

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS**

**A INTEGRAÇÃO DOS MODELOS WRF E MGB-IPH COMO
SUPORTE À PREVENÇÃO DE INUNDAÇÕES:
UM ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO PARAÍBA DO SUL**

Débora Martins de Oliveira

**Itajubá-MG, Brasil
2025**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS**

Débora Martins de Oliveira

**A INTEGRAÇÃO DOS MODELOS WRF E MGB-IPH COMO
SUPORTE À PREVENÇÃO DE INUNDAÇÕES:
UM ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO PARAÍBA DO SUL**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Área de concentração:

Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientador (a):

Prof.^a Dr.^a Vanessa Silveira Barreto Carvalho

Coorientador:

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

**Itajubá-MG, Brasil
2025**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS**

Débora Martins de Oliveira

**A INTEGRAÇÃO DOS MODELOS WRF E MGB-IPH COMO
SUPORTE À PREVENÇÃO DE INUNDAÇÕES:
UM ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO PARAÍBA DO SUL**

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Vanessa Silveira Barreto Carvalho
Universidade Federal de Itajubá

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva
Universidade Federal de Itajubá

Prof.^a Dr.^a Michelle Simões Reboita
Universidade Federal de Itajubá

Prof.^a Dr.^a Marina Batalini de Macedo
Universidade Federal de Itajubá

Dr.^a Priscila da Cunha Luz
Climatempo

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola
Universidade Federal de Lavras

**Itajubá-MG, Brasil
2025**

*Dedico ao meu marido, Leonardo.
Pelo apoio incondicional e
incentivo nesta jornada.*

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Vanessa Silveira Barreto Carvalho, por todos os ensinamentos, pela confiança e incentivo para a realização deste trabalho; e pelo apoio e atenção ao longo desses anos;

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva, pelo aprendizado, pela disponibilidade e pela atenção dedicada ao desenvolvimento deste estudo;

Aos professores e colegas que participaram do projeto e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho: Prof.^a Dr.^a Michelle Simões Reboita, Bruno de Campos, Vitor Lucas dos Santos Rosa Tenório e Fabiane de Cássia dos Santos, pelo apoio e colaboração ao longo da pesquisa;

Ao meu marido, Leonardo Favarin, por todo o amor, por ser meu porto seguro e meu motivador. Sua presença ao meu lado tornou cada desafio mais leve e cada conquista mais significativa;

Aos meus pais e familiares, pelo suporte e compreensão, essenciais para que eu pudesse concluir este trabalho;

Aos amigos especiais da turma de Ciências Atmosféricas 2011, que continuam presentes em minha vida e pela troca de conhecimento constante;

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, que contribuíram para a minha formação;

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro;

À Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (AGEVAP) pelo apoio financeiro ao projeto.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

*“A maior glória em viver não está
em nunca cair, mas levantarmos
cada vez que caímos”
Nelson Mandela*

ABSTRACT

OLIVEIRA, Débora Martins. **The integration of WRF and MGB-IPH models to support flood prevention: a case study for the Paraíba Do Sul Basin.** 112 f. Doctoral Thesis (Environment and Water Resources Graduate Program) – Institute of Natural Resources, Federal University of Itajubá, Itajubá (Brazil), 2025.

The Paraíba do Sul River Basin (PSRB) stands out in the Brazilian economic scenario, covering a region responsible for approximately 14% of the national GDP and encompassing the states with the highest population density and economic development in the country. However, the PSRB is frequently impacted by extreme precipitation events, resulting in floods and landslides. This study evaluates the integration of the WRF atmospheric and MGB-IPH hydrological models to predict extreme precipitation and flow events, with the aim of optimizing warnings of extreme flood events in the region. To understand the hydrological behavior of the PSRB, historical precipitation and flow series were analyzed, identifying average patterns, trends and extreme events, as well as selecting a critical period for model validation. The atmospheric simulation with WRF was started with data from GFS/NCEP and validated using data from MERGE and rainfall stations, while the MGB-IPH model was adjusted and calibrated to represent the basin. Hydrological simulations were carried out with precipitation data from WRF and GFS, and evaluated with data from fluvimetric stations. The historical analysis revealed that the higher-altitude regions of the PSRB record higher rainfall accumulations, higher flows and a greater frequency of extreme events. Along the Paraíba do Sul River, a negative flow trend was observed, possibly associated with the growing demand for water resources. However, the central region of the PSRB showed an increase in the occurrence of extreme flow events, reinforcing the need for monitoring and flood warnings. The results indicate that WRF simulated the spatial distribution of precipitation with greater consistency, but underestimated extreme events in some areas. The hydrological simulations showed that integrating the WRF with the MGB-IPH improved the flow forecast, reducing errors and better capturing flood peaks compared to the GFS, standing out as a promising tool for hydrological monitoring and forecasting with a focus on mitigating the damage caused by floods.

Keywords: Extreme Precipitation, Streamflow, Model Evaluation, Atmospheric and hydrological modeling.

RESUMO

OLIVEIRA, Débora Martins. **A integração dos modelos WRF e MGB-IPH como suporte à prevenção de inundações: um estudo de caso para a Bacia do Paraíba Do Sul.** 112 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá (Brasil), 2025.

A Bacia do Rio Paraíba do Sul (BRPS) se destaca no cenário econômico brasileiro, abrangendo uma região responsável por aproximadamente 14% do PIB nacional e englobando os estados com maior densidade populacional e desenvolvimento econômico do país. No entanto, a BRPS é frequentemente impactada por eventos extremos de precipitação, resultando em inundações e deslizamentos. Este estudo avalia a integração dos modelos atmosférico WRF e hidrológico MGB-IPH para prever eventos extremos de precipitação e vazão, visando otimizar alertas de eventos extremos de inundação na região. Para compreender o comportamento hidrológico da BRPS, foram analisadas séries históricas de precipitação e vazão 1939 a 2020, identificando padrões médios, tendências e eventos extremos, além da seleção de um mês (fevereiro/2020) com chuvas intensas para validação dos modelos. A simulação atmosférica com o WRF foi iniciada com dados do GFS/NCEP e validada utilizando dados do MERGE e de estações pluviométricas, enquanto o modelo MGB-IPH foi ajustado e calibrado para representar a bacia. Foram realizadas simulações hidrológicas com dados de precipitação do WRF e GFS, e avaliadas com os dados de estações fluviométricas. A análise histórica revelou que as regiões de maior altitude da BRPS registram maiores acumulados de chuva, vazões específicas mais elevadas e maior frequência de eventos extremos. Ao longo do Rio Paraíba do Sul, observou-se uma tendência negativa de vazão, possivelmente associada à crescente demanda por recursos hídricos. No entanto, a região central da BRPS apresentou aumento na ocorrência de eventos extremos de vazão, reforçando a necessidade de monitoramento e alertas para inundações. Os resultados indicam que o WRF simulou a distribuição espacial da precipitação com maior coerência, mas subestimou eventos extremos em algumas áreas. Já as simulações hidrológicas demonstraram que a integração do WRF com o MGB-IPH melhorou a previsão das vazões, reduzindo erros e capturando melhor os picos de cheia em comparação ao GFS, destacando-se como uma ferramenta promissora para o monitoramento e previsão hidrológica com foco na mitigação dos danos causados pelas de inundações.

Palavras-chave: Precipitação extrema, vazão, avaliação de modelos, modelagem atmosférica e hidrológica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma ilustrando as etapas da integração entre os modelos WRF e MGB-IPH, utilizado para previsão de eventos extremos na BRPS _____	23
Figura 2 - Localização da BRPS no Brasil (esquerda) e sua distribuição topográfica, destacando as estações pluviométricas e fluviométricas (direita) _____	25
Figura 3 - Representação dos domínios externo (d01) e interno (d02) do modelo WRF utilizados no estudo. Os contornos vermelhos indicam os limites da bacia do PRSB (Fonte: De Campos, 2023). _____	30
Figura 4 - Fluxograma de Aplicação do Modelo MGB-IPH _____	32
Figura 5 - Mapa com a localização dos 53 postos fluviométricos utilizados na calibração do modelo MGB-IPH na BRPS. Para detalhes específicos de cada posto, consultar a Tabela 2 (Fonte: Santos, 2024) _____	34
Figura 6 - Mapa da distribuição das usinas hidrelétricas na BRPS. Informações detalhadas sobre cada usina estão na Tabela 3 (Fonte: Santos, 2024) _____	36
Figura 7 - Subdivisão da BRPS em 2.582 mini-bacias e 53 sub-bacias, com delimitação baseada no Modelo Digital de Elevação (MDE) e informações de drenagem (Fonte: Santos, 2024) _____	38
Figura 8 - Distribuição da precipitação: (a) Média mensal e desvio padrão; (b) <i>Boxplot</i> dos totais anuais; (c) Distribuição espacial da precipitação registrada nas estações pluviométricas (pontos vermelhos). _____	45
Figura 9 - Distribuição espacial dos limiares de precipitação extrema a) p95 e b) p99 [mm] para a estação seca, e c) p95 e d) p99 para a estação chuvosa. Os pontos vermelhos indicam a localização das estações de chuva. _____	46
Figura 10 - Tendência dos totais mensais de precipitação nas estações de chuva de 1939 a 2020 considerando a) estação seca e b) estação chuvosa. _____	47
Figura 11 - Tendência no número de dias acima dos limiares a) p95 e b) p99 durante a estação seca, e c) limiares p95 e d) p99 durante a estação chuvosa. _____	48
Figura 12 - Distribuição espacial das taxas médias mensais de vazão específica registradas nas estações de fluviométricas entre 1939 e 2020. _____	49
Figura 13 - Distribuição espacial dos valores extremos de vazão específica [L/s/km ²] para a estação seca nos percentis a) p95 e b) p99, e para a estação chuvosa nos percentis c) p95 e d) p99. _____	50

Figura 14 - Tendência das taxas médias mensais de vazão específica nas estações de fluviométricas de 1939 a 2020 para a estação a) seca e b) chuvosa. _____	51
Figura 15 - Tendência da ocorrência de eventos de taxas extremas de vazão específica nas estações de fluviométricas acima dos limiares percentuais a) p95 e b) p99 durante a estação seca, e acima dos limiares percentuais c) p95 e d) p99 durante a estação chuvosa. ____	53
Figura 16 - a) População na BRPS de 1940 a 2010 (IBGE, 2010) e b) área urbana [km ²] de 1985 a 2021 (MAPBIOMAS, 2021). _____	54
Figura 17 - Área urbana (em vermelho) da BRPS em a) 1985 e b) 2021. A linha azul indica o curso do Rio Paraíba do Sul. _____	54
Figura 18 - Demanda hídrica [m ³ /s] na BRPS, capturando a quantidade de água retirada e consumida, sem retorno direto para o corpo d'água, em: a) 1940, b) 1980, c) 2020 e d) 2040 (prognóstico). _____	55
Figura 19 - Registro fotográfico dos impactos causados pelos eventos extremos de precipitação na BRPS durante fevereiro de 2020. As imagens foram extraídas de reportagens jornalísticas e ilustram enchentes, deslizamentos de terra e danos à infraestrutura. _____	58
Figura 20 - Localização das estações pluviométricas na BRPS que registraram eventos extremos de precipitação durante fevereiro de 2020. As estações estão organizadas em três regiões da bacia: a Região 1 cobre o norte e nordeste da bacia; a Região 2 abrange a porção central e serrana do Rio de Janeiro; e a Região 3 concentra as áreas do centro-sul da bacia. _____	61
Figura 21 - Cartas sinóticas (Fonte: CPTEC/INPE) e imagens de satélite do canal 13 (10.35 μ) do Goes 16 (Fonte: DSA/INPE) para caracterizar os dias 3, 13 e 28 de fevereiro de 2020. _____	63
Figura 22 - Anomalia de precipitação no Brasil para fevereiro de 2020. (Fonte: CPTEC/INPE) _____	64
Figura 23 - Precipitação total acumulada para o mês de fevereiro de 2020: a) Dados do MERGE e b) Simulação com o Modelo WRF e c) Simulação com o Modelo GFS ____	66
Figura 24 - Precipitação Acumulada em 24h para os dias 02, 03, 04 e 05 de fevereiro de 2020: Dados do MERGE, simulação do modelo WRF e simulação com o Modelo GFS na grade 2. _____	67
Figura 25 - Precipitação Acumulada em 24h para os dias 10, 11, 12 e 13 de fevereiro de 2020: Dados do MERGE, simulação do modelo WRF e simulação com o Modelo GFS na grade 2. _____	68

Figura 26 - Precipitação Acumulada em 24h para os dias 25, 26, 27 e 28 de fevereiro de 2020: Dados do MERGE, simulação do modelo WRF e simulação com o Modelo GFS na grade 2. _____	69
Figura 27 - Gráfico comparativo da precipitação diária e acumulado mensal das Estações Pluviométricas: Carangola, Itaperuna, Cardoso Moreira, Dois Rios, Cataguases, Astolfo Dutra e Fazenda Umbaubas, e simulada pelos modelos WRF e GFS. _____	72
Figura 28 - Gráfico comparativo da Precipitação Diária e acumulado mensal das Estações Pluviométricas: Anta, Fazenda Sobradinho, Fazenda Mendes, Itamarati, Fagundes e Areal, e simulada pelos modelos WRF e GFS. _____	73
Figura 29 - Gráfico comparativo da Precipitação Diária e acumulado mensal das Estações Pluviométricas: Fazenda São Gabriel, Conservatoria, Ribeirão São Joaquim, Fazenda Santa Clara, Caçapava, Fazenda Agulhas Negras e Fumaça, e simulada pelos modelos WRF e GFS. _____	74
Figura 30 - Divisão das 53 sub-bacias na área de estudo, mostrando a rede hidrográfica principal do Rio Paraíba do Sul (em azul) e seus principais afluentes. Ao fundo, utiliza-se uma imagem de satélite para localização geográfica da bacia e identificação das principais cidades na região. _____	75
Figura 31 - <i>Boxplots</i> comparando os coeficientes de ajuste antes e depois da calibração do modelo MGB-IPH. (a) NS, (b) NSlog e (c) ΔV . As faixas coloridas indicam níveis de desempenho: satisfatório (vermelho), bom (laranja) e muito bom (verde). _____	76
Figura 32 - Classificação das Sub-bacias em relação ao Coeficiente de ajuste NS após a calibração do modelo MGB-IPH. As cores indicam o desempenho do ajuste, variando de valores mais baixos (vermelho) para valores mais altos (verde), onde maiores valores representam melhor ajuste entre os valores simulados e observados. _____	78
Figura 33 - Hidrogramas pós-calibração do modelo MGB-IPH para o período de 2010 a 2020 na Região 1, comparando os valores simulados usando a precipitação do produto MERGE com os valores observados. A figura apresenta as sub-bacias 40, 42, 45, 46, 51 e 52. _____	80
Figura 34 - Hidrogramas pós-calibração do modelo MGB-IPH para o período de 2010 a 2020 na Região 2, comparando os valores simulados usando a precipitação do produto MERGE com os valores observados. A figura apresenta as sub-bacias 19, 20, 21, 22, 34, 43 e 44. _____	81
Figura 35 - Hidrogramas pós-calibração do modelo MGB-IPH para o período de 2010 a 2020 na Região 3, comparando os valores simulados usando a precipitação do produto	

MERGE com os valores observados. A figura apresenta as sub-bacias 9, 12, 13, 24, 25, 26 e 27	82
Figura 36 - Mapas com as estatísticas de ajuste do modelo MGB-IPH para as 53 sub-bacias da área de estudo, utilizando as métricas: (a) NS; (b) NSlog; e (c) ΔV . As cores indicam o modelo com melhor desempenho em cada sub-bacia.	84
Figura 37 - Mapas com as estatísticas da vazão simulada pelo modelo MGB-IPH com os dados dos modelos WRF, GFS e os dados observados para as 53 sub-bacias da área de estudo, utilizando as métricas: (a) EMA; (b) REQM; e (c) PBIAS. As cores indicam o modelo com melhor desempenho em cada sub-bacia.	86
Figura 38 - Hidrogramas simulados pelo modelo MGB-IPH para fevereiro de 2020 utilizando com os dados dos modelos WRF e GFS, do produto MERGE usado na calibração e comparados aos valores observados para a Região 1. A figura apresenta as sub-bacias 40, 42, 45, 46, 51 e 52.	89
Figura 39 - Hidrogramas simulados pelo modelo MGB-IPH para fevereiro de 2020 utilizando com os dados dos modelos WRF e GFS, do produto MERGE usado na calibração e comparados aos valores observados para a Região 2. A figura apresenta as sub-bacias 19, 20, 21, 22, 34, 43 e 44.	90
Figura 40 - Hidrogramas simulados pelo modelo MGB-IPH para fevereiro de 2020 utilizando com os dados dos modelos WRF e GFS, do produto MERGE usado na calibração e comparados aos valores observados para a Região 2. A figura apresenta as sub-bacias 9, 12, 13, 24, 25, 26 e 27.	91
Figura 41 - Fluxograma representando a operacionalização da integração do modelo atmosférico WRF com o modelo hidrológico MGB-IPH para a previsão de vazões na BRPS.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configurações das parametrizações usadas nas simulações com o modelo WRF	30
Tabela 2 - Lista dos postos fluviométricos utilizados para a aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na BRPS.	34
Tabela 3 - Usinas Hidrelétricas na BRPS (CEIVAP, 2020)	36
Tabela 4 - Parâmetros Calibráveis do MGB-IPH (Manual MGB-IPH, 2018)	40
Tabela 5 - Registro de eventos extremos de precipitação nas estações pluviométricas da BRPS durante o mês de fevereiro de 2020	59

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA: Agência Nacional de Águas

ASAS: Anticiclone Subtropical da América do Sul

BRPS: Bacia do Rio Paraíba do Sul

CEIVAP: Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul

CPTEC: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DJF: Dezembro, Janeiro, Fevereiro (Verão Austral)

ECMWF: *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

ETA: Modelo atmosférico de previsão numérica do tempo

GEFS: *Global Ensemble Forecast System*

GFS: *Global Forecast System*

HRES: *High Resolution Forecast Model*

IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW: *Inverse Distance Weighted* (Ponderação do Inverso da Distância)

IMERG: *Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM (Global Precipitation Measurement)*

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

JBN: Jatos de Baixos Níveis

JJA: Junho, Julho, Agosto (Inverno Austral)

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

MK: Mann-Kendall (Teste de Tendência)

NOMADS: *NOAA Operational Model Archive and Distribution System*

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration*

OMM: Organização Meteorológica Mundial

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico

p95: Percentil 95

p99: Percentil 99

SIN: Sistema Interligado Nacional

SMAS: Sistema de Monção da América do Sul

SPEHC: Sistema de Previsão de Eventos Hidrológicos Críticos

TOPMODEL: *Topography-based Hydrological Model*

WRF: *Weather Research and Forecasting* (Modelo de Pesquisa e Previsão do Tempo)

ZCAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul

LISTA DE SIMBOLOS

α : Nível de significância

β : Parâmetro de ajuste do modelo hidrológico

ΔH : Variação de altura da coluna d'água

ΔV : Erro Relativo de Volume

EAM: Erro Médio Absoluto

L/s/km²: Litros por segundo por quilômetro quadrado

mm: Milímetros

NS: Eficiência de Nash-Sutcliffe

NSlog: Eficiência Nash-Sutcliffe logarítmica

PBIAS: Erro Percentual Médio

Q: Vazão (m³/s)

R²: Coeficiente de determinação estatística

REQM: Raiz do Erro Quadrático Médio

S: Coeficiente de Mann-Kendall

X_i, X_j: Valores de séries temporais

Z: Índice de distribuição normal

θ : Ângulo de inclinação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	21
2. MATERIAL E MÉTODOS	22
2.1 ÁREA DE ESTUDO	23
2.2 ANÁLISE DAS SÉRIES HISTÓRICAS DE PRECIPITAÇÃO E VAZÃO	25
2.2.1 O Comportamento Médio e a Identificação de Extremos	26
2.2.2 Cálculo da Tendência	26
2.2.3 Influência do crescimento urbano na vazão da BRPS	27
2.3 INTEGRAÇÃO DOS MODELOS ATMOSFÉRICO WRF E HIDROLÓGICO MGB-IPH	28
2.3.1 Simulação da Precipitação com o Modelo WRF	29
2.3.2 Aplicação do Modelo MGB-IPH	31
3. RESULTADOS	43
3.1 COMPORTAMENTO MÉDIO, EXTREMOS E TENDÊNCIA DA BRPS	43
3.2.1 Análise da Precipitação	43
3.2.2 Análise da Vazão	49
3.2.3 Análise da influência urbana no padrão de vazão	53
3.2 SELEÇÃO DO PERÍODO DE TESTE	57
3.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO WRF	65
3.4 AVALIAÇÃO DAS SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS	75
4. CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS	95
ANEXOS	107

1. INTRODUÇÃO

Mesmo o cenário mais otimista do Sexto Relatório de Avaliação de Mudanças Climáticas (AR6-WGI) do IPCC indica um aumento de pelo menos 1,5°C na temperatura média global até 2030 (IPCC, 2021). Esse aumento deverá levar a mudanças no regime hidrológico em escala global e local. Consequentemente, o aumento da frequência de eventos extremos hidrológicos e de precipitação, como secas prolongadas ou enchentes, promoverá alterações na disponibilidade hídrica de uma determinada região e poderá afetar a qualidade de vida das populações (GOMES et al., 2021; FISCH et al., 2017; MARENGO; VALVERDE, 2007). Portanto, o planejamento e a gestão dos recursos hídricos são essenciais para garantir a sustentabilidade no futuro próximo. Como a água é considerada um recurso com disponibilidade limitada, a avaliação do comportamento médio e de anomalias no regime de precipitação e nas vazões registradas nos rios e corpos d'água é fundamental para o planejamento adequado do uso da água.

Além disso, evidências do aumento na frequência de eventos extremos de precipitação têm sido relatadas na literatura para diversas regiões do globo (TABARI, 2020; O'GORMAN, 2015; WILCOX et al., 2018; CHUG et al., 2020). Para o Brasil, Silva Dias et al. (2012), utilizando dados de 1933 a 2010, encontraram tendências crescentes de valores extremos de precipitação para a cidade de São Paulo, atribuídas não apenas a fatores climáticos, mas também ao crescimento da ilha de calor urbana e ao papel da poluição do ar na microfísica das nuvens. Abou Rafee et al. (2020) analisaram eventos extremos de precipitação na Bacia do Rio Paraná e observaram tendências positivas na porção sul e negativas na região norte-noroeste.

Costa et al. (2020) estudaram o Nordeste do Brasil entre 1961 e 2014, identificando um aumento significativo de dias secos e chuvosos consecutivos, intensificando o perfil sazonal, com estações secas mais áridas e chuvosas mais úmidas. Já Regoto et al. (2021) observaram tendências de um clima mais seco no Nordeste, mais úmido no Sul e ausência de mudanças claras nas demais regiões, baseando-se em dados de 1961 a 2018 provenientes de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas (ANA). Esses estudos reforçam a variabilidade regional dos eventos extremos de precipitação no Brasil e sua relevância para a gestão hídrica.

Estudos específicos abordam tendências de chuva e vazão em diferentes regiões. Vilanova (2014) analisou séries de estações fluviométricas e pluviométricas de 1973 a 2006 no Alto Rio Mogi-Guaçu, sul de Minas Gerais, identificando tendências de redução de chuva e vazão. Por outro lado, Groppo et al. (2005), Mortatti et al. (2004) e Oliveira et al. (2021)

verificaram tendências positivas de vazão em bacias de São Paulo, como os rios Tietê (1965-1996) e Piracicaba (1944-1997), e no Rio Branco, no Acre (1970-2018). Além disso, Groppo et al. (2005) e Oliveira et al. (2021) também registraram aumento da precipitação nas mesmas bacias.

Já para a bacia do Rio São Francisco, França et al. (2021), com dados de 2001 a 2013, relacionaram as tendências da vazão com as mudanças ocorridas no uso do solo e concluíram que 11 das 18 estações fluviométricas consideradas indicaram a diminuição da vazão ao longo dos anos, o que pode ser relacionado à elevada presença de atividades de irrigação na bacia. Logo, devido à dimensão continental do Brasil, não é possível inferir um único padrão quando analisadas as tendências de precipitação e vazão em diferentes regiões, o que justifica a análise para regiões específicas.

Nesse contexto, no Brasil, a Bacia do Rio Paraíba do Sul (BRPS) se destaca no cenário econômico e possui uma relevância estratégica no cenário nacional uma vez que compreende os estados com maior densidade populacional e desenvolvimento econômico do país (São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais), sendo responsável por grande parte do abastecimento público de água da região (DEMANBORO, 2015). De acordo com a ANA (2019), a demanda por água na BRPS, oriunda de diversas atividades socioeconômicas e de sucessivas transformações devido ao desenvolvimento urbano-industrial da região, deverá crescer cerca de 24% entre 2019 e 2029. Destaca-se na região o uso da água associado à geração de energia hidrelétrica, ao consumo por atividades como indústria, agricultura, mineração e pesca, e ao abastecimento urbano, responsável pelo atendimento de cerca de 14 milhões de pessoas (CALVALCANTI; MARQUES, 2016).

Vale destacar que Marengo e Alves (2005) analisaram tendências de precipitação e vazões médias mensais na BRPS entre 1920 e 2000 e não encontraram tendências positivas ou negativas significativas nas séries de precipitação; entretanto, a série de vazões apresentou tendências negativas durante os últimos 50 anos que não parecem estar associadas a variações nas chuvas na bacia. Os autores concluíram que as tendências negativas no fluxo sugerem um possível impacto da influência humana (na forma de gestão dos recursos hídricos, geração de energia, lançamento de esgoto no rio, irrigação e crescimento populacional).

Santana et al. (2020) utilizaram o teste estatístico de Mann-Kendall (MK) para detectar tendências significativas na BRPS em dados de precipitação de 92 postos pluviométricos de 1970 a 2018 e concluíram que o regime pluviométrico na bacia vem sofrendo alterações em uma escala local, com regiões que apresentaram tendência significativa negativa, enquanto outras apresentaram tendência significativa positiva de precipitação. Gomes et al. (2021)

também calcularam a tendência, a partir do teste de MK, em dados de precipitação de 86 estações pluviométricas localizadas na BRPS durante o período de 1988 à 2018 e também concluíram que cerca de 20,9% das estações apresentaram tendências significativas de acréscimo na estação chuvosa e 22,9% de tendências significativas de decréscimo na estação seca.

Em relação à ocorrência de extremos positivos e negativos de precipitação na região, destaca-se que, entre 2014 e 2017, a BRPS registrou déficits pluviométricos severos, levando a condições de seca com impactos na disponibilidade de água para abastecimento humano, geração hidrelétrica, indústria e agricultura (DA COSTA et al., 2018). Vasconcelos et al. (2019) evidenciaram que esse evento de seca gerou uma crise hídrica com significativos impactos em usuários dos rios Paraíba do Sul e Guandu, enquanto Neves e Vilanova (2021) reforçam que a seca ocorrida entre 2013 e 2014 foi também um período crítico no que diz respeito à redução da chuva regional, o que impactou o armazenamento e a capacidade de regularização do principal reservatório da região, o Reservatório de Paraibuna.

No outro extremo, são comuns na região da BRPS eventos de chuvas fortes. Os impactos desses eventos vão desde de inundações urbanas, deslizamentos de terra e danos à infraestrutura, afetando diretamente áreas habitadas e a economia local. Mendonça et al. (2012), por exemplo, identificaram, por meio de imagens de sensoriamento remoto, as áreas atingidas pelas inundações ocorridas no período do verão de 2008/2009 na região Norte Fluminense, Rio de Janeiro, e identificaram um aumento em 2,61 vezes da área de corpos d'água, o que resultou em graves danos à infraestrutura e à economia local. Brasiliense (2016) estudou um episódio de chuvas intensas ocorridas em janeiro de 2000 na BRPS que acumulou quase 50% do volume de precipitação esperado para todo o mês e foi responsável por deslizamentos de terra, interrupções no transporte e inundações que afetaram severamente a população urbana e rural. Os eventos relatados por estes estudos reforçam a importância do planejamento da operação do Sistema Hidráulico da BRPS, bem como a análise e previsão de extremos positivos ou negativos de precipitação e vazão.

Logo, a utilização da modelagem numérica é uma importante ferramenta para (a) quantificar e compreender as contribuições dos diversos fatores que influenciam a frequência e intensidade de ocorrência de sistemas atmosféricos responsáveis pela precipitação e para (b) dar suporte à prevenção de inundações e resposta à ocorrência de eventos extremos de chuva e vazão a partir de modelos atmosféricos e hidrológicos. Na literatura, encontram-se vários estudos de casos de eventos extremos simulados com modelos atmosféricos regionais. Os modelos regionais, como por exemplo o *Weather Research and Forecast (WRF)*, são utilizados

para fornecer previsões detalhadas em escalas menores, geralmente de 1 a 10 km, e são iniciados a partir das condições, iniciais e de fronteira, fornecidas pelos modelos globais de Previsão Numérica do Tempo (PNT). O WRF, um dos modelos que será utilizado neste estudo, possui capacidade de simular fenômenos meteorológicos complexos com maior resolução espacial e temporal.

Garcia et al. (2023) observaram que a parametrização de convecção cumulus do tipo Grell–Freitas teve melhor desempenho na simulação com o WRF de um evento extremo no sul de Minas Gerais. Eles concluíram que o modelo conseguiu reproduzir com precisão o padrão espacial e a intensidade da precipitação, apesar de uma subestimativa em áreas específicas. De Araujo et al. (2023) destacaram a habilidade do WRF na representação da posição e das condições de tempo associadas a atuação de um sistema frontal no sudeste do Brasil, apesar de diferenças na intensidade devido à resolução dos dados. Esses estudos mostram a eficácia e os desafios do WRF em simular eventos extremos de precipitação que podem impactar diretamente na vazão de rios e corpos d'água, e inclusive ser responsável por inundações.

Para a BRPS, também associado ao projeto vinculado a esta tese, o estudo de De Campos et al. (2023) investigou a performance de diferentes parametrizações de microfísica de nuvens e convecção no WRF durante um evento de chuva intensa em janeiro de 2016. Foi verificado uma subestimativa dos totais acumulados de chuva, especialmente em terrenos complexos e áreas urbanizadas, mas a simulação apresentou alta correlação temporal (acima de 90%) em algumas simulações.

Além da previsão de eventos extremos de precipitação a partir de modelos atmosféricos, a utilização de modelos hidrológicos, que simulam o impacto da precipitação na vazão, também é fundamental para a previsão de inundações. A integração de dados de previsão da precipitação fornecido pelos modelos atmosféricos com os modelos hidrológicos tem sido aplicada em diversas plataformas, auxiliando no prognóstico de eventos que podem causar danos sociais e ambientais e subsidiando a preparação e a resposta dos órgãos responsáveis (RODRIGUES, 2012). Para isso, é crucial avaliar a habilidade do modelo atmosférico em simular a precipitação, já que erros na representação desta variável podem influenciar diretamente o escoamento gerado, uma vez que o modelo hidrológico não vai gerar uma vazão consistente se utilizar valores incorretos de precipitação ou com problemas na localização dos núcleos de maior intensidade (LUZ BARCELLOS; CATALDI, 2020).

A literatura apresenta diversos estudos que utilizam modelos meteorológicos como entrada para modelos hidrológicos, com o objetivo de prever vazões em bacias hidrográficas e mitigar desastres naturais. Oliveira (2006) implementou o modelo atmosférico WRF acoplado

ao modelo hidrológico TOPMODEL na bacia de União da Vitória, e um dos resultados verificados foi que as simulações com os modelos acoplados demonstraram a possibilidade de previsão de vazão para alertas de níveis críticos até 48 horas, embora possam existir casos de falsos alertas e superestimativa de vazão. Barcellos e Cataldi (2020) estudaram a previsão de enxurradas no estado do Rio de Janeiro, utilizando o modelo WRF-SMAP para a previsão de eventos extremos, como as chuvas de 2011 na região serrana, que causaram mais de 900 mortes e impactos socioeconômicos severos, as simulações subestimaram a precipitação em 57,4% e a vazão em 24,6%. O estudo destacou a necessidade de ajustar as parametrizações regionais para aumentar a precisão dos modelos e sua utilidade na gestão de desastres.

Lara et al. (2015) criaram um Sistema de Previsão de Eventos Hidrológicos Críticos (SPEHC) integrando os modelos meteorológicos BRAMS e ETA com o modelo hidrológico PM-Tank Model, gerenciado atualmente pela empresa Fractal Engenharia e Sistemas e comercializado para previsão de vazão em tempo real no estado de Santa Catarina. Este sistema também foi utilizado em outros locais, como no estudo de Baron (2017) em duas bacias hidrográficas, Igarapé Tarumã-Açu e Igarapé do Mindu, que abrangem a região urbana de Manaus, capital do Amazonas, propondo melhorias na construção do boletim emitido pela plataforma online, enviado aos usuários via e-mail e celulares para alertar a população e acionar as entidades responsáveis em caso de desastres.

Ainda no que se refere à importância da previsão de vazões, destaca-se que o parque gerador de energia elétrica brasileiro, inserido no contexto do Sistema Interligado Nacional (SIN), é predominantemente de base hidroelétrica. Em função dessa característica, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) elabora diariamente previsões de vazões naturais para os locais de aproveitamentos hidroelétricos do SIN. Para isso, adota uma metodologia própria utilizando o modelo hidrológico SMAP/ONS (ONS, 2017), baseado no modelo de Lopes et al. (1981), e emprega dados de entrada dos modelos de previsão do tempo ETA-40 do CPTEC/INPE, GEFS (Global Ensemble Forecast System) e HRES do ECMWF, utilizando uma técnica de remoção de viés e pesos para os diferentes modelos meteorológicos (ONS, 2019; 2020). As previsões de vazões permitem antecipar e monitorar o estado dos reservatórios, bem como prever as vazões naturais totais para cada bacia que produz energia elétrica para o SIN, assegurando a segurança e a eficiência do fornecimento de energia elétrica no país (TREISTMAN et. al, 2021).

Além dos estudos já mencionados, Rodrigues (2012) realizou a integração entre o modelo atmosférico WRF e o modelo hidrológico Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) para estimar a vazão da Bacia do Rio Paraíba do Meio

(AL/PE). O estudo demonstrou que essa abordagem apresentou correlações significativas entre os dados simulados e observados, sugerindo que esse método pode ser uma ferramenta útil para previsão de vazões elevadas e auxiliar na implementação de sistemas de alerta de cheias.

Diante do exposto, é importante destacar que, até o momento, a literatura apresenta uma quantidade limitada de estudos analisando de forma abrangente as tendências e os extremos de vazão na região da BRPS e sua relação com a precipitação. Esse tema ainda demanda investigações mais detalhadas, especialmente no que tange às possibilidades de integração entre modelos atmosféricos e hidrológicos, que podem ser fundamentais para otimizar a previsão de eventos extremos e, conseqüentemente, contribuir para a prevenção de enchentes na região. Ressalta-se que tais eventos possuem um elevado potencial de gerar impactos sociais e econômicos significativos, especialmente considerando que a BRPS é responsável por aproximadamente 14% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (CEIVAP, 2020). Esta tese está inserida no projeto intitulado Plataforma de previsão de vazões na BRPS como suporte a prevenção de inundações, financiado pela AGEVAP e pelo CNPq e vinculado ao programa de Doutorado Acadêmico para Inovação.

1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a performance da previsão de vazão a partir da integração dos modelos atmosférico WRF e hidrológico MGB-IPH, visando otimizar os alertas de eventos extremos responsáveis por inundações na BRPS.

São objetivos específicos:

- Analisar o comportamento médio, as tendências e os extremos de precipitação e vazão na BRPS com base em dados históricos de 1939 a 2020 de estações pluviométricas e fluviométricas.
- Avaliar o desempenho do modelo WRF na simulação de eventos extremos de precipitação ocorridos em fevereiro de 2020, comparando os resultados com os dados observados e com as previsões do modelo Global Forecast System (GFS).
- Ajustar e calibrar o modelo hidrológico MGB-IPH para a BRPS, garantindo que as vazões simuladas representem com precisão as vazões observadas.
- Comparar as previsões de vazão geradas pelo modelo hidrológico MGB-IPH utilizando as saídas dos modelos atmosféricos WRF e GFS como condições iniciais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste estudo foi desenvolvida com o objetivo de integrar os modelos atmosférico WRF e hidrológico MGB-IPH, visando prever eventos extremos de inundação. Para isso, foi seguido um processo estruturado em três etapas principais, destacadas no fluxograma (Figura 1).

As etapas do estudo incluem:

(1) a análise das séries históricas de precipitação e vazão registradas em estações pluviométricas e fluviométricas na região, com o objetivo de definir padrões médios, identificar tendências e eventos extremos de precipitação e vazão na BRPS. Essa análise permitiu a seleção de um estudo de caso com base nos eventos extremos observados;

(2) a simulação com o modelo atmosférico WRF, seguida pela análise dos resultados da precipitação simulada e da avaliação do desempenho do modelo em comparação com o GFS, utilizado como dado de entrada para a simulação. Essa etapa visa avaliar se o uso do WRF, que possui um custo computacional elevado, é realmente vantajoso frente ao GFS, cujos resultados são disponibilizados diariamente e de forma gratuita para todo o globo pelo *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, através do sistema *NOAA Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS)*;

(3) para a fase hidrológica, iniciou-se com a calibração do modelo MGB-IPH para a bacia de estudo, ajustando seus parâmetros para garantir que as vazões simuladas representassem com precisão as vazões observadas. Em seguida, foram preparados os dados de entrada gerados pelos modelos atmosféricos WRF e GFS, os quais passaram por um processo de conversão e interpolação para garantir compatibilidade com o MGB-IPH. Após a calibração e preparo dos dados, o modelo foi utilizado para simular as vazões na BRPS, permitindo a avaliação dos resultados e a identificação de eventos extremos de inundação.

No decorrer deste capítulo 2, cada uma dessas etapas será detalhada de forma mais aprofundada.

