et al., 2016; PONTES et al., 2017) e compatíveis a produtos de sensoriamento remoto (MEDEIROS et al., 2018). Outra característica importante para a aplicação do modelo sob o contexto de monitoramento hidrológico no Brasil é a presença de apenas 6 parâmetros calibráveis (COLLISCHONN, 2001), sendo os demais obtidos por meio de banco de dados preexistentes, observações a campo, características fisiográficas da área de estudo e/ou limiares estabelecidos na literatura.

O modelo MGB-IPH é amplamente utilizado na simulação de grandes bacias tropicais, majoritariamente coberta por áreas de vegetação nativa, pouco ou não ocupadas pelo homem, como a bacia Amazônica (NETO et al., 2006; COLLISCHONN; COLLISCHONN; TUCCI, 2008; GETIRANA et al., 2010; PAIVA; COLLISCHONN; BUARQUE, 2011; PAIVA et al., 2012; PAIVA et al., 2013; CORREA et al., 2017). O modelo também foi extensivamente utilizado em bacias sob maior influência da ocupação agrícola, como as bacias dos rios Uruguai (COLLISCHONN et al., 2005), São Francisco (SILVA et al. 2007; FAN et al., 2015), Grande (TUCCI et al., 2008; NÓBREGA et al., 2011), Paraná (PAZ et al., 2010; BRAVO et al., 2014), Doce e Tocantins (FAN et al., 2015) e da lagoa Mirim (MUNAR et al., 2018) e laguna dos Patos (LOPES et al., 2018). Apesar da comprovada aplicabilidade do modelo para diferentes contextos de clima, topografia e ocupação, pouca ênfase tem sido dada a bacias localizadas em regiões altamente urbanizadas e sob forte influência da indústria, extração de água para o consumo humano e de obras de engenharia hídrica.

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHPS) abrange áreas dos três estados mais populosos do Brasil (São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais); englobando grandes centros urbanos como partes da região metropolitana de São Paulo, os municípios de Jacareí, São José dos Campos, Taubaté, Resende,

Volta Redonda, Juiz de Fora e Campos dos Goytacazes. Além disso, a BHPS compreende uma das regiões mais desenvolvidas e industrializadas do país, a qual depende das intervenções realizadas nos recursos hídricos. Dentre as intervenções realizadas na BHPS destacam-se o grande número de barragens construídas e os volumes de água derivada não somente para o abastecimento de municípios dentro da área de captação da bacia mas também grandes municípios fora da bacia como São Paulo e Rio de Janeiro (OVALLE et al., 2013; MARQUES et al., 2017). Estudos recentes têm abordado os impactos causados pelos processos de ocupação da bacia sobre o rio Paraíba do Sul, especialmente no que diz respeito a qualidade de água (MARQUES et al., 2017; PACHECO et al., 2017) e a possibilidade de eventual restauração do meio a partir da valoração dos serviços ecossistêmicos (KAHN; VÁSQUEZ; REZENDE, 2017). Uma crescente atenção também é dada a avaliação dos atributos biofísicos da bacia. O projeto “Recursos Hídricos da Bacia do Paraíba do Sul: Integrando aspectos naturais e antrópicos” (projeto 2180/2017 CAPES-ANA) se insere nesse contexto ao propor a modelagem integrada de atributos biofísicos, por meio indicadores de degradação, modelagem climática, modelagem de uso e cobertura da terra e modelagem hidrológica.

Neste contexto de significativas intervenções nos recursos hídricos e dado a demanda por estudos hidrológicos para grandes bacias sob forte influência dos efeitos da urbanização e mais especificamente na BHPS, faz-se necessário o desenvolvimento de um estudo avaliativo das capacidades e limitações da modelagem hidrológica sob as condições supracitadas.

1.1 Justificativa

O adequado manejo dos recursos hídricos é dependente, entre outras coisas, da possibilidade de simulação de situações hipotéticas, projeção de cenários futuros e representação dos processos hidrológicos. Assim sendo, a modelagem hidrológica surge como uma importante ferramenta de gestão e engenharia hídrica. Modelos hidrológicos de grandes bacias são adequados para as condições impostas pelo monitoramento hidrológico no Brasil. Porém, tais aplicações são, em sua maioria, realizadas em bacias rurais ou compostas

majoritariamente por vegetação nativa, deixando uma lacuna na compreensão dos processos hidrológicos em grandes bacias urbanizadas. Portanto, é imprescindível a identificação dos potenciais e limitações dos modelos de grandes bacias em uso no país em áreas sob forte influência dos processos de urbanização.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como principal objetivo simular os processos hidrológicos na BHPS por meio do modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH utilizando diferentes produtos de precipitação por sensoriamento remoto.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Avaliar o potencial de utilização de dados de chuva derivados de produtos de sensoriamento remoto (TRMM) e produtos de sensoriamento remoto corrigidos (MERGE) em comparação com dados pluviométricos convencionais.
- 2) Avaliar a sensibilidade dos parâmetros do modelo sob as condições apresentadas pela área de estudo.
- 3) Calibrar o modelo MGB-IPH aplicado à BHPS.
- 4) Avaliar o desempenho do modelo nas sud-bacias hidrográficas com maior interferência antrópica (i.e. seções compostas por grandes barramentos e/ou urbanizadas).

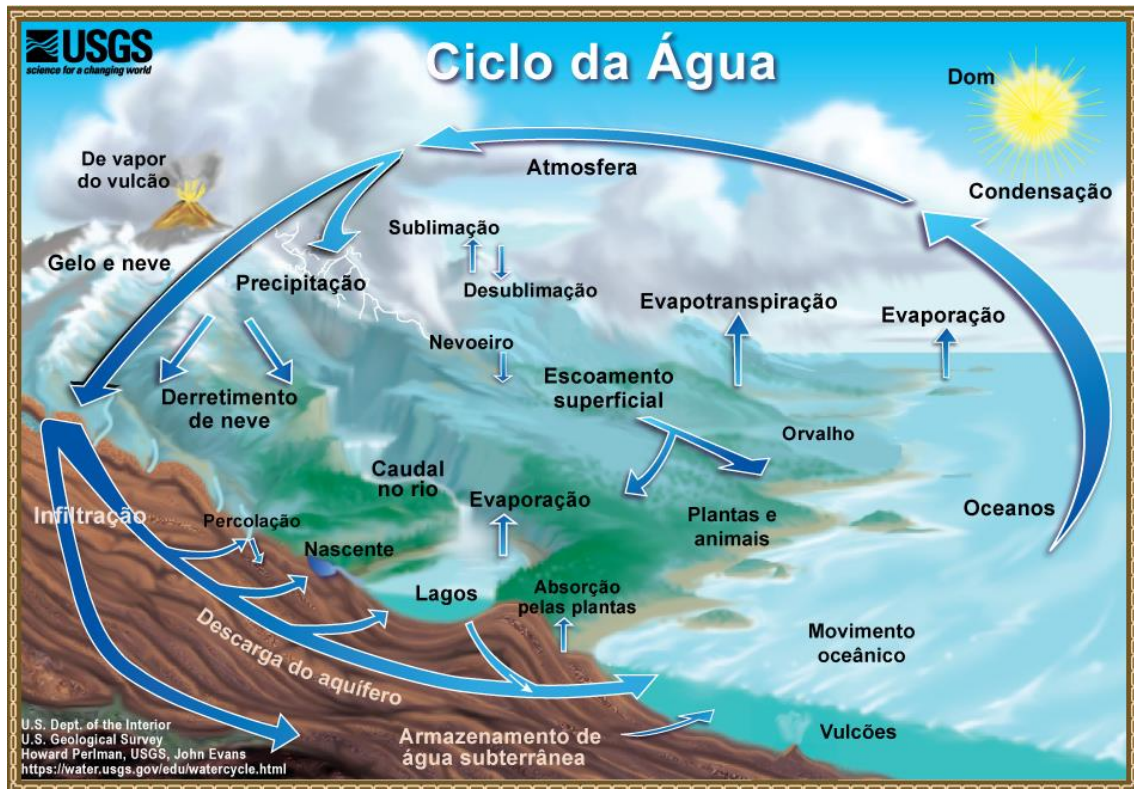
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento do presente estudo, é necessário a definição de alguns conceitos. Primeiramente é apresentado o ciclo hidrológico seguido de uma explanação sobre as fontes de dados de precipitação, visto que esta é a principal entrada do modelo hidrológico utilizado. Posteriormente, é feita uma contextualização do MGB-IPH em relação ao histórico de desenvolvimento de modelos hidrológicos. Em seguida, as equações implementadas no modelo são detalhadamente descritas. Por fim, é apresentada uma revisão das aplicações do modelo.

2.1 Processos hidrológicos

A hidrologia é a ciência que estuda o ciclo hidrológico englobando a ocorrência, distribuição, movimento e propriedades da água (VIESSMAN; LEWIS, 2003). O ciclo hidrológico é um fenômeno global, impulsionado por energia solar, no qual a água é evaporada pelo sol e transferida para a atmosfera, o vapor na atmosfera é incorporado pelas nuvens e posteriormente precipitado de volta para a superfície terrestre (TUCCI, 2009). O ciclo hidrológico global é um ciclo fechado onde a distribuição da água varia no espaço e no tempo (VIESSMAN; LEWIS, 2003) (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Ciclo hidrológico global.

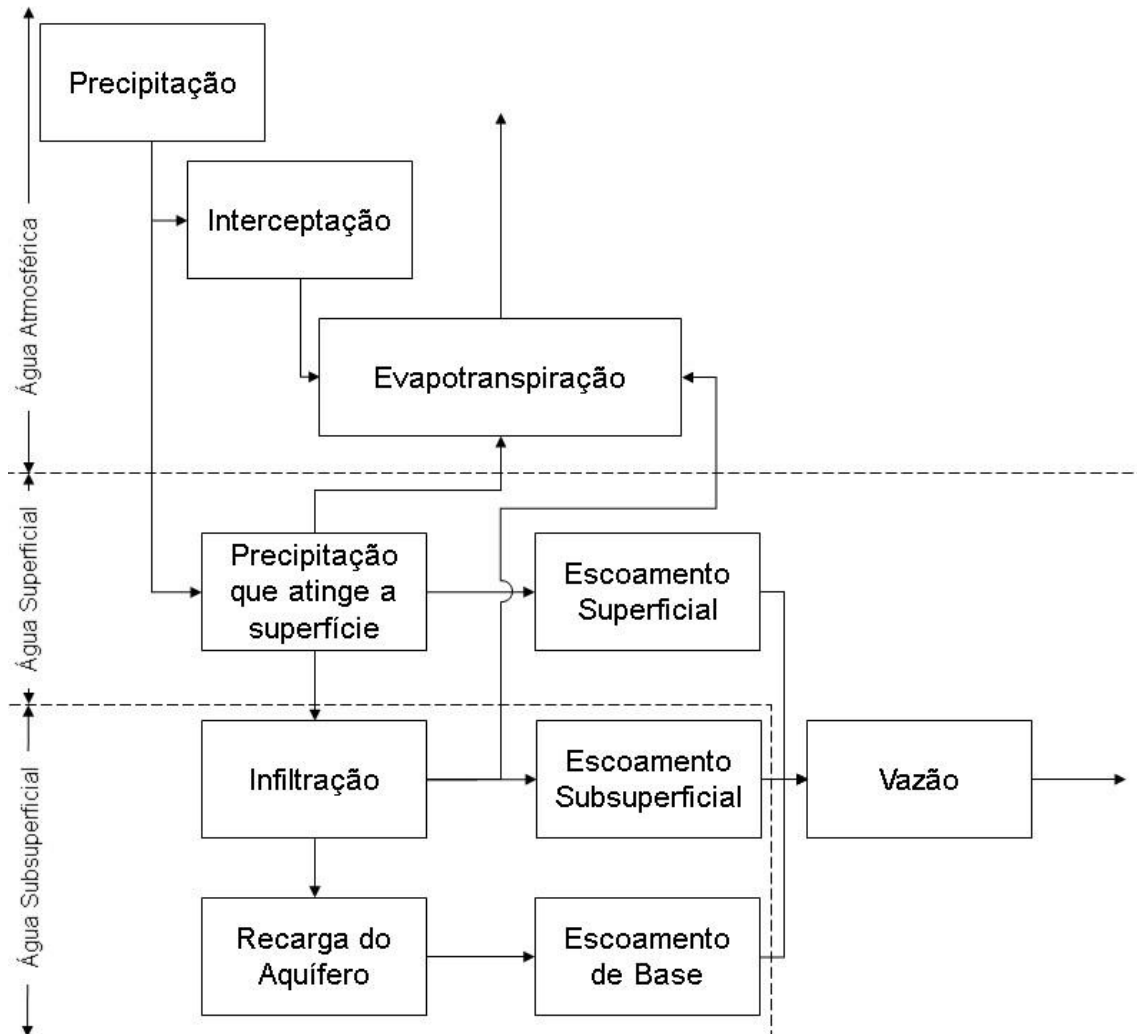


Fonte: United States Geological Survey (2019).

O ciclo hidrológico é extremamente complexo e por isso é tradicionalmente simplificado a partir dos seus seis principais componentes: precipitação, infiltração, evaporação, transpiração, escoamento superficial e de base. Outra abordagem para a simplificação do ciclo hidrológico se dá por meio do conceito de sistema (i.e. partes conectadas que formam o todo) a partir do qual os principais componentes do ciclo hidrológico podem ser analisados separadamente em subsistemas (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). A Figura 2.2 representa um sistema de distribuição da precipitação no ciclo hidrológico de maneira simplificada. A precipitação incidente sobre o continente pode ser interceptada e posteriormente evaporada. Uma parcela da precipitação pode atingir a superfície. Esta parcela pode ser evaporada de volta para a atmosfera, infiltrada no solo ou escoar superficialmente para as posições de menor altitude. A parcela infiltrada pode se propagar lateralmente, gerando escoamento subsuperficial, ser capturada pelas raízes e ser transferida para a atmosfera por transpiração ou ainda percolar para as camadas saturadas do solo. A parcela

infiltrada que atinge as camadas inferiores do solo é responsável pela recarga do aquífero e pelo escoamento de base. Os escoamentos gerados, i.e. escoamentos superficial, subsuperficial e de base, alimentam rede de drenagem, formando a vazão observada nos rios.

Figura 2.2 – Distribuição da precipitação no ciclo hidrológico.

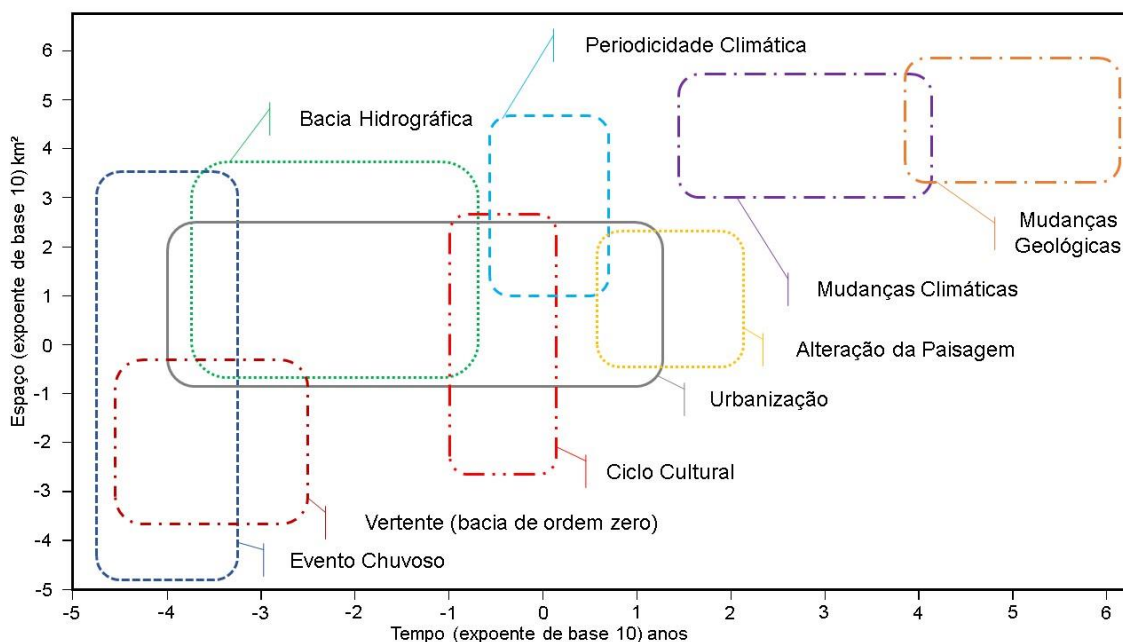


Fonte: Adaptado de Chow; Maidment e Mays (1988).

Vale destacar que os processos supracitados, apesar de conectados, ocorrem em um amplo intervalo de escalas espaço-temporais (Figura 2.3). Por exemplo, um evento de chuva que ocorre na escala de minutos pode eventualmente contribuir para a recarga de um aquífero cujo tempo de residência está na escala de centenas ou milhares de anos. Ou ainda, as mudanças climáticas que ocorrem a nível global, podem influenciar diretamente a vazão observada em uma bacia hidrográfica de pequena ordem. A questão da escala na hidrologia é

de fundamental importância devido à necessidade de representação dos processos assim como de transferência das informações em diferentes escalas espaço-temporais.

Figura 2.3 – Escala temporal e espacial dos processos hidrológicos.



Fonte: Adaptado de Tucci (2005).

2.2 Hidrologia aplicada e disponibilidade de dados

A compreensão dos processos hidrológicos é fundamental para o suporte a atividades antrópicas e ambientais, incluindo: dimensionamento e operação de estruturas hidráulicas, abastecimento de água, tratamento de águas residuais, irrigação, drenagem, geração de energia elétrica, controle de cheias, navegação, controle de erosão e produção de sedimento, controle de salinidade, usos recreativos da água e conservação da fauna e flora (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Entretanto, a adequada execução de tais atividades é diretamente dependente da disponibilidade de dados hidrológicos.

Idealmente, obras de engenharia hidráulica e planos de gestão dos recursos hídricos devem ser executados em bacias hidrográficas monitoradas, onde os processos hidrológicos assim como o dimensionamento dos possíveis impactos ambientais podem ser devidamente descritos. Porém, a maior parte do país ainda dispõe de densidade de estações hidrológicas convencionais (incluindo para o

monitoramento da precipitação, evaporação, vazão, sedimentos e qualidade de água) abaixo dos limites mínimos estipulados pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1994). Além disso, a rede hidrológica disponível é irregularmente distribuída no território (GETIRANA et al., 2010), sendo majoritariamente concentrada em grandes bacias potencialmente utilizadas para geração de energia elétrica, abastecimento urbano e/ou irrigação (BESKOW; NORTON; MELLO, 2013).

Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto tem suprido a demanda de dados em estudos hidrológicos. Produtos de precipitação derivados de sensores orbitais, como por exemplo o *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) e seu sucessor *Global Precipitation Measurement* (GPM), apresentam vantagens sobre o monitoramento convencional, não somente quanto a maior cobertura espacial, mas também devido à rapidez com a qual estes dados são disponibilizados (CLARKE et al., 2011); e por estes motivos vêm sendo amplamente utilizados na hidrologia (PAIVA et al., 2013; FALCK et al., 2015; FAN et al., 2016; CORREA et al., 2017; FLEISCHMANN et al., 2018). Sensores orbitais têm ainda auxiliado no desenvolvimento do conhecimento de processos de: i) infiltração e armazenamento subterrâneo de água, estudados em termos de gravimetria a partir do *Gravity Recovery and Climate Experimental* (GRACE) (PAIVA et al., 2013; CORREA et al., 2017; SIQUEIRA et al., 2018); ii) evapotranspiração, a partir de estimativas derivadas da combinação de dados orbitais a respeito do balanço radiativo superficial e da cobertura do solo, do qual se destaca a recentemente publicada base de dados *Climate Data Record* (CDR), por Zhang et al. (2018); e iii) escoamento superficial, por meio da compreensão da dinâmica dos eventos de vazão extrema através do mapeamento de áreas alagadas a partir de produtos de radares orbitais como o *ALOS PALSAR Radiometric Terrain Correction Product* (RTC) (PONTES et al., 2017), ou ainda potencialmente alagáveis derivadas de dados do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) (RENNÓ et al., 2008).

2.2.1 Estimativa indireta da precipitação

A precipitação é principal forma de entrada de água em uma bacia hidrográfica. Segundo Ramakrishna e Nasreen (2013), a precipitação é responsável pela deposição anual de aproximadamente 505.000 km³ (ou 990mm) de água no planeta. Devido a sua grande variabilidade espacial e temporal, a precipitação é uma das variáveis atmosféricas de mais difícil medição (ZHU et al., 2016). Convencionalmente, a precipitação é medida de forma direta e pontual por meio de pluviômetros espalhados na área de estudo. Entretanto, os pluviômetros, apesar de gerarem estimativas precisas, apresentam limitações espaciais intrínsecas às estimativas pontuais. Além disso, as estações pluviométricas estão sujeitas aos efeitos do vento e da evapotranspiração, os quais podem comprometer a qualidade das medições (MAGGIONI; MEYERS; ROBINSON, 2016). Isso faz com que não exista consenso claro a respeito de qual método de medição provê os melhores resultados, especialmente no contexto de modelagem hidrológica (TOBIN; BENNETT, 2009). Logo, métodos indiretos de medição se apresentam como alternativas às estações pluviométricas convencionais.

De acordo com Tapiador et al. (2012), existem três métodos para a estimativa indireta da precipitação por meio de sensores remotos, sendo: i) baseado na temperatura de brilho do topo das nuvens, a partir de dados do infravermelho termal, ii) derivado da análise do espalhamento da emissividade oriunda da superfície terrestre causada pelas nuvens, a partir do uso de sensores passivos de microondas, e iii) baseado na relação entre a refletividade e o diâmetro das gotículas de chuva através de sensores ativos de microondas. O último, de estimativas derivadas de uma rede meteorológica de radares em solo, apesar de superar as limitações espaço-temporais das estações convencionais, é limitado por problemas relacionados a calibração inter-radar, efeitos de contaminação por retroespalhamento de alvos na superfície e atenuação e extinção do sinal (MAGGIONI; MEYERS; ROBINSON, 2016).

Segundo Chokngamwong e Chiu (2008), técnicas de sensoriamento remoto por sensores orbitais, em especial sensores passivos que se utilizam das faixas do

infravermelho termal e microondas, proporcionam uma excelente opção para o monitoramento contínuo da precipitação. Ao integrar essas duas fontes de dados, é possível obter um produto de precipitação de alta resolução espaço-temporal uma vez que ambos possuem características complementares (THIEMIG et al., 2013): i) dados de infravermelho termal, podem ser coletados para todo o globo em menos de uma hora, sendo particularmente apurados para detecção da presença ou ausência de precipitação; por outro lado, nenhuma informação é obtida do interior da nuvem, limitando a estimativa da quantidade de precipitação, em especial em chuvas de menor intensidade; ii) tendo em vista as relações físicas entre a emissividade oriunda da superfície e a precipitação, dados coletados por sensores passivos de microondas se mostram mais adequados para a estimativa da quantidade de precipitação; no entanto em um maior tempo de revisita e resoluções espaciais mais grosseiras.

Nas últimas décadas, diversos algoritmos que integram dados de sensores passivos de microondas (e.g. *Special Sensor Microwave Imager – SSM/I*, *Special Sensor Microwave Imager/Sounder – SSMIS*, *Advanced Microwave Scanning Radiometer – AMSR*, e o *Tropical Rainfall Measuring Mission Microwave Imager – TMI*) e Infravermelho geostacionário (e.g. *Geostationary Operational Environmental Satellite – GOES/GOE IR*, *Visible and Infrared Sensor – VIRS* e *Meteosat Visible and Infra-Red Imager – MVIRI*) foram desenvolvidos, incluindo o: *Tropical Rainfall Measuring Mission Multisatellite Precipitation Analysis* (TMPA) versões *real-time* e *research* (3B42-RT e 3B42, respectivamente), *Global Satellite Mapping of Precipitation* (GSMaP), *Climate Prediction Center morphing technique* (CMORPH) e o *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks* (PERSIANN) (MAGGIONI; MEYERS; ROBINSON, 2016). Tendo em vista a gama de produtos de precipitação por sensores orbitais, Thiemiig et al. (2013) recomenda a escolha daquele que apresenta os melhores resultados com o menor esforço de processamento, correção e validação. Os produtos TRMM se destacam nesse contexto devido sua ampla utilização e obtenção de resultados aceitáveis, mesmo quando não corrigidos, principalmente quando aplicado a estudos hidrológicos (COLLISCHONN; COLLISCHON; TUCCI, 2008; ZHU et al., 2016).

Os produtos de precipitação do TRMM, disponíveis de 1998 a 2015, foram desenvolvidos por meio de uma técnica multissensores que combina dados de microondas passivo de satélites de baixa órbita e de dados do infravermelho obtidos por uma constelação internacional de satélites de órbita geossíncrona. Essa combinação é possível devido à forte relação física entre as interferências observadas nos dados de microondas e as partículas de água na atmosfera, dados estes coletados a baixa resolução temporal e espacial, e dados de infravermelho de resolução espacial mais fina (4 x 4 km) e temporal (30 minutos) (HUFFMAN et al., 2007). O produto TRMM 3B42, de resolução espacial de 0,25° x 0,25° e temporal de 3 horas passa ainda por um processo adicional de calibração com dados do *Precipitation Radar* (PR) e dados acumulados mensais de estações pluviométricas convencionais. Apesar dos esforços de calibração dos produtos TRMM, erros têm sido reportados na literatura.

Thiemig et al. (2013) observaram um desempenho muito superior dos produtos TRMM em regiões planas quando comparado a regiões de relevo acentuado. Tong et al. (2014) detalham que, como os sensores de microondas estimam precipitação a partir do espalhamento causado principalmente pelo conteúdo de gelo nas nuvens (relação Z-R), chuvas orográficas de topo de nuvem de maior temperatura, comuns em regiões tropicais montanhosas, tendem a ser subestimadas. Maggioni et al. (2016) destacam que a inabilidade de sensores do infravermelho termal em distinguir nuvens que resultam em chuva, compromete não somente a detecção de eventos como também geram erros proporcionais a magnitude das chuvas. Os autores apontam ainda para a dependência sazonal dos erros observados, uma vez que durante estações quentes caracterizadas por chuvas intensas, maior correlação e menor viés são observados nas estimativas; enquanto que, nas estações frias, quando as chuvas são de menor intensidade, a detecção de eventos chuvosos se torna mais difícil a partir de sensores orbitais. Já na América do Sul, Rozante et al. (2010) destacam que os produtos TRMM tendem a subestimar precipitações provindas de nuvens de elevada temperatura, como observado no nordeste brasileiro, e superestimar precipitações em regiões cobertas por nuvens de menor temperatura, comuns entre o Brasil, Argentina e Paraguai.

A presença de erros sistemáticos nos produtos TRMM tem levado ao desenvolvimento de produtos associados a dados coletados *in situ* (CLARKE et al., 2011). Rozante et al. (2010) desenvolveram um produto denominado MERGE, derivado de uma base de dados pluviométricos para a América do Sul, composta por mais de 1500 estações pluviométricas e dados TRMM em tempo real (RT). O MERGE tem demonstrado resultados satisfatórios quando utilizado em diversas regiões do continente (BRITO; VEIGA; YOSHIDA, 2014; VASCONCELOS et al., 2015; FAN et al., 2015; PONTES et al., 2017). Segundo Tong et al. (2014), a incorporação de precipitações observadas a partir de estações convencionais aos produtos de sensores remotos tende a reduzir o erro total devido ao ajuste das amplitudes das precipitações detectadas. Entretanto, essa abordagem não afeta as precipitações não detectadas, visto que a mesma não acrescenta novos eventos à série histórica.

Recentemente, abordagens mais complexas foram propostas para a estimativa espacialmente distribuída da precipitação. O *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* (MSWEP) (BECK et al., 2017) disponibiliza séries históricas diárias de precipitação global de 1979 a 2015 com resolução temporal de 3 horas e espacial de 0,25° a partir da junção de dados orbitais, pluviométricos convencionais e dados de reanálise. As precipitações de longo termo disponibilizadas pelo MSWEP são baseadas em dados CHPclim, corrigida com bases de dados regionais de maior acurácia e para os efeitos orográficos. A variabilidade temporal das precipitações é derivada de duas abordagens de interpolação de dados *in situ* (CPC Unified e GPCC), três produtos de sensoriamento remoto (CMORPH, GSMaP-MVK e TRMM 3B42RT) e duas abordagens de reanálise de dados atmosféricos globais (ERA-Interim e JRA-55). Estudos iniciais da aplicabilidade deste produto em estudos de modelagem hidrológica têm apontado para um melhor ajuste das vazões estimadas aos dados observados, quando comparado a produtos de sensoriamento remoto corrigidos apenas para estações pluviométricas convencionais (BECK et al. 2017; SIQUEIRA et al., 2018). Porém, esses dados não são disponibilizados publicamente, o que limita a aplicação e disseminação desses produtos.

2.3 Aplicações de sensores orbitais para a estimativa da precipitação

Nas últimas duas décadas, uma grande quantidade de estudos hidrológicos foram desenvolvidos a partir dos produtos do TRMM. Em busca de uma compreensão geral da aplicabilidade desses produtos, os primeiros estudos hidrológicos utilizando o TRMM se limitaram a sua aplicação e/ou comparação entre versões desses produtos ou estações convencionais. Chokngamwong e Chiu (2008) compararam duas versões dos produtos TMPA 3B42 para todo o território da Tailândia, encontrando melhorias significativas nas estimativas da precipitação nas versões até então mais recentes, tanto na análise diária quanto mensal. A aplicabilidade do TRMM como entrada de modelos hidrológico também foi exaustivamente avaliada. Collischonn et al. (2008) compararam os produtos TRMM diários com a rede pluviométrica disponível para a bacia do Rio Tapajós, encontrando resultados para a modelagem hidrológica semelhantes quando da utilização de ambas fontes de dados. Su et al. (2008) utilizaram os produtos TRMM 3B42 para a modelagem hidrológica na bacia do Rio da Prata; os autores destacam uma maior concordância entre o TRMM e os dados convencionais, e conseqüentemente com os resultados da modelagem, quando analisados mensalmente. Tobin e Bennett (2009) avaliaram os produtos supracitados nas bacias do Rio Nuances e do Rio Grande, entre os Estados Unidos e o México. Os autores observaram que os produtos TRMM geram resultados aceitáveis e comparáveis com os de redes meteorológicas escassas, e, portanto, são indicados para locais onde o monitoramento da precipitação é limitado.

Estudos recentes, no entanto, têm concentrado esforços na análise qualitativa e na validação dos produtos de sensoriamento remoto. Bitew e Gebremichael (2011) propuseram a utilização de diversas estatísticas na avaliação de 4 produtos de precipitação por sensoriamento remoto no noroeste da Etiópia. Os autores concluíram que todos os produtos avaliados apresentam viés negativo, o qual pode comprometer estudos hidrológicos, em especial aqueles relacionados ao cálculo balanço hídrico. Ouma et al. (2012) realizaram uma análise comparativa multi-temporal na escala de bacia do TRMM 3B42 em relação aos produtos de estações convencionais, interpoladas para o oeste do

Quênia, por meio da validação-cruzada. Os autores observaram uma maior concordância entre os produtos de precipitação, em particular para os produtos diários, se agregados espacialmente na escala de bacia. Thiemi et al. (2013) destacam os esforços na correção de produtos de precipitação em termos de ajuste do viés. Após avaliar técnicas de correção, os autores recomendam a aplicação da correção de viés somente em casos específicos, uma vez que tal correção não produz melhorias significativas se os dados já apresentam boa qualidade intrínseca ou foram previamente calibrados.

Devido sua proposta superioridade por meio de ajustes com dados *in situ*, os produtos MERGE vêm sendo utilizados em estudos ambientais no continente Sul-americano. Brito et al. (2014) utilizaram 15 anos da série do MERGE (1998-2013) para classificação das chuvas intensas sobre a bacia amazônica por meio de índices climatológicos. Vasconcelos et al. (2015) analisaram a susceptibilidade da vegetação amazônica ao fogo, demonstrando a adequabilidade dos produtos MERGE em anos de seca severa e anos sem seca. Fan et al. (2015) empregaram uma adaptação dos produtos MERGE na previsão de cheias na bacia hidrográfica do rio Tocantins. A partir desses produtos os autores geraram um sistema de previsão capaz de identificar o sinal das cheias com até 3 dias de antecedência. Embora esses produtos sejam publicamente disponibilizados e aplicados em diferentes contextos, pouca atenção tem sido dada a sua validação para fins hidrológicos.

2.4 A estimativa da vazão

A bacia hidrográfica pode ser entendida como um sistema que transforma precipitação em vazão. Portanto, a vazão é a principal saída do sistema, capaz de refletir todos os processos do ciclo hidrológico (Figura 2.2).

Estimativas confiáveis da vazão, assim como dos processos a ela relacionados, são as principais informações para a tomada de decisão no manejo dos recursos hídricos (SIQUEIRA et al., 2018). Diversas abordagens têm sido propostas para a estimativa da vazão, dentre as quais se destacam as baseadas em princípios da hidrologia estatística, estocástica e determinística.

Princípios da hidrologia estatística podem ser utilizados tanto em seções monitoradas, a partir da qual se busca estimar a magnitude e frequência de eventos hidrológicos extremos, quanto em seções não monitoradas onde tais estimativas são feitas a partir do agrupamento de seções hidrológicamente semelhantes; a estas abordagens se dão os nomes de *at-site flood frequency analysis* e *regional flood frequency analysis*, respectivamente (NAGHETTINI, 2017). No entanto, a estimativa de um único valor de vazão de projeto, sem a descrição dos processos de ascensão e recessão das vazões pode ser insuficiente, limitando a aplicabilidade dos modelos estatísticos. Ademais, descrições qualitativas dos processos hidrológicos envolvidos na geração das vazões podem ser de interesse, fazendo com que abordagens hidrológicamente mais complexas, e.g. modelos do tipo chuva-vazão, sejam priorizadas (CALDEIRA et al., 2019). O uso de modelos chuva-vazão é, na maioria dos casos, a melhor alternativa para o desenvolvimento de estudos dos recursos hídricos, em especial em locais onde o monitoramento hidrológico das vazões é escasso, visto a maior disponibilidade de estações pluviométricas do que fluviométricas (BESKOW et al., 2011a).

Uma das principais diferenciações de modelos chuva-vazão se dá entre modelos estocásticos e determinísticos (TUCCI, 2005). Por definição, modelos estocásticos são aqueles que permitem algum grau de aleatoriedade nos valores de saída do modelo (e.g. vazão) devido às incertezas e variabilidades relacionadas as variáveis de entrada, condições de contorno e/ou parâmetros do modelo (BEVEN, 2012). Por sua vez, se o modelo segue leis definidas sem considerar a lei das probabilidades, resultando para um dado valor de entrada um único valor de saída, este pode ser classificado como determinístico (TUCCI, 2005). Apesar do caráter aleatório dos processos hidrológicos, Beven (2012) destaca que a maioria dos modelos do tipo chuva-vazão são do tipo determinístico, uma vez que tais processos estocásticos observados podem ser satisfatoriamente aproximados por abordagens determinísticas (VIESSMAN; LEWIS, 2003).

Modelos hidrológicos podem também ser divididos segundo a abordagem adotada na avaliação temporal dos fenômenos. Dessa forma, modelos contínuos

(ou sequenciais) são aqueles cujos fenômenos hidrológicos são avaliados continuamente no tempo, enquanto os modelos baseados em evento são fundamentados em eventos isolados de precipitação-vazão (VIESSMAN; LEWIS, 2003).

Além disso, modelos hidrológicos podem ser classificados como concentrados, isto é, modelos que ignoram a variabilidade espacial dos fenômenos, ou distribuídos, quando as variáveis representadas no modelo variam no espaço (TUCCI, 2005). Devido à maior facilidade de manuseio de informações espacialmente distribuídas em sistemas de informações geográficas (SIGs), modelos distribuídos são extensivamente utilizados na simulação hidrológica (VIESSMAN; LEWIS, 2003). Por fim, Devi et al. (2015) distinguem entre modelos fisicamente baseados, i.e., derivados de representações matematicamente idealizadas dos fenômenos reais; conceituais (ou semi-empíricos), ou seja, baseado em representações parametrizadas dos elementos físicos; e empíricos (i.e. caixa-preta) baseado no ajuste entre estimativas e valores observados. Viessman e Lewis (2003) sugerem ainda a diferenciação em termos do propósito de utilização do modelo; sendo assim modelos utilizados para a simulação de condições futuras são chamados de modelos preditivos, enquanto modelos que confirmam ou descrevem os processos hidrológicos registrados são chamados de modelos de balanço hídrico.

2.5 Escolha do modelo hidrológico

A escolha de um modelo hidrológico adequado para a descrição dos processos de interesse é talvez uma das decisões mais importantes no processo de modelagem. Não existe nenhum procedimento padrão e amplamente aceito para a escolha do melhor modelo para a área de estudo, ainda assim, critérios básicos devem ser atendidos (BENNETT et al., 2013): i) avaliação do objetivo, escala e resolução do modelo; deve-se ter uma ideia clara das condições em que a modelagem está sendo proposta, assim como se o modelo é adequado para as condições observadas; ii) avaliação dos dados; deve-se conhecer os dados de modo a determinar se os mesmos atendem os requisitos temporais e espaciais mínimos para a utilização no modelo; outra decisão importante nesta etapa é a

avaliação da melhor divisão das séries históricas entre período de calibração e validação; e iii) avaliação preliminar de desempenho do modelo.

Os autores supracitados sugerem que seja realizado uma análise exploratória dos resultados a fim de encontrar erros grosseiros, relações indesejáveis e avaliar adequabilidade geral dos resultados. Em seguida, é necessário avaliar o desempenho do modelo a partir de critérios objetivos. A raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de correlação (r) são amplamente utilizados na avaliação de modelos ambientais (BENNETT et al., 2013). Para modelos hidrológicos, métricas como o coeficiente de Nash-Sutcliffe e de Kling-Gupta são convencionalmente utilizadas (GETIRANA et al., 2010; PAZ et al., 2011; PAIVA et al., 2012; BESKOW et al., 2013; FAN et al., 2015; HUANG et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2017; SIQUEIRA et al., 2018; CALDEIRA et al., 2019). Por fim, deve-se interpretar os resultados, identificando as qualidades e deficiências do modelo e a possibilidade de melhora nas etapas anteriores.

2.6 Modelos determinísticos do tipo chuva-vazão

Modelos determinísticos do tipo chuva-vazão baseados em eventos são majoritariamente utilizados para modelagem de curto prazo, principalmente para a descrição do comportamento do hidrograma. Nestes casos, o conhecimento das condições antecedentes da bacia (por exemplo, umidade do solo) é essencial para a representação adequada do evento analisado. Modelos determinísticos do tipo chuva-vazão contínuos, por outro lado, são utilizados para modelagem de longo termo, avaliação de mudanças na bacia (e.g. uso e cobertura, manejo do solo, demanda dos recursos hídricos) e nas variáveis relacionadas ao ciclo hidrológico (e.g. regime de precipitações e clima). Nestes casos, um determinado período da modelagem é dedicado ao aquecimento do modelo, de modo a diminuir o impacto da escolha inicial dos parâmetros de entrada.

2.6.1 Modelos baseados em evento

O primeiro modelo chuva-vazão foi desenvolvido por Mulvaney (1850) e é conhecido como Método Racional. Este modelo permite a estimativa da vazão a partir do produto de um coeficiente empírico C , a intensidade da precipitação I

e a área de captação *A*. Obviamente que esta abordagem simplificada não considera muitos aspectos importantes na geração das cheias, como por exemplo, as condições antecedentes de umidade do solo, a influência da vegetação ou variações temporais dos eventos, etc., mesmo assim este método ainda é muito utilizado em projetos de engenharia (MELLO et al., 2016). Destaca-se também que o Método Racional se propõe a estimar apenas a vazão de pico, de modo que tentativas de descrição do hidrograma só seriam desenvolvidas décadas depois por meio da diferenciação dos efeitos da geração e propagação do escoamento (BEVEN et al., 2012). Sherman (1932) propôs uma abordagem para a representação dos processos de ascensão e recessão do hidrograma resultante de uma chuva em excesso de uma unidade (cm, mm, polegadas, etc.) e uniformemente distribuída sobre a bacia considerando intensidade constante. Este método seria mais tarde conhecido como Hidrograma Unitário (HU) (SHERMAN, 1932). Como o HU é baseado em sistemas lineares, os princípios da proporcionalidade e da superposição podem ser aplicados e, portanto, o HU pode ser utilizado para determinar a vazão derivada de hidrogramas reais (i.e. diferentes da chuva de 1 unidade) por meio de equações de convolução (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). A principal dificuldade dessa abordagem é a quantificação da chuva em excesso (BEVEN et al., 2012). Uma das contribuições mais significativas para a solução (mesmo que parcial) deste problema foi dada por Horton (1933) ao descrever o mecanismo de geração de escoamento por infiltração em excesso. Desde então, diversos mecanismos de geração de escoamento superficial têm sido descritos na literatura (BEASLEY, 2011). No contexto de modelos baseados em evento destacam-se também o modelo de Nash (1957), resultante da sucessão de reservatórios lineares simples em cascata; e o de Clark (1945), baseado na translação do escoamento por meio do histograma tempo-área (HTA) (TUCCI, 2005). Outro método amplamente utilizado é o da Curva Número do Serviço Americano de Conservação de Solo (CN-SCS) (McCuen, 1982). Este método empírico parte do pressuposto que a razão entre o escoamento gerado e o escoamento potencial (excluindo as abstrações iniciais) é equivalente a razão entre a retenção gerada e a retenção potencial (BEVEN, 2012). Outros modelos sintéticos, como o de Snyder (1938)

baseado em relações empíricas formuladas a partir da avaliação de bacias hidrográficas de área entre 30 a 30.000 km², também têm sido satisfatoriamente empregados na solução de problemas práticos de engenharia (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

2.6.2 Modelos contínuos

Com o advento dos computadores a partir da década de 50 e 60, foram desenvolvidos modelos mais complexos, capazes de representar os principais processos do ciclo hidrológico e simular vazões de maneira contínua (TUCCI, 2005). Deste período destaca-se o modelo *Stanford Watershed Model* (Stanford IV) (CRAWFORD; LINSLEY, 1966), que estabelece as bases para o que posteriormente viria a ser chamado de modelos *Explicit Soil Moisture Accounting* (ESMA) (O'CONNELL, 1991) ou “modelos conceituais”. Tais modelos compartilham o mesmo princípio de representação dos processos hidrológicos por meio de reservatórios conectados, cujas trocas e perdas de água são controladas por equações paramétricas (BEVEN, 2012). Beven (2012) destaca que modelos do tipo ESMA ainda são amplamente utilizados devido a flexibilidade e a qualidade dos ajustes atribuídas ao grande número de parâmetros. Exemplos de modelos da família ESMA em uso, são: *Hydrologiska Byrans Vattenavdelning model* (HBV) (BERGSTROM, 1976), *Variable Infiltration Capacity* (VIC) (LIANG et al., 1994), *Xinanjiang* (ZHAO; LIU, 1995) e ARNO (TODINI, 1996).

