

# O CICLO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL

UMA FERRAMENTA  
ESTRATÉGICA DE GESTÃO  
INTEGRADA DO SISTEMA  
HIDRELÉTRICO

MAURICIO NOGUEIRA FROTA

GUTEMBERG BORGES FRANÇA

ENIO PEREIRA DE SOUZA

AFONSO AUGUSTO MAGALHÃES DE ARAUJO

JOSÉ MARCUS GODOY

LUDE QUIETO VIANA







# O CICLO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL

UMA FERRAMENTA  
ESTRATÉGICA DE GESTÃO  
INTEGRADA DO SISTEMA  
HIDRELÉTRICO

MAURICIO NOGUEIRA FROTA

GUTEMBERG BORGES FRANÇA

ENIO PEREIRA DE SOUZA

AFONSO AUGUSTO MAGALHÃES DE ARAUJO

JOSÉ MARCUS GODOY

LUDE QUIETO VIANA



©**Editora PUC-Rio**

Rua Marquês de S. Vicente, 225 – Casa da Editora PUC-Rio

Gávea – Rio de Janeiro – RJ – CEP 22451-900

T 55 21 3527-1760/1838

edpucio@puc-rio.br

www.editora.puc-rio.br

*Revisão de texto:* Júlia Barandier

*Projeto gráfico de capa e miolo:* Flavia da Matta Design

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida ou transmitida por qualquer forma e/ou quaisquer meios (eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia e gravação) ou arquivada em qualquer sistema ou banco de dados sem permissão escrita da Editora.

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

O ciclo das águas da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul: uma ferramenta estratégica de gestão integrada do sistema hidrelétrico / Mauricio Nogueira Frota ... [et al.]. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2023.  
1 recurso eletrônico (340p.) – (Coleção Interseções)

Inclui bibliografia

ISBN: 978-65-88831-76-2

1. Bacias hidrográficas – Paraíba do Sul, Rio, Vale. 2. Paraíba do Sul, Rio, Vale – História. 3. Climatologia. 4. Meteorologia. I. Frota, Mauricio Nogueira. II. Série.

CDD: 551.48098153

---

Elaborado por Lizandra Toscano dos Santos – CRB-7/6915  
Divisão de Bibliotecas e Documentação – PUC-Rio

## AGRADECIMENTO

Pelo apoio financeiro e relevantes contribuições que viabilizaram a publicação deste livro, creditam-se devidos agradecimentos.

- À Agência Nacional de Energia Elétrica, pelo seu comprometimento com políticas públicas inteligentes voltadas à modernização e inovação do setor elétrico brasileiro.
- À Concessionária de Energia Elétrica Light Energia S.A. (responsável pela gestão do complexo hidrelétrico instalado na bacia do rio Paraíba do Sul em sua área de concessão), (i) pela confiança depositada nas instituições científicas que integraram o consórcio multi-institucional (PUC-Rio, UFRJ e UFCG) formado para desenvolver o Projeto de P&D Light/Aneel 5161-0016/2019, intitulado Vazão, Sedimento e Modelagem Climática (MoVaSC) e (ii) pelo seu financiamento, com recursos do Programa Regulado de P&D Light/Aneel.
- À Secretaria Executiva do Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), por meio de sua Gerência do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, por terem facilitado acesso às suas bases de dados e fornecido mapas em alta resolução para inclusão no livro.
- Ao Centro de Previsão do Tempo da Marinha do Brasil; ao Centro de Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), ao National Centers for Environmental Prediction (NCEP), e ao Climate Hazards Center da University of California at Santa Barbara (CHC-UCSB), pelo acesso às suas bases de dados atmosféricos.
- À Universidades Federal Fluminense (UFF) e à Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), pelo apoio indireto prestado

por pesquisadores que integraram a Equipe do P&D MoVaSC, complementando competências técnicas em áreas específicas.

- Ao Engenheiro José Tenório Barreto Junior, à época Coordenador do Programa regulado de P&D Light/Aneel, pelo seu estímulo à formação da parceria estratégica que resultou na construção do Consórcio multi-institucional que reuniu pesquisadores dos programas de pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio e dos Programas de Meteorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas da UFCG/Paraíba e da UFRJ, contratado para estudar e modelar a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, cujos resultados são relatados neste livro.
- Ao Escritório de Projetos Patrocinados da PUC-Rio, à Fundação Coppetec/UFRJ e à Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior (ATECEL/UFCG/Paraíba), pelo apoio nas respectivas gestões financeiras do Contrato tripartite celebrado entre a Light Energia S.A. e as instituições co-executoras do projeto MoVaSC.
- Ao Professor Dr. Felipe Gomberg, à Jornalista Tatiana Helich Lopes e demais profissionais da Editora PUC-Rio, pelo comprometimento e excelência profissional na produção deste livro.
- Aos pesquisadores e profissionais que, de forma direta ou indireta, se envolveram e contribuíram para a superação dos muitos desafios impostos durante as etapas de desenvolvimento do P&D MoVaSC. Em destaque: Engenheiro Cartógrafo Roberto Fernandes e Geofísico Cesar Rocha, pela criteriosa e exaustiva assessoria especializada na análise dos dados batimétricos dos reservatórios de Vigário e Santana; Karine Nascimento Cardozo, graduanda em Ciência da Computação (UFRJ), pela construção da homepage do Projeto MoVaSC; Douglas Felipe Cordeiro de Oliveira, Técnico do Laboratório de Águas da PUC-Rio, pelas análises de Granulometria e Concentração de Materiais Particulados das muitas amostras de sedimentos coletadas nos reservatórios de água estudados; e Matheus Francisco Pereira, bolsista de Iniciação Científica, pelo apoio à equipe de Climatologia do Projeto.