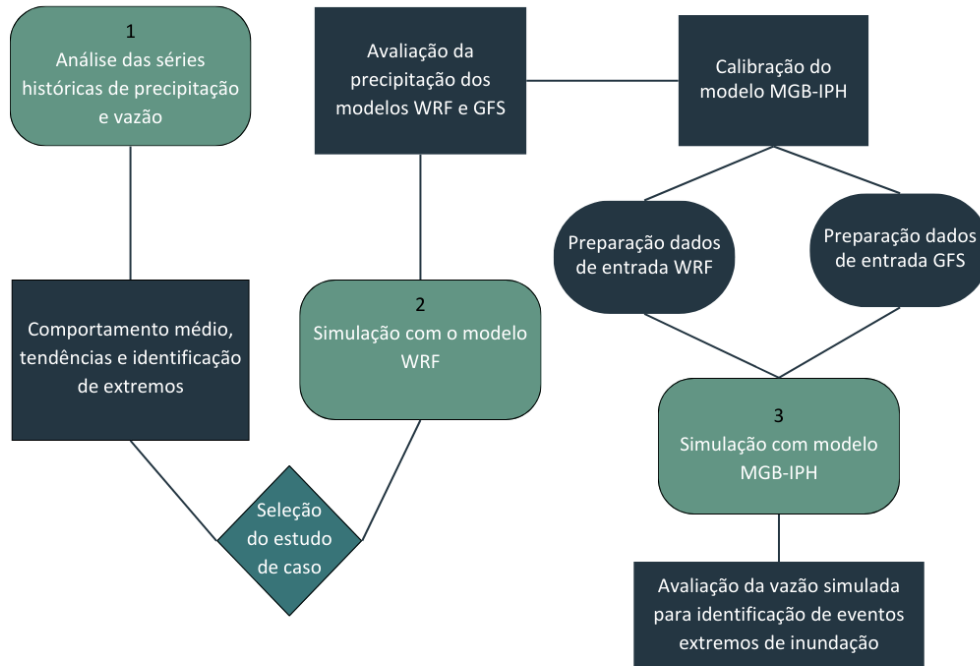


Figura 1 - Fluxograma ilustrando as etapas da integração entre os modelos WRF e MGB-IPH, utilizado para previsão de eventos extremos na BRPS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A BRPS possui uma forma alongada, com comprimento cerca de três vezes maior que a largura máxima. O rio principal, o Rio Paraíba do Sul, resulta da confluência dos rios Paraíbauna e Paraitinga, ambos no Estado de São Paulo, a 1.800 m de altitude. Este rio tem uma extensão aproximada de 1.130 km e deságua no Oceano Atlântico, na praia de Atafona, no município de São João da Barra, no norte do Estado do Rio de Janeiro (CAVALCANTI; MARQUES, 2016). Com aproximadamente 55.500 km², a bacia abrange um total de 184 municípios: 88 em Minas Gerais, 57 no Rio de Janeiro e 39 em São Paulo (AGEVAP, 2013; AGEVAP, 2006). Além disso, contém aproximadamente 120 usinas hidrelétricas em operação, com geradores de grande, médio e pequeno porte (IORIS, 2011). A BRPS faz parte da região hidrográfica conhecida como Atlântico Sudeste e é subdividida em oito Unidades de Planejamento Hídrico: Paraíba do Sul (trecho paulista), Preto Paraíbauna, Compé, Médio Paraíba do Sul, Piabanha, Rio Dois Rios, Baixo Paraíba do Sul e Sub-Bacia do Rio Pirai.

O clima da BRPS é predominantemente subtropical, quente e úmido, influenciado pela altitude e pela influência de ventos marinhos. A temperatura média anual oscila entre 18°C e 24°C (CEIVAP, 2020). Localizada na região sudeste do Brasil, a BRPS é caracterizada por um período muito chuvoso no verão e outro seco no inverno, uma das características do Sistema de

Monção da América do Sul (SMAS) (RAMAGE, 1971; ZHOU; LAU, 1998; GAN et al., 2004; GRIMM et al., 2005; REBOITA et al., 2022).

Durante o período chuvoso do SMAS, a dinâmica da atmosfera mostra que os ventos alísios de nordeste apresentam maior intensidade e transportam mais umidade do Oceano Atlântico Tropical para a bacia Amazônica. Parte dessa umidade é transportada pelos Jatos de Baixos Níveis (JBN) para os subtropicais (DRUMOND et al., 2008; DURÁN-QUESADA et al., 2009; REBOITA et al., 2022). Ocasionalmente, essa umidade que chega à região subtropical pode formar uma banda de nebulosidade e precipitação com orientação noroeste-sudeste, que se estende desde o sul da região amazônica até a região central do Atlântico Sul (LENTERS; COOK, 1995), caracterizando a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (KODAMA, 1992; QUADRO et al., 2012; REBOITA et al., 2022).

De acordo com Reboita et al. (2010), os totais pluviométricos no inverno são mais baixos devido à atuação do Anticiclone Subtropical da América do Sul (ASAS), que, nesta época, alcança sua posição mais a oeste e se estende até a região sudeste do Brasil. Os eventos de precipitação mais intensos podem ocorrer quando sistemas frontais e ciclones subtropicais e extratropicais conseguem se sobrepor ao ASAS.

A topografia da região é apresentada na Figura 2, onde se destacam a região do Vale do Paraíba, a Serra da Mantiqueira e a Serra do Mar, que, no estado do Rio de Janeiro, recebe o nome de Serra dos Órgãos. Essas regiões apresentam relevo muito acidentado, de colinoso a montanhoso, chegando a mais de 2.000 m nos pontos mais elevados, como o Pico da Mina (2.798 m), Pico das Agulhas Negras (2.791 m) e o Pico dos Três Estados (2.665 m) (MARENGO; ALVES, 2005).

A região da BRPS é marcada pela vulnerabilidade a desastres naturais. No período de 2003 a 2022, foram registrados no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD) 1.698 desastres em 173 dos 184 municípios da bacia, sendo 76% deles associados a eventos hidrológicos, como inundações, enxurradas e chuvas intensas (CALDERÓN PACHECO et al., 2023). As inundações representaram a maior parcela dos desastres e o estado do Rio de Janeiro é a região mais afetada, foram registrados 1276 desastres em todos os 92 municípios pertencentes. Dois dos maiores desastres já ocorridos na bacia foram registrados em 2011 e 2022. Em 2011, a tragédia que atingiu Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis resultou em 775 óbitos e mais de 10 mil desabrigados, com prejuízos avaliados em R\$ 1,36 bilhão (S2iD, 2023). Já em 2022, deslizamentos em Petrópolis deixaram 78 mortos e agravaram os impactos socioeconômicos da região, reforçando a necessidade de políticas mais eficazes de gestão de risco de desastres (CALDERÓN PACHECO et al., 2023).

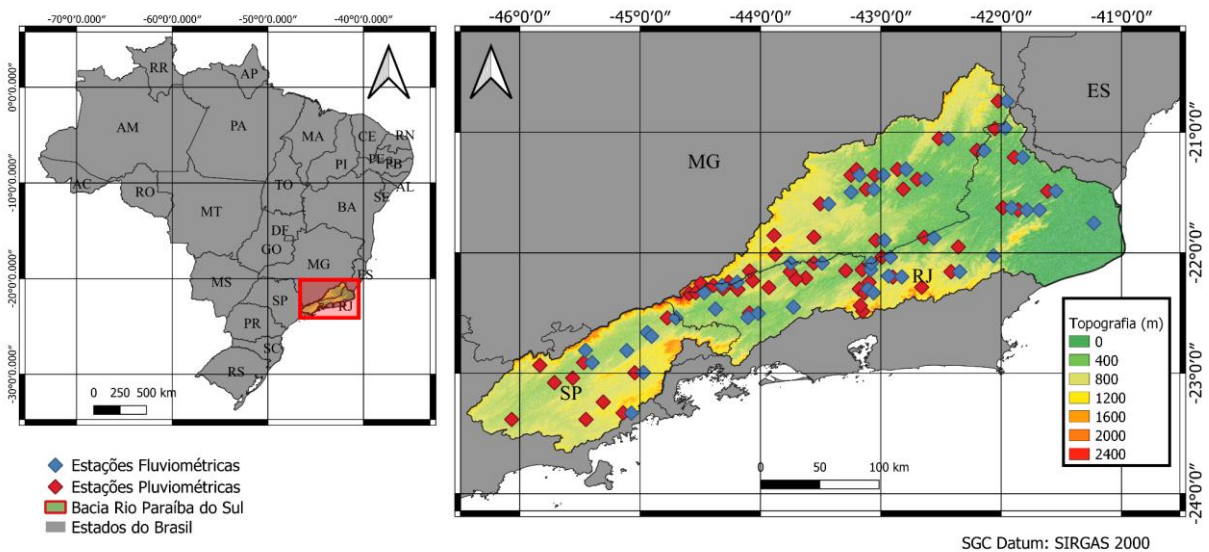


Figura 2 - Localização da BRPS no Brasil (esquerda) e sua distribuição topográfica, destacando as estações pluviométricas e fluviométricas (direita)

2.2 ANÁLISE DAS SÉRIES HISTÓRICAS DE PRECIPITAÇÃO E VAZÃO

Neste estudo, dados históricos diários de precipitação, de 1939 a 2020, de 58 estações pluviométricas e dados de vazão diários de 47 estações fluviométricas localizadas na BRPS foram utilizados (Figura 2). O conjunto de dados utilizado é disponibilizado pela ANA, no endereço: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. As informações fluviométricas e pluviométricas obtidas do conjunto de dados da ANA estão categorizadas em dois níveis de consistência: o nível 2 consiste em dados pré-analisados quanto à consistência (preferencialmente utilizados no estudo) e o nível 1 consiste em dados brutos (usados neste estudo apenas quando os dados do nível 2 não estavam disponíveis). As tabelas com os dados das estações utilizadas neste estudo estão disponíveis no Anexo 1.

A análise dos dados históricos de precipitação e vazão foi realizada em três etapas: (a) avaliação do comportamento médio e identificação dos extremos; (b) cálculo da tendência; e (c) análise da influência do crescimento urbano na vazão.

Ressalta-se que os resultados encontrados nessa etapa foram publicados no artigo revista *Climate*, volume 11, número 7, de 2023, sob o título “*Hydrological and Precipitation Extremes and Trends over the Paraíba do Sul River Basin, Brazil*”

2.2.1 O Comportamento Médio e a Identificação de Extremos

Os valores mensais e anuais acumulados de precipitação foram obtidos para cada local e, em seguida, foram calculadas as médias de todas as estações de chuva para representar a bacia como um todo. Os valores médios mensais da bacia foram utilizados para definir as estações chuvosa e seca na BRPS.

A técnica de análise de quantis (WILKS, 2006) foi empregada para estabelecer os limites de taxas de precipitação e vazão para eventos extremos durante as estações chuvosa e seca. Os percentis 95 e 99 (p95 e p99) foram utilizados como limites, conforme Costa et al. (2020). Para o cálculo dos percentis, apenas os dias com precipitação (acima de zero) foram considerados. Essa técnica já foi empregada em estudos como Dias et al. (2013), para dados de precipitação, e por Pedron et al. (2016) e Gudmundsson et al. (2018), para extremos de vazão. O número de dias por ano com registros acima desses limites em cada local também foi calculado para as estações chuvosa e seca.

Com base nesses resultados, a distribuição espacial do total anual e da precipitação extrema foi construída utilizando o método de interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância (*Inverse Distance Weighted* - IDW) (ABOU RAFEE et al., 2020). Para os padrões médios anuais e os valores extremos de vazão, foi utilizada a técnica de símbolos pontuais proporcionais (MEIRELLES, 2013), que permite visualizar a vazão média anual registrada na área de drenagem de cada sub-bacia.

2.2.2 Cálculo da Tendência

Para verificar a tendência e sua significância estatística, o teste de MK (MANN, 1945; KENDALL, 1975) foi aplicado aos dados de precipitação e vazão. O MK é um teste não paramétrico recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para estimar tendências em dados climatológicos, sendo amplamente utilizado na análise de possíveis mudanças climáticas (GOOSSENS; BERGER, 1986; MARENGO; ALVES, 2005). Neste estudo, o teste MK foi aplicado para identificar tendências nos valores médios a partir das séries mensais de precipitação e vazão, assim como para identificar tendências nos valores extremos, considerando os dados anuais do número de dias com registros superiores aos limiares p95 e p99 de precipitação e vazão.

O cálculo do Teste MK é dado da seguinte forma: com uma série temporal (X_i, X_{i+1}, \dots, X_n) resultante de uma amostra com “n” variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas, é possível obter o coeficiente de Mann Kendall (S) através da soma dos sinais da

diferença entre os valores (X_i) e seus valores futuros (X_j), Equações 1 e 2. Quando o valor de S é positivo indica que há tendência de alta e quando o valor é negativo indica tendência decrescente.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signal}(x_j - x_i) \quad (1)$$

com função de sinal calculada da seguinte forma

$$\text{signal}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1, & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Nos casos em que $n \geq 10$, a variável S possui características de uma distribuição normal, onde sua variância ($\text{Var}(S)$) e o índice de distribuição normal (Z) são calculados pelas equações 3 e 4

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-2)(2m+5) - \sum_{j=i+1}^n t_j(i)(i-1)(2i+5)}{18} \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

O teste MK é bicaudal, portanto, a hipótese H_0 (hipótese nula) deve ser rejeitada nos casos em que o valor absoluto de Z for maior que $Z_{\alpha/2}$, onde α é o nível de significância.

2.2.3 Influência do crescimento urbano na vazão da BRPS

Para investigar a influência do crescimento das áreas urbanas nos padrões médios e tendências observadas nos dados de vazão, foram utilizados os dados do censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), abrangendo o período de 1940 a 2010, juntamente com a análise da expansão da área urbana, com base nos dados do Projeto MapBiomas - Coleção 7.1 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra no Brasil. Os

dados estão disponíveis no seguinte link: <http://mapbiomas.org>. Esse procedimento permitiu avaliar as mudanças no uso do solo ao longo das décadas e sua possível influência nos padrões hidrológicos da região.

Adicionalmente, também foram considerados dados sobre o uso consuntivo da água no Brasil, disponíveis em <https://metadados.snirh.gov.br/>. Esses dados incluem informações sobre a quantidade de água retirada e consumida, sem retorno direto ao corpo d'água. Os setores avaliados para consumo foram: abastecimento humano (urbano e rural), abastecimento animal, indústria de transformação, mineração, termoeletricidade, agricultura irrigada e evaporação líquida de reservatórios. Foram utilizados dados históricos de 1931 a 2021 (diagnóstico), bem como projeções até 2040 (prognóstico).

2.3 INTEGRAÇÃO DOS MODELOS ATMOSFÉRICO WRF E HIDROLÓGICO MGB-IPH

A integração entre o modelo atmosférico WRF e o modelo hidrológico MGB-IPH foi desenvolvida com base em uma metodologia que abrangeu a seleção do período de teste, a simulação atmosférica e a calibração hidrológica. O período de teste foi definido a partir da análise de eventos extremos ocorridos na BRPS, considerando precipitações diárias que excederam os percentis de 95% e 99%. O mês de fevereiro de 2020 foi escolhido devido à ocorrência de mais de 100 registros de eventos extremos nas estações pluviométricas distribuídas pela bacia. Detalhes adicionais sobre essa seleção serão apresentados nos resultados.

As simulações atmosféricas foram realizadas com o modelo WRF, utilizando parametrizações ajustadas para a região, conforme descrito por De Campos et al. (2023). Para isso, os dados do modelo global GFS foram preparados como condições de contorno e entrada para o WRF. Posteriormente, o modelo MGB-IPH foi calibrado especificamente para a BRPS, com o objetivo de representar com precisão os processos hidrológicos da bacia. O modelo hidrológico foi alimentado com os dados de precipitação simulados pelo WRF e, adicionalmente, com os dados do GFS, permitindo a avaliação da variabilidade dos resultados.

As características detalhadas das simulações realizadas com os modelos WRF e MGB-IPH são apresentadas nos subtópicos 2.3.1 e 2.3.2.

2.3.1 Simulação da Precipitação com o Modelo WRF

Para este estudo, foi utilizada a versão 4.0 do modelo WRF para realizar simulações atmosféricas que fornecem as previsões meteorológicas necessárias para alimentar o modelo hidrológico de previsão de vazões. O WRF é um modelo atmosférico de mesoescala de alta resolução. Um dos objetivos principais desse modelo é atender tanto às necessidades de previsão operacional quanto às de pesquisa. Ele foi projetado para ser independente de plataforma e pode ser executado em máquinas compartilhadas ou distribuídas (SKAMAROCK et al., 2019).

O modelo WRF oferece várias opções de parametrizações físicas para representar os processos atmosféricos significativos. Neste estudo, foram adotadas as parametrizações listadas na Tabela 1, conforme recomendação de De Campos (2023), que avaliou o impacto dessas configurações na simulação de eventos extremos de precipitação na BRPS. O domínio utilizado consistiu em duas grades aninhadas centradas sobre a bacia (22.211°S; 43.791°W), com resoluções horizontais de 12 km (domínio externo, d01) e 3 km (domínio interno, d02). A Figura 3 apresenta os domínios utilizados e os limites da BRPS. A parametrização de convecção cumulus foi ativada apenas no domínio externo, enquanto o domínio interno foi configurado para permitir a convecção explícita, conforme recomendado por Weisman, Skamarock e Klemp (1997).

As condições iniciais e de contorno para as simulações regionais foram fornecidas a cada 3 horas pelo modelo global GFS (NCEP, 2015), com resolução horizontal de 0,25°. A escolha do GFS baseia-se em sua capacidade de representar adequadamente as condições sinóticas e fornecer informações consistentes para modelos regionais (FERRARI et al., 2020). Embora possa apresentar limitações em áreas de terreno complexo, estudos demonstram que suas previsões são suficientemente confiáveis para inicializar modelos atmosféricos regionais (LIU et al., 2018).

As simulações foram realizadas para o período de 00 UTC de 31 de janeiro de 2020 a 18 UTC de 29 de fevereiro de 2020. Para lidar com a demanda computacional necessária para um mês de simulação, o período foi dividido em seis etapas de 7 dias cada. As primeiras 48 horas de cada etapa foram descartadas para permitir o spin-up do modelo, garantindo a estabilização dos processos físicos e dinâmicos antes do início da análise, conforme prática recomendada (LIU et al., 2021).

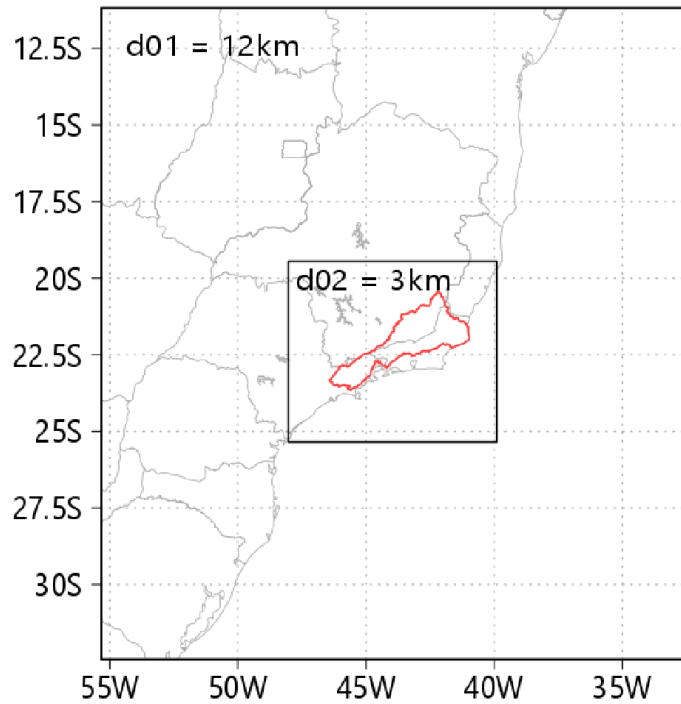


Figura 3 - Representação dos domínios externo (d01) e interno (d02) do modelo WRF utilizados no estudo. Os contornos vermelhos indicam os limites da bacia do PRSB (Fonte: De Campos, 2023).

Tabela 1 – Configurações das parametrizações usadas nas simulações com o modelo WRF

Parâmetro	Domínio Externo (d01)	Domínio Interno (d02)
Pontos na direção x	200	281
Pontos na direção y	200	221
Pontos na direção z	45	45
Resolução horizontal	12 km	3 km
Passo de tempo	60	15
Topo do modelo	50 hPa	
Latitude central	22.211°S	
Longitude central	43.791°W	
Convecção Cumulus	Grell–Freitas (GRELL; FREITAS, 2014)	
Microfísica	Morrison 2–moment (MORRISON et al., 2009)	
Camada limite planetária	Mellor–Yamada–Janjic (JANJIC, 2001).	
Camada superficial	Revised-MM5 (JIMÉNEZ et al., 2012).	
Superfície terrestre	Noah-LSM (CHEN; DUDHIA, 2001).	
Radiação de ondas curtas	MM5 (DUDHIA, 1989).	
Radiação de ondas longas	RRTM (MLAWER et al., 1997).	

Para validação dos resultados obtidos a partir do modelo WRF, foram utilizados dados de estimativas de precipitação do MERGE (ROZANTE et al., 2010), que combinam informações do *Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-Satellite Retrievals* for GPM (IMERG; HUFFMAN et al., 2015a, 2015b, 2015c) com observações de precipitação na América do Sul, além de dados diários de precipitação de 20 estações meteorológicas da ANA, que registraram os eventos extremos no período selecionado.

Além disso, a precipitação simulada pelo WRF será comparada com a do GFS para determinar se o uso do WRF, que possui um custo computacional elevado, oferece vantagens significativas na simulação de eventos de precipitação extrema em relação ao GFS, cujos resultados são disponibilizados diariamente e de forma gratuita para todo o globo.

Para a análise da distribuição espacial da precipitação na grade de maior resolução espacial (d02), foram elaborados mapas de acumulados mensais de precipitação para fevereiro de 2020 a partir dos dados do MERGE, WRF e GFS. Esses mapas forneceram uma visão geral da distribuição da precipitação ao longo do mês, destacando as áreas de maiores acumulados. Adicionalmente, foram produzidos mapas de acumulados diários, que permitiram identificar os locais com maior intensidade de precipitação nos dias que registraram eventos extremos.

Por fim, foram elaborados gráficos comparando os totais diários de precipitação registrados pelas estações meteorológicas com os valores simulados pelos modelos WRF e GFS nos mesmos pontos geográficos. Essa comparação permitiu avaliar o desempenho de cada modelo na reprodução das condições locais de precipitação extrema. A localização das estações que capturaram esses eventos está indicada nos resultados.

2.3.2 Aplicação do Modelo MGB-IPH

O MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O modelo foi projetado para simular processos hidrológicos em grandes bacias hidrográficas, permitindo a representação detalhada da heterogeneidade espacial e dos processos hidrológicos locais. Conforme descrito por Collischonn et al. (2007), o MGB-IPH tem como base os modelos LARSIM (BREMICKER, 1998) e VIC-2L (LIANG et al., 1994), incorporando modificações que tornam o modelo mais adequado às condições hidrológicas brasileiras. A estrutura do modelo permite a divisão da bacia em mini-bacias, que são agrupadas em Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), definidas com base em características homogêneas de solo, vegetação, declividade e geologia.

O escoamento em cada mini-bacia é calculado considerando o balanço hídrico no solo, processos de infiltração e evapotranspiração, e os escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo. Esses processos são integrados por meio de reservatórios lineares que representam o transporte de água na rede de drenagem. A modelagem hidrológica no MGB-IPH utiliza como dados de entrada informações de precipitação, vazão, clima, parâmetros de vegetação e uso do solo, além de dados geoespaciais, como modelos digitais de elevação (FAN, F. M.; COLLISCHONN, W., 2014).

Os parâmetros associados ao uso do solo no modelo são classificados em dois tipos: fixos e calibráveis. Os parâmetros fixos são determinados a partir de medições ou estimativas baseadas no tipo de cobertura vegetal e são mantidos constantes, pois sua influência nas variações do modelo é considerada limitada. Em contraste, os parâmetros calibráveis são ajustados ao longo do processo de calibração, sendo modificados iterativamente a cada aplicação do modelo até que os valores simulados apresentem boa correspondência com os dados observados (COLLISCHONN, 2001).

A aplicação do MGB-IPH neste estudo seguiu as etapas estruturadas no fluxograma da Figura 4, que detalha o processo desde o pré-processamento, a construção do banco de dados até a simulação e avaliação do comportamento hidrológico da bacia. O fluxograma descreve as etapas: (1) Construção do Banco de Dados, (2) Pré-Processamento, (3) Calibração do Modelo, (4) Preparação dos dados de entrada, e (5) Avaliação da Precisão.

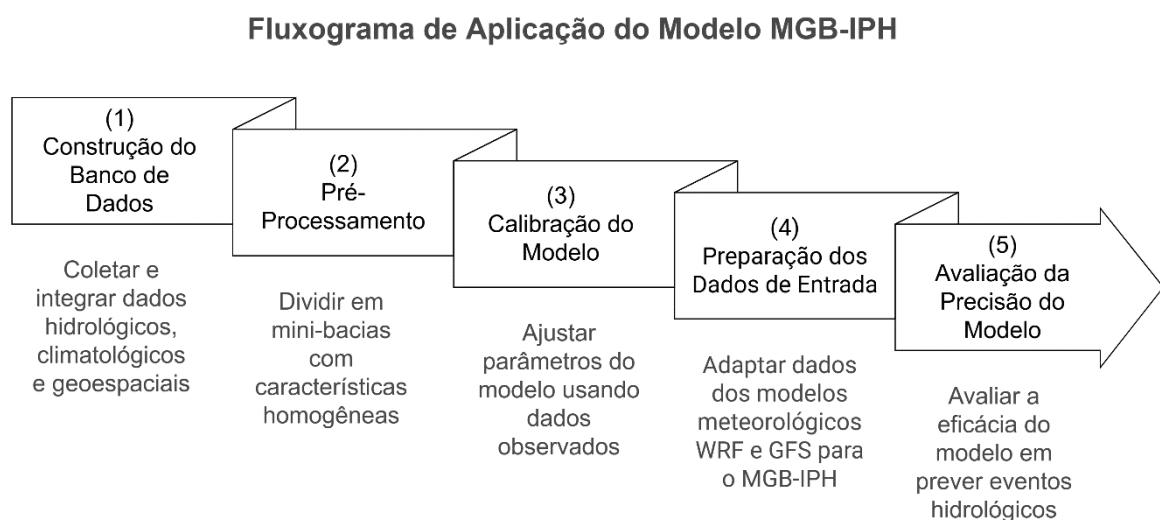


Figura 4 - Fluxograma de Aplicação do Modelo MGB-IPH

(1) Construção do Banco de Dados

A etapa de construção do banco de dados envolveu a coleta e integração de informações hidrológicas, climatológicas e geoespaciais essenciais para a simulação hidrológica da BRPS. Os principais dados utilizados foram:

- Modelo Digital de Elevação (MDE): Com resolução espacial de 90 metros, obtido da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e disponibilizado pelo projeto Brasil em Relevo da EMBRAPA. O MDE é utilizado para a delimitação das sub-bacias e a modelagem do relevo.

- Mapas de tipos e uso do solo: Foi utilizado o mapa de Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) da América do Sul, fornecido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com resolução espacial de 400 metros. Este mapa classificou a área em nove categorias principais de uso do solo: (1) Agricultura em solo profundo; (2) Agricultura em solo raso; (3) Campo em solo profundo; (4) Campo em solo raso; (5) Floresta em solo profundo; (6) Floresta em solo raso; (7) Várzea e florestas inundáveis; (8) Água; e (9) Áreas semi-impermeáveis (FAN et al., 2015). Associados a cada URH, estão parâmetros de vegetação como albedo, altura da vegetação, índice de área foliar e resistência superficial, que permanecem fixos durante o processo de calibração.

- Dados de precipitação: obtidos do produto MERGE/CPTEC (ROZANTE et al., 2010), abrangendo o período de 2010 a 2020, utilizando a série desde o início da disponibilidade até a data que antecede o período de simulação. Estudos indicam que a escolha do período de calibração deve levar em conta a variabilidade hidrológica e climática para garantir uma boa performance do modelo (LEE et al., 2023). Para iniciar o modelo MGB-IPH é necessário gerar um arquivo de dados de chuva interpolados. Esse processo é feito pelo código Interplu, um executável do modelo MGB-IPH que faz a interpolação destes dados de precipitação para cada centroide de mini-bacia da bacia em estudo, criando um arquivo binário de chuva interpolada que pode ser utilizado como dado de entrada no MGB-IPH.

- Dados de vazão: Os dados de vazão calculados pelo MGB-IPH serão comparados aos dados observados nos postos fluviométricos. Para isso, foram selecionados 53 postos fluviométricos no sistema HIDROWEB da ANA. Embora alguns desses postos coincidam com os utilizados na análise da vazão na BRPS, a seleção para esta etapa considerou critérios como área de drenagem superior a 200 km², séries temporais iniciadas antes de 2000, operação ativa e localização estratégica próxima a cidades e principais afluentes. A Figura 5 apresenta a distribuição desses postos na BRPS, enquanto a Tabela 2 fornece detalhes sobre cada estação.

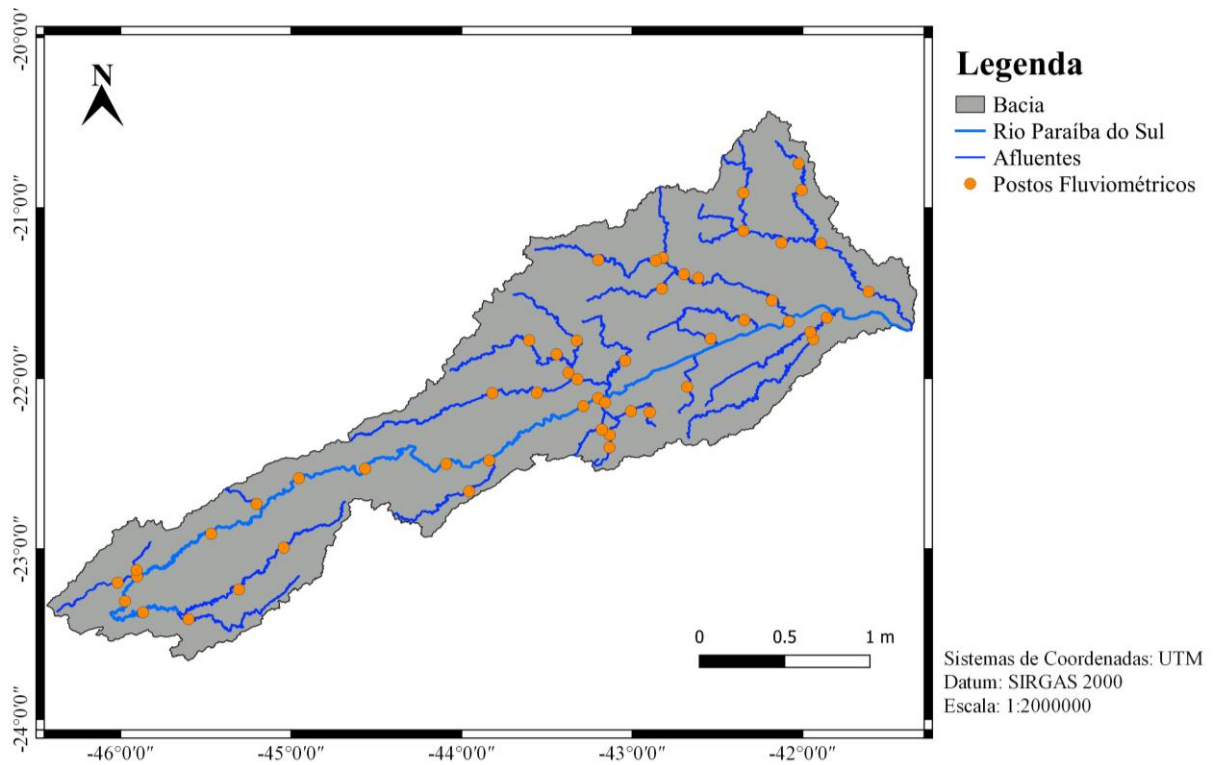


Figura 5 - Mapa com a localização dos 53 postos fluviométricos utilizados na calibração do modelo MGB-IPH na BRPS. Para detalhes específicos de cada posto, consultar a Tabela 2 (Fonte: Santos, 2024)

Tabela 2 - Lista dos postos fluviométricos utilizados para a aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na BRPS. (continua na próxima página)

Posto	Código	Lat	Lon	Posto	Operadora	Rio/Ribeirão
1	58030000	-22.99	-45.04	Estrada do Cunha	CPRM	RIO PARAÍTINGA
2	58040000	-23.21	-45.31	São Luiz do Paraítinga	CPRM	RIO PARAÍTINGA
3	58087000	-23.38	-45.78	UHE Paraibuna Barramento	CESP	RIO PARAÍBUNA
4	58093000	-23.41	-45.87	UHE Santa Branca	LIGHT	RIO PARAÍBA DO SUL
5	58115000	-23.31	-45.97	Jacareí	CPRM	RIO PARAÍBA DO SUL
6	58128000	-22.83	-46.42	UHE Jaguari Montante	FURNAS	RIO JAGUARI
7	58137000	-22.91	-45.3	Prefeitura Municipal	DAEE-SP	RIO PARAÍBA DO SUL
8	58152000	-22.81	-45.22	Buquirinha II	CPRM	RIO BUQUIRINHA
9	58158000	-22.91	-45.46	Pindamonhangaba	CPRM	RIO PARAÍBA DO SUL
10	58183000	-22.9	-45.91	Colônia Piagui	DAEE-SP	RIO PIAGUI
11	58205000	-22.53	-44.96	Cruzeiro	DAEE-SP	RIO PARAÍBA DO SUL
12	58211000	-22.43	-44.57	UHE Funil Barramento	FURNAS	RIO PARAÍBA DO SUL
13	58237000	-22.51	-44.1	Volta Redonda	CPRM	RIO PARAÍBA DO SUL
14	58245000	-22.48	-43.86	UHE Santa Cecília	LIGHT	RIO PARAÍBA DO SUL
15	58267000	-22.51	-43.9	Fazenda Nova Esperança	LIGHT	RIO PARAÍBA DO SUL
16	58330000	-22.16	-43.29	Paraíba do Sul	CPRM	RIO PARAÍBA DO SUL
17	58378000	-22.1	-43.2	UHE Simplício Montante	FURNAS	RIO PARAÍBA DO SUL
18	58385000	-22.06	-43.13	Parque Petrópolis	CPRM	RIO PIABANHA
19	58387000	-22.28	-43.01	Pedro do Rio	CPRM	RIO PIABANHA
20	58425000	-21.87	-42.98	Fazenda Sobradinho	CPRM	RIO PRETO

Tabela 2 - Lista dos postos fluviométricos utilizados para a aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na BRPS (continuação)

Posto	Código	Lat	Lon	Posto	Operadora	Rio/Ribeirão
21	58432000	-21.86	-42.98	Moreli	CPRM	RIO PRETO
22	58450000	-21.76	-42.95	Fagundes	CPRM	RIO FAGUNDES
23	58451000	-21.71	-42.73	UHE Ilha do Pombos	LIGHT	RIO PARAÍBA DO SUL
24	58470000	-21.77	-43.36	Juiz de Fora Jusante	CPRM	RIO PARAÍBA DO SUL
25	58471000	-21.78	-43.44	UHE Picada Montante 1	L.D.S.P.E.	RIO DO PEIXE
26	58480000	-21.86	-43.27	Fazenda Santo Antônio	CPRM	RIO DO PEIXE
27	58501000	-21.93	-43.13	Sobragí	CPRM	RIO PARAÍBA DO SUL
28	58505000	-21.89	-43.11	Rio Preto	CPRM	RIO PRETO
29	58510000	-21.88	-43.55	Manuel Duarte	CPRM	RIO PRETO
30	58590000	-22	-42.88	PCH Monte Serrat	M. SERRAT	RIO PARAÍBA DO SUL
31	58610000	-21.9	-43.04	Estevão Pinto	CPRM	RIO CAGADO
32	58645000	-21.62	-42.54	Sumidouro	CPRM	RIO PAQUEQUER
33	58670000	-21.77	-42.44	Volta Grande	CPRM	RIO ANGU
34	58676000	-21.66	-42.36	Fazenda da Barra	CPRM	RIO PIRAPETINGA
35	58730000	-21.71	-42.45	Itacora	CPRM	RIO PARAÍBA DO SUL
36	58743000	-21.31	-42.45	Usina Ituerê	CPRM	RIO POMBA
37	58758000	-21.31	-42.86	Astolfo Dutra	CPRM	RIO POMBA
38	58767000	-21.42	-43.01	Barra do Xopotó	CPRM	RIO XOPOTÓ
39	58787000	-21.09	-43.1	Usina Maurício	CPRM	RIO NOVO
40	58797000	-21.39	-42.69	Cataguases	CPRM	RIO POMBA
41	58804000	-21.4	-42.71	Aracati	CPRM	RIO POMBA
42	58805000	-21.53	-42.19	Santo Antônio de Pádua II	CPRM	RIO POMBA
43	58825000	-21.53	-42.15	Pimentel	CPRM	RIO GRANDE
44	58835000	-21.44	-42.35	Barra do Rio Negro	CPRM	RIO NEGRO
45	58867000	-21.4	-42.27	Dois Rios	CPRM	RIO GLÓRIA
46	58895000	-21.28	-42.27	Jussara	CPRM	RIO GLÓRIA
47	58910000	-21.18	-42.13	Laje do Muriaé	INEA-RJ	RIO MURIAÉ
48	58935000	-20.74	-42	Carangola	CPRM	RIO CARANGOLA
49	58950000	-20.9	-42.03	PCH Tombos Montante II	QUANTA	RIO CARANGOLA
50	58955000	-21.57	-42.12	CGH Comendador Venâncio	COMENDADOR	RIO MURIAÉ
51	58971000	-21.2	-41.88	Itaperuna	CPRM	RIO MURIAÉ
52	58972000	-21.14	-41.5	Cardoso Moreira	CPRM	RIO MURIAÉ
53	58972300	-21.75	-41.3	Campos dos Goytacazes	CPRM	RIO PARAÍBA DO SUL

- Informações sobre usinas hidrelétricas: O Rio Paraíba do Sul abriga diversas usinas hidrelétricas ao longo de seu curso principal, incluindo as UHEs Paraibuna, Santa Branca, Funil e Ilha dos Pombos, além de outras localizadas em seus afluentes, como Jaguari e Picada. Um dos aspectos mais relevantes do sistema energético da bacia é a transposição de água para o reservatório de Ribeirão das Lajes, no estado do Rio de Janeiro. Destaca-se, nesse contexto, o Complexo de Lajes, formado pelas usinas Fontes, Nilo Peçanha, Pereira Passos, Santa Cecília

e Vigário, que desempenham um papel estratégico tanto na geração de energia quanto na condução das águas para Ribeirão das Lajes, garantindo o abastecimento e a regularização da vazão na região (AVELLAR, 2015). A Figura 6 ilustra a localização das usinas na bacia e a Tabela 3 resume as principais características dessas instalações.