Ainda nos anos 60, foram realizadas tentativas mais elaboradas de formulação de modelos baseados na descrição matemática completa dos processos hidrológicos de maneira distribuída (FREEZE; HARLAN, 1969). Talvez o exemplo mais conhecido de modelo fisicamente baseado e espacialmente distribuídos seja o *Système Hydrologique Européen* (SHE) (ABBOTT et al., 1986) e sua derivação MIKE SHE (REFSGAARD; STORM, 1995). O modelo SHE é baseado em grades regulares, conectadas a rede de drenagem, onde cada elemento de grade possui uma dada altitude, interceptação, evapotranspiração, infiltração e vários parâmetros a serem ajustados (BEVEN, et al., 2012). Outros modelos distribuídos e fisicamente baseados amplamente

utilizados são o *Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response System* (ANSWERS) (BEASLEY et al., 1980), cuja formulação consiste na geração de escoamento, em cada elemento de grade, pelo método de Green-Ampt e sua propagação para a rede de drenagem pela direção de maior declividade (BEVEN, et al. 2012), e o *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM) (WIGMOSTA; VAIL; LETTENMAIER, 1994), com uma maior discretização das camadas da vegetação e do solo (MELLO et al., 2016). Vale destacar a existência de uma gama de modelos fisicamente baseados que não realizam os cálculos para cada elemento de grade, mas sim para uma função de distribuição representativa (BEVEN, 2012). Dentre estes modelos destaca-se o TopModel (BEVEN; KIRKBY, 1979), que parte do pressuposto de que todos os elementos de grade com mesmo valor de índice topográfico respondem hidrológicamente da mesma maneira, e os modelos baseados em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU), que consideram o mesmo tipo do solo, uso e cobertura (COLLISCHONN et al., 2007).

2.6.3 Modelos desenvolvidos no Brasil

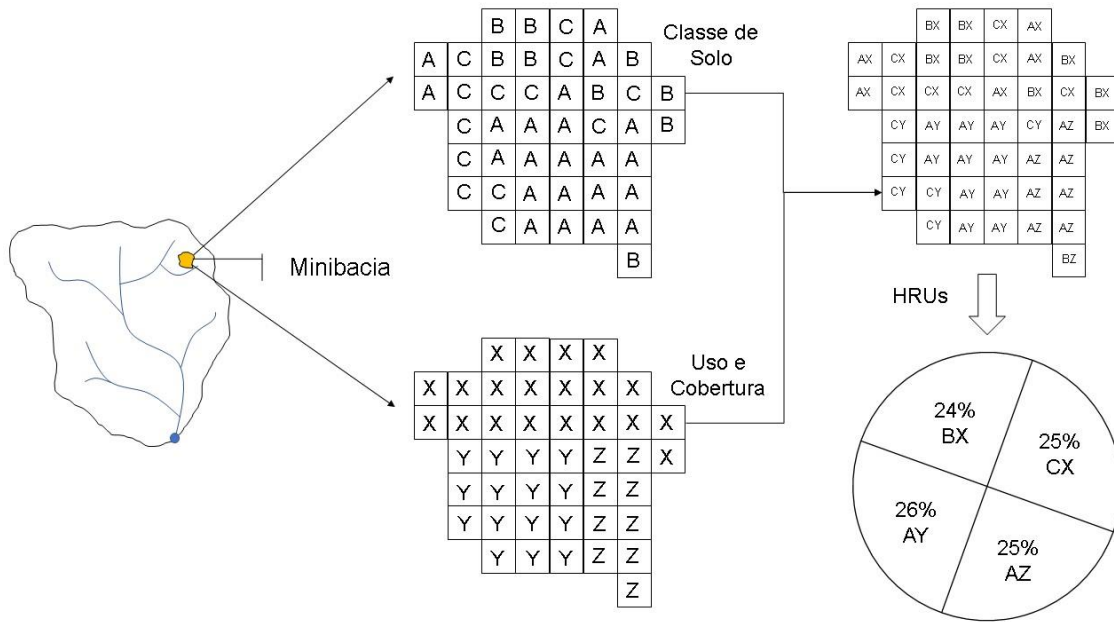
A carência de dados e a característica do monitoramento hidrológico do Brasil, baseado principalmente no monitoramento de grandes bacias com potencial econômico (BESKOW; NORTON; MELLO, 2013), limita a utilização de modelos distribuídos e fisicamente baseados no país. As primeiras tentativas de desenvolvimento de um modelo adequado às condições do país foram feitas por Tucci (1981), no modelo do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH II). O modelo dispõe de uma formulação simplificada em sub-bacias, com poucos parâmetros e baseado em algoritmos amplamente utilizados. Atualizações do modelo se deram por meio das versões IPH III, com a implementação de uma rotina de propagação das vazões em canais pelo modelo de Muskingum-Cunge e em reservatórios pelo modelo de Pulz, e IPH IV, com a possibilidade de estimativa de áreas de inundação por meio de um modelo hidrodinâmico baseado na solução implícita de quatro pontos das equações de Saint Venant (TUCCI, 2005). Outro fator limitante devido ao monitoramento esparsos e do tamanho das bacias monitoradas no país se dá na escala de representação dos processos

hidrológicos, fazendo com que a simulação hidrológica se concentre em modelos de grande escala (COLLISCHONN et al., 2007). Com base nessas considerações, Collischonn e Tucci (2001) desenvolveram o Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH). O modelo é baseado na função de distribuição para o armazenamento de água no solo do modelo Xinanjiang (ZHAO; LIU, 1995) e aprimorado em outros modelos de grande escala, como o ARNO (TODINI, 1996), na divisão da área de estudo em HRUs como o VIC (LIANG et al., 1994), na estrutura de representação dos processos do LARSIM (BREMICKER, 1998), com adaptações para a representação da evapotranspiração por meio da equação de Penman-Monteith (WIGMOSTA; VAIL; LETTENMAIER, 1994) e da propagação do escoamento por Muskingum-Cunge. Versões mais recentes do modelo possibilitam a discretização espacial da área de estudo em bacias unitárias (PAIVA et al., 2011) e a propagação do escoamento por métodos hidrodinâmicos unidimensionais (PAIVA et al., 2013) ou pelo método inercial local (PONTES et al., 2017).

2.7 Estrutura do MGB-IPH

O MGB-IPH é composto por 4 módulos principais necessários para o cálculo do balanço hídrico, da evapotranspiração, da propagação do escoamento até a rede de drenagem e da propagação do escoamento na rede de drenagem (COLLISCHONN et al., 2007). O modelo foi formulado a partir da representação da bacia hidrográfica em elementos de área (células de grade) interconectadas por canais (GETIRANA et al., 2010). Entretanto, esta abordagem foi posteriormente substituída pela divisão em minibacias (PAIVA; COLLISCHONN; BUARQUE, 2011), cada uma contendo um trecho da rede de drenagem associado a uma planície de alagamento e balanço hídrico vertical (FLEISCHMANN et al., 2018). As HRUs são definidas através de combinações entre uso e cobertura e tipo de solo em cada minibacia (SIQUEIRA et al., 2018) (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Discretização das HRUs por minibacias.



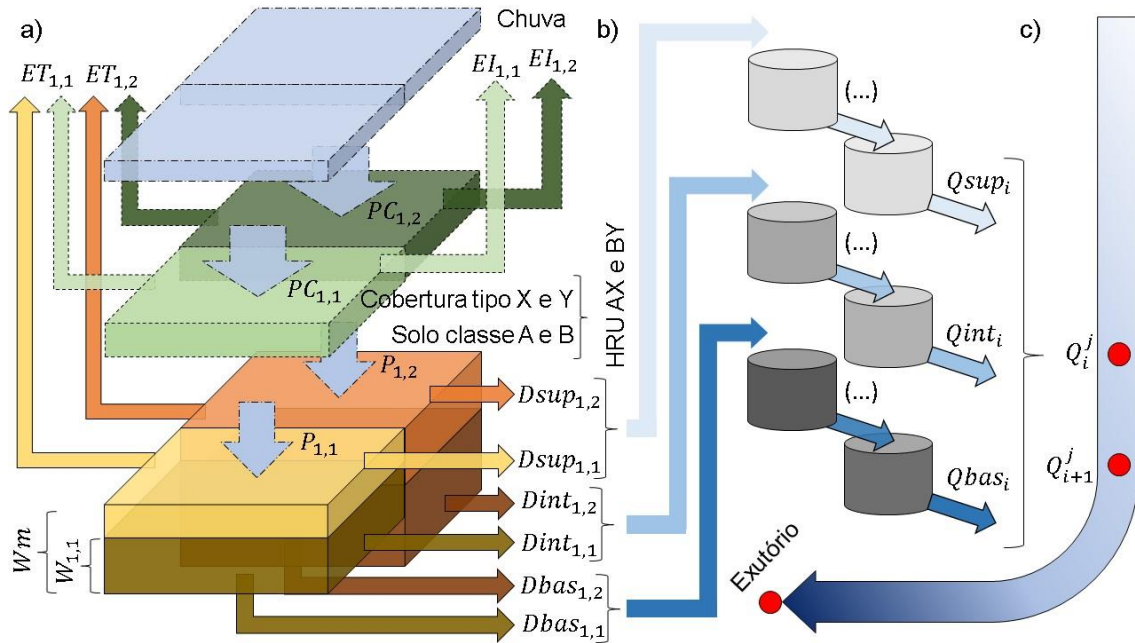
Fonte: Adaptado de Collischonn et al. (2007).

O balanço hídrico é então computado para cada HRU e o escoamento gerado nas diferentes HRUs que compõem a minibacia é propagado para a rede de drenagem (COLLISCHON et al., 2007; FLEISCHMANN et al., 2018). O balanço hídrico para cada HRU é calculado como:

$$W_{i,j}^k = W_{i,j}^{k-1} + (P_i - ET_{i,j} - Dsup_{i,j} - Dint_{i,j} - Dbas_{i,j})\Delta t \quad (2.1)$$

onde k , i e j são índices relacionados com o passo de tempo, célula ou minibacia e HRU, respectivamente; Δt é o intervalo de tempo considerado; $W_{i,j}^k$ (mm) é a quantidade de água armazenada na camada de solo ao final do passo de tempo k da HRU j da minibacia i ; $W_{i,j}^{k-1}$ (mm) é o armazenamento de água na camada de solo no passo de tempo anterior; P_i é a precipitação em atinge a superfície ($\text{mm } \Delta t^{-1}$); $ET_{i,j}$ ($\text{mm } \Delta t^{-1}$) é a evapotranspiração; e $Dsup_{i,j}$, $Dint_{i,j}$ e $Dbas_{i,j}$ são os escoamentos superficial, subsuperficial e de base ($\text{mm } \Delta t^{-1}$), respectivamente (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Estrutura do modelo MGB-IPH.



Fonte: Adaptado de Collischonn et al. (2007).

A evapotranspiração do solo e da vegetação ($ET_{i,j}$) é estimada pela equação de Penman-Monteith, por meio da interpolação de valores observados em estações climatológicas próximas a área de estudo; a água interceptada pela copa das árvores é evaporada sob taxa potencial $EI_{i,j}$ que é limitada pela capacidade máxima de interceptação, representada por $Smax_j$, determinado para cada HRU em função do índice de área foliar (LAI):

$$Smax_{j,m} = \alpha \cdot LAI_{j,m} \quad (2.2)$$

onde α é um parâmetro fixo igual a 0,2 mm e LAI pode ser obtido para cada mês do ano (m). Parte chuva incidente (PC_i) que não é armazenada por interceptação acaba atingindo a superfície é denominada P_i .

Considera-se que a evapotranspiração não é restringida pelo armazenamento de água no solo desde que o armazenamento observado (W_L) seja maior ou igual a $Wm/2$ (metade do armazenamento máximo). Se a umidade do solo estiver entre este limiar e o ponto de murcha permanente W_{PM} , a resistência superficial r_s aumenta de acordo com:

$$r_{s_{i,j}} = r_{i,j,m} \frac{W_L - W_{PM}}{W_{i,j} - W_{PM}} \quad (2.3)$$

Se o solo se encontrar abaixo do ponto de murcha permanente, então $ET_{i,j} = 0$; $r_{i,j}$ é a mínima resistência superficial da vegetação em condições não afetadas pela umidade do solo. Por efeito de simplicidade, o modelo considera este valor igual a 10% da Wm .

A geração de escoamento e posterior propagação para a rede de drenagem e para o exutório é realizada conforme apresentado na Figura 2.5b,c. A parcela referente ao escoamento superficial é calculada como:

$$Dsup_{i,j} = \Delta t \cdot P_i - (Wm_j - W_{i,j}^{k-1}), \text{ para } y \leq 0 \quad (2.4)$$

e para $y > 0$:

$$Dsup_{i,j} = \Delta t \cdot P_i - (Wm_j - W_{i,j}^{k-1}) + Wm_j(y)^{b_j+1} \quad (2.5)$$

onde

$$y = \left[\left(1 - \frac{W_{i,j}^{k-1}}{Wm_j} \right)^{\frac{1}{b_j+1}} - \frac{\Delta t \cdot P_i}{(b_j + 1)Wm_j} \right] \quad (2.6)$$

onde b_j representa a forma da relação empírica entre a fração da área saturada e o armazenamento médio de umidade no solo baseada no conceito de área de contribuição variável dos modelos ARNO, Xinanjiang, VIC e LARSIM. Se b_j é igual a zero, então toda a área de uma dada HRU terá capacidade de armazenamento máxima Wm_j na camada superficial do solo. Se b_j é maior que zero, partes da HRU apresentarão capacidade de armazenamento de água menor do que Wm_j e conseqüentemente gerarão maior escoamento superficial (COLLISCHONN et al., 2007).

O escoamento subsuperficial é calculado com base em derivações da equação de condutividade hidráulica e meio não saturado de Brooks e Corey:

$$Dint_{i,j} = Kint_j \left(\frac{W_{i,j} - W_{z_j}}{Wm_j - W_{z_j}} \right)^{\left(3 + \frac{2}{\lambda_j} \right)} \quad (2.7)$$

onde Wz_j (mm) é o limite inferior a partir do qual não há escoamento subsuperficial; $Kint_j$ (mm Δt^{-1}) é o parâmetro relacionado a drenagem subsuperficial da água quando o solo está saturado; e λ_j é o índice de porosidade.

O escoamento de base é calculado a partir da relação linear entre a água armazenada e a capacidade máxima de armazenamento de água na camada:

$$Dbas_{i,j} = Kbas_j \left(\frac{W_{i,j}^{k-1} - Wc_j}{Wm_j - Wc_j} \right) \quad (2.8)$$

onde Wc_j (mm) é o limite inferior a partir do qual não ocorre escoamento de base; $Kbas_j$ (mm Δt^{-1}) é o parâmetro relacionada com a taxa de percolação do solo saturado.

Uma vez que os escoamentos de cada camada de solo estejam calculados, é necessário a utilização de um método de propagação do escoamento até a rede de drenagem capaz de representar o retardo exercido pelo meio (COLLISCHONN et al., 2007). O MGB-IPH se utiliza de três reservatórios lineares simples (um para cada camada) capazes de coletar o escoamento de cada HRU em cada minibacia (ou célula de grade) e propagá-lo até o canal (Figura 2.5b). As vazões de saída de cada reservatório são estimadas a partir de:

$$Qsup_i^k = \frac{1}{TKS_i} Vsup_i^k \quad (2.9)$$

$$Qint_i^k = \frac{1}{TKI_i} Vint_i^k \quad (2.10)$$

$$Qbas_i^k = \frac{1}{TKB_i} Vbas_i^k \quad (2.11)$$

onde $Qsup_i$ ($m^3 s^{-1}$) é a vazão de saída do reservatório superficial; $Qint_i$ ($m^3 s^{-1}$) é a vazão de saída do reservatório subsuperficial; $Qbas_i$ é a vazão de saída do reservatório de base; $Vsup_i^k$, $Vint_i^k$, $Vbas_i^k$ são os volumes (m^3) dos respectivos reservatórios e TKS_i , TKI_i , TKB_i , são parâmetros relacionados ao tempos de retardo exercido pelos reservatórios.

A propagação das vazões na rede de drenagem é realizada com base em uma variação do método de propagação da onda cinemática proposto por Cunge (1969) (Figura 5c). Considerando uma relação bi-unívoca entre o nível e a vazão, o método de Muskingum-Cunge permite a estimativa da vazão no tempo $k + 1$ e seção $i + 1$ por:

$$Q_{i+1}^{k+1} = C_1 Q_i^{k+1} + C_2 Q_i^k + C_3 Q_{i+1}^k \quad (2.12)$$

onde Q_i^{k+1} é a vazão na seção i no tempo $k + 1$; Q_i^k é a vazão na seção i no tempo k ; Q_{i+1}^k é a vazão na seção $i + 1$ no tempo k ; C_1 , C_2 e C_3 são simplificações da equação de continuidade.

2.8 Aplicações do MGB-IPH

Além de situações de escassez de dados, o uso de modelos de grande escala é recomendado na gestão de conflitos em bacias transfronteiriças, acoplagem com Modelos de Circulação Global, avaliação de impactos decorrentes de mudanças de uso e cobertura e de mudanças climáticas em grande escala (ALLASIA et al., 2006). Desde a sua formulação por Collischonn e Tucci (2001), o MGB-IPH tem sido majoritariamente utilizado para o aprimoramento da gestão e engenharia dos recursos hídricos.

As primeiras aplicações do modelo se limitaram na sua avaliação e comparação com métodos tradicionalmente utilizados. Tucci et al. (2003) compararam um modelo empírico, baseado em componentes principais, com o modelo MGB-IPH, acoplado a um modelo climático proposto por Marengo et al. (2003), para a previsão das vazões mensais do rio Uruguai no sul do Brasil. Os autores obtiveram melhores ajustes ao utilizar o modelo MGB-IPH. Neto et al. (2006) avaliaram o desempenho do modelo utilizando base de dados alternativas, obtendo resultados divergentes quando comparados a base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA). Collischonn et al. (2008) compararam as estimativas de vazão obtidas a partir de precipitações derivadas de dados de precipitação do TRMM produto 3B42 e dados pluviométricos interpolados pelo método do inverso do quadrado da distância, para a bacia do rio Tapajós. Os autores obtiveram ajustes satisfatórios ao utilizar dados orbitais, principalmente em bacias maiores, com menor sensibilidade a erros diários.

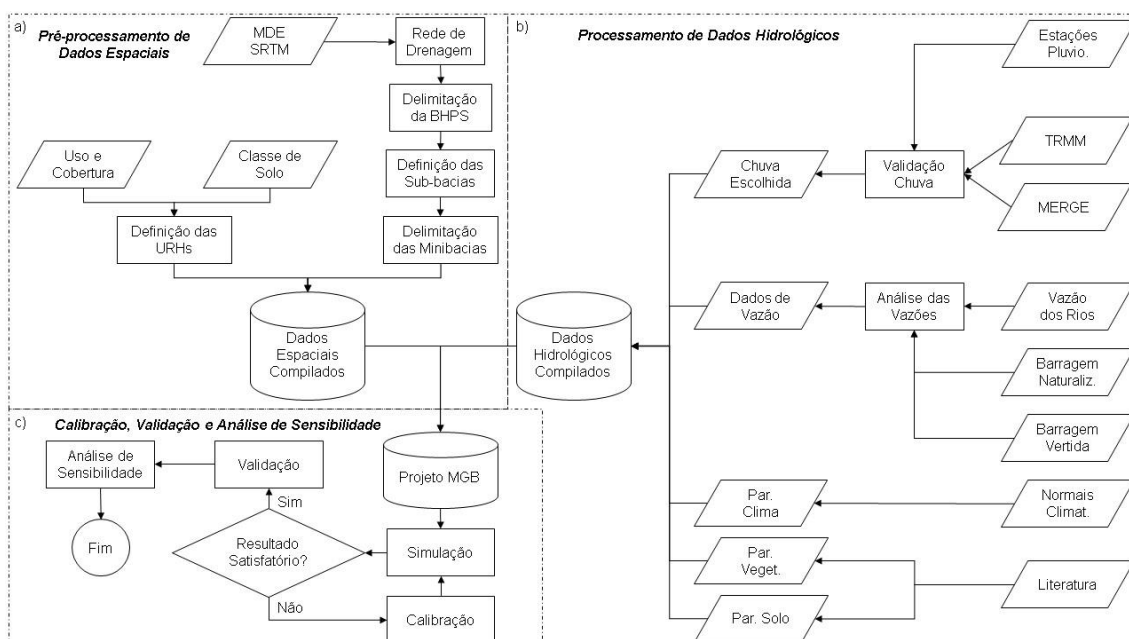
O modelo também foi utilizado na previsão da vazão de curto (horas e dias) e longo (de 1 a 9 meses) prazo (SILVA; TUCCI; COLLISCHON, 2006). Aplicações de previsão da vazão de curto prazo pelo modelo MGB-IPH se deram na bacia do Paranaíba (COLLISCHON et al., 2007), Rio Grande (TUCCI et al., 2008), São Francisco (FAN et al., 2016) e Tocantins (FAN et al., 2015); enquanto previsões de longo prazo segundo cenários de mudanças climáticas foram realizadas nos rios Uruguai (TUCCI et al., 2003), Grande (TUCCI et al., 2008; NÓBREGA et al., 2011) e Paraguai (BRAVO et al., 2013). Outra aplicação recorrente do modelo se dá na otimização da operação de reservatórios para geração de energia elétrica (TUCCI et al., 2003; COLLISCHON et al., 2007; FAN et al., 2015; SCHWANENBERG et al., 2015; FAN et al., 2016; QUEIROZ et al., 2016; QUEIROZ et al., 2019). Destaca-se também o uso do modelo na avaliação de impactos das mudanças de uso e cobertura da terra nas vazões (BAYER; COLLISCHONN, 2013).

Recentemente, com a implementação de rotinas de propagação de escoamento por modelos hidrodinâmicos (PAIVA; COLLISCHON; BUARQUE, et al., 2011), aplicações voltadas para a avaliação da dinâmica de inundação ganharam destaque. Dentre as aplicações do modelo MGB-IPH associado ao módulo hidrodinâmico, destacam-se os estudos de Paz et al. (2011) no Pantanal brasileiro, Paiva et al. (2013) na bacia do rio Amazonas, Pontes et al. (2017) na ilha do Bananal no Rio Araguaia, Fleischmann et al. (2018) na bacia do rio Niger, Munar et al. (2018) na lagoa Mirim e Lopes et al. (2018) na laguna dos Patos. Destaca-se ainda a aplicabilidade do modelo como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos e análise de frequência de eventos extremos (ADAM et al., 2015; CORREA et al., 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O esquema representado na Figura 3.1 apresenta as etapas realizadas no presente trabalho. Primeiramente foi realizado o pré-processamento dos dados espaciais de modo a definir as características fisiográficas da BHPS necessárias para a operação do MGB-IPH (Figura 3.1a). Posteriormente, foi realizada uma avaliação das fontes de dados de precipitação (Figura 3.1b). Os produtos de precipitação foram validados em função das precipitações observadas pela rede pluviométrica disponível. Foram definidas sub-bacias a partir das quais o modelo hidrológico foi calibrado. Para isso foi necessário a obtenção de séries históricas de vazão, observando as particularidades das seções, especialmente em casos de barragens. Por fim foi realizada a calibração e validação do modelo para o produto de precipitação mais adequado (Figura 3.1c).

Figura 3.1 – Representação esquemática das etapas do trabalho.



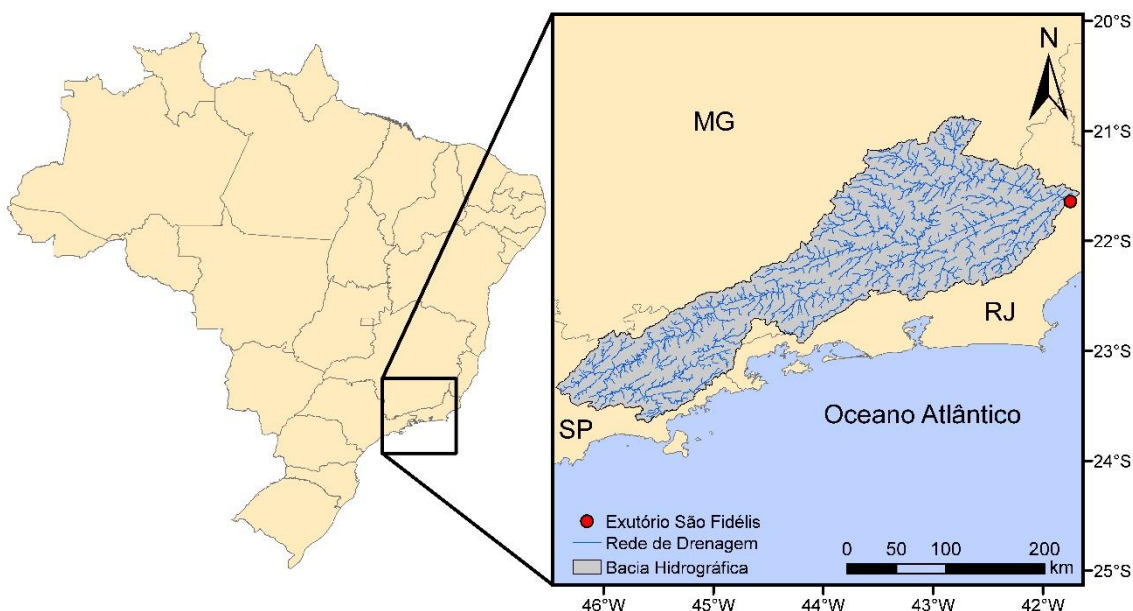
Fonte: Produção do autor.

3.1 Área de estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul

O rio Paraíba do Sul é formado pelas confluências dos rios Paraitinga e Paraibuna, estendendo-se por aproximadamente 1.150 km até a sua foz entre os municípios de São João da Barra e São Francisco de Itabapoana no norte do Estado do Rio de Janeiro (MARQUES et al., 2017). A Bacia Hidrográfica do Rio

Paraíba do Sul (BHPS) abrange uma área de aproximadamente 57.000 km², o que equivale a 6% da área total da região sudeste do país, cobrindo cerca de 63% do Estado do Rio de Janeiro, 5% de São Paulo e 4% de Minas Gerais (KAHN; VÁSQUEZ; REZENDE, 2017). O clima da bacia, segundo Köppen, é classificado como tropical com inverno seco (Aw) nas proximidades da foz e subtropical úmido com invernos secos (Cw) no restante da bacia (ALVARES et al., 2014). As estações são bem definidas entre verão quente e chuvoso, entre outubro e março, e inverno seco, entre abril e setembro, e os extremos de vazão mensal de longo termo ocorrem em janeiro (1.453 m³ s⁻¹) e setembro (376 m³ s⁻¹) (PACHECO et al., 2017) (Figura 3.2).

Figura 3.2 – BHPS com seção de controle em São Fidelis -RJ.



Fonte: Produção do autor.

A BHPS é altamente urbanizada, abrangendo uma população de cerca de 5 milhões de pessoas (MARQUES et al., 2017). Destaca-se também o grau de antropização do rio Paraíba do Sul. Ovalle et al. (2013) identificaram 47 reservatórios de tamanhos variados na BHPS, dos quais, alguns abastecem os municípios de São Paulo e Rio de Janeiro (localizados fora da área de captação da bacia), fazendo com que o rio Paraíba do Sul seja a principal fonte para o abastecimento de água para 14 milhões de pessoas (MARQUES et al., 2017) em mais de 180 municípios (PACHECO et al., 2017).

Segundo a classificação geomorfológica, BHPS é majoritariamente composta por Morros Altos e Alongados e Serras e Escarpas (EPE, 2007). Grandes áreas de Planícies e Tabuleiros são encontradas nas proximidades da foz do rio Paraíba do Sul. Tendo em vista as limitações do modelo de Muskingum-Cunge utilizado no presente trabalho quando aplicado a regiões sobre o efeito da marés, propõe-se avaliar a BHPS até a seção de controle no município de São Fidelis – RJ (Figura 3.2).

De acordo com AGEVAP (2014), a BHPS é formada por rochas ígneas e metamórficas, pré-cambrianas altamente afetadas pela atividade tectônica, formando estruturas geológicas de lineamentos de orientação NNE-SSW (zonas de cisalhamento e fraturas). Os autores destacam que esta orientação corresponde aquela do rio Paraíba do Sul e é importante componente na recarga dos aquíferos fissurais que compõem toda a BHPS, com exceção das regiões de mais baixa altitude e próximas as margens do rio Paraíba do Sul, composto por aquíferos porosos.

Cerca de 40% da BHPS é formada por solos de avançado estágio de intemperização, como, Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, caracterizados pela baixa saturação na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (EMBRAPA 2013). Outros 15% são formados por solos compostos por materiais de origem heterogênea, de horizonte B incipiente, da classe Cambissolos Háplicos Distróficos, que são caracterizados pela baixa saturação na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (EMBRAPA 2013). Em seguida, com cerca de 14,5%, a BHPS é composta por Argissolos Vermelho-Amarelo Distróficos de estágio de intemperismo intermediário quando comparado as classes supracitadas e de baixa saturação na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (EMBRAPA 2013). Destacam-se ainda as presenças de Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos, Argissolos Vermelhos Eutrófico e Latossolos Amarelos Distróficos em 7, 6 e 5% da bacia, respectivamente (AGEVAP 2014).

Por fim, a BHPS é coberta por campos e pastagens em cerca de 41% de sua área total; seguida de cerca de 43% de floresta, incluindo ~28% de vegetação

arbórea densa e ~15% de vegetação arbórea esparsa. Atividades antrópicas de maior intensidade, quanto a utilização dos recursos hídricos, contemplam aproximadamente 10% e 5% da área ocupada na bacia, na forma de agricultura e áreas urbanizadas, respectivamente. Os demais ~1% são atribuídos a restingas e mangues (AGEVAP 2014).

3.2 Material

Os dados utilizados no presente estudo são compostos basicamente por fontes hidrometeorológicas e espaciais. Os dados utilizados nas etapas de pré-processamento dos dados espaciais e processamento de dados hidrológicos são apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Dados utilizados.

| Dado | Variável [unidade] | Domínio Espacial | Domínio Temporal | Agência |
|--------------------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| SRTM-DEM ¹ | Altimetria [m] | 30 m | - | USGS |
| MapBiomass ² | Classe de Cobertura [qualitativo] | 30 m | 2006 | MapBiomass |
| RADAMBRASIL ³ | Classe de Solo [qualitativo] | 1:250.000 | - | IBGE |
| Estações Pluviométricas ⁴ | Chuva [mm] | Pontual | 01/01/1999 a 31/12/2014 | ANA |
| TMPA 3B42V7 ⁵ | Chuva [mm] | ~ 25km | 01/01/1999 a 31/12/2014 | NASA |
| MERGE ⁶ | Chuva [mm] | 20 km | 01/01/1999 a 31/12/2014 | INPE/CPTEC |
| Estações Fluviométricas ⁴ | Vazão [m ³ /s] | Pontual | 01/01/1999 a 31/12/2014 | ANA |
| Seções Barradas ⁷ | Vazão [m ³ /s] | Pontual | 01/01/1999 a 31/12/2014 | ONS |
| Estações Meteorológicas ⁸ | Temperatura [°C], Umidade [%], Insolação [horas/dia], Velocidade do Vento [m/s] e Pressão [kPa] | Pontual | 01/01/1999 a 31/12/2014 | INMET |

Os dados supracitados podem ser baixados nas respectivas plataformas online:

¹<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>; ²<https://mapbiomas.org/download>;

³<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html?t=acesso-ao-produto>;

⁴http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf;

⁵<https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm>;

⁶<ftp://ftp1.cptec.inpe.br/modelos/io/produtos/MERGE/>;

⁷<https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>; ⁸Base interna do MGB-IPH ou <http://www.inmet.gov.br/porta/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>.

Fonte: Produção do autor.

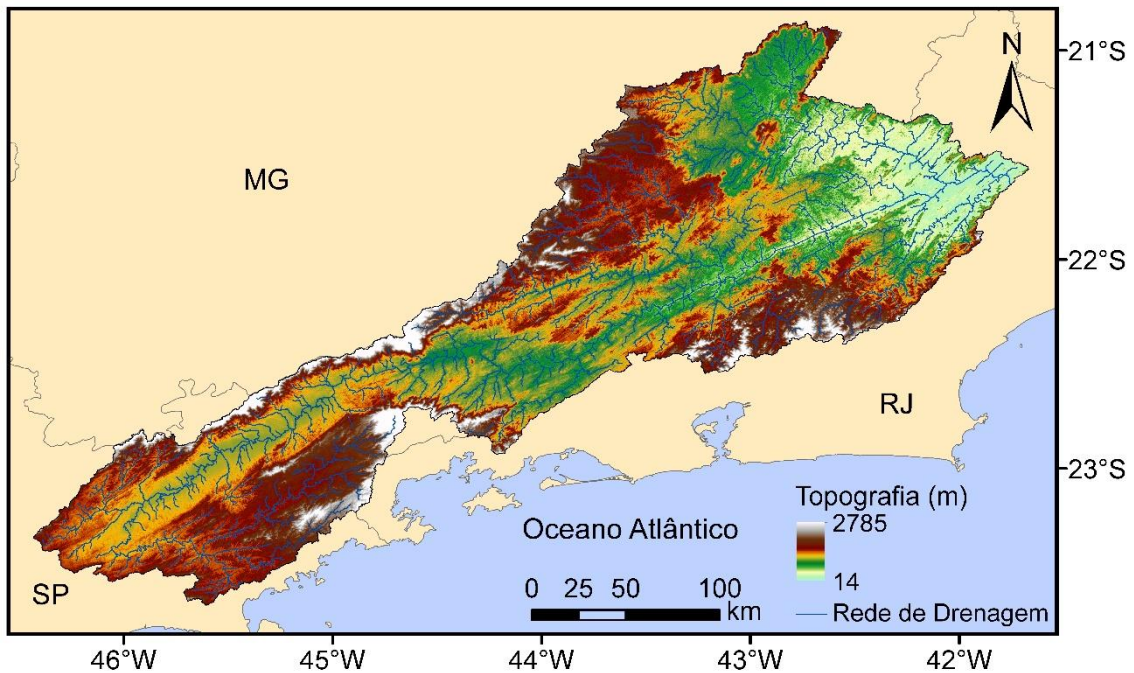
3.2.1 Dados de entrada do modelo

Modelo Digital de Elevação

Projetado em um esforço conjunto entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), o Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a Agência Espacial Italiana (ASI), o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi lançado em fevereiro de 2000 a partir do ônibus espacial (VAN ZYL, 2001). Com uma altitude de 233 km, inclinação de 57°, realizando cerca de 159 translações sobre o planeta em um período de 10 dias e cobrindo aproximadamente 80% da área da terra (entre 60° N e 56° S), o SRTM, o primeiro sistema de interferometria de passagem-única (i.e. duas imagens coletadas ao mesmo tempo em posições diferentes), resultou nos produtos de até então maior resolução espacial disponíveis em nível global (FARR et al., 2007).

O SRTM é constituído por dois radares de abertura sintética (SAR), nas bandas C (5,3 GHz) e X (9,6 GHz), separados por um mastro de 60 metros, resultando em produtos pós-validação de resolução espacial de 30 metros, erros absolutos verticais menores que 9 metros e erros absolutos de geolocalização menores que 13 metros (VAN ZYL, 2001; FARR et al., 2007). O modelo digital de elevação (MDE) derivado do SRTM na banda C, utilizado no presente estudo, é apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Modelo digital de elevação da BHPS.



Fonte: Produção do autor.

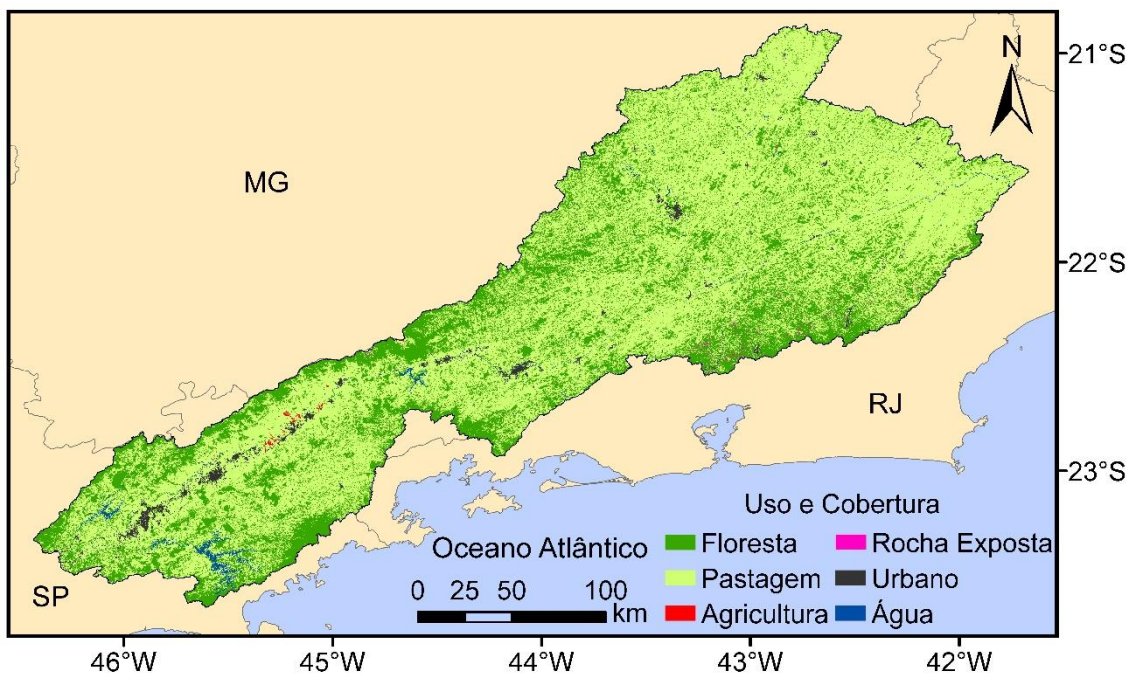
Uso e cobertura

O mapa de uso e cobertura utilizado é referente ao produto do projeto MapBiomass, para ao ano representativo de 2006. O MapBiomass é um projeto iniciado em 2015 por universidades, mais de 40 organizações não-governamentais e a iniciativa privada, para o desenvolvimento de uma série temporal de mudanças de uso e cobertura da terra dos biomas do Brasil. Para tal foram utilizadas imagens dos Landsat 5, 7 e 8, coletadas a partir dos sensores Landsat *Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), *Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor* (OLI-TIRS); e calibradas radiometricamente e ortoretificadas a partir de pontos de controle na superfície e modelo digital de elevação (SOUZA; AZEVEDO, 2017).

O produto possui resolução espacial de 30 metros e é composto por 5 grandes classes de uso e cobertura, sendo elas: i) florestas, subdivididas em formações de florestas, formações de savanas, manguezais e florestas cultivadas; ii) formações naturais de não-floresta, incluindo banhados e pastagens nativas; iii) áreas de agricultura e pastagem cultivada; iv) áreas não-vegetadas, como dunas, infraestrutura urbana e outras áreas não vegetadas e v) corpos d'água.

Os produtos MapBiomas foram validados pela análise comparativa com mapas de referência previamente existentes e na coleta de pontos amostrais, resultando em níveis de acurácia de até 90% (SOUZA; AZEVEDO, 2017). Para a adequação do produto às recomendações de aplicação de Medeiros et al. (2018) no MGB-IPH, as classes de uso e cobertura foram reagrupadas em floresta (incluindo as classes de floresta do MapBiomas) pastagem (incluindo as formações naturais de não-floresta e de pastagem cultivadas do MapBiomas), agricultura (referente a classe de agricultura do MapBiomas), afloramentos rochosos (correspondente a classe de outras áreas não vegetadas) e água (ou seja, a classe de corpos d'água do MapBiomas). O mapa de uso e cobertura utilizado no modelo é apresentado na Figura 4.3.

Figura 3.4 – Uso e cobertura da BHPS.



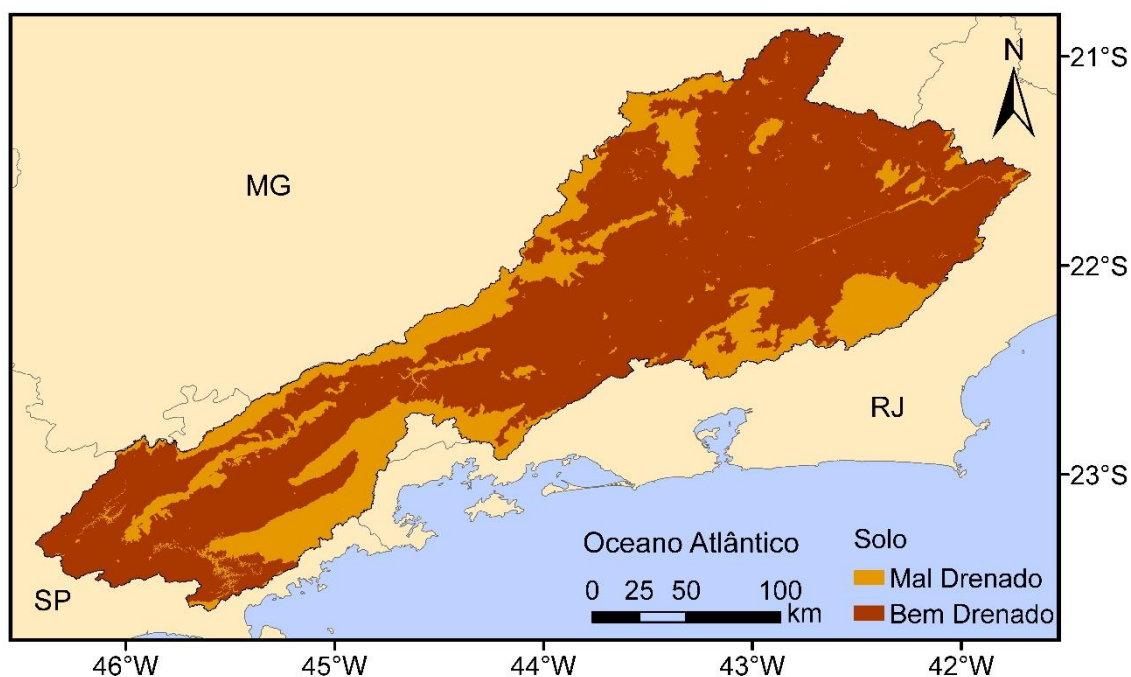
Fonte: Produção do autor.

Mapa de solo

Nas últimas décadas, diversas fontes de dados pedológicos foram criadas para o Brasil. O primeiro e mais completo esforço de mapear os solos do Brasil se deu nos anos 70 a partir do Projeto RADAMBRASIL, que era constituído de imagens de radar e mapas temáticos regionais, resultando em um produto de resolução espacial de 1:250.000 e posteriormente reduzidos para 1:1.000.000.

Destaca-se também o Mapa de Solos do Brasil, desenvolvido pela Embrapa no ano de 1981, reunindo os levantamentos exploratórios do solo produzidos pelo Projeto RADAMBRASIL e complementando-os com estudos detalhados da EMBRAPA e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em um produto de escala 1:500.000. Desde então, vários mapas pedológicos foram desenvolvidos com maior resolução espacial (de 1:250.000 à 1:50.000) (ROSSI, 2017). Entretanto, estes mapas compreendem regiões ou estados específicos, e, portanto, não abrangem toda a BHPS. No presente estudo, foi utilizado o mapa pedológico referente as folhas SF.23/24 do projeto RADAMBRASIL na escala 1:250.000 (PROJETO RADAMBRASIL, 1983). Segundo as recomendações de Medeiros et al. (2018) os solos presentes na bacia foram reclassificados em solo mal drenados (Cambissolos, Gleissolos e Neossolos) e bem drenados (Argissolos, Latossolos e Nitossolos) (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Classes de solo da BHPS.