- Ao Professor Luiz Eduardo Correa Lima, estudioso do tema e membro do Comitê das Bacias Hidrográficas do Rio Paraíba do Sul (CBH-PS), por compartilhar instigantes reflexões documentadas no artigo de sua autoria intitulado *Viagem história sobre os 400 anos de ocupação da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul*.
- Ao Professor Doutor António Guerner Dias, do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Portugal, pelo interesse demonstrado nos resultados do Projeto MoVaSC e pela sinalização de oportunidade de desdobramentos futuros para validação do modelo hidrometeorológico desenvolvido em bacias hidrográficas de Portugal e outras atividades científicas de interesse mútuo entre Brasil e Portugal.





# SUMÁRIO

SOBRE OS AUTORES E COLABORADORES .....	11
LISTAS DE SIGLAS E ABREVIações .....	17

---

<b>MENSAGEM DO REGULADOR DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO</b> .....	<b>21</b>
---	-----------

<b>PREFÁCIO</b> LIGHT ENERGIA S.A. ....	<b>25</b>
--	-----------

<b>APRESENTAÇÃO</b> <i>STEERING COMMITTEE</i> DO P&D MOVASC .....	<b>29</b>
--	-----------

---

<b>CAPÍTULO 1</b> BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: PERSPECTIVA DE ESTUDOS IMPACTANTES .....	<b>33</b>
--	-----------

<b>CAPÍTULO 2</b> TENDÊNCIAS DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO E IMPACTO DE OSCILAÇÕES OCEÂNICAS NA BACIA .....	<b>85</b>
---	-----------

<b>CAPÍTULO 3</b> FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS DE BAIXA FREQUÊNCIA NA BACIA HIDROGRÁFICA .....	<b>121</b>
--	------------

<b>CAPÍTULO 4</b> DINÂMICA DA TAXA DE SEDIMENTAÇÃO: ESTRATÉGIA DE AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DOS RESERVATÓRIOS DO COMPLEXO HIDRELÉTRICO .....	<b>159</b>
---	------------

<b>CAPÍTULO 5</b> USO E COBERTURA DO SOLO: INSUMO PARA A MODELAGEM HIDROMETEOROLÓGICA DA BACIA .....	<b>213</b>
--	------------

<b>CAPÍTULO 6</b> MODELAGEM HIDROMETEOROLÓGICA DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL: UMA ABORDAGEM INTEGRADA .....	<b>261</b>
--	------------



## SOBRE OS AUTORES E COLABORADORES

### COORDENADOR

---



Maurício  
Nogueira Frota

PhD em Engenharia Mecânica pela Stanford University (1982). Professor Emérito do Programa de Pós-Graduação em Metrologia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Membro Titular da *Pan American Academy of Engineering* (desde 2008). Membro honorífico da Academia de Metrologia da Federação Russa, San Petersburg (desde 1988). Consultor internacional (Banco Mundial e USAID) para assuntos de metrologia, qualidade e avaliação da conformidade. Áreas de atuação: metrologia e *turbulence fluid mechanics*. Coordenador do projeto de P&D Light/Aneel Light/Aneel 5161-0016/2019, “Modelagem de Vazão, Sedimento e Clima” (MoVaSC), que motivou este livro.  
E-mail: [mfrota@puc-rio.br](mailto:mfrota@puc-rio.br)

### MÓDULO TEMÁTICO CLIMATOLOGIA

---



Gutemberg  
Borges França

PhD em Física, com ênfase em meteorologia por satélite, pela University of Dundee, Reino Unido (1994). Professor titular do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Coordenador do Laboratório de Meteorologia Aplicada. Editor do *International Journal of Remote Sensing*. Áreas de atuação: meteorologia aeronáutica, sensoriamento remoto da atmosfera e do oceano. Pesquisador líder do Módulo Climatologia do projeto de P&D MoVaSC.  
E-mail: [gutemberg@lma.ufrj.br](mailto:gutemberg@lma.ufrj.br)