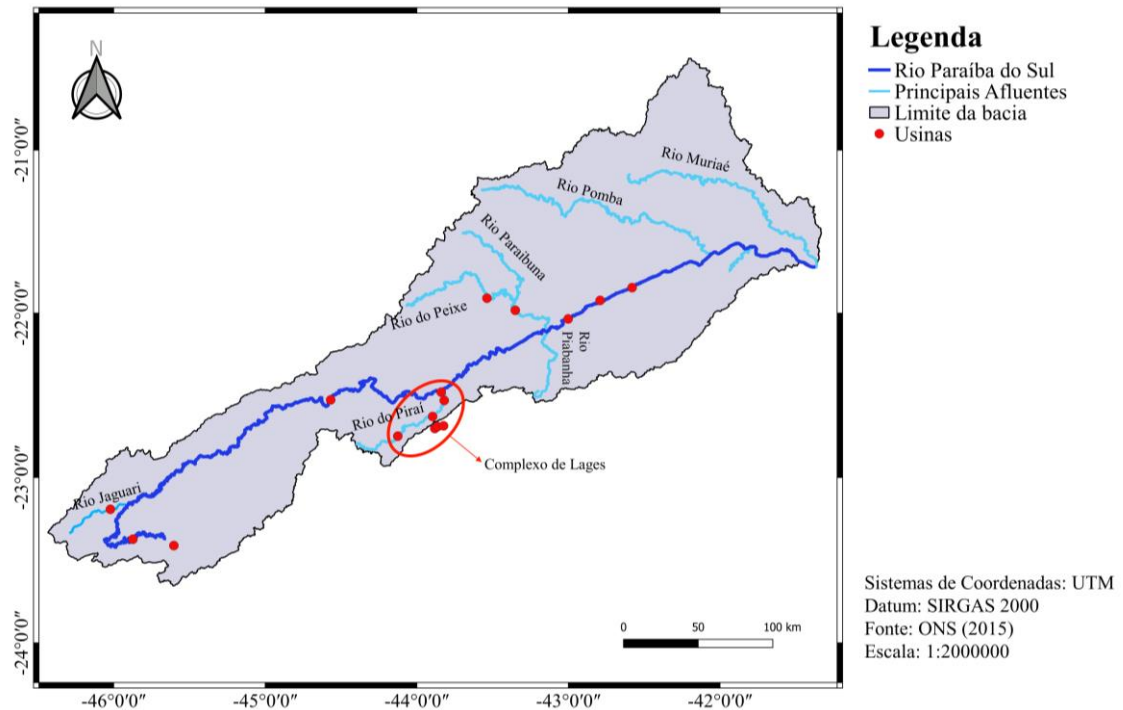


Figura 6 - Mapa da distribuição das usinas hidrelétricas na BRPS. Informações detalhadas sobre cada usina estão na Tabela 3 (Fonte: Santos, 2024)

Tabela 3 - Usinas Hidrelétricas na BRPS (CEIVAP, 2020)

Aproveitamento

Hidrelétrico	Potência [MW]	Rio	Município	Situação
Paraibuna	87	Rio Paraíba do Sul	Paraibuna - SP	Operando desde 1978
Santa Branca	64	Rio Paraíba do Sul	Santa Branca - SP	Operando desde 1969
Funil	216	Rio Paraíba do Sul	Resende - RJ	Operando desde 1969
Simplício	305.7	Rio Paraíba do Sul	Além Paraíba - MG	Operando desde 1966
Ilha dos Pombos	187	Rio Paraíba do Sul	Carmo - RJ	Operando desde 1924
Jaguari	27	Rio Jaguari	Jacareí - SP	Operando desde 1972
Picada	50	Rio do Peixe	Juiz de Fora - MG	Operando desde 2006
Sobragí	60	Rio Paraibuna	Belmiro Braga - MG	Operando desde 1998
Fontes	132	Complexo de Lages	Piraí - RJ	Operando desde 1940
Nilo Peçanha	380	Complexo de Lages	Piraí - RJ	Operando desde 1953
Pereira Passos	100	Complexo de Lages	Piraí - RJ	Operando desde 1962
Santa Cecília	15	Complexo de Lages	Piraí - RJ	Operando desde 1952
Vigário	146	Complexo de Lages	Piraí - RJ	Operando desde 1952

(2) Pré-Processamento

O pré-processamento é a etapa inicial na aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH, responsável por organizar e estruturar os dados geoespaciais e hidrológicos necessários para a modelagem. Essa fase é essencial, pois realiza a discretização da bacia hidrográfica em unidades menores, garantindo uma representação mais precisa dos processos hidrológicos.

Para a segmentação da BRPS, utilizou-se o plugin *IPH-Hydro Tools* (Manual MGB-IPH, 2018), integrado ao *software* QGIS. Esse procedimento permitiu a subdivisão da área de estudo em 2.582 mini-bacias, além da definição de 53 sub-bacias, estabelecidas a partir da localização dos postos fluviométricos selecionados para a calibração e validação do modelo.

Para iniciar o processo, foi realizada a correção do Modelo Digital de Elevação (MDE), que teve como objetivo a remoção de depressões espúrias, corrigindo inconsistências topográficas que poderiam comprometer a definição da rede de drenagem. A partir do MDE corrigido, foi gerado o mapa de direções de fluxo (*Flow Direction*), que possibilitou a determinação da trajetória do escoamento superficial em cada célula do modelo. Complementarmente, o cálculo da acumulação de fluxos (*Flow Accumulation*) permitiu estabelecer a hierarquia da rede hidrográfica, identificando as áreas de maior convergência de escoamento. Dessa forma, foi possível definir tanto a rede hidrográfica principal quanto seus afluentes (*Stream Definition*). A segmentação da rede fluvial foi conduzida de maneira a associar cada trecho de rio a sua mini-bacia correspondente, garantindo uma discretização espacial consistente.

A delimitação da bacia e sua subdivisão em mini-bacias foram realizadas com a ferramenta *Watershed Delineation*. Esse procedimento possibilitou a definição precisa dos limites da BRPS e sua subdivisão em unidades espaciais homogêneas, respeitando critérios geomorfológicos e hidrológicos.

A atribuição das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) utilizou o mapa de uso e cobertura da América do Sul, caracterizando as mini-bacias em termos de propriedades hidrológicas, tais como coeficientes de escoamento, capacidade de armazenamento no solo e evapotranspiração potencial.

Por fim, consolidou-se o pré-processamento com a geração do arquivo de entrada do modelo MGB-IPH (Mini.gtp). Esse arquivo reúne todas as informações espaciais estruturadas, incluindo a área de drenagem de cada mini-bacia, as coordenadas dos centroides, os comprimentos e declividades dos trechos fluviais e as frações das URHs associadas a cada unidade de discretização. A Figura 7 ilustra a organização espacial das mini-bacias e sub-bacias

delimitadas no pré-processamento, assim como a disposição dos postos fluviométricos selecionados para a calibração e validação do modelo.

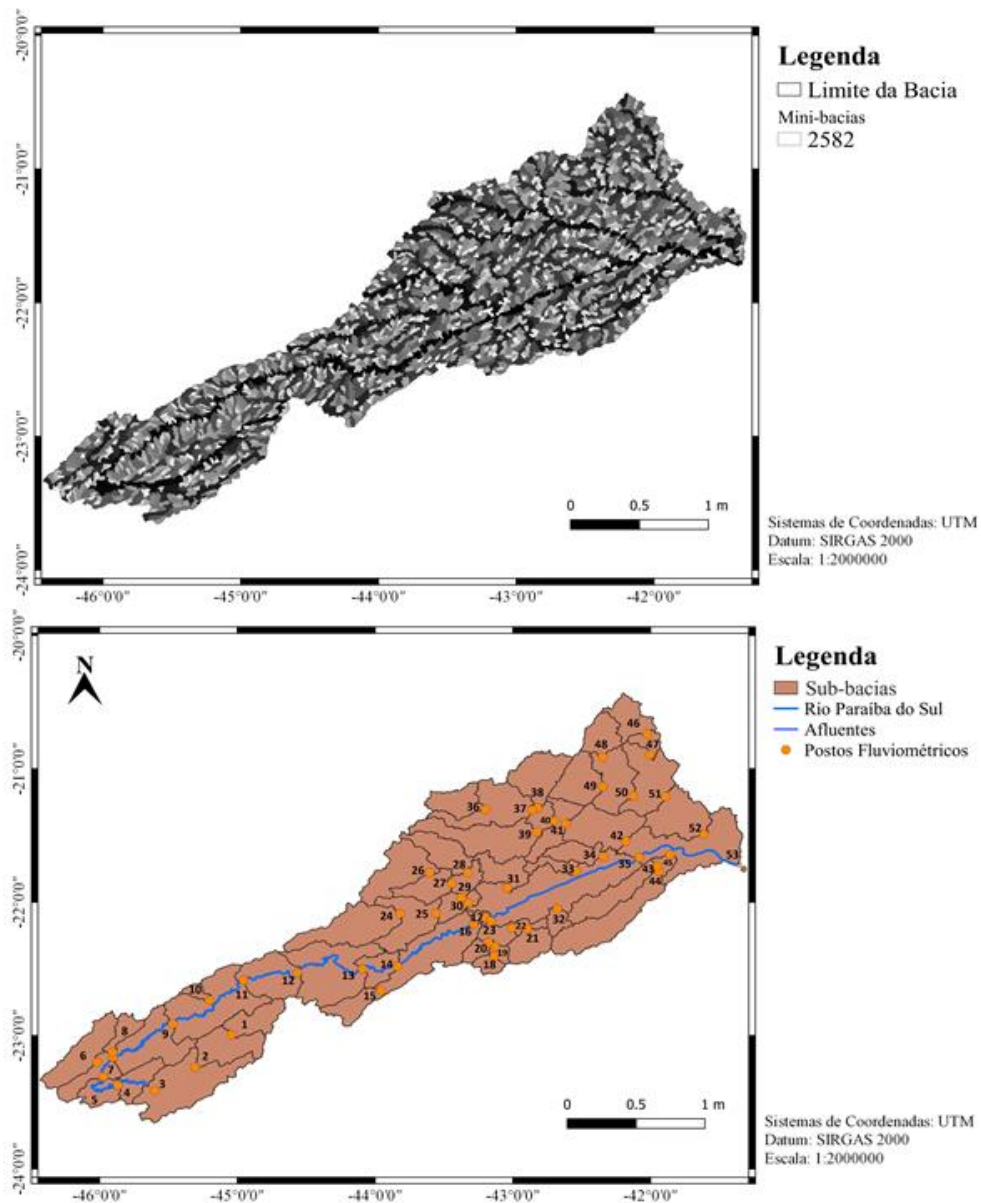


Figura 7 - Subdivisão da BRPS em 2.582 mini-bacias e 53 sub-bacias, com delimitação baseada no Modelo Digital de Elevação (MDE) e informações de drenagem (Fonte: Santos, 2024)

(3) Calibrar Modelo

O processo de calibração do modelo MGB-IPH para a BRPS foi conduzido com o objetivo de ajustar seus parâmetros e aprimorar a precisão das simulações. Para isso, foram utilizados dados os de precipitação do produto MERGE/CPTEC (ROZANTE et al., 2010), com a série temporal disponível desde 2010 até 2020 que antecede o período da simulação.

A avaliação do ajuste foi realizada por meio de métricas como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), o coeficiente de Nash-Sutcliffe logarítmico (NS_{log}) e o erro relativo de volume (ΔV).

O coeficiente de NS mede a capacidade do modelo de prever com precisão as vazões máximas, especialmente durante eventos de cheia (GUILHON, ROCHA, MOREIRA, 2007). Seu valor pode variar de $-\infty$ a 1, sendo que, segundo Moriasi (2007), valores superiores a 0,75 indicam um desempenho muito bom. Índices entre 0,65 e 0,75 caracterizam um desempenho bom, enquanto valores entre 0,50 e 0,65 são considerados satisfatórios. Já resultados inferiores a 0,50 classificam o modelo como inadequado.

Por sua vez, o coeficiente NS aplicado ao logaritmo das vazões (NS_{log}) representa melhor as vazões mínimas, tornando-se menos sensível aos eventos de cheia. Assim como o NS, seu valor máximo é 1, e quanto mais próximo desse limite, melhor a qualidade das previsões (GUILHON, ROCHA, MOREIRA, 2007). As equações 5, 6 e 7 apresentam as funções objetivo NS, NS_{log} e ΔV .

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (5)$$

$$NS_{log} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (\log Q_{obs} - \log Q_{cal})^2}{\sum_{t=1}^n (\log Q_{obs} - \log \overline{Q_{obs}})^2} \quad (6)$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{cal}) - \sum_{t=1}^n (Q_{obs})}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs})} \quad (7)$$

Onde: t indica o intervalo de tempo; n é o número de intervalos de tempo; Q_{cal} é a vazão calculada no posto; Q_{obs} é a vazão observada; $\overline{Q_{obs}}$ é a média das vazões observadas; V é o volume; e ΔV é o erro relativo adimensional deste volume.

Considerando que o foco do ajuste é a previsão de vazões de cheia, optou-se por atribuir um peso maior ao coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões diárias (Equação 5), pois ele favorece um melhor ajuste para as vazões mais elevadas.

A calibração do modelo envolveu o ajuste de diversos parâmetros, principalmente aqueles relacionados às características do solo e ao escoamento da água na bacia. Os parâmetros

calibráveis incluem a capacidade de armazenamento de água no solo (W_m), que influencia diretamente o balanço hídrico e depende do tipo de solo e vegetação, pois a retenção de água está relacionada à profundidade das raízes e à porosidade do solo. Além disso, a relação entre armazenamento e saturação (b) regula a partição entre escoamento superficial e armazenamento do solo, enquanto o coeficiente de drenagem subsuperficial (K_{int}) controla o volume de água que escoar subsuperficialmente das camadas do solo. O coeficiente de drenagem subterrânea (K_{bas}) regula a quantidade de água que se movimenta em camadas mais profundas, enquanto o parâmetro W_c atua como um limitador do escoamento subsuperficial e subterrâneo. Por fim, o parâmetro CAP representa a capilaridade do solo e pode ser ajustado para considerar a possibilidade de retorno da água subterrânea à superfície por meio do fluxo ascendente (COLLISCHONN et al., 2020). A Tabela 4 apresenta os principais parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH.

Tabela 4 - Parâmetros Calibráveis do MGB-IPH (Manual MGB-IPH, 2018)

Parâmetro	Significado	Valores típicos
W_m	Capacidade de armazenamento de água no solo	10 – 1500 [mm]
β	Forma da relação empírica entre fração de área saturada e armazenamento médio de umidade no solo	0,02 – 1,6 [-]
K_{bas}	Parâmetro de escoamento subterrâneo (drenagem muito lenta) – controle de volume na recessão e estiagem	0,01 – 5 [mm/dia]
K_{int}	Parâmetro de escoamento subsuperficial (drenagem intermediária)	0,01 – 50 [mm/dia]
W_c	Fração de W_m abaixo da qual não há geração de escoamento subterrâneo e subsuperficial	0,1 [-]
CAP	Fluxo de retorno da camada subterrânea para o solo (capilaridade)	0 [mm/dia]
CS	Parâmetro para calibração da propagação superficial, multiplicativo do tempo de concentração	5 – 35 [-]
CI	Parâmetro para calibração da propagação subsuperficial, multiplicativo do tempo de concentração	20 – 200 [-]
CB	Parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo	50 – 250 [dias]

No MGB-IPH, alguns parâmetros podem ser calibrados, enquanto outros, como os parâmetros da vegetação, são geralmente fixos. A área foliar (AF), por exemplo, pode ser determinada com razoável precisão para um determinado tipo de vegetação com base na literatura. A resistência superficial, por sua vez, é um parâmetro conceitual estimado para toda

a unidade de resposta hidrológica (URH), mas é considerada não-calibrável, pois o modelo apresenta baixa sensibilidade às suas variações (COLLISCHONN et al., 2020).

Em regiões onde há usinas hidrelétricas, a vazão defluente foi incorporada diretamente ao modelo para garantir uma representação mais fiel das vazões observadas. Já em áreas montanhosas, ajustes nos parâmetros de escoamento superficial foram necessários para corrigir a superestimação dos picos de vazão.

(4) Preparação dos Dados de Entrada

A integração dos dados meteorológicos provenientes dos modelos WRF e GFS com o modelo hidrológico MGB-IPH exigiu um processo de adaptação e interpolação. Foram desenvolvidos scripts para transformar os arquivos gerados pelos modelos atmosféricos em formatos compatíveis com o MGB-IPH.

O primeiro passo foi realizar a leitura dos dados binários, transformando-os em arquivos texto com informações de longitude, latitude e valores de precipitação acumulada para cada ponto da grade dentro da área de estudo. Os dados do mês de fevereiro, escolhido como período de teste, gerados a partir do WRF e do GFS, foram escritos em sequência com a série histórica de precipitação do produto MERGE, que abrange o período de 2010 a 2020. Essa integração ajuda o modelo hidrológico a manter a coerência nos padrões de previsão e aproveitar a série temporal para simulação.

Os dados meteorológicos foram interpolados para cada mini-bacia da BRPS utilizando o código Interplu. Este executável, escrito em Fortran, retorna um arquivo binário contendo os dados de chuva preparados para serem utilizados como entrada no MGB-IPH. Este processo também foi utilizado por Rodrigues (2012).

(5) Avaliação da Precisão do Modelo

A avaliação das simulações hidrológicas foi conduzida por meio de análises comparativas entre os hidrogramas simulados e observados, utilizando um conjunto de métricas estatísticas e gráficos de séries temporais de vazão. O desempenho das simulações foi avaliado a partir dos dados hidrológicos da BRPS durante o mês de fevereiro de 2020 (período de teste), considerando as simulações alimentadas pelos modelos atmosféricos WRF e GFS.

A análise inicial se baseou na eficiência do modelo em capturar a variabilidade hidrológica da bacia, utilizando três métricas principais de ajuste: NS, NSlog e ΔV . Essas métricas permitiram quantificar a aderência das vazões simuladas aos valores observados, tanto para a reprodução das vazões absolutas quanto para a representação dos eventos extremos.

Além dessas métricas principais, foram incorporadas métricas estatísticas adicionais para uma análise mais detalhada dos erros das simulações:

- Erro Médio Absoluto (EAM) – Mede a média dos erros absolutos entre as vazões simuladas e observadas, quantificando o desvio médio do modelo. Sua equação é dada por:

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{sim,i} - Q_{obs,i}| \quad (8)$$

Onde: $Q_{sim,i}$ representa a vazão simulada no instante i ; $Q_{obs,i}$ é a vazão observada; n é o número o número total de observações.

- Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) – Penaliza desvios maiores, enfatizando erros extremos que podem impactar a previsão hidrológica de eventos críticos. Sua equação é dada por:

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2} \quad (9)$$

- Erro Percentual Médio (PBIAS) – Mede o viés do modelo, indicando se ele tende a superestimar ou subestimar as vazões. Sua equação é dada por:

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs})}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs})} \quad (10)$$

Valores positivos de PBIAS indicam superestimação das vazões, enquanto valores negativos indicam subestimação.

Os resultados das métricas estatísticas foram avaliados para cada sub-bacia individualmente, possibilitando uma comparação detalhada do desempenho das simulações nas diferentes regiões da bacia. Além disso, gráficos de *boxplot* foram gerados para apresentar a distribuição dos coeficientes de ajuste (NS, NSlog e ΔV) antes e depois do processo de calibração do modelo MGB-IPH.

A análise dos hidrogramas foi realizada separadamente para as três regiões identificadas na BRPS, permitindo uma avaliação espacial do desempenho das simulações: Região 1 (Norte da BRPS), Região 2 (Região Serrana do Rio de Janeiro) e Região 3 (Centro-Sul da BRPS).

3. RESULTADOS

3.1 COMPORTAMENTO MÉDIO, EXTREMOS E TENDÊNCIA DA BRPS

Os resultados apresentados nesta seção foram publicados na revista *Climate*, volume 11, número 7, de 2023, sob o título “*Hydrological and Precipitation Extremes and Trends over the Paraíba do Sul River Basin, Brazil*”

3.2.1 Análise da Precipitação

A Figura 8 mostra os padrões anuais e mensais de precipitação, bem como a distribuição espacial da precipitação na BRPS entre 1939 e 2020. A média e o desvio padrão dos valores mensais acumulados de precipitação (Figura 8-a) evidenciam a influência do Sistema de Monção da América do Sul, com verões chuvosos e invernos secos, corroborando estudos como os de Reboita et al. (2010), Marengo et al. (2012), Wang et al. (2020) e Teodoro et al. (2022). Com base nos resultados, a estação seca foi definida pelos meses em que a precipitação acumulada média ficou abaixo de 150 mm (abril a outubro) e a estação chuvosa pelos meses com valores acima de 150 mm (novembro a março). Durante o inverno austral, por exemplo, em JJA, as taxas de precipitação na BRPS ficaram abaixo de 50 mm, enquanto no verão austral, em DJF, foram registrados valores acima de 200 mm. Esses resultados são consistentes com os encontrados por Silva e Kousky (2012), que descreveram o regime de monções na América do Sul como apresentando um ciclo anual de precipitação bem definido, no qual algumas regiões do centro e leste do Brasil e da Cordilheira dos Andes recebem 50% da precipitação anual total durante o verão austral e menos de 5% dessa precipitação anual durante o inverno austral.

O *boxplot* (Figura 8-b) apresenta os valores anuais acumulados de precipitação na BRPS de 1939 a 2020. Anos com taxas de precipitação acumulada mais baixas, como 1963 e 2014, tiveram valores abaixo de 1.000 mm/ano. Ambos os anos também foram destacados por Silva (2018) e Nobre et al. (2016) como extremamente secos para a região sudeste do Brasil. Em 2014, Coelho et al. (2016) identificaram que um dos fatores responsáveis pelo déficit significativo de precipitação durante o verão de 2013/2014 foi o término precoce da estação úmida, enquanto Da Costa et al. (2018) apontaram que os verões de 2013/2014 e 2014/2015 no sudeste do Brasil apresentaram déficits significativos de precipitação, resultando em fluxos reduzidos e condições de seca que impactaram a disponibilidade de água para diferentes setores econômicos e sociais.

A distribuição espacial das taxas médias anuais de precipitação na BRPS (Figura 8-c) revela que os valores mais altos (superiores a 2.100 mm/ano) são registrados na fronteira entre os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Os valores médios anuais mais altos de precipitação acumulada foram observados em regiões montanhosas, como Fazenda Agulhas Negras, com 2.385 mm (1.242 m), e Visconde de Mauá, com 2.234 mm (1.030 m), ambas na Serra da Mantiqueira. Esses resultados estão em concordância com os apresentados por Brasiliense et al. (2020), que associaram valores mais altos de precipitação a áreas localizadas em altitudes superiores a 2.000 m. No entanto, a região do Baixo Paraíba do Sul, localizada no norte e noroeste do Rio de Janeiro e caracterizada como uma depressão (Figura 2), apresenta valores anuais de precipitação abaixo de 1.000 mm/ano.

As diferenças nos valores acumulados anuais de precipitação podem ser atribuídas, em uma escala mais ampla, à circulação vale-montanha, na qual a precipitação é induzida pelo forçamento orográfico e apresenta um gradiente intenso em direção a regiões de maior altitude. Espinoza et al. (2015) analisaram como os efeitos orográficos e a exposição aos ventos influenciam fortemente o gradiente anual de precipitação, destacando o aumento da precipitação em áreas de maior altitude devido ao forçamento orográfico e à circulação regional. De modo geral, as análises dos padrões espaciais de precipitação estão alinhadas com os resultados de Santana et al. (2020) e Brasiliense et al. (2020), que utilizaram diferentes conjuntos de dados.

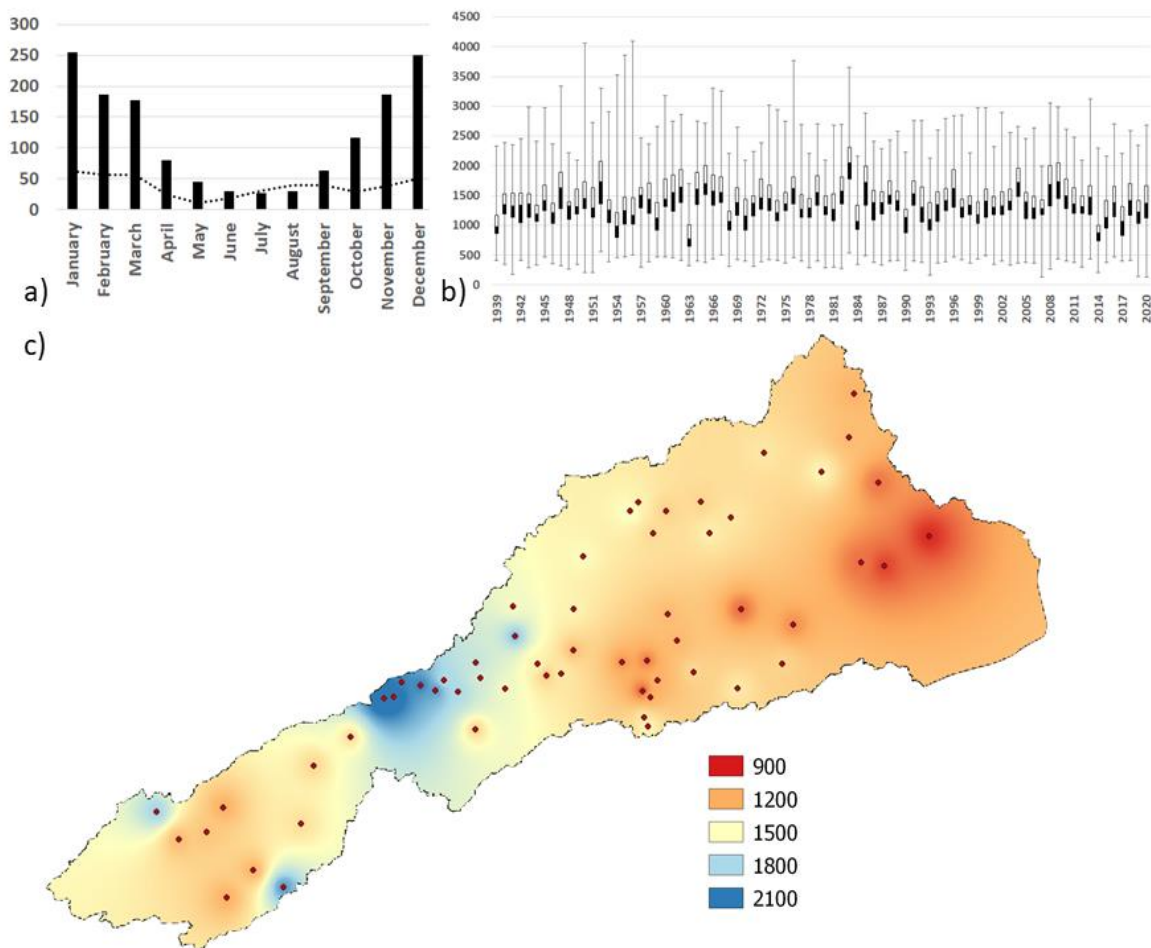


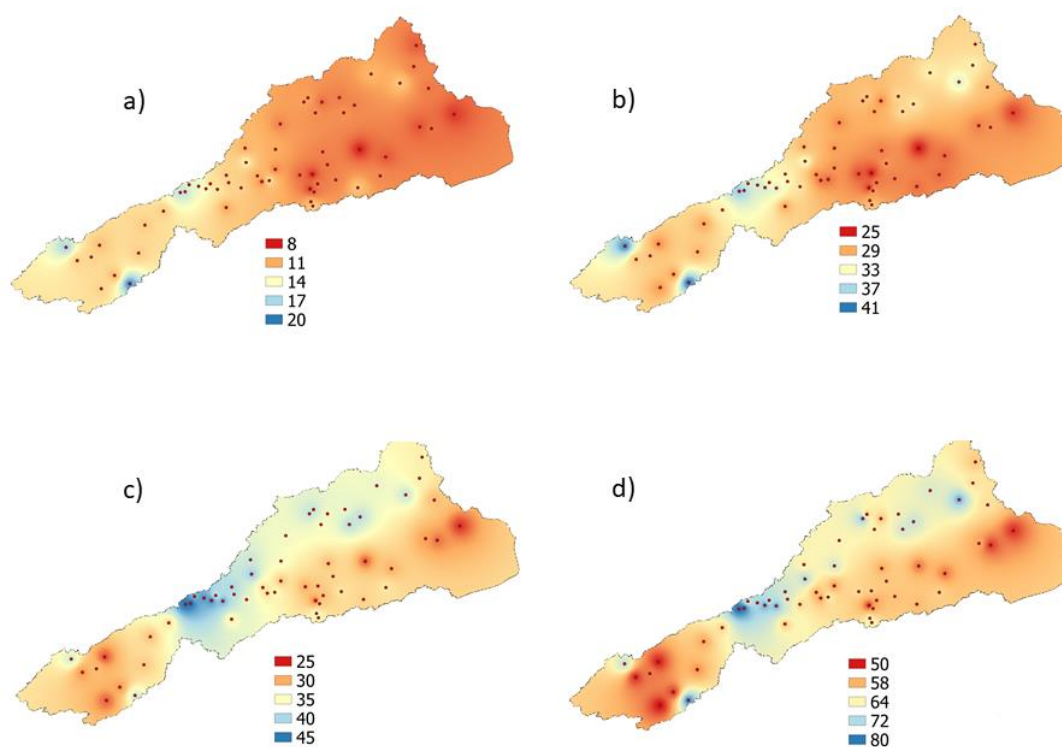
Figura 8 - Distribuição da precipitação de 1939 a 2020: (a) Média mensal e desvio padrão; (b) *Boxplot* dos totais anuais; (c) Distribuição espacial das taxas médias anuais de precipitação registrada nas estações pluviométricas (pontos vermelhos).

A Figura 9 exibe a distribuição espacial dos limiares p95 e p99 para eventos de chuva extrema e muito extrema durante as estações seca e chuvosa. Com base na análise dos totais anuais de precipitação, os valores mais altos dos limiares estão concentrados em regiões de altitudes elevadas, incluindo a Serra da Mantiqueira. Em algumas localidades, o limiar para eventos extremos registrados durante a estação chuvosa é mais que o dobro do limiar observado na estação seca, característica típica do regime de precipitação associado às monções sul-americanas.

O limiar p95 na BRPS varia entre 8 e 20 mm por dia durante a estação seca e entre 25 e 45 mm por dia durante a estação chuvosa. Os valores dos limiares p99, que indicam eventos muito extremos, seguem a mesma distribuição espacial. Durante a estação seca, esses valores

variam de 25 a 41 mm por dia, enquanto na estação chuvosa variam de 50 a 80 mm por dia, com os valores acima de 80 mm/dia concentrados na região da Serra da Mantiqueira.

Ao longo do Sudeste do Brasil, onde a BRPS está localizada, uma variabilidade significativa nos limiares de extremos de precipitação também é observada em outros estudos,



como os de Silva Dias et al. (2012), dos Reis et al. (2018) e Costa et al. (2020).

Figura 9 - Distribuição espacial dos limiares de precipitação extrema a) p95 e b) p99 [mm] para a estação seca, e c) p95 e d) p99 para a estação chuvosa. Os pontos vermelhos indicam a localização das estações de chuva.

Na Figura 10, são apresentados os locais com tendência significativa (positiva ou negativa) calculada a partir das taxas mensais acumuladas de precipitação durante as estações seca e chuvosa. Das 58 estações de chuva analisadas, apenas 9 apresentaram uma tendência significativa durante a estação seca (Figura 10-a). Entre essas, 8 indicaram um aumento nas taxas de precipitação, sendo três delas localizadas na região de maior altitude do estado do Rio de Janeiro. As estações restantes estavam distribuídas pela bacia, nos estados de Minas Gerais e São Paulo, próximas ao limite superior da bacia. Apenas uma estação de chuva apresentou uma tendência negativa, enquanto a maioria das estações não apresentou nenhuma tendência.

Durante a estação chuvosa (Figura 10-b), 14 estações revelaram tendências significativas: 8 negativas e 6 positivas. Não foi encontrada uma tendência clara,

particularmente durante a estação chuvosa, o que também foi confirmado por outros estudos que analisaram as tendências de precipitação na BRPS, como Santana (2020), que utilizou dados de 92 estações de chuva cobrindo o período de 1970 a 2018, e Gomes et al. (2021), que analisou dados de 86 estações de chuva abrangendo o período de 1988 a 2018.

No entanto, destacam-se as tendências positivas nas taxas mensais de precipitação na região montanhosa do Rio de Janeiro durante as estações seca e chuvosa, especialmente na região da Serra dos Órgãos, próxima aos municípios de Três Rios, Teresópolis e Petrópolis. Essa região registrou 119 desastres naturais entre 2001 e 2016, causados por eventos de precipitação intensa com registros acima de 100 mm/dia (ALVES et al., 2022). O terreno complexo e o uso intensivo da terra na área, particularmente a ocupação em encostas, potencializam os riscos de danos econômicos e perdas de vidas associadas a taxas intensas de precipitação. Por exemplo, em 15 de fevereiro de 2022, uma acumulação de 210 mm de chuva em apenas 3 horas causou deslizamentos de terra e inundações repentinas, resultando em 233 mortes e deixando 800 pessoas desabrigadas em Petrópolis (ALCÂNTARA et al., 2022).

Portanto, as tendências positivas na precipitação podem indicar riscos mais elevados para esta região.

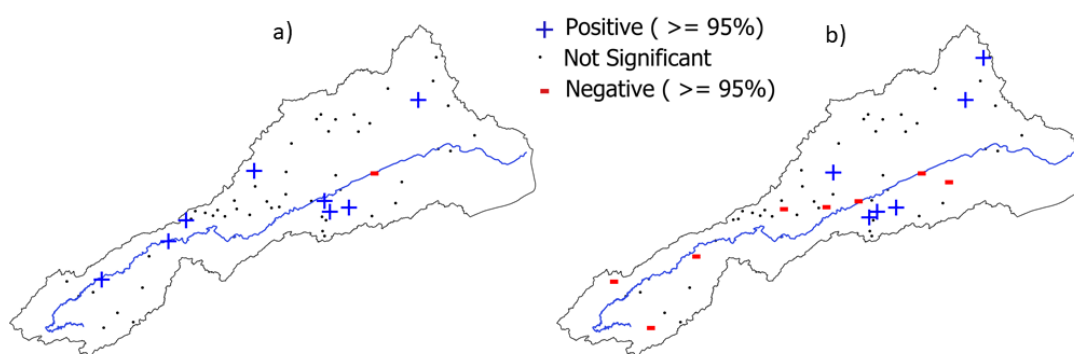


Figura 10 - Tendência dos totais mensais de precipitação nas estações de chuva de 1939 a 2020 considerando a) estação seca e b) estação chuvosa.

A Figura 11 apresenta os resultados das tendências do teste de MK associadas ao número de dias por ano acima dos limiares p95 e p99 para as estações seca e chuvosa. Em todas as análises, a maioria dos locais não apresentou uma tendência significativa. No entanto, houve uma maior ocorrência de tendências para extremos muito intensos (p99) do que para extremos intensos (p95).

Durante a estação seca, o limiar p95 indicou apenas quatro estações com tendência significativa: duas com aumento e duas com diminuição. Para a estação chuvosa, as localidades

com tendência positiva de eventos extremos acima do limiar p95 estavam concentradas principalmente em duas regiões: no extremo norte da bacia, no estado de Minas Gerais, e na parte central da bacia, abrangendo os municípios de Juiz de Fora, em Minas Gerais, e Petrópolis, no Rio de Janeiro. Por outro lado, cinco estações com tendências negativas não apresentaram um padrão claro de distribuição espacial.

Em contraste, o limiar p99, que avalia a ocorrência de eventos de precipitação muito extremos, mostrou 11 locais com tendências significativas durante a estação seca, com a maioria indicando tendências crescentes e localizadas na parte central da BRPS. Isso sugere que o número de eventos de chuva muito intensa nessa região está se tornando mais frequente. Da mesma forma, na estação chuvosa, estações com tendências positivas de eventos extremos acima do limiar p99 foram encontradas. A região nordeste da bacia, sobre o estado de Minas Gerais, destacou-se pela maior concentração de estações com tendências positivas para eventos muito intensos acima de 64 mm/dia. Por outro lado, tendências negativas estavam concentradas no sul da bacia, especificamente no estado de São Paulo.

Vale ressaltar que Gomes et al. (2021) indicaram um aumento de 10% na probabilidade de ocorrência de eventos extremos em toda a bacia, enquanto Marengo e Alves (2005) evidenciaram uma maior variabilidade espacial ao analisar a precipitação extrema na região.