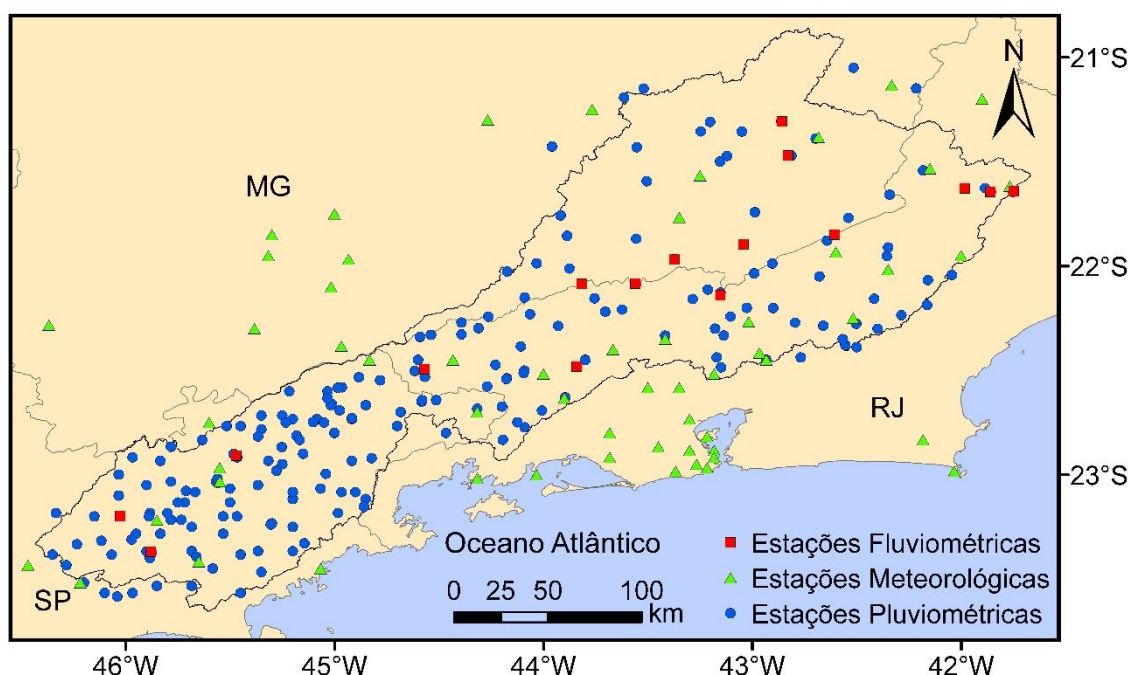
Fonte: Produção do autor.

Estações pluviométricas

Os dados de chuva das estações pluviométricas convencionais foram obtidos através da plataforma HidroWeb da ANA. Existem estações 1863 cadastradas na plataforma HidroWeb para a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul e suas

mediações (considerando um *buffer* de 50 km). Após uma minuciosa triagem dos dados, foi constatado que 402 possuíam medições computadas. Quando levado em conta o período analisado, ou seja, de 1999 a 2014, 242 estações possuíam dados e, portanto, foram utilizadas como entrada do modelo hidrológico. Os códigos das estações utilizadas no presente estudo podem ser encontrados no Apêndice A. A localização das estações pluviométricas utilizadas é apresentada na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Estações hidrometeorológicas da BHPS.



Fonte: Produção do autor.

TRMM

O TRMM foi lançado pelo foguete H-II a partir do Centro Espacial de Tanegashima da Agência de Desenvolvimento Espacial do Japão (NASDA) no dia 28 de novembro de 1997, em um esforço combinado entre os Estados Unidos e o Japão (WORQLUL et al., 2014). O satélite TRMM orbita a uma inclinação de 35° em relação ao Equador, cobrindo uma extensão muito além dos trópicos (entre 38° N e 38°S) e disponibilizando dados de alta resolução temporal (i.e. horas) e espacial (0,25° x 0,25°) (LIECHTI et al., 2012; WORQLUL et al., 2014). Conforme descrito por Chen et al. (2013), as principais fontes de dados para o *Tropical Rainfall Measuring Mission Multisatellite Precipitation Analysis* (TMPA)

3B42 são os dados de infravermelho de satélites geoestacionários e o *TRMM Microwave Imager* (TMI), *Special Sensor Microwave Imager* (SSM/I), *Special Sensor Microwave Imager/Sounder* (SSMIS), *Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS* (AMSR-E), *Advanced Microwave Sounding Unit-B* (AMSU-B) e *Microwave Humidity Sounder* (MHS) para dados de microondas, além de dados de estações convencionais do *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC) e do *Climate Assessment and Monitoring System* (CAMS).

A partir desses dados as estimativas TMPA 3B42 são produzidas em 5 etapas principais (MAGGIONI; MEYERS; ROBINSON, 2016): i) as precipitações são computadas para os sensores de microondas pelo algoritmo de Goddard; ii) as precipitações são então calibradas e combinadas; iii) as estimativas de precipitação por sensores do infravermelho são criadas e calibradas com as estimativas supracitadas; iv) as estimativas por sensores de microondas e infravermelho são combinadas e, por fim, v) é implementado uma rotina de correção de viés em escala mensal tendo como referências os dados do GPCC. No presente estudo é utilizado a versão 7 dos produtos TMPA 3B42 (TMPA 3B42V7), a qual, segundo Chen et al. (2013), apresenta pequenas a moderadas melhorias em relação à versão anterior em termos de erro médio e para detecção de eventos anômalos, incluindo aqueles em terrenos complexos.

MERGE

Algoritmos como o TMPA são conhecidos por realizar correções internas, baseadas em dados de estações convencionais, como forma de correção de viés. Apesar dessas correções, técnicas de pós-análise de integração desses algoritmos (*merging methods*) com dados de estações convencionais (geralmente diferentes daqueles usados pelo TMPA), como aquelas baseadas em ajustes espaciais por interpolação (e.g. inverso da distância, double-kernal e vizinho mais próximo), análise de regressão em diferentes escalas temporais (e.g. sazonais e mensais) e distribuição de probabilidades, são amplamente utilizadas (NERINI et al., 2015).

Rozante et al. (2010) desenvolveram um produto integrado de estimativas TMPA 3B42RT (em tempo real, ou seja, não corrigido mensalmente) e cerca de 1500

estações pluviométricas do *Global Telecommunication Systems* (GTS), estações pluviométricas automáticas, e dados disponibilizados pelas agências regionais brasileiras, denominado MERGE. O MERGE é desenvolvido a partir das seguintes etapas (ROZANTE et al., 2010): i) são identificadas as células de grade do TRMM que coincidem com a posição de estações pluviométricas; ii) para estas células os dados TRMM são substituídos pelos dados das estações convencionais de modo a atribuir maior peso aos dados observados; iii) os dados TRMM das duas linhas e colunas adjacentes as células identificadas são excluídos, o que resulta na remoção das estimativas por sensores remotos para as 24 células mais próximas; iv) o mapa gerado pela combinação de dados TRMM e dados de estações convencionais é então interpolado usando a análise objetiva de Barnes (BARNES, 1973) e v) as estimativas são validadas por meio da validação cruzada. Os resultados da interpolação possuem resolução espacial de 20 km e temporal de 24 horas, cobrindo toda a América do Sul para todo o período da série histórica do TRMM.

Vazão

No presente estudo foram utilizadas 3 bases de dados de vazão: i) vazões naturais, ii) vazões naturalizadas e iii) vazões vertidas. As vazões naturais são obtidas a partir de estimativas diárias da vazão derivadas das curvas-chave de seções naturais monitoradas. Estes dados são disponibilizados pela ANA e podem ser obtidos na plataforma HidroWeb. Já para as seções compostas por grandes barramentos, responsáveis por mudanças significativas no regime hidrológico (Santa Branca, Jaguari e Ilha dos Pombos), foram utilizadas estimativas indiretas da vazão, i.e. vazão naturalizada, e vazões de fato vertidas, disponíveis na plataforma do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Por definição, vazões naturalizadas são aquelas que ocorreriam na seção caso desconsiderado as atividades antropogênicas, como por exemplo, a operação de reservatórios, extrações de água para consumo humano, irrigação etc. (GUILHON; ROCHA; MOREIRA, 2007). Já as vazões vertidas são aquelas que de fato são propagadas a jusante do reservatório e são compostas pela vazão ecológica, a vazão utilizada na geração de energia (caso se trate de uma hidrelétrica) e a

vazão extravasada pelo vertedouro da barragem. A lista dos dados de vazão utilizados é apresentada no Apêndice B. A localização das estações fluviométricas utilizadas é apresentada na Figura 3.6.

Clima e uso e cobertura da terra

O MGB-IPH exige dados de entrada das médias mensais de temperatura (°C), umidade do ar (%), insolação (horas/dia), velocidade do vento (m/s) e pressão (kPa). Estes dados, necessários para a interpolação dos dados de clima e o posterior cálculo da evapotranspiração no modelo, foram extraídos do banco de dados interno do MGB-IPH, derivado das normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para observações realizadas entre 1961 e 1990. No total, foram consideradas 64 estações meteorológicas cuja localização é apresentada na Figura 3.6. A lista dos dados das estações meteorológicas é apresentada no Apêndice C. Já os parâmetros referentes a cobertura da terra, como albedo, índice de área foliar, altura da vegetação e resistência superficial, foram considerados fixos ao longo do ano, com as magnitudes recomendadas por Medeiros et al. (2018).

3.2.2 Programas computacionais e linguagens de programação

Para a implementação do trabalho foram utilizados recursos computacionais gratuitos, possibilitando a implementação de novas rotinas e adaptação de abordagens preexistentes.

Quantum GIS

A primeira parte do projeto foi desenvolvida no sistema de informações geográficas QuantumGIS. O QuantumGIS foi desenvolvido em 2002 em linguagem C++ e disponibilizado em uma interface gráfica de fácil utilização. O programa foi lançado sob uma licença *General Public License* (GPL), referente a permissão ao usuário a inspecionar, acessar e modificar o código fonte de maneira livre e gratuita (QGIS, 2018). O pré-processamento dos dados espaciais foi realizado no *plug-in IPH Hydro-Tools* (SIQUEIRA et al., 2016), composto pelas ferramentas de conversão dos dados QGIS ASCII para IPHHT ASCII, extração da área de interesse, remoção de sumidouros, determinação dos fluxos acumulados, definição e segmentação da rede de drenagem, delimitação das

bacias hidrográficas, obtenção das minibacias, álgebra de mapas para a geração das HRUs e criação dos arquivos de entrada do modelo. As etapas de processamento de dados hidrológicos e pós-processamento do modelo foi realizada com o auxílio do *plug-in* MGB, utilizado na implementação dos dados de precipitação, vazão, clima, definição dos parâmetros de vegetação e solo e calibração e simulação das vazões (MEDEIROS et al., 2018).

Cygwin

O Cygwin é uma Interface de Programação de Aplicações (API), que permite a compilação e utilização de aplicações originalmente desenvolvidas para Unix ou Linux no Windows (Cygwin, 2019). O Cygwin foi utilizado para o download automatizado das séries históricas de precipitação por sensores remotos.

RStudio

O RStudio, inicialmente lançado em 2011, é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) para a linguagem de programação R, disponibilizado de maneira livre e de ampla utilização em estudos estatísticos. Majoritariamente escrito em Java e C++, o RStudio é disponibilizado nas versões Desktop e Server para Windows, macOS e Linux (RStudio, 2019). O RStudio foi utilizado na organização e preparo das séries históricas de precipitação (tanto das estações convencionais quanto dos dados de satélite), cálculo das estatísticas de chuva e na construção de gráficos.

Visual Studio

O Visual Studio é um IDE utilizado para editar, depurar e compilar códigos em 36 linguagens de programação diferentes (e.g. C, C++, Visual Basic, JavaScript, XML, HTML, Python, etc.) (Visual Studio, 2019). O Visual Studio foi utilizado para compilar os códigos do MGB-IPH escrito na linguagem de programação FORTRAN e converter os dados de vazão das seções barradas para o formato ASCII-Colunas necessário para entrada no MGB-IPH (MEDEIROS et al., 2018).

Super Manejo de Dados

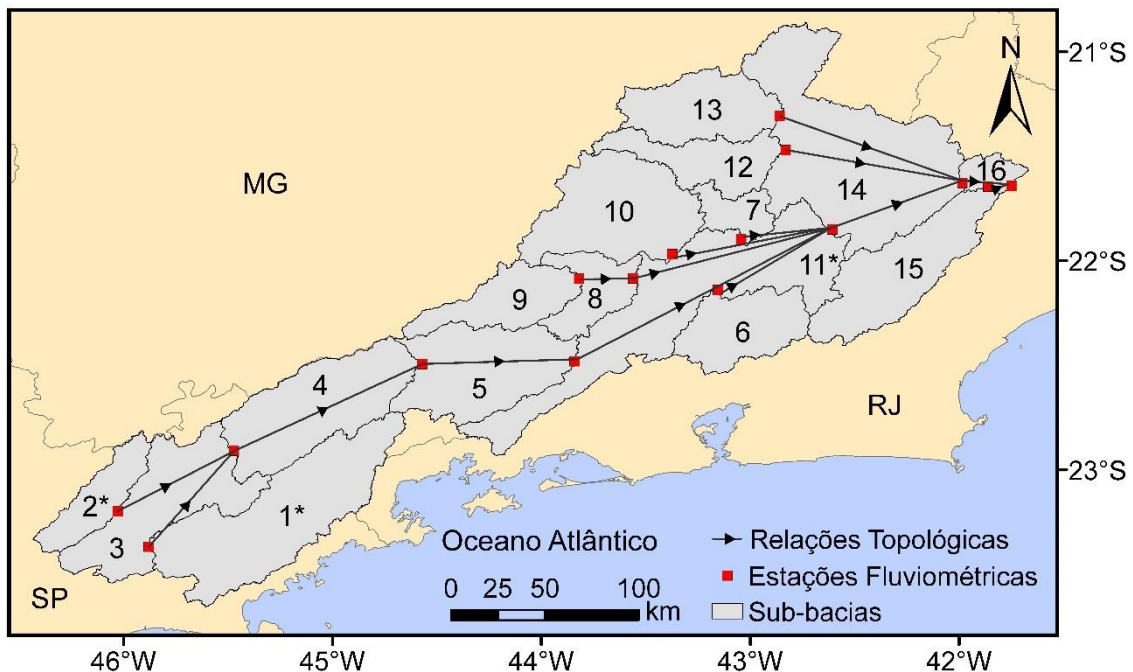
O Super Manejo de Dados é um programa executável, desenvolvido pelo grupo de pesquisa em Hidrologia de Grande Escala do IPH com o propósito de auxiliar

no manuseio dos dados hidrológicos da plataforma HidroWeb. No presente estudo, este programa foi utilizado para a conversão dos dados das estações pluviométricas e fluviométricas do formato ASCII-HidroWeb para o formato ASCII-Colunas necessário para entrada no MGB-IPH (MEDEIROS et al., 2018).

3.3 Métodos

Após uma análise exploratória dos dados disponíveis, foi estipulado o período de 1999 a 2014. Este período contempla a disponibilidade de dados de vazão das barragens encontradas na BHPS e da série do TRMM, permitindo a possibilidade de validação dos resultados para um período de 4 anos. Foram delimitadas 16 sub-bacias segundo a disponibilidade de dados fluviométricos para o período analisado. Essas 16 sub-bacias tiveram os parâmetros calibrados e as vazões ajustadas a partir de dados observados. As seções de controle e suas relações topológicas são apresentadas na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Relações topológicas das sub-bacias da BHPS.



* Seções barradas com vazões naturalizadas.

Fonte: Produção do autor.

Vale destacar que para cada uma das 16 sub-bacias serão calibrados 4 parâmetros dependentes do tipo de HRU (W_m , b , K_{int} e K_{bas}) e 3 parâmetros

independentes do tipo de HRU (C_s , C_i e C_b). Sabendo que até 8 HRUs calibráveis (excluindo a HRU água) podem ser encontradas em uma sub-bacia, o total de parâmetros calibráveis por sub-bacia pode chegar à 35. Ou seja, até 560 parâmetros podem ser calibrados para a área de estudo, o que torna a calibração manual dos parâmetros inviável.

3.3.1 Pré-processamento de dados espaciais

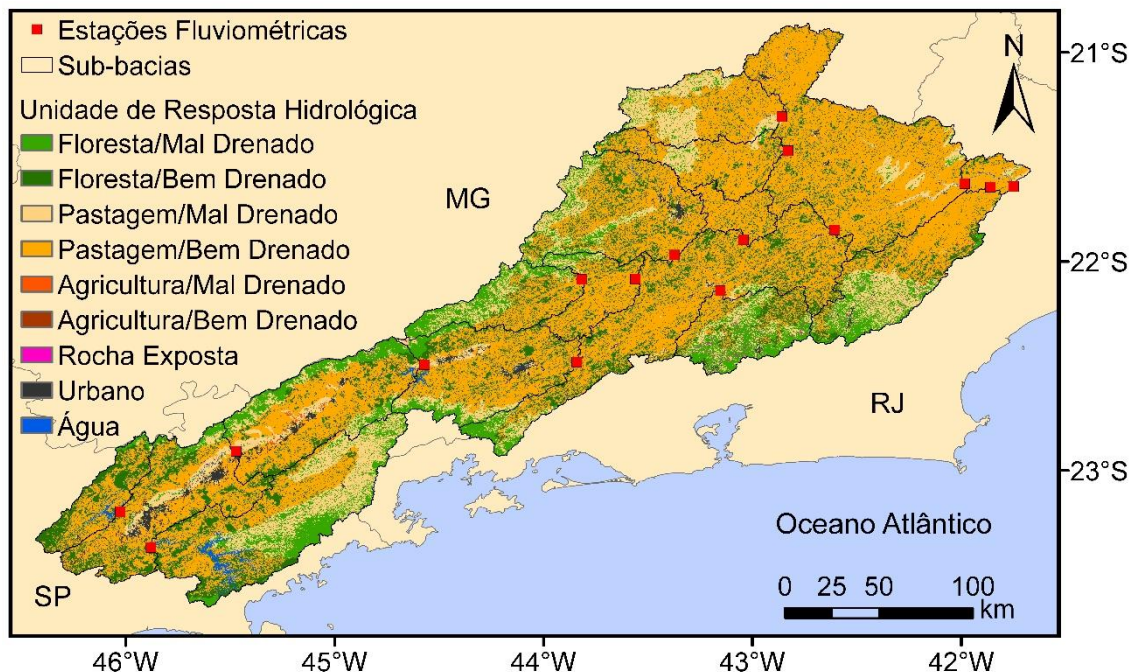
A primeira etapa de aplicação do MGB-IPH é o pré-processamento de dados espaciais para discretização da bacia. Esta etapa foi realizada com o auxílio da ferramenta *IPH Hydro-Tools* (SIQUEIRA et al. 2016), disponível para o software de código-fonte aberto QuantumGIS. Nesta etapa foram obtidos os arquivos necessários para a simulação hidrológica, incluindo: MDE hidrológicamente consistente, mapa de direção de fluxo, delimitação das sub-bacias monitoradas, minibacias (i.e. bacias unitárias) e HRUs.

Uma vez delimitada a área de estudo foram eliminadas as depressões ou sumidouros que causariam a interrupção do fluxo. No presente estudo foi utilizado o método *Modify Heuristic Search* (MHS) para a remoção de depressões, o qual segundo Siqueira et al. (2016) apresenta um melhor desempenho quando comparado a rotinas comumente utilizadas (e.g. *Priority-First-Search* – PFS).

O próximo passo foi a determinação da direção de fluxo e do fluxo acumulado. O *IPH Hydro-Tools* utiliza o método determinístico *eight-node* (D8) para identificação do caminho preferencial do escoamento. Neste método as declividades de cada célula em relação as suas 8 vizinhas são computadas. Uma vez que a maior declividade positiva seja identificada, é atribuído um código que identifica a direção da célula vizinha de maior declividade à jusante (SIQUEIRA et al., 2016). A partir deste dado foi calculado o fluxo acumulado que contabiliza o número total de células que convergem para uma determinada célula. Com o arquivo de fluxo acumulado, delimitou-se a rede de drenagem a partir de um limiar de células equivalente a 20 km² que drenam para o ponto onde a rede começa a ser traçada (MEDEIROS et al., 2018).

Posteriormente foram obtidos as minibacias com base na segmentação da rede de drenagem e o mapa de HRUs. As HRUs foram definidas por meio de álgebra de mapas. Tendo em vista as características do modelo, assim como o caráter genérico dos dados disponíveis, foram estipuladas 6 classes de uso e cobertura (floresta, pastagem, agricultura, urbano, rocha exposta, água) e 2 classes de solo (mal drenado e bem drenado), e, portanto, 9 classes possíveis de HRU, conforme sugerido por Medeiros et al. (2018). A Figura 3.8 ilustra as HRU criada a partir das classes de solo e uso e cobertura apresentadas nas Figuras 3.5 e 3.4, respectivamente.

Figura 3.8 – HRUs definidas da BHPS.



Fonte: Produção do autor.

3.3.2 Processamento de dados hidrológicos

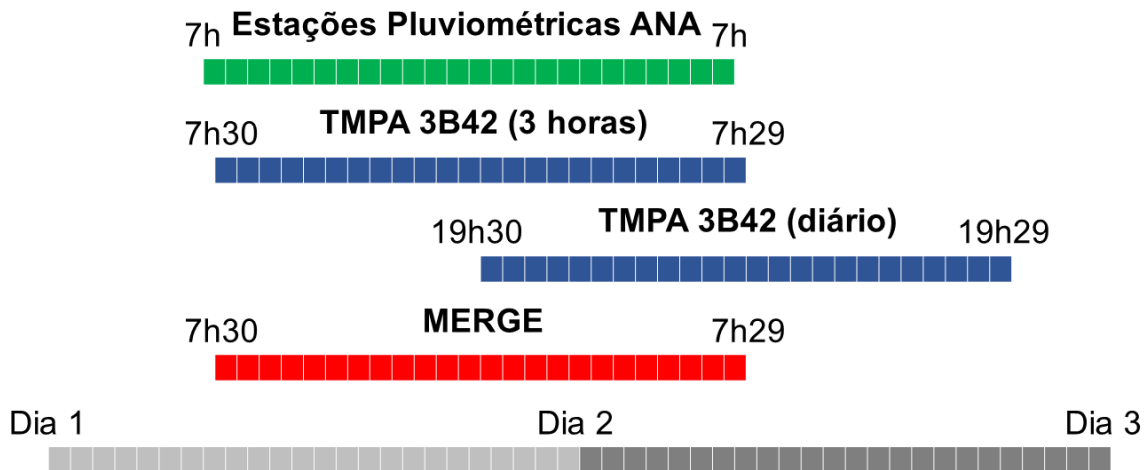
Nesta etapa de desenvolvimento do trabalho, foram realizados 5 procedimentos principais: i) avaliação dos dados convencionais de precipitação, ii) validação e avaliação dos dados de precipitação derivados de sensores remotos, iii) análise dos dados de vazão e definição das sub-bacias, iv) parametrização do clima por meio das normais climatológicas e v) parametrização da vegetação.

3.3.2.1 Preparo dos dados de chuva

Para que a comparação e validação dos produtos de precipitação fosse possível, todos os dados (i.e. das estações convencionais, TMPA 3B42V7 e MERGE) foram colocados na mesma escala espaço-temporal. Os dados das estações pluviométricas, disponibilizados pela ANA, são referentes ao acumulado diário das 7 horas (-3 UTC) do dia anterior às 7 horas do dia da medição (REIS; RENNÓ; LOPES, 2017) e foram utilizados como referência na validação dos produtos de precipitação para o período de 1 de janeiro de 2001 à 31 de dezembro de 2012. Vale destacar que este período foi estipulado por abranger o maior número de séries históricas, para o maior período da série TRMM e com a menor quantidade de falhas. Tendo em vista o caráter espacial, em termos de sub-bacias, da análise hidrológica, as precipitações médias diárias para as 16 sub-bacias analisadas foram geradas a partir da interpolação pelo método dos Polígonos de Thiessen. Portanto, 16 mapas diários de precipitação (um para cada sub-bacia) foram gerados e comparados com os mapas diários de precipitação das estimativas de precipitação por sensores remotos.

Já os dados diários TMPA 3B42 são referentes aos acumulados das 19 horas e 30 minutos do dia anterior às 19 horas e 29 minutos do dia em questão (-3 UTC) e, portanto, são incompatíveis com os dados *in situ*. Por esse motivo, os valores de precipitação diária do TMPA 3B42 foram calculados a partir dos produtos de 3 horas, sendo resultado do acumulado das 7 horas e 30 minutos do dia anterior às 7 horas e 29 minutos do dia em questão, conforme proposto por Reis et al. (2017). De maneira análoga, Rozante et al. (2010) integraram os dados TMPA 3B42RT aos dados *in situ* na formação dos produtos MERGE. Para os dados de sensores remotos os 16 mapas diários de precipitação (um para cada sub-bacia) foram gerados pelo método da média ponderada pela área da célula de grade contido na sub-bacia (detalhes do processo de integração podem ser encontrados na Seção 4.1). A Figura 3.9 ilustra as resoluções temporais das fontes de dados de precipitação consideradas no presente estudo.

Figura 3.9 – Característica temporal das fontes de dados de precipitação.



Fonte: Adaptado de Reis et al. (2017).

A interpolação dos dados das estações convencionais, assim como o cálculo da média ponderada da precipitação por sub-bacias, foi realizada no software R (RStudio, 2019) a partir do pacote *raster* (HIJMANS, 2015). Os dados compatibilizados espacialmente (em escala de sub-bacia) e temporalmente (com uma diferença de apenas 30 minutos) foram então empregados no processo de validação.

3.3.2.2 Validação da precipitação

Um dos maiores empecilhos para a modelagem hidrológica em muitas regiões do globo se dá pela falta de dados confiáveis de precipitação (TOBIN; BENNETT, 2009). A precipitação é a principal entrada de modelos hidrológicos e, portanto, a qualidade da estimativa da vazão é intrinsecamente dependente da qualidade das estimativas de precipitação (NIKOLOPOULOS et al., 2010). De acordo com Tobin e Bennett (2010) existe um crescente entendimento que para a simulação adequada dos processos hidrológicos, a escolha do produto de entrada de precipitação é mais importante, até mesmo que, a escolha do modelo hidrológico a ser utilizado. Apesar de suas vantagens espaço-temporais, estimativas por sensores orbitais estão sujeitas a uma variedade de erros ainda não completamente compreendidos (CHEN et al., 2013), como por exemplo, lacunas entre revisitas, falta de relação direta entre sinais remotos e a taxa de precipitação, interferência nos sinais devido a efeitos atmosféricos, incertezas

relacionadas aos algoritmos e erros aleatórios (NAIR; SRINIVASAN; NEMANI, 2009; BITEW; GEBREMICHAEL, 2011). Por outro lado, estações pluviométricas são consideradas a ferramenta mais precisa para a estimativa da precipitação (NIKOLOPOULOS et al., 2010) e, conseqüentemente, são geralmente utilizadas como a “verdade” na validação de produtos de precipitação (ROZANTE et al., 2010). Assim sendo, a comparação entre dados *in situ* e estimativas de sensoriamento remoto é aceita como procedimento essencial para a validação de produtos de satélites (OUMA et al., 2012).

Segundo Thiemi et al. (2013), existem 2 métodos para a validação dos produtos de precipitação por sensores remotos, a avaliação “pixel-a-pixel” e a avaliação hidrológica. Sendo o primeiro baseado na comparação direta entre as estimativas de produtos de sensoriamento remoto com dados *in situ* e o segundo a partir da avaliação da capacidade preditiva das vazões derivadas de estimativas orbitais de precipitação aplicadas à modelagem hidrológica; sendo esta realizada por meio da comparação de diferentes entradas de precipitação em um modelo hidrológico, utilizando a vazão como função objetivo para a validação (STISEN; SANDHOLT, 2010).

De acordo com Bitew e Gebremichael (2011), a abordagem amparada por modelos hidrológicos possui 2 vantagens principais: i) como a abordagem é realizada na escala de bacia, a mesma não está sujeita a problemas de escala, comuns quando da validação “pixel-a-pixel” e ii) as estimativas por satélite são avaliadas para uma aplicação específica, a partir de critérios práticos e objetivos. Para Stisen e Sandholt (2010) esta vantagem é essencial visto que as validações “pixel-a-pixel” tendem a gerar resultados insatisfatórios, o que não é verdade na escala de bacia, graças às integrações espaciais e temporais necessárias para a aplicação.

Diversas abordagens podem ser adotadas para a avaliação e validação das estimativas da precipitação na escala de bacia, tanto em termos de análise visual, e.g. gráficos de precipitação acumulada, erro absoluto, precipitação média mensal e dispersão entre estimativas por estações convencionais e sensores remotos (TONG et al., 2018, BUI; ISHIDAIRA; SHAOWEI, 2019),

quanto por meio de medidas estatísticas, e.g. coeficiente de correlação (r), raiz quadrada do erro médio ($RMSE$) e viés relativo ($RBias$) (XUE et al., 2013; MOAZAMI et al., 2013). No presente estudo as análises supracitadas foram utilizadas para a validação hidrológica dos produtos de precipitação aplicada para as 16 sub-bacias hidrográficas do Paraíba do Sul por meio das seguintes estatísticas:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{S_i} - \bar{P}_S)(P_{O_i} - \bar{P}_O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{S_i} - \bar{P}_S)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{O_i} - \bar{P}_O)^2}} \quad (3.1)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_{S_i} - P_{O_i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

$$RBias = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{S_i} - P_{O_i})}{\sum_{i=1}^N P_{O_i}} \times 100\% \quad (3.3)$$

Onde, P_{S_i} é a estimativa de precipitação por sensor remoto e P_{O_i} a medição pela estação pluviométrica convencional, para o dia i de um total N . \bar{P}_S e \bar{P}_O são as médias diárias históricas de precipitação para a estimativa do sensor e os dados das estações convencionais, respectivamente.

O produto de precipitação por satélite, que apresentou maior concordância com os dados observados, foi então escolhido para ser implementado no modelo hidrológico. Bitew e Gebremichael (2011) avaliaram a simulação hidrológica a partir de dados de sensoriamento remoto para um modelo calibrado com ambas, estações convencionais e produtos de sensoriamento remoto. Os autores observaram uma melhora significativa nas vazões simuladas pelo modelo ao ser calibrado com a respectiva fonte de dado (i.e. calibrar e simular com os dados de sensoriamento remoto). Essa característica é possível uma vez que os parâmetros do modelo são capazes de se adaptar às diferenças de viés entre as fontes de dado de precipitação (BUI; ISHIDAIRA; SHAOWEI, 2019), mesmo que isso acarrete na má representação de outros processos hidrológicos, como observado por Bitew e Gebremichael (2011) em relação a evapotranspiração. No presente estudo o produto de precipitação selecionado foi utilizado para a

calibração e validação do modelo. As compensações necessárias nos parâmetros calibrados são discutidas na Seção 4.3.

3.3.2.3 Preparo dos dados de vazão

Para a implementação das vazões no modelo, foi desenvolvida uma rotina no Visual Studio para a transformação dos dados de vazões observadas da ANA e vazões naturalizadas da ONS para o formato ASCII coluna, conforme descrito por Medeiros et al. (2018). Estes dados foram então vinculados às suas respectivas minibacias e utilizados como referência no processo de calibração e validação. Substituições foram realizadas nas bacias barradas de Santa Branca, Jáguari e Ilha dos Pombos. Tendo em vista a característica do manejo desses reservatórios, diferenças significativas são observadas entre as vazões afluentes e as vazões de fato vertidas. Nestes casos o modelo foi calibrado e validado para as vazões naturalizadas, ou seja, aquelas que ocorreriam caso não existisse a barragem. Porém, uma vez calibrado, as vazões propagadas da seção barrada para a seção não barrada a jusante são substituídas pela vazão de fato vertida, de modo a não influenciar na calibração e validação das seções a jusante. Vale destacar que nos casos de barramento a montante de uma seção natural monitorada, deve-se: i) calibrar a seção barrada para as vazões naturalizadas, ii) utilizar as vazões vertidas da barragem no sentido barragem-jusante e iii) calibrar a seção natural para as vazões observadas. As seções barradas com vazões naturalizadas são apresentadas na Figura 3.7.

Para o presente estudo foi adotado um período total de 16 anos para a implementação do modelo, dos quais os 2 primeiros anos foram reservados para o aquecimento do modelo (de 1 de janeiro de 1999 à 31 de dezembro de 2000), 10 anos para a calibração (de 1 de janeiro de 2001 à 31 de dezembro de 2010) e 4 anos para a validação (de 1 de janeiro de 2011 à 31 de dezembro de 2014).

3.3.2.4 Preparo dos dados de clima e vegetação

As normais climatológicas foram consideradas em escala mensal a partir das estações meteorológicas encontradas na bacia e suas mediações e interpoladas para as minibacias pelo método do vizinho mais próximo. Os demais parâmetros relacionados à vegetação são considerados constantes para as HRUs e foram

obtidos a partir de valores de referência encontrados na literatura (MEDEIROS et al., 2018).

3.3.3 Análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo

White e Chaubey (2005) recomendam que a avaliação da aplicação de um modelo em uma dada bacia deve ser feita por meio da análise de sensibilidade dos parâmetros, calibração e validação. A calibração é uma etapa fundamental na aplicação de um modelo hidrológico, uma vez que esta permite o ajuste dos parâmetros do modelo para uma dada bacia (BESKOW; MELLO; NORTON, 2011b). Entretanto, se o número de parâmetros é elevado, esta etapa pode ser demorada e exaustiva. A análise de sensibilidade tem como objetivo expressar a influência de diferentes parâmetros do modelo sobre as estimativas de vazão, sendo que quanto maiores as variações nas estimativas de vazão, maior a sensibilidade do parâmetro (BESKOW et al., 2011a). Dessa forma, a identificação dos parâmetros mais influentes na calibração do modelo, por meio da análise de sensibilidade, se apresenta como um procedimento importante para o cumprimento do princípio da parcimônia.

Diversos métodos podem ser utilizados para a avaliação da sensibilidade dos parâmetros do modelo. Beven (2012) apresenta diferentes abordagens de análise global de sensibilidade, baseados em hipercubos no espaço de parâmetros, simulações Monte Carlo e na decomposição da variância das variáveis estimadas por uma amostra de simulações do modelo. Viola et al. (2013), por outro lado, destacam métodos visuais de análise da sensibilidade, os quais por definição são facilmente implementados e interpretados. Por meio deste método a análise de sensibilidade é conduzida separadamente para cada parâmetro, de modo que enquanto um parâmetro é variado, os demais são mantidos fixos, a taxa de variação nas funções objetivo devido às variações na magnitude dos parâmetros são então utilizadas para determinar, qualitativamente, a sensibilidade dos parâmetros (COLLISCHONN, 2001).

Collischonn (2001), em um estudo aplicado ao rio Taquari – Antas no Rio Grande do Sul, utilizou a análise visual da sensibilidade dos parâmetros do modelo MGB-IPH para identificar aqueles mais relevantes na simulação hidrológica. O autor

identificou que dos 17 parâmetros do modelo, a capacidade de armazenamento de água no solo (Wm), o parâmetro que controla a separação do escoamento superficial até a saturação da capacidade de armazenamento de água no solo (b), o escoamento da camada sub-superficial ($Kint$) e de base ($Kbas$) e os parâmetros de propagação superficial, sub-superficial e o subterrâneo C_s , C_i , C_b , são os mais sensíveis em termos de coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS), sua versão logarítmica (NS_{log}) e o erro no volume (ΔV):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - Q_{est}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}]^2} \quad (3.4)$$

$$NS_{log} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n \{\log[Q_{obs}(t)] - \log[Q_{est}(t)]\}^2}{\sum_{t=1}^n \{\log[Q_{obs}(t)] - \bar{\log}(Q_{obs})\}^2} \quad (3.5)$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{est}(t)] - \sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t)]}{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t)]} \cdot 100 \quad (3.6)$$

onde t é o passo de tempo, i.e. o dia respectivo; n é o número total de passos de tempo considerados; Q_{obs} são as vazões observadas e Q_{cal} as vazões calculadas. O NS pode chegar a um valor máximo igual a 1 quando o hidrograma estimado se iguala ao observado. Usualmente o ajuste do hidrograma estimado é classificado como “Muito bom” para $0,75 < NS \leq 1,00$, “Bom” para $0,65 < NS \leq 0,75$, “Satisfatório” para $0,50 < NS \leq 0,65$ e “Insatisfatório” para $NS \leq 0,50$ (MORIASI et al., 2007). O NS_{log} também pode chegar a valores iguais a 1, sendo que quanto mais próximo deste, melhor as simulações dos períodos de recessão do hidrograma (COLLISCHONN, 2001). Valores negativos de ΔV representam subestimativas e valores positivos de ΔV representam superestimativas da vazão, sendo que ajustes perfeitos apresentarão $\Delta V = 0$ (CALDEIRA et al., 2019). Ajustes cujo erro de volume sejam $\leq \pm 10\%$ podem ser classificados como “Muito bom”, já para $\pm 15\% \leq \Delta V < \pm 10\%$ classifica-se como “Bom”, para $\pm 25\% \leq \Delta V < \pm 15\%$ classifica-se como “Satisfatório”, e para $\Delta V > \pm 25\%$ classifica-se como “Insatisfatório” (VAN LIEW et al., 2003).

No presente estudo foi adotado a análise visual da sensibilidade dos parâmetros sugeridos por Collischonn (2001) para uma variação de 20 a 300%, conforme proposto por Viola et al. (2013), para as 16 sub-bacias analisadas. A discussão

dos resultados e suas possíveis implicações nas estimativas da vazão dado a variabilidade de uso e cobertura presente na BHPS são a apresentadas na Seção 4.2.

Na maior parte dos casos, mesmo quando os principais parâmetros do modelo são identificados pela análise de sensibilidade, não é possível estimar todos os parâmetros a partir de medições a campo, fazendo com que a calibração seja necessária. Segundo Collischonn e Tucci (2003), a calibração é a etapa mais complexa na modelagem, sendo tradicionalmente realizada manualmente, por meio de repetidas execuções do modelo e análise dos resultados. Entretanto, o ajuste manual é subjetivo, demorado e potencialmente enviesado (ECKHARDT et al., 2005). Técnicas de otimização global que combinam aspectos da abordagem por tentativa e erro (i.e. *hill-climbing*) e algoritmos baseados em evolução biológica (i.e. algoritmos genéticos) como o *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA) são amplamente utilizados em modelagem hidrológica (BESKOW et al., 2011a). O modelo MGB-IPH utiliza um algoritmo de calibração automática multi-objetivo, denominado *Multiple-Objective Complex Evolution – University of Arizona* (MOCOM-UA), considerando as funções objetivo descritas nas Equações 3.4, 3.5 e 3.6.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

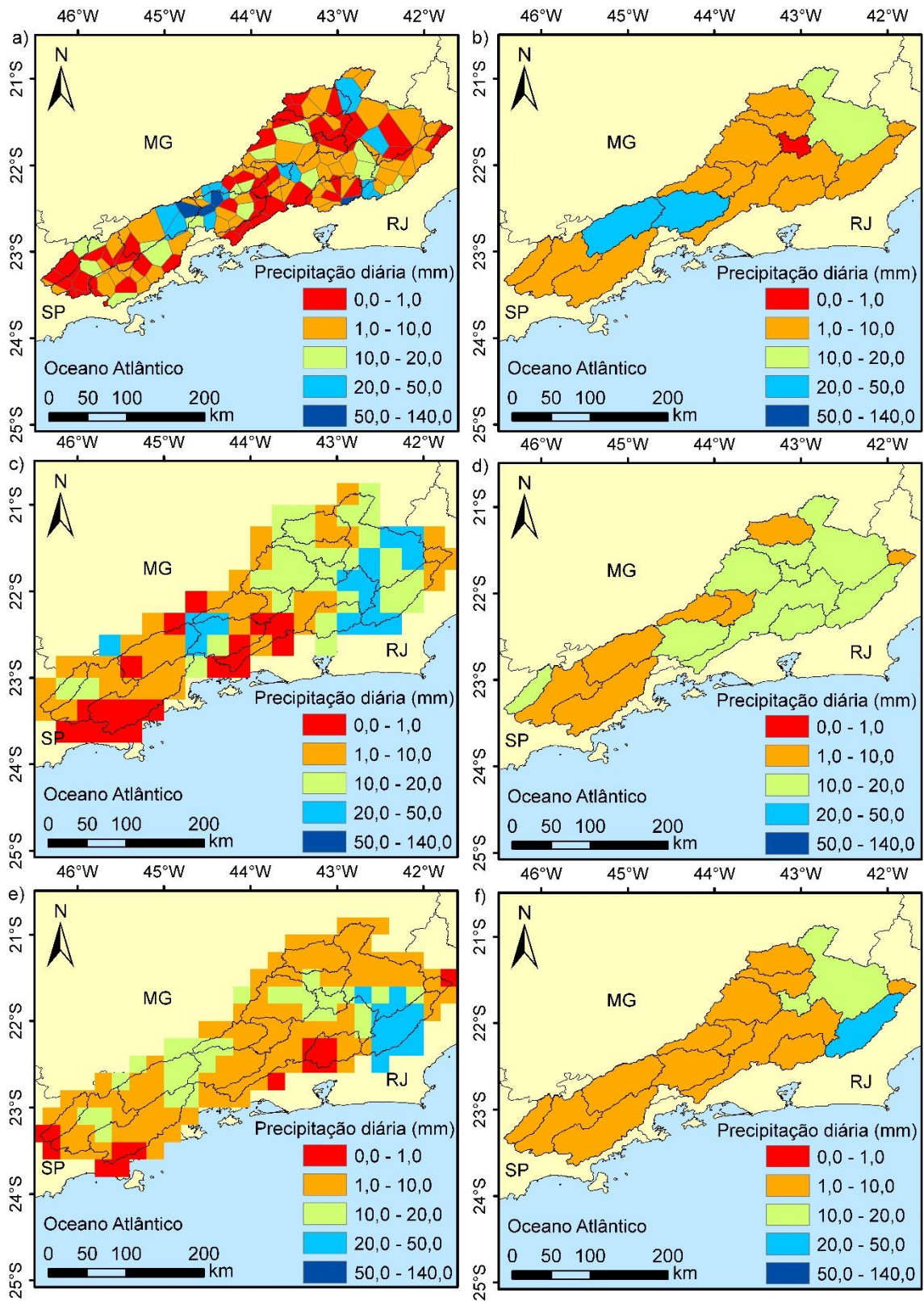
Na presente seção, são apresentados os resultados e discussões a respeito da: validação dos dados de precipitação por sensores remotos (Seção 4.1), análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo (Seção 4.2), calibração e validação do modelo, assim como os resultados das vazões simuladas e análise dos parâmetros calibrados (Seção 4.3).

4.1 Precipitação por sensores remotos

Para que os dados de precipitação por sensores remotos consideradas (TMPA 3B42V7 e MERGE) sejam propriamente avaliados em relação aos dados de referência (i.e. estações pluviométricas convencionais), ambos devem estar na mesma escala espaço-temporal. Para isso os dados de precipitação organizados temporalmente conforme descrito na Seção 3.3.1 foram integrados espacialmente na escala de bacia por meio da média ponderada da área elementar da precipitação (i.e. polígono de Thiessen para as estações convencionais e célula de grade para os produtos de sensores remotos) compreendida dentro de cada sub-bacia (REIS; RENNÓ; LOPES, 2017).