---



Mônica Carneiro  
Alves Senna

Doutora em Agronomia, com ênfase em meteorologia aplicada pela Universidade Federal de Viçosa (2004). Professora associada da Universidade Federal Fluminense – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biosistemas. Coordenadora do Grupo de Análise da Interação Atmosfera-Biosfera (GAIA). Área de atuação em Geociências: meteorologia, modelagem de ecossistemas, mudanças climáticas e interação atmosfera-biosfera, com ênfase especial no estudo dos impactos sobre os biomas da América do Sul. E-mail: [monicasenna@id.uff.br](mailto:monicasenna@id.uff.br)

---



Lucio Silva  
de Souza

Doutor e mestre em Engenharia pela COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro (2010). Professor adjunto na Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Faculdade de Oceanografia, Departamento de Oceanografia Física e Meteorologia. Áreas de atuação: Geociências meteorologia, modelagem meteorológica, sistemas acoplados de modelos na interface oceano-atmosfera e previsão do tempo.

E-mail: [lucio.souza@uerj.br](mailto:lucio.souza@uerj.br)

---



Manoel  
Valdonel de  
Almeida

Doutor em Ciências Atmosféricas em Engenharia pela COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro (2009), com ênfase em redes neurais artificiais e previsão meteorológica. Áreas de atuação: ensino de meteorologia, aeronáutica, radar meteorológico, perfilador vertical de vento (sodar), inteligência computacional, aprendizado de máquinas, redes neurais artificiais, sensoriamento remoto atmosférico, previsão meteorológica de curtíssimo prazo (*nowcasting*) de fenômenos atmosféricos.

E-mail: [valdonel@lma.ufrj.br](mailto:valdonel@lma.ufrj.br)

---

---

## MÓDULO TEMÁTICO PREVISÃO DO TEMPO

---



Enio Pereira  
de Souza

Doutor em Meteorologia pela Universidade de São Paulo (1999), com tese desenvolvida na Universidade do Arizona (EUA). Professor titular da Universidade Federal de Campina Grande. Diretor científico da Sociedade Brasileira de Meteorologia (2009–2010). Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas da UFCG (2008–2012 e 2015–2018). Áreas de atuação: Física da atmosfera, teoria termodinâmica, modelagem de nuvens convectivas e modificação artificial de nuvens, estudos climáticos e de fontes renováveis de energia. Pesquisador líder do Módulo Previsão do Tempo do projeto de P&D MoVaSC. E-mail: [enio.souza@ufcg.edu.br](mailto:enio.souza@ufcg.edu.br)



Maurício  
Soares da Silva

Doutor em Engenharia Mecânica com ênfase em Mecânica dos Fluidos pelo Programa de Engenharia Mecânica da COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro (2019). Possui experiência na área de Geociências, com ênfase em Meteorologia e Qualidade do Ar, atuando principalmente nos seguintes temas: modelagem atmosférica e modelagem da qualidade do ar. E-mail: [soares@lamma.ufrj.br](mailto:soares@lamma.ufrj.br)



Nilton Oliveira  
Moraes

Doutor em Engenharia Mecânica pelo PEM/COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro (2017). Possui experiência em previsão do tempo e monitoramento em sistema de alerta (2009) de chuvas intensas que tem como objetivo emitir boletins de alerta à população. Conhecimento em modelagem computacional utilizando modelos meteorológicos (MM5 e WRF), regulatório para qualidade do ar (AERMOD), de estimativa de emissões biogênicas (MEGAN) e emissões antropogênicas (SMOKE), e Fotoquímico da Qualidade do Ar (CMAQ). E-mail: [moraes.nilton@gmail.com](mailto:moraes.nilton@gmail.com)

---



Vinicius  
Albuquerque  
de Almeida

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2020). Possui experiência em Geociências, com ênfase em Meteorologia, mercado privado na área de tecnologia, trabalhando desde 2010 em uma das maiores parceiras de tecnologia do Google na América Latina. E-mail: [vinicius@lma.ufrj.br](mailto:vinicius@lma.ufrj.br)

---

## MÓDULO TEMÁTICO *HIDROLOGIA*

---



Afonso Augusto  
Magalhães de  
Araujo

Doutor em Ciências Atmosféricas em Engenharia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2006). Pós-Doutorado no *Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie*, em Toulouse (2008–2009). Professor associado do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Áreas de atuação: Engenharia Civil e Ambiental, Engenharia Portuária, hidrologia e hidrometeorologia. Pesquisador Líder do Módulo Hidrologia do projeto de P&D MoVaSC. E-mail: [afonsoaraujo@poli.ufrj.br](mailto:afonsoaraujo@poli.ufrj.br)



Gabriel Titara  
Silva de Melo

Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2022). Pesquisador colaborador durante o processo de coleta de dados de suporte ao desenvolvimento do modelo hidrológico. E-mail: [gtitara@poli.ufrj.br](mailto:gtitara@poli.ufrj.br)