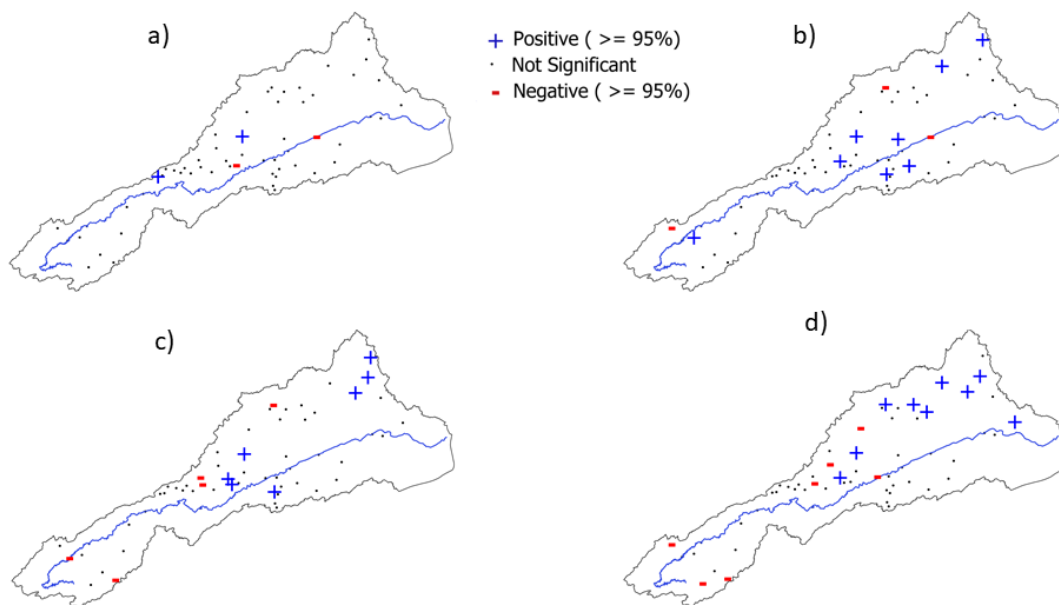


Figura 11 - Tendência no número de dias acima dos limiares a) p95 e b) p99 durante a estação seca, e c) limiares p95 e d) p99 durante a estação chuvosa.

3.2.2 Análise da Vazão

A Figura 12 apresenta a distribuição da vazão específica média anual nas estações fluviométricas analisadas na BRPS. A vazão específica é uma variável hidrológica que expressa a relação entre a vazão e a área da bacia hidrográfica. Sua unidade de medida é litros por segundo por quilômetro quadrado [$L/s/km^2$], resultante da divisão da vazão média pelo tamanho da bacia contribuinte [km^2], multiplicada por 1000 [$m^3/s \times 1000 = L/s$]. Na maior parte da bacia, incluindo o rio principal, Paraíba do Sul, as taxas de vazão específica variam entre 12 e 19 [$L/s/km^2$].

Na porção central da bacia, destacam-se dois clusters com taxas de vazão específica ligeiramente mais altas, acima de 19,7 [$L/s/km^2$]: um localizado no estado de Minas Gerais e outro no estado do Rio de Janeiro. A região da bacia que apresenta os valores mais elevados está concentrada em áreas de maior altitude, que também registraram as taxas de precipitação acumulada mais altas, como a Serra da Mantiqueira. Nessa região, três estações de monitoramento de fluxo de água apresentaram uma média anual superior a 42 [$L/s/km^2$].

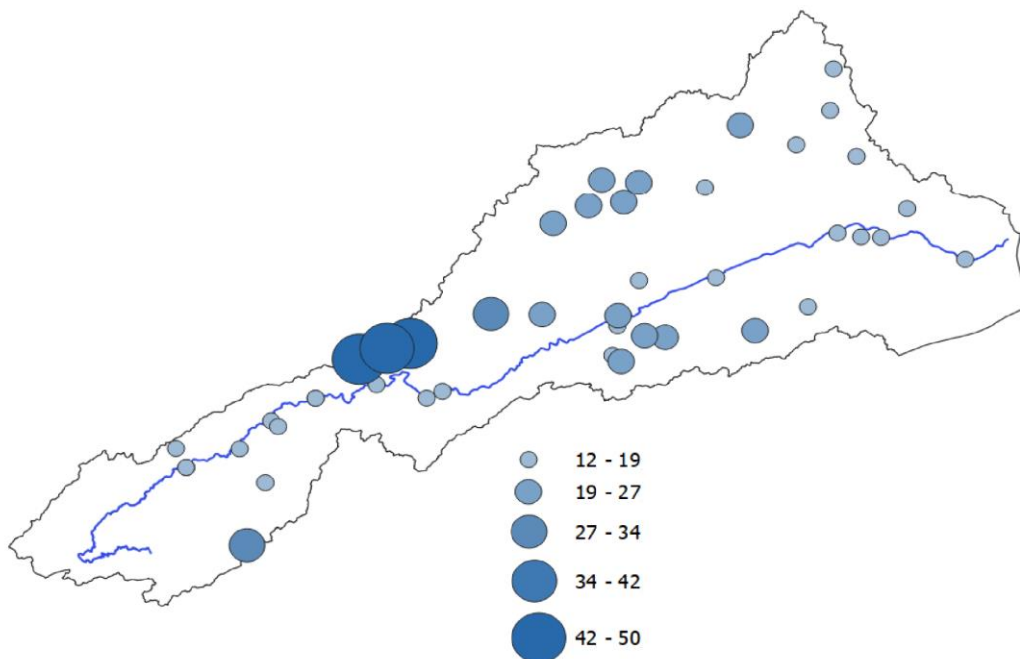


Figura 12 - Distribuição espacial das taxas médias mensais de vazão específica registradas nas estações fluviométricas entre 1939 e 2020.

Os valores de eventos extremos para a média da vazão específica, calculadas com base nos limiares p95 e p99 para as estações seca e chuvosa, são apresentados na Figura 13. Durante a estação seca, para a maioria das estações de fluxo de água, os valores p95 não ultrapassam 21 [L/s/km²]. No entanto, em locais com médias anuais mais altas, os valores extremos podem atingir 42 [L/s/km²], especialmente em regiões de maior altitude, onde a precipitação anual é mais intensa.

Na estação chuvosa, os valores extremos são mais elevados, revelando uma variabilidade sazonal significativa. O limiar mínimo p95 para a estação chuvosa é superior a 35 [L/s/km²], e, em altitudes mais elevadas próximas à Serra da Mantiqueira, pode superar 144 [L/s/km²]. O limiar p99 apresenta valores ainda mais extremos, acima de 230 [L/s/km²]. Na maior parte dos locais da BRPS, os extremos associados ao limiar p99 ficam acima de 115 [L/s/km²].

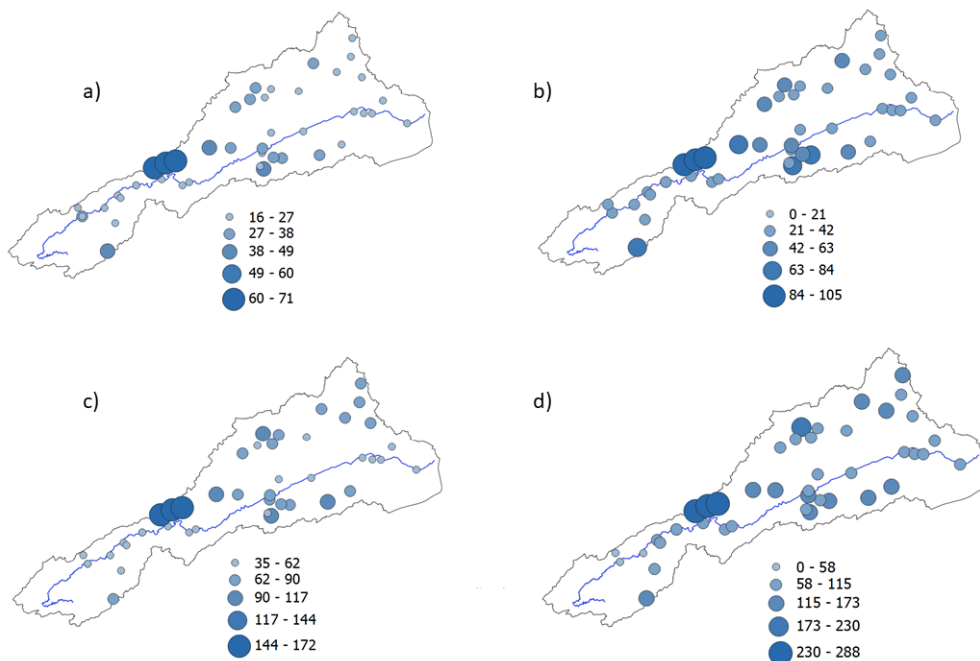


Figura 13 - Distribuição espacial dos valores extremos de vazão específica [L/s/km²] para a estação seca nos percentis a) p95 e b) p99, e para a estação chuvosa nos percentis c) p95 e d) p99.

Ao contrário das tendências de precipitação, a análise de tendência do teste de MK aplicada às taxas mensais de vazão específica (Figura 14) revela que muitos locais apresentam uma tendência significativa (quase 50%), predominantemente negativa, durante as estações seca e chuvosa. A maioria dos locais com tendências negativas está localizada ao longo do Rio Paraíba do Sul, onde grandes áreas urbanas, com populações elevadas e atividades econômicas

que consomem água, como indústrias e agricultura, estão situadas. Esse resultado é consistente com o estudo de Marengo e Alves (2005), que sugeriu que os baixos níveis do fluxo do Rio Paraíba do Sul poderiam ser atribuídos à maior demanda de água, e não a um sinal claro de mudança climática, uma vez que as tendências de precipitação não apresentam resultados semelhantes. Andrade e Ribeiro (2020) também concluíram que o comportamento hidrológico da maior parte da BRPS apresentou uma diminuição na disponibilidade de água entre cenários de uso da terra de 1986 a 2015.

O subtópico 3.2.3 examinará mais detalhadamente a influência do processo de urbanização e da consequente maior demanda de água nas tendências negativas observadas. Uma das hipóteses consideradas foi a influência dos reservatórios e da transposição de água para o sistema Guandu em algumas das tendências negativas identificadas. Estações de fluxo de água próximas à represa de Funil – uma a jusante e duas a montante – mostraram tendências negativas durante a estação chuvosa, mas apenas uma apresentou essa tendência durante a estação seca. O local mais próximo de onde ocorre a transposição para o sistema Guandu mostrou tendências negativas apenas durante a estação seca.

Embora algumas dessas estações apresentem tendências negativas, ainda não é possível inferir a influência direta do reservatório e da transposição de água, uma vez que existem outros locais ao longo dessa área sem tendências significativas. Além disso, a maioria dos dados disponíveis é posterior à construção desses sistemas. Em relação às estações com uma tendência positiva de vazão específica, foram observados apenas dois registros durante a estação chuvosa. Na estação seca, alguns locais apresentaram tendências positivas, particularmente no norte do estado do Rio de Janeiro.

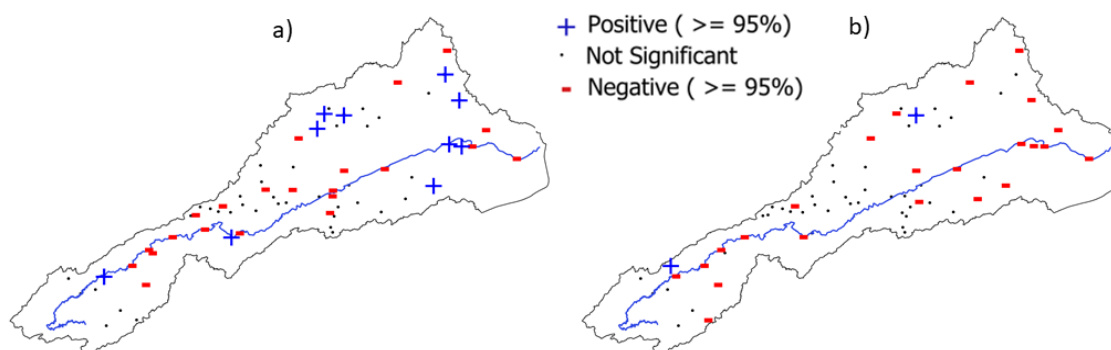


Figura 14 - Tendência das taxas médias mensais de vazão específica nas estações fluviométricas de 1939 a 2020 para a estação a) seca e b) chuvosa.

A Figura 15 exhibe as tendências nas taxas de vazão específica com valores extremos (conforme mostrado na Figura 13) para a BRPS, analisadas separadamente para as estações seca e chuvosa. Os resultados indicam que o número de locais com tendências significativas é menor durante a estação seca em comparação com a estação chuvosa. Isso pode ser atribuído aos padrões climáticos da região, onde sistemas convectivos associados a eventos de chuvas intensas são mais frequentes na estação chuvosa.

Durante a estação chuvosa, um número significativo de locais na parte central da BRPS apresentou tendências positivas para eventos extremos de vazão específica. Essa região montanhosa, que inclui as cidades de Petrópolis e Teresópolis, é amplamente conhecida por episódios de inundações e deslizamentos de terra (ALVES et al., 2022; DIAS et al., 2018). Portanto, é essencial investigar se os eventos de enchentes e deslizamentos estão relacionados aos eventos extremos de taxas de vazão específica ou a outros fatores, como características do solo e mudanças no uso da terra.

Alterações no uso da terra, como desmatamento e urbanização, podem afetar significativamente o ciclo hidrológico e aumentar a probabilidade de eventos de inundação e deslizamentos de terra. Essas mudanças reduzem a capacidade de infiltração do solo, aumentam o escoamento superficial e modificam rios e planícies de inundação, contribuindo para a ocorrência de eventos extremos (DA ENCARNAÇÃO PAIVA et al., 2020).

Compreender os fatores que impulsionam os eventos extremos de taxas de escoamento e sua relação com enchentes e deslizamentos de terra é crucial para o desenvolvimento de estratégias e políticas eficazes que mitiguem os impactos desses eventos na sociedade e no meio ambiente. Isso exige esforços interdisciplinares que integrem conhecimentos de hidrologia, climatologia, ecologia e ciências sociais, fornecendo uma visão abrangente das interações complexas entre os sistemas naturais e humanos na BRPS.

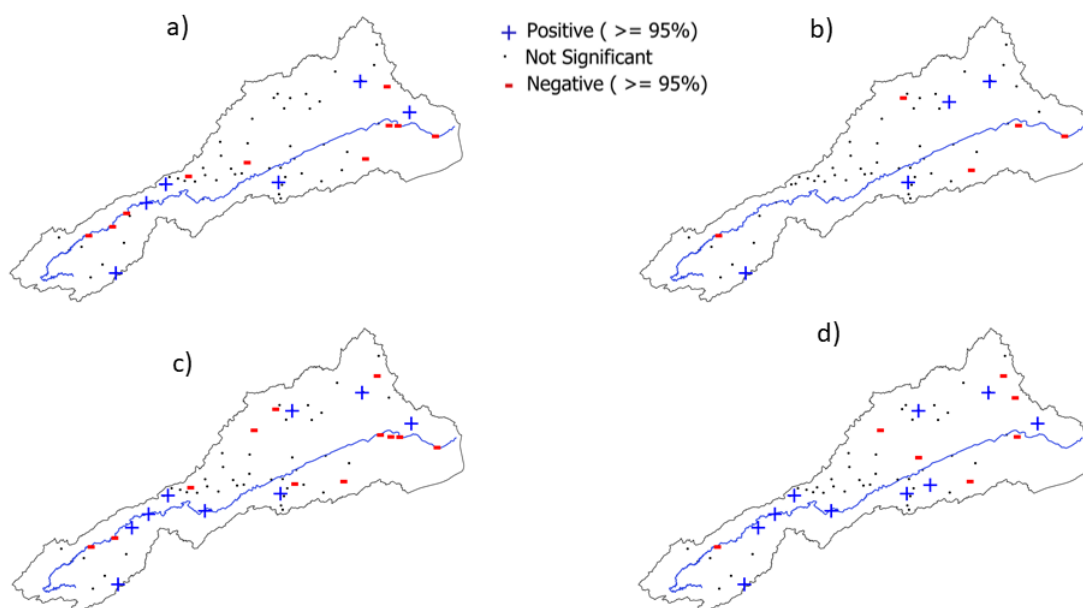


Figura 15 - Tendência da ocorrência de eventos de taxas extremas de vazão específica nas estações de fluviométricas acima dos limiares percentuais a) p95 e b) p99 durante a estação seca, e acima dos limiares percentuais c) p95 e d) p99 durante a estação chuvosa.

3.2.3 Análise da influência urbana no padrão de vazão

A maioria dos locais na BRPS não apresentou tendências estatisticamente significativas de precipitação a um nível de confiança de 95%, embora as taxas de vazão específica na área tenham mostrado quase 50% dos locais com tendências negativas. Esse resultado sugere o impacto do crescimento urbano na hidrologia da bacia, uma vez que a população urbana na região aumentou significativamente nas últimas décadas (MARENGO; ALVES, 2005; PAIVA et al., 2020).

De acordo com o IBGE (2010), a população total da bacia, incluindo todos os municípios situados integral ou parcialmente dentro de seus limites, era de aproximadamente 2,3 milhões de pessoas em 1940. Esse número cresceu para cerca de 5,1 milhões em 1991 e atingiu aproximadamente 8,4 milhões em 2010. O crescimento das áreas urbanas pode ser atribuído a diversos fatores, como migração decorrente da industrialização e do desenvolvimento econômico.

A Figura 16 nos itens a e b ilustram, respectivamente, a evolução da população e das áreas urbanas na BRPS. Em 1985, a área urbana na região abrangia 3.558,071 km², aumentando para 10.554,542 km² em 2021, concentrando-se predominantemente ao redor do Rio Paraíba do Sul, especialmente na porção inferior da bacia, localizada no estado de São Paulo (Figura 17). De acordo com o Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos da BRPS

(CEIVAP, 2020), a densidade populacional média na bacia é de aproximadamente 123 habitantes por quilômetro quadrado, com uma taxa de urbanização de 91,8%.

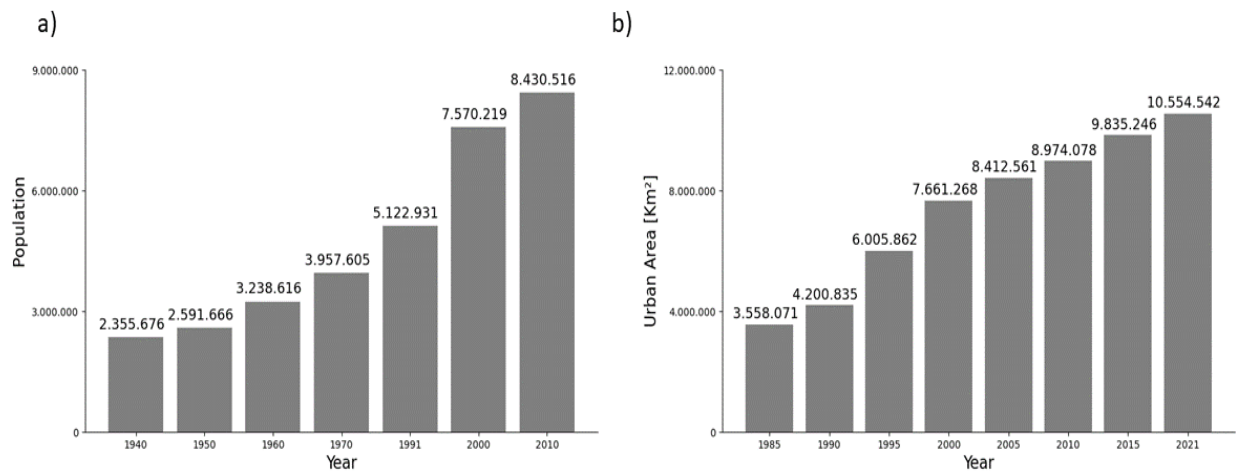


Figura 16 - a) População na BRPS de 1940 a 2010 (IBGE, 2010) e b) área urbana [km²] de 1985 a 2021 (MAPBIOMAS, 2021).

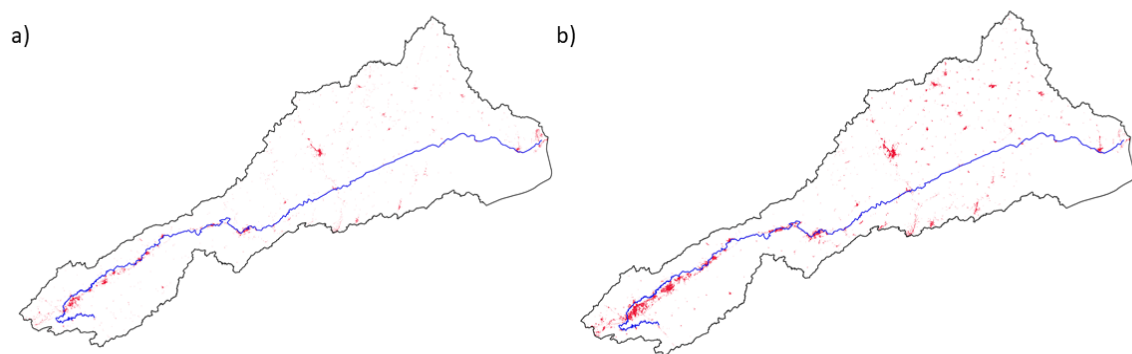


Figura 17 - Área urbana (em vermelho) da BRPS em a) 1985 e b) 2021. A linha azul indica o curso do Rio Paraíba do Sul.

A Figura 14 mostrou uma tendência decrescente de vazão específica ao longo da bacia, especialmente na parte central. À luz da Figura 16 e da Figura 17, o papel da urbanização pode ser um fator determinante nas mudanças nos padrões de uso da água, especialmente em um contexto no qual o sinal das mudanças nos padrões de precipitação se torna incerto. A Figura 18 apresenta a demanda de água na BRPS entre 1940 e 2020 (histórico) e 2040 (projeção), de acordo com a ANA (2019).

O aumento acentuado na demanda de água foi particularmente evidente entre 1940 e 1980 (Figura 18 a, b), período marcado pelo início da industrialização pesada (VIEIRA, 2014).

Entre 1980 e 2020 (Figura 18 c, d), período caracterizado pelo estabelecimento da atividade industrial e pela explosão populacional, a demanda de água continuou crescendo, com avanços especialmente na porção central da BRPS.

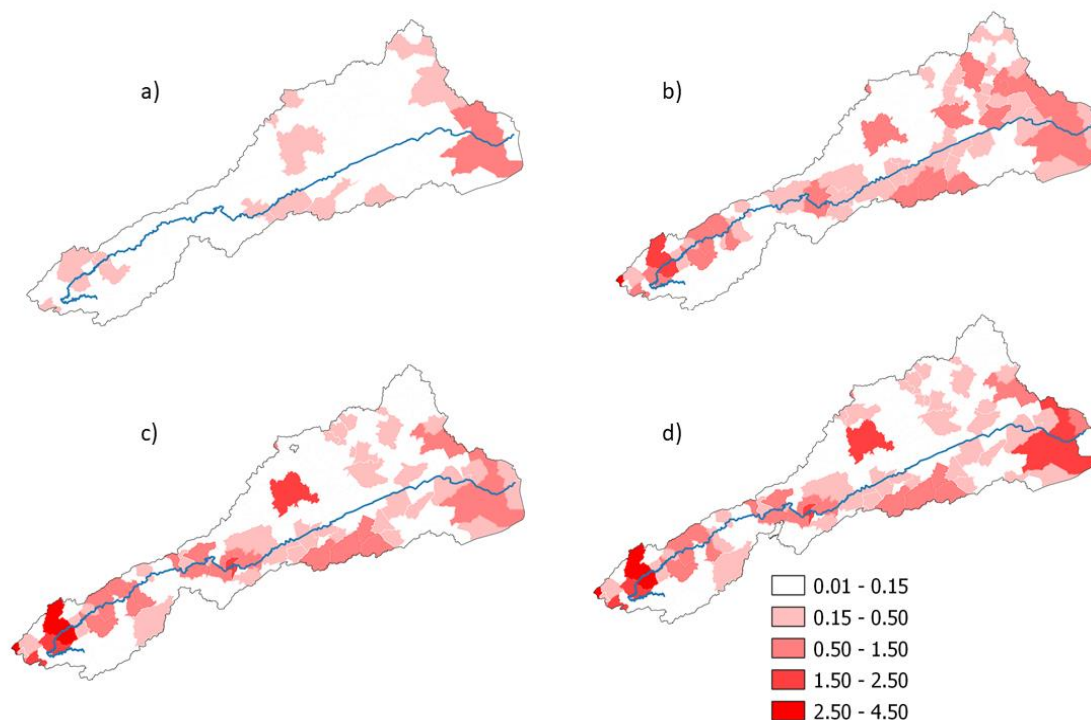


Figura 18 - Demanda hídrica [m^3/s] na BRPS, capturando a quantidade de água retirada e consumida, sem retorno direto para o corpo d'água, em: a) 1940, b) 1980, c) 2020 e d) 2040 (prognóstico).

Ao longo da literatura, as modificações nos regimes de fluxo devido à urbanização foram amplamente estudadas, especialmente na América do Norte (por exemplo, VIGER et al., 2011; GERARD et al., 2021; KAUFMANN et al., 2007). Yang et al. (2010) investigaram os efeitos da urbanização nos regimes de fluxo na Bacia do Indiana (América do Norte) e mostraram que a intensidade urbana tem um impacto significativo nas variáveis hidrológicas. Os resultados apontam para uma redução na fração de tempo em que o fluxo diário excede o fluxo médio e um aumento na frequência de eventos de alto fluxo, atribuídos à urbanização. Essas descobertas corroboram os resultados apresentados na Figura 14 e na Figura 15, onde tendências negativas de vazão específica coincidem com áreas de tendências positivas para os eventos extremos. Em termos de mudanças climáticas, esses achados são consistentes com tendências futuras de expansão urbana, nas quais se espera que as vazões de pico aumentem em frequência em um futuro próximo (ZHAO et al., 2016).

Yu et al. (2023) investigaram a relação entre o fluxo de água e a urbanização na área metropolitana de Las Vegas. Os autores identificaram um aumento abrupto nas vazões de pico

desde meados da década de 1990 e apontaram para uma mudança na sazonalidade das inundações, atribuída às interações entre drivers hidrometeorológicos e urbanização. Além disso, o fenômeno El Niño-Oscilação Sul foi destacado como um modulador importante do regime de fluxo, devido aos seus impactos na precipitação extrema na região.

Em contraste, Hubbart e Zell (2013) argumentam que a suposição de que a urbanização reduz os fluxos de base pode não ser válida para todas as bacias hidrográficas em processo de urbanização. Seus resultados indicaram que, apesar do crescimento populacional, nenhuma tendência estatisticamente significativa foi detectada de 1967 a 2010 na bacia do Hinkson Creek (Missouri, EUA). No entanto, os fluxos de base apresentaram uma leve, mas insignificante, tendência de redução. De maneira geral, as contribuições compensatórias para os fluxos de base (por exemplo, irrigação, linhas de esgoto e efluentes de águas residuais) podem distorcer mudanças fundamentais nos caminhos hidrológicos. Essa não linearidade e complexidade exigem investigações adicionais e cautela na avaliação dos efeitos antropogênicos sobre as variáveis hidrológicas.

3.2 SELEÇÃO DO PERÍODO DE TESTE

O mês de fevereiro de 2020 foi escolhido como período de teste para a simulação devido à ocorrência de diversos eventos extremos de precipitação registrados na BRPS. A seleção desse mês baseou-se na análise da série histórica de dados de precipitação e vazão, evidenciando volumes de chuva que ultrapassaram o percentil de 95% em várias estações pluviométricas da bacia.

Na Tabela 4 são apresentados os eventos extremos de precipitação ao longo de fevereiro de 2020, considerando as estações que registraram volumes superiores a 25 mm, valor estabelecido na Figura 9-c como o limiar do percentil de 95% para a estação chuvosa na BRPS. Três períodos de chuvas intensas foram identificados.

O primeiro período ocorreu entre os dias 3 e 6 de fevereiro, quando diversas estações registraram chuvas significativas, como Cataguases, com 86 mm no dia 3, e Fazenda São Gabriel, com 60 mm. O transbordamento dos rios Itabapoana, Muriaé e Carangola causou inundações em oito cidades das regiões Norte e Noroeste do Rio de Janeiro, incluindo Itaperuna, Porciúncula e Santo Antônio de Pádua. No total, mais de 6 mil pessoas ficaram desalojadas ou desabrigadas, sendo Itaperuna a cidade mais afetada, com 2.040 desalojados e 28 desabrigados (G1, 2020a). As chuvas também atingiram a Zona da Mata mineira, deixando 25 cidades em estado de emergência. Em Carangola, 2.284 pessoas ficaram desalojadas e 45 desabrigadas; a prefeitura ofereceu atendimento psicológico e vacinação contra hepatite A para os afetados. Espera Feliz registrou cerca de 300 desabrigados e 1.700 desalojados, com esforços de limpeza realizados por voluntários e prefeituras vizinhas (G1, 2020b).

O segundo período importante ocorreu entre os dias 11 e 13 de fevereiro, com destaque para o dia 13, quando a estação Cataguases registrou 124 mm, e a estação Fazenda Umbaúbas atingiu 235 mm, valores excepcionalmente altos que ultrapassaram em 340% o limiar de 99%. Durante este período, Muriaé enfrentou novas inundações, levando a prefeitura a cancelar os eventos de Carnaval para redirecionar recursos às vítimas, com economia estimada de R\$ 60 mil (G1, 2020c). O período foi marcado por deslizamentos de terra e enchentes em cidades como Muriaé, Além Paraíba e Recreio, causando interrupções em estradas e obrigando a evacuação de áreas de risco. Em Muriaé, os rios Muriaé e Preto subiram mais de 1,5 metros em poucas horas, resultando em enchentes que deixaram 31 pessoas desabrigadas. No município de Natividade, o Rio Carangola atingiu 5,80 metros, ultrapassando em 65 centímetros a cota de transbordo, o que causou inundações e danos significativos. Além Paraíba também enfrentou

dificuldades, incluindo danos à infraestrutura urbana e rural, além da mobilização para proteger moradores (G1, 2020c; G1, 2020d).

No terceiro período significativo, registrado nos dias 26, 27 e 28 de fevereiro de 2020, ocorreram novos eventos extremos de chuva que afetaram diversas localidades. Embora não haja registros específicos para esses dias em Paraíba do Sul, é importante notar que, em 2 de março de 2020, a Defesa Civil orientou moradores de áreas ribeirinhas a evacuarem devido ao risco de transbordamento do Rio Paraíba do Sul, causado pelo alto volume de chuvas nos dias anteriores. As áreas mais atingidas incluíram os bairros Santa Josefa, Centro e Barão de Angra, onde a água chegou a cobrir quintais de residências. Moradores foram encaminhados para abrigos temporários em uma escola e uma creche, e as aulas nessas unidades foram suspensas até a normalização da situação (G1, 2020e)

Conforme ilustrado na Figura 19, os impactos desses eventos estão documentados em imagens que mostram enchentes em Itaperuna e Carangola no início do mês (imagens a, b e c), deslizamentos de terra e danos a estruturas, como a queda de uma ambulância em uma cratera que se abriu em Antônio Carlos, ocorridos entre 11 e 13 de fevereiro (imagens d, e, f, g e h).

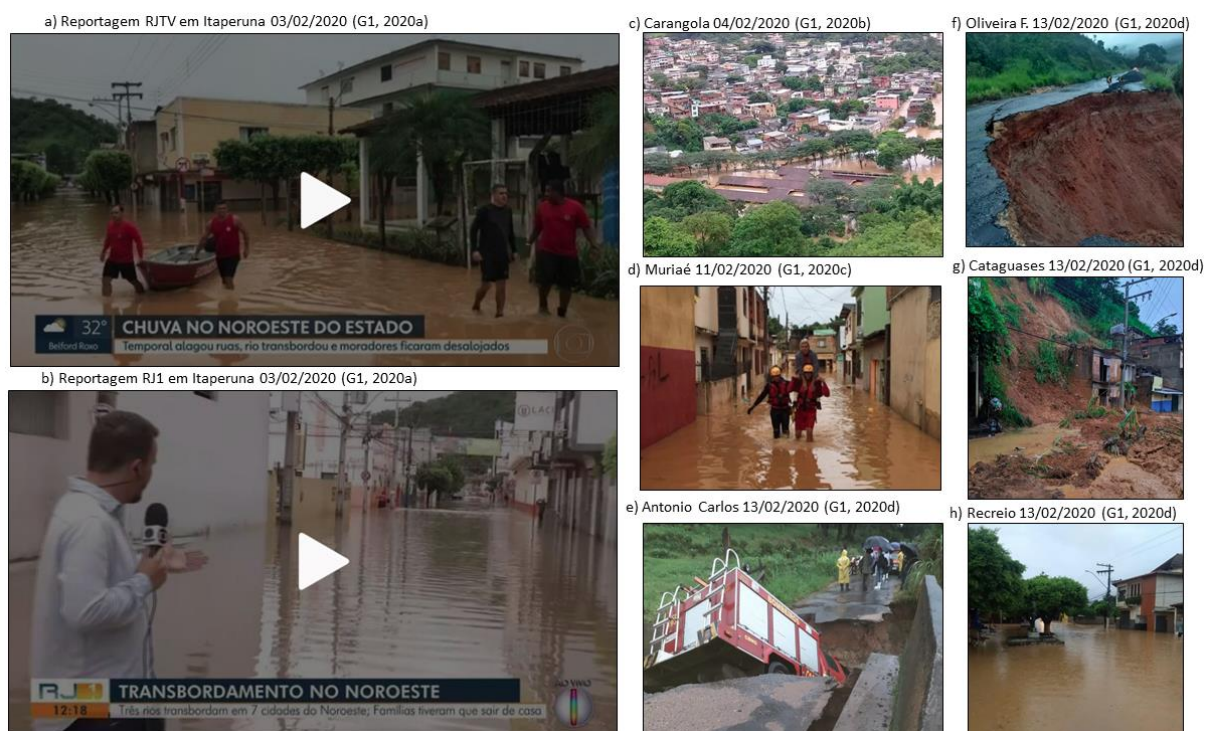


Figura 19 - Registro fotográfico dos impactos causados pelos eventos extremos de precipitação na BRPS durante fevereiro de 2020. As imagens foram extraídas de reportagens jornalísticas e ilustram enchentes, deslizamentos de terra e danos à infraestrutura.

Tabela 5 - Registro de eventos extremos de precipitação nas estações pluviométricas da BRPS durante o mês de fevereiro de 2020

Fevereiro 2020						
Segunda-Feira	Terça-Feira	Quarta-Feira	Quinta-Feira	Sexta-Feira	Sábado	Domingo
					1 Caçapava (30 mm)	2 Caçapava (29 mm) Conservatoria (26 mm)
3 Anta (25 mm) Areal (25 mm) Cataguases (86 mm) Fagundes (25 mm) Faz. Mendes (26 mm) Faz. S. Gabriel (60 mm) Fumaça (67 mm) Itaperuna (34 mm) R. S. Joaquim (29 mm)	4 Caçapava (30 mm) Conservatoria (37 mm) Faz. S. Clara (31 mm) F. Sobradinho (23 mm) Fumaça (67 mm) R. S. Joaquim (65 mm)	5 Conservatoria (69 mm) F. Sobradinho (29 mm) Itamarati (28 mm)	6 Areal (50 mm) Cataguases (36 mm) Conservatoria (43 mm) Faz. A. Negras (28 mm) F. Sobradinho (28 mm) Fumaça (39 mm)	7 Faz. S. Gabriel (38 mm)	8 Faz. S. Gabriel (42 mm)	9
10 Areal (25 mm) Caçapava (30 mm) Faz. A. Negras (46 mm)	11 Anta (24 mm) Caçapava (25 mm) Carangola (24 mm) C. Moreira (27 mm) Conservatoria (64 mm) Dois Rios (46 mm) Fagundes (34 mm) Faz. A. Negras (46 mm) Faz. S. Clara (55 mm) F. Sobradinho (45 mm) Fumaça (47 mm) R. S. Joaquim (40 mm)	12 Anta (27 mm) Carangola (27 mm) C. Moreira (42 mm) Dois Rios (26 mm) Faz. A. Negras (87 mm) Faz. Mendes (35 mm) Faz. S. Clara (41 mm) Faz. S. Gabriel (39 mm) Itamarati (113 mm) Itaperuna (28 mm)	13 Anta (44 mm) Astolfo Dutra (96 mm) C. Moreira (22 mm) Cataguases (124 mm) Dois Rios (56 mm) Faz. A. Negras (27 mm) Faz. Mendes (89 mm) F. Sobradinho (46 mm) F. Umbaubas (235 mm) Fumaça (46 mm) Itaperuna (39 mm) R. S. Joaquim (30 mm)	14 C. Moreira (24 mm) Faz. S. Gabriel (50 mm) Itaperuna (24 mm)	15 Anta (42 mm)	16 Areal (33 mm) Faz. S. Gabriel (29 mm)
17 Anta (27 mm) F. Sobradinho (44 mm) R. S. Joaquim (56 mm)	18 Faz. A. Negras (32 mm) R. S. Joaquim (52 mm)	19	20	21 Conservatoria (28 mm) F. Sobradinho (37 mm)	22 Carangola (29 mm)	23 Carangola (35 mm) Itaperuna (46 mm)
24	25 Caçapava (40 mm)	26 Areal (24 mm) Caçapava (40 mm) Conservatoria (26 mm) Faz. S. Clara (52 mm) Faz. S. Gabriel (43 mm) Fumaça (29 mm) R. S. Joaquim (48 mm)	27 Faz. S. Gabriel (32 mm) F. Umbaubas (28 mm)	28 Astolfo Dutra (61 mm) Carangola (42 mm) C. Moreira (36 mm) Cataguases (50 mm) Dois Rios (26 mm) Faz. A. Negras (37 mm) Faz. S. Gabriel (50 mm) F. Umbaubas (89 mm) Itaperuna (70 mm)	29 Faz. S. Gabriel (48 mm) F. Umbaubas (34 mm)	

A Figura 20 ilustra a localização geográfica das estações pluviométricas que registraram os eventos extremos de precipitação ao longo de fevereiro de 2020, distribuídas em três regiões da BRPS, sendo:

- Região 1: Abrange a porção norte/nordeste da bacia, com estações situadas nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Essas áreas concentraram os eventos mais intensos de precipitação documentados, que foram destacados em reportagens mencionadas anteriormente.

- Região 2: Corresponde à parte central da bacia, incluindo a Região Serrana do Rio de Janeiro, conhecida por sua vulnerabilidade a desastres naturais, como inundações e deslizamentos. Municípios como Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis, localizados nessa região, já enfrentaram eventos significativos, incluindo o desastre de janeiro de 2011, que causou mais de 900 mortes e afetou cerca de 300 mil pessoas (DOURADO, F., 2023; LIMA, A. et al., 2021).