A Figura 4.1 apresenta a precipitação referente ao dia 24/03/2008 para os diferentes produtos, assim como a localização de suas unidades elementares de precipitação sobre as sub-bacias. A Figura 4.1a se refere aos polígonos de Thiessen derivados das estações pluviométricas convencionais. Já a Figura 4.1b corresponde a precipitação do TMPA 3B42V7 e a Figura 4.1c a do MERGE. As Figuras 4.1b, 4.1d e 4.1e representam as médias ponderadas dos respectivos produtos de precipitação sobre as sub-bacias.

Figura 4.1 – Resolução espacial das fontes de dados de precipitação.



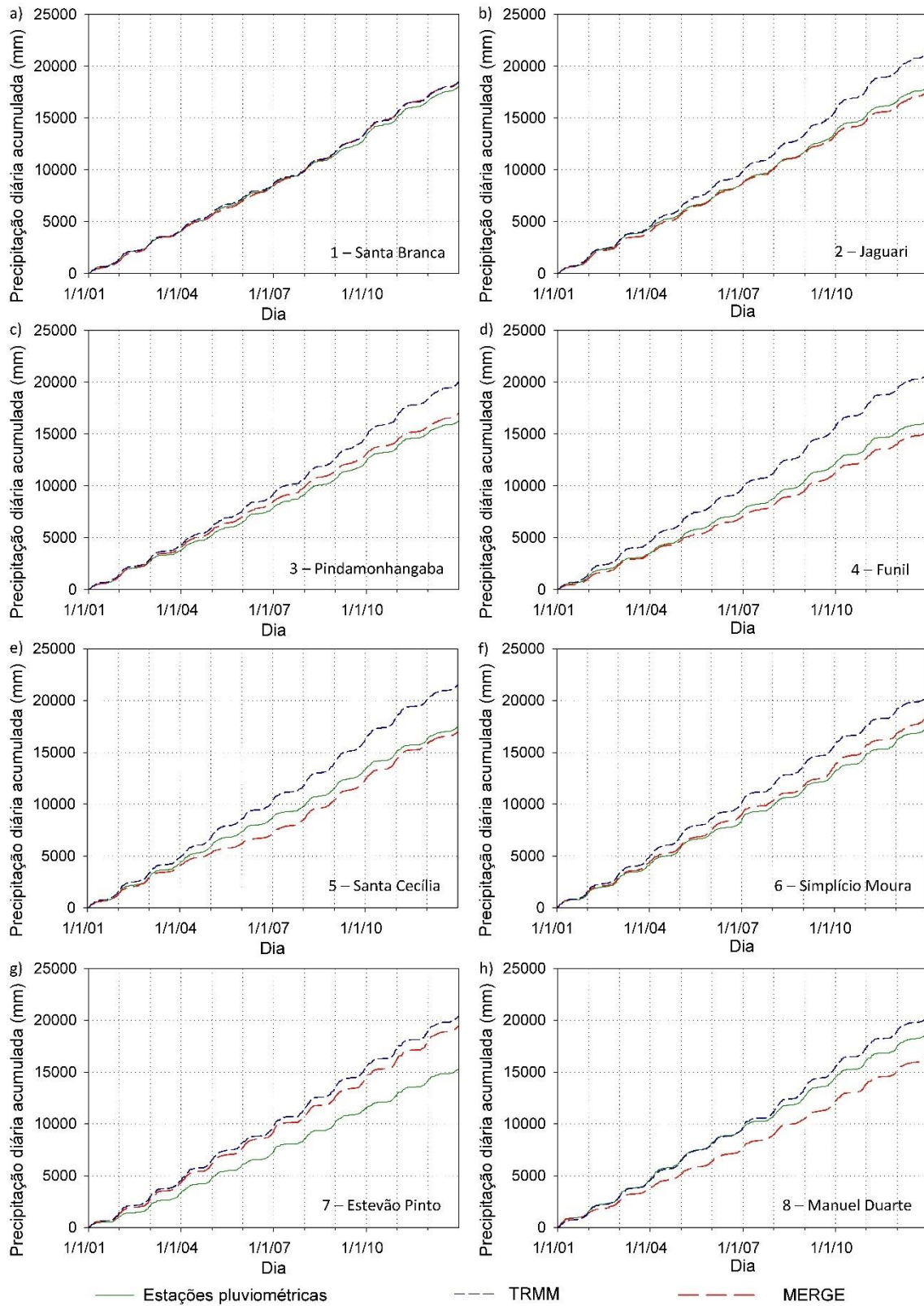
Fonte: Produção do autor.

As 16 séries históricas criadas, ou seja, uma para cada sub-bacia, para os 3 produtos de precipitação considerados, foram analisadas, comparadas e validadas conforme apresentado a seguir.

4.1.1 Avaliação dos produtos de precipitação

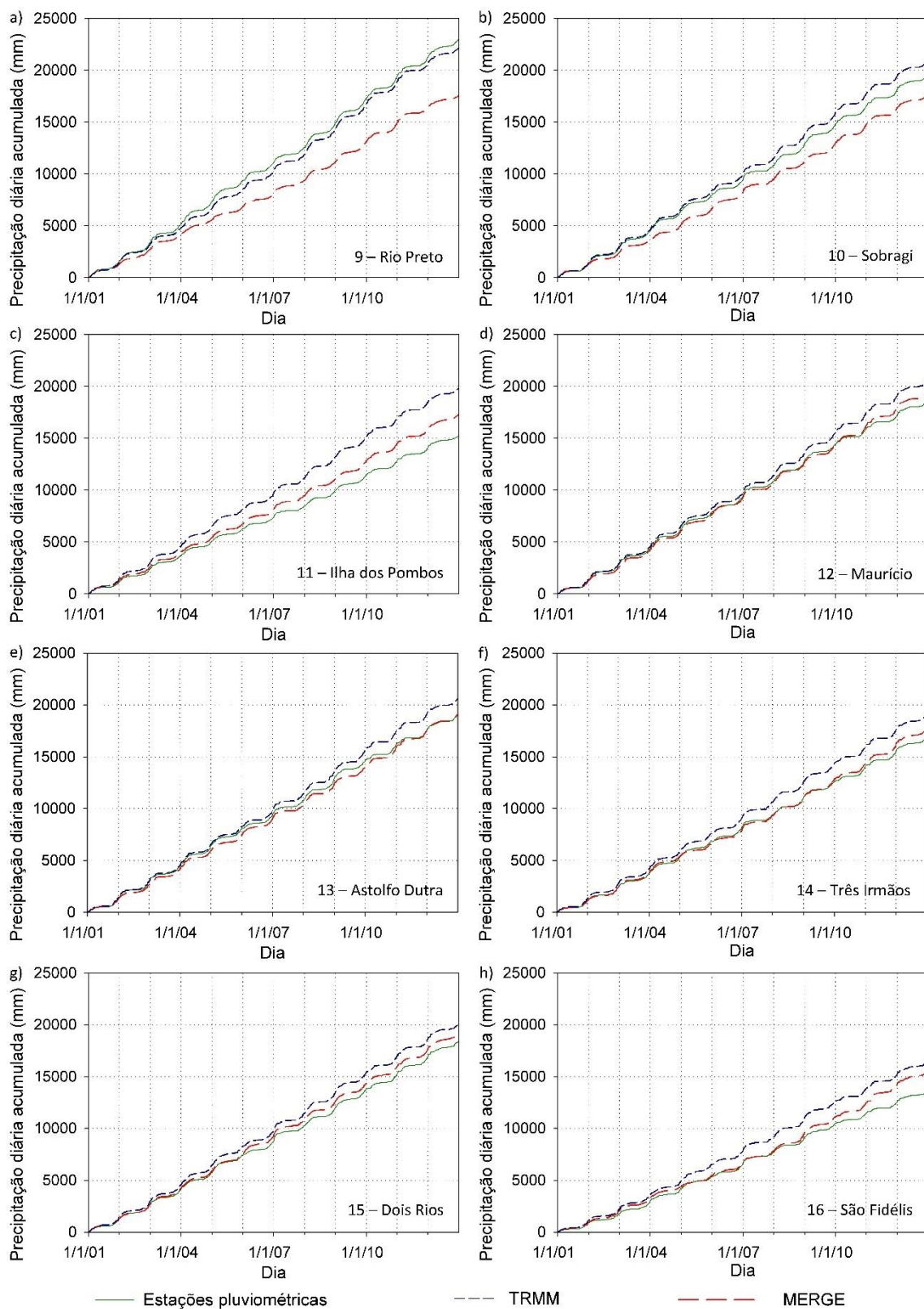
De acordo com Tong et al. (2018) e Bui et al. (2019) a avaliação e comparação preliminar dos produtos de precipitação pode se dar pela análise visual em uma série de abordagens gráficas descritivas. Dentre estas abordagens destaca-se as análises das precipitações acumuladas, dos erros diários e das médias históricas mensais, dos quais é possível inferir sobre os erros de volume, acurácia e precisão e sazonalidade das estimativas de precipitação por sensores remotos, respectivamente. As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam as precipitações diárias acumuladas para cada uma das 16 sub-bacias, para os produtos TMPA 3B42V7 e MERGE.

Figura 4.2 – Precipitação acumulada das sub-bacias da BHPS.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.3 – Precipitação acumulada das sub-bacias da BHPS.



Fonte: Produção do autor.

Como pode ser observado na Figura 4.2, a maior concordância em termos de precipitação acumulada é constatada para a bacia de Santa Branca quando comparada às outras 15 sub-bacias. Já as demais sub-bacias do alto Paraíba do Sul e/ou do vale do Paraíba do Sul (i.e. Pindamonhangaba, Funil, Santa Cecília e Ilha dos Pombos), caracterizadas pela menor altitude e complexidade topográfica (Figura 3.3), apresentam superestimativas dos produtos TMPA 3B42V7 na ordem de milhares de milímetros para fim do período considerado. O mesmo comportamento não é observado para os produtos MERGE, os quais demonstram diferenças nas precipitações acumuladas das sub-bacias de 2 a 6, após um período de 12 anos, de apenas algumas dezenas de milímetros.

Em um estudo aplicado em bacias africanas, Thiemig et al. (2013) observaram pior desempenho de produtos de sensoriamento remoto aplicado a regiões de planície, quando comparados à aqueles corrigidos a partir de estações pluviométricas convencionais. Os autores então constataram que a correção, mesmo que realizada a partir de um pequeno número de estações convencionais, tem o potencial de melhorar substancialmente a qualidade intrínseca dos dados. Neste caso, os produtos MERGE, corrigidos a partir de 1500 estações convencionais majoritariamente concentradas na região sudeste e nordeste do Brasil (ver ROZANTE et al., 2018), tendem a produzir estimativas mais próximas dos valores observados, haja vista a grande densidade de estações convencionais disponíveis para ajuste.

Já para as sub-bacias de maior altitude nas proximidades da Serra da Mantiqueira (i.e. Manuel Duarte, Rio Preto e Sobragi) o comportamento inverso é observado, ou seja, os produtos TMPA 3B42V7 apresentam precipitações acumuladas próximas aos valores observados, enquanto os produtos MERGE subestimam as precipitações na ordem de milhares de milímetros (Figura 4.2 e 4.3). Segundo Thiemig et al. (2013) esse comportamento sugere que a densidade de estações pluviométricas convencionais, as quais por definição deveria ser maior em regiões montanhosas devido à complexidade do terreno e, conseqüentemente, dos mecanismos de geração de precipitação, não é suficiente e, portanto, não favorece abordagens de correção como o MERGE. Os autores ainda apontam que nestas condições, estimativas puramente

remotas, em particular aquelas derivadas de sensores de microondas passivos, desempenham sistematicamente melhor, visto que em regiões de topografia complexa a maior acurácia dos sensores de microondas passivos é mais importante do que a maior resolução espaço-temporal dos sensores de infravermelho.

Para as demais sub-bacias, ambos produtos tendem a superestimar as precipitações. Entretanto, as superestimativas apresentadas pelo MERGE são visivelmente menores quando comparadas as do TMPA 3B42. Falck et al. (2015), ao avaliar as estimativas do TRMM para 19 sub-bacias da bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia por meio da análise das precipitações acumuladas, também constatou uma predominância das superestimativas derivadas desse produto.

Por fim vale destacar que dentre todas as sub-bacias, a de Estevão Pinto apresentou os maiores erros de volume para ambos os produtos de precipitação, os quais superestimaram as precipitações acumuladas e aproximadamente 5000 mm (Figura 4.2).

As Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam o erro da estimativa diária da precipitação para os produtos TMPA 3B42V7 e MERGE, respectivamente. É possível constatar que, de modo geral, a amplitude dos erros do TMPA 3B42V7 é consideravelmente maior do que a do MERGE. Além do mais, os erros do TMPA 3B42V7 são majoritariamente positivos, corroborando as superestimativas observadas nos erros acumulados (Figura 4.2 e 4.3).

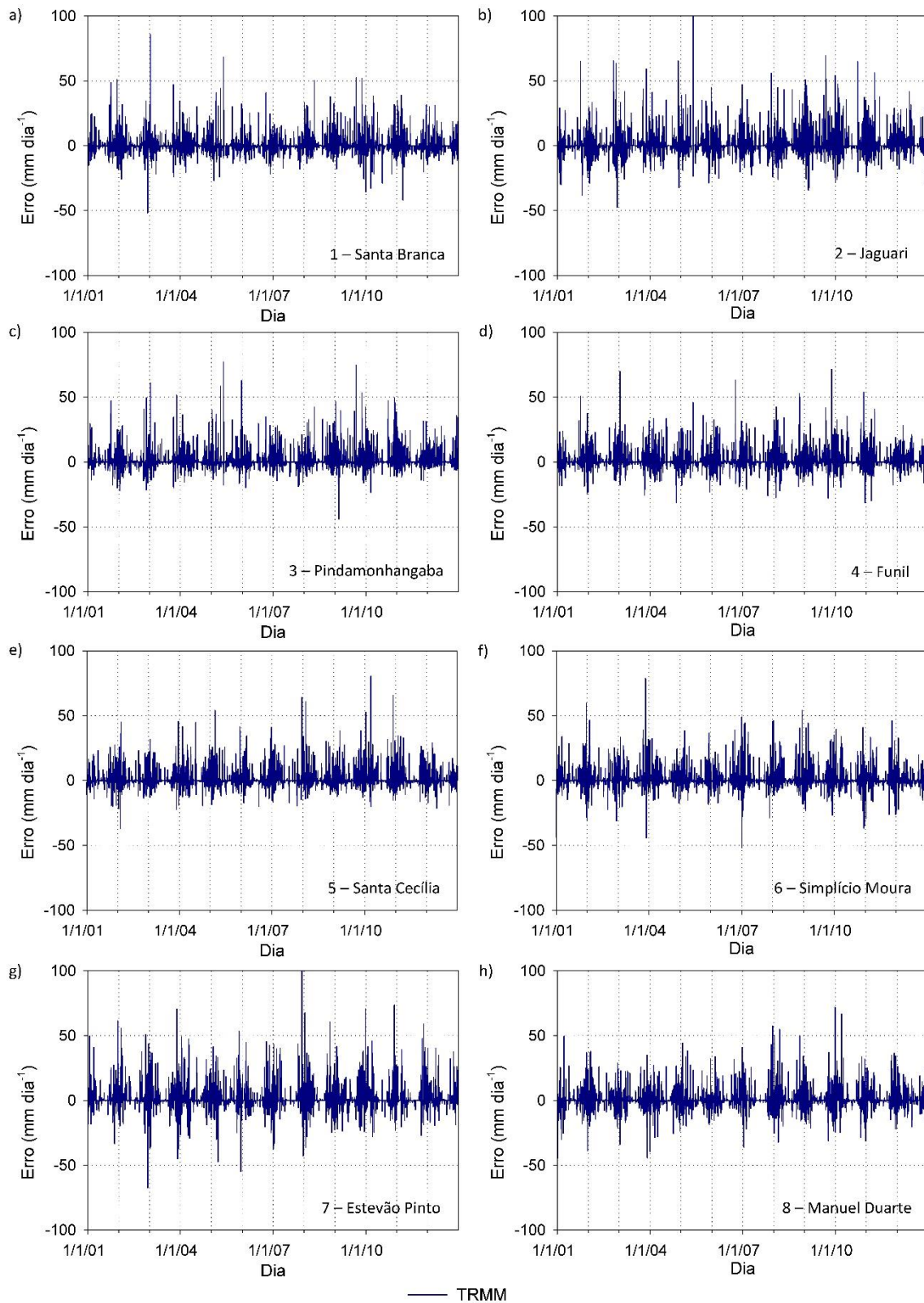
Com base nas 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 é possível ainda identificar a característica sazonal dos erros de estimativa, onde maiores erros são observados nas estações chuvosas (primavera e verão no hemisfério sul), quando comparado as estações secas (outono e inverno no hemisfério sul). Além disso, a característica espacial do erro, observado nas Figuras 4.2 e 4.3 também pode ser constatada na análise diária do erro (Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7).

É possível observar uma maior amplitude do erro diário nas sub-bacias do alto Paraíba do Sul para os produtos TMPA 3B42V7 do que para os produtos MERGE. Já para as sub-bacias próximas a Serra da Mantiqueira, apesar das

amplitudes dos erros do MERGE (Figuras 4.6 e 4.7) serem menores do que as do TMPA 3B42V7 (Figuras 4.4 e 4.5), os erros do TMPA 3B42V7 se mostram mais uniformemente distribuídos (entre erros positivos e negativos), enquanto os erros do MERGE são majoritariamente negativos. Portanto, mesmo que os erros do TMPA 3B42V7 para essas sub-bacias sejam maiores, a diferença entre as precipitações acumuladas é menor.

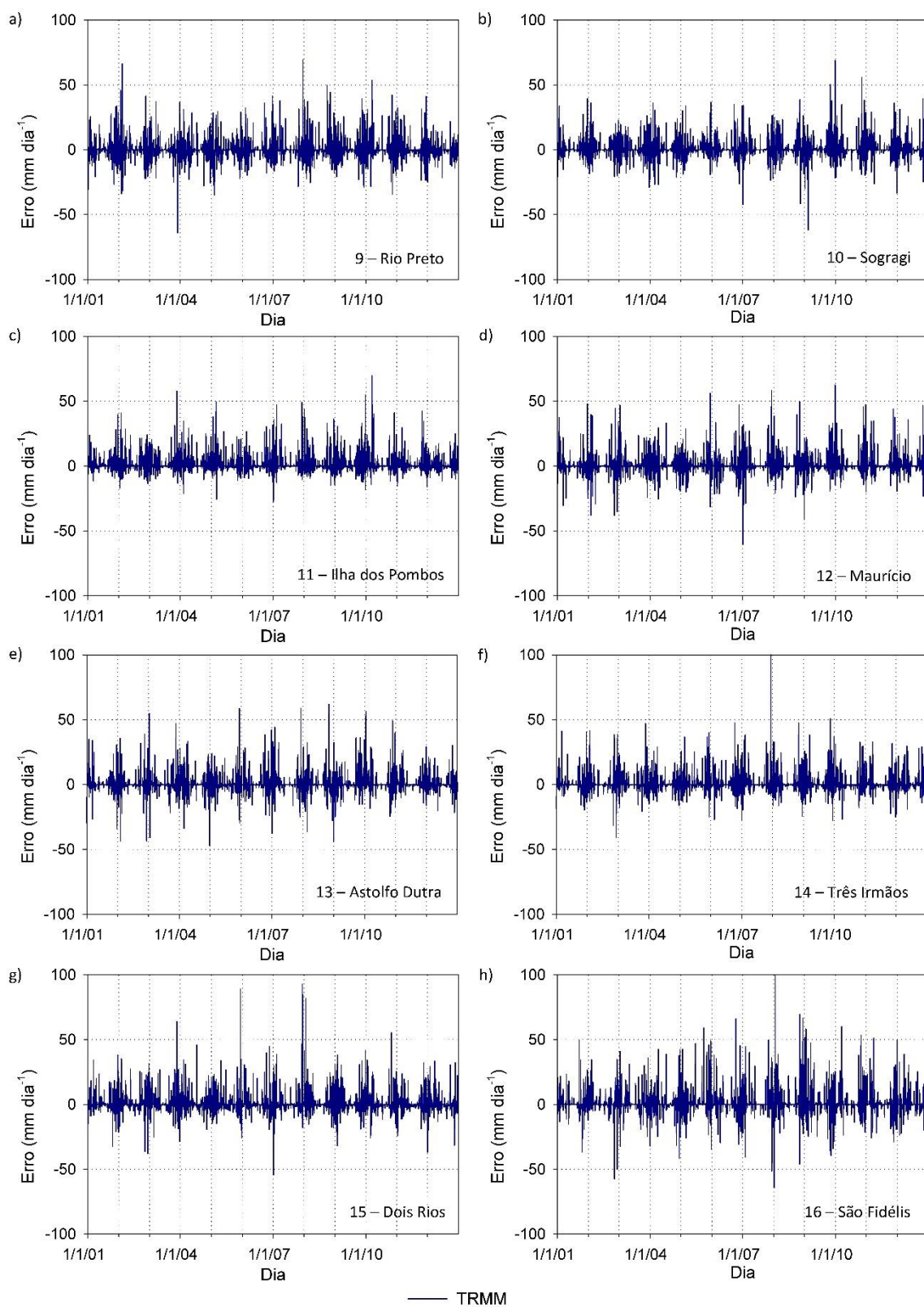
Por outro lado, as amplitudes dos erros diários para as sub-bacias de regiões planas e próximas dos cursos d'água principais da BHPS (i.e. Ilha dos Pombos e Três Irmãos) são visivelmente menores quando comparado às demais sub-bacias para ambos os produtos de precipitação. Porém, mesmo com menor amplitude, a sistematicidade do erro leva a estimativas acumuladas consideravelmente diferentes dos valores observados, conforme observado para o produto TMPA 3B42V7 na sub-bacia de Três Irmãos e TMPA 3B42V7 e MERGE na sub-bacia de Ilha dos Pombos (Figura 4.2 e 4.3). Essa característica complementar das análises visuais dos produtos de precipitação, reforça a necessidade de avaliação dos dados a partir de diferentes formas de análise visual.

Figura 4.4 – Erro diário da precipitação dos produtos TRMM 3B42V7.



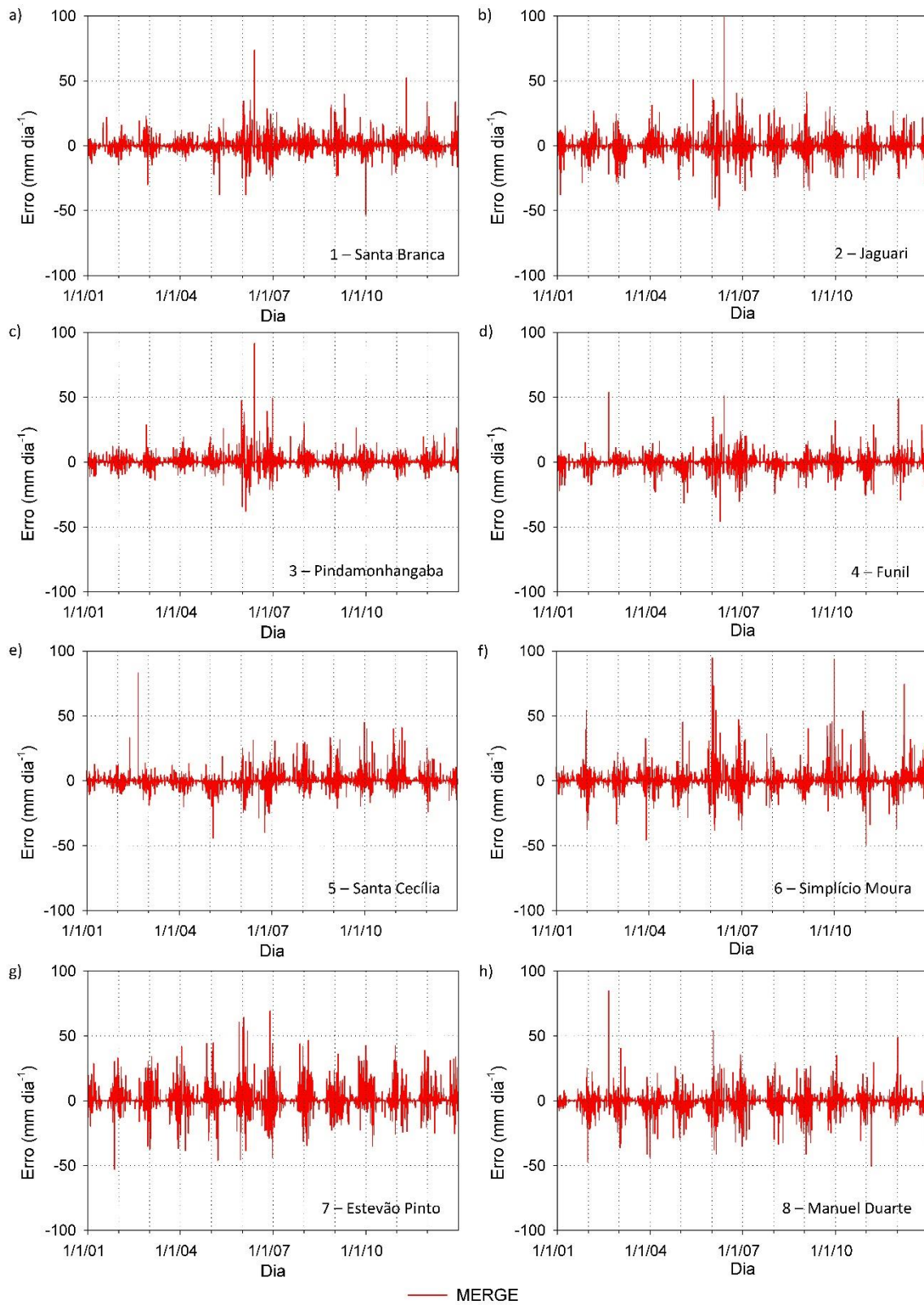
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.5 – Erro diário da precipitação dos produtos TRMM 3B42V7.



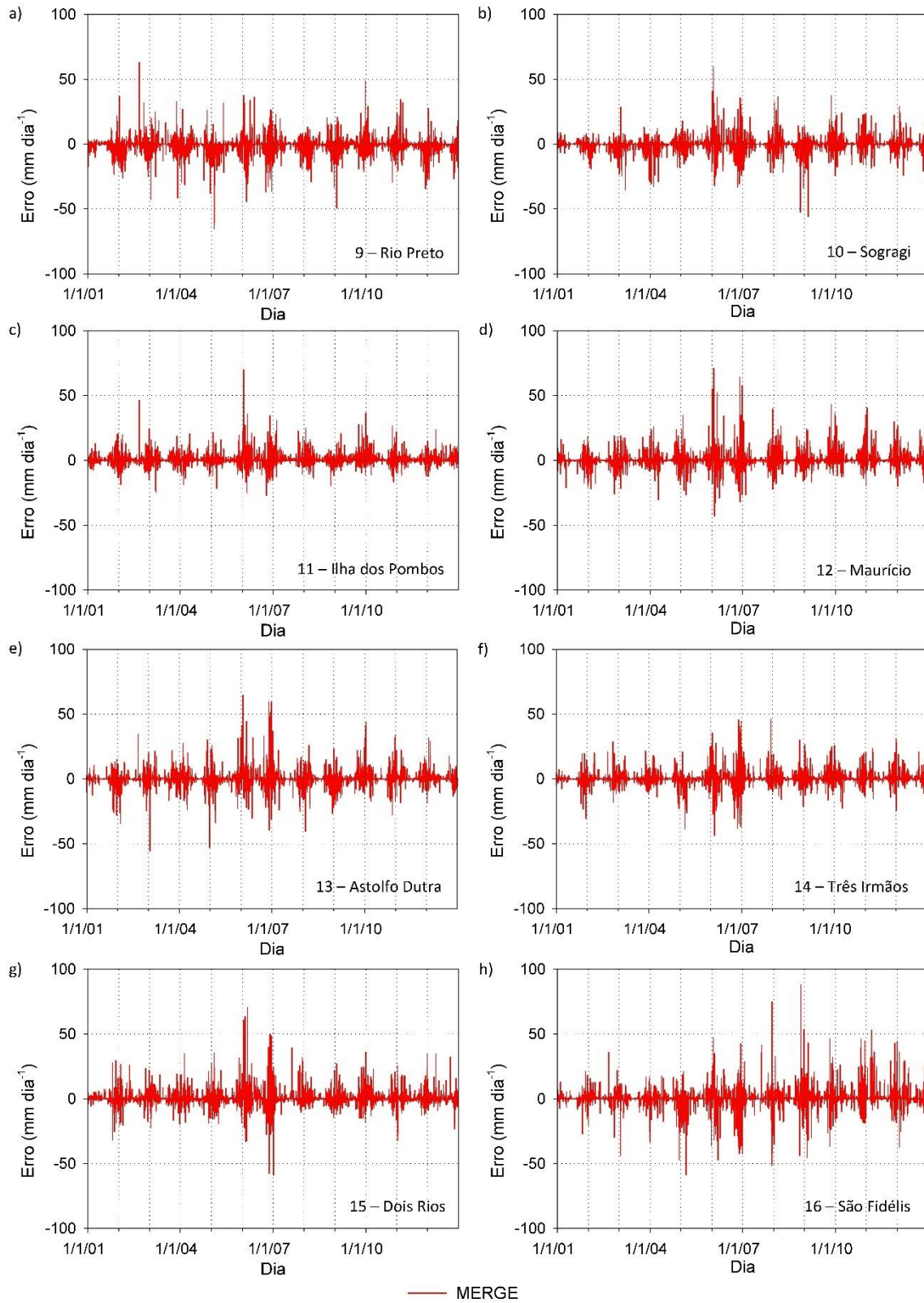
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.6 – Erro diário da precipitação dos produtos MERGE.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.7 – Erro diário da precipitação dos produtos MERGE.

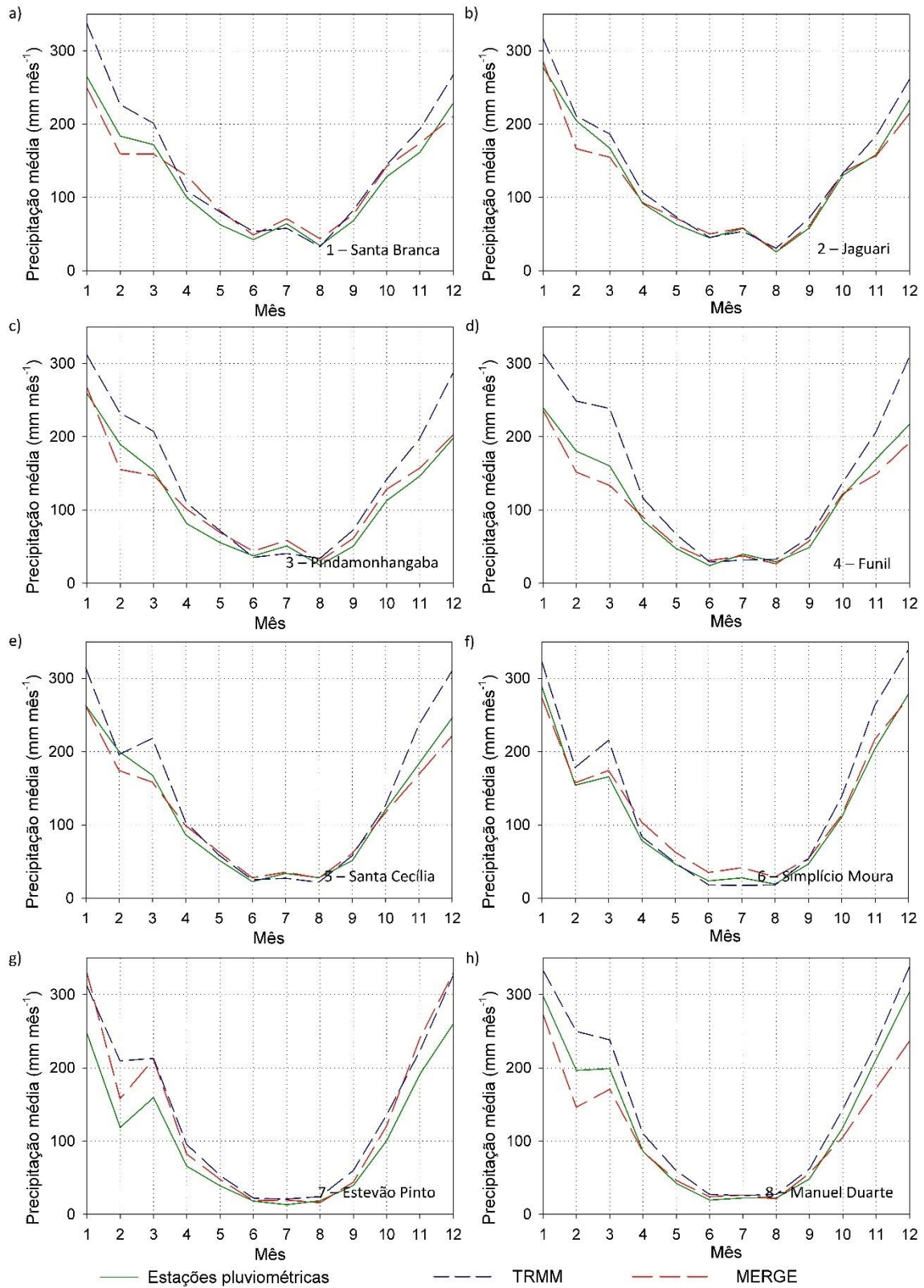


Fonte: Produção do autor.

A característica sazonal do erro da estimativa da precipitação também pode ser vista quando da análise das médias históricas mensais da precipitação nas 16 sub-bacias. Conforme ilustrado nas Figuras 4.8 e 4.9, as médias mensais para todos os produtos de precipitação apresentam valores semelhantes aos valores observados nas estações convencionais para os períodos de seca, enquanto as maiores discrepâncias são vistas nos períodos chuvosos. As superestimativas dos produtos TMPA 3B42V7 observadas para as bacias do alto Paraíba do Sul também são vistas nas médias históricas mensais, para as quais o TMPA 3B42V7 tende a subestimar ligeiramente as precipitações no período de seca e superestimar consideravelmente as precipitações no período chuvoso, em especial nos meses de dezembro e janeiro (Figuras 4.8 e 4.9). Já para as sub-bacias de Rio Preto e Sobragi, próximas a Serra da Mantiqueira, as médias mensais TMPA 3B42V7 apresentam comportamento e magnitude muito próximas das médias históricas observadas, com as médias do MERGE subestimando as precipitações para todo o período chuvoso. Por fim, para as demais sub-bacias, o MERGE apresenta maior conformidade com as médias observadas do que os produtos TMPA 3B42V7.

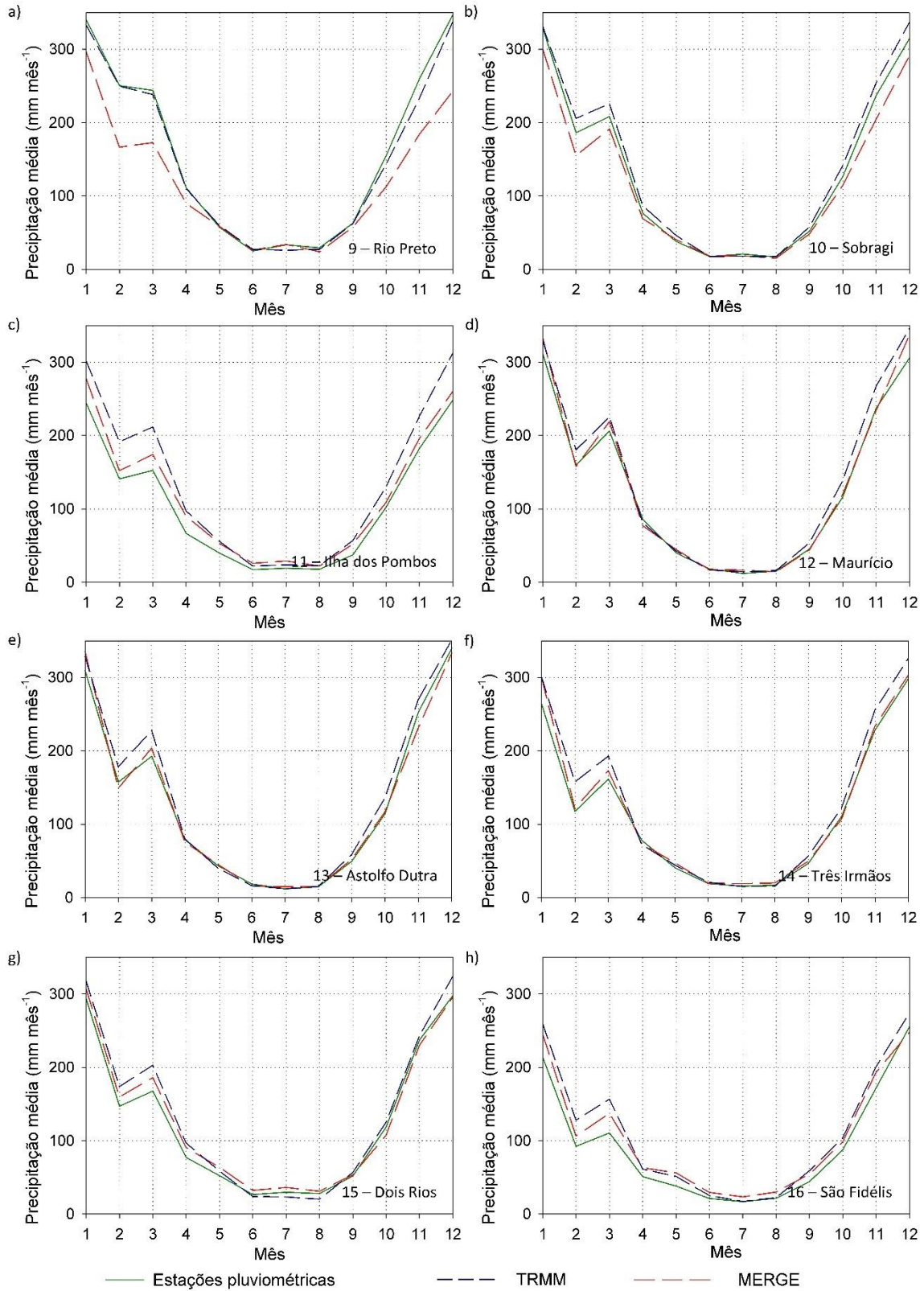
Maggioni et al. (2016) afirma que a sazonalidade impõe limitações às estimativas de precipitação por sensores remotos, especialmente em termos da probabilidade de detecção de eventos e erro médio. Os maiores erros para os períodos chuvosos, descritos nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, são característicos de regiões de terreno complexo e acentuados gradientes de precipitação, para os quais a capacidade de detecção da precipitação por sensores remotos é prejudicada e essencialmente dependente da magnitude do evento (MAGGIONI; MEYERS; ROBINSON, 2016).

Figura 4.8 – Médias mensais dos produtos de precipitação.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.9 – Médias mensais dos produtos de precipitação.



Fonte: Produção do autor.

Aspectos importantes do padrão das precipitações podem ser constatados nas Figuras 4.8 e 4.9. Dentre eles a característica mais nítida é a forte sazonalidade, típica de regiões tropicais, onde os volumes de precipitação na estação chuvosa são consideravelmente maiores do que na estação seca. Outro aspecto notável são as maiores médias de precipitação nos meses de março, que marcam o início do outono e portanto são mais secos, do que os meses de fevereiro. Essa característica recorrente na maioria das sub-bacias pode ser atribuída, não ao aumento dos níveis de precipitação no mês de março, mas sim ao simples fato deste ser aproximadamente 10% maior (31 dias) do que o mês de fevereiro (28 a 29 dias). Além disso, destaca-se também os maiores volumes de precipitação nos meses de julho quando comparados aos meses de junho e agosto. Os níveis pluviométricos ligeiramente superiores para o mês de julho também pode ser observado nas normais climatológicas de precipitação acumulada para o período de 1981 a 2010 na região da BHPS (INMET, 2019)

Os resultados observados nas Figuras 4.8 e 4.9 corroboram as Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, porquanto ambas análises convergem para um menor erro e conseqüentemente melhor ajuste dos produtos MERGE quando comparados com o TMPA 3B42V7 para todas as sub-bacias consideradas, com exceção das sub-bacias 8, 9 e 10 (Manuel Duarte, Rio Preto e Sobragi, respectivamente); além da inaptidão dos produtos de sensoriamento remoto em representar as precipitações da sub-bacia de Estevão Pinto. Conforme sugerido por Huffman et al. (2007), os produtos de sensores remotos tendem a apresentar melhores resultados quando agregados espacialmente. Scheel et al. (2011), em uma avaliação da agregação espaço-temporal dos produtos TMPA 3B42 aplicada à região central do Andes, observou uma melhora na correlação com dados de estações convencionais quando agregados para grandes áreas. Segundo a Figura 4.1, as bacias de menor porte (i.e. Estevão Pinto e São Fidelis) são representadas por um pequeno número de unidades elementares de precipitação (polígono de Thiessen ou célula de grade). Portanto, a menor representatividade espacial e a maior incerteza devido a agregação gerada para pequenas áreas pode ter comprometido não somente as estimativas por

sensores remotos, como também os valores de referência obtidos através da interpolação das estações pluviométricas convencionais.