Marcel Pereira  
de Andrade

Mestrado em andamento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora (2022). Tema da pesquisa de mestrado: Sistema de alerta de cheia e seca para a bacia do rio Paraíba do Sul (Orientador: Celso Bandeira de Mello Ribeiro). Possui experiência em geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicados na gestão de recursos hídricos e no risco da fauna em aeroportos. E-mail: [marcel.pdandrade@gmail.com](mailto:marcel.pdandrade@gmail.com)

---

---

**MÓDULO TEMÁTICO ASSOREAMENTO**

---



Jose Marcus de  
Oliveira Godoy

Doutor em Radioquímica pela Technische Universität München (1983). Professor titular e Vice-Decano de Desenvolvimento da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Áreas de atuação: Engenharia Nuclear, com ênfase em Aplicações de Radioisótopos, sedimentos, icp-ms, pb-210, datação, petróleo, Química Forense e análise isotópica. Pesquisador líder do Módulo Assoreamento do projeto de P&D MoVaSC.

**E-mail:** [jmgodoy@puc-rio.br](mailto:jmgodoy@puc-rio.br)

---



Camille  
Delfino Vieira

Mestre em Química pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2021). Desenvolveu sua pesquisa de Mestrado seguindo o mesmo tema do Projeto MoVaSC, sob a orientação do Professor José Marcus Godoy. Pesquisadora colaboradora durante o processo de coleta dos testemunhos nos reservatórios de Vigário e Santana para datação dos reservatórios.

**E-mail:** [cdv.quimica@gmail.com](mailto:cdv.quimica@gmail.com)

---



Sergio  
Bragantine  
Germano

Mestre em Metrologia pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2013). Pesquisador do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento do Exército brasileiro, com experiência em projetos de Defesa, processos automatizados de manufatura e desenvolvimento de equipamentos industriais. Pesquisador colaborador nas missões técnicas de planejamento de experimentos, medições e coleta de amostras de água e sedimentos nos reservatórios de Vigário e Santana.

**E-mail:** [sbragant@gmail.com](mailto:sbragant@gmail.com)

---

## EQUIPE LIGHT DO P&D MOVASC

---



Lude Quietto  
Viana

Gerente do Projeto MoVaSC pela Light Energia S.A. Gerência de Manutenção de Usinas. Mestre em Engenharia Civil na área de Recursos Hídricos e Saneamento pela COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro (2012). Possui experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em projetos de saneamento, drenagem, estudos hidrológicos e sistemas de monitoramento hidrológico.

**E-mail: [lude.viana@light.com.br](mailto:lude.viana@light.com.br)**

---



Carlos Augusto  
Machado Gomes

Light S.E.S.A. Gerência de Transformação Digital. Mestre em Sistemas de Energia Elétrica pela COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro (2018). Possui experiência na área de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência, otimização de sistemas elétricos e estudos voltados ao setor de distribuição e geração de energia. Atuou no projeto MoVaSC como interface com a Coordenação de P&D da Light.

**E-mail: [carlos.gomes@light.com.br](mailto:carlos.gomes@light.com.br)**

---



César Augusto  
Silva de Farias

Light Energia S.A. Gerência de Manutenção de Usinas. Graduado em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Geraldo Di Biase (2019). Possui experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Engenharia Hidráulica, sistemas de monitoramento hidrológico e hidrometria.

**E-mail: [cesar.farias@light.com.br](mailto:cesar.farias@light.com.br)**

---

## LISTAS DE SIGLAS E ABREVIações

AGEVAP	Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARW	Formato de arquivo de imagem
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
BPS	Bacia hidrográfica do Paraíba do Sul
CBHAMPM	Comitê da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos rios Pomba e Muriaé
CBHAMPP	Comitê da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos rios Preto e Paraibuna
CDD	Dias Secos Consecutivos
CEIVAP	Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento de Alertas de Desastres Naturais
CGH	Centrais Geradoras Hidrelétricas
CHIRPS	Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations
COPPETEC	Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos / UFRJ
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTec	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CPU	Central Process Unit (Unidade Central de Processamento)
CRS	Constant Rate of Supply (e.g., Constant Rate of <sup>210</sup> Pb Supply)
DAEE	Departamento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo
EGO	Environment for Geoprocessing Objects
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERA	Dados atmosféricos do clima global
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GCM	Global Circulation Model
GFS	Global Forecast System
HRU	Unidade de Resposta Hidrológica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDW	Inverse Distance Weighted
IEC	International Electrotechnical Commission
IG	Instituto Geológico
IGAM	Instituto de Gestão de Águas Mineiro
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPDO	Índice de Oscilação Oceânica
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
IOS	Índice da Oscilação Sul
ISO	International Organization for Standardization
JoPAG	Journal of Pure and Applied Geophysics
LCLU	Land Cover/Land Use
LSU	Landscape units
NIST	National Institute of Standards and Technology (USA)
NMM	Non-hydrostatic Mesoscale Model
MMM	Modelo de mesoescala não hidrostático
MODIS	Espectro-radiômetro de imagem de resolução moderada
MoVaSC	Projeto de P&D Light/Aneel Ref. 5161-0016/2019
NBR	Norma Brasileira (norma técnica)
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NCL	NCAR Command Language
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
OAN	Oscilação do Atlântico Norte
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
OMA	Oscilação Multidecadal do Atlântico
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PEL	Probable Effect Level
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PSD	Physical Sciences Division