- Região 3: Situa-se na porção sul/sudoeste da bacia, abrangendo áreas do estado de São Paulo e regiões limítrofes entre os três estados. Destaca-se a Serra da Mantiqueira, ao sul de Minas Gerais e Rio de Janeiro, onde se encontra a estação Fazenda Agulhas Negras, localizada a 1.245 metros de altitude, sendo a mais elevada utilizada neste estudo. Estações próximas, como Fumaça e Ribeirão São Joaquim, estão a altitudes de 720 e 620 metros, respectivamente.

Essa divisão em três regiões permite uma análise detalhada da distribuição espacial dos eventos extremos e fornece subsídios para validar o modelo hidrológico MGB-IPH. Além disso, essa organização espacial é fundamental para testar a capacidade do modelo em prever tanto os volumes de precipitação quanto seus padrões temporais e espaciais, como destacado em estudos como os de Macedo et al. (2024) e Rosa et al. (2019).

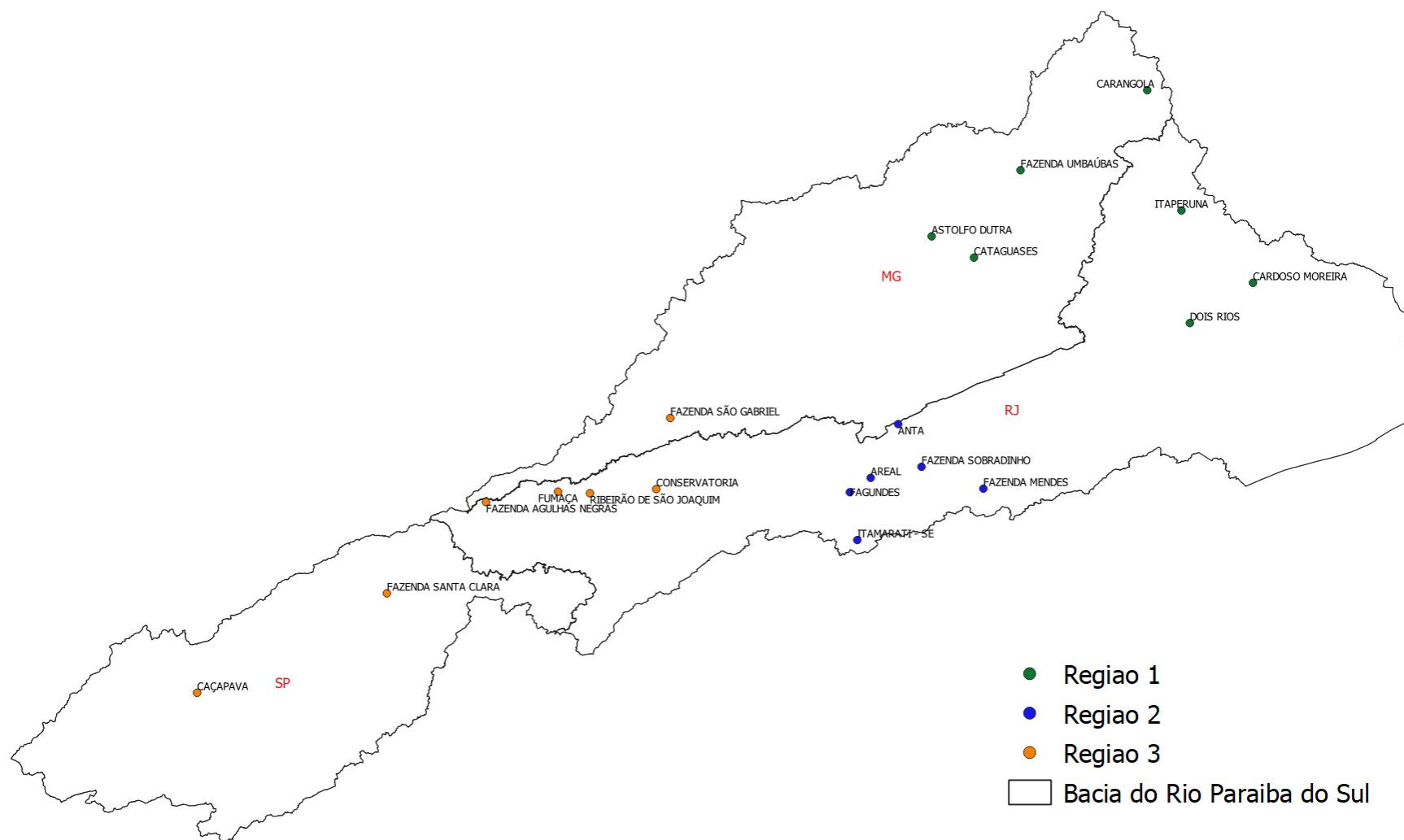


Figura 20 - Localização das estações pluviométricas na BRPS que registraram eventos extremos de precipitação durante fevereiro de 2020. As estações estão organizadas em três regiões da bacia: a Região 1 cobre o norte e nordeste da bacia; a Região 2 abrange a porção central e serrana do Rio de Janeiro; e a Região 3 concentra as áreas do centro-sul da bacia.

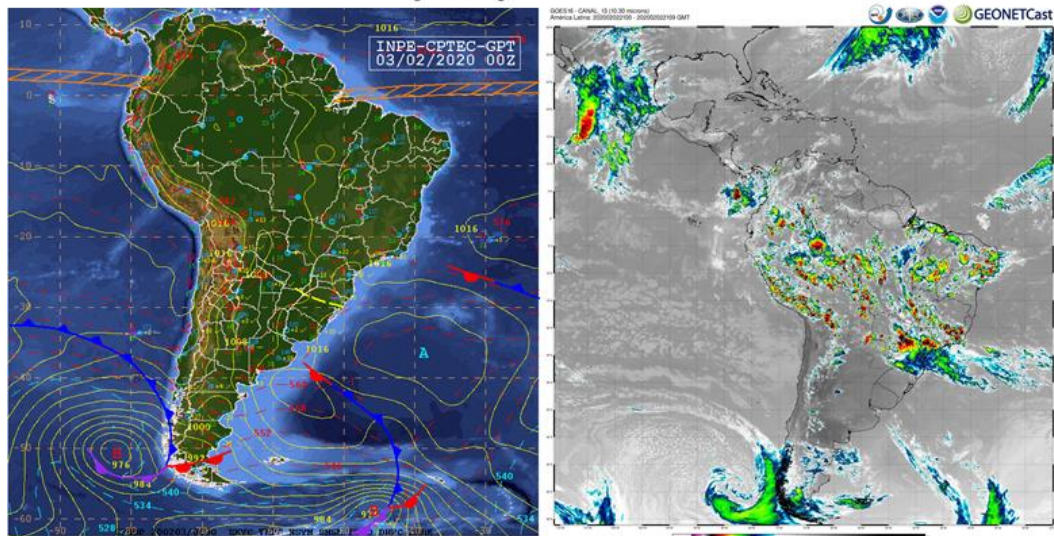
A Figura 21 apresenta a carta sinótica (CPTEC/INPE) e a imagem de satélite (DSA/INPE) do GOES-16, canal 13 (10.35μ), infravermelho realçado, dos dias 3, 13 e 28 de fevereiro de 2020, representando os três principais períodos de precipitação extrema registrados ao longo do mês.

No dia 3 de fevereiro, observa-se a presença de nuvens convectivas espalhadas pela região, indicativas de áreas de instabilidade que contribuíram para as intensas precipitações registradas. Esse padrão foi intensificado pela umidade canalizada pela alta pressão subtropical e pela frente fria estacionária sobre o Atlântico, favorecendo a convergência de umidade na região Sudeste.

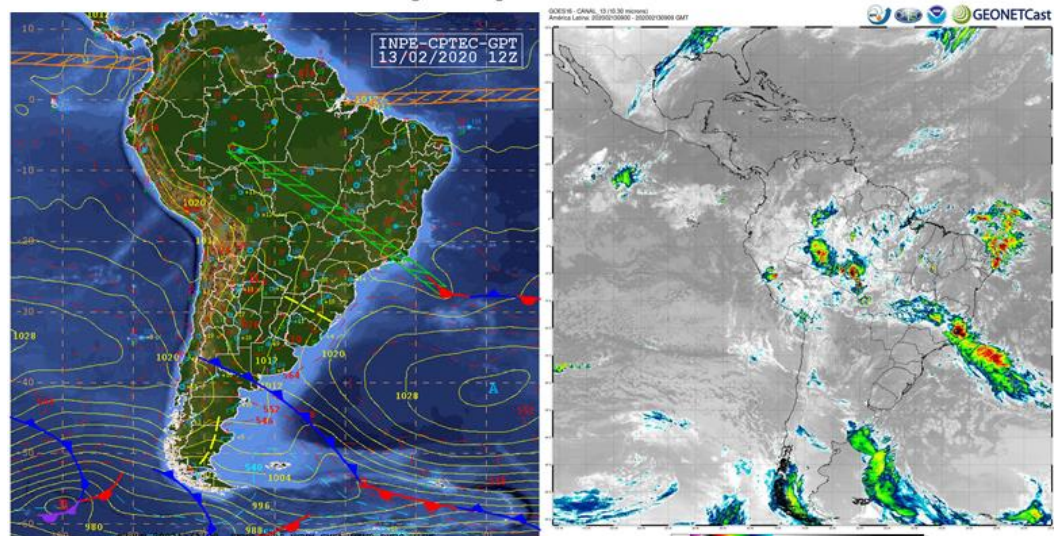
No dia 13 de fevereiro de 2020, destaca-se a formação da ZCAS, frequentemente associada a precipitações persistentes e intensas. Esse evento é caracterizado pela formação de uma banda de nebulosidade concentrada ao longo do seu eixo (CARVALHO et al., 2004). Nesse episódio, a ZCAS estendia-se desde a região central da Amazônia até o oceano Atlântico, atravessando boa parte da região Sudeste, o que resultou em chuvas intensas, principalmente na porção norte da BRPS, incluindo áreas de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Uma frente fria estacionária e a alta pressão sobre o Atlântico também favoreceram a convergência de umidade. As imagens de satélite do GOES-16 deste dia confirmam a presença de uma cobertura de nuvens convectivas bem definidas, associadas a precipitações volumosas e persistentes. Na BRPS, o dia 13 de fevereiro se destacou por intensas precipitações registradas em estações como Cataguases e Fazenda Umbaúbas.

Por fim, no dia 28 de fevereiro, ocorreu outro episódio de ZCAS, abrangendo uma faixa de atuação que ia do sudeste da Amazônia até a costa da região Sudeste do Brasil. Esse evento foi intensificado pela interação com uma nova frente fria, que trouxe nebulosidade densa associada à sua retaguarda. As imagens de satélite do GOES-16 novamente evidenciam uma ampla cobertura de nuvens densas ao longo do eixo da ZCAS.

03/02/2020 00Z



13/02/2020 12Z



28/02/2020 12Z

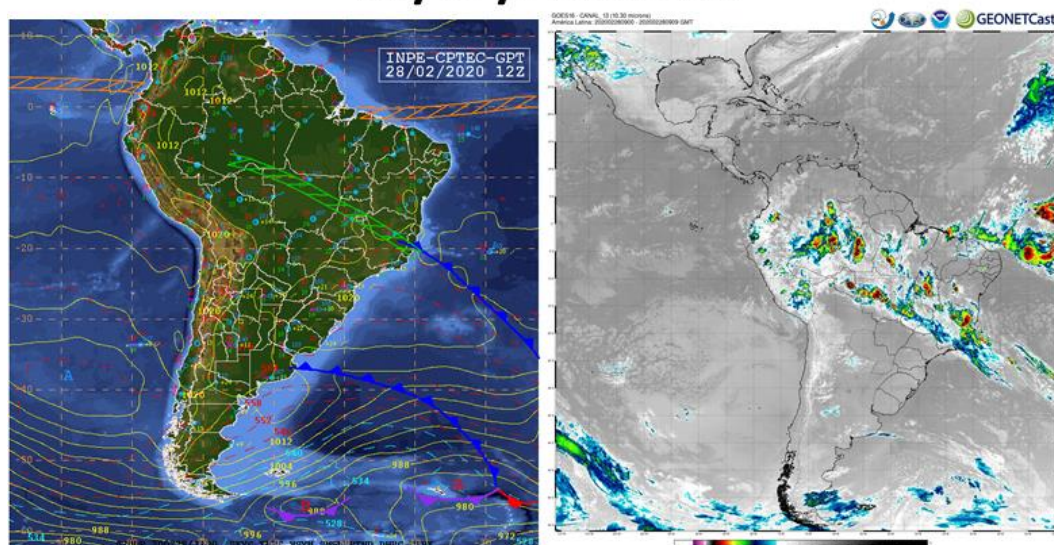


Figura 21 - Cartas sinóticas (Fonte: CPTEC/INPE) e imagens de satélite do canal 13 (10.35 μ) do Goes 16 (Fonte: DSA/INPE) para caracterizar os dias 3, 13 e 28 de fevereiro de 2020.

Para complementar, a Figura 22 apresenta a anomalia de precipitação no Brasil para fevereiro de 2020, com base nos dados do CPTEC/INPE. Nota-se uma anomalia positiva na região Sudeste, abrangendo os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro, onde se localiza a BRPS.

Essa anomalia pode estar relacionada a teleconexões atmosféricas, como o El Niño, fenômeno caracterizado pelo aquecimento das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial, que altera os padrões de circulação atmosférica e umidade na região Sudeste do Brasil (GRIMM, 2003; REBOITA et al., 2021). Estudos indicam que a frequência de eventos extremos de precipitação tem aumentado, influenciada tanto pelas mudanças climáticas quanto por padrões de variabilidade climática, como o El Niño, que impacta significativamente o regime de precipitação nas regiões Sudeste e Sul do Brasil (MARENGO et al., 2021).

Durante fevereiro de 2020, a região Niño 3.4 registrou uma anomalia de temperatura de $+0,98^{\circ}\text{C}$, um valor condizente com condições favoráveis ao aumento da precipitação na área (PEZZA; SIMMONDS, 2019).

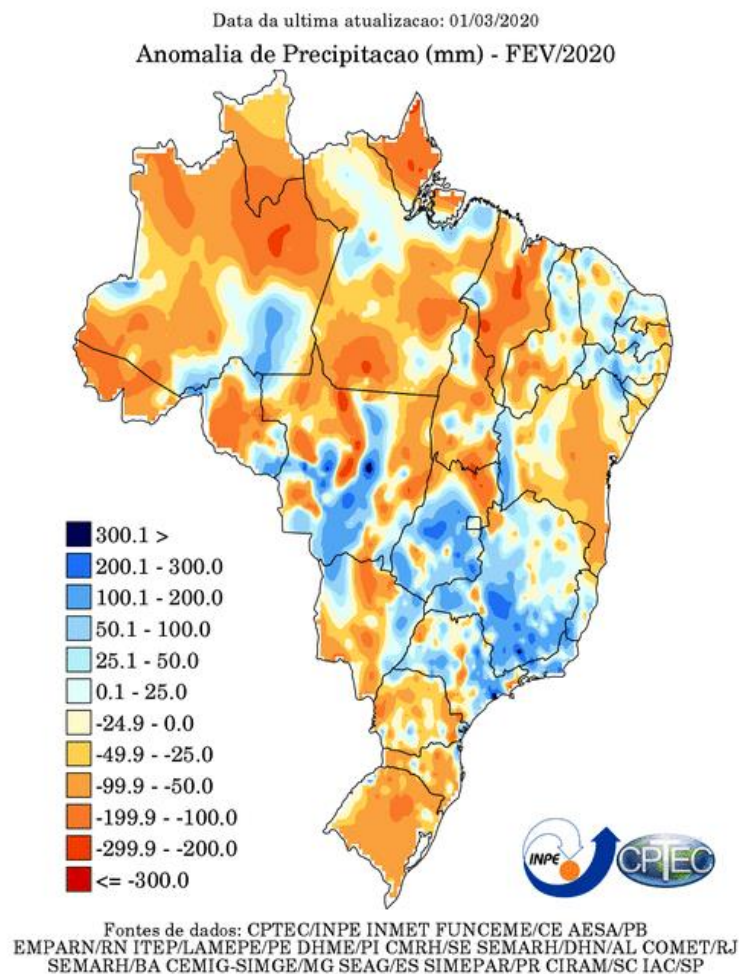


Figura 22 - Anomalia de precipitação no Brasil para fevereiro de 2020. (Fonte: CPTEC/INPE)

3.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO WRF

A Figura 23 apresenta a comparação entre o total mensal de precipitação acumulada para fevereiro de 2020, com base nos dados observados pelo produto MERGE e nos resultados dos modelos WRF e GFS. A análise revela padrões distintos de desempenho entre os modelos em relação às diferentes regiões da BRPS, influenciados pelas características topográficas e climáticas locais.

Nas regiões de maior altitude, como próximo à Serra da Mantiqueira (Região 3), o WRF conseguiu capturar adequadamente os volumes acumulados, com valores acima de 450 mm, em conformidade com os dados do MERGE. Por outro lado, na região serrana do Rio de Janeiro (Região 2), próximo à Serra do Mar, o WRF subestimou os acumulados de precipitação, indicando valores muito inferiores aos observados pelo MERGE. Essa discrepância evidencia uma limitação do modelo em representar de forma precisa os processos convectivos que interagem com o relevo mais complexo dessa área, como também foi apontado por Campos et al. (2023), que destacaram as dificuldades do WRF na simulação de sistemas convectivos organizados em áreas de relevo acentuado.

Já na divisa entre Minas Gerais e Rio de Janeiro, correspondente ao centro-norte da bacia, os modelos apresentaram resultados discrepantes. O GFS superestimou os volumes de precipitação, simulando acumulados próximos de 500 mm, enquanto o WRF subestimou de forma acentuada, com valores abaixo de 200 mm. Nesse local, o MERGE indicou um total próximo de 350 mm, destacando uma dificuldade comum em ambos os modelos.

Nas áreas mais secas da bacia, particularmente no norte fluminense, ambos os modelos apresentaram um desempenho satisfatório, capturando acumulados inferiores a 200 mm conforme observado pelo MERGE. Contudo, o WRF demonstrou maior destreza em reproduzir padrões espaciais detalhados, reflexo de sua resolução mais fina, enquanto o GFS apresentou um comportamento mais homogêneo e com menos variação espacial. Essa diferença reflete o papel crucial da resolução na representação de processos físicos regionais, como também destacado por Silva et al. (2021), que observaram que resoluções mais finas no WRF proporcionam melhorias significativas na simulação de chuvas intensas.

No geral, a precipitação simulada pelo WRF se concentrou majoritariamente entre 300 e 400 mm ao longo da bacia, valores que estão em conformidade com as observações do MERGE na maior parte da bacia. O GFS, no entanto, apresentou uma distribuição mais homogênea da precipitação, resultando em uma menor capacidade de capturar os extremos e as nuances locais observadas pelo MERGE e representadas parcialmente pelo WRF.

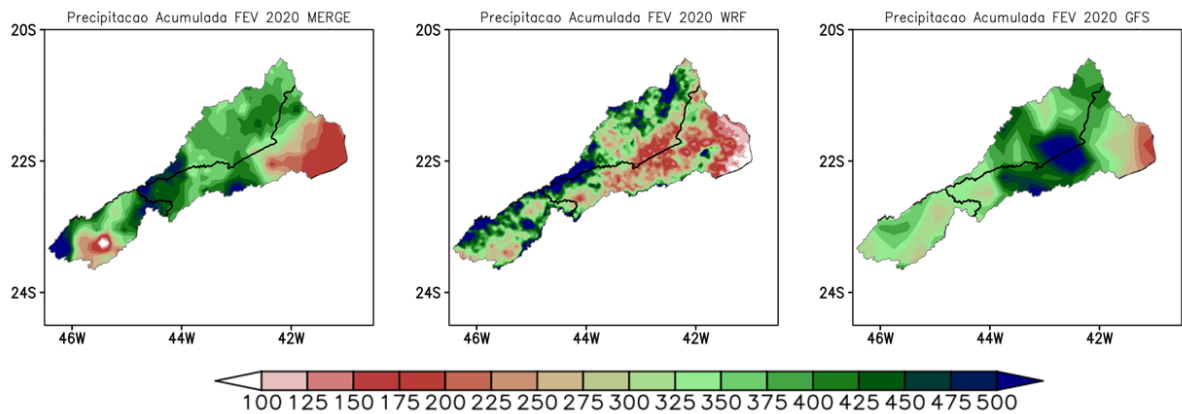


Figura 23 - Precipitação total acumulada para o mês de fevereiro de 2020: a) Dados do MERGE e b) Simulação com o Modelo WRF e c) Simulação com o Modelo GFS

A Figura 24, a Figura 25 e a Figura 26 apresentam uma comparação dos acumulados diários de precipitação entre o produto MERGE, e os modelos WRF e GFS para os 3 períodos identificados na seção 3.2 com chuvas intensas durante o mês fevereiro de 2020.

A Figura 24 apresenta os dados do primeiro período, entre os dias 2 e 5 de fevereiro. Nos primeiros dois dias, o WRF apresentou um bom desempenho ao capturar as áreas de precipitação mais intensas que foram identificadas na Tabela 4. O MERGE e o GFS mostram um padrão de precipitações mais homogêneas, enquanto o WRF detalhou as áreas de chuva de forma mais fragmentada, essas características estão associadas à resolução espacial dos dados. Como destacado por Kendzierski (2020), o WRF, ao utilizar grades de 9 km e 3 km, demonstrou maior capacidade de capturar padrões detalhados de precipitação, especialmente em regiões com topografia complexa e eventos intensos de chuva. Essa configuração permite ao modelo regional representar processos atmosféricos em escalas menores que os modelos globais, como o GFS, que utiliza grades de maior resolução espacial e, portanto, tende a suavizar as variações locais.

Na Região 1, localizada ao norte da bacia e incluindo estações como Itaperuna e Cataguases, as chuvas acumuladas no dia 3 foram de 34 mm e 86 mm, respectivamente, segundo os dados das estações (Tabela 4). O WRF captou parte dessa variabilidade, especialmente os acumulados maiores, mas com padrões mais dispersos. Já o GFS subestimou os acumulados, apresentando um padrão mais homogêneo e sem captar os picos observados nas estações.

Na Região 2, situada na porção central da bacia e representada por estações como Anta e Itamarati, os acumulados registrados entre os dias 2 e 4 ficaram próximos à 30mm/dia. O GFS teve um desempenho relativamente melhor que o WRF nessa área, representando os

acumulados máximos de maneira mais próxima ao observado. O WRF apresentou padrões mais fragmentados e subestimação em algumas localidades.

Na Região 3, localizada ao sul da bacia e incluindo estações como Conservatória e Ribeirão de São Joaquim, os dados das estações mostraram acumulados significativos, como os 65 mm registrados em Ribeirão de São Joaquim no dia 4. O MERGE conseguiu representar bem esses valores, e em relação aos modelos, o WRF simulou o evento intenso de precipitação nesse local enquanto o GFS o GFS apresentou uma distribuição mais uniforme, não representando a intensidade das chuvas registradas pelas estações.

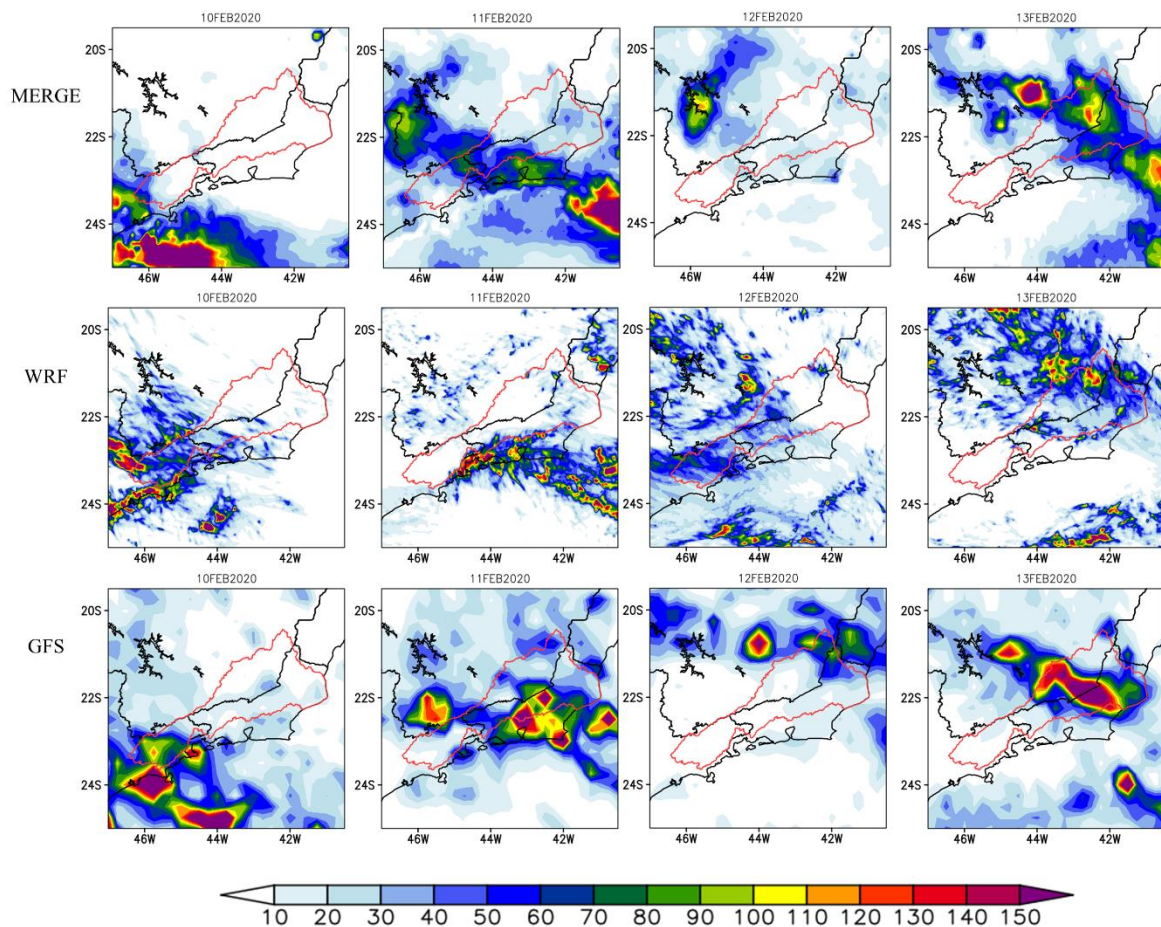


Figura 24 - Precipitação Acumulada em 24h para os dias 02, 03, 04 e 05 de fevereiro de 2020: Dados do MERGE, simulação do modelo WRF e simulação com o Modelo GFS na grade 2.

A Figura 25 apresenta os acumulados diários de precipitação para o período de 10 a 13 de fevereiro de 2020, comparando os resultados do MERGE com os modelos WRF e GFS. Esse período foi marcado por eventos significativos de precipitação, especialmente no dia 13, quando os maiores acumulados foram registrados em diversas localidades da bacia.

Na Região 1, localizada ao norte da bacia, as estações de Cataguases e Fazenda Umbaúbas registraram acumulados diários de 124 mm e 235 mm, respectivamente, no dia 13. Esses valores

refletem a intensidade do evento extremo ocorrido nessa região, também destacado em reportagens mencionadas no tópico 3.2. O MERGE evidenciou áreas de precipitação intensa, com os máximos concentrados ao norte da bacia. O WRF teve um bom desempenho, conseguindo reproduzir tanto a localização quanto a intensidade desses acumulados intensos. Por outro lado, o GFS apresentou dificuldade em localizar corretamente o evento extremo, posicionando os valores mais elevados na divisa entre Minas Gerais e Rio de Janeiro, deslocamento que também impactou o acumulado mensal mostrado na Figura 23.

Na Região 2, próxima à Serra do Mar, os maiores acumulados foram observados nos dias 11 e 12, com destaque para os 113 mm registrados na estação de Itamarati no dia 12. O WRF captou parte desse padrão, mas apresentou deslocamentos das áreas de máxima precipitação para o sul, o que resultou em menor precisão espacial. Nesse caso, o GFS apresentou desempenho superior ao WRF, reproduzindo os acumulados de forma mais precisa em relação tanto às observações do MERGE quanto às das estações. Na Região 3, o GFS manteve um padrão mais homogêneo, apresentando resultados semelhantes aos dados observados no MERGE. O WRF, por sua vez, representou as chuvas na região, mas com menor intensidade.

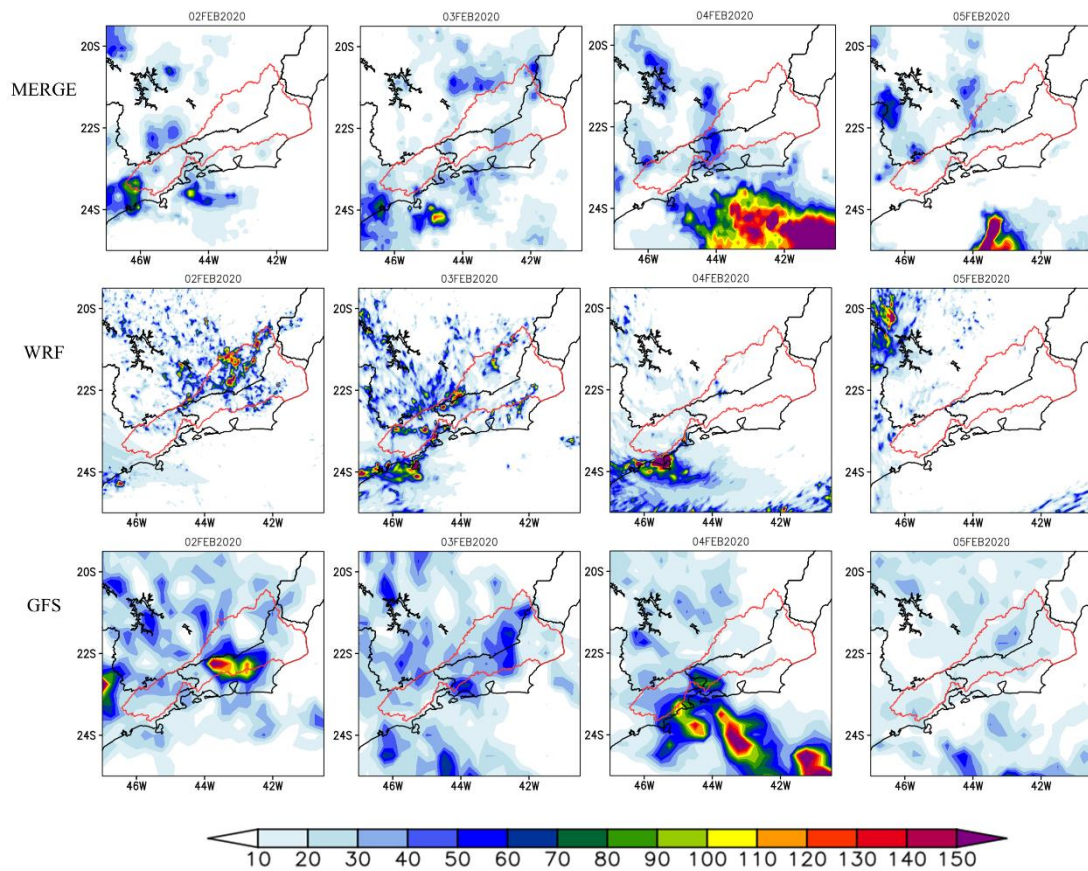


Figura 25 - Precipitação Acumulada em 24h para os dias 10, 11, 12 e 13 de fevereiro de 2020: Dados do MERGE, simulação do modelo WRF e simulação com o Modelo GFS na grade 2.

A Figura 26 apresenta os acumulados diários de precipitação para o período de 25 a 28 de fevereiro de 2020, comparando os resultados dos modelos WRF e GFS com o MERGE. Esse período foi caracterizado por acumulados um pouco menores em relação aos eventos anteriores, apesar da atuação da ZCAS. No dia 28, o GFS se destacou na Região 1, ficando com uma representação mais próxima ao MERGE e mais precisa dos valores registrados, como os 89 mm em Fazenda Umbaubas e 70 mm em Itaperuna, enquanto o WRF subestimou a precipitação. Segundo Garcia et al. (2023) no sudeste brasileiro, estudos têm mostrado que essa subestimação é frequente devido à complexidade do terreno e às limitações dos esquemas de parametrização de convecção e microfísica utilizados nos modelos.

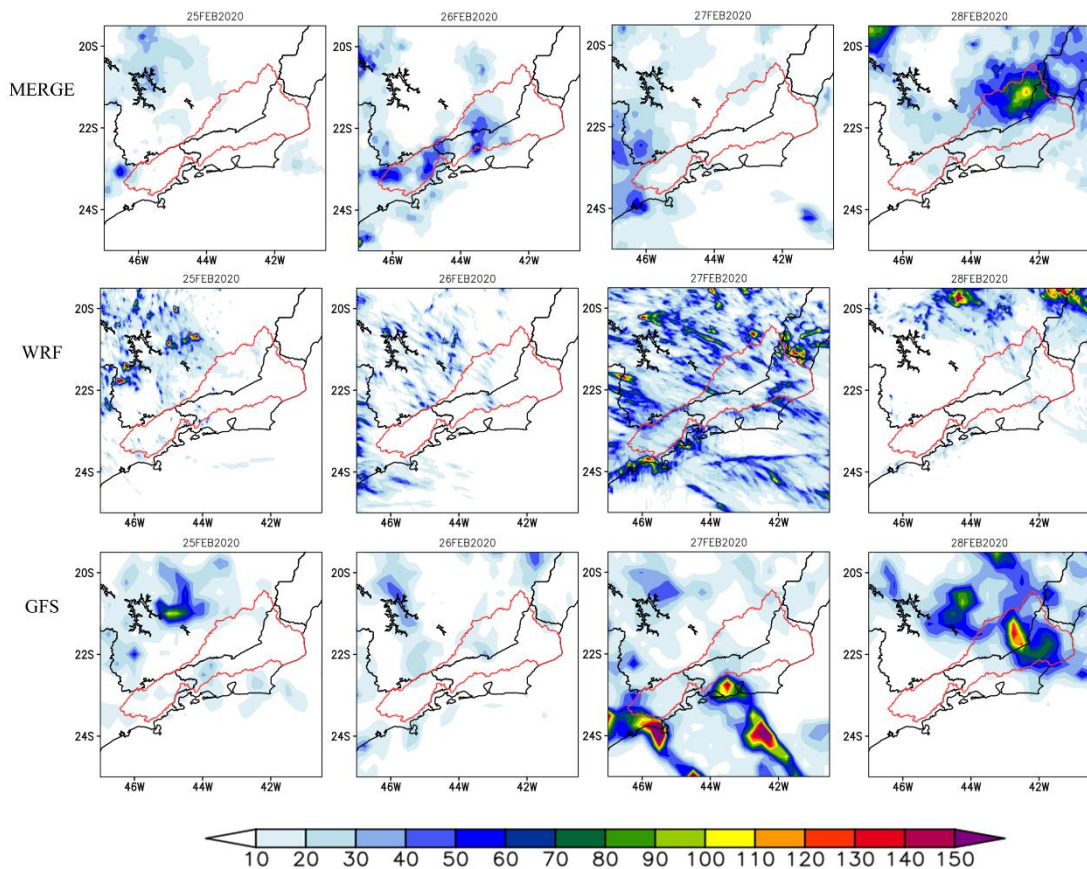


Figura 26 - Precipitação Acumulada em 24h para os dias 25, 26, 27 e 28 de fevereiro de 2020: Dados do MERGE, simulação do modelo WRF e simulação com o Modelo GFS na grade 2.

A Figura 27, a Figura 28 e a Figura 29 apresentam uma análise comparativa da precipitação diária e do acumulado mensal registrados nas estações pluviométricas e nas simulações dos modelos WRF e GFS para o mês de fevereiro de 2020. Essas estações estão distribuídas na BRPS, com cada figura destacando uma região pré-definida de acordo com a localização das estações.

Na Figura 27, a Região 1 engloba as estações localizadas ao norte da bacia, onde foram registrados os maiores volumes de chuva do mês, especialmente em torno do dia 13 de fevereiro. O modelo WRF conseguiu capturar melhor o padrão temporal das chuvas, identificando os dias de maior intensidade, como observado nos gráficos das estações Fazenda Umbaubas, Astolfo Dutra e Cataguases. No entanto, subestimou os acumulados dos eventos ocorridos no final do mês, período em que o modelo GFS apresentou melhor representação. Na maioria dos locais dessa região, o GFS superestimou os acumulados mensais em relação aos valores registrados pelas estações. Em locais como Carangola e Itaperuna, que registraram acumulados mensais de 268 mm e 298 mm, respectivamente, o GFS simulou totais de 393 mm e 398 mm. O WRF, por sua vez, apresentou valores mais próximos aos observados, com 310 mm e 245 mm. No geral, o GFS mostrou uma distribuição mais homogênea e constante, com dificuldades em representar os eventos diários de forma precisa, enquanto o WRF capturou melhor os eventos mais extremos.

A Figura 28 representa a Região 2, que abrange as estações localizadas na região serrana do Rio de Janeiro. Essa região enfrentou chuvas frequentes ao longo de todo o mês de fevereiro. O modelo WRF apresentou um desempenho moderado, capturando o padrão geral das chuvas, mas subestimando eventos mais intensos em locais como Fazenda Sobradinho e Itamarati. Quanto aos acumulados mensais, o modelo GFS superestimou os valores em geral. Em Fagundes e Anta, por exemplo, foram registrados acumulados de 246 mm e 277 mm, enquanto o GFS simulou 439 mm e 455 mm. O WRF, por outro lado, subestimou os acumulados, apresentando 235 mm e 187 mm, respectivamente. Dessa forma, o WRF demonstrou limitações na captura de tempestades severas nessa região, subestimando tanto os eventos extremos quanto o total mensal.

A Figura 29 apresenta os acumulados para a Região 3, que compreende estações distribuídas na parte centro-sul da bacia. Nessa região, algumas estações estão situadas em áreas de maior altitude, próximas à Serra da Mantiqueira, enquanto outras estão mais dispersas na parte central. As chuvas ocorreram ao longo de todo o mês, com picos de intensidade em semanas distintas. O modelo WRF conseguiu identificar o ritmo das chuvas, mas subestimou os volumes nos locais de maior precipitação. Em Fazenda Agulhas Negras e Fumaça, situadas em maior altitude e com acumulados mensais de 495 mm e 500 mm, respectivamente, o WRF apresentou valores mais representativos que o GFS, que tendeu a subestimar a precipitação nessa região, simulando apenas 495 mm e 441 mm. Estudos recentes, como o de Schumacher et al. (2020), apontam que o WRF apresenta melhor desempenho em altitudes elevadas, especialmente devido à melhoria na resolução da topografia.