4.1.2 Validação dos produtos de precipitação

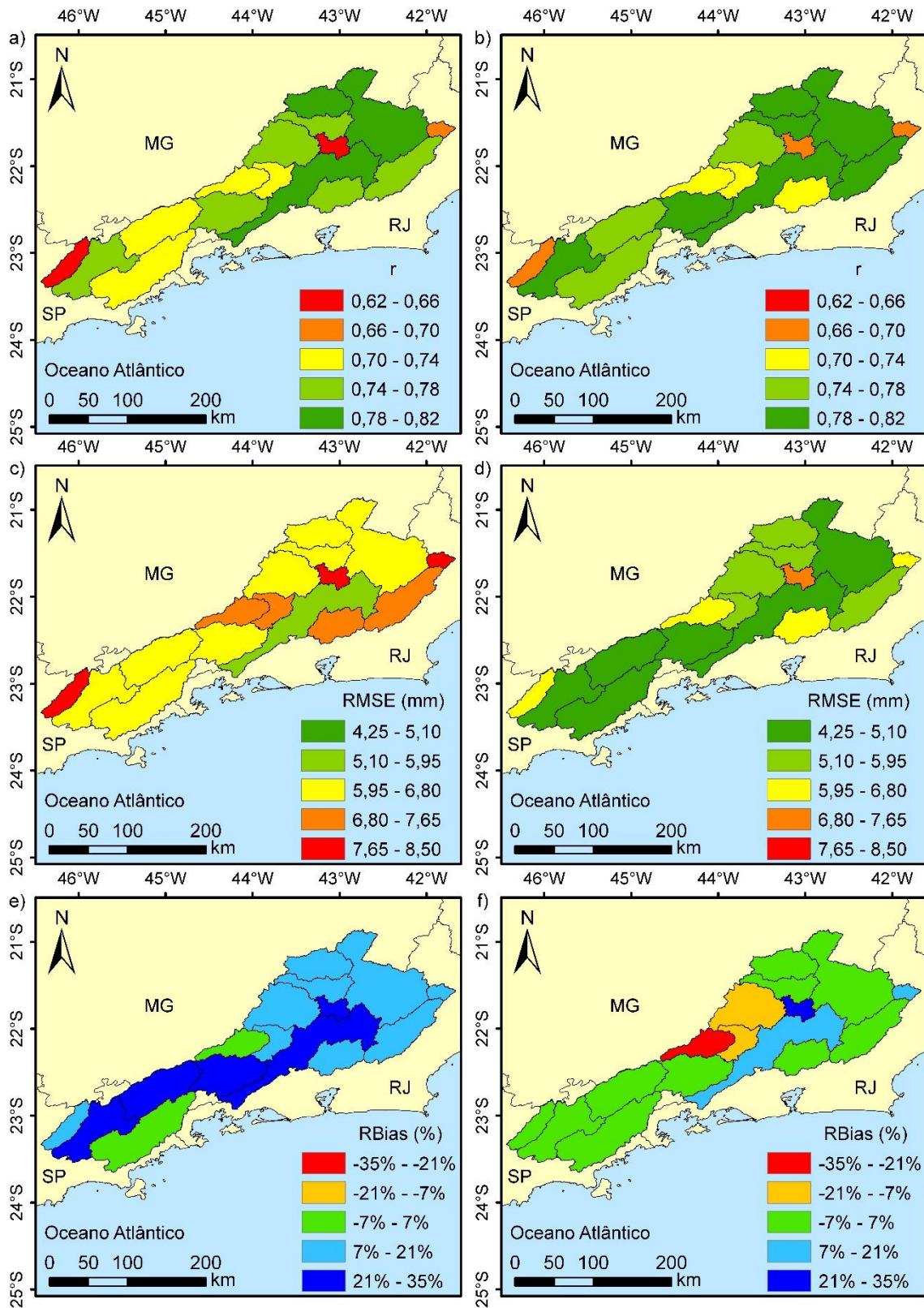
Uma série de estatísticas podem ser utilizadas para quantificar os padrões observados na Seção 4.1.1 No presente estudo, a validação dos produtos de precipitação por sensoriamento remoto se deu por meio do coeficiente de correlação (r), raiz quadrada do erro médio ($RMSE$) e viés relativo ($RBias$).

Com base na Figura 4.10a e 4.10b e no Apêndice D é possível observar que as correlações entre os produtos MERGE (Figura 4.10b) e as estações convencionais são mais fortes do que aquelas obtidas para o TMPA 3B42V7 (Figura 4.10a) para todas as sub-bacias, exceto Simplício Moura, Manuel Duarte e Rio Preto. Além disso, para ambos os produtos, valores mais baixos de r foram estimados para as sub-bacias de menor porte, e.g. Jaguari, Estevão Pinto e São Fidelis. Já a $RMSE$ do MERGE (Figura 4.10d) é menor do que a do TMPA 3B42V7 (Figura 4.10c) para todas as 16 sub-bacias. Assim como na análise da correlação, as bacias de menor porte apresentaram os maiores $RMSE$ para ambos os produtos de precipitação.

Por fim, os produtos TMPA 3B42V7 e MERGE apresentam padrões claramente distintos em termos de $RBias$. Conforme apresentado na Figura 4.10e e no Apêndice D, o TMPA 3B42V7 tende a superestimar a precipitação em média em aproximadamente 15%, sendo estas superestimativas mais acentuadas nas sub-bacias de menor elevação média, próximas ao curso d'água principal do rio Paraíba do Sul, chegando a ser em média 26% superior ao valor observado (Figura 4.10e e Apêndice D). Por outro lado, o $RBias$ referente ao MERGE se mostra muito mais próximo dos valores ideais (próximos de 0) (Figura 4.10f), sendo que a média do $RBias$ das 16 sub-bacias é de aproximadamente 1,5% ($RBias$ absoluto de 8,7%) (Apêndice D). Entretanto, vale destacar que para as sub-bacias próximas a Serra da Mantiqueira (Manuel Duarte, Rio Preto e Sobragi) o MERGE apresenta viés relativo de em média -15,4%, podendo chegar a -23,5% para a sub-bacia do Rio Preto. Assim como para as medidas

anteriormente analisadas, ambos produtos de precipitação apresentaram resultados inferiores quando aplicados a sub-bacias de menor área.

Figura 4.10 – Validação dos produtos de precipitação para a BHPS.



Fonte: Produção do autor.

Em uma análise das estimativas de precipitação por sensores remotos em regiões montanhosas mais próximas da linha do Equador, Dinku et al. (2010) identificaram particularidades das estimativas TMPA 3B42 devido a incapacidade dos sensores de infravermelho e passivos de microondas em estimar a precipitação de chuvas orográficas de maior temperatura. Tendo em vista que os sensores de infravermelho são utilizados para estimar a precipitação por meio da relação inversa entre a temperatura do topo da nuvem e a quantidade de precipitação, e que as chuvas orográficas em regiões tropicais são geradas a partir de nuvens de elevada temperatura, os limiares estabelecidos para a identificação de nuvens chuvosas se mostram incapazes de discriminar entre eventos de chuva e não-chuva. Além disso, como as chuvas orográficas em regiões tropicais resultam em elevados níveis pluviométricos sem a formação de grandes quantidades de conteúdo congelado nas nuvens, mesmo os sensores de microondas, por definição mais acurados, tendem a subestimar as precipitações uma vez que as relações Z-R entre a onda eletromagnética e a partícula congelada são comprometidas (DINKU; CONNOR; CECCATO, 2010). Com base nas Figuras 4.10e e 4.10f, é possível constatar que o viés observado para as regiões montanhosas da BHPS é oposto a aqueles descritos por Dinku et al. (2010) para regiões montanhosas da Colômbia e da Etiópia. Além disso, as superestimativas do TMPA 3B42V7 (Figuras 4.10e) para a BHPS são maiores em regiões planas. As divergências observadas entre as estimativas TMPA 3B42V7 para a BHPS e as regiões próximas do Equador, sugerem que, apesar de se tratar de uma região majoritariamente tropical litorânea montanhosa, os mecanismos geradores de precipitação observados no presente estudo são diferentes daqueles observados em regiões montanhosas de menor latitude, se assemelhando aos padrões de bacias de clima sub-tropicais de montanha observados por Reis et al. (2017).

Reis et al. (2017) encontraram valores 0,70 de correlação do TMPA 3B42V7 com dados de estações convencionais interpoladas para 9 polígonos de Thiessen em bacia de aproximadamente 860 km², localizada nas proximidades do município de Itajubá – MG, na região da Serra da Mantiqueira. O resultado obtido por Reis et al. (2017) é superior aos obtidos para as pequenas sub-bacias do presente

estudo (Jaguari, com área de 1320 km², Estevão Pinto, com área de 794 km² e São Fidelis, com área de 449 km²) tanto para o TMPA 3B42V7 quanto para o MERGE; demonstrando que melhores resultados podem ser obtidos mesmo para pequenas bacias se estas possuírem uma grande densidade de estações pluviométricas. Já para as demais sub-bacias, as correlações observadas no presente estudo são superiores a obtida por Reis et al. (2017).

Já Zhang et al. (2019) em um estudo aplicado a bacia do rio Ganjiang na China, caracterizada pela sua grande área (83500 km²), clima úmido (1400-1800 mm/ano) e terreno complexo (2-2120 m acima do nível do mar), obtiveram resultados ligeiramente superiores aos observados para as sub-bacias da BHPS. A correlação de 0,82 obtida por Zhang et al. (2019) é superior as obtidas por ambos, TMPA 3B42 e MERGE, para todas as 16 sub-bacias. Já o viés relativo obtido para a bacia do rio Ganjiang, igual a 2,95%, é comparável aos melhores resultados obtidos no presente estudo (Figuras 4.10e e 4.10f Apêndice D) e referentes ao MERGE. Entretanto, o *RMSE* observado por Zhang et al. (2019) é maior que os obtidos pelo MERGE. Paridade entre os resultados do MERGE para o presente estudo e os obtidos por Zhang et al. (2019) para uma bacia dezena de vezes maior que as sub-bacias da BHPS reforça a importância das correções nas estimativas do TMPA 3B42 desenvolvidas por Rozante et al. (2010).

Os resultados obtidos na validação dos produtos de sensoriamento remoto corroboram os observados qualitativamente na Seção 4.1.1. É possível constatar que as precipitações com maior amplitude do erro diário, apresentadas nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, são exatamente aquelas com menor correlação com as precipitações observadas (Figuras 4.10a e 4.10b), refletindo em uma menor precisão das estimativas diárias, em especial para os produtos TMPA 3B42V7. Além disso, os padrões de magnitude dos erros das estimativas representados nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 também se refletem na medida do *RMSE* (Figuras 4.10c e 4.10d). Estes padrões são ratificados pela análise da precipitação diária acumulada (Figuras 4.2 e 4.3), medida do *RBias* (Figuras 4.10e e 4.10f) e a análise de dispersão (Apêndice D), os quais permitem inferir sobre uma menor acurácia dos produtos TMPA 3B42V7, tendem a superestimar as precipitações

de 15 das 16 sub-bacias consideradas. Os resultados obtidos corroboram as observações de Rozante et al. (2010), que constataram uma melhora nas estimativas do TMPA 3B42 quando combinados com os dados de estações convencionais segundo o método proposto no MERGE. Haja vista a superioridade do MERGE sobre o TMPA 3B42 para a maior parte da BHPS em todas as análises qualitativas e quantitativas realizadas, este foi adotado como entrada do modelo MGB-IPH, afim de demonstrar sua aplicabilidade em estudos hidrológicos. Os resultados da simulação da vazão derivadas do MERGE foram então comparadas com as vazões observadas e as geradas a partir de estações pluviométricas convencionais e são apresentados na Seção 4.3.

4.2 Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo

Nesta seção é apresentado a análise de sensibilidade dos parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH. A análise foi conduzida individualmente para cada parâmetro de modo que enquanto o valor do parâmetro avaliado é alterado, os demais são mantidos fixos, conforme proposto por Collishchonn (2001) para os limites de variação estipulados por Viola et al. (2013). Segundo Mello et al. (2008) a análise de sensibilidade dos parâmetros calibrados é uma abordagem relevante para a otimização do desempenho do modelo. Além disso, a identificação dos parâmetros mais influentes, possível através da análise de sensibilidade, auxilia na compreensão e discussão das influências exercidas sobre as vazões simuladas. Por esse motivo foi desenvolvida uma calibração preliminar dos parâmetros do modelo, para a qual foram obtidos ajustes satisfatórios das vazões simuladas, de modo a orientar as futuras discussões sobre a influência e representatividade dos parâmetros sobre as vazões simuladas. Deve-se destacar também que para simplificação das discussões, a análise de sensibilidade do MGB-IPH foi realizada a partir do modelo calibrado para as precipitações tomadas como referência, i.e. estações pluviométricas convencionais, considerando três funções objetivo: os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS), sua versão logarítmica (NS_{log}) e o erro no volume (ΔV).

4.2.1 Influência sobre as vazões máximas

O NS é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual comparada a medida de variância dos dados; cujos valores podem ir de $-\infty$ a 1 (CORREA et al., 2017). Segundo Moriasi et al. (2007), NS entre 0 e 1 refletem alguma capacidade preditiva dos valores simulados, enquanto valores ≤ 0 indicam que o valor médio observado é um preditor melhor que os valores simulados. Devido a tendência de maior magnitude dos erros das vazões máximas, o NS é mais influenciado pela magnitude (COLLISCHONN, 2001) e tempo de ocorrência (PONTES et al., 2017) dos picos do hidrograma.

Como pode ser observado nas Figuras 4.11 e 4.12, as variações do parâmetro W_m resultaram nas maiores variações no NS para todas as 16 sub-bacias, ou seja, o W_m é o parâmetro de maior sensibilidade e, portanto, é o que exerce maior influência em relação às vazões máximas. O parâmetro W_m (mm) representa o armazenamento máximo de água na camada superior do solo pertencente a uma HRU e possui um significado físico relacionado as propriedades do solo e a profundidade do sistema radicular da vegetação de cobertura (COLLISCHONN et al., 2007).

É possível observar também que o modelo é muito mais sensível a diminuições nos valores de W_m do que a aumentos. Essa característica pode ser atribuída a natureza do parâmetro e as características da função objetivo em questão. Reduções no armazenamento máximo de água representam uma saturação antecipada das camadas de solo, resultando em uma maior e mais rápida geração de escoamento superficial, potencializando os picos de cheia simulados e resultando em valores de NS exponencialmente piores (ver Equações 3.4, 3.5 e 3.6).

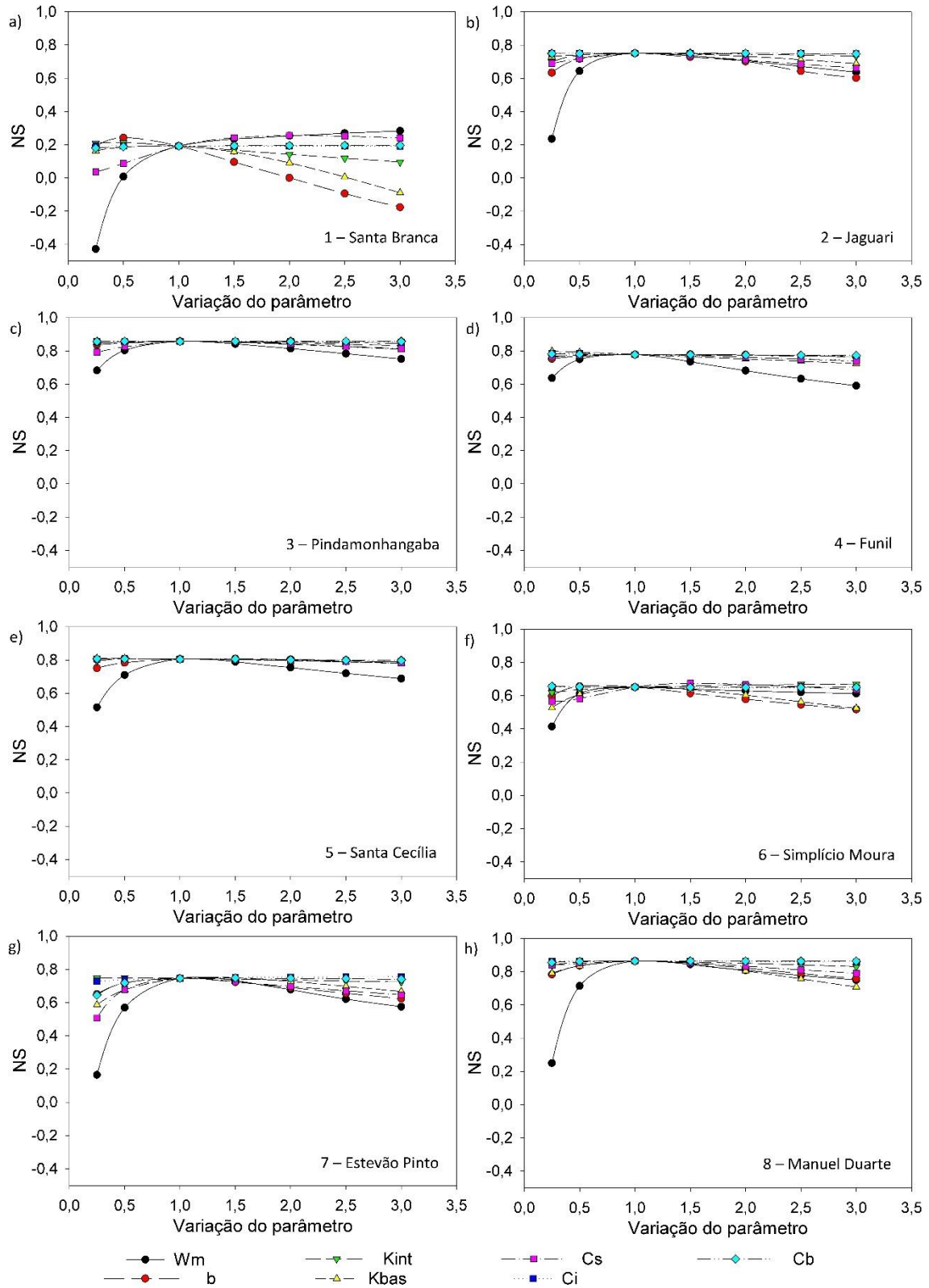
Já o aumento no armazenamento máximo de água no solo representa um potencial retardo na saturação do solo, resultando em uma menor quantidade e magnitude dos picos de cheia. Algumas sub-bacias, como por exemplo Santa Branca, Simplício Moura, Sobragi, Maurício e Três Irmãos, não apresentam sensibilidade para o aumento do W_m , o que indica que as vazões máximas não mudam significativamente com a maior capacidade de armazenamento de água

no solo. Essa característica indica que os mecanismos de geração de escoamento observados para estas sub-bacias independem da saturação da camada superior do solo. Outra peculiaridade observada é a menor sensibilidade dos parâmetros, em especial o Wm , nas bacias majoritariamente planas (i.e. Pindamonhangaba, Funil, Santa Cecília, Três Irmãos e São Fidelis). Essa característica permite inferir que a maior complexidade topográfica das demais sub-bacias também se reflete numa maior complexidade dos processos hidrológicos, conseqüentemente uma maior dependência da estimativa adequada dos parâmetros.

Os parâmetros b , $Kint$, $Kbas$, e Cs também apresentam alguma sensibilidade a variações em termos de NS , conforme pode ser visto nas Figuras 4.11 e 4.12. Collischon (2001) em um estudo aplicado a bacia do rio Taquari – Antas no Rio Grande do Sul, também observou uma maior influência do parâmetro Wm sobre as vazões máximas simuladas, seguido dos parâmetros de retardo do reservatório superficial Cs e o parâmetro de forma da curva de saturação b . Com base nas Figuras 4.11 e 4.12, é possível constatar que o aumento indevido do parâmetro b resulta numa pior descrição das vazões máximas. Segundo Collischon (2001), maiores valores de b não exercem forte influência sobre os picos das maiores cheias, todavia causam o aumento dos pequenos e médios picos.

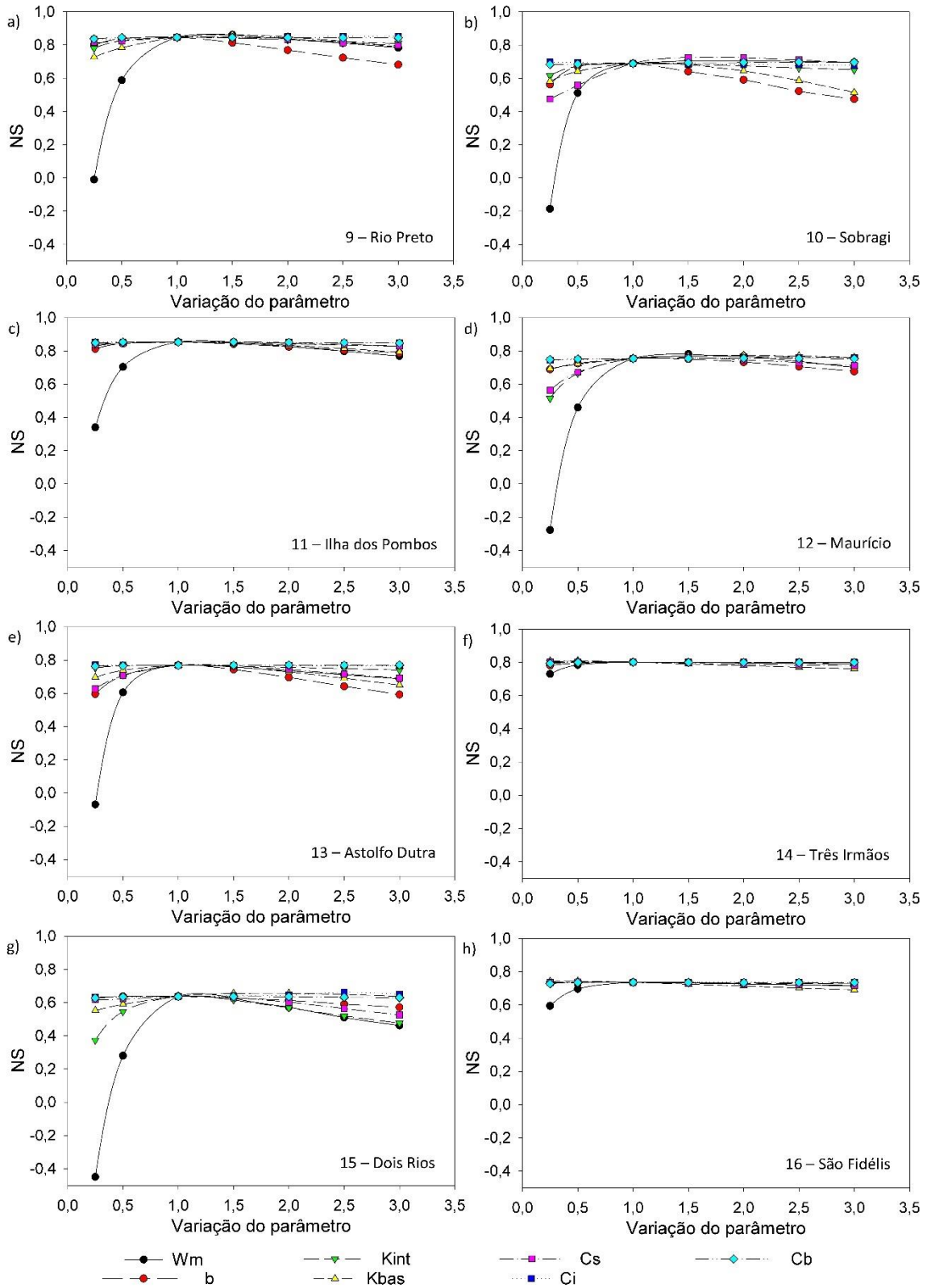
Vale destacar também que, conforme esperado, a estimativa das vazões máximas também aparenta ser sensível às variações no parâmetro de controle do retardo do escoamento superficial entre minibacias Cs , por definição independente da HRU e constante para toda a sub-bacia (Figura 4.11 e 4.12). O fato do parâmetro Cs , assim como o Wm e o b , também exercer maior influência nas bacias montanhosas (Figura 4.11 e 4.12) reforça a importância da calibração exaustiva, particularmente em regiões de topografia complexa.

Figura 4.11 – Sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação ao NS.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.12 – Sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação ao NS



Fonte: Produção do autor.

4.2.2 Influência sobre as vazões mínimas

Assim como o NS , o NS_{log} também é variável de $-\infty$ a 1. Conforme apresentado na Equação 3.5, o NS_{log} é calculado a partir do logaritmo das vazões simuladas e observadas, resultando em uma métrica mais sensível às recessões e vazões de estiagem do hidrograma (PONTES et al., 2017), para a qual valores próximos da unidade refletem a simulação adequada das vazões mínimas (COLLISHCHONN, 2001).

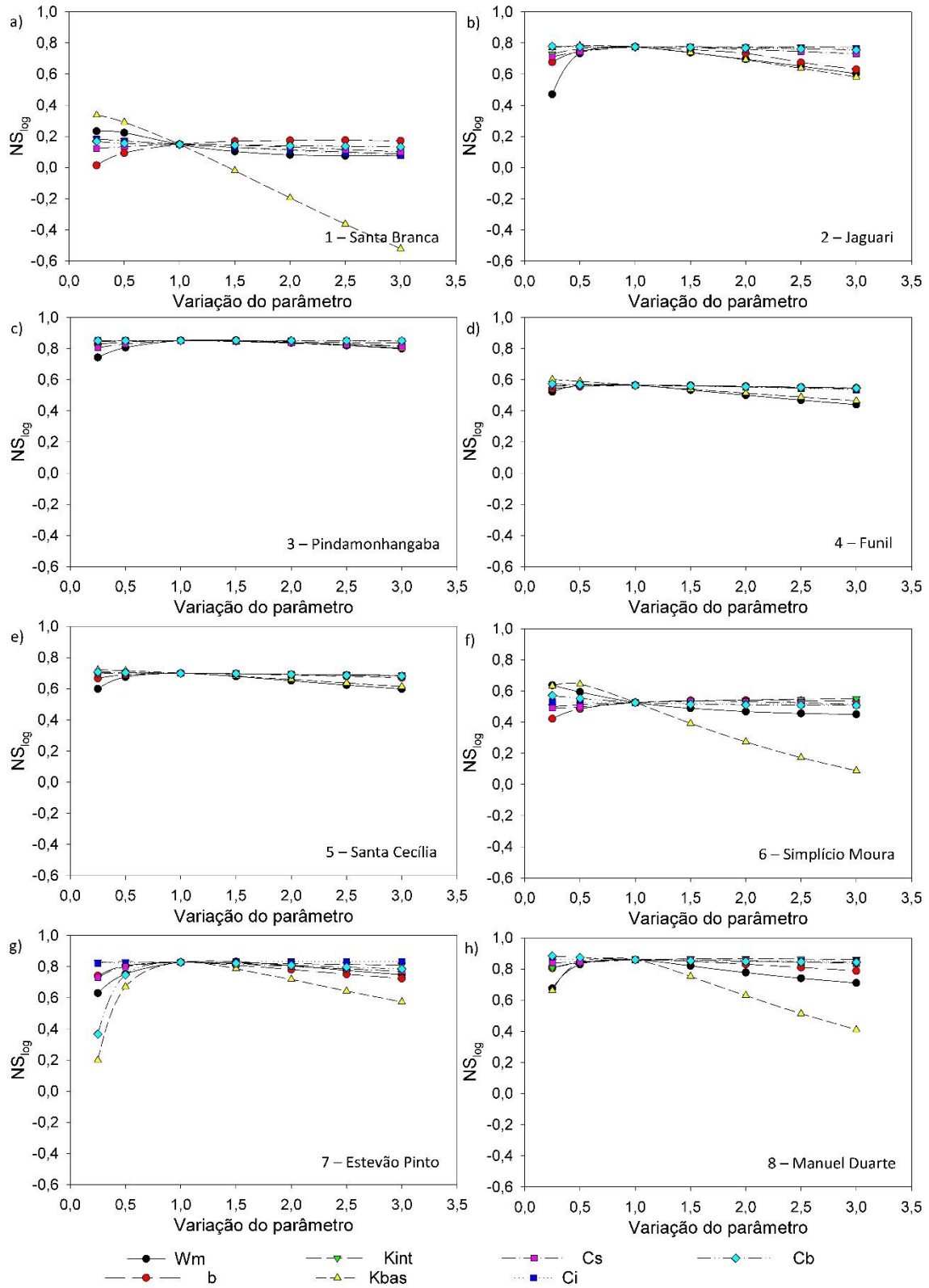
Conforme apresentado nas Figuras 4.13 e 4.14, o parâmetro Wm também exerce grande influência na simulação das vazões mínimas. De maneira análoga às vazões máximas, a sensibilidade ao parâmetro Wm também é mais evidente nas bacias de topográfica complexa, por exemplo Jaguari, Manuel Duarte, Rio Preto, Maurício, Astolfo Dutra e Dois Rios. Para estas bacias, a sensibilidade do parâmetro de armazenamento de água no solo também se mostra mais acentuada para reduções do que para acréscimos. Reduções no parâmetro Wm tendem a gerar superestimativas dos períodos de recessão do hidrograma, característica essa acentuada em bacias de maior declividade devido ao menor tempo de concentração. Já o aumento do valor do parâmetro Wm , tende a comprometer a estimativa das vazões somente após longos períodos de estiagem, para os quais os limites inferiores do Wm são atingidos, o que nem sempre acontece.

Os parâmetros relacionados ao escoamento de base também apresentaram sensibilidade sobre as vazões mínimas. Aumento indevido no parâmetro $Kbas$ gera estimativas inadequadas das vazões de recessão. Conforme apresentado na Equação 2.8, o parâmetro de escoamento subterrâneo $Kbas$ funciona como um multiplicador que aumenta ou diminui o escoamento subterrâneo segundo sua magnitude. A má calibração desse parâmetro resulta na maior ou menor geração de escoamento de base, sendo este a principal forma de escoamento nos períodos de estiagem. O parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo Cb também se mostrou sensível a reduções, especialmente em bacias de menor porte. Por fim, vale destacar que, assim como para as vazões máximas, o

parâmetro b apresentou sensibilidade nas sub-bacias de terreno complexo, reforçando a necessidade de maior atenção na calibração nesses casos.

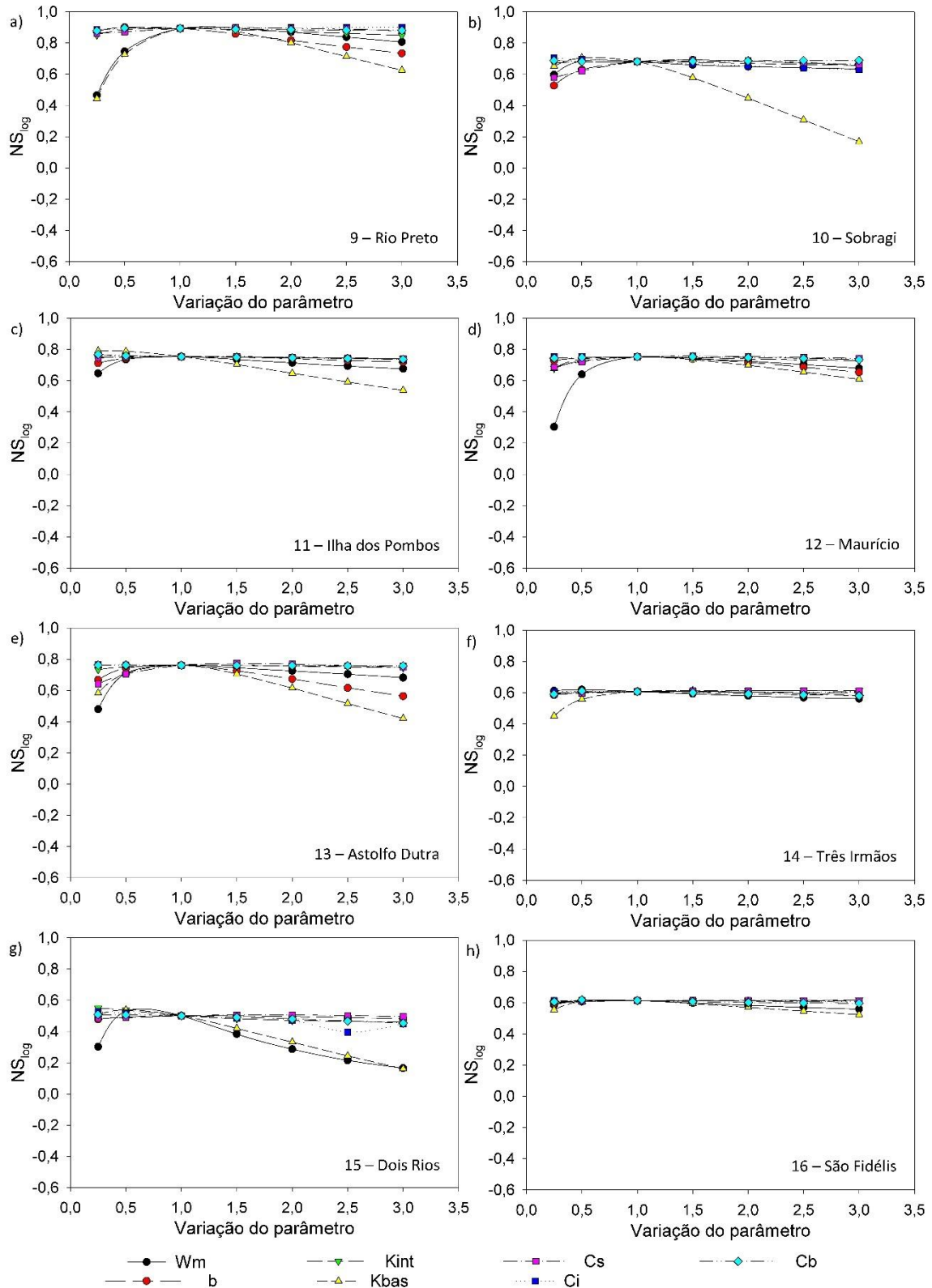
Os resultados para as 16 sub-bacias do presente estudo corroboram as observações de Collischonn (2001) para a bacia do Taquari-Antas, para o qual os parâmetros Wm , b , $Kbas$, Cs , assim como os parâmetros $Kint$ e Ci , se mostraram sensíveis às vazões mínimas.

Figura 4.13 – Sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação ao NS_{log} .



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.14 – Sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação a NS_{log} .



Fonte: Produção do autor.

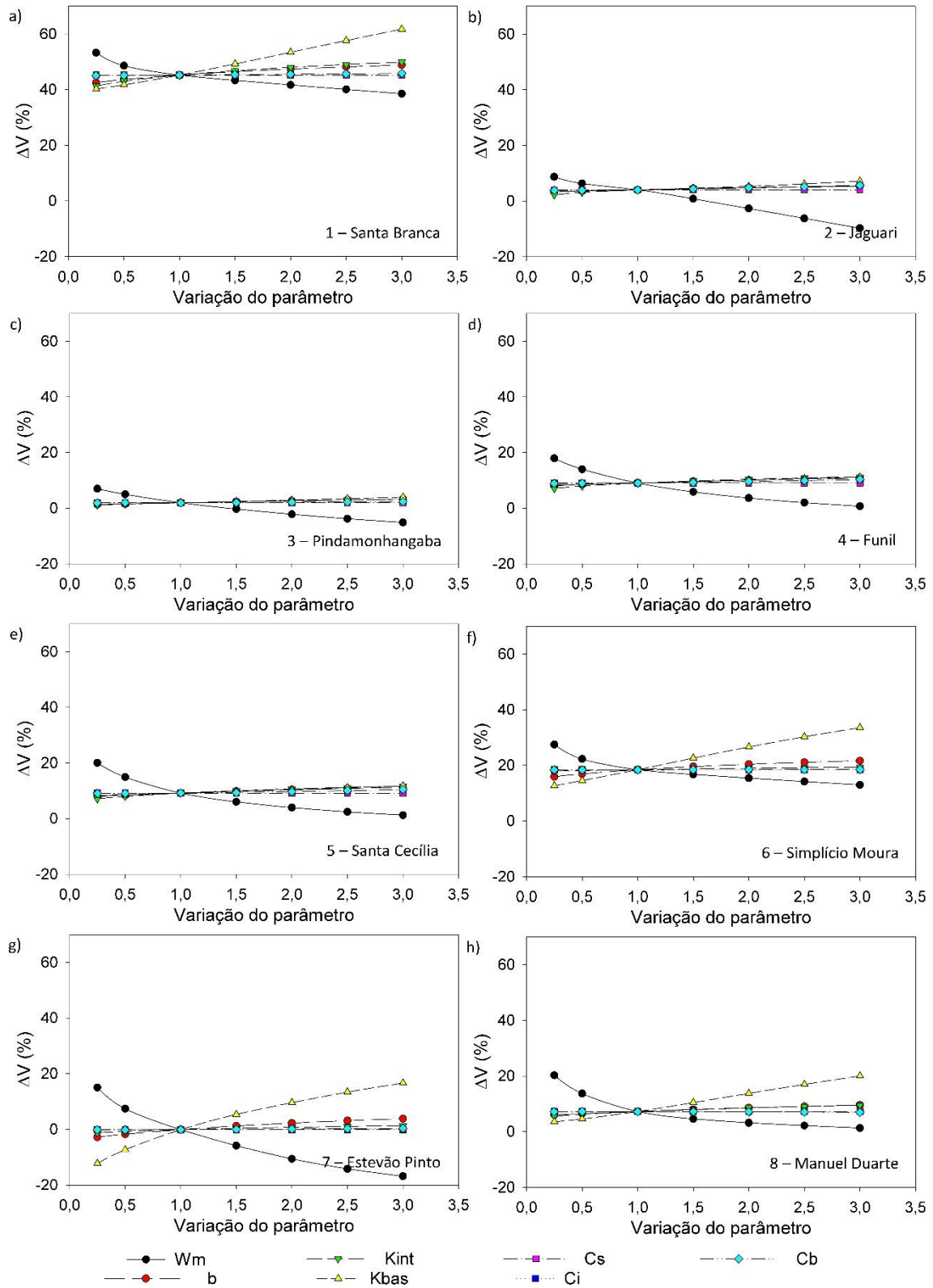
4.2.3 Influência sobre as vazões médias

O erro de volume (ΔV) pode variar de $-\infty$ à $+\infty$ e não é influenciado de maneira diferenciada pelas vazões mínimas ou máximas (COLLISCHONN, 2001). Segundo o autor supracitado, essa medida da diferença relativa entre o somatório de vazões observadas e calculadas é importante para o cálculo do viés, além de ser um bom indicativo a respeito da qualidade das estimativas de perdas por evapotranspiração; mostrando a tendência média de longo termo da simulação (FLEISCHMANN et al., 2018).

Com base na análise de sensibilidade do modelo a respeito do erro de volume apresentado nas Figuras 4.15 e 4.16, é possível afirmar que os parâmetros mais influentes sobre o viés das estimativas de vazão são o Wm e o $Kbas$, sendo o Wm mais influentes em sub-bacias planas e ambos Wm e $Kbas$ em sub-bacias montanhosas. Para todas as 16 sub-bacias é observado uma relação entre o acréscimo do Wm e o decréscimo do erro de volume. Esse comportamento é esperado visto que o aumento do Wm resulta em um maior armazenamento de água no solo e, portanto, a diminuição do escoamento superficial, resultando em subestimativas da vazão. Já o $Kbas$ apresenta uma relação com o ΔV inversa a àquela apresentada pelo Wm . O aumento no parâmetro de escoamento subterrâneo $Kbas$ resulta numa maior propensão a geração de escoamento de base, fazendo com que a vazão simulada no curso d'água, que por sua vez se dá pela soma do escoamento superficial, subsuperficial e de base, seja superestimada.

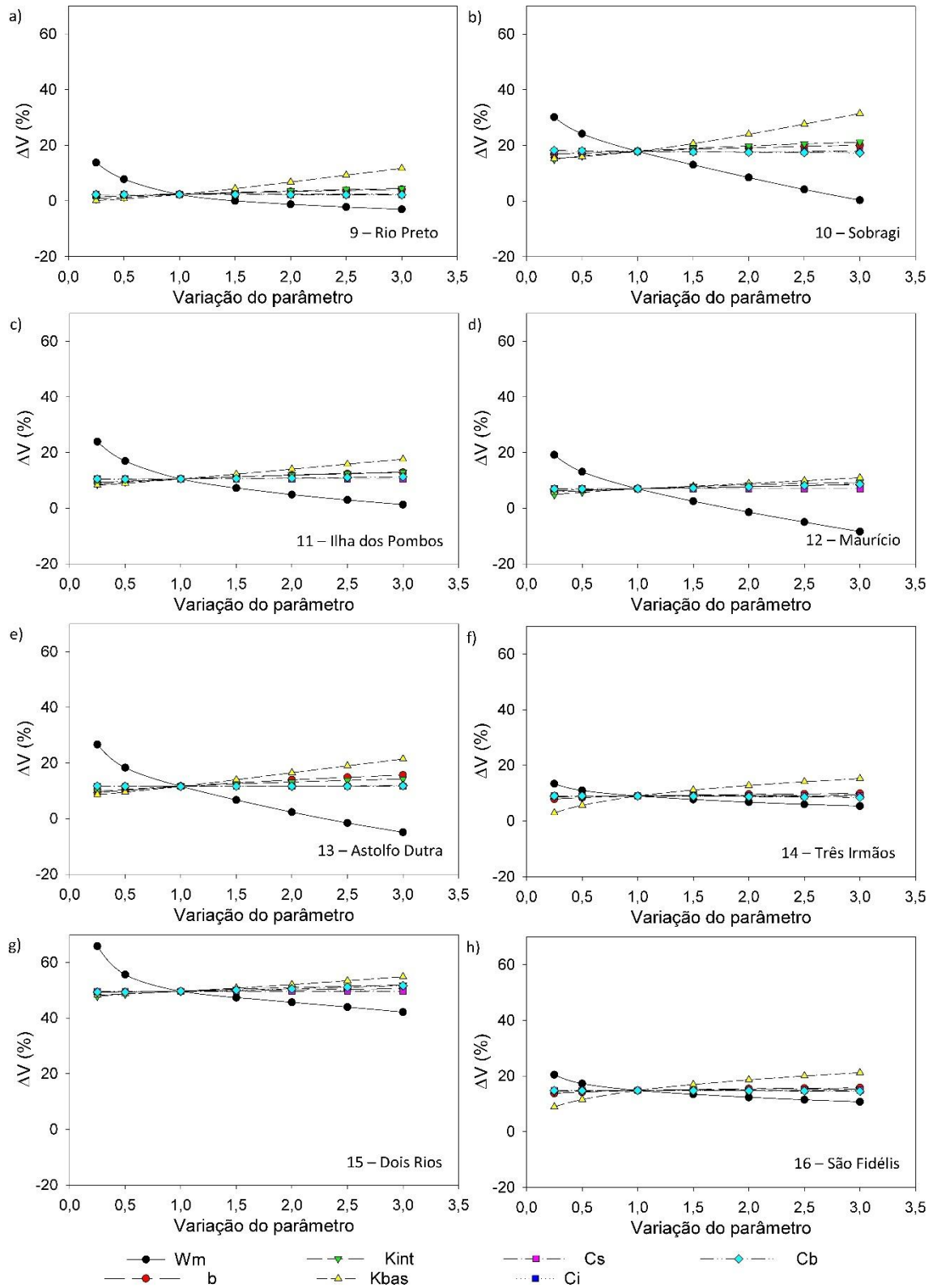
Assim como no presente estudo, Collischonn (2001) constatou uma maior sensibilidade para os parâmetros Wm e $Kbas$ em relação ao erro de volume, assim como uma alta sensibilidade do parâmetro b , quando da avaliação da bacia de Taquari-Antas no Rio Grande do Sul. Já para o presente estudo, a maior sensibilidade de b sobre o erro de volume foi observada somente nas sub-bacias de Santa Branca, Simplício Moura, Estevão Pinto e Astolfo Dutra. Collischonn (2001) também observou uma sensibilidade considerável do parâmetro $Kint$ que no presente estudo só foi verificada para a sub-bacia de Santa Branca.

Figura 4.15 – Sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação ao ΔV .



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.16 – Sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação ao ΔV .



Fonte: Produção do autor.

De modo geral, pode-se inferir que maior atenção deve ser dada a calibração das sub-bacias de topografia complexa, onde os parâmetros W_m , b , K_b apresentam as maiores sensibilidades. Vale destacar também que as sub-bacias de topografia complexa são aquelas com a maior presença de neossolos e cambissolos, classificados no presente estudo como mal drenados (Figura 3.5), o que pode, junto da topografia, ter causado a maior sensibilidade dos parâmetros relacionados ao armazenamento e propagação de água no solo. Além disso, essas sub-bacias também são as com maior concentração de floresta, especialmente nas regiões de cabeceira (Figura 3.4), as quais exercem grande influência no armazenamento de água no solo.