PSL	Physical Sciences Laboratory
QGIS	Sistema de Informações Geográficas
RBC	Rede Brasileira de Calibração
REN	Resolução Normativa ANEEL
RRTMG	Rapid Radiative Transfer Model for GCMs
SAM	Modo Anular Sul (na sigla em inglês)
SCS	Soil Conservation Service
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIN	Sistema Interligação Nacional
SOI	Índice da Oscilação Sul (na Sigla em Inglês South Oscillation Index)
SF	Sistemas Frontais
SCM	Sistemas Convectivos na Mesoescala
SRM	Standard Reference Material
SWAT	The Soil & Water Assessment Tool
SWAT+	Versão modificada do SWAT
TEL	Threshold Effect Level
TS#	Identificador de Testemunho de Sedimentos
TSM	Temperatura de Superfície do Mar
UM	Modelo Unificado
UTM	Universe Transverse Mercator
URU	Unidade de Resposta Hidrológica
VIT	Capacidade de Infiltração Variável
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
WRF	Weather Research and Forecasting

## DESCRITORES ESTATÍSTICOS

CDD	Número máximo de dias secos consecutivos
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CHIRPS	Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations
CMP	Concentração de Material Particulado

CSI	Índice de sucesso crítico (Critical Success Index). Mede a razão entre a frequência de eventos de previsão e mede a fração de eventos observados por todos os eventos “sim” previstos e observados. Uma pontuação perfeita é 1.
CWD	Número máximo de dias úmidos consecutivos
D1	Domínio de parametrização de cumulus (nuvens convectivas)
FAR	Taxa de alarmes falsos. Mede a fração de previsões “sim” nas quais o evento não ocorreu. Uma pontuação perfeita é 0.
MM5	Mesoscale Modelling System - 5ª Geração
NS	Nash-Sutcliffe Index
NSE	Descritor estatístico
PBias	Valores percentuais de tendenciosidade
POD	Probabilidade de detecção (Probability of Success). Mede a fração de eventos observados que foram previstos corretamente. Uma probabilidade perfeita é 1.
PRCPTOT	Índice de Precipitação Total Anual
R	Coefficiente de Correlação
R <sup>2</sup>	Coefficiente de Determinação
R10	Número de dias com precipitação acima de 10 mm
R25	Número de dias com precipitação acima de 25 mm
PPU	Percentage Prediction Uncertainties
POD	Probability Detection (Probabilidade de detecção)
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
R95p	Total Anual de Precipitação em Dias muito úmidos (precipitação diária > 95º percentil)
R99p	Total Anual de Precipitação em Dias Extremamente Úmidos (precipitação diária > 99º percentil)
RX5day	Quantidade Máxima de Precipitação em 5 dias consecutivos
RX1day	Quantidade Máxima de Precipitação em 1 dia
SDII	Índice Simples de Intensidade Diária
VIÉS	Viés de frequência (Bias). Mede a razão entre a frequência de eventos de previsão e a frequência de eventos observados. Uma pontuação perfeita é 1.



## MENSAGEM DO REGULADOR DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Este livro é fruto de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) implementado pela concessionária de energia elétrica Light Energia S.A. no âmbito do Programa de P&D regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e executado por renomadas instituições de ensino e pesquisa do Brasil, a saber, a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), com a colaboração pontual de pesquisadores de outras universidades. Essas instituições uniram seus esforços a fim de tratar de um tema relevante para o país, que é o mapeamento e a gestão integrada das bacias hidrográficas, objetivando o uso correto e eficiente do potencial hídrico, de forma a maximizar o potencial hídrico existente.

A abordagem do projeto e do livro integra-se aos esforços contínuos do Programa de P&D regulado pela ANEEL para buscar resultados de aplicação prática que agreguem valor ao consumidor de energia elétrica e à sociedade, mediante o desenvolvimento do conhecimento e da transformação de boas ideias, experimentos, modelos e metodologias em resultados práticos que melhorem o desempenho das organizações e da vida das pessoas.

O Programa de P&D ANEEL é resultante da Lei nº 9991, de 2000, a qual instituiu a política pública de estímulo a pesquisa e desenvolvimento no Setor Elétrico Brasileiro, por meio da aplicação compulsória de recursos provenientes da Receita Operacional Líquida (ROL) das empresas do setor elétrico. Pelo comando legal, coube à Aneel regulamentar, estabelecendo as diretrizes para implementação dessa política pública.