O GFS mostrou resultados ainda mais homogêneos e subestimou significativamente os máximos diários e mensais, como observado em Fazenda Agulhas Negras, onde simulou apenas 346 mm. Em estações como Ribeirão de São Joaquim e Conservatória, ambos os modelos tiveram desempenhos similares no padrão temporal, mas subestimaram os máximos diários e os acumulados mensais.

De forma geral, o modelo WRF demonstrou maior sensibilidade à variabilidade temporal e espacial das chuvas, mas apresentou tendência de subestimar eventos mais severos, especialmente em regiões de topografia complexa. Por outro lado, o modelo GFS, com sua abordagem mais homogênea, teve melhor desempenho no acumulado mensal em algumas localidades, mas não conseguiu capturar adequadamente os picos de precipitação. Destaca-se que, na Região 1, o WRF representou melhor os eventos ocorridos por volta do dia 13 de fevereiro, enquanto o GFS teve melhor desempenho no final do mês. Na Região 2, o GFS apresentou melhor desempenho por não subestimar tanto os eventos extremos. Já na Região 3, o modelo WRF se sobressaiu na representação dos padrões de precipitação. Estudos como o de Crippa et al. (2017) indicam que a melhoria da resolução espacial contribui para uma representação mais precisa das condições meteorológicas e de precipitação.

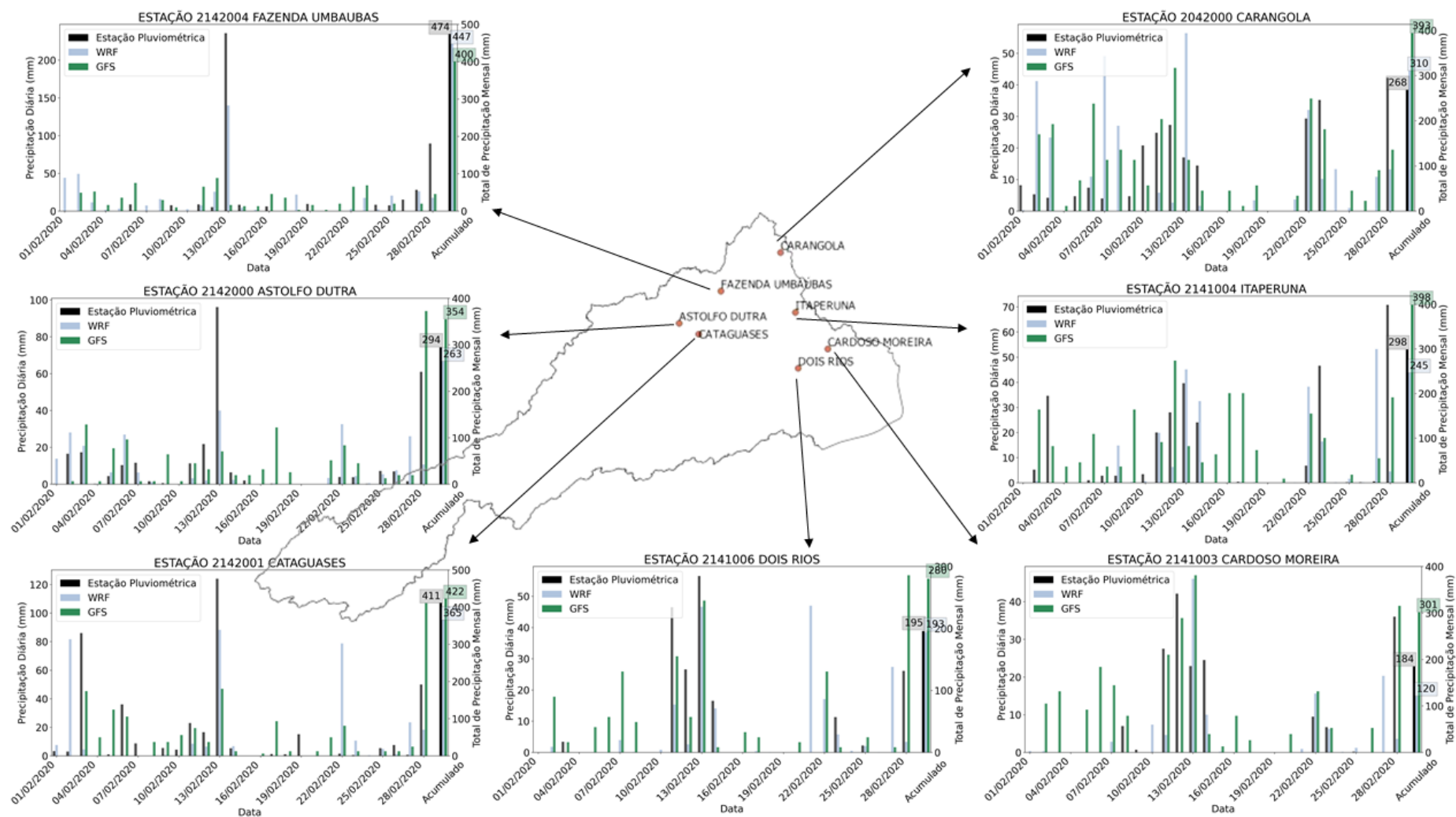


Figura 27 - Gráfico comparativo da precipitação diária e acumulado mensal das Estações Pluviométricas: Carangola, Itaperuna, Cardoso Moreira, Dois Rios, Cataguases, Astolfo Dutra e Fazenda Umbaubas, e simulada pelos modelos WRF e GFS.

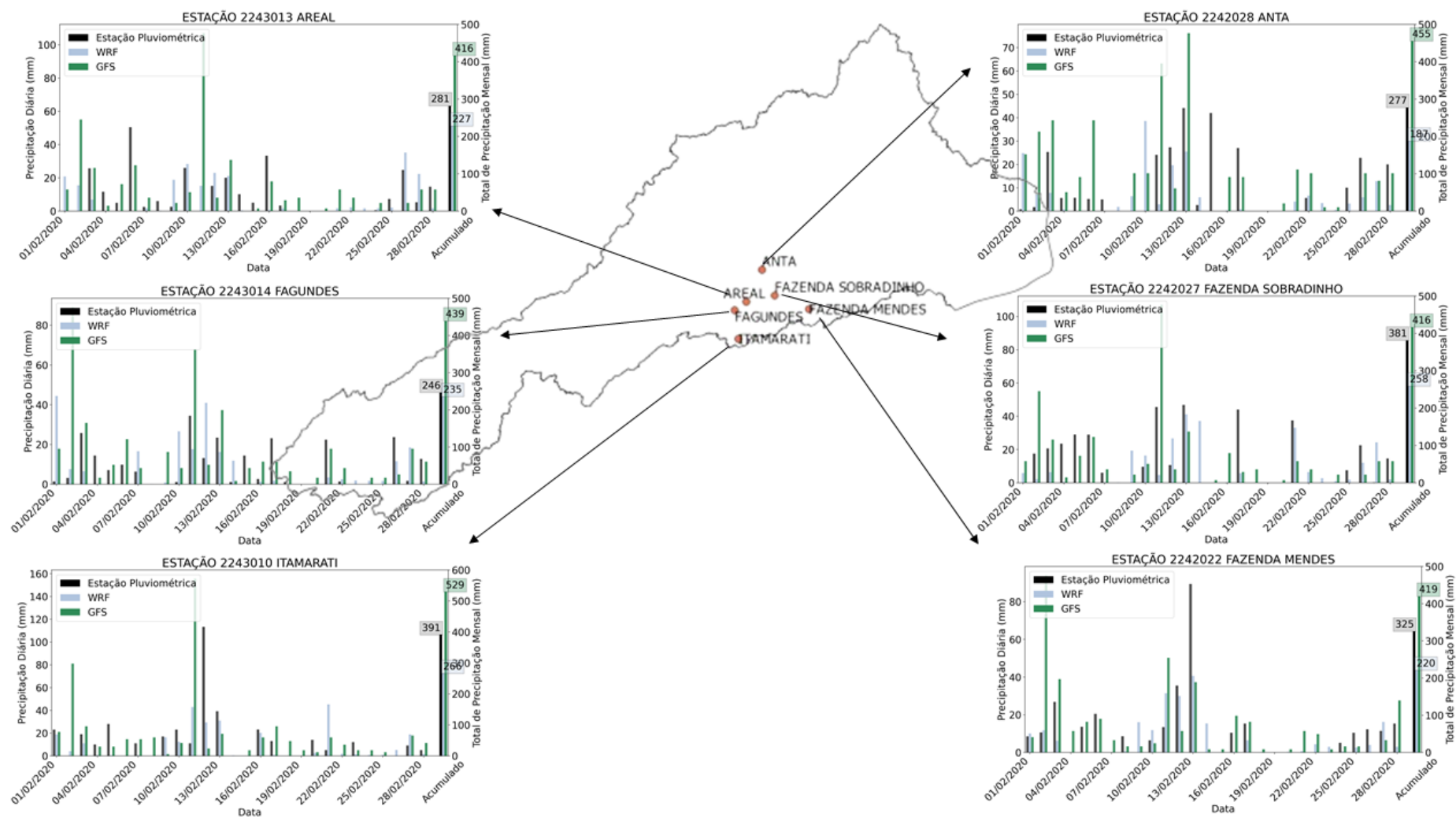


Figura 28 - Gráfico comparativo da Precipitação Diária e acumulado mensal das Estações Pluviométricas: Anta, Fazenda Sobradinho, Fazenda Mendes, Itamarati, Fagundes e Areal, e simulada pelos modelos WRF e GFS.

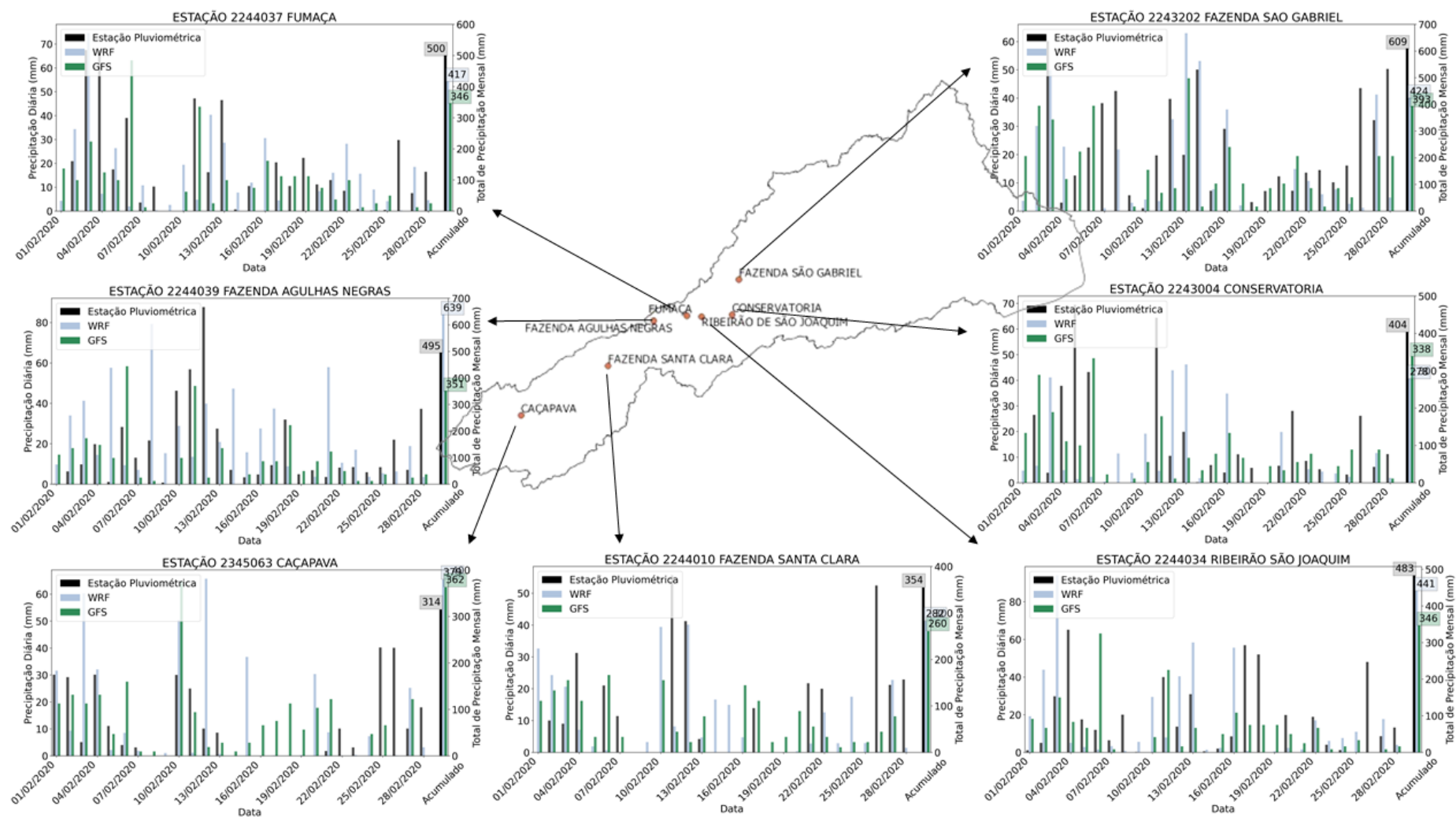


Figura 29 - Gráfico comparativo da Precipitação Diária e acumulado mensal das Estações Pluviométricas: Fazenda São Gabriel, Conservatória, Ribeirão São Joaquim, Fazenda Santa Clara, Caçapava, Fazenda Agulhas Negras e Fumaça, e simulada pelos modelos WRF e GFS.

3.4 AVALIAÇÃO DAS SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS

A Figura 30 apresenta a localização e a divisão das 53 sub-bacias na BRPS. O rio principal, Paraíba do Sul, está destacado em azul e seus principais afluentes também estão indicados por diferentes cores: Paraibuna, Rio Pirai, Rio Pomba, Rio Muriaé, Rio Piabanha, Rio Dois Rios, Rio Carangola e Rio Fagundes. O mapa também apresenta informações geográficas da região, para facilitar a identificação.

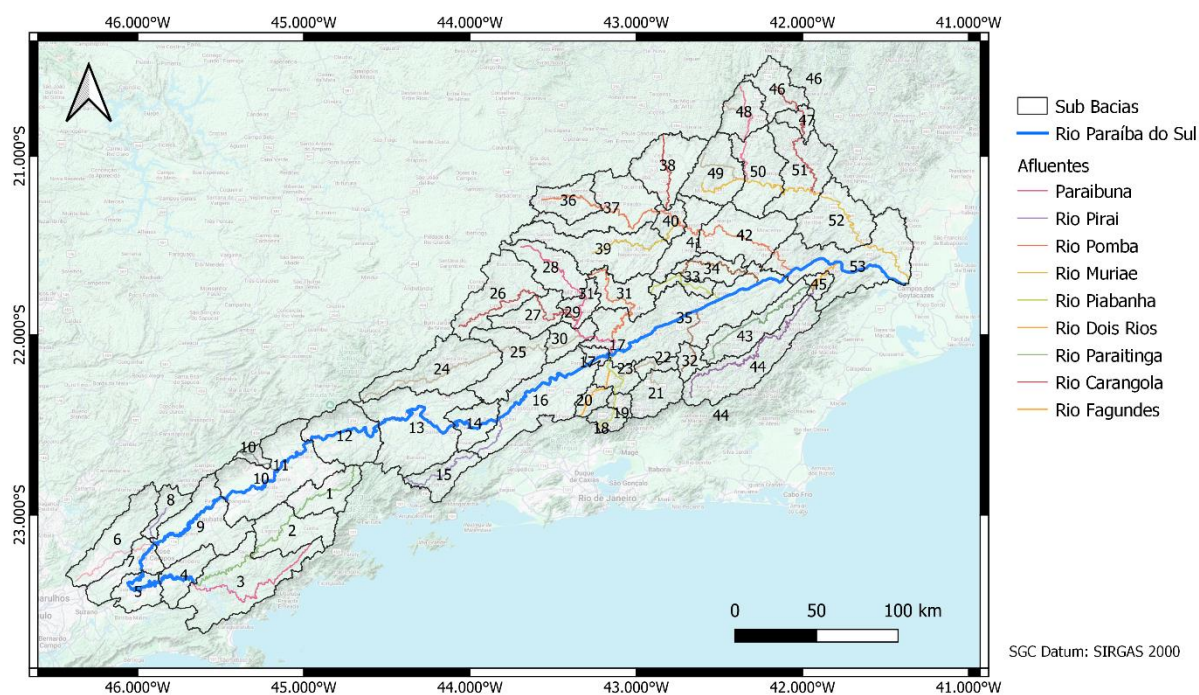


Figura 30 - Divisão das 53 sub-bacias na área de estudo, mostrando a rede hidrográfica principal do Rio Paraíba do Sul (em azul) e seus principais afluentes. Ao fundo, utiliza-se uma imagem de satélite para localização geográfica da bacia e identificação das principais cidades na região.

A Figura 31 apresenta a comparação dos coeficientes de ajuste antes e depois da calibração do modelo MGB-IPH para as 53 sub-bacias analisadas. Os *boxplots* exibem as métricas de desempenho adotadas para avaliar a qualidade das simulações hidrológicas: NS, NSlog e ΔV . Essas métricas oferecem perspectivas complementares: enquanto o NS é mais sensível a picos de vazão (cheias), o NSlog representa melhor as vazões baixas. O ΔV , por sua vez, avalia o desempenho no volume total de água. Além disso, faixas coloridas indicam níveis de desempenho conforme critérios estabelecidos por Moriasi et al. (2007), com limiares para classificação de modelos como satisfatórios, bons ou muito bons.

Antes do ajuste, observa-se uma grande variabilidade nos valores do NS, com muitas sub-bacias apresentando coeficientes negativos ou próximos a zero, indicando baixa eficiência na simulação da

vazão. Após a calibração, o desempenho do modelo melhora significativamente, com a maioria das sub-bacias atingindo valores superiores a 0,5, entrando na faixa de desempenho "satisfatório" e "bom", e algumas superando 0,75, alcançando classificação "muito bom".

O comportamento do coeficiente de NSlog segue a mesma tendência do NS, mas com uma leve melhora na simulação das vazões baixas, já que essa métrica dá maior peso aos períodos de estiagem. Após a calibração, há um aumento expressivo no NSlog, com a maioria das sub-bacias apresentando valores positivos e muitos se aproximando da faixa de "muito bom".

O ΔV antes do ajuste indicava grandes discrepâncias entre os volumes simulados e observados, com um espalhamento significativo. Após a calibração, os valores de ΔV são reduzidos, com menor variabilidade e aproximação da linha de referência, indicando uma melhor estimativa do volume total escoado nas sub-bacias.

A análise dos coeficientes de ajuste demonstra que o processo de calibração do modelo MGB-IPH foi eficiente na melhoria das simulações hidrológicas. Os valores dos coeficientes NS e NSlog aumentaram consideravelmente, refletindo melhor correspondência entre os valores simulados e observados, tanto para vazões máximas quanto para vazões baixas. Além disso, a redução do ΔV indica uma melhora na estimativa do volume total escoado. Os resultados reforçam a importância da calibração no modelo MGB-IPH, permitindo sua aplicação em estudos hidrológicos e previsão de vazões na BRPS.

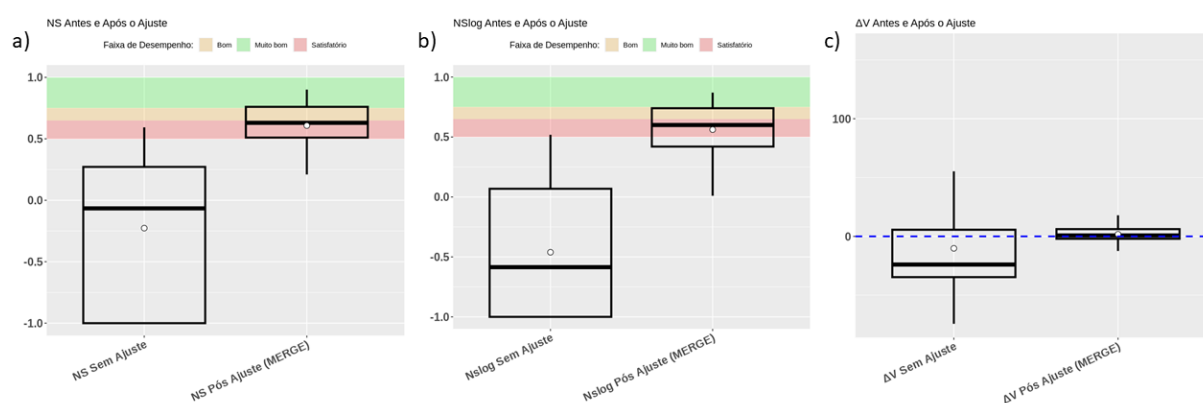


Figura 31 - *Boxplots* comparando os coeficientes de ajuste antes e depois da calibração do modelo MGB-IPH. (a) NS, (b) NSlog e (c) ΔV . As faixas coloridas indicam níveis de desempenho: satisfatório (vermelho), bom (laranja) e muito bom (verde).

Na Figura 32, é apresentada a distribuição do coeficiente de ajuste NS ao longo das 53 sub-bacias após o processo de calibração. O ajuste do NS foi priorizado na calibração na intenção de melhorar a simulação dos picos de vazão, aspecto crucial para a previsão de eventos extremos. Observa-se que as sub-bacias com melhores valores de NS estão predominantemente na região central

e na região mais ao norte da bacia, onde os valores ajustados ultrapassam 0,75, indicando um ajuste considerado "muito bom", segundo os critérios de Moriasi et al. (2007).

A priorização do NS como métrica de avaliação do desempenho hidrológico tem sido amplamente adotada em estudos de modelagem hidrológica, como no estudo de Viola et al. (2013) na aplicação do modelo *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH) para a simulação da vazão na bacia do Rio Grande. Os autores verificaram que o LASH apresentou valores de NS superiores a 0,70 na maioria das sub-bacias analisadas, mas também ressaltam a importância da calibração específica para diferentes regiões da bacia, uma vez que algumas sub-bacias apresentaram desempenhos inferiores devido a particularidades hidrológicas e limitações dos dados de entrada.

De forma similar, no presente estudo, as sub-bacias que apresentaram menor desempenho na calibração se concentram em regiões específicas. A área das sub-bacias 19, 20, 21, 22 e 23, localizadas próximas à região serrana do Rio de Janeiro, destacou-se por valores mais baixos de NS, variando entre 0,21 e 0,42. Essa região, caracterizada por topografia acidentada e alta variabilidade espacial de precipitação, impõe desafios adicionais para a modelagem hidrológica. Estudos indicam que áreas serranas tendem a apresentar maiores dificuldades na representação dos processos de escoamento superficial, principalmente devido à complexidade dos padrões de precipitação e infiltração (COLLISCHONN et al., 2020).

Por outro lado, algumas sub-bacias ao longo do curso principal do Rio Paraíba do Sul e seus principais afluentes, como as sub-bacias 4, 7, 10, 30, 35, 49, 50 e 53, atingiram coeficientes NS próximos a 0,90, demonstrando uma excelente correspondência entre as vazões simuladas e observadas.

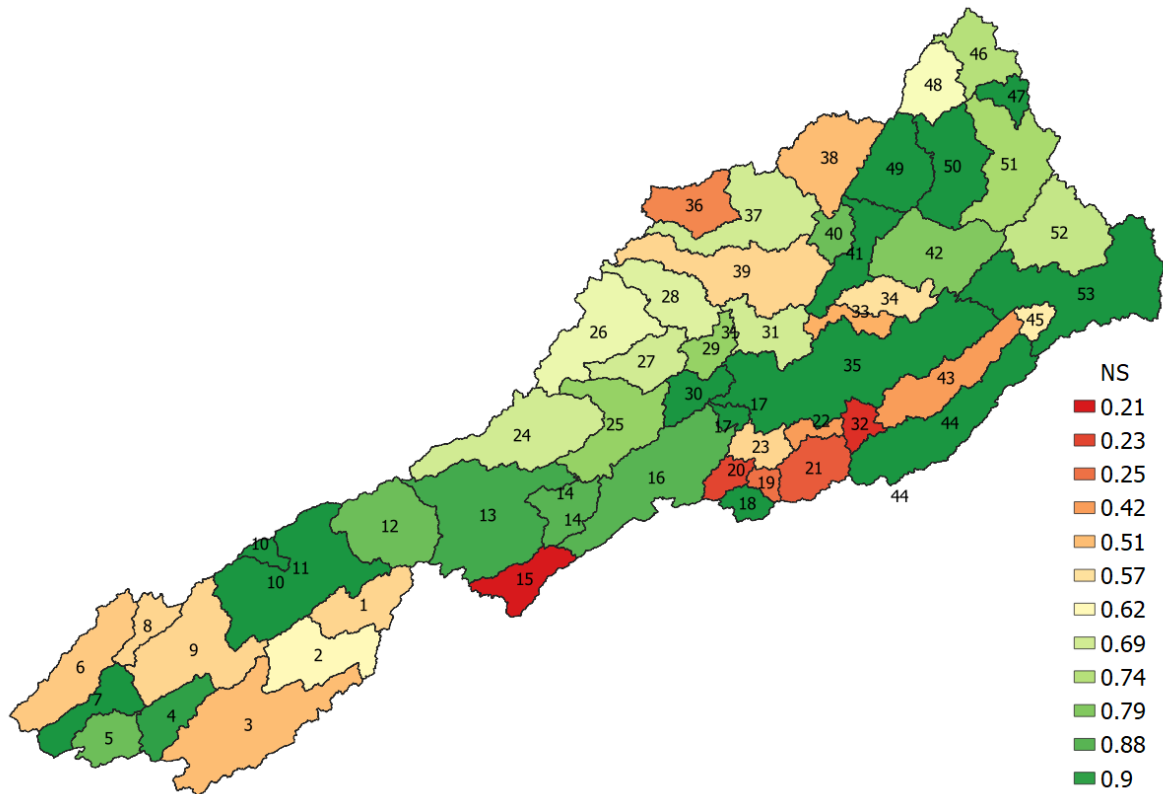


Figura 32 - Classificação das Sub-bacias em relação ao Coeficiente de ajuste NS após a calibração do modelo MGB-IPH. As cores indicam o desempenho do ajuste, variando de valores mais baixos (vermelho) para valores mais altos (verde), onde maiores valores representam melhor ajuste entre os valores simulados e observados.

A Figura 33, a Figura 34 e a Figura 35 apresentam os hidrogramas pós-calibração do modelo MGB-IPH para as três regiões da bacia que foram divididas neste estudo, comparando os valores simulados utilizando a precipitação do produto MERGE com os valores observados entre 2010 e 2020.

Na Região 1 (Figura 33), que compreende as sub-bacias 40, 42, 45, 46, 51 e 52, observa-se que o modelo foi capaz de representar adequadamente a variabilidade das vazões, especialmente durante os períodos de cheia. A calibração aprimorou a correspondência entre os valores simulados e observados, reduzindo discrepâncias nos picos de vazão. Os hidrogramas indicam que o modelo conseguiu capturar eventos extremos, embora algumas sub-bacias ainda apresentem diferenças, como a sub-bacia 40, onde os picos observados são ligeiramente mais intensos do que os simulados. Além disso, sub-bacias 45 e 51 demonstram uma tendência de leve subestimação nos períodos de estiagem.

Na Região 2 (Figura 34), englobando as sub-bacias 19, 20, 21, 22, 34, 43 e 44, os hidrogramas revelam um ajuste satisfatório, embora haja uma maior dispersão nos picos de vazão. Essa região é caracterizada por uma resposta hidrológica altamente variável, reflexo da topografia serrana e da distribuição irregular das precipitações. Os hidrogramas indicam que o modelo tem dificuldades em capturar corretamente a magnitude de alguns eventos extremos, como observado nas sub-bacias 19, 20 e 22, onde os picos simulados são geralmente menores do que os observados. A sub-bacia 21 também

apresenta discrepâncias entre os valores simulados e observados, principalmente nos períodos de maior precipitação. Já a sub-bacia 43 apresenta uma tendência de superestimação dos volumes em determinados períodos do ano.

Na Região 3 (Figura 35), composta pelas sub-bacias 9, 12, 13, 24, 25, 26 e 27, a calibração demonstrou um ajuste muito bom, com valores simulados alinhados aos dados observados ao longo do período analisado. O desempenho do modelo nesta região foi um dos melhores, com os hidrogramas mostrando um excelente ajuste entre os valores simulados e observados. Sub-bacias 12 e 13 mostraram um ajuste satisfatório, com leve subestimação nos períodos de seca. As sub-bacias 24 e 25 tiveram um ajuste notável, com a maioria dos picos de vazão bem representados. Já as sub-bacias 26 e 27 apresentaram leve subestimação dos picos de vazão em eventos extremos, mas, de forma geral, os padrões de vazão foram bem simulados, indicando que o modelo conseguiu captar corretamente os processos hidrológicos predominantes na região.

No geral, os hidrogramas pós-calibração confirmam a melhoria do desempenho do modelo MGB-IPH após o ajuste dos parâmetros. Embora algumas limitações ainda sejam evidentes em áreas de relevo acidentado e alta variabilidade climática, a calibração do modelo resultou em um desempenho satisfatório na maioria das sub-bacias.

Os resultados obtidos indicam que a metodologia adotada para ajuste do modelo é robusta e pode ser utilizada para previsão de vazões na BRPS, contribuindo para estratégias de monitoramento e mitigação de impactos hidrológicos.

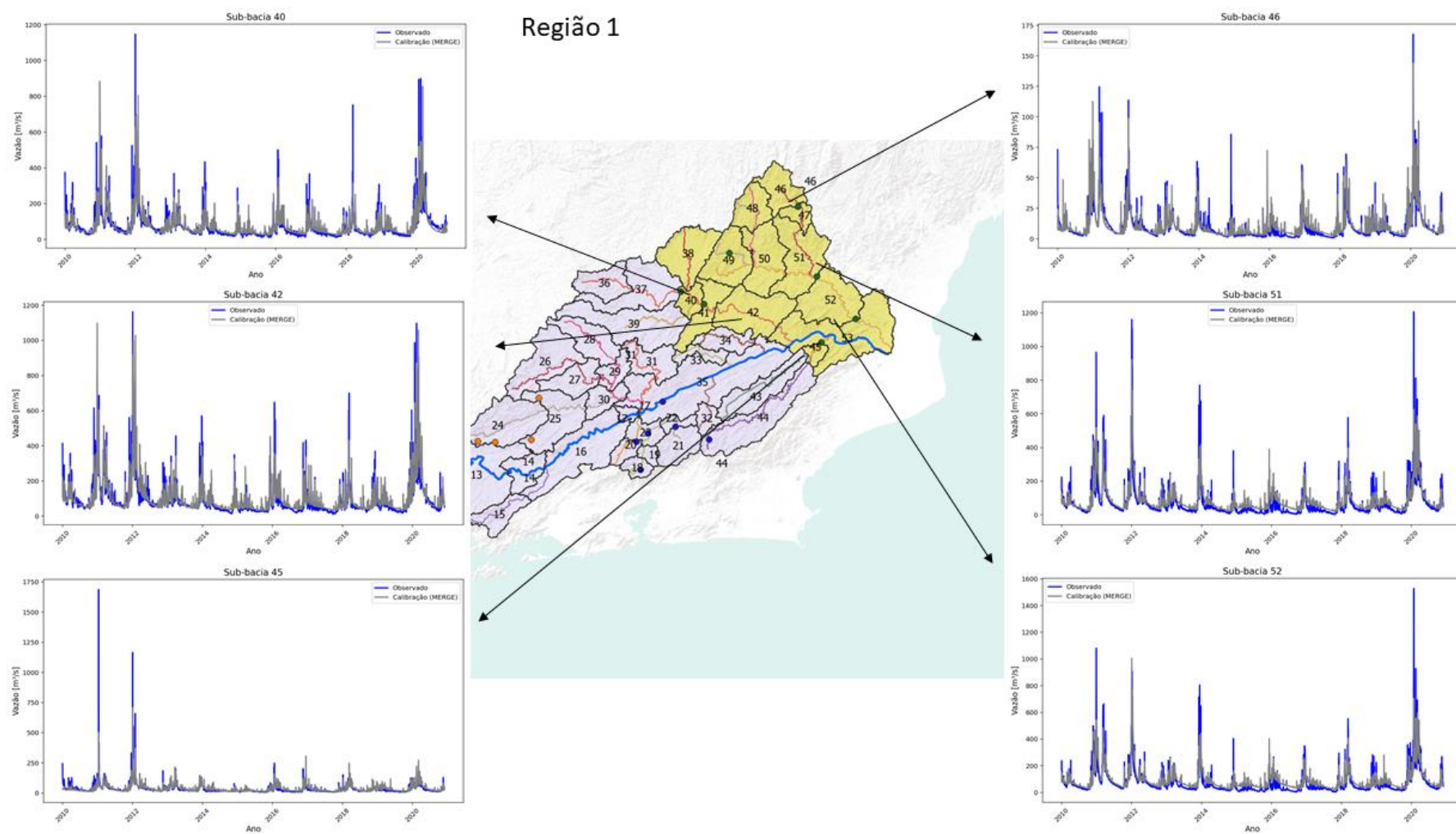


Figura 33 - Hidrogramas pós-calibração do modelo MGB-IPH para o período de 2010 a 2020 na Região 1, comparando os valores simulados usando a precipitação do produto MERGE com os valores observados. A figura apresenta as sub-bacias 40, 42, 45, 46, 51 e 52.

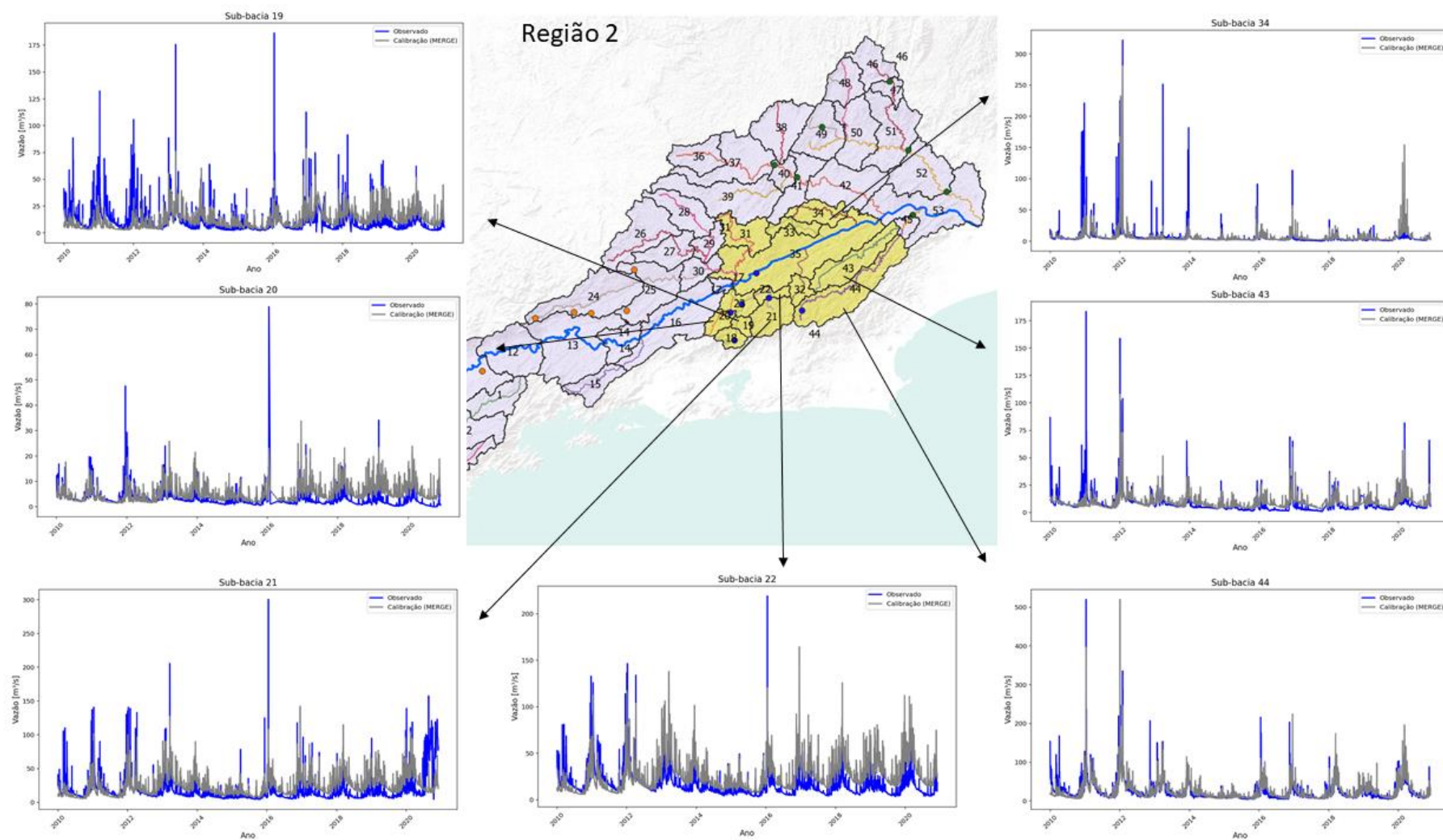


Figura 34 - Hidrogramas pós-calibração do modelo MGB-IPH para o período de 2010 a 2020 na Região 2, comparando os valores simulados usando a precipitação do produto MERGE com os valores observados. A figura apresenta as sub-bacias 19, 20, 21, 22, 34, 43 e 44.