Alguns outros aspectos menos claros e conclusivos também podem ser observados na análise de sensibilidade. Com base nas Figuras 4.11 e 4.13, é possível observar uma ligeira sensibilidade do parâmetro C_s , responsável pelo retardo na propagação do escoamento superficial entre minibacias, na sub-bacia de Pindamonhangaba. A sub-bacia de Pindamonhangaba é que apresenta maior cobertura de áreas urbanas, cerca de 7,5% (Apêndice E), o que permite inferir que a impermeabilização do solo causada por áreas urbanas pode interferir na geração das vazões máximas e mínimas, mesmo que essa não interfira na tendência média de longo termo (Figura 4.2a). Já para a bacia de Funil, a jusante, de forma e topografia semelhante, coberta com apenas 2,7% de áreas urbanas, a mesma influência do parâmetro C_s não pode ser observada, o que reforça a hipótese supracitada.

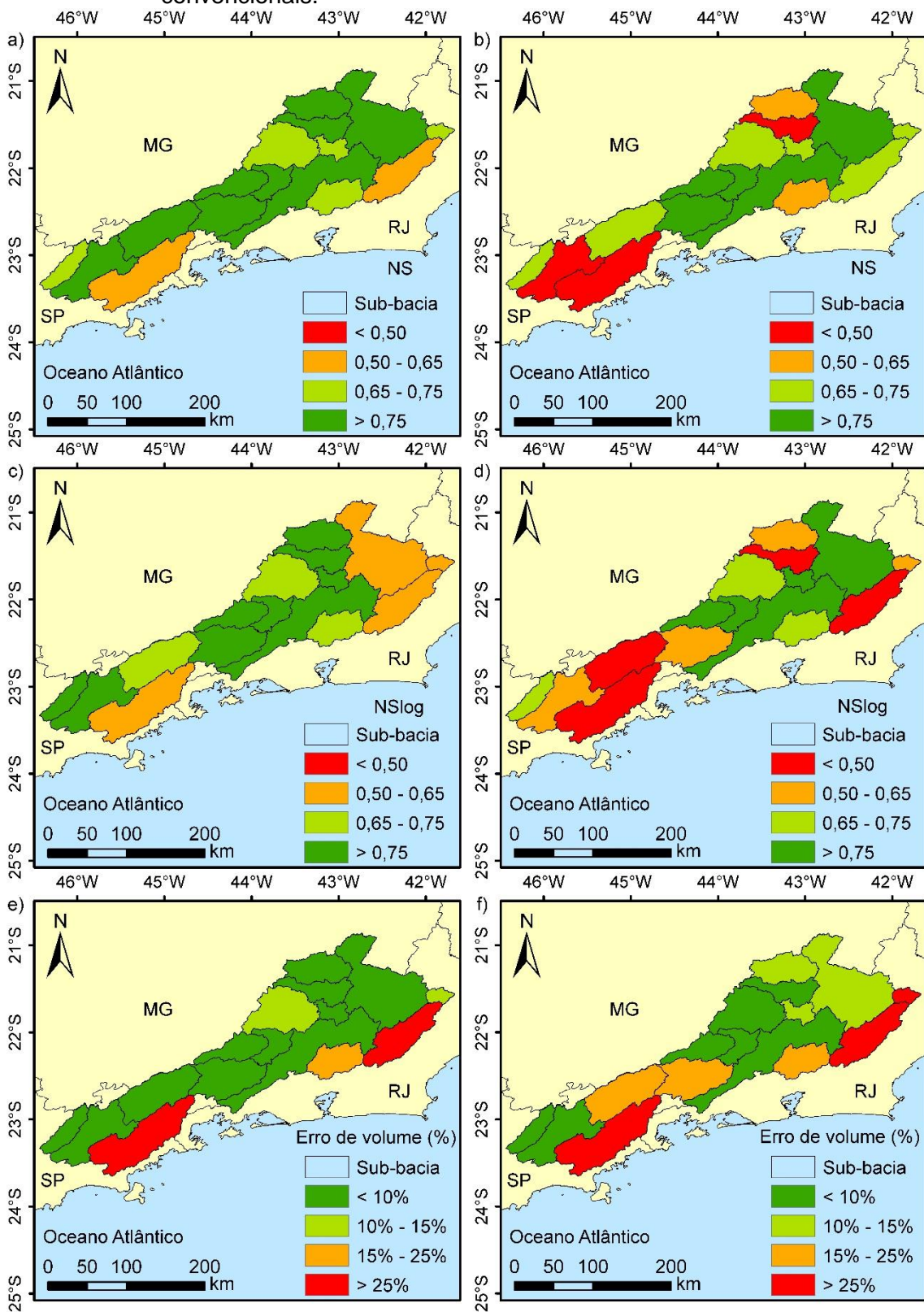
Por fim, vale destacar que o presente estudo desenvolveu a maior análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo MGB-IPH até o momento. Estudos anteriores, como Collischonn (2001) e Bayer (2014), se limitaram a um número muito inferior de bacias, o que impossibilita conclusões para diferentes condições fisiográficas. Portanto, os resultados obtidos colaboram para a compreensão das simulações pelo MGB-IPH e possibilitam a otimização do seu uso em termos da parcimônia na representação dos processos hidrológicos.

4.3 Calibração e validação

Para a realização dos processos de calibração e validação do modelo, as séries históricas de vazão foram divididas em período de aquecimento, calibração e validação. Em simulações preliminares, foi observado que para algumas sub-bacias as vazões simuladas passavam a convergir a partir de um certo período de simulação, sendo essa característica comumente atribuída a memória da bacia. Segundo Nippgen et al. (2016) a memória é um atributo da bacia hidrográfica composto pela combinação de forçantes climatológicas e propriedades da bacia (e.g. declividade, profundidade do solo, tipo de vegetação, etc.), que exercem influência sobre suas respostas hidrológicas atuais, i.e. influências das precipitações passadas sobre as vazões atuais. A fim de evitar má representações dos processos hidrológicos para os períodos iniciais da simulação devido a efeitos de memória da bacia, principalmente causados pelo desconhecimento do armazenamento inicial de água no solo (VIOLA et al., 2015), os dois primeiros anos das simulações foram separados para o aquecimento do modelo. Posteriormente, os anos de 2001 a 2010 foram utilizados para calibração e os anos de 2011 a 2014 para validação. Os resultados das vazões simuladas são apresentados no Apêndice F.

Conforme sugerido na Seção 4.1.2, as simulações hidrológicas foram realizadas para o produto de precipitação adotado como referência, isto é, estações pluviométricas convencionais e o produto de sensoriamento remoto que obteve os melhores resultados nos processos de avaliação e validação, i.e. MERGE. As vazões simuladas para ambas fontes de dados de precipitação foram avaliadas por meio das funções objetivo NS , NS_{log} e ΔV e da análise visual dos hidrogramas gerados (Apêndice F). Os resultados das estatísticas NS (Figura 4.17a e 4.17b), NS_{log} (Figura 4.17c e 24d) e ΔV (Figura 4.17e e 4.17f) para a calibração (Figura 4.17a, 4.17c e 4.17d) e validação (Figura 4.17b, 4.17d e 4.17e) das simulações a partir das estações convencionais são apresentados na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Resultados das simulações a partir das estações pluviométricas convencionais.



Fonte: Produção do autor.

Conforme pode ser observado na Figuras 4.17a e 4.17c, referentes as estatísticas NS e NS_{log} , foram obtidos resultados considerados “satisfatórios”, “bons” e “muito bons” para o período de calibração de todas as 16 sub-bacias analisadas a partir das estações convencionais de precipitação, sendo os piores resultados observados para as bacias mais próximas do litoral, como Santa Branca e Dois Rios. O mesmo comportamento se repete em relação ao erro de volume, visto que os resultados são “insatisfatórios” apenas para as duas sub-bacias supracitadas (Figura 4.17e). Com base na Figura 4.17a e 4.17c é possível constatar que as sub-bacias de Funil, Três Irmãos e São Fidélis ajustaram melhor em relação aos máximos do que aos mínimos, esse comportamento pode ser visualizado no Apêndice F, uma vez que as vazões simuladas tendem a superestimar as recessões do hidrograma. De maneira análoga, o melhor ajuste para as vazões mínimas em relação às máximas também pode ser observado no Apêndice F para as sub-bacias de Jaguari e Estevão Pinto.

A sub-bacia de Santa Branca é composta por uma considerável densidade de estações pluviométricas (Figura 3.6), além disso, ambos produtos de precipitação apresentaram concordância quando da validação da precipitação (Figura 4.10), portanto, neste caso a baixa qualidade das simulações das vazões não pode ser atribuída a incertezas derivadas da rede pluviométrica. Entretanto, vale destacar que apesar da menor densidade populacional quando comparado as sub-bacias a jusante, a sub-bacia de Santa Branca é altamente antropizada em termos de grandes obras hidráulicas. A sub-bacia de Santa Branca contém dois grandes reservatórios, Paraíbuna e Santa Branca, que cobrem mais de 3% da área total da bacia (Apêndice E). As influências exercidas por estes grandes reservatórios sobre o ciclo hidrológico, fazem com que seja necessário a utilização de vazões naturalizadas, aquelas que ocorreriam na seção caso desconsiderado as atividades antropogênicas (GUILHON; ROCHA; MOREIRA, 2007), para a simulação do regime de vazões. Por definição, a estimativa da vazão a partir de técnicas indiretas, utilizados no cálculo das vazões naturalizadas, adicionam incertezas à modelagem hidrológica, comprometendo a simulação das vazões.

No presente estudo foi adotado o método de validação *Split Sample Test* de Klemes (1986), para o qual a série é dividida em dois intervalos, o de calibração e o de validação, a partir de dados independentes. Para o período de validação, é possível observar uma piora nas simulações nas sub-bacias de Santa Branca e as subseqüentes sub-bacias a jusante, além das sub-bacias de Simplício Moura, Maurício e Astolfo Dutra (Figuras 4.17b e d). A piora na predição das vazões para Santa Branca e as sub-bacias imediatamente a jusante pode ser atribuída ao caráter antropizado das mesmas. Como as vazões observadas na seção de Santa Branca obedecem a critérios de manejo e engenharia dos reservatórios a montante, e não à princípios hidrológicos naturais, a capacidade preditiva das vazões é comprometida, uma vez que não é levado em conta as características da gestão da barragem. Em outras palavras, não é possível prever a vazão vertida dos reservatórios a partir do modelo, visto que a abertura e fechamento das comportas não obedece a critérios puramente hidrológicos. Conseqüentemente, a validação das sub-bacias a jusante, i.e. Pindamonhangaba, Funil e Santa Cecília, é comprometida pelas interferências causadas pela sub-bacia de Santa Branca. Já as sub-bacias de Simplício Moura, Maurício e Astolfo Dutra, apesar de não possuírem grandes reservatórios como Santa Branca, possuem pequenas barragens e centrais hidrelétricas que certamente interferem no regime hidrológico. A sub-bacia de Simplício Moura contém as barragens de Morro Grande e de Alberto Torres, responsáveis pelo abastecimento de água e energia hidrelétrica do município de Areal – RJ. Já a sub-bacia de Maurício contempla a pequena central hidrelétrica (PCH) de Maurício e a de Astolfo Dutra as PCHs de Ivan Botelho I, II e III.

A antropização das bacias se apresenta como um desafio na simulação dos processos hidrológicos. Conforme observado na Figuras 4.17b, 4.17d e 4.17f, a presença de barragens compromete a simulação das vazões máximas e mínimas mais do que a das vazões médias e o viés. Essa característica dos reservatórios em retardar e amenizar os picos de cheia e recessões do hidrograma é discutida na literatura (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988), dificultando, portanto, o uso dos modelos hidrológicos como ferramenta de gestão de desastres naturais e eventos extremos. Nesse contexto, versões

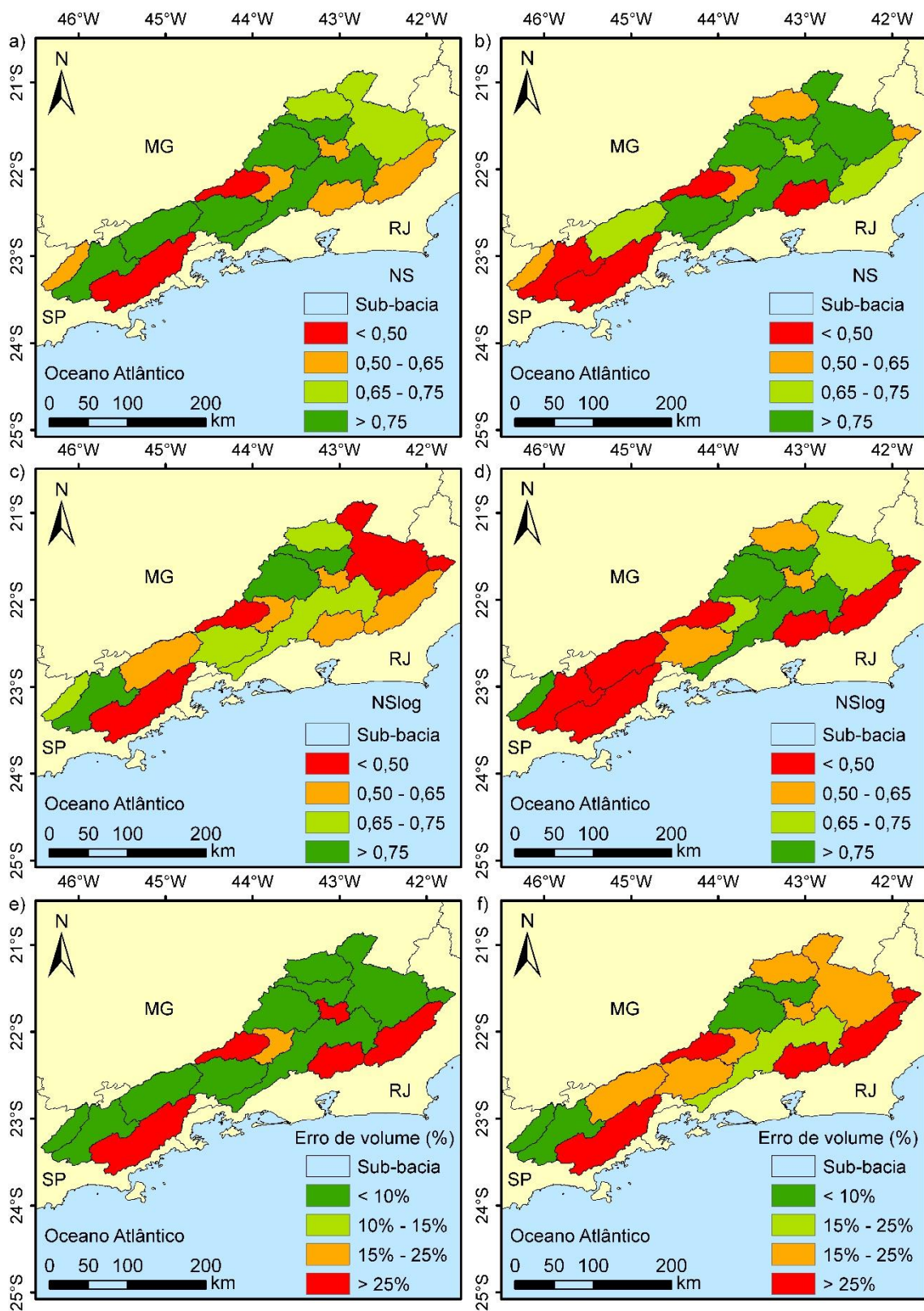
recentes do MGB-IPH se propõem corrigir as limitações do modelo em planícies de inundação e bacias compostas por grandes reservatórios, por meio da combinação da estrutura do modelo com abordagens hidrodinâmicas, resultando em melhorias significativas no ajuste do modelo (FLEISCHMANN et al., 2019). Entretanto, esta versão ainda não foi disponibilizada livremente e, portanto, não pôde ser implementada no presente estudo.

As estimativas de precipitação por sensores remotos do MERGE ao serem utilizadas como entrada no modelo MGB-IPH apresentaram resultados semelhantes aos obtidos a partir das estações convencionais (Figura 4.17 e 4.18). Assim como para as estações convencionais, as simulações a partir do MERGE foram “insatisfatórias” nas sub-bacias próximas do litoral, especialmente para Santa Branca. A sub-bacia de Santa Branca apresentou os menores valores de *RMSE* e viés para o MERGE na etapa de validação da precipitação, além de correlação maior que 0,75 (Figura 4.10). A sistematicidade da má simulação hidrológica nessa sub-bacia reforça a hipótese da inabilidade da versão utilizada do modelo em áreas influenciadas por grandes reservatórios, mesmo quando utilizado as estimativas de vazão naturalizada.

É possível observar também que as sub-bacias próximas a Serra da Mantiqueira que apresentaram resultados insatisfatórios na validação das precipitações, também não produziram estimativas aceitáveis da vazão (Figura 4.18). A sub-bacia de Rio Preto, para qual foram obtidos resultados “muito bons”, tanto para o período de calibração como o de validação para as simulações a partir das estações convencionais, produziu resultados “insatisfatórios” para todas as estatísticas utilizadas quando simulado com os produtos do MERGE.

Da mesma forma, as sub-bacias pequenas, incluindo as de Jaguari, Estevão Pinto e São Fidelis, para as quais foi constatado o mal ajuste entre as precipitações das estações convencionais e a dos sensores remotos (Figura 4.10), também produziram estimativas da vazão inferiores àquelas obtidas a partir das estações convencionais (Figura 4.17).

Figura 4.18 – Resultados das simulações a partir do MERGE.



Fonte: Produção do autor.

Ao comparar as Figuras 4.18a e 4.18b e 4.18c e 4.18d, é possível afirmar que foram obtidos resultados melhores para as vazões máximas do que para as vazões mínimas. Ao avaliar o Apêndice F, nota-se que as estimativas a partir do MERGE tendem a superestimar as vazões no período de seca e representar adequadamente os picos do hidrograma no período chuvoso, essa característica corrobora o comportamento do produto MERGE descrito na Figura 4.8 e 4.9, para o qual o MERGE tende a superestimar as precipitações nos meses de junho, julho e agosto. Destaca-se também que as técnicas de correção de viés, como as implementadas no MERGE, reduzem os erros de amplitude, relacionados aos períodos chuvosos, mas não são capazes de criar eventos não constatados pelo sensor remoto (TONG et al., 2014), o que por consequência afeta as estimativas das vazões mínimas. A capacidade dos produtos de precipitação por sensores remotos em representar principalmente as vazões máximas também foi observado por Collischonn et al. (2008), Tong et al. (2014) e Li et al. (2018). Essa característica associada às deficiências na detecção de chuvas de menor intensidade comuns nas estações frias (MAGGIONI; MEYERS; ROBINSON, 2016), faz com que as simulações hidrológicas geradas a partir do MERGE sejam mais adequadas para a utilização na gestão e engenharia de cheias do que para aplicações relacionadas às estiagens.

4.3.1 Análise da curva de permanência

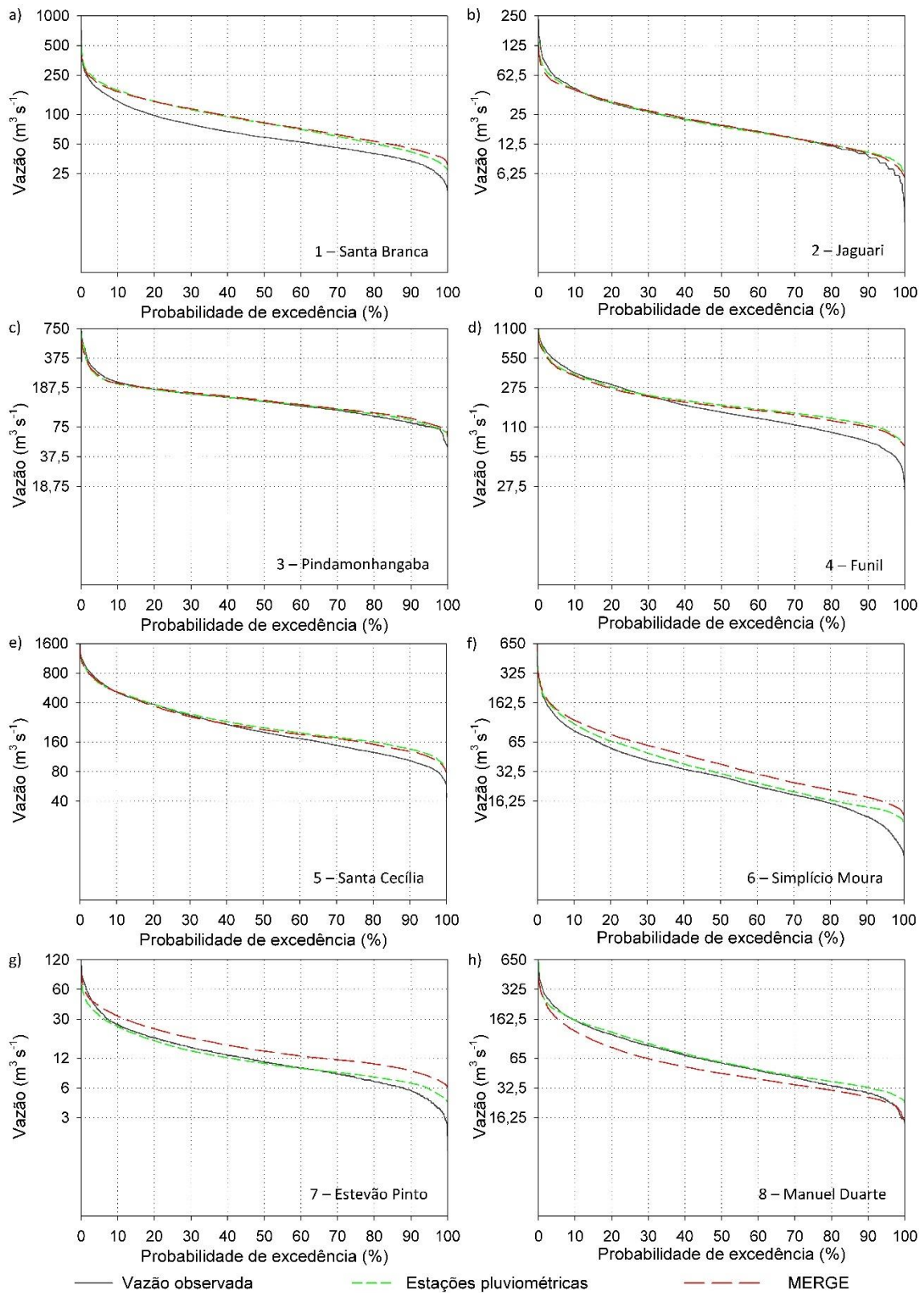
A curva de permanência é uma ferramenta importante para a gestão dos recursos hídricos, pois ela possibilita a compreensão da frequência dos eventos hidrológicos, além de auxiliar na identificação das simulações mais adequadas para eventos extremos específicos (cheias ou estiagens).

Com base nas Figuras 4.19 e 4.20, é possível observar que de modo geral tanto as simulações a partir das estações convencionais, quanto as simulações a partir do MERGE, foram capazes de representar a frequência de ocorrência dos eventos hidrológicos na BHPS. Entretanto, algumas sub-bacias apresentaram resultados inferiores, corroborando as observações apresentadas na Seção 4.1. A curva de permanência para a sub-bacia de Santa Branca (Figura 4.19a), desenvolvida a partir dos valores simulados, se mostra inadequada para as

probabilidades de excedência acima de 3%, uma vez que ambas simulações tendem a superestimar as vazões. Já as curvas de permanência para sub-bacias de Funil e Santa Cecília (Figura 4.19d e 4.19e) são semelhantes para probabilidades de excedência de até 40%, o que implica na boa representatividade das vazões máximas para ambas simulações hidrológicas. A superioridade das simulações a partir das estações convencionais é claramente observada nas curvas de permanência das sub-bacias de Simplício Moura, Estevão Pinto, Manuel Duarte (Figura 4.19f, 4.19g e 4.19h) e Rio Preto (Figura 4.20a), onde, apesar de superestimar as vazões mínimas, a curva de permanência tende a se manter mais próxima da curva de permanência das vazões observadas do que a gerada a partir das simulações do MERGE. Para a sub-bacia de Sobragi (Figura 4.20b), entretanto, a curva de permanência gerada pelo MERGE é melhor que a gerada pelas estações pluviométricas convencionais para as probabilidades de excedência superiores a 10%, demonstrando que em algumas situações o MERGE é uma ferramenta superior às estações convencionais, mesmo para períodos de estiagem. Por fim, para as sub-bacias de Pindamonhangaba (Figura 4.19c), Ilha dos Pombos, Maurício, Três Irmãos, Dois Rios e São Fidélis (Figura 4.20c, 4.20d, 4.20e, 4.20g e 20f), pouco ou nenhuma diferença é identificada entre as simulações.

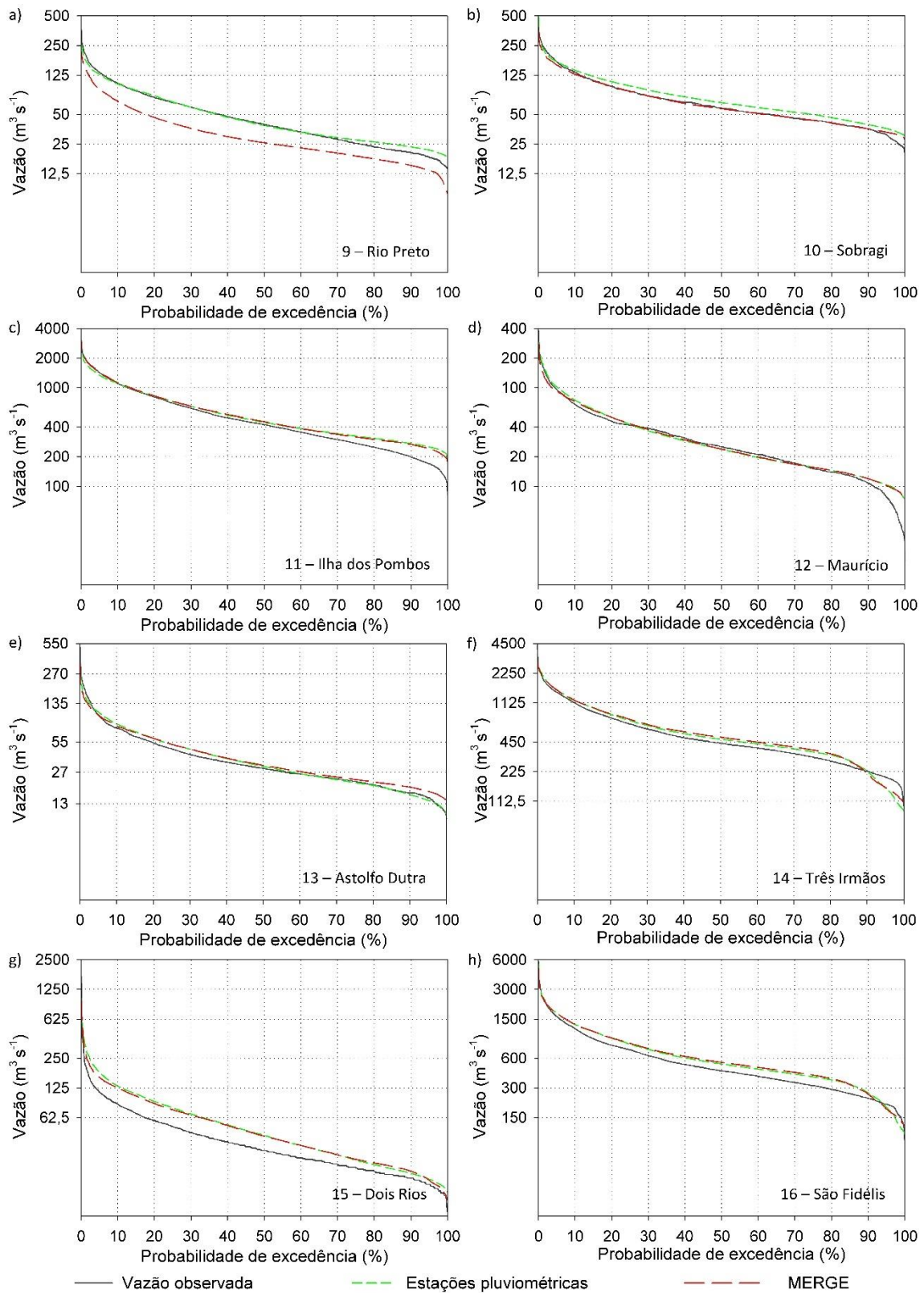
Os resultados observados nas curvas de permanência reforçam a hipótese de que as simulações hidrológicas na BHPS são superiores para as vazões máximas, visto que ambas simulações se ajustaram bem a vazões com menor probabilidade de excedência. Vale destacar também que apesar de apresentar resultados inferiores, as estações convencionais para as estatísticas NS , NS_{log} e ΔV , quando abordado pela curva de permanência, as simulações do MERGE se mostraram semelhantes ou até mesmo superiores às geradas pelas estações convencionais, para a maioria das 16 sub-bacias. Portanto, pode-se inferir que apesar de eventuais erros de precisão temporal dos eventos extremos (*timing*), as simulações do MERGE são capazes de representar suas respectivas magnitudes e frequências, demonstrando sua aptidão como ferramenta de gestão de eventos hidrológicos extremos

Figura 4.19 – Curvas de permanência observadas e simuladas.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.20 – Curvas de permanência observadas e simuladas.



Fonte: Produção do autor.

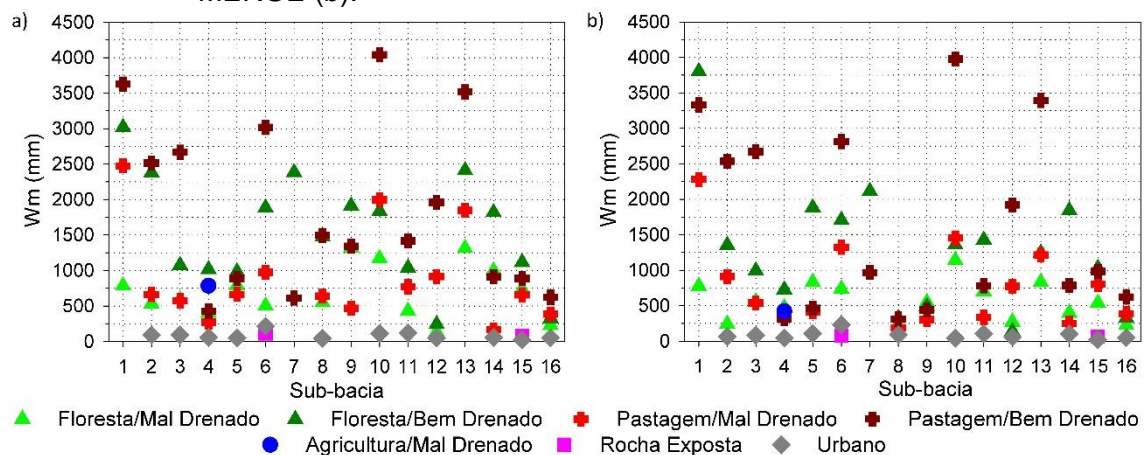
4.3.2 Análise dos parâmetros calibrados

Conforme descrito na Seção 3.3.3, o modelo MGB-IPH utiliza o algoritmo MOCOM-UA para calibração automática multi-objetivo dos parâmetros com as funções objetivos apresentadas nas Equações 3.4, 3.5 e 3.6. Os parâmetros foram calibrados individualmente, seguindo a ordem topológica das sub-bacias (Figura 3.7), a partir de valores de referência (MEDEIROS et al., 2018) e respeitando limiares pré-estabelecidos na literatura (COLLISCHONN, 2001, SILVA, 2005). Nesta seção são apresentados os parâmetros calibrados do modelo para cada HRU com pelo menos 0,5% de cobertura da terra em cada uma das 16 sub-bacias analisadas. Os valores calibrados de todos os parâmetros podem ser encontrados no Apêndice G, a porcentagem de cada HRU em cada sub-bacia, essencial para a compreensão da influência de cada parâmetro, é apresentada no Apêndice E.

O parâmetro W_m , identificado como mais influente na calibração do modelo, (Seção 4.2) apresentou valores consistentes com o tipo de HRU observada (Figuras 4.21a e 4.21b). Os maiores valores de W_m são observados para as coberturas de pastagem e floresta, sendo os referentes a solos bem drenados maiores que aqueles de solos mal drenados. Essa característica é esperada, uma vez que os solos classificados como “bem drenados” (latossolos, argissolos, nitossolos) possuem mais avançado estágio de intemperização, menor capacidade de troca de cátions e maior profundidade (EMBRAPA, 2013), o que reflete em uma maior capacidade de armazenamento de água no solo (W_m). Já os solos classificados como “mal drenados” (Cambissolos, Gleissolos e Neossolos) são rasos e pouco intemperizados e/ou são permanentemente ou periodicamente saturados (EMBRAPA 2013), o que reflete em um menor valor de W_m . Destaca-se também que as HRUs supracitadas (i.e. “Floresta Bem Drenado”, “Floresta Mal Drenado”, “Pastagem Bem Drenado” e “Pastagem Mal Drenado”) correspondem a mais de 97,5% da área total da BHPS (i.e. 18,7%, 11,2%, 54,7% e 12,9%, respectivamente) e, portanto, são HRUs mais relevantes na geração das vazões simuladas.

Ao comparar os W_m calibrados para as estações convencionais (Figura 4.21a) e para o MERGE (Figura 4.21b), é possível constatar que para a maioria das sub-bacias os valores são semelhantes. Entretanto, para as sub-bacias de Manuel Duarte (8) e Rio Preto (9), onde MERGE não foi capaz de representar adequadamente os regimes de chuva (Figura 4.10), os valores calibrados de W_m para o MERGE se mostraram muito inferiores aos calibrados para as estações convencionais, além de não apresentarem grandes variações de magnitude para as diferentes HRUs. Essa característica reforça a hipótese de que produtos de precipitação que não apresentam resultados satisfatórios no processo de validação, tendem a não resultar em performances adequadas na modelagem hidrológica.

Figura 4.21 – Parâmetro W_m calibrado para as estações convencionais (a) e para o MERGE (b).

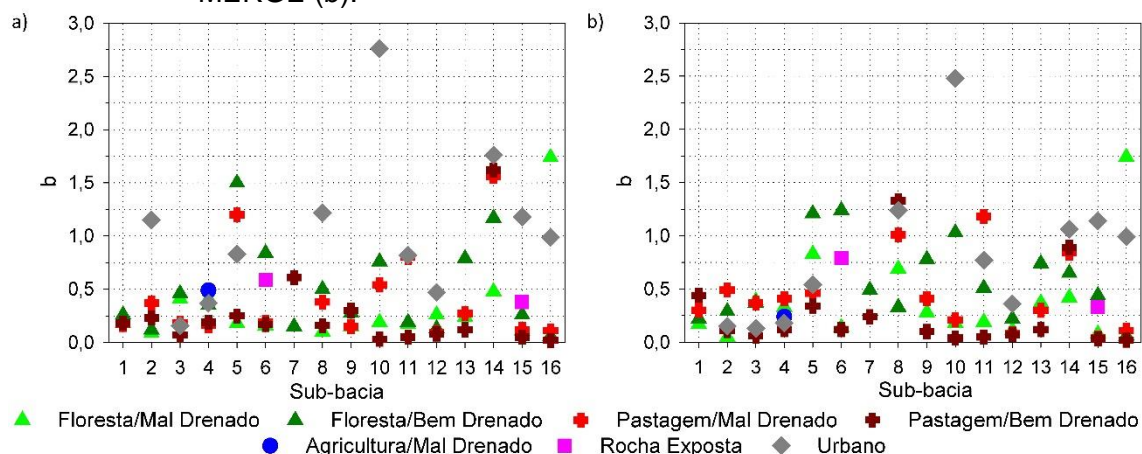


Fonte: Produção do autor.

Com base na Figura 4.22 é possível constatar que as HRUs referentes a solos mal drenados tendem a apresentar os maiores valores para o parâmetro de forma da curva de saturação b . Segundo Collischonn (2001), nenhum parâmetro do modelo é capaz de representar adequadamente a redução da capacidade de infiltração de água no solo. Nesse contexto, o parâmetro b possivelmente seja o parâmetro que melhor representa essa variável do solo. O autor ainda afirma que, provavelmente, bacias de solo degradado e compactado tendem a apresentar os maiores valores de b , resultando em um hidrograma com maior número de picos de cheias. Os resultados observados tanto para as estações convencionais (Figura 4.22a) quanto para o MERGE (Figura 4.22b) corroboram

as afirmações de Collischonn (2001), visto que os maiores valores de b são observados para aquele que talvez seja o uso de maior impermeabilização do solo, isto é, uso urbano.

Figura 4.22 – Parâmetro b calibrado para as estações convencionais (a) e para o MERGE (b).



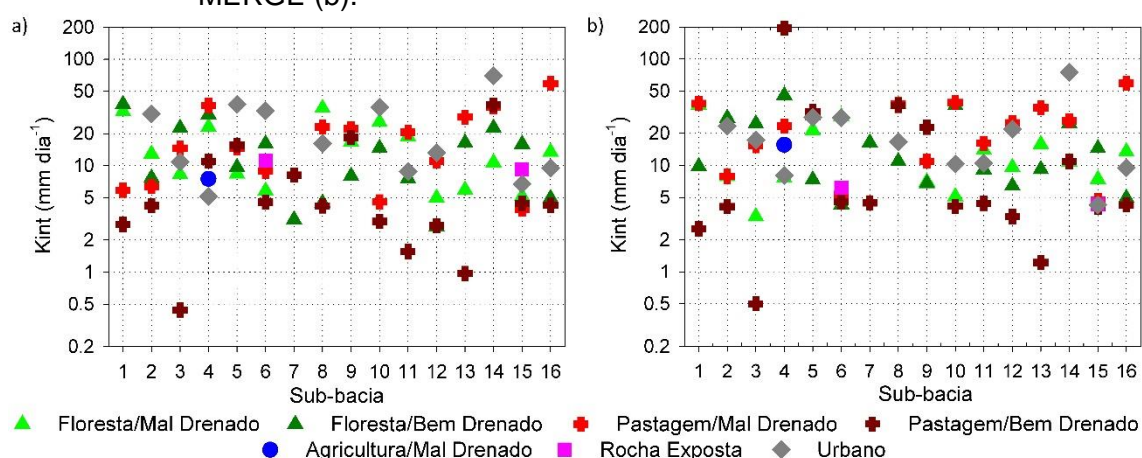
Fonte: Produção do autor.

Valores elevados de b ($> 1,5$), também são observados para as HRUs Floresta/Mal Drenado e Pastagem Bem e Mal Drenadas. Os maiores valores de b para os solos mal drenados podem estar associados a menor capacidade de infiltração destes solos, que apesar de poderem ser aumentadas pela cobertura, (e.g. a cobertura de florestas tende a resultar em solos com maior quantidade de macroporos), ainda sim são limitados pela profundidade e/ou caráter hidromórfico dos mesmos. Já os maiores valores de b para a HRU Pastagem/Bem Drenado, ou até mesmo para a Floresta/Bem Drenado, podem estar relacionados ao grau de degradação resultantes da compactação do solo pelo pisoteio animal, falta de práticas conservacionistas ou pelo uso intensivo de máquinas (COLLISCHONN, 2001). Vale destacar que no presente estudo não foi feita distinção entre florestas naturais e florestas cultivadas, então, é possível que a HRU Floresta/Bem Drenado contemple florestas cultivadas com elevado grau de mecanização e práticas de silvopastoris.

O parâmetro K_{int} é relacionado a condutividade hidráulica ou a taxa de infiltração da camada sub-superficial do solo, sendo responsável pela quantidade de água escoada sub-superficialmente (COLLISCHONN, 2001).

Conforme descrito na Equação 2.7, maiores valores de K_{int} resultam na maior contribuição do escoamento sub-superficial. Entretanto, de acordo com a análise de sensibilidade do modelo, desenvolvida na Seção 4.2, tanto as vazões máximas e mínimas como as médias são pouco sensíveis as variações do K_{int} na BHPS, o que dificulta a interpretação e discussão da Figura 4.23. Porém, vale destacar que, com exceção das sub-bacias Santa Branca, Jaguari e Funil, ambas calibrações resultaram em valores semelhantes de K_{int} , o que indica alguma consistência hidrológica na calibração desse parâmetro.

Figura 4.23 – Parâmetro K_{int} calibrado para as estações convencionais (a) e para o MERGE (b).

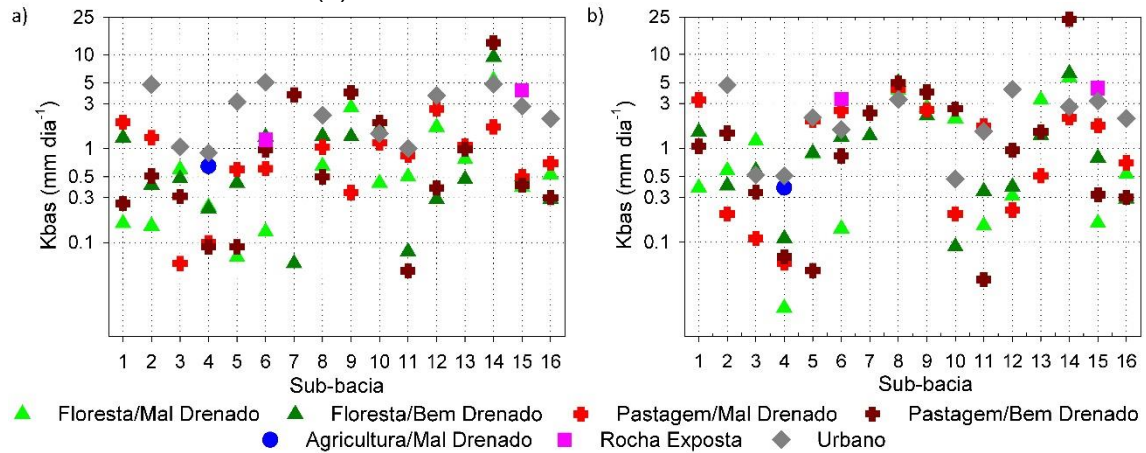


Fonte: Produção do autor.

Já o parâmetro K_{bas} exerce influência sobre todas as funções objetivos consideradas, controlando a contribuição do escoamento de base na geração das vazões. De acordo com a Figura 4.24, os maiores valores de K_{bas} , e, portanto, as maiores contribuições do escoamento de base são observadas para os solos categorizados como “Mal Drenados”. As HRUs relacionadas a solos mal drenados são majoritariamente encontradas próximas aos divisores de águas ou às margens dos cursos d’água principais (Figura 3.8), ou seja, nas regiões de recarga dos aquíferos ou nas planícies fluviais da BHPS. A importância dessas áreas, não só para a recarga dos aquíferos como também para a manutenção das vazões, principalmente nos períodos de estiagem, é amplamente discutida na literatura (VIESSMAN; LEWIS, 2003; TUCCI, 2009). A capacidade do modelo em representar tais peculiaridades do ciclo hidrológico reforça seu caráter

conceitual, ou seja, baseados na representação dos processos físicos do ciclo hidrológico.