Nos últimos 15 anos, mediante o Programa regulado, foram investidos, em valores históricos, montantes da ordem de R\$ 7,0 bilhões. Esses investimentos possibilitaram o desenvolvimento de mais de 2.000 projetos com a participação de mais de 10.000 pesquisadores que possibilitaram o desenvolvimento de 450 patentes e registros de propriedade intelectual, como também a capacitação de 1.637 profissionais com títulos de pós-graduação.

De fato, o Programa de P&D regulado pela ANEEL representa um dos principais mecanismos de inovação no setor elétrico e tem, ao longo de seus mais de 20 anos, investido consistentemente no avanço da ciência e tecnologia no país. Assim, objetivando a ampliação desses resultados, a ANEEL aprovou a REN nº 1045/2022 com o intuito de criar um ambiente favorável à inovação no setor elétrico, uma vez que parte dos ganhos de produtividade é revertido em benefício da modicidade tarifária, assim, favorecendo o desenvolvimento socioeconômico, sobretudo quando se trata de um serviço público essencial, como a energia elétrica.

Nos últimos anos, no qual o projeto de pesquisa e desenvolvimento foi realizado e este livro foi sendo elaborado, vivenciamos a pandemia de Covid-19, que representou para toda a população mundial um momento de grandes incertezas e desafios incluindo os pesquisadores envolvidos no projeto que souberam superá-los de forma extraordinária, haja vista o conteúdo extremamente atual e aqui apresentado.

Adicionalmente, no ano de 2021, superamos a escassez hídrica, com a verificação das piores afluições no SIN em 91 anos de histórico e os baixos armazenamentos dos reservatórios das usinas hidrelétricas, bem como a necessidade de adoção de várias medidas que garantissem a manutenção da governabilidade do SIN ao longo do ano de 2021.

Nesse contexto, verifica-se a total aderência do tema desenvolvido nesta publicação, a qual realizou, de forma clara e objetiva, um assunto extremamente complexo, apresentando a evolução do ciclo das águas da bacia do Rio Paraíba do Sul, os eventos climáticos, a dinâmica de sedimentação e ocupação do solo que influenciam

diretamente a gestão da bacia. Destacam-se também o desenvolvimento e a implementação da ferramenta computacional concebida neste projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, associando duas diretrizes básicas que estão sendo potencializadas no âmbito do Programa regulado, que são o desenvolvimento de projetos em redes e o desenvolvimento de produtos com a aplicação prática.

Por fim, parabenizo todos os profissionais da Light Energia S.A. e os pesquisadores das Universidades PUC-Rio, UFRJ e UFCG que atuaram no desenvolvimento deste projeto de pesquisa e desenvolvimento, pelo trabalho extraordinário desenvolvido e consolidado neste livro. Assim, espero que venham novos desafios aos quais o Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação regulado pela ANEEL irá apoiá-los.

**Paulo Luciano de Carvalho**

*Superintendente de Pesquisa e Desenvolvimento  
e Eficiência Energética da ANEEL*





## PREFÁCIO

Caro leitor,

Honrado pelo convite para contribuir na elaboração do Prefácio do livro *O ciclo das águas da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul: uma ferramenta estratégica de gestão integrada do sistema hidrelétrico*, que descreve os resultados do projeto de P&D Light/Aneel com o tema Vazão, Sedimento e Modelagem Climática (MoVaSC), na bacia do rio Paraíba do Sul, deixo aqui o meu testemunho.

A proposta desse P&D inicialmente nos preocupou, não só pela complexidade dos conteúdos e pelo seu caráter multidisciplinar, mas, principalmente, pelo desafio de sua conclusão em um prazo típico de projetos de P&D. Entretanto, dada a histórica trajetória da Light nos usos múltiplos dos recursos hídricos de seu complexo gerador composto por usinas hidrelétricas e elevatórias mundialmente conhecido por seus ousados projetos de engenharia, o desafio foi aceito.

Como não poderia deixar de ser, o desafio foi abraçado pelo time de hidrologia da Light e por uma equipe multidisciplinar de pesquisadores de três conceituadas universidades dispostos a dar o seu melhor em prol de um resultado que traria inúmeros benefícios não somente para a empresa, mas também para a gestão de uma bacia hidrográfica de enorme importância econômica, social, energética e responsável pelo abastecimento de água da região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro.

Não obstante as três temáticas centrais do projeto – clima, previsão de tempo e hidrologia – a Light Energia propôs a inclusão de um quarto módulo para avaliar as taxas de assoreamento

de seus reservatórios, assunto de permanente e grande interesse da concessionária. Tendo em vista que o uso e ocupação do solo afetam significativamente os processos de assoreamento por meio do carreamento de sedimentos, quer pelo fluxo de água da chuva no solo, quer pelo próprio curso do rio, a inclusão do módulo assoreamento foi motivada para refletir especificidades da bacia e atribuir maior robustez à modelagem hidrometeorológica pretendida. E, assim, o projeto incorporou o quarto módulo de pesquisa: sedimentos, o “S” em sua sigla MoVaSC.