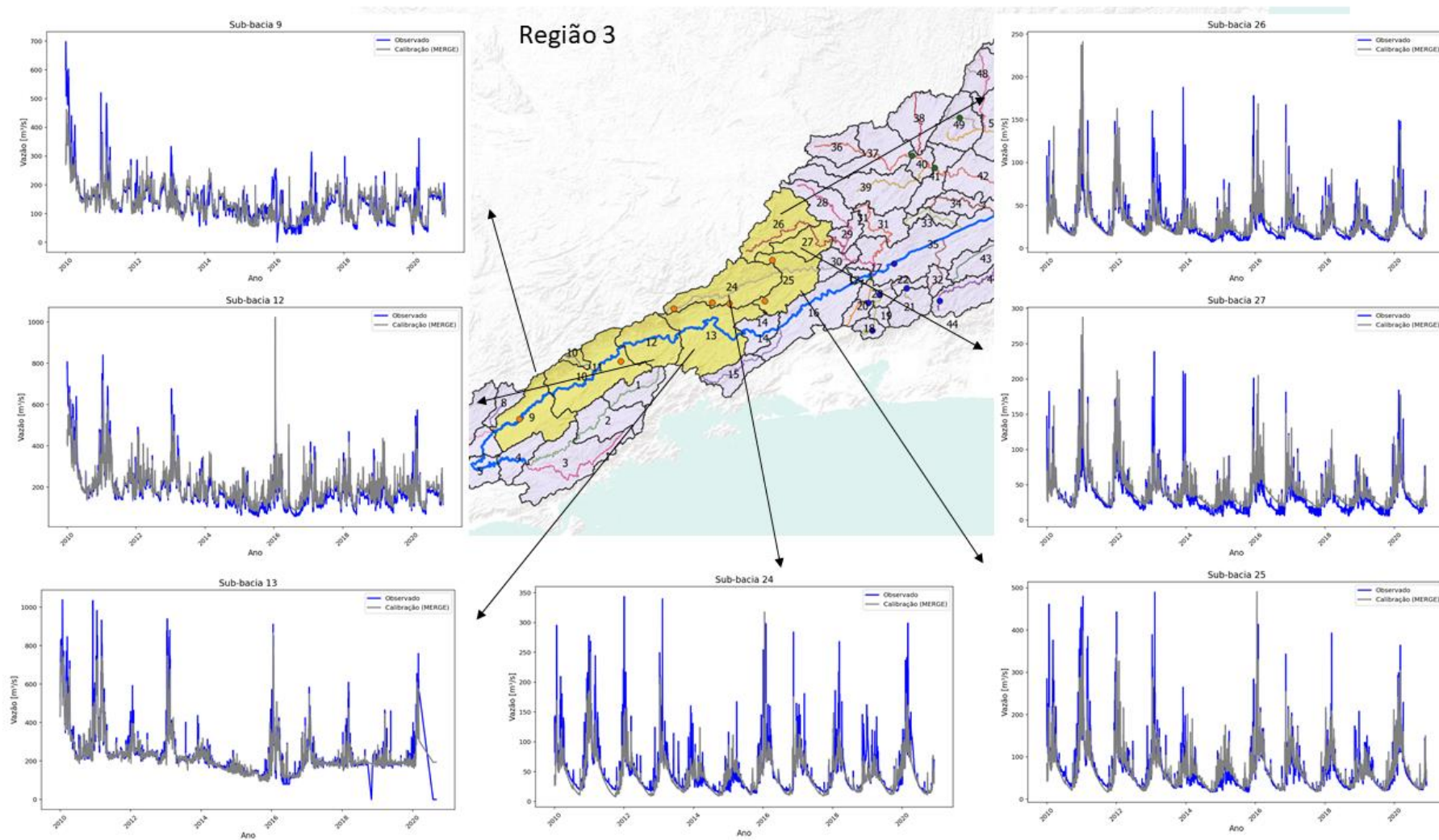


Figura 35 - Hidrogramas pós-calibração do modelo MGB-IPH para o período de 2010 a 2020 na Região 3, comparando os valores simulados usando a precipitação do produto MERGE com os valores observados. A figura apresenta as sub-bacias 9, 12, 13, 24, 25, 26 e 27

Após a calibração do modelo MGB-IPH, as simulações hidrológicas foram realizadas utilizando os dados dos modelos meteorológicos WRF e GFS, para o mês de fevereiro de 2020, que o capítulo 3.2 apresenta como escolha do período de teste.

O primeiro método de avaliação foi utilizando as métricas NS, NSlog e ΔV . A Figura 36 apresenta a distribuição espacial do desempenho dessas métricas, destacando as sub-bacias onde cada modelo apresentou melhores resultados. Os valores numéricos correspondentes estão detalhados no Anexo 2.

A análise do NS, que mede a capacidade do modelo de representar as variações da vazão observada, mostrou que o WRF apresentou desempenho superior na maioria das sub-bacias, indicando maior precisão na simulação de eventos extremos, como picos de cheia. Os valores de NS superiores a 0,80 em sub-bacias como 12, 13, 14 e 16 comprovam a capacidade do modelo regional de capturar os eventos de maior intensidade. O GFS obteve desempenhos inferiores na maioria das sub-bacias, sendo superado principalmente nas áreas centrais e norte da bacia. Entretanto, na Região 2 (área serrana do Rio de Janeiro), o GFS apresentou melhor ajuste, possivelmente devido à sua melhor representação da precipitação acumulada nessa área, conforme já indicado na Figura 25.

O comportamento do NSlog, que é mais sensível às baixas vazões, manteve o padrão observado no NS, com o WRF apresentando melhor desempenho na maior parte das sub-bacias. Isso reforça que o modelo regionalizado não apenas melhora a simulação dos eventos extremos de cheia, mas também representa melhor os períodos de estiagem. Em algumas sub-bacias, como 31, 33 e 34, o GFS superou ligeiramente o WRF.

Já o ΔV , que avalia o erro no volume total de água escoado, mostrou uma distribuição mais equilibrada entre os modelos. O GFS teve um desempenho mais consistente nessa métrica, conseguindo reduzir os erros volumétricos em várias sub-bacias onde o WRF superestimou a vazão total. Apesar disso, o WRF ainda apresentou um maior número de sub-bacias com melhor desempenho no ΔV .

Os resultados demonstram que, apesar do GFS apresentar vantagens em algumas sub-bacias específicas e melhor equilíbrio no erro volumétrico total, o WRF foi claramente superior na simulação de picos de cheia, que são fundamentais para previsões de eventos extremos e gestão de riscos hidrológicos. A melhor performance do NS e NSlog no WRF reforça o impacto positivo da regionalização da modelagem meteorológica, proporcionando maior precisão tanto na simulação das vazões máximas quanto na representação das estiagens.

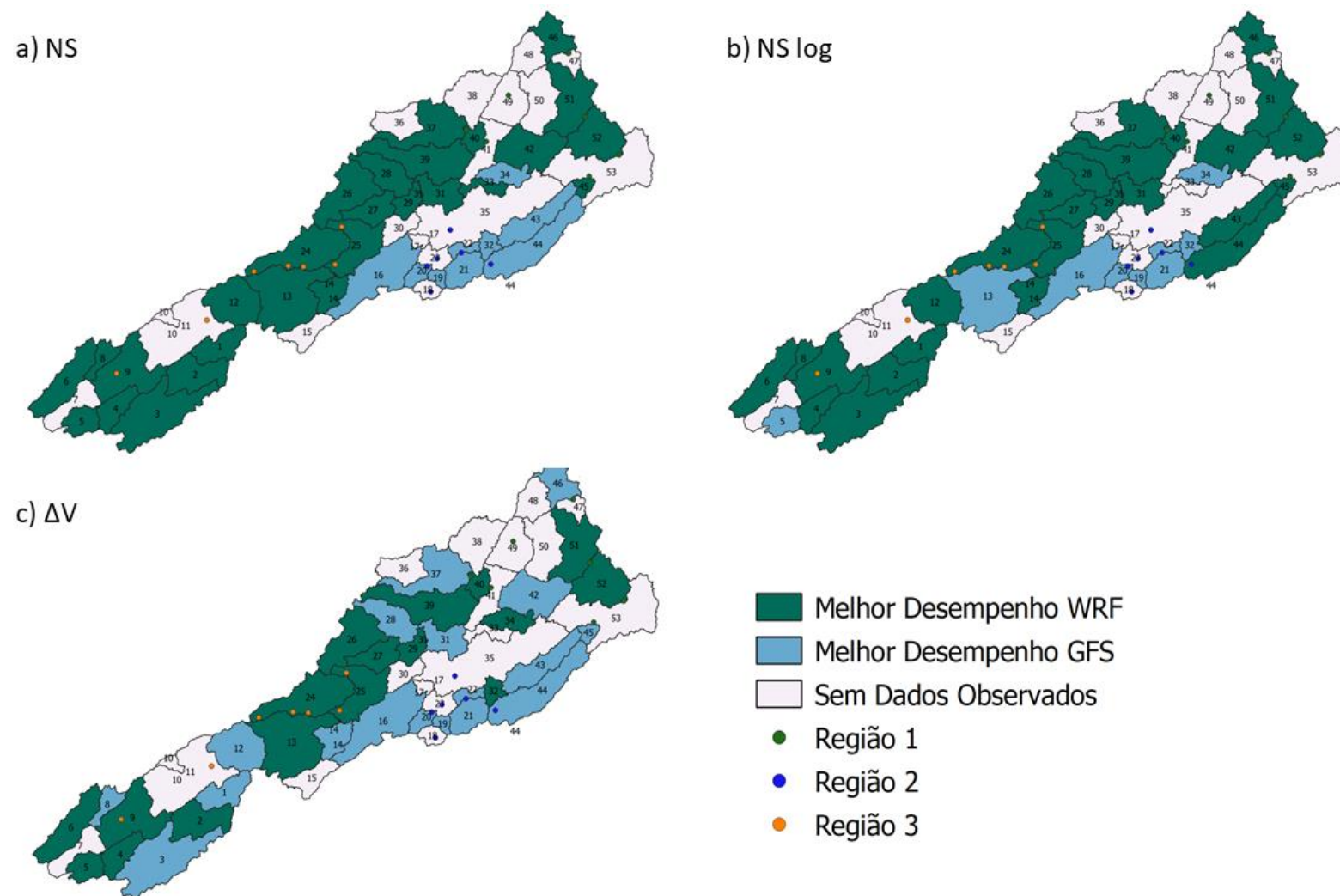


Figura 36 - Mapas com as estatísticas de ajuste do modelo MGB-IPH para as 53 sub-bacias da área de estudo, utilizando as métricas: (a) NS; (b) NSlog; e (c) ΔV . As cores indicam o modelo com melhor desempenho em cada sub-bacia.

Além das métricas NS, NSlog e ΔV , foram calculadas as métricas EAM, REQM e PBIAS para avaliar a precisão da simulação das vazões pelos modelos WRF e GFS em relação às vazões observadas. Essas métricas fornecem insights complementares sobre os erros absolutos, a magnitude dos desvios e a tendência de superestimação ou subestimação da vazão. Na Figura 37, é apresentada a distribuição espacial destacando as sub-bacias onde cada modelo apresentou o melhor desempenho entre os modelos WRF e GFS para cada métrica. Os valores correspondentes estão detalhados no Anexo 2.

A análise do EAM mostra que o WRF apresentou menor erro absoluto na grande maioria das sub-bacias, enquanto o GFS teve vantagem em apenas cinco delas. O WRF obteve um desempenho melhor, por exemplo, na sub-bacia 12, que o EAM do WRF foi de 101,97, enquanto o GFS atingiu 112,63, e na sub-bacia 42, que o WRF apresentou um erro de 101,63, contra 129,43 do GFS. Mesmo na Região 2 (serrana do Rio de Janeiro), onde o GFS apresentou melhores ajustes de NS e NSlog, os valores absolutos de erro mostram que o WRF foi superior na maior parte das sub-bacias.

Os valores do REQM, que penaliza mais os erros extremos, confirmam a vantagem do WRF, com desempenho superior em 35 sub-bacias. Destacam-se as sub-bacias 40 e 42, onde o WRF obteve REQM bem menores que o GFS. As regiões centrais da bacia e parte do norte foram as que apresentaram os melhores ajustes de erro absoluto.

A análise do PBIAS, que avalia se o modelo tende a superestimar ou subestimar a vazão observada mostra que, no geral, os valores foram muito próximos de 0%, que indica pouco viés em ambos os modelos, valores positivos indicam que o modelo tende a subestimar os valores observados e os valores negativos indicam que o modelo tende a superestimar os valores observados. A maioria das bacias apresentam valores positivos, tanto para o WRF quanto para o GFS, indicando essa tendência de subestimar a vazão, porém em sub-bacias como 16, 34, 43, 44 e 45 os valores negativos indicam que houve superestimativa da vazão, e isso pode ser observado nos hidrogramas.

Além disso, os valores de PBIAS indicam que o WRF teve menor viés em 38 das 53 sub-bacias, reforçando seu maior equilíbrio na previsão do volume total escoado. Na sub-bacia 42, por exemplo, o PBIAS do WRF foi de 0.00340, enquanto o GFS atingiu 0.00419, confirmando que o modelo global apresentou uma maior tendência à superestimação da vazão.

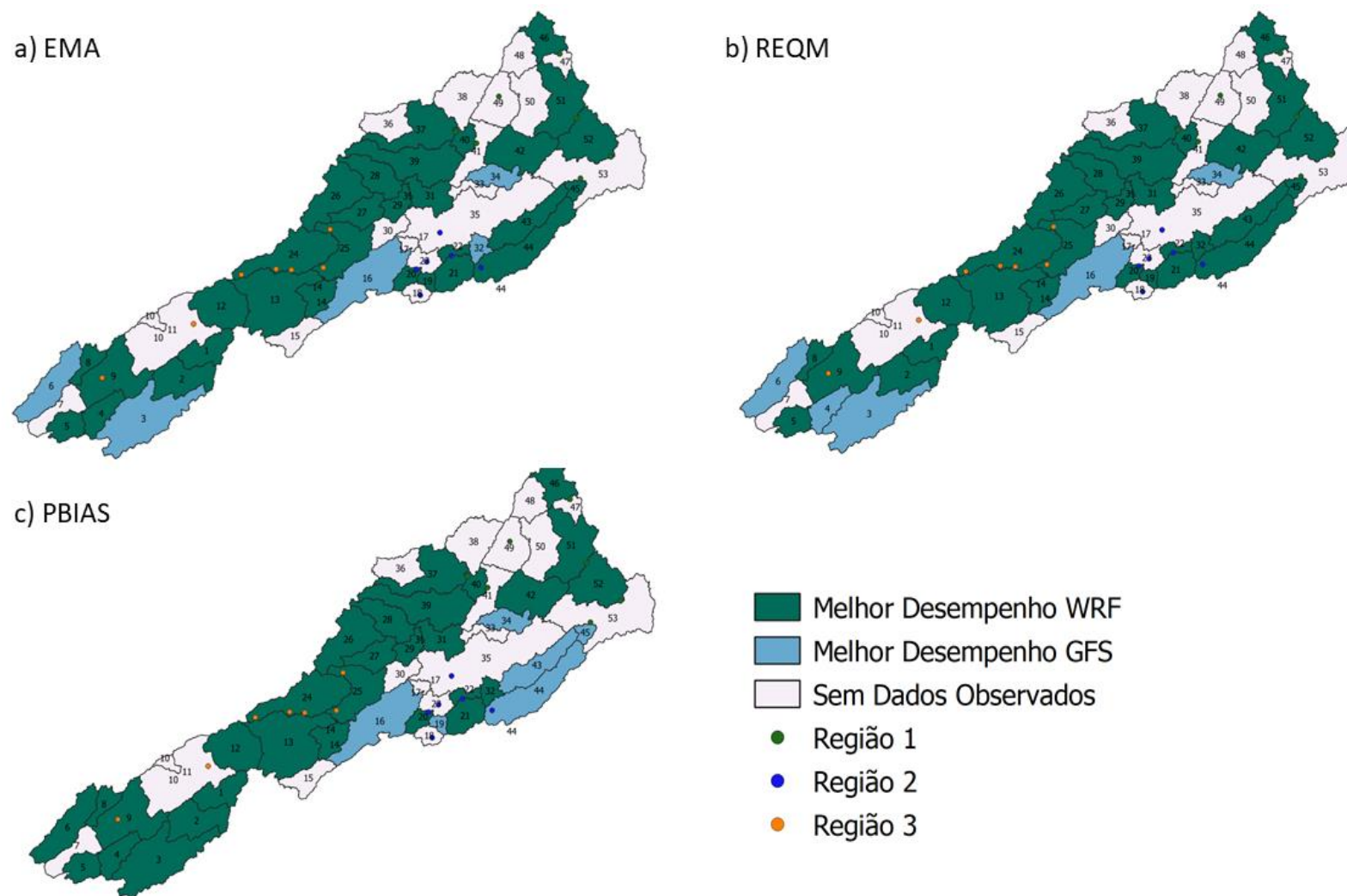


Figura 37 - Mapas com as estatísticas da vazão simulada pelo modelo MGB-IPH com os dados dos modelos WRF, GFS e os dados observados para as 53 sub-bacias da área de estudo, utilizando as métricas: (a) EMA; (b) REQM; e (c) PBIAS. As cores indicam o modelo com melhor desempenho em cada sub-bacia.

Os hidrogramas simulados pelo MGB-IPH para as três regiões estudadas são apresentados na Figura 38, na Figura 39 e na Figura 40, respectivamente, para o mês de fevereiro de 2020 utilizando os dados de precipitação do WRF e GFS, comparados aos valores observados. Essas figuras permitem avaliar o desempenho dos modelos na previsão das vazões ao longo da bacia.

A Região 1 (Figura 38), situada no norte da bacia, é caracterizada por volumes expressivos de precipitação, particularmente associados a eventos intensos registrados em fevereiro. A análise dos hidrogramas demonstra que o WRF teve um desempenho superior ao GFS na representação dos picos de vazão. Isso pode ser observado na sub-bacia 45, próxima à estação pluviométrica de Dois Rios, onde o WRF representou melhor os picos de vazão, ainda que tenha subestimado os valores máximos. A Figura 27, que apresenta a precipitação acumulada, já indicava que o WRF teve um melhor ajuste nos dias 11 a 13 de fevereiro, o que se reflete na simulação hidrológica.

Nas sub-bacias 51 e 52, o WRF simulou picos ligeiramente maiores que o GFS, mas ambos os modelos subestimaram significativamente os valores observados. Isso indica que, apesar de o modelo regionalizado ser mais sensível às variações da precipitação, ainda há dificuldades na representação precisa dos eventos de cheia. Em sub-bacias como a 40 e 42, o WRF capturou a tendência da vazão com mais fidelidade, enquanto o GFS apresentou uma resposta muito mais suavizada e distante dos valores observados. Esse comportamento está em conformidade com os resultados das métricas NS e NSlog, que já indicavam um desempenho superior do WRF na maioria das sub-bacias, especialmente para eventos extremos.

A Figura 39 apresenta os hidrogramas da Região 2, que compreende a região serrana do Rio de Janeiro. Nesta área, o GFS havia apresentado melhores ajustes nas métricas NS e NSlog em algumas sub-bacias, mas os hidrogramas mostram que o WRF ainda teve uma melhor representação das vazões observadas.

Nas sub-bacias 34, 43 e 44, o WRF demonstrou boa capacidade de capturar os picos de vazão, mantendo uma tendência próxima à observada. No entanto, nas sub-bacias 19, 21 e 22, ambos os modelos subestimaram de forma significativa os valores máximos de vazão, o que sugere uma dificuldade comum em representar eventos hidrológicos extremos em áreas de topografia mais complexa e maior variabilidade espacial da precipitação.

A análise de PBIAS, discutida anteriormente, já havia indicado que algumas sub-bacias desta região apresentavam superestimação do escoamento pelo WRF, o que pode ser observado em hidrogramas como os da sub-bacia 34. No entanto, o desempenho geral do WRF continua superior, especialmente ao considerar que a representação do volume total escoado também foi mais equilibrada neste modelo em comparação ao GFS.

A Figura 40 apresenta os hidrogramas da Região 3, localizada na parte centro-sul da bacia. Essa região, caracterizada por áreas de maior altitude, como a Serra da Mantiqueira, registrou valores extremos de precipitação no início do mês, que não foram bem representados pela maioria dos modelos.

Na sub-bacia 13, o WRF conseguiu identificar uma elevação nos valores nos primeiros dias de fevereiro, sendo uma das simulações mais precisas entre os dois modelos. Essa sub-bacia, inclusive, apresentou os melhores ajustes globais, tanto para o WRF quanto para o GFS, indicando que a calibragem do modelo hidrológico foi mais eficiente nessa área.

Já nas sub-bacias 25, 26 e 27, o WRF foi mais eficiente na simulação dos picos de vazão, mas ainda subestimou os valores registrados, evidenciando dificuldade em capturar os extremos hidrológicos. Esse comportamento está alinhado com os resultados das métricas de erro absoluto (EAM e REQM), que já haviam demonstrado que o WRF foi mais preciso na estimativa das vazões ao longo da bacia, mas ainda apresentava desafios na previsão de picos elevados.

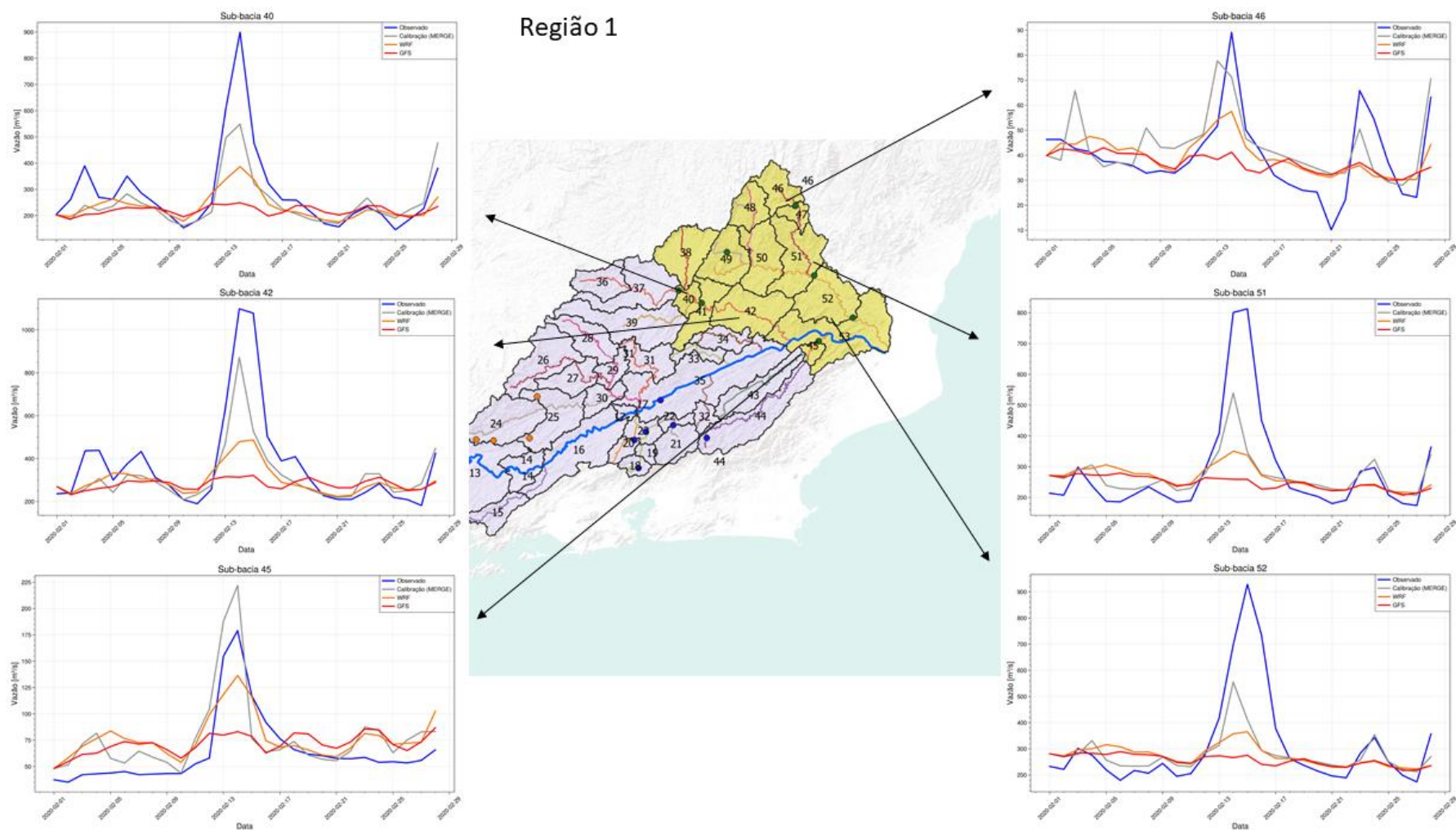


Figura 38 - Hidrogramas simulados pelo modelo MGB-IPH para fevereiro de 2020 utilizando com os dados dos modelos WRF e GFS, do produto MERGE usado na calibração e comparados aos valores observados para a Região 1. A figura apresenta as sub-bacias 40, 42, 45, 46, 51 e 52.

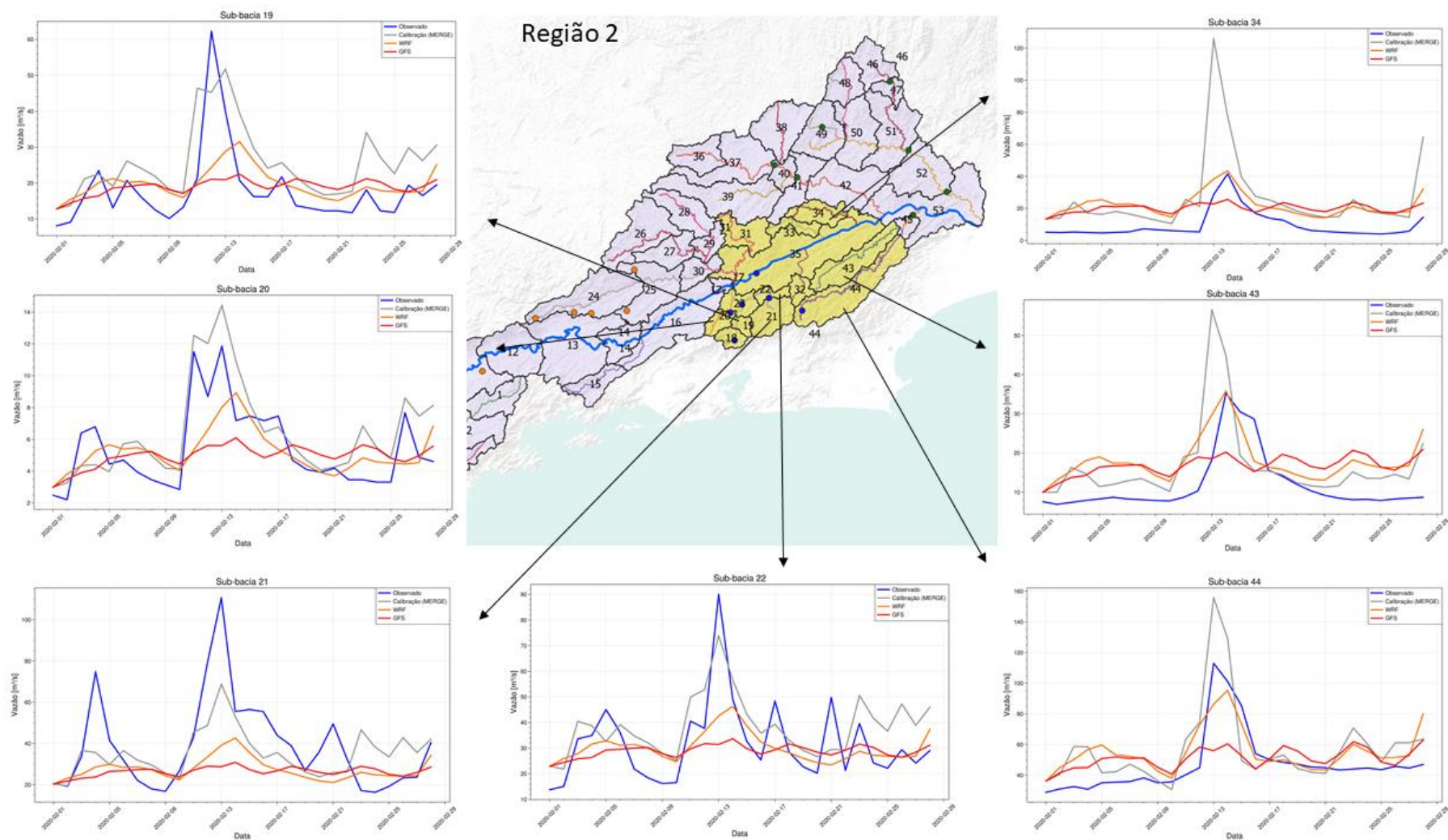


Figura 39 - Hidrogramas simulados pelo modelo MGB-IPH para fevereiro de 2020 utilizando com os dados dos modelos WRF e GFS, do produto MERGE usado na calibração e comparados aos valores observados para a Região 2. A figura apresenta as sub-bacias 19, 20, 21, 22, 34, 43 e 44.

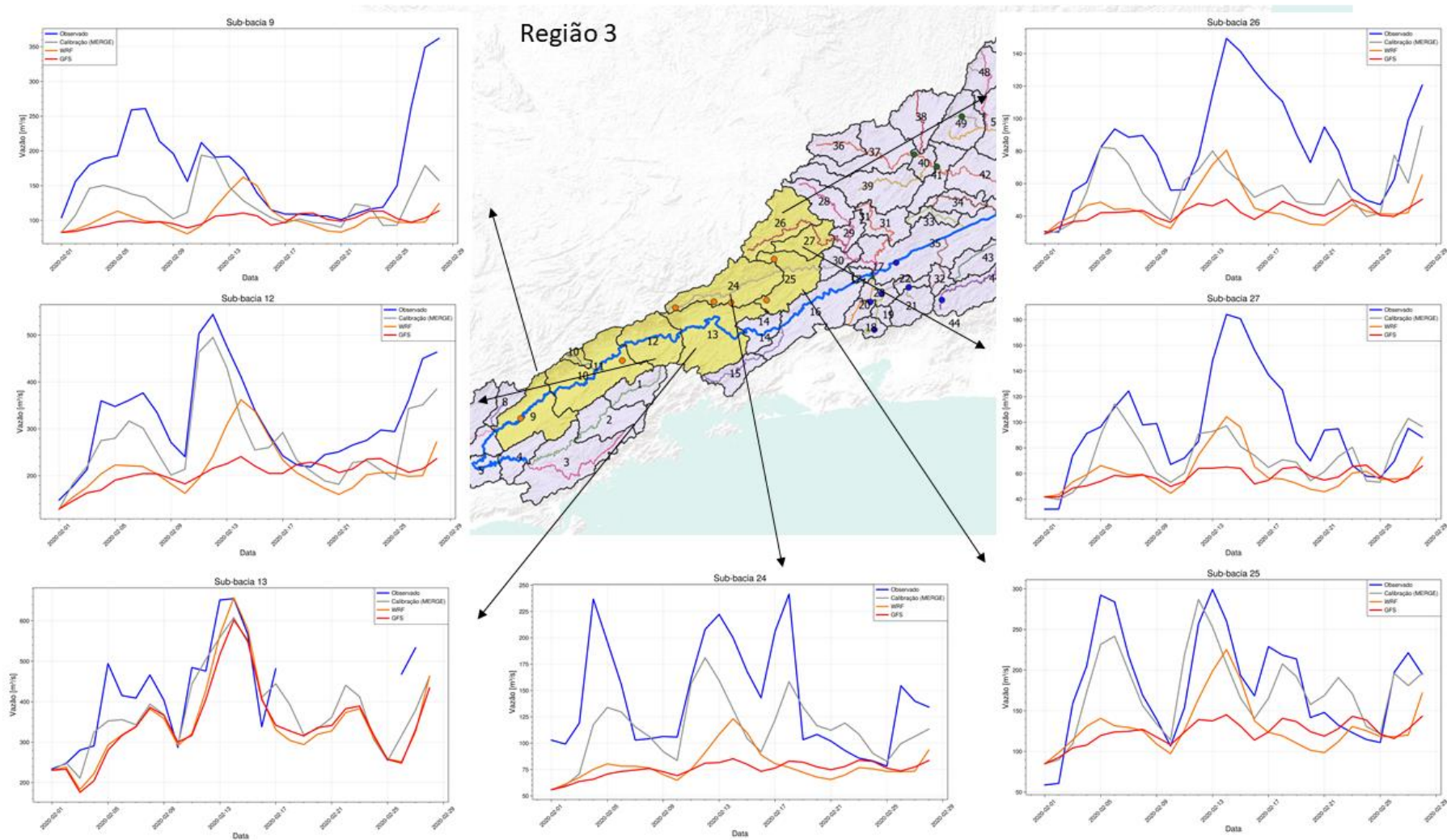


Figura 40 - Hidrogramas simulados pelo modelo MGB-IPH para fevereiro de 2020 utilizando com os dados dos modelos WRF e GFS, do produto MERGE usado na calibração e comparados aos valores observados para a Região 2. A figura apresenta as sub-bacias 9, 12, 13, 24, 25, 26 e 27.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma avaliação da integração do modelo regional WRF ao modelo hidrológico MGB-IPH para a BRPS, buscando aprimorar a previsão hidrológica e contribuir para a gestão de eventos extremos na bacia. A metodologia desenvolvida permite uma melhor antecipação de inundações. Inicialmente, foram analisados os dados observados de precipitação e vazão, a fim de compreender os padrões climáticos e hidrológicos da região. A distribuição espacial desses dados revelou que as áreas de maior altitude e relevo mais acidentado, como a Serra da Mantiqueira, registram os maiores volumes anuais de precipitação, refletindo diretamente em maiores valores de vazão específica. Além disso, a análise dos percentis de extremos (p95 e p99) indicou a recorrência de eventos extremos nessas regiões, evidenciando sua vulnerabilidade a inundações.

A análise de tendências da precipitação mostrou um comportamento heterogêneo entre as estações pluviométricas, com algumas apresentando tendência positiva e outras negativa. No entanto, a análise de MK das taxas de vazão, indica uma preocupante diminuição em muitos pontos ao longo do Rio Paraíba do Sul, principalmente em áreas urbanas com alta demanda hídrica. Esse resultado contrasta com as tendências calculadas para os dados de precipitação, que, em sua maioria, não apresentam tendências significativas. Isso levanta preocupações sobre a sustentabilidade dos recursos hídricos nessas áreas e enfatiza a necessidade de estratégias eficazes de gestão da água para mitigar os possíveis impactos da escassez hídrica.

A definição dos limiares de precipitação extrema para a estação úmida permitiu a escolha de fevereiro de 2020 como período de referência para as simulações, devido à ocorrência de três eventos significativos de precipitação prolongada. O modelo WRF capturou melhor a variabilidade espacial e temporal desses eventos em comparação ao GFS, refletindo-se em uma melhor performance hidrológica. Essa diferença foi mais notável em eventos extremos, onde o GFS apresentou distribuição mais homogênea e menos aderente às observações.

O modelo MGB-IPH foi ajustado e calibrado para garantir a adequação da simulação hidrológica à BRPS. Foram ajustados parâmetros relacionados à infiltração, armazenamento e escoamento superficial, a fim de minimizar os erros entre as vazões simuladas e observadas. O processo de calibração priorizou a métrica NS, garantindo uma melhor representação dos picos de vazão, fundamentais para a previsão de eventos extremos. Os resultados da calibração indicam que o desempenho do modelo melhora significativamente, com a maioria das sub-

bacias atingindo valores de NS superiores a 0,5, entrando na faixa de desempenho "satisfatório" e "bom", e algumas superando 0,75, alcançando classificação "muito bom".

Em relação a avaliação entre as simulações do MGB-IPH iniciadas com os dados do WRF e do GFS, foram empregadas diversas métricas estatísticas para avaliar a qualidade das simulações, incluindo NS, NSlog, ΔV , EAM, REQM e PBIAS.

A comparação demonstrou a superioridade do modelo regional na representação das vazões, especialmente em eventos de pico. Embora o GFS tenha apresentado bons ajustes em algumas sub-bacias, particularmente na Região 2 (serrana do Rio de Janeiro), a análise dos erros revelou que o WRF apresentou um desempenho mais equilibrado e preciso na maioria das sub-bacias, com valores de EAM, REQM e PBIAS mais aderentes às vazões observadas.

A análise do EAM evidenciou um desempenho superior do WRF em 35 das 53 sub-bacias, indicando uma menor discrepância entre as vazões simuladas e observadas. O REQM, que penaliza erros extremos, também reforçou a superioridade do WRF, mostrando sua maior precisão na representação dos eventos hidrológicos mais intensos. Além disso, o PBIAS revelou um viés menor no WRF em 38 sub-bacias, demonstrando um melhor equilíbrio na estimativa do volume total escoado, enquanto o GFS apresentou maior tendência à superestimação ou subestimação das vazões em diferentes regiões da bacia.

A análise regional destacou variações importantes na resposta hidrológica da BRPS. A Região 1 (norte da bacia) registrou os maiores volumes de precipitação e picos de vazão, com o WRF demonstrando maior precisão na representação desses eventos. Na Região 2 (serrana do Rio de Janeiro), o GFS teve um ajuste inicial melhor para algumas métricas, mas os hidrogramas mostraram que o WRF capturou melhor as vazões observadas. Já na Região 3 (centro-sul da bacia), o WRF teve melhor desempenho ao representar os picos de vazão iniciais, apesar de ainda subestimar alguns eventos extremos.

Os resultados obtidos têm implicações diretas para a gestão de recursos hídricos e a previsão de eventos extremos. A integração do WRF com o MGB-IPH demonstrou ser uma abordagem promissora para aprimorar a previsão hidrológica, fornecendo subsídios para ações de mitigação de desastres e planejamento hídrico em regiões vulneráveis a inundações. Essa abordagem pode servir de suporte para políticas públicas destinadas à proteção da população e infraestrutura em áreas suscetíveis a eventos extremos.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a implementação e operacionalização dessa integração de modelos com foco na prevenção de inundações, incluindo o desenvolvimento de um sistema online para acesso público e emissão de alertas. Além disso, aprimoramentos na

calibração do modelo para sub-bacias específicas e investigações sobre o impacto do uso e ocupação do solo podem contribuir para a melhoria contínua da previsão hidrológica.

A Figura 41 apresenta uma síntese da aplicação operacional do WRF + MGB-IPH, detalhando os passos necessários para sua implementação. Esse fluxo operacional destaca desde o download dos dados atmosféricos até a execução final do modelo hidrológico, reforçando a viabilidade de sua aplicação prática.