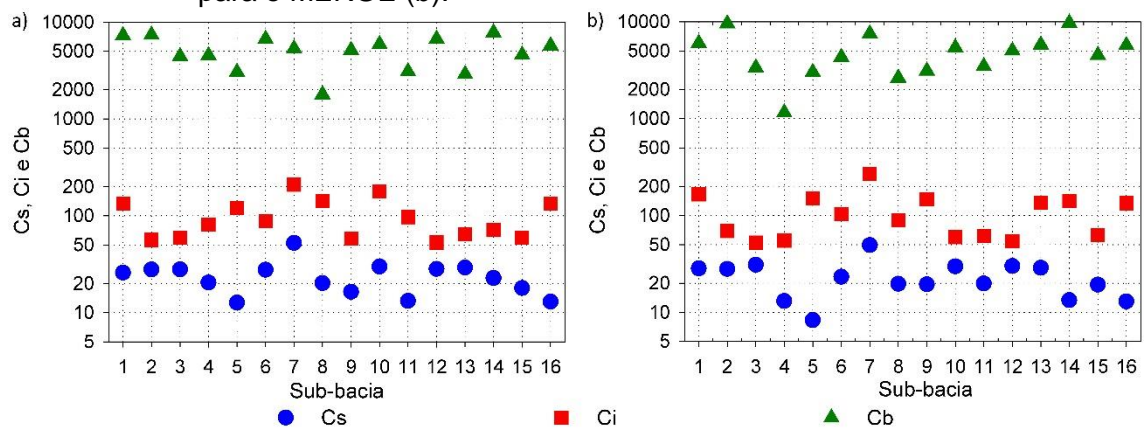
Figura 4.24 – Parâmetro K_{bas} calibrado para as estações convencionais (a) e para o MERGE (b).



Fonte: Produção do autor.

Por fim, os parâmetros de controle do retardo do escoamento superficial (C_s), sub-superficial (C_i) e de base (C_b) entre as minibacias não apresentaram grandes variações entre as calibrações para as estações convencionais e para o MERGE (Figura 4.25). O modelo se mostrou pouco sensível a estes parâmetros (Seção 4.2), o que pode explicar a semelhança dos mesmos para ambas calibrações.

Figura 4.25 – Parâmetros C_s , C_i e C_b calibrados para as estações convencionais (a) e para o MERGE (b).



Fonte: Produção do autor.

5 CONCLUSÕES

No presente estudo foi avaliado a possibilidade de utilização de produtos de precipitação por sensores remotos em um modelo hidrológico contínuo de grande escala, aplicado a 16 sub-bacias heterogêneas em termos de topografia, pedologia, uso e cobertura da terra e grau de antropização, que compõem a BHPS. Para tanto fez-se necessário avaliar o potencial de utilização de dois produtos de precipitação derivados de sensores remotos (TRMM e MERGE), de modo a identificar o mais adequado para a área de estudo; avaliar a sensibilidade do modelo às características das sub-bacias analisadas; aplicar o modelo em especial nas bacias sob forte antropização.

Com base na avaliação dos produtos de precipitação é possível afirmar que ambos produtos foram capazes de capturar o comportamento sazonal do regime de chuvas da BHPS. Entretanto, o erro diário observado para o produto TMPA 3B42V7 é visivelmente maior do que o observado para o MERGE, conseqüentemente gerando uma maior incerteza e maior erro acumulado. As observações foram corroboradas pela abordagem de validação dos produtos de precipitação, para qual o MERGE apresentou maior correlação, menor *RMSE* e menor viés para a maioria das sub-bacias. Vale destacar também que algumas características espaço-temporais se mostraram mais influentes sobre o erro das estimativas. Conforme descrito na literatura, foi observado que o erro é dependente da magnitude da precipitação, sendo assim mais relevante nas estações chuvosas. Além disso, ao contrário do observado em regiões de menor latitude, o erro de viés do produto TMPA 3B42V7 na BHPS se mostrou maior em regiões planas do que nas áreas montanhosas. Por fim, foi constatado que as áreas utilizadas para agregação dos dados de precipitação influenciam na qualidade das estimativas, especialmente se o número de estações convencionais disponíveis é reduzido. Já os produtos MERGE, superiores em praticamente todos os quesitos analisados, corroboram a hipótese da necessidade de correção do viés dos produtos de sensoriamento remoto com a rede pluviométrica disponível. Por esse motivo o MERGE foi utilizado como entrada do modelo MGB-IPH e seus resultados foram comparados com simulações realizadas a partir das estações pluviométricas convencionais.

A análise de sensibilidade, necessária para a identificação dos parâmetros mais influentes do modelo, demonstrou que maior atenção deve ser dada ao parâmetro W_m , uma vez que este é o mais importante na descrição dos extremos e médias hidrológicas. O MGB-IPH também se mostrou sensível aos parâmetros b e $Kbas$, especialmente em bacias montanhosas, o que permite inferir que a maior complexidade do terreno exige maior atenção na etapa de calibração. Foi observado também que, além da topografia, o tipo de uso e cobertura da terra influencia na sensibilidade do modelo, visto que bacias mais antropizadas, em termos de cobertura urbana, se mostraram ligeiramente sensíveis ao parâmetro de retardo do reservatório superficial C_s .

O modelo foi então calibrado e validado para o as estações pluviométricas convencionais e o MERGE. As simulações a partir de dados de estações pluviométricas convencionais foram superiores às do MERGE para as funções objetivo NS , NS_{log} e ΔV na maioria das sub-bacias analisadas. Porém, resultados considerados “satisfatórios”, “bons” e “muito bons” também foram obtidos para as simulações derivadas do MERGE, demonstrando a adequabilidade do produto para a simulação hidrológica e corroborando os resultados observados no processo de validação dos produtos de precipitação. Os parâmetros calibrados para as simulações do MERGE apresentaram pequenas variações em relação a calibração de referência (i.e. calibração para as estações convencionais), indicando certa consistência hidrológica; consistência essa também observada na capacidade preditiva do modelo no período de validação, especialmente para as sub-bacias pouco antropizadas. O modelo MGB-IPH foi aplicado com sucesso nas sub-bacias mais antropizadas, sendo capaz de capturar o comportamento máximo e médio das vazões. Porém, limitações foram constatadas em sub-bacias compostas por grandes barramentos, para as quais a calibração com vazões naturalizadas gerou resultados insatisfatórios.

O presente estudo colabora para a compreensão dos potenciais e limitações do MGB-IPH aplicado a condições análogas a aquelas propostas na sua formulação. O uso de fontes de dados de precipitação a partir de sensores remotos é uma alternativa viável para a modelagem hidrológica, visto que ela é capaz de representar as características gerais do regime de chuvas e

consequentemente de vazões, mesmo que acrescentando erros e incertezas nas estimativas. Estudos futuros devem avaliar a aplicabilidade de outras fontes de dados de precipitação por sensoriamento remoto, assim como alternativas para a simulação das vazões em seções antropizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the European Hydrological System – SHE. **Journal of Hydrology**, v. 87, n. 1/2, p. 45-59, 1986.
- ADAM, K. N.; FAN, F. M.; PONTES, P. R.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 999-1007, 2015.
- ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large basin simulation experience in South America. In: IAHS SCIENTIFIC ASSEMBLY, 7., 2006. **Proceedings...** 2006.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL - AGEVAP. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e Planos de Ação de Recursos Hídricos das Bacias Afluentes**. Resende: AGEVAP, 2014.
- BARNES, S. L. **Mesoscale objective analysis using weighted time-series observations**. Silver Spring: NOAA, 1973. 60p.
- BAYER, D. M. **Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala**. 2014. 156 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- BAYER, D. M.; COLLISCHONN, W. Análise de sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças de uso da terra. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 165-179, 2013.
- BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F.; MONKE E. J. ANSWERS: a model for watershed planning. **Transaction of the ASAE**, v.23, n.4, p.938-944, 1980.
- BEASLEY, E. W. **Investigating the driving mechanism of subsurface runoff response on a vegetated hillslope in the Georgia Piedmont**. 2011. 76 p. Dissertação (Mestrado) - University of Georgia, Athens, 2011.
- BECK, H. E.; VAN DIJK, A. I. J. M.; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D. G.; MARTENS, B.; ROO, A. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.21, p. 589-615, 2017.

BENNETT, N. D.; CROKE, B. F. W.; GUORISO, G.; GUILLAUME, J. H. A.; HAMILTON, S. H.; JAKEMAN, A. J.; MARSILI-LIBELLI, S.; NEWHAM, L. T. H.; NORTON, J. P.; PERRIN, C.; PIERCE, S. A.; ROBSON, B.; SEPPELT, R. VOINOV, A. A.; FATH, B. D.; ANDREASSIAN, V. Characterising performance of environmental models. **Environmental Modelling & Software**, v. 40, p. 1-20, 2013.

BERGTROM, S. **Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments**. Lund: University of Lund, 1976. 134p. (Bulletin Series A, 52).

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 3, p. 265-274, 2011a.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, v. 86, p. 160-171, 2011b.

BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by oxisols using distributed hydrological model. **Water Resources Management**, v. 27, p. 341-363, 2013.

BEVEN, K. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. West Wessex: John Wiley & Sons, 2012, 457 p.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contribution area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

BITEW, M. M.; GEBREMICHAEL, M. Evaluation of satellite rainfall products through hydrologic simulation in a fully distributed hydrologic model. **Water Resources Research**, v. 47, w06526, 2011.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; PAZ, A. R.; ALLASIA, D. Impacts of projected climate change on hydrologic regime of the Upper ParÁguay River basin. **Climatic Change**, v. 127, n. 1, p. 27-41, 2014.

BREMICKER, M. **Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells fur das Weser- und das Ostsee-Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells**. Dissertation (Master) - Institut fur Hydrologie, Albert-Ludwigs- Universitat Freiburg, Freiburg im Breisgau, 1998.

BRITO, A. L.; VEIGA, J. A. P.; YOSHIDA, M. C. Extreme rainfall events over the Amazon Basin produce significant quantities of rain relative to the rainfall climatology. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 4, p. 179-191, 2014.

- BUI, H. T.; ISHIDAIRA, H.; SHAOWEI, N. Evaluation of the use of global satellite-gauge and satellite-only precipitation products in stream flow simulation. **Applied Water Science**, v. 9, n. 53, p. 1-15, 2019.
- CALDEIRA, T. L.; MELLO, C. R.; BESKOW, S.; TIMM, L. C.; VIOLA, M. R. LASH hydrological model: an analysis focused on spatial discretization. **Catena**, v. 173, p. 183-193, 2019.
- CHEN, S.; HONG, Y.; GOURLEY, J. J.; HUFFMAN, G. J.; TIAN, Y.; CAO, Q.; YONG, B.; KIRSTETTER, P. E.; HU, J.; HARDY, J.; LI, Z.; KHAN, S. I.; XUE, X. Evaluation of the successive V6 and V7 TRMM multisatellite precipitation analysis over the Continental United States. **Water Resources Research**, v. 49, p. 8174-8186, 2013.
- CHOKNGAMWONG, R.; CHIU, L. S. Thailand daily rainfall and comparison with TRMM products. **Journal of Hydrometeorology**, v.9, p. 256-266, 2008.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. Nova Iorque: McGraw Hill, 1988, 572 p.
- CLARK, C. O. Storage and the unit hydrograph. **Transactions, ASCE**, v. 110, n. 2261, p. 1419-1446, 1945.
- CLARKE, R. T.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. Issues of spatial correlation arising from the use of TRMM rainfall estimates in the Brazilian Amazon. **Water Resources Research**, v. 47, n. 5, W05539, 2011.
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 207 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001.
- COLLISCHONN, W.; HAAS, R.; ANDREOLLI, I.; TUCCI, C. E. M. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. **Journal of Hydrology**, v. 305, p. 87-98, 2005.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; 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.
- COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. **Journal of Hydrology**, v. 360, p. 207-216, 2008.

CORREA, S. W.; PAIVA, R. C. D.; ESPINOZA, J. C.; COLLISCHONN, W. Multi-decadal hydrological retrospective: case study of Amazon floods and droughts. **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 667-684, 2017.

CRAWFORD, H. H.; LINSLEY, R. K. **Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model IV**. Stanford: Stanford University, 1967. (Technical Report, 39).

CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation methods (Muskingum method). **Journal of Hydraulics Research**, v. 7, n. 2, p. 205-230, 1969.

CURTARELLI, M. P.; RENNÓ, C. D.; ALCÂNTARA, E. H. E. Evaluation of the Tropical Rainfall Measuring Mission 3B43 product over an inland area in Brazil. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 8, 083589, 2014.

CYGNUS SOLUTION. **CYGWIN**. Disponível em: <https://cygwin.com/>. Acesso em: 12 ago. 2019.

DEVI, G.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A review on hydrological models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001-1007, 2015.

DINKU, T.; CONNOR, S. J.; CECCATO, P. Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over mountainous regions of Africa and South America. In: GEBREMICHAEL, M.; HOSSAIN, F. (Ed.). **Satellite rainfall applications for surface hydrology**. Dordrecht: Springer, 2010.

DUAN, Z.; BASTIAANSEN, W. F. M. First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling-calibration procedure. **Remote Sensing of the Environment**, v. 131, p. 1-13, 2013.

ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H. G. Automatic model calibration. **Hydrological Processes**, v. 19, p. 651-658, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Avaliação Ambiental Integrada (AAI) dos aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio Paraíba do Sul**. Rio de Janeiro: EPE, 2007. (Relatório Final EPP-1-70-0001 RE RO).

FALCK, A. S.; MAGGIONI, V.; TOMASELLA, J.; VILA, D. A.; DINIZ, F. L. R. Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: a case study in the Tocantins-Araguaia basin in Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 943-957, 2015.

FAN F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do modelo MGB-IPH com sistema de informação geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 243-254, 2014.

FAN F. M.; SCHWANENBERG D.; COLLISCHONN, W.; WEERTS, A. Verification of inflow into hydropower reservoirs using ensemble forecast of the TIGGE database for large scale basins in Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.4, p. 196-227, 2015.

FAN F. M.; COLLISCHONN, W.; QUIROZ, K. J.; SORRIBAS, M. V.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A. Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecast and real-time satellite rainfall estimates. **Journal of Flood Risk Management**, v. 9, n. 3, 2016.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The shuttle radar topography mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. 1-33, 2007.

FLEISCHMANN, A.; COLLISCHONN, W.; PARIS, A.; TUCCI, C. E. Modeling the role of reservoirs versus floodplains on large-scale river hydrodynamics. **Natural Hazards**, v.99, n.2, p.1075-1104, 2019. DOI: 10.1007/s11069-019-03797-9.

FLEISCHMANN, A.; SIQUEIRA, V.; PARIS, A.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, PAIVA, R.; PONTES, P.; CRÉTAUX, J. F.; NGUYEN, M. B.; BIANCAMARIA, S.; GOSSET, M.; CALMANT, S.; TANIMOUN, B. Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands. **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 943-959, 2018.

FREEZE R. A.; HARLAN, R. L. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. **Journal of Hydrology**, v. 9, 237-258, 1969.

GETIRANA, A. C. V.; BONNET, M. P.; FILHO, O. C. R.; COLLISCHONN, W.; GUYOT, J. L.; SEYLER, F.; MANSUR, W. L. Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 3219-3236, 2010.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F.; MOREIRA, J. C. Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 13-20, 2007.

HIJMANS, R. L. **Raster**: geographic data analysis and modeling: R package version 2.5-2. 2015. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/index.html>.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Transactions American Geophysical Union**, v. 14, p. 446-460, 1933.

HUANG, S.; KUMAR, R.; FLORKE, M.; YANG, T.; HUNDECHA, W.; KRAFT, P.; GAO, C.; GELFAN, A.; LIERSCH, S.; LOBANOVA, A.; STRAUCH, M.; VAN OGTROP, F.; REINHARDT, J.; HABERLANDT, U.; KRYSANOVA, V. Evaluation of an ensemble of regional hydrological models in 12 large-scale river basins worldwide. **Climatic Change**, v. 141, p. 381-397, 2017.

HUFFMAN, G. J.; ADLER, R. F.; BOLVIN, D. T.; GU, G.; NELKIN, E. J.; BOWMAN, K. P.; HONG, Y.; STOCKER, E. F.; WOLFF, D. B. The TRMM multisatellite precipitation analysis: Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, p. 38-55, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Normais climatológicas do Brasil**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 10 jul.2019.

KAHN, J. R.; VÁSQUEZ, W. F.; REZENDE, C. E. Choice modeling of system-wide or large-scale environmental change in a developing country context: lessons from the Paraíba do Sul River. **Science of the Total Environment**, v. 598, p. 488-496, 2017.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, p. 13-24, 1986.

LI, DAN.; CHRISTAKOS, G.; DING, X.; WU, J. Adequacy of TRMM satellite rainfall data in driving the SWAT modeling of Tiaoxi catchment (Taihu lake basin, China). **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 1139-1152, 2018.

LIANG, X. **A two-layer variable infiltration capacity land surface representation for general circulation models**. Seattle: University of Washington, 1994. 208p. (Water Resources Series, TR140).

LIECHTI, T. C.; MATOS, J. P.; BOILLAT, J. L.; SCHLEISS, A. J. Comparison and evaluation of satellite derived precipitation products for hydrological modeling of the Zambezi River Basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, p. 489-500, 2012.

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

MAGGIONI, V.; MEYERS, P. C.; ROBINSON, M. D. A review of merged high-resolution satellite precipitation product accuracy during the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) era. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, p. 1101-1117, 2016.

MARENGO, J.; CAVALCANTI, I. F. A.; SATYAMURTY, P.; TROSNIKOV, I.; NOBRE, C. A.; BONATTI, J. P.; CAMARGO, H.; SAMPAIO, G.; SANCHES, M. B.; MANZI, A. O.; CASTRO, C. A. C.; D'ALMEIDA, C.; PEZZI, L. P.; CANDIDO, L. Assessment of regional seasonal rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM. **Climate Dynamics**, v. 21, p. 459-475, 2003.

MARQUES, J. S. J.; DITTMAR, T.; NIGGEMANN, J.; ALMEIDA, M. G.; GOMEZ-SAEZ, G. V.; REZENDE, C. E. Dissolved black carbon in the headwaters-to-ocean continuum of Paraíba do Sul River, Brazil. **Frontiers in Earth Sciences**, v. 5, n. 11, 2017.

MCCUEN, R. H. **A guide to hydrologic analysis using SCS methods**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1982.

MEDEIROS, S. M.; 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-IPH 2018 utilizando o IPH-Hydro tools**. Porto Alegre: UFRGS, 2019.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M.; WEIMAR, F. A. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, v. 75, p. 235-247, 2008.

MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; PINTO, L. C.; BESKOW, S.; CURI, N. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 1, p. 7-25, 2016.

MOAZAMI, SABER.; GOLIAN, S.; KAVIANPOUR, M. R.; HONG, Y. Comparison of PERSIANN and V7 TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) products with rain gauge data over Iran. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 22, p. 8156-8171, 2013.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic

- quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.
- MULVANEY, T. J. On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations on the relation of rainfall and flood discharges in a given catchment. **Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland**, v. 4, n. 2, p. 18-33, 1850.
- MUNAR, A. M.; CAVALCANTI, R.; BRAVO, J. M.; FAN, F. M.; MOTTA-MARQUES, D.; FRAGOSO, C. R. Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling: toward a better comprehension of watershed-shallow lake process. **Journal of Hydrology**, v. 564, p. 424-441, 2018.
- NAGHETTINI, M. **Fundamentals of statistical hydrology**. Suíça: Springer, 2017.
- NAIR, S.; SRINIVASAN, G.; NEMANI, R. Evaluation of multi-satellite TRMM derived rainfall estimates over a western state of India. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 87, n. 6, p. 927-939, 2009.
- NASH, J. E. The form of the instantaneous unit hydrograph. **International Association of Science and Hydrology**, v. 3, p. 114-121, 1957.
- NERINI, D.; ZULKAFI, Z.; WANG, L. P.; ONOF, C.; BUYTAERT, W.; LAVADO-CASIMIRO, W.; GUYOT, J. L. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, p. 2153-2168, 2015.
- NIKOLOPOULOS, E. I.; ANAGNOSTOU, E. N.; HOSSAIN, F.; GEBREMICHAEL, M.; BORGA, M. Understanding the scale relationships of uncertainty propagation of satellite rainfall through a distributed hydrologic model. **Journal of Hydrometeorology**, v. 11, p. 520-532, 2010.
- NIPPGEN, F.; MCGLYNN, B. L.; EMANUEL, R. E.; VOSE, J. M. Watershed memory at the Coweeta Hydrologic Laboratory: the effect of past precipitation and storage on hydrologic response. **Water Resources Research**, v. 52, p. 1673-1695, 2016.
- NÓBREGA, M. T.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PAZ, A. R. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 585-595, 2011.
- O'CONNELL, P. E. A historical perspective. In: BOWLES, D. S.; O'Connell, P. E. (Ed.). **Recent advances in the modeling of hydrologic systems**. Dordrecht: Kluwer, 1991. p. 3-30.

OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005-5023, 2017.

OUMA, Y. O.; OWITI, T.; KIPKORIR, E.; KIBIY, J.; TATEISHI, R. Multitemporal comparative analysis of TRMM-3B42 satellite-estimated rainfall with surface gauge data at basin scales: daily, decadal and monthly evaluations. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 24, p. 7662-7684, 2012.

OVALLE, A. R. C.; SILVA, C. F.; REZENDE, C. E.; GATTS, C. E. C.; SUZUKI, M. S.; FIGUEIREDO, R. O. Long-term trends in hydrochemistry in the Paraíba do Sul River, southeastern Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 481, p. 191-203, 2013.

PACHECO, F, S.; MIRANDA, M.; PEZZI, L. P.; ASSIREU, A.; MARINHO, M. M.; MALAFAIA, M.; REIS, A.; SALES, M.; CORREIA, G.; DOMINGOS, P.; IWAMA, A.; RUDORFF, C.; OLIVA, P.; OMETTO, J. P. Water quality longitudinal profile of the Paraíba do Sul River, Brazil during an extreme drought event. **Limnology and Oceanography**, v. 62, p. 5131-5146, 2017.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 3, p. 333-346, 2011.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; GONÇALVES, L. G. G. On the sources of hydrological prediction uncertainty in the Amazon. **Hydrological Earth System Sciences**, v. 16, p. 3127-3137, 2012.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; MENDES, C. A. B. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling for the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, p. 1226-1243, 2013.

PAZ, A. R.; BRAVO, J. M.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large-scale hydrodynamic modeling of a complex river network and floodplains. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 15, p. 152-165, 2010.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PADOVANI, C. R. Large-scale modelling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal (Brazil). **Hydrological Processes**, v. 25, p. 1498-1516, 2011.

PROJETO RADAMBRASIL. **Folhas SF. 23/24, Rio de Janeiro/Vitória:** geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. 1983.

Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=217129>.

PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P. F.; SORRIBAS, M. C.; 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.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS geographic information system**: Open Sources Geospatial Foundation Project. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.4/en/docs/user_manual/preamble/foreword.html. Acesso em: 14 set. 2018.

QUEIROZ, A. R.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M.; SILVA, B. C.; SCIANNI, L. A. Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system. **Renewable Energy**, v. 99, p. 379-389, 2016.

QUEIROZ, A. R.; FARIA, V. A. D.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M. Hydropower revenues under the threat of climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 133, p. 873-882, 2019.

RAMAKRISHNA, S.; NASREEN, S. A. A. N. An overview on water resources: pollution and nanomaterials. In: BRUGGEN, B. (Ed.). **Applications of nanomaterials for water quality**. London: Future Science, 2013. p.8-29.

REFSGAARD, J. C.; STORM, B. MIKE SHE. In: SINGH, V. P.(Ed.). **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Park: Water Resources Publications, 1995. p. 809-846.

REIS, J. B. C.; RENNÓ, C. D.; LOPES, E. S. S. Validation of satellite rainfall products over a mountainous watershed in a humid subtropical climate region of Brazil. **Remote Sensing**, v. 9, p. 1240, 2017.

RIBEIRO NETO, A. R.; COLLISCHONN, W.; SILVA, R. C. V.; TUCCI, C. E. M. Hydrological modelling in Amazonia: use of the MGB-IPH model and alternative databases. **IAHS**, v. 303, p. 246-254, 2006.

ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. 118p.

ROZANTE, J. B.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G.; VILA, D. A. Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. **Weather Forecasting**, v. 25, p. 885-894, 2010.

RSTUDIO TEAM. **RStudio**: integrated development for R. Boston, MA: RStudio Inc. Disponível em: www.rstudio.com/. Acesso em: 19 jun. 2019.

RUDORFF, N. D. M.; KAMPEL, M.; DE REZENDE, C. E. Spectral mapping of the Paraíba do Sul River plume (Brazil) using multitemporal Landsat images. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 5, 053550, 2011.

SCHEEL, M. L. M.; ROHRER, M.; HUGGEL, C.; SANTOS VILLAR, D.; SILVESTRE, E.; HUFFMAN, G. J. Evaluation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 8, p. 2649-2663, 2011.

SCHWANENBERG, D.; FAN, F. M.; NAUMANN, S.; KUWAJIMA, J. I.; MONTERO, R. A.; REIS, A. A. Short-term reservoir optimization of flood mitigation under meteorological and hydrological forecast uncertainty: application to the Três Marias Reservoir in Brazil. **Water Resources Management**, v. 29, p. 1635-1651, 2015.

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

SHUKLA, A. K.; OJHA, C. S. P.; SINGH, R. P.; PAL, L.; FU, D. Evaluation of TRMM precipitation dataset over Himalayan catchment: the Upper Ganga Basin, India. **Water**, v. 11, p. 613, 2019.

SILVA, B. C. **Previsão hidroclimática de vazão para a Bacia do Rio São Francisco**. 2005. 228 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. Previsão de vazão com modelos hidroclimáticos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 3, p. 15-29, 2006.

SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; CORBO, M. D. Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na Bacia do Rio São Francisco, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.12, n. 3, p. 31-41, 2007.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-hydro tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 274-287, 2016.

SIQUEIRA, V. A.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, 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, p. 4815-4824, 2018.

SNYDER, F. F. Synthetic unit-graphs. **Transactions American Geophysical Union**, v. 19, n. 1, p. 447-454, 1938.

SOUZA, C.; AZEVEDO, T. **MapBiomass general "Handbook"**, 2017. 23p.
Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/mapbiomas-ecostage/Base+de+dados/Metodologia/ATBD+MapBiomass+Geral+2017-03-22.pdf>.

STISEN, S.; SANDHOLT, I. Evaluation of remote-sensing-based rainfall products through predictive capability in hydrological runoff modelling. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 879-891, 2010.

SU, F.; HONG, Y.; LETTENMAIER, D. P. Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. **Journal of Hydrometeorology**, v. 9, p. 622-640, 2008.

TAN, M. L.; DUAN, Z. Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore. **Remote Sensing**, v. 9, p. 720, 2017.

TAPIADOR, F. J.; TURK, F. J.; PETERSEN, W.; HOU, A. Y.; EDUARDO, G.; MACHADO, L. A. T.; ANGELIS, C. F.; SALIO, P.; KIDD, C.; HUFFMAN, G. J.; CASTRO, M. Global precipitation measurements: Methods, datasets and applications. **Atmospheric Research**, v. 104-105, p. 70-97, 2012.

THIEMIG, V.; ROJAS, R.; ZAMBRANO-BIGIARINI, M.; ROO, A. D. Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin. **Journal of Hydrology**, v. 499, p. 324-338, 2013.

TOBIN, K. J.; BENNETT, M. E. Using SWAT to model streamflow in two river basins with ground and satellite precipitation data. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n. 1, p. 253-271, 2009.

TOBIN, K. J.; BENNETT, M. E. Adjusting satellite precipitation data to facilitate hydrologic modeling. **Journal of Hydrometeorology**, v. 11, p. 966-978, 2010.

TODINI, E. The ARNO rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, v. 175, n 1-4, p. 339-382, 1996.

TONG, K.; SU, F.; YANG, D.; HAO, Z. Evaluation of satellite precipitation retrievals and their potential utilities in hydrologic modeling over the Tibetan Plateau. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 423-437, 2014.

- TONG, K.; ZHAO, Y.; WEI, Y.; HU, B.; LU, Y. Evaluation and hydrological validation of GPM precipitation products over the Nanliu River Basin, Beibu, Gulf. **Water**, v. 10, p. 1777, 2018.
- TUCCI, C. E. M.; ORDONEZ, J. S.; SIMÕES, M. L. Modelo matemático precipitação-vazão IPH II alguns resultados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 4., 1981, Fortaleza, CE. **Anais.. ABRH**, 1981.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W. Long-term flow forecast based on climate and hydrologic modeling: Uruguay River basin. **Water Resources Research**, v. 39, n. 7, 2003.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678 p.
- TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W.; CLARKE, R. T.; PAZ, A. R.; ALLASIA, D. Short- and long- term flow forecasting in the Rio Grande watershed (Brazil). **Atmospheric Science Letters**, v. 9, p. 53-56, 2008.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. O ciclo d'água, The water cycle, Portuguese. Acesso em Fevereiro de 2019. Disponível em:<<https://water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>>.
- VAN LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G.; GARBRECHT, J. D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: choosing between two models. **Transactions of the ASABE**, v. 46, p. 1539-1551, 2003.
- VAN ZYL, J. J.; The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, v. 48, n. 5-12, p. 559-565, 2001.
- VASCONCELOS, S. S.; FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. A.; SILVA, P. R. T.; DIAS, D. V. Suscetibilidade da vegetação ao fogo no sul do Amazonas sob condições meteorológicas atípicas durante a seca de 2005. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 2, p. 134-144, 2015.
- VISSMAN, W.; LEWIS, G. L. **Introduction to hydrology**. Nova Jersey: Pearson Education, 2003. 612 p.
- VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; BESKOW, S.; NORTON, L. D. Applicability of the LASH for hydrological simulation of the Grande River Basin, Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, p. 1639-1652, 2013.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; CHOU, S. C.; YANAGI, S. N.; GOMES, J. L. Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 35, n. 6, p. 1054-1068, 2015.

VISUAL STUDIO. Disponível em: www.visualstudio.microsoft.com. Acesso em: 09 mar. 2019.

XUE, X.; HONG, Y.; LIMAYE, A. S.; GOURLEY, J. J.; HUFFMAN, G. J.; KHAN, S. I.; DORJI, C.; CHEN, S. Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based multi-satellite precipitation analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins? **Journal of Hydrology**, v. 499, p. 91-99, 2013.

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity analysis calibration, and validation for a multivariable swat model. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 5, p. 1077-1089, 2005.

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

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **Guide to hydrological practices**. Geneva: WMO, 1994,

WORQLUL, A. W.; MAATHUIS, B.; ADEM, A. A.; DEMISSIE, S. S.; LANGAN, S.; STEENHUIS, T. S. Comparison of rainfall estimations by TRMM 3B42, MPEG and CFSR with ground-observed data for the Lake Tana basin in Ethiopia. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 4871-4881, 2014.

ZHANG, Y.; PAN, M.; SHEFFIELD, J.; SIEMANN, A. L.; FISHER, C. K.; LIANG, M.; BECK, H. E.; WANDERS, N.; MACCRACKEN, R. F.; HOUSER, P. R.; ZHOU, T.; LETTENMAIER, D. P.; PINKER, R. T.; BYTHEWAY, J.; KUMMEROW, C. D.; WOOD, E. F. A Climate Data Record (CDR) for the global terrestrial water budget: 1984-2010. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, p. 241-263, 2018.

ZHANG, Z.; TIAN, J.; HUANG, Y.; CHEN, X.; CHEN, S.; DUAN Z. Hydrologic evaluation of TRMM and GPM IMERG satellite-based precipitation in a humid basin of China. **Remote Sensing**, v. 11, p. 431, 2019.

ZHAO, R. J.; LIU, X. R. The Xinanjiang Model. In: SINGH, V. P. (Ed.). **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch, Colo: Water Resources Publications, 2012. p. 2015-232.

ZHU, Q.; XUAN, W.; LIU, L.; XU, Y. Evaluation and hydrological application of precipitation estimates derived from PERSIANN-CDR, TRMM 3B42V7, and NCEP-CFSR over humid regions in China. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 17, p. 3061-3083, 2016.

APÊNDICE A – LISTA DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS CONVENCIONAIS

No presente estudo foram utilizadas as seguintes séries históricas de precipitação, as quais podem ser baixadas na plataforma hidroweb da ANA (https://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf):

2042016, 2141005, 2141006, 2141007, 2142000, 2142001, 2142002, 2142004, 2142006, 2142007, 2142008, 2142009, 2142014, 2142015, 2142022, 2142058, 2142064, 2142065, 2143000, 2143001, 2143003, 2143007, 2143008, 2143011, 2143013, 2143016, 2143017, 2143018, 2143019, 2143020, 2143021, 2143022, 2143062, 2144016, 2242001, 2242002, 2242005, 2242013, 2242017, 2242018, 2242019, 2242020, 2242021, 2242022, 2242024, 2242025, 2242026, 2242027, 2242028, 2242029, 2243003, 2243004, 2243005, 2243006, 2243007, 2243008, 2243010, 2243011, 2243012, 2243013, 2243014, 2243015, 2243016, 2243202, 2243205, 2243216, 2243255, 2244010, 2244030, 2244033, 2244034, 2244035, 2244036, 2244037, 2244038, 2244039, 2244041, 2244043, 2244044, 2244045, 2244047, 2244048, 2244058, 2244064, 2244097, 2244099, 2244100, 2244103, 2244124, 2244133, 2244144, 2244145, 2244152, 2244153, 2244154, 2245020, 2245054, 2245055, 2344009, 2345001, 2345004, 2345008, 2345012, 2345017, 2345023, 2345032, 2345034, 2345047, 2345049, 2345062, 2345065, 2345067, 2345071, 2345106, 2345159, 2345161, 2345164, 2345175, 2345176, 2346019, 2346029, 234610 e 2346344.

APÊNDICE B – LISTA DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS

No presente estudo foram utilizados dados de vazão naturalizada e vertida dos reservatórios, disponíveis na plataforma do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (<https://www.ana.gov.br/sar0/Medicao>) para as seções de Santa Branca, Jaguari, Funil, Santa Cecília e Três Irmãos.

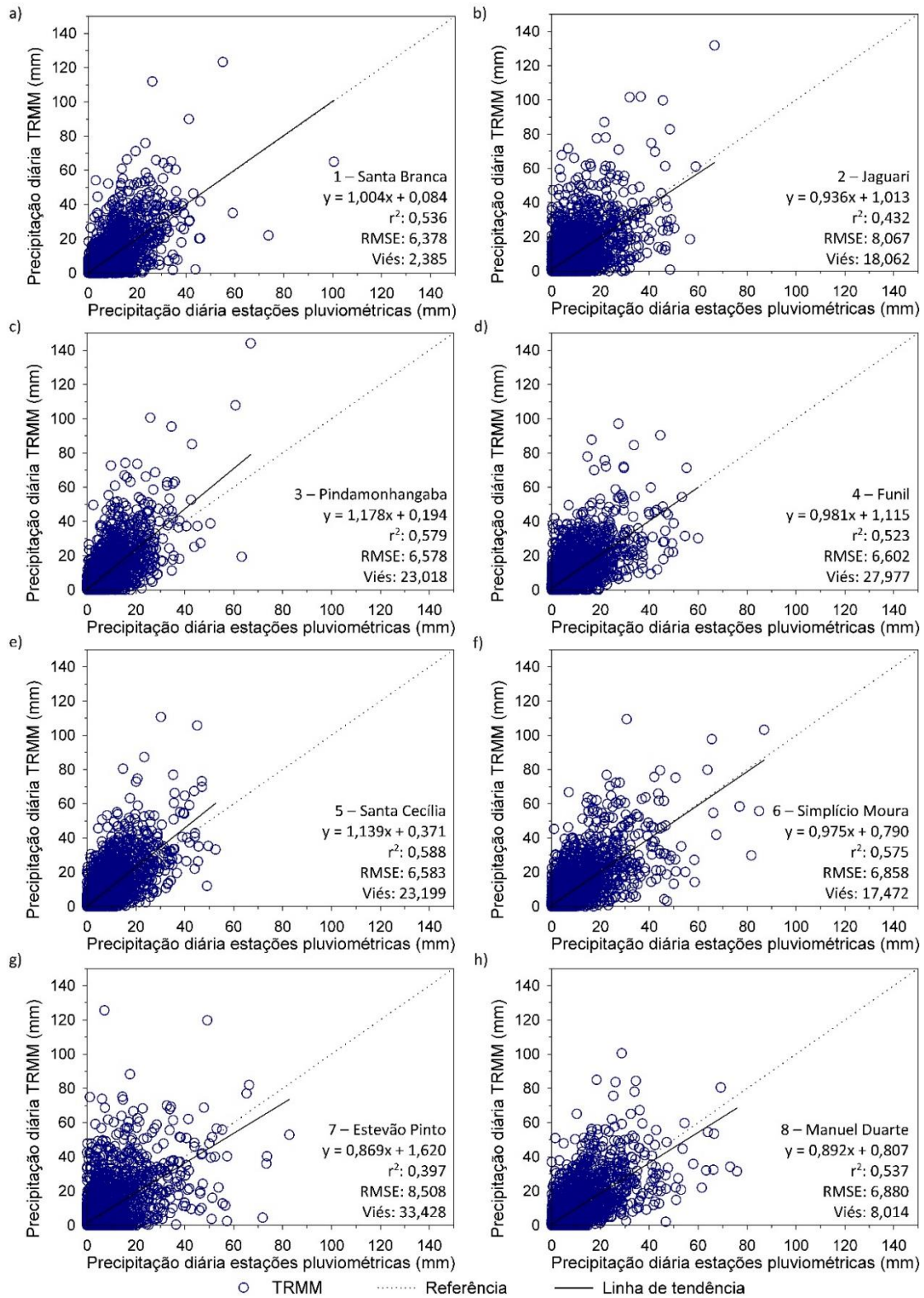
Para as demais seções os dados foram baixados na plataforma hidroweb da ANA (https://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf): Pindamonhangaba (58183000), Simplício Moura (58440000), Estevão Pinto (58610000), Manuel Duarte (58585000), Rio Preto (58550001), Sobragi (58520000), Maurício (58765001), Astolfo Dutra (58735000), Três Irmãos (58795000), Dois Rios (58874000) e São Fidélis (58880001).

APÊNDICE C – LISTA DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

No presente estudo foram utilizados dados das estações meteorológicas do INMET disponíveis na base de dados interna do modelo MGB-IPH, com os códigos: 83007, 83015, 83027, 83032, 83037, 83049, 83075, 83087, 83114, 83639, 83692, 83642, 83685, 83686, 83687, 83688, 83689, 83694, 83695, 83696, 83697, 83698, 83712, 83714, 83718, 83719, 83732, 83736, 83737, 83738, 83741, 83742, 83743, 83744, 83745, 83752, 83754, 83757, 83758, 83760, 83763, 83764, 83765, 83772, 83781, 83782, 83784, 83786, 83788, 83789, 83790, 83791, 83792, 83793, 83796, 83798, 83802, 83805, 83806, 83807, 83809, 83847, 83856 e 83857.

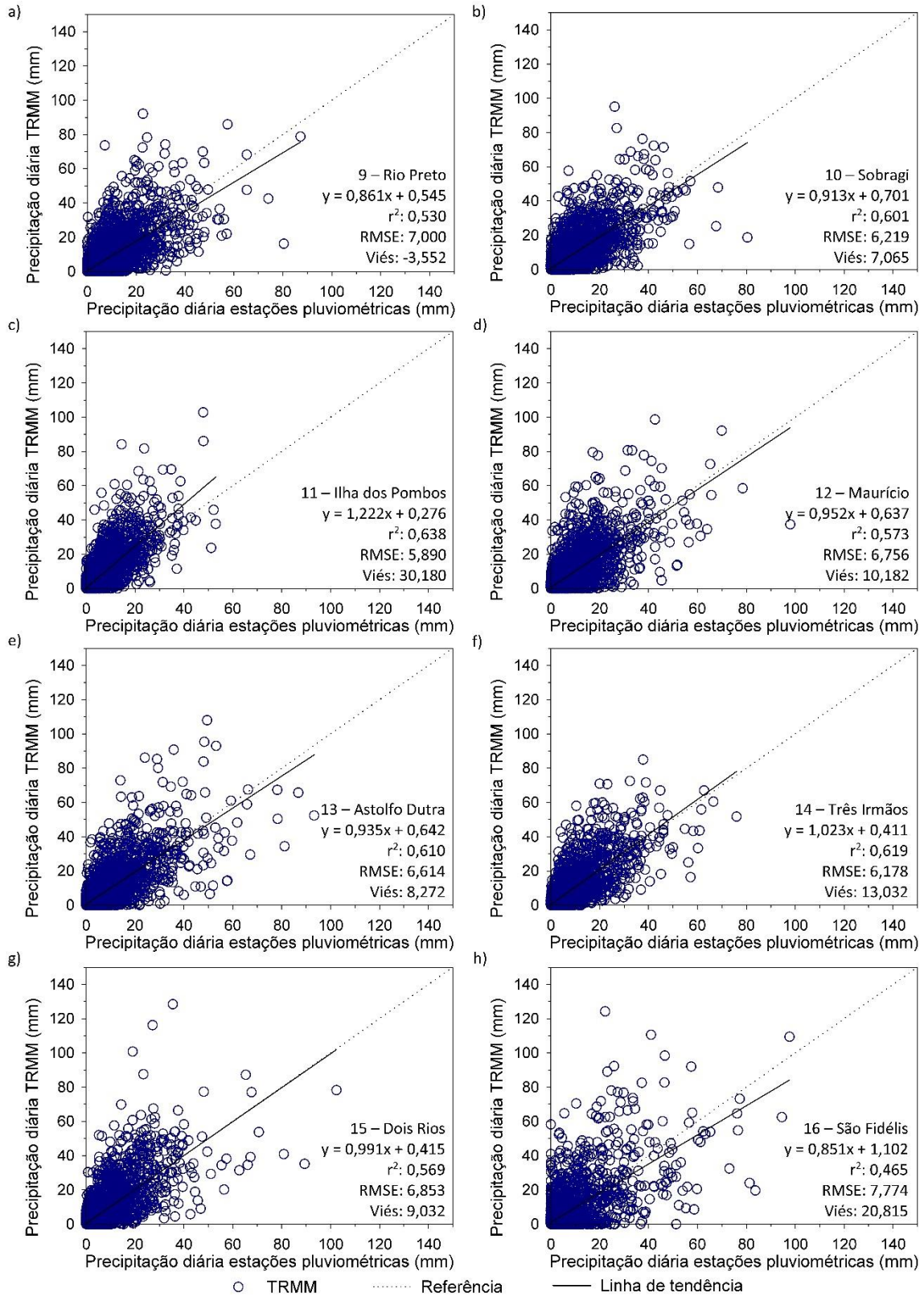
APÊNDICE D – ANÁLISE DE DISPERSÃO DAS PRECIPITAÇÕES

Figura D.1 – Dispersão das precipitações TMPA 3B42V7.



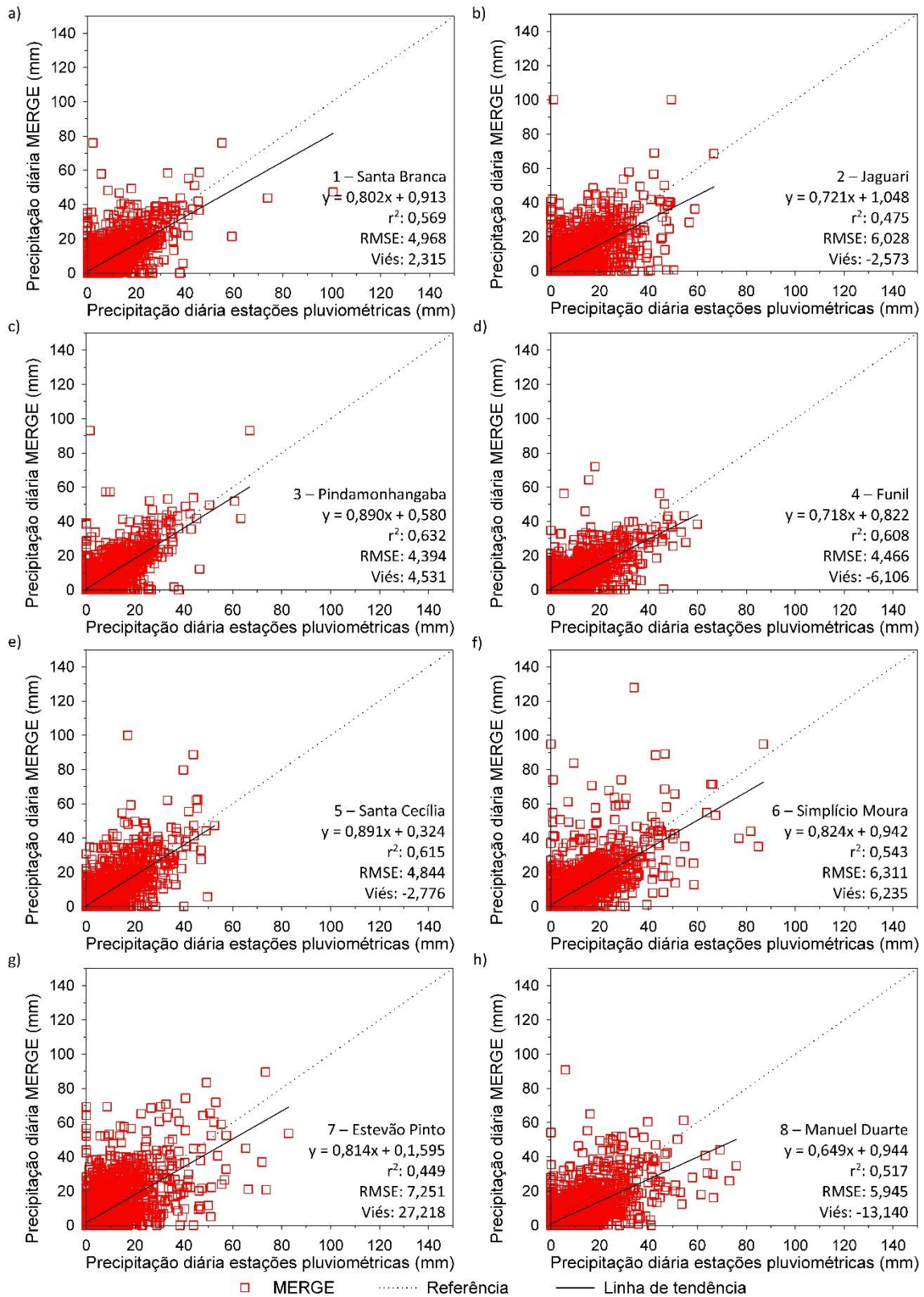
Fonte: Produção do autor.

Figura D.2 – Dispersão das precipitações TMPA 3B42V7.



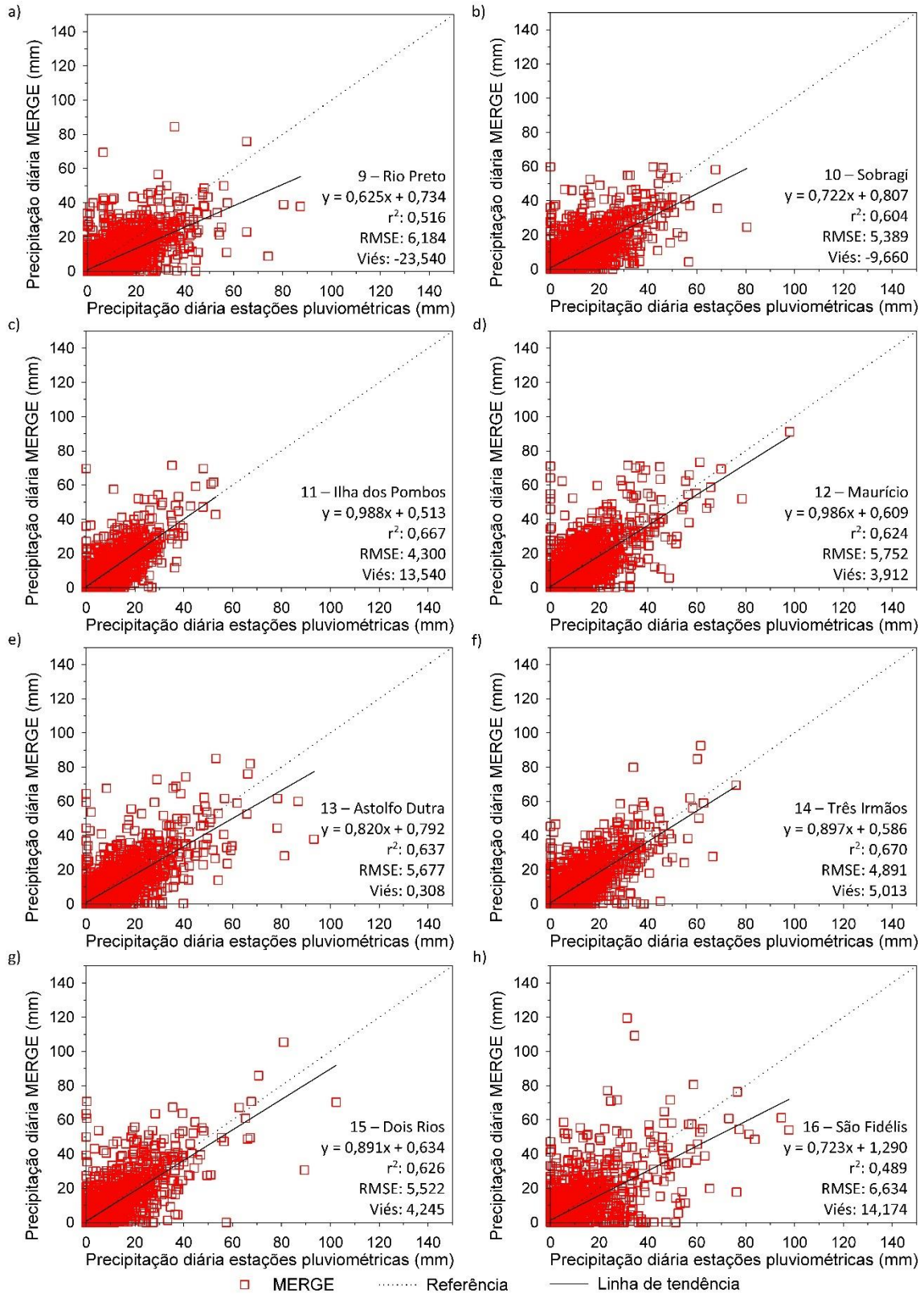
Fonte: Produção do autor.

Figura D.3 – Dispersão das precipitações MERGE.



Fonte: Produção do autor.

Figura D.4 – Dispersão das precipitações MERGE.



Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE E – PORCENTAGEM DAS HRUs NAS SUB-BACIAS

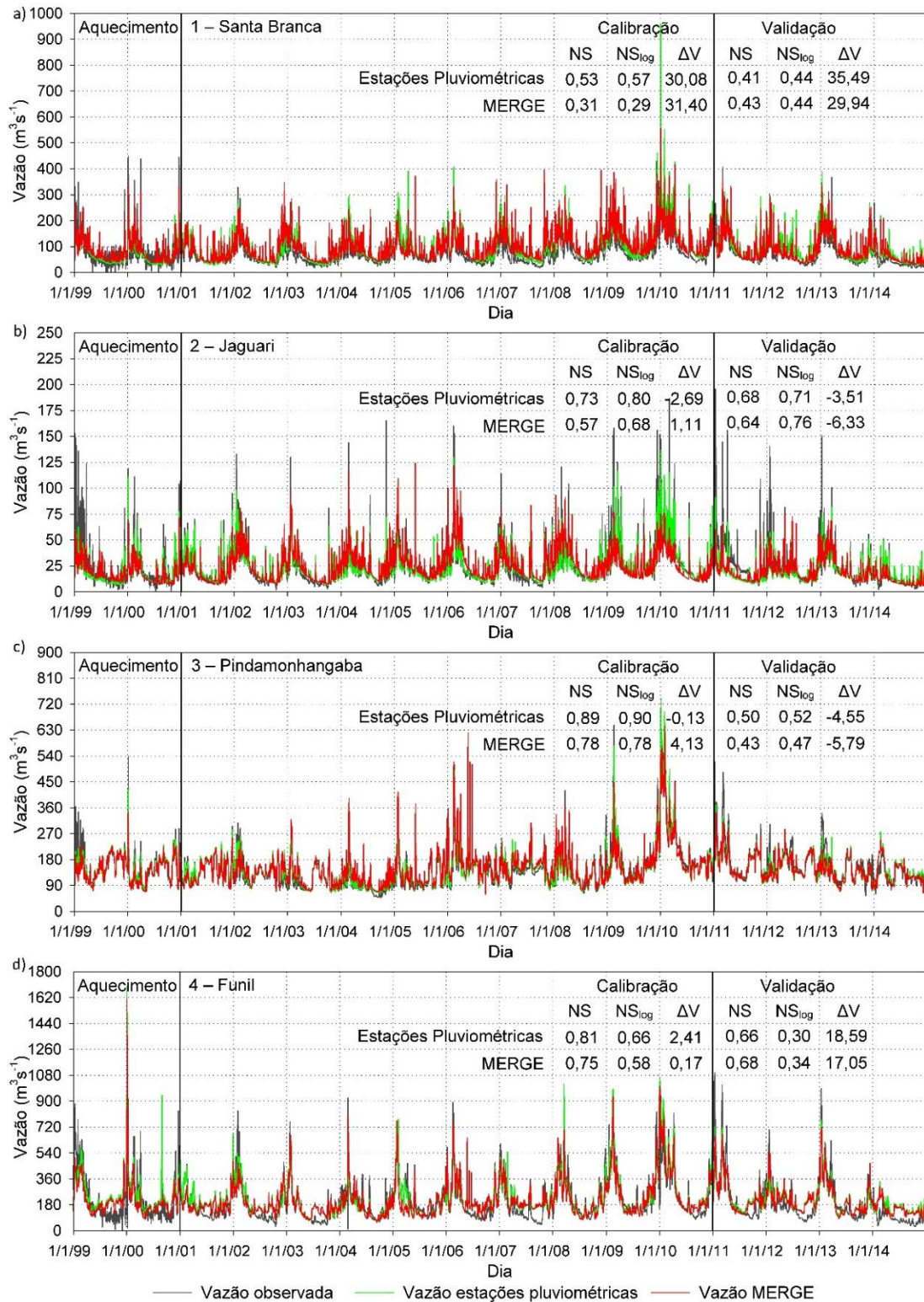
Tabela E.1 – Porcentagem das HRUs nas sub-bacias.

| Sub-bacia | Porcentagem da HRU (%) | | | | | | | | | |
|-----------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|--------|------|--|
| | Floresta/Mal Drenado | Floresta/Bem Drenado | Pastagem/Mal Drenado | Pastagem/Bem Drenado | Agricultura/Mal Drenado | Agricultura/Bem Drenado | Rocha Exposta | Urbano | Água | |
| 1 | 20,64 | 17,99 | 27,33 | 30,57 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,24 | 3,21 | |
| 2 | 3,33 | 43,46 | 1,22 | 47,87 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,91 | 3,17 | |
| 3 | 4,05 | 24,65 | 10,06 | 53,02 | 0,05 | 0,01 | 0,07 | 7,53 | 0,55 | |
| 4 | 16,97 | 14,02 | 14,69 | 50,17 | 0,75 | 0,10 | 0,06 | 2,69 | 0,55 | |
| 5 | 10,66 | 19,26 | 10,34 | 55,96 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 2,88 | 0,84 | |
| 6 | 34,27 | 18,57 | 19,37 | 24,33 | 0,00 | 0,00 | 1,78 | 1,64 | 0,04 | |
| 7 | 0,02 | 17,42 | 0,39 | 81,67 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,47 | 0,02 | |
| 8 | 7,12 | 19,74 | 5,86 | 66,63 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,53 | 0,12 | |
| 9 | 31,51 | 14,75 | 19,19 | 34,38 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,08 | 0,01 | |
| 10 | 9,80 | 21,50 | 14,06 | 52,62 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 1,75 | 0,26 | |
| 11 | 5,27 | 25,62 | 3,84 | 64,21 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,65 | 0,31 | |
| 12 | 4,67 | 15,51 | 11,87 | 67,09 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,53 | 0,26 | |
| 13 | 8,32 | 8,17 | 34,19 | 48,65 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,47 | 0,18 | |
| 14 | 0,69 | 14,14 | 4,21 | 79,97 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,74 | 0,24 | |
| 15 | 20,97 | 13,49 | 19,99 | 43,63 | 0,00 | 0,00 | 1,01 | 0,89 | 0,02 | |
| 16 | 1,70 | 11,23 | 10,42 | 74,44 | 0,00 | 0,00 | 0,12 | 0,61 | 1,49 | |

Fonte: Produção do autor.

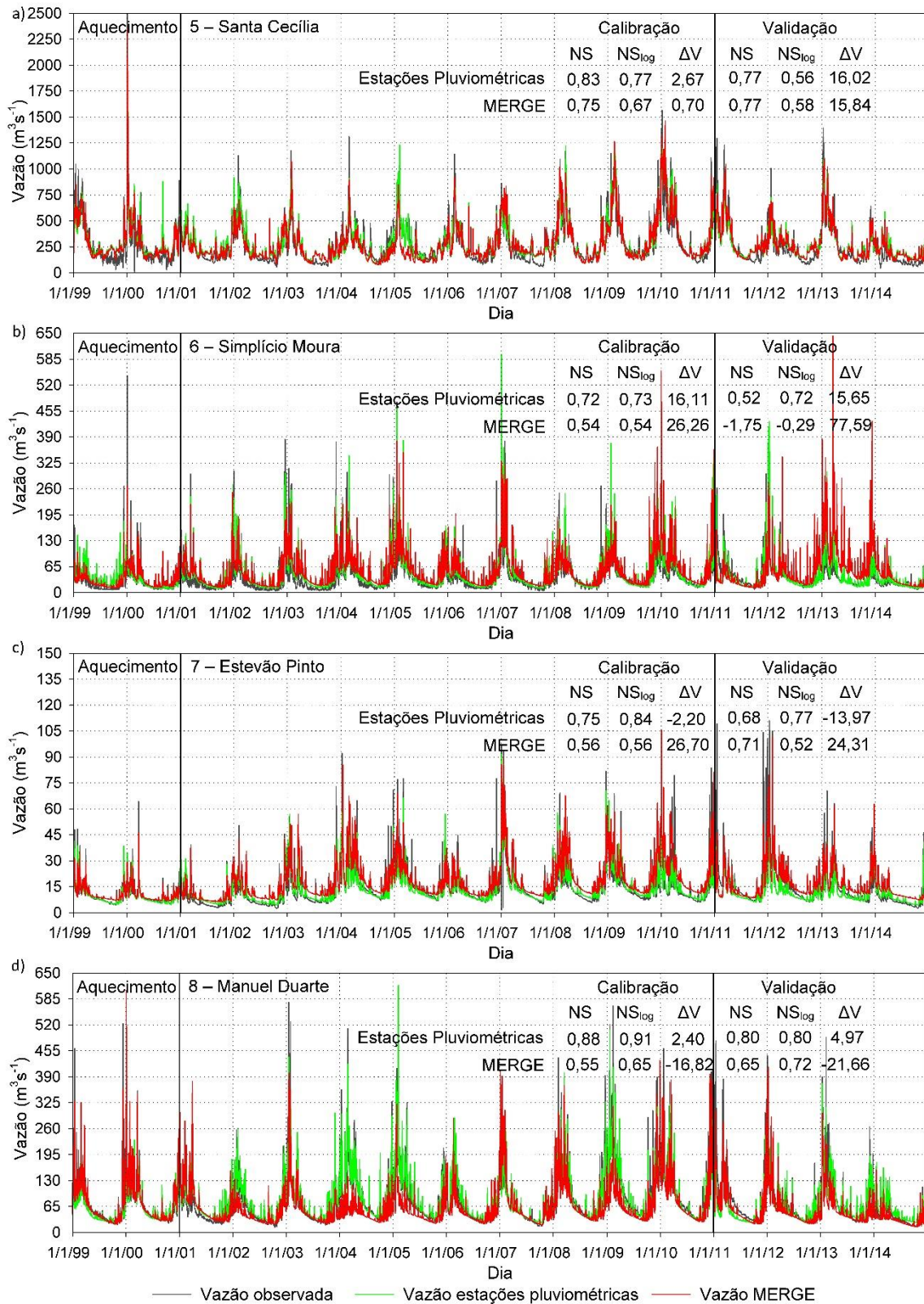
APÊNDICE F – VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS

Figura F.1 – Vazões simuladas e observadas.



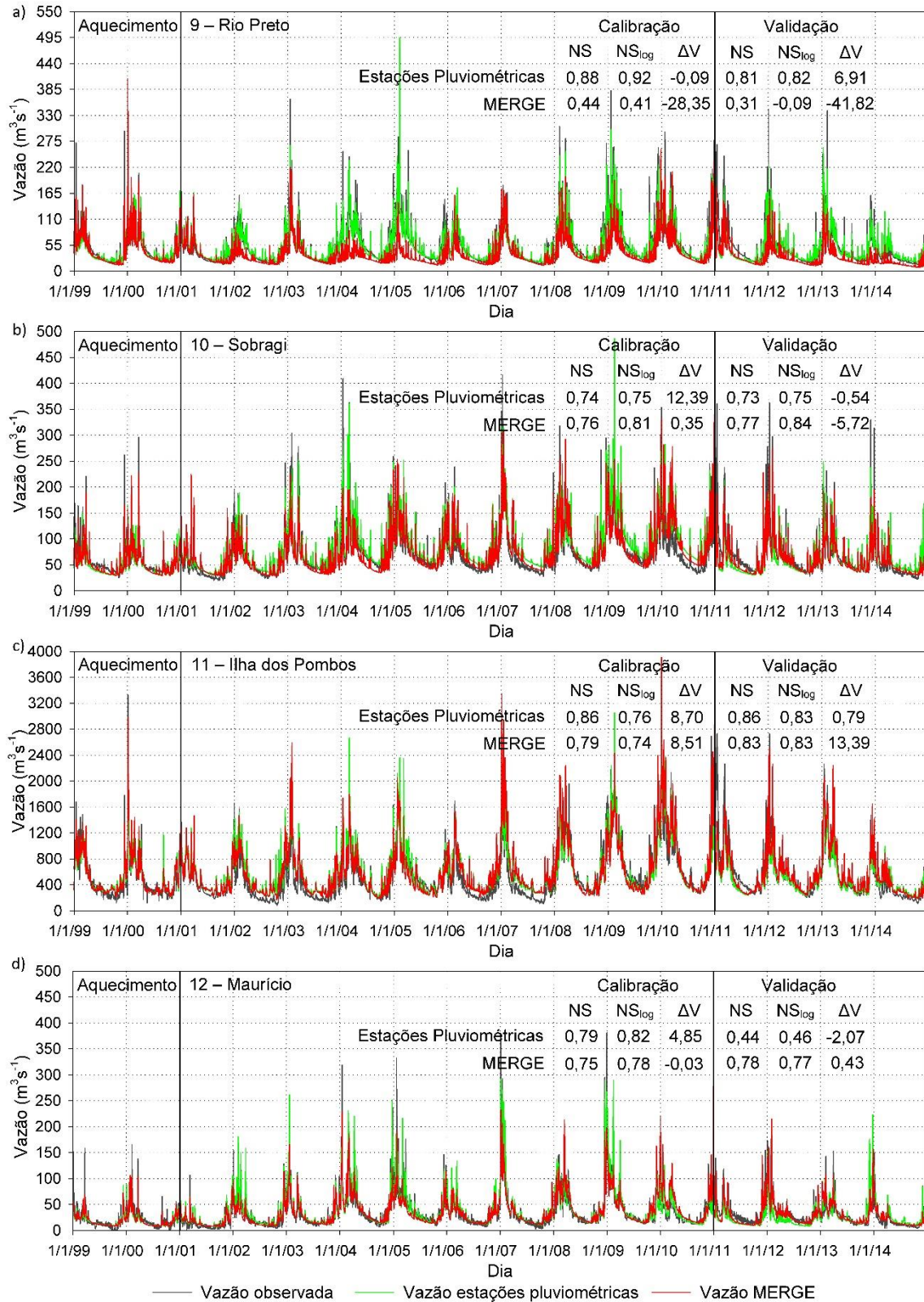
Fonte: Produção do autor.

Figura F.2 – Vazões simuladas e observadas.



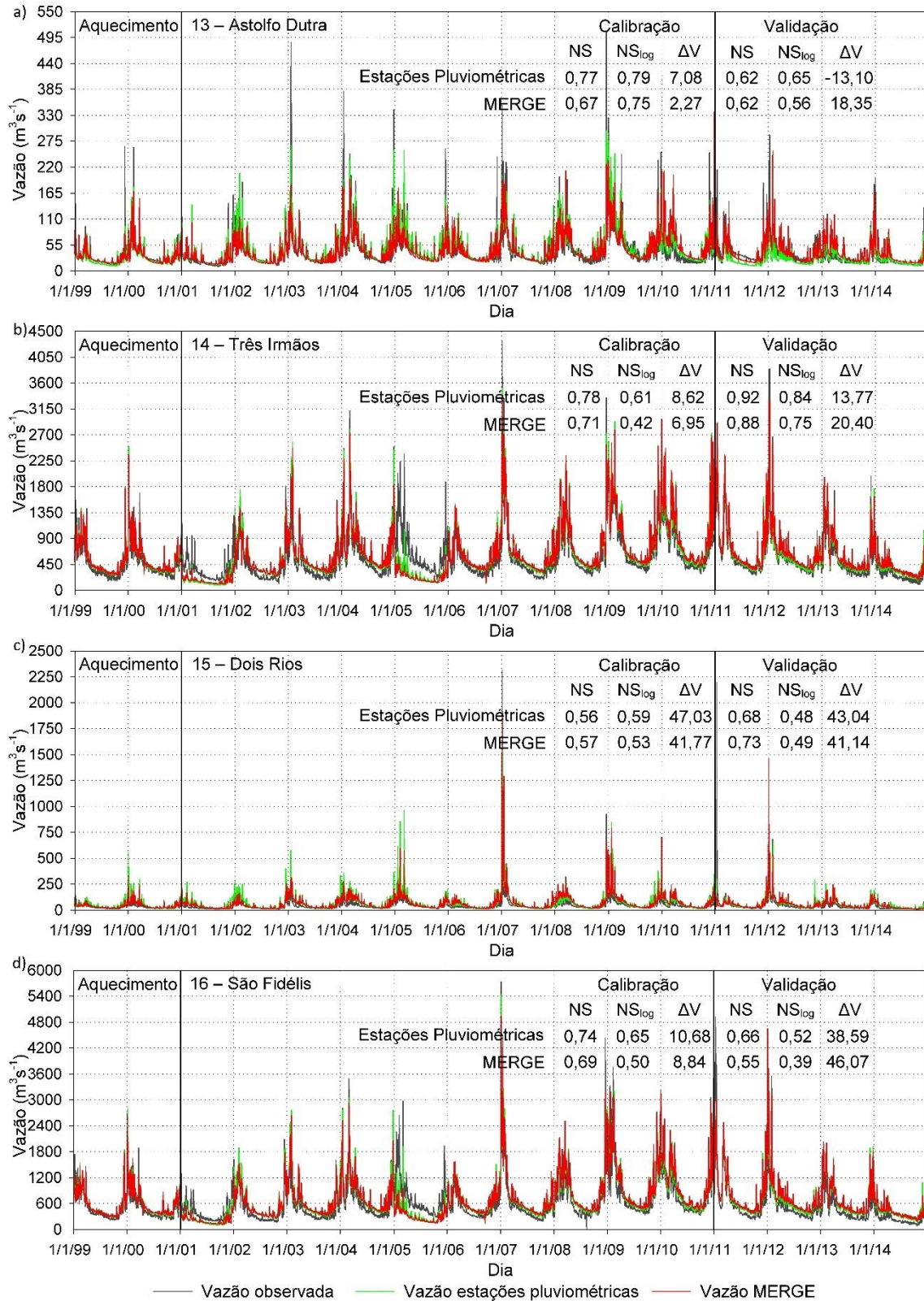
Fonte: Produção do autor.

Figura F.3 – Vazões simuladas e observadas.



Fonte: Produção do autor.

Figura F.4 – Vazões simuladas e observadas.



Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE G – PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO

GAUGE

| Watershed use | 1 | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|----|-----|----|
| Floresta/Mal Drenado | 786 | 0,18 | 0,16 | 32,29 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Floresta/Bem Drenado | 3018,2 | 0,26 | 1,3 | 37,76 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Pastagem/Mal Drenado | 2474,5 | 0,17 | 1,91 | 5,87 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Pastagem/Bem Drenado | 3627,9 | 0,18 | 0,26 | 2,8 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Agricultura/Mal Drenado | 151,1 | 0,52 | 0,42 | 11,44 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - | |
| Rocha Exposta | 77,8 | 0,42 | 2,28 | 15,27 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Urbano | 11,7 | 1,5 | 24,3 | 16,58 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| CS | 25,84 | | | | | | | |
| CI | 133,63 | | | | | | | |
| CB | 7272,39 | | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | | |
| Watershed use | 2 | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 531,9 | 0,09 | 0,15 | 12,88 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Floresta/Bem Drenado | 2382,4 | 0,12 | 0,41 | 7,7 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Pastagem/Mal Drenado | 661,6 | 0,37 | 1,31 | 6,36 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Pastagem/Bem Drenado | 2515,9 | 0,23 | 0,51 | 4,22 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - | |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - | |
| Rocha Exposta | 105,8 | 1,2 | 2,36 | 27,06 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Urbano | 91,1 | 1,15 | 4,81 | 30,6 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| CS | 27,83 | | | | | | | |
| CI | 56,37 | | | | | | | |
| CB | 7365,11 | | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | | |
| Watershed use | 3 | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 588,3 | 0,41 | 0,6 | 8,26 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Floresta/Bem Drenado | 1076,7 | 0,46 | 0,48 | 22,58 | 0,67 | 0 | 0,1 | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|---|-----|
| Pastagem/Mal Drenado | 575,2 | 0,18 | 0,06 | 14,58 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 2666,3 | 0,07 | 0,31 | 0,44 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | 592,4 | 0,08 | 1,28 | 38,03 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Bem Drenado | 1048,4 | 1,64 | 2,32 | 22,68 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Rocha Exposta | 76,9 | 1,37 | 7,86 | 7,96 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 91,8 | 0,16 | 1,04 | 10,88 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 27,93 | | | | | | |
| CI | 58,95 | | | | | | |
| CB | 4415,23 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 4 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 400 | 0,41 | 0,24 | 23,07 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1016,8 | 0,35 | 0,23 | 30,14 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 274,4 | 0,16 | 0,1 | 36,69 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 426,7 | 0,19 | 0,09 | 11,01 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | 786,2 | 0,49 | 0,65 | 7,52 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Bem Drenado | 1131,1 | 1,81 | 5,47 | 24,52 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Rocha Exposta | 43,3 | 0,22 | 1,1 | 22,82 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 58,3 | 0,37 | 0,9 | 5,14 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 20,4 | | | | | | |
| CI | 80,69 | | | | | | |
| CB | 4520,49 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|-------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 5 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 790,2 | 0,18 | 0,07 | 8,38 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 983,9 | 1,5 | 0,43 | 9,69 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 662,9 | 1,2 | 0,6 | 14,62 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 890,2 | 0,25 | 0,09 | 15,51 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 53,4 | 0,7 | 3,79 | 37,17 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 50 | 0,83 | 3,16 | 37,51 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 12,64 | | | | | | |

| | |
|------------|---------|
| CI | 120,13 |
| CB | 3044,47 |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 6 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 502,2 | 0,16 | 0,13 | 5,81 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1885 | 0,84 | 1,33 | 16,09 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 973,4 | 0,19 | 0,61 | 8,88 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 3017,3 | 0,17 | 0,97 | 4,54 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 113,3 | 0,59 | 1,24 | 11,12 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 212,6 | 4,93 | 5,08 | 32,73 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 27,65 | | | | | | |
| CI | 88,26 | | | | | | |
| CB | 6673,05 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 7 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 649,2 | 2,02 | 2,16 | 25,22 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 2383,2 | 0,15 | 0,06 | 3,12 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 222,7 | 1,32 | 2,6 | 30,07 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 613,9 | 0,61 | 3,74 | 8,14 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 25,7 | 1,6 | 4,26 | 35,74 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 153,5 | 0,44 | 4,37 | 27,17 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 52,32 | | | | | | |
| CI | 209,73 | | | | | | |
| CB | 5301,77 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|----------------------|--------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 8 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 548,4 | 0,1 | 0,65 | 34,72 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1477,5 | 0,5 | 1,36 | 4,48 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 637,5 | 0,38 | 1,04 | 23,16 | 0,67 | 0 | 0,1 |

| | | | | | | | |
|-------------------------|--------|------|------|-------|------|---|-----|
| Pastagem/Bem Drenado | 1496,9 | 0,16 | 0,5 | 4,18 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 39,6 | 0,73 | 2,59 | 31,41 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 43 | 1,22 | 2,25 | 16,09 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 20,09 | | | | | | |
| CI | 142,24 | | | | | | |
| CB | 1785,6 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 9 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 1322,7 | 0,15 | 2,73 | 16,74 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1913,2 | 0,28 | 1,34 | 8,01 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 468 | 0,15 | 0,34 | 22,19 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 1342,3 | 0,3 | 3,96 | 18,4 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 17,1 | 0,53 | 2,57 | 14,63 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 55,8 | 0,3 | 1,32 | 34,09 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 16,39 | | | | | | |
| CI | 58,29 | | | | | | |
| CB | 5128,51 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|--------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 10 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 1169,1 | 0,19 | 0,43 | 25,66 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1837,8 | 0,76 | 1,63 | 14,64 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 1995,7 | 0,54 | 1,15 | 4,57 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 4040,4 | 0,03 | 1,89 | 2,99 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 61,3 | 0,34 | 8,27 | 4,65 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 110,5 | 2,76 | 1,44 | 35,37 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 29,77 | | | | | | |
| CI | 176,97 | | | | | | |

CB 5902,71
 QB_M3/SKM2 0,01

| Watershed use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Floresta/Mal Drenado | 428,6 | 0,17 | 0,5 | 18,74 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1039 | 0,19 | 0,08 | 7,55 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 772,8 | 0,8 | 0,84 | 20,57 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 1416,7 | 0,05 | 0,05 | 1,56 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 159,6 | 0,43 | 2,01 | 21,53 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 122,7 | 0,82 | 1 | 8,8 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 13,2 | | | | | | |
| CI | 96,68 | | | | | | |
| CB | 3080,81 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| Watershed use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Floresta/Mal Drenado | 136,8 | 0,26 | 1,69 | 4,97 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 242,3 | 0,13 | 0,29 | 2,69 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 915,9 | 0,09 | 2,64 | 11,03 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 1962,2 | 0,08 | 0,38 | 2,72 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 15,8 | 0,66 | 2,85 | 15,89 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 53,6 | 0,47 | 3,68 | 13,17 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 28,17 | | | | | | |
| CI | 53,07 | | | | | | |
| CB | 6685,19 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| Watershed use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
|----------------------|--------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Floresta/Mal Drenado | 1315,3 | 0,24 | 0,77 | 5,92 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 2410,8 | 0,79 | 0,47 | 16,37 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 1846,8 | 0,27 | 1,07 | 28,59 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 3519 | 0,12 | 0,98 | 0,97 | 0,67 | 0 | 0,1 |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|-------|-------|------|-----|-----|
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 133,2 | 1,05 | 5,57 | 23,36 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 164,1 | 1,34 | 3,11 | 38,28 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 29,16 | | | | | | |
| CI | 64,45 | | | | | | |
| CB | 2893,11 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |
| Watershed use | 14 | | | | | | |
| | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 997,3 | 0,48 | 5,33 | 10,7 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1820,1 | 1,17 | 9,39 | 22,63 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 164,8 | 1,56 | 1,7 | 35,54 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 911 | 1,62 | 13,32 | 37,26 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 107,1 | 1,32 | 4,61 | 34,98 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 58,1 | 1,76 | 4,88 | 69,65 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 22,69 | | | | | | |
| CI | 71,08 | | | | | | |
| CB | 7786,94 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |
| Watershed use | 15 | | | | | | |
| | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 737,6 | 0,11 | 0,39 | 5,14 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1116,3 | 0,26 | 0,5 | 15,95 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 657,8 | 0,12 | 0,5 | 3,88 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 889,2 | 0,05 | 0,41 | 4,43 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 85,1 | 0,38 | 4,19 | 9,25 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 21,2 | 1,18 | 2,81 | 6,74 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 17,87 | | | | | | |
| CI | 59,05 | | | | | | |
| CB | 4587,91 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |
| Watershed | 16 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 227,8 | 1,74 | 0,53 | 13,46 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 326,9 | 0,06 | 0,29 | 4,94 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 385,8 | 0,11 | 0,7 | 59,12 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 622,6 | 0,02 | 0,3 | 4,24 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 127,7 | 1,53 | 2,75 | 32,65 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 50,9 | 0,99 | 2,08 | 9,51 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 12,92 | | | | | | |
| CI | 133,99 | | | | | | |
| CB | 5700,34 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

MERGE

| Watershed use | 1 | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
|-------------------------|---------|------|-------|-------|------|----|-----|----|
| Floresta/Mal Drenado | 777,4 | 0,17 | 0,38 | 36,82 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Floresta/Bem Drenado | 3801,2 | 0,22 | 1,49 | 9,79 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Pastagem/Mal Drenado | 2280,6 | 0,3 | 3,28 | 38,12 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Pastagem/Bem Drenado | 3331,4 | 0,44 | 1,05 | 2,54 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Agricultura/Mal Drenado | 288,4 | 1,47 | 5,94 | 19,8 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - | |
| Rocha Exposta | 76,4 | 1,37 | 5,6 | 25,53 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Urbano | 30,9 | 1,19 | 36,71 | 17,73 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| CS | 28,36 | | | | | | | |
| CI | 164,97 | | | | | | | |
| CB | 6005,28 | | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | | |

| Watershed use | 2 | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|----|-----|----|
| Floresta/Mal Drenado | 241,8 | 0,05 | 0,58 | 7,88 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Floresta/Bem Drenado | 1354,9 | 0,29 | 0,4 | 27,89 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Pastagem/Mal Drenado | 910,9 | 0,49 | 0,2 | 7,87 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Pastagem/Bem Drenado | 2539,3 | 0,11 | 1,45 | 4,08 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - | |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - | |
| Rocha Exposta | 97,7 | 1,3 | 1,11 | 29,35 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Urbano | 65,2 | 0,15 | 4,71 | 23,4 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| CS | 27,96 | | | | | | | |
| CI | 69,15 | | | | | | | |
| CB | 9576,89 | | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | | |

| Watershed use | 3 | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
|-------------------------|--------|------|------|-------|------|----|-----|----|
| Floresta/Mal Drenado | 557,6 | 0,39 | 1,2 | 3,31 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Floresta/Bem Drenado | 994,2 | 0,37 | 0,58 | 24,7 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Pastagem/Mal Drenado | 539,1 | 0,37 | 0,11 | 15,33 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Pastagem/Bem Drenado | 2671,6 | 0,06 | 0,34 | 0,5 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Agricultura/Mal Drenado | 532,3 | 0,05 | 1,91 | 50,3 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Agricultura/Bem Drenado | 1010 | 1,52 | 2,23 | 25,89 | 0,67 | 0 | 0,1 | |
| Rocha Exposta | 76,3 | 1,73 | 7,98 | 1,68 | 0,67 | 0 | 0,1 | |

| | | | | | | | |
|------------|--------|------|------|------|------|---|-----|
| Urbano | 81,7 | 0,13 | 0,52 | 17,3 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 30,93 | | | | | | |
| CI | 52,54 | | | | | | |
| CB | 3362,7 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|-------|--------|------|-----|-----|
| Watershed | 4 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 475,8 | 0,33 | 0,02 | 7,62 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 728,3 | 0,22 | 0,11 | 45,52 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 392,5 | 0,41 | 0,06 | 23,3 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 316,4 | 0,12 | 0,07 | 194,59 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | 423 | 0,24 | 0,38 | 15,6 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Bem Drenado | 1309 | 1,72 | 11,77 | 30,98 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Rocha Exposta | 16,4 | 0,18 | 1,64 | 22,58 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 46,2 | 0,18 | 0,51 | 8,05 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 13,06 | | | | | | |
| CI | 54,94 | | | | | | |
| CB | 1152,68 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|--------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 5 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 832,7 | 0,83 | 0,88 | 21,36 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1883,6 | 1,21 | 0,89 | 7,34 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 414,8 | 0,46 | 1,98 | 28,78 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 463,7 | 0,34 | 0,05 | 31,94 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 36,6 | 0,48 | 3,88 | 36,86 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 107,5 | 0,54 | 2,13 | 28,42 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 8,3 | | | | | | |
| CI | 149,52 | | | | | | |
| CB | 3010,4 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|----------------------|--------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 6 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 738 | 0,14 | 0,14 | 28,86 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1707,6 | 1,24 | 1,32 | 4,28 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 1324,6 | 0,12 | 2,52 | 5,33 | 0,67 | 0 | 0,1 |

| | | | | | | | |
|-------------------------|--------|------|------|-------|------|---|-----|
| Pastagem/Bem Drenado | 2812,8 | 0,12 | 0,83 | 4,55 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 77,2 | 0,79 | 3,32 | 6,2 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 231,3 | 4 | 1,58 | 28,05 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 23,24 | | | | | | |
| CI | 104,09 | | | | | | |
| CB | 4319,5 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 7 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 537,1 | 1,98 | 1,2 | 35,33 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 2115,1 | 0,49 | 1,36 | 16,38 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 515,8 | 1,43 | 0,32 | 29,88 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 966,8 | 0,24 | 2,37 | 4,45 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 15,4 | 1,56 | 2,24 | 11,89 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 88,3 | 0,86 | 4,61 | 27,06 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 49,37 | | | | | | |
| CI | 270,68 | | | | | | |
| CB | 7546,38 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 8 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 223,7 | 0,69 | 4,16 | 37,54 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 325,5 | 0,33 | 5,02 | 10,92 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 189,4 | 1,01 | 4,27 | 37,43 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 312,2 | 1,33 | 4,95 | 36,6 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 57,6 | 1,3 | 2,08 | 18,52 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 89,4 | 1,24 | 3,3 | 16,62 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 19,65 | | | | | | |
| CI | 89,56 | | | | | | |
| CB | 2633,76 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

Watershed 9

| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Floresta/Mal Drenado | 549 | 0,28 | 2,74 | 7,02 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 490,3 | 0,78 | 2,22 | 6,78 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 304 | 0,41 | 2,57 | 10,93 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 439,3 | 0,1 | 3,97 | 22,78 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 14,7 | 0,31 | 1,61 | 18,59 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 29,3 | 0,59 | 5,99 | 14,61 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 19,39 | | | | | | |
| CI | 147,21 | | | | | | |
| CB | 3110,57 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| Watershed | 10 | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 1139,8 | 0,18 | 2,08 | 5,09 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1359 | 1,03 | 0,09 | 36,52 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 1454,8 | 0,21 | 0,2 | 38,93 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 3978,6 | 0,04 | 2,63 | 4,13 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 94 | 0,72 | 0,11 | 23,89 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 44 | 2,48 | 0,47 | 10,3 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 29,77 | | | | | | |
| CI | 59,83 | | | | | | |
| CB | 5420,22 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| Watershed | 11 | | | | | | |
|-------------------------|--------|------|------|-------|------|-----|-----|
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 702 | 0,19 | 0,15 | 13,95 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1429,5 | 0,51 | 0,35 | 9,15 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 335,7 | 1,18 | 1,72 | 16,13 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 781,1 | 0,05 | 0,04 | 4,4 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 117,5 | 0,18 | 3,17 | 14,59 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 106,2 | 0,77 | 1,52 | 10,49 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 19,8 | | | | | | |
| CI | 61,58 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|-------|-------|------|-----|-----|
| CB | 3467,19 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |
| Watershed | 12 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 272,5 | 0,11 | 0,31 | 9,59 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 142,8 | 0,22 | 0,39 | 6,41 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 774,8 | 0,08 | 0,22 | 25,15 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 1923 | 0,07 | 0,95 | 3,31 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 20,9 | 0,99 | 3,1 | 9,85 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 58,2 | 0,36 | 4,26 | 21,93 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 29,95 | | | | | | |
| CI | 54,29 | | | | | | |
| CB | 5019,16 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |
| Watershed | 13 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 832,6 | 0,37 | 3,28 | 15,75 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1244 | 0,74 | 1,38 | 9,17 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 1215,2 | 0,3 | 0,51 | 34,74 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 3392,3 | 0,12 | 1,5 | 1,22 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 146 | 1,2 | 4,08 | 27,99 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 153,3 | 1,02 | 4,83 | 22,59 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 28,75 | | | | | | |
| CI | 135,93 | | | | | | |
| CB | 5803,58 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |
| Watershed | 14 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 397,5 | 0,42 | 5,64 | 10,69 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1843,7 | 0,65 | 6,25 | 24,92 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 248,7 | 0,84 | 2,11 | 26,1 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 786,1 | 0,89 | 23,58 | 10,88 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 69 | 0,69 | 5,97 | 21,58 | 0,67 | 0 | 0,1 |

| | | | | | | | |
|------------|---------|------|------|------|------|---|-----|
| Urbano | 101,2 | 1,06 | 2,78 | 74,9 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 13,32 | | | | | | |
| CI | 140,58 | | | | | | |
| CB | 9740,91 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 15 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 540,4 | 0,08 | 0,16 | 7,4 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 1031,7 | 0,44 | 0,79 | 14,45 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 803,2 | 0,04 | 1,74 | 4,71 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 981,5 | 0,03 | 0,32 | 4,02 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 63,1 | 0,33 | 4,37 | 4,28 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 22 | 1,14 | 3,18 | 4,24 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 19,26 | | | | | | |
| CI | 62,35 | | | | | | |
| CB | 4520,11 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|-------|------|-----|-----|
| Watershed | 16 | | | | | | |
| use | Wm | b | Kbas | Kint | XL | CAP | Wc |
| Floresta/Mal Drenado | 227,8 | 1,74 | 0,53 | 13,46 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Floresta/Bem Drenado | 326,9 | 0,06 | 0,29 | 4,94 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Mal Drenado | 385,8 | 0,11 | 0,7 | 59,12 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Pastagem/Bem Drenado | 622,6 | 0,02 | 0,3 | 4,24 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Agricultura/Mal Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Agricultura/Bem Drenado | - | - | - | - | - | - | - |
| Rocha Exposta | 127,7 | 1,53 | 2,75 | 32,65 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Urbano | 50,9 | 0,99 | 2,08 | 9,51 | 0,67 | 0 | 0,1 |
| Água | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CS | 12,92 | | | | | | |
| CI | 133,99 | | | | | | |
| CB | 5700,34 | | | | | | |
| QB_M3/SKM2 | 0,01 | | | | | | |