Em meio a tantos desafios a serem superados, eis que nos aparece mais um, de proporções mundiais: a pandemia da Covid-19. Inúmeras foram as dificuldades em seguir em frente, seja pela ausência presencial dos colegas nas discussões, seja pelas dificuldades e até impedimentos em realizar trabalhos de campo e laboratoriais. Mas seguimos determinados a realizar e concluir o desafiador projeto concebido.

Outro desafio superado foi a internalização, nos sistemas e padrões de TI da Light, dos modelos e softwares desenvolvidos no projeto. Graças à determinação de todos, e ao alinhamento dos profissionais de TI da Light com os pesquisadores do projeto, as dificuldades foram superadas e o modelo hidrometeorológico internalizado na empresa.

Hoje, diante dos produtos gerados pelo P&D MoVaSC, das publicações realizadas, mestrados e doutorandos envolvidos e, por fim, deste livro como sintetização dos resultados gerados pelo projeto, confirma-se que a preocupação inicial, de fato, tinha razão de ser. Não foi fácil, mas foi extremamente gratificante fazer parte dos desafios impostos e vencê-los, até o final contando com uma equipe formada por profissionais determinados, trabalhando como um time e, acima de tudo, unidos não somente por um projeto, mas por um coleguismo que permanecerá.

Agradeço à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelo incentivo e apoio dados às pesquisas nacionais, a todos os pesquisadores do Consórcio (PUC-Rio – UFRJ – UFCG) executor

do projeto de P&D, ao time da Light Energia e à Gerência de P&D da Light pelo esforço e resultados alcançados.

Percebendo o Projeto MoVaSC como uma ferramenta estratégica que contribui para a gestão da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, espero que o livro seja fonte de inspiração para outras iniciativas de pesquisa e desenvolvimento, visando cada vez mais o melhor uso dos recursos hídricos, que devem ser compreendidos de forma universal.

**Renato Osório Ferreira**

*Light Energia S.A*

*Superintendência de Usinas e Engenharia da Geração*





## APRESENTAÇÃO

*O ciclo das águas da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul: uma ferramenta estratégica de gestão integrada do sistema hidrelétrico* resultou de um esforço coletivo de pesquisa orientado para o estudo da bacia do rio Paraíba do Sul, realizado no âmbito do Projeto de P&D Light/Aneel 5161-0016/2019 “Modelagem de Vazão, Sedimento e Clima” (MoVaSC), financiado pelo Programa regulado de P&D Light/Aneel.

O projeto nasceu de duas iniciativas complementares: (i) da preocupação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de fomentar a inovação do setor elétrico e de estimular parcerias institucionais visando o desenvolvimento da capacitação tecnológica da região Norte-Nordeste como estratégia em favor de maior equilíbrio regional e (ii) do interesse da concessionária Light Energia S.A. em superar desafios impostos por suas demandas internas de projetos visando a superação de gargalos tecnológicos que limitam sua capacidade inovativa.

No âmbito dessas iniciativas, foi lançado, em 2019, o Edital P&D Light/Aneel Norte-Nordeste que, dentre suas propostas de temas estratégicos, anunciou o interesse em desenvolver um projeto integrado de amplo escopo para estudar aspectos atmosféricos e hidrológicos impactantes (clima, precipitação, uso e ocupação do solo e hidrologia) na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, com vistas a orientar a gestão do seu complexo hidrelétrico.

Não obstante as sugestões, suscitadas por ocasião do Seminário de P&D da Light, de fracionamento do projeto originalmente proposto em pelo menos três projetos independentes, dada a sua abrangência e complexidade, a Light insistiu na manutenção de um projeto único, devido à interdependência dos temas. Para dirimir o

impasse e responder à necessidade de agregar expertise específica nas áreas científica, técnica e de infraestrutura de pesquisa para superar o desafio imposto, pesquisadores de três programas de pós-graduação acordaram em consolidar um consórcio de instituições para conceber e executar o projeto. A iniciativa reuniu pesquisadores dos programas de pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio, de Meteorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas da UFCG/Paraíba e Meteorologia do Instituto de Geociências da UFRJ, agregando outros profissionais cujos créditos estão referenciados na Galeria de Autores e Colaboradores deste livro.

Para facilitar a integração, os executores do projeto criaram um Grupo de Coordenação (*Steering Committee*), que trabalhou coeso para superar os desafios impostos e para cumprir o prazo (dois anos) de execução do Projeto. O consórcio estabelecido atendeu ao propósito da chamada Light/Aneel de fomentar parcerias científico-estratégicas envolvendo instituições científicas da região Norte-Nordeste, assim aproximando o grupo de pesquisas em Ciências Atmosféricas da UFCG/Paraíba com grupos de pesquisa já consolidados da região Sul-Sudeste.

Superados os desafios e finalizado o projeto, os autores creditam à iniciativa da ANEEL/Light Energia S.A. os méritos pela consolidação do consórcio e pelos resultados da pesquisa multidisciplinar realizada que deveram-se ao dedicado trabalho orquestrado da equipe, à complementaridade de *expertises* e às infraestruturas computacional e laboratorial mobilizadas. Igualmente prazerosa, a parceria criada para superar os desafios foi indutora não apenas de outras cooperações científicas, publicações compartilhadas, permuta de conhecimentos e novas conquistas, mas, sobretudo, da interação humana profícua e engrandecedora que se traduziu na formação de novas e sólidas amizades; essas que, contrariamente a projetos, nascem sem prazo de validade determinado.

Na expectativa de que este livro possa contribuir com resultados de pesquisa e uso de ferramentas estratégicas capazes de orientar gestores do complexo hídrico do Paraíba do Sul, divulga-se

autorizados pela Light Energia S.A. e ANEEL, os resultados do Projeto de P&D MoVaSC.

Alimentamos também o desejo e a esperança de que o livro possa despertar a atenção de pesquisadores e estudiosos do tema, dada a compreensão e a extrema relevância dos aquíferos e das extensas bacias hidrográficas do Brasil, vitais à sobrevivência da vida na Terra. O conhecimento de que nossas reservas de água doce constituem a maior reserva de água potável (cerca de 12 %) do planeta, diretamente impactando na formação do clima, na capacidade de geração hidrelétrica e na manutenção de nossos complexos biomas, deve perenizar-se na consciência científica nacional como vetor magno de contribuição à preservação universal da saúde do planeta.

Estruturado em seis capítulos, o livro apresenta uma retrospectiva histórica da bacia do rio Paraíba do Sul, discute os fenômenos climáticos da bacia, em particular aqueles atmosféricos de baixa frequência e os resultados da simulação de eventos meteorológicos típicos da bacia. Fazendo uso da técnica de datação do  $^{210}\text{Pb}$ , apresenta resultados do estudo de assoreamento dos reservatórios de Santana (reservatório de passagem, para alimentação do reservatório de Vigário) e de Vigário (reservatório de acumulação de água do complexo hidrelétrico de Piraí/RJ).

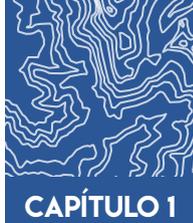
Finalizando, o último capítulo sintetiza os resultados do projeto MoVaSC e discute aspectos relevantes da bacia. Em destaque, descreve e dispõe um código computacional, entendido como ferramenta estratégica de gestão do complexo hídrico da bacia do Paraíba do Sul; esse código alimentado por dados atmosféricos (forçantes meteorológicos) e calibrado com base em dados de vazão independentemente medidos por estações fluviométricas em operação, executa a modelagem hidrometeorológica integrada (previsão da vazão, por sete dias) em 809 sub-bacias estrategicamente identificadas ao longo do rio Paraíba do Sul.

Como prova incontestável do reconhecimento pelo recém concluído projeto de P&D MoVaSC, as instituições e a equipe de

pesquisadores envolvidos registram a satisfação pela demonstração de interesse na contratação de um projeto de continuidade, Light/Aneel MoVaSC-II, que objetiva incluir a modelagem da sedimentação dos reservatórios associada à estimativa da cor da água via sensoriamento remoto orbital, assim ampliando o escopo de aplicação e agregando maior robustez à ferramenta computacional de gestão hídrica da bacia.

**Maurício N. Frota (PUC-Rio); Gutemberg B. França (UFRJ)  
e Enio P. de Souza (UFCG)**

*Steering Committee do Projeto MoVaSC.*



# BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: PERSPECTIVA DE ESTUDOS IMPACTANTES

## Contextualização

Este capítulo introdutório apresenta aspectos da complexa bacia do rio Paraíba do Sul, inserida na região da bacia hidrográfica do Atlântico Sudeste, objeto de estudo do projeto de pesquisa (P&D MoVaSC), cujos resultados motivaram a publicação deste livro.

O projeto de P&D cumpriu dois objetivos centrais: (i) desenvolver um sistema computacional atmosférico-hidrológico capaz de antecipar, em períodos de até sete dias, a previsão de chuva-vazão em locais críticos da bacia e (ii) estudar o histórico de assoreamento de Santana (reservatório de passagem) e de Vigário (reservatório de acumulação de água para geração de energia elétrica) que integram o complexo hidrológico da bacia. O projeto foi desenvolvido ao longo de dois anos, em 23 etapas, cujos resultados encontram-se documentados em relatório técnico interno (Frota et al., 2021a). Provê, assim, informações estratégicas para a tomada de decisão pelos gestores do complexo hidrelétrico controlado pela concessionária.

De forma sucinta, este capítulo apresenta uma retrospectiva histórica<sup>1</sup> de aspectos relevantes que impactaram o aproveitamento

---

1 Aos interessados em aprofundar sobre os aspectos históricos da bacia, recomenda-se a leitura do instigante texto “Viagem histórica sobre os 400 anos