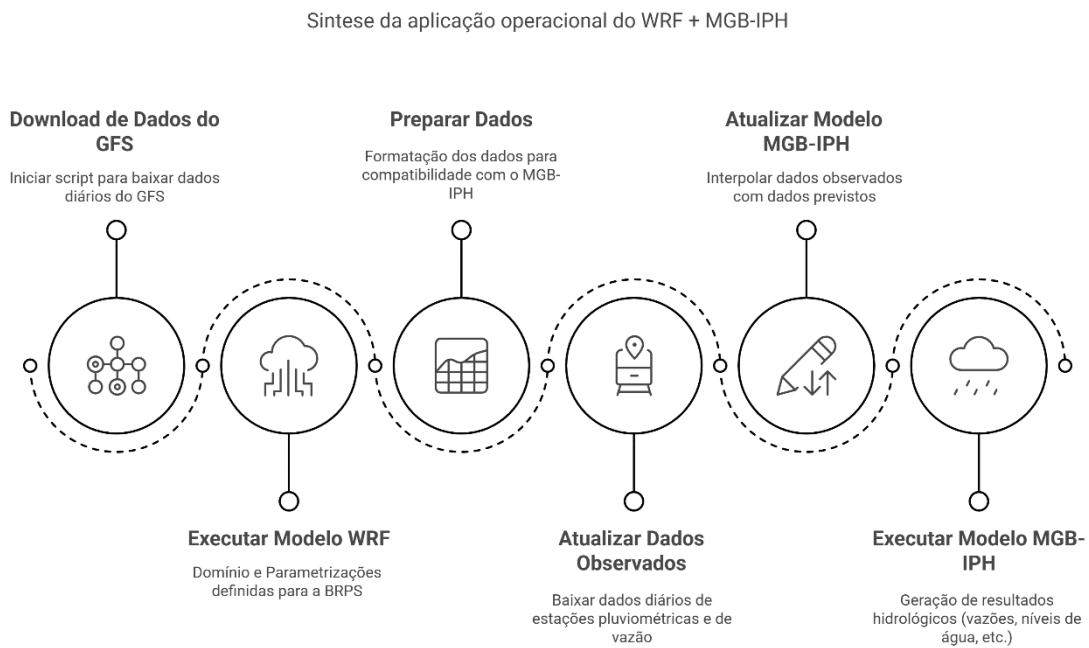


Figura 41 - Fluxograma representando a operacionalização da integração do modelo atmosférico WRF com o modelo hidrológico MGB-IPH para a previsão de vazões na BRPS.

REFERÊNCIAS

ABOU RAFEE, S. A., FREITAS, E. D., MARTINS, J. A., MARTINS, L. D., DOMINGUES, L. M., NASCIMENTO, J. M., UVO, C. B. Spatial trends of extreme precipitation events in the Paraná river basin. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 59, n. 3, p. 443-454, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <http://18.229.168.129:8080/publicacoes/ana/Conjuntura-2019.pdf>. Acesso em: 20 set. 2020.

AGEVAP - Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Plano de recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul: Diagnóstico dos recursos hídricos - relatório final. Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente, 2006. (Relatório Contratual R-7). Disponível em: <www.ceivap.org.br/downloads/PSR-010-R0.pdf>. Acesso em: 20 set. 2022.

AGEVAP. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e planos de recursos hídricos das bacias afluentes: caracterização sócio-econômica, 2013. Disponível em: <www.ceivap.org.br/conteudo/relatorio-diagnostico-rp6-tomo3.pdf>. Acesso em: 20 set. 2022.

ALMEIDA, V A; MARTON, E. Chuvas Intensas em Santa Catarina: Análise Sinótica de um Evento Extremo e Simulação Numérica com o Modelo Atmosférico WRF. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. v. 37, n. 2, p. 169-179, 2014.

ANDRADE, K. M., PINHEIRO, H. R. Simulação de eventos extremos de precipitação na Região Serrana do Rio de Janeiro no clima presente e futuro utilizando o modelo ETA-HADCM3. **Simpósio Internacional de Climatologia**, João Pessoa-PB, 2011.

ARAÚJO, A. A., GARCIA, D. W., MONTEIRO, J. R., MIGUEL, T. V., CAMPOS, B., CARVALHO, V. S. B., REBOITA, M. S. Avaliação do modelo Weather Research and Forecasting (WRF) na simulação operacional de um evento de frente fria no sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, p. 805-817, 2023.

BARON, G. Implementação Do Sistema De Previsão De Eventos Hidrológicos Críticos No Município De Manaus/Am. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade

Federal de Santa Catarina – Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – Florianópolis – 2017.

BENOIT, R.; KOUWEN, N.; YU, W.; CHAMBERLAND, S.; PELLERIN, P. Hydrometeorological aspects of the real-time ultra nescale forecast support during the special observing period of the map. **Hydrology and Earth System Sciences, Perugia**, v. 7, p. 877-889, 2003.

BENOIT, R.; PELLERIN, P. Toward the use of coupled atmospheric and hydrologic models at regional scale. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 1681-1706, 2000.

BRAGA, A. C. F. M.; GALVAO, C. O.; ARAÚJO, E.; SOUZA, E. P.; OLIVEIRA, K. F.; CIRNE, W. Acoplamento operacional de modelos atmosféricos, hidrológicos e de gerenciamento de recursos hídricos. In: **Simpósio internacional de climatologia**, 9., 2005.

BRASILIENSE, C. S. Chuvas Intensas Associadas A Inundações Na Bacia Do Rio Paraíba Do Sul Em janeiro/2000. **II IPTMU - Encontro sobre Impactos Potenciais de Desastres Naturais em Infraestruturas de Transporte e Mobilidade Urbana**. São José dos Campos, Brasil. 2016.

BRASILIENSE, C. S., DEREZYNSKI, C. P., SATYAMURTY, P., CHOU, S. C., CALADO, R. N. Climatologias da Temperatura do Ar e da Precipitação na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Região Sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 1, p. 355-365, 2020.

BREMICKER, M. Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells. Dissertation Doktorgrad, Geowissenschaftlicher Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg. Juli. 1998.

CALADO, R. N., DEREZYNSKI, C. P., CHOU, S. C., SUEIRO, G., OLIVEIRA MOURA, J. D. D., SILVA SANTOS, V. R. D. Avaliação do Desempenho das Simulações por Conjunto do Modelo Eta-5km para o Caso de Chuva Intensa na Bacia do Rio Paraíba do Sul em janeiro de 2000. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 83-96, 2018.

CAMPOS, B., CARVALHO, V. S. B., CALHEIROS, A. J. P. Análise da ocorrência de eventos extremos de precipitação registrados no município de Itajubá, MG. Conference: **V Simpósio Internacional de Climatologia**. Natal, Brasil. 2011.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**. v.17, p. 88-108, 2004.

CAVALCANTI, B. S.; MARQUES, G. R. G. Recursos hídricos e gestão de conflitos: A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a partir da crise hídrica de 2014-2015. **Revista de Gestão dos Países de Língua Portuguesa**, v. 15, n. 1, p. 4-16, 2016.

CEIVAP - Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, 2020. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br>>. Acesso em: 20 set. 2022.

CHAVES, M B. Simulação hidrometeorológica em bacia semiárida/tropical através de um modelo atmosférico-hidrológico acoplado. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2015.

CHEN, F.; DUDHIA, J. Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 4, 2001.

CHUG, D., PATHAK, A., INDU, J., JAIN, S. K., JAIN, S. K., DIMRI, A. P., GHOSH, S. Observed evidence for steep rise in the extreme flow of western Himalayan rivers. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 15, 2020.

COELHO, C. A., CARDOSO, D. H., FIRPO, M. A. A seca de 2013 a 2015 na região sudeste do Brasil. **Revista Climanalise**, p. 55-66, 2016.

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

COSTA, R. L., DE MELLO BAPTISTA, G. M., GOMES, H. B., DOS SANTOS SILVA, F. D., DA ROCHA JÚNIOR, R. L., DE ARAÚJO SALVADOR, M., HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, 2020.

DA COSTA, L. F., DE FARIAS JÚNIOR, J. E. F., JOHNSON, R. M. F., PETRUNGARO, A. C. N., RAMOS, N. P. Análise da precipitação da bacia do rio Paraíba do Sul com enfoque nos

anos de 2014 a 2017. **Proceedings of the III Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do rio Paraíba do Sul**, Juiz de Fora, Brazil, p. 27-29, 2018.

DA SILVA, B. C., COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M. Simulação da bacia do Rio São Francisco através do Modelo Hidrológico MGB-IPH. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE VII**, São Luiz: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. ABRH, v. 1, p. 122. 2004.

DE CAMPOS, B.; CARVALHO, V. S. B.; MATTOS, E. V. Assessment of cloud microphysics and cumulus convection schemes to model extreme rainfall events over the Paraíba do Sul River Basin. **Urban Climate**, v. 51, p. 101618, 2023.

DE MACEDO, N. B. et al. Modelling urban floods in megacities: a comparative bibliometric review of traditional physically based and artificial intelligence models. In: **IAHS-AISH Scientific Assembly 2022**, Montpellier, France, 29 May–3 Jun 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/iahs2022-687>. Acesso em: 2024.

DEMANBORO, A. C. Gestão ambiental e sustentabilidade na macrometrópole paulista-Bacia do Rio Paraíba do Sul. **Sociedade & Natureza**, v. 27, p. 515-529, 2015.

DOURADO, F., ARRAES, T., SILVA, M. O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro: as causas do evento, os mecanismos dos movimentos de massa e a distribuição espacial dos investimentos de reconstrução no pós-desastre, **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 35, p. 43-54, 2013.

DRUMOND, A.; NIETO, R.; GIMENO, L.; AMBRIZZI, T. A Lagrangian identification of major sources of moisture over Central Brazil and La Plata Basin. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. D14128, 2008.

DUDHIA, J. Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 46, n. 20, 1989.

DURÁN-QUESADA, A. M.; REBOITA, M. S.; GIMENO, L.; NIETO, R. The role of the tropics in the global water cycle: Precipitation and moisture transport in Tropical America. In: **ESA-ESRIN CONFERENCE: Earth Observation and Water Cycle Science: “towards a water cycle multi-mission strategy”**, Frascati, Itália, 2009.

FERRARI, F., CASSOLA, F., TUJU, P. E., STOCCHINO, A., BROTTTO, P., MAZZINO, A. Impact of Model Resolution and Initial/Boundary Conditions in Forecasting Flood-Causing Precipitations. **Atmosphere**, v. 11, n. 6, p. 592, 2020.

FISCH, G.; SANTOS, T. A.; SILVA, R. C. Water security in the Vale do Paraíba's basin: future scenarios. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, p. 881-887, 2017.

FRANÇA, B. T., DE ANDRADE, M. P., DE MELO RIBEIRO, C. B., HIPPERT, H. S. Dinâmica do uso do solo e alterações na vazão na bacia do Rio São Francisco no início do Séc. XXI. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, p. 18, 2021.

G1. Cheia do Rio faz Defesa Civil levar moradores de áreas ribeirinhas para abrigos temporários em Paraíba do Sul. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/sul-do-rio-costa-verde/noticia/2020/03/02/cheia-do-rio-faz-defesa-civil-levar-moradores-de-areas-ribeirinhas-para-abrigos-temporarios-em-paraiba-do-sul.ghtml>. Acesso em: 28 jan. 2025.

G1. Chuvas voltam a causar enchentes e deslizamentos em cidades da Zona da Mata e Vertentes. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2020/02/13/chuvas-voltam-a-causar-enchentes-e-deslizamentos-em-cidades-da-zona-da-mata-e-vertentes.ghtml>. Acesso em: 28 jan. 2025.

G1. Cidades atingidas por enchentes na Zona da Mata continuam trabalhos de recuperação. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2020/02/04/cidades-atingidas-por-enchentes-na-zona-da-mata-continuam-trabalhos-de-recuperacao.ghtml>. Acesso em: 28 jan. 2025.

G1. Cidades do Norte e Noroeste do Rio ficam inundadas após chuva forte e cheia dos rios. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/norte-fluminense/noticia/2020/01/25/cidades-do-norte-e-noroeste-do-rio-ficam-inundadas-apos-chuva-forte-e-cheia-dos-rios.ghtml>. Acesso em: 28 jan. 2025.

G1. Prefeitura cancela shows de Carnaval para auxiliar vítimas das enchentes em Muriaé. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2020/02/11/prefeitura-cancela-shows-de-carnaval-para-auxiliar-vitimas-das-enchentes-em-muriae.ghtml>. Acesso em: 28 jan. 2025.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROUPELEWSKI, C. F. The South America Monsoon Rainfall over West-Central Brazil. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 47-66, 2004.

GOMES, F. B. R., VARGAS, I. S., PROCÓPIO, A. S., CASTRO, S. R., DE MELO RIBEIRO, C. B. Estudo da variabilidade espaço-temporal e tendências de precipitação na bacia hidrográfica do rio paraíba do sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 365-390, 2021.

GOOSSENS C, BERGER A. Annual and seasonal climatic variation over the northern hemisphere and Europe during the last century. **Ann Geophys** v. 4, p. 385–400, 1986.

GRELL, G. A.; FREITAS, S. R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 10, 2014.

GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 263-280, 2003.

GRIMM, A. M.; VERA, C. S.; MECHOSO, C. R. The South American Monsoon System. In: CHANG, C.-P.; WANG, B.; LAU, N.-C. G. (Org.). The Global Monsoon System: Research and Forecast, WMO/TD No 1266 (TMRP Report No 70) **Report of the International Committee of the Third International Workshop on Monsoons (IWMIII)**, 2 –6 November 2004, Hangzhou, China, p. 219–238, 2005.

GROPPO, J. D., MORAES, J. D., BEDUSCHI, C. E., MARTINELLI, L. A. Análise de séries temporais de vazão e precipitação em algumas bacias do Estado de São Paulo com diferentes graus de intervenções antrópicas. **Geociências**, v. 24, n. 2, p. 181-193, 2005.

GUDMUNDSSON, L., LEONARD, M., DO, H. X., WESTRA, S., SENEVIRATNE, S. I. Observed trends in global indicators of mean and extreme streamflow. **Geophysical Research Letters**, v. 46, p. 756–766, 2019.

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.

GUO, S., WANG, J., XIONG, L., YING, A., LI, D. “A macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts in China”. **Journal of Hydrology**, v. 268, n. 4, p. 1-15, 2002.

IORIS, A.A.R. Os limites políticos de uma reforma incompleta: a implementação da Lei dos Recursos Hídricos na Bacia do Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 10, n. 1, p. 61-85, 2011.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. **Cambridge University Press**, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

JANJIC, Z. I. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP MESOmodel. **NCEP Office Note**, v. 437, p. 61, 2001.

JIMÉNEZ, P. A. et al. A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation. **Monthly Weather Review**, v. 140, n. 3, 2012.

KENDALL, M. Rank Correlation Methods. London: Charles Griffin, 1975.

KENDZIERSKI, S. A review of selected parameterization schemes of WRF model over Poland area in short-term weather forecast. 2020.

KODAMA, Y.-M. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ), Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 70, p. 813–835, 1992.

LARA, P. G., KOBIYAMA, M., BONUMÁ, N. B., LUCINI, H., GOMES, G. H., XAVIER, K., BORGES, N. B. (2015) SPEHC– Sistema de previsão de eventos hidrológicos críticos. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2015.

LEE, J., CHOI, J., SEO, J., WON, J., KIM, S. Exploring Climate Sensitivity in Hydrological Model Calibration. **Water**, v. 15, n. 23, p. 4094, 2023.

LENTERS, J. D.; COOK, K. H. Simulation and Diagnosis of the Regional Summertime Precipitation Climatology of South America. **Journal of Climate**, v. 8, p. 2988-3005, 1995.

LIANG, X.; LETTENMAIER, D.P.; WOOD, E.F.; BURGESS, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D7, p. 14415-14428, 1994.

LIMA, A., LYRA, G., ABREU, M., OLIVEIRA-JÚNIOR, J., ZERI, M., CUNHA-ZERI, G. Extreme rainfall events over Rio de Janeiro State, Brazil: Characterization using probability distribution functions and clustering analysis. **Atmospheric Research**, v. 247, p. 105221, 2021.

LIRA, C. B., CATALDI, M. Avaliação do ensemble de parametrizações físicas do modelo MM5 no evento de precipitação intensa ocorrido entre os dias 05 e 06 de abril de 2010 no município do Rio de Janeiro. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 1, p. 354-366, 2016.

LUZ BARCELLOS, P.C.; CATALDI, M. Flash Flood and Extreme Rainfall Forecast through One-Way Coupling of WRF-SMAP Models: Natural Hazards in Rio de Janeiro State. *Atmosphere*, v. 11, p. 834, 2020.

MANN, H.B. Non-parametric test against trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.

MARENGO, J. A., ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.

MARENGO, J.A., LIEBMANN, B., GRIMM, A.M., MISRA, V., DIAS, P.L.S., CAVALCANTI, I.F.A., CARVALHO, L.M.V., BERBERY, E.H., AMBRIZZI, T., VERA, C.S., SAULO, A.C., NOGUES-PAEGLE, J., ZIPSER, E., SETH, A. ALVES, L.M. Recent developments on the South American monsoon system, **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 1-21, 2012.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, v. 8, n. 1, p. 5-28, 2007.

MEIRELLES, I. Design for Information: An Introduction to the Histories, Theories, and Best Practices Behind Effective Information Visualizations. **Rockport Publishers**, Beverly, MA, p. 142, 2013.

MLAWER, E. J. et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 102, n. D14, 1997.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. van; BINGER, 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, p.885-900, 2007.

MORRISON, H.; THOMPSON, G.; TATARSKII, V. Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One- and Two-Moment Schemes. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 3, 2009.

MORTATTI, J., BORTOLETTO JUNIOR, M. J., MILDE, L. C. E., PROBST, J. L. Hidrologia dos rios Tietê e Piracicaba: séries temporais de vazão e hidrogramas de cheia. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 12, n. 23, p. 55-67, 2004.

NEGRÃO, A. C., RODRIGUEZ, D. A., CHOU, S. C., MEDEIROS, G. S., CAMARGO, C. P. Previsão de vazão de eventos extremos utilizando o modelo hidrológico distribuído MHD-INPE e previsões meteorológicas do modelo ETA-INPE para uma alta resolução espacial–estudo de caso: São Luís do Paraitinga (SP). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, p. 647-657, 2017.

NEVES, A. D. O., VILANOVA, M. R. N. Caracterização da seca histórica da década de 2010 na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Estado de São Paulo, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, p. 339-349, 2021.

NOBRE, C. A., MARENGO, J. A., SELUCHI, M. E., CUARTAS, L. A., ALVES, L. M. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 2, p. 252-262, 2016.

SILVA, V. O. Eventos de seca na região Sudeste do Brasil: ocorrências temporais e comportamento futuro (Doctoral dissertation, Master Dissertation, Universidade Federal de Lavras, Lavras), 2018.

O’GORMAN, PAUL A. Precipitation extremes under climate change. **Current climate change reports**, v. 1, n. 2, p. 49-59, 2015.

OLIVEIRA, A. C. Implantação do modelo atmosférico WRF acoplado com o modelo hidrológico TOPMODEL para Bacia de União da Vitória. 2006. 75 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

OLIVEIRA, A. V. D., SERRANO, R. O. P., MESQUITA, A. A., MOREIRA, J. G. D. V. Temporal Trend and Estimation of the Hydrological Risk of Maximum Rainfall and Flow Extremes in the City of Rio Branco, Acre, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 749-758, 2021.

PACHECO, L. C.; ODA, P. S. S.; MARCHEZINI, V. Impactos socioeconômicos de desastres na Bacia do Rio Paraíba do Sul: uma análise do período 2003-2022. **ClimaCom – Desastres** [online], Campinas, v. 10, n. 2, 2023.

PAIVA, R. C. D. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias estudo de caso: bacia do rio Solimões. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009.

PAN, L., LIU, Y., KNIEVEL, J. C., DELLE MONACHE, L., ROUX, G. Evaluations of WRF Sensitivities in Surface Simulations with an Ensemble Prediction System. **Atmosphere**, v. 9, n. 3, p.106, 2018.

PEDRON, I. T., SILVA DIAS, M. A., DE PAULA DIAS, S., CARVALHO, L. M., FREITAS, E. D. Trends and variability in extremes of precipitation in Curitiba–Southern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1250-1264, 2017.

QUADRO, M. F. L. D., DIAS, M. A. F. D. S., HERDIES, D. L., GONÇALVES, L. G. G. D. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 152-162, 2012.

RAMAGE, C. S. Monsoon Meteorology. **Academic Press**, New York, p. 296, 1971.

REBOITA, M. S., GAN, M. A., ROCHA, R. P. D., AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.

REBOITA, M. S., OLIVEIRA, K. R., CORRÊA, P. Y. C., RODRIGUES, R. Influência dos diferentes tipos do fenômeno El Niño na precipitação da América do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 2, p. 729-742, 2021.

REBOITA, M. S.; TEODORO, T. A.; FERREIRA, G. W. S.; SOUZA, C. A. Ciclo de Vida do Sistema de Monção da América do Sul: Clima Presente e Futuro. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 15, p. 343-358, 2022.

REGOTO, P., DEREZYNSKI, C., CHOU, S. C., BAZZANELA, A. C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 11, p. 5125-5142, 2021.

RODRIGUES, M T. Acoplamento do modelo hidrológico MGB ao modelo atmosférico WRF visando estimar vazão na bacia do rio Paraíba do Meio-AL/PE. Dissertação (mestrado em Meteorologia: Processos de Superfície Terrestre) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2012.

RODRIGUES, M. T.; MONTE, B.; FIALHO, W. B.; DINIZ, M. A.; AMORIM, R. F. C. SILVA JUNIOR, R. S.; FRAGOSO JUNIOR, C. R.; Utilização de métodos de interpolação para análise espacial pluviométrica na Bacia Hidrográfica do Paraíba do Meio – Alagoas e Pernambuco. In: **IV Simpósio Internacional de Climatologia**. 4. João Pessoa, PB. 2011.

RODRIGUEZ, D. A., LOPES, L. G., CARRIELLO, F., LÁZARO, J., JÚNIOR, S., PINTO, G. L., CHOU, S. C. Previsões de cheias extremas nos horizontes sazonais e de curto e médio prazos na bacia do rio Madeira: estudo de caso da enchente de 30 de março de 2014 em Porto Velho. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 24210, p. 346, 2017.

ROSA, A., MENDIONDO, E. M., MACEDO, M. B., DE SOUZA, V. C., SAMPLE, D., PROCOPIUCK, M. Sustainable urban drainage: delineation of a scientific domain of knowledge production. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 15, n. 38, 2019.

SANTANA, G. R. A., SANTOS, E. B., DA SILVA, M. G. A. J. Caracterização Espaço-Temporal das Secas na Bacia do Rio Paraíba do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, p. 364–375, 2020.

SILVA DIAS, M. A., DIAS, J., CARVALHO, L., FREITAS, E. D., SILVA DIAS, P. L. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, v. 116, n. 3, p. 705-722, 2013.

SILVA, V. B., KOUSKY, V. E. The South American monsoon system: climatology and variability. **Modern climatology**, v. 123, p. 152, 2012.

TABARI, H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2020.

TEODORO, T. A.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. Principais Padrões de Verão da Pressão ao Nível do Mar sobre a Região da América do Sul no Clima Presente e em Projeções Futuras. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 45, p. 40597, 2022.

VASCONCELOS, N. A.; FORMIGA-JOHNSSON, R. M.; RIBEIRO, N. B. Impactos da crise hídrica 2014-2016 sobre os usuários dos rios Paraíba do Sul e Guandu. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 16, n. 14, 2019.

VILANOVA, M. R. N. Tendências hidrológicas na região do alto rio Mogi-Guaçu, sul de Minas Gerais. **Revista Agrogeambiental**, v. 6, n. 3, 2014.

VIOLA, M. R., DE MELLO, C. R., BESKOW, S., NORTON, L. D. Applicability of the LASH model for hydrological simulation of the Grande River Basin, Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 12, p. 1639-1652, 2013.

WANG, B., JIN, C. LIU, J. Understanding Future Change of Global Monsoons Projected by CMIP6 Models, **Journal of Climate**, v. 33, n. 15, p. 6471-89, 2020.

WEISMAN, M. L.; SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B. The Resolution Dependence of Explicitly Modeled Convective Systems. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 4, 1997.

WILCOX, Catherine et al. Trends in hydrological extremes in the Senegal and Niger Rivers. **Journal of Hydrology**, v. 566, p. 531-545, 2018.

WILKS, D. S. Statistical methods in the atmospheric sciences, 2nd edn. International Geophysics Series, **Academic Press**, v. 91, p. 627, 2006.

ZHOU, J.; LAU, K. M. Does a Monsoon Climate Exist Over South America? **Journal of Climate**, v. 11, n. 5, p. 1020-1040, 1998.

ANEXOS

Anexo 1 – Tabela de estações pluviométricas usadas na etapa 1

Nome	Cód.	Latitude	Longitude	Período
Aldeia	2142022	-21,9514	-42,3561	1939-2020
Anta	2242028	-22,0353	-42,9908	1944-2020
Areal	2243013	-22,2439	-43,0972	1939-2020
Astolfo Dutra	2142000	-21,3069	-42,8606	1939-2020
Bom Jardim	2242021	-22,1569	-42,4164	1941-2020
Caçapava	2345063	-23,0778	-45,7114	1939-2020
Carangola	2042000	-20,74	-42,0239	1939-2020
Cardoso Moreira	2141003	-21,4872	-41,6136	1939-2020
Cataguases	2142001	-21,3894	-42,6964	1939-2020
Chapeu Duvas	2143020	-21,5933	-43,5033	1950-2020
Conservatoria	2243004	-22,2875	-43,9294	1945-2020
Dois Rios	2141006	-21,6433	-41,8586	1939-2020
Estevao Pinto	2143013	-21,8964	-43,0414	1943-2020
Estrada do Cunha	2245055	-22,9958	-45,0442	1939-2020
Fagundes	2243014	-22,2997	-43,1781	1939-2020
Fazenda Agulhas Negras	2244039	-22,3378	-44,5903	1941-2020
Fazenda Mendes	2242022	-22,2858	-42,66	1950-2020
Fazenda Santa Clara	2244010	-22,6919	-44,975	1939-2020
Fazenda São Gabriel	2243202	-22,0117	-43,875	1945-2020
Fazenda Sobradinho	2242027	-22,2011	-42,9	1939-2020
Fazenda Umbaubas	2142004	-21,0503	-42,5156	1943-2020
Fumaca	2244037	-22,2975	-44,3106	1947-2020
Guarani	2143001	-21,3556	-43,0503	1939-2020
Itamarati	2243010	-22,4853	-43,1492	1939-2020
Itaperuna	2141004	-21,2064	-41,8911	1942-2020
Manuel Duarte	2243008	-22,0858	-43,5567	1942-2020
Mirantao	2244058	-22,2539	-44,495	1971-2020
Monteiro Lobato	2245054	-22,9333	-45,8333	1939-2020
Moura Brasil	2243015	-22,1403	-43,1542	1939-2020
Natividade da Serra	2345032	-23,3833	-45,45	1940-2020
Paquequer	2142014	-21,8708	-42,6403	1956-2020
Paraíba do Sul	2243003	-22,1483	-43,2911	1939-2020
Patrocínio de Muriae	2142002	-21,15	-42,2011	1939-2020
Pedro do Rio	2243012	-22,3325	-43,1361	1939-2020
Pentagna	2243006	-22,1569	-43,7525	1944-2020
Pidamonhangaba	2245048	-22,9111	-45,4694	1939-2020
Ponte Alta 1	2345067	-23,3292	-45,1403	1939-2020
Ponte do Souza	2244038	-22,2706	-44,3917	1939-2020
Porciuncula	2042027	-20,9692	-42,0517	1939-2020
Queluz	2244001	-22,5406	-44,7736	1943-2020
Ribeirão São Joaquim	2244034	-22,3036	-44,1869	1942-2020

Rio da Cidade	2243011	-22,4381	-43,1703	1939-2020
Rio Novo	2143018	-21,4725	-43,1211	1944-2020
Santa Isabel do Rio Preto	2244033	-22,2311	-44,0647	1942-2020
Santa Rita do Jacutinga	2244035	-22,1506	-44,09	1939-2020
São Luiz do Paraitinga	2345065	-23,2392	-45,3056	1939-2020
Taboas	2243007	-22,2086	-43,6233	1941-2020
Tabuleiro	2143017	-21,355	-43,2469	1944-2020
Taubate	2345062	-23,0394	-45,5597	1939-2020
Torreões	2143016	-21,8692	-43,5556	1943-2020
Tres Irmãos	2141007	-21,6253	-41,9853	1943-2020
Usina Brumado	2143019	-21,8556	-43,8864	1945-2020
Usina Ituere	2143000	-21,3094	-43,2022	1939-2020
Usina Mauricio	2142006	-21,4714	-42,8131	1944-2020
Valenca	2243005	-22,2189	-43,7036	1944-2020
Visconde de Maua	2244047	-22,33	-44,5383	1939-2020
Volta Redonda	2244041	-22,5011	-44,0919	1943-2020
Zelinda	2244036	-22,2431	-44,2636	1939-2020

Tabela de estações fluviométricas usadas na etapa 1

Nome	Cód.	Latitude	Longitude	Período
Anta	58630002	-22,0353	-42,9908	1943-2020
Astolfo Dutra	58735000	-21,3069	-42,8619	1939-2020
Bom Jardim	58827000	-22,1567	-42,4161	1973-2020
Campos - Ponte Municipal	58974000	-21,7533	-41,3003	1939-2020
Carangola	58930000	-20,74	-42,0239	1955-2020
Cardoso Moreira	58960000	-21,4872	-41,6167	1939-2020
Cataguases	58770000	-21,3894	-42,6964	1966-2020
Chapeu D'uvas	58470000	-21,5939	-43,5047	1939-2020
Dois Rios	58874000	-21,6442	-41,8589	1944-2020
Estevão Pinto	58610000	-21,8964	-43,0414	1939-2020
Estrada Do Cunha	58030000	-22,9939	-45,0439	1939-2020
Fagundes	58434000	-22,2997	-43,1781	1939-2020
Fazenda Santa Clara	58220000	-22,6925	-44,9753	1939-2020
Fazenda Sobradinho	58420000	-22,1994	-42,8969	1962-2020
Fazenda Umbaúbas	58910000	-21,0506	-42,5142	1942-2020
Guarani	58730001	-21,3556	-43,0503	1944-2020
Guaratinguetá	58204000	-22,8119	-45,1825	1939-2020
Itaperuna	58940000	-21,2072	-41,8922	1939-2020
Manuel De Morais	58846000	-22,0242	-42,1344	1939-2020
Manuel Duarte	58585000	-22,0844	-43,5589	1952-2020
Moreli (Parada Moreli)	58425000	-22,1925	-43,0075	1939-2020
Paquequer	58648001	-21,8764	-42,63	1950-2020
Patrocínio Do Muriaé	58920000	-21,1506	-42,2144	1939-2020

Pedro Do Rio	58405000	-22,3319	-43,1317	1939-2020
Piau	58750000	-21,4967	-43,3172	1939-2020
Pindamonhangaba	58183000	-22,9117	-45,47	1939-2020
Piracuama	58463000	-22,8094	-45,5258	1951-2020
Ponte Alta 1	58060000	-23,33	-45,1436	1939-2020
Ponte De Pindamonhangaba	58182500	-22,9119	-45,4711	1984-2020
Ponte Do Souza	58530000	-22,2708	-44,39	1939-2020
Porciuncula	58934000	-20,9633	-42,0372	1939-2020
Queluz	58235100	-22,54	-44,7728	1939-2020
Resende	58250000	-22,4667	-44,4453	1939-2020
Rio Novo	58755000	-21,4739	-43,1289	1939-2020
Rio Preto	58550001	-22,0861	-43,82	1939-2020
São Fidelis	58880001	-21,6453	-41,7522	1939-2020
Tabuleiro	58720000	-21,3547	-43,2478	1987-2020
Três Irmãos	58795000	-21,6258	-41,9853	1939-2020
Uel Santa Cecília Barra Do Pirai	58370000	-22,45	-43,7972	1939-2020
Uhe Funil Jusante 2	58300000	-22,5375	-44,1758	1941-2020
Uhe Funil Montante 1	58235000	-22,5403	-44,7739	1939-2020
Uhe Funil Montante 2	58218000	-22,6617	-45,0125	1939-2020
Uhe Ilha Dos Pombos Fazenda Piracema	58620000	-22,0864	-43,1511	1939-2020
Uhe Simplício Moura Brasil	58440000	-22,1403	-43,1542	1950-2020
Visconde De Mauá	58525000	-22,33	-44,5389	1939-2020
Volta Redonda	58305001	-22,5019	-44,0911	1941-2020
Zelinda	58535000	-22,2442	-44,265	1949-2020

Anexo 2 – Resultados dos cálculos estatísticos das simulações do MGB-IPH com os modelos WRF e GFS

Sub-bacia	NS WRF	NS GFS	Nslog WRF	Nslog GFS	Δv WRF	Δv GFS
1	0.547	0.515	0.596	0.578	0.976	-0.345
2	0.617	0.588	0.705	0.686	-0.492	-0.76
3	0.514	0.501	0.611	0.607	2.353	2.313
4	0.901	0.897	0.865	0.857	-9.715	-9.831
5	0.799	0.798	0.35	0.829	-0.018	-0.388
6	0.52	0.481	0.601	0.579	-2.33	-3.868
8	0.545	0.511	0.6	0.571	-1.197	-1.08
9	0.548	0.518	0.592	0.553	-3.038	-3.679
12	0.802	0.786	0.763	0.754	9.299	9.111
13	0.893	0.891	0.362	0.588	-3.335	-3.426
14	0.882	0.875	0.851	0.851	6.674	6.368
15	0.209	0.209	0.213	0.213	-4.945	-4.945
16	0.881	0.883	0.794	0.8	16.356	15.908
19	0.252	0.274	0.012	0.065	23.581	18.269
20	-1.041	0.246	-0.501	0.075	89.601	7.271
21	0.031	0.434	-0.208	0.382	39.129	3.075
22	-0.63	0.437	-0.493	0.358	71.557	6.253
23	0.675	0.547	0.541	0.306	-9.31	-28.281
24	0.685	0.652	0.697	0.672	-12.387	-12.593
25	0.773	0.746	0.823	0.811	-0.067	-1.096
26	0.672	0.638	0.763	0.745	-1.628	-1.649
27	0.685	0.659	0.61	0.595	15.762	15.843
28	0.684	0.669	0.67	0.671	-1.761	-0.595
29	0.769	0.745	0.768	0.754	6.165	6.824
31	0.687	0.683	0.784	0.784	2.64	1.98
32	0.221	0.231	0.267	0.287	0.985	-1.176
33	0.479	0.479	0.586	0.586	1.054	1.054
34	0.572	0.607	0.475	0.491	0.102	-5.749
36	0.373	0.373	0.688	0.688	-1.905	-1.905
37	0.693	0.625	0.758	0.746	-0.697	-0.524
38	0.512	0.516	0.518	0.609	4.127	3.73
39	0.547	0.509	0.596	0.585	-2.227	-3.616
40	0.802	0.777	0.779	0.776	0.772	1.569
42	0.786	0.765	0.738	0.73	3.21	1.65
43	0.418	0.434	0.255	0.254	17.915	17.22
44	0.74	0.742	0.66	0.655	1.066	-0.099
45	0.606	0.604	0.642	0.641	5.953	4.511
46	0.742	0.729	0.662	0.647	-2.055	-1.682
48	0.627	0.629	0.422	0.589	-7.628	-7.825
51	0.762	0.737	0.5	0.467	12.785	13.734
52	0.723	0.696	0.489	0.456	12.523	13.305

Sub-bacia	EAM WRF	EAM GFS	REQM WRF	REQM GFS	PBIAS WRF	PBIAS GFS
1	12.16	12.19	16.23	16.72	0.0005	0.0006
2	30.02	30.98	39.55	40.53	0.0014	0.0015
3	40.21	39.21	49.72	49.10	0.0016	0.0017
4	16.38	16.44	20.13	20.03	0.0008	0.0008
5	6.08	7.43	7.00	7.96	0.0003	0.0004
6	27.83	26.03	38.52	37.04	0.0011	0.0012
8	8.21	8.30	10.90	11.27	0.0004	0.0004
9	70.45	73.48	98.36	101.42	0.0035	0.0036
12	101.97	112.63	131.98	144.96	0.0051	0.0056
13	86.68	93.51	112.41	116.26	0.0028	0.0031
14	73.33	79.30	101.61	106.14	0.0034	0.0037
16	54.13	53.00	72.47	72.26	-0.0025	-0.0025
19	5.68	6.13	8.84	9.72	-0.0001	0.0000
20	1.45	1.82	1.93	2.35	0.0000	0.0000
21	14.07	15.67	21.18	23.90	0.0005	0.0006
22	8.62	10.05	12.57	14.51	0.0001	0.0001
24	60.65	64.03	74.90	80.82	0.0030	0.0032
25	55.07	63.27	69.86	79.84	0.0024	0.0027
26	37.09	39.86	44.87	49.23	0.0018	0.0020
27	36.10	39.63	44.86	51.89	0.0017	0.0019
28	12.59	14.10	19.36	23.18	0.0006	0.0006
29	60.62	64.98	69.91	77.99	0.0030	0.0032
31	4.68	6.43	6.40	8.19	0.0001	0.0002
32	3.61	3.60	4.88	4.93	0.0000	0.0000
34	12.06	11.96	13.31	12.87	-0.0006	-0.0005
37	40.82	48.95	77.25	92.76	0.0016	0.0019
39	47.94	52.24	62.37	70.13	0.0023	0.0025
40	65.66	85.84	122.03	158.93	0.0025	0.0032
42	101.63	129.43	179.86	228.81	0.0034	0.0042
43	7.00	7.69	8.11	8.52	-0.0003	-0.0002
44	11.45	13.21	14.68	17.72	-0.0004	-0.0002
45	19.92	24.11	23.84	30.56	-0.0006	-0.0004
46	8.73	10.21	11.91	14.56	0.0000	0.0001
51	82.81	91.34	137.97	160.57	0.0010	0.0017
52	91.43	99.48	158.52	182.28	0.0017	0.0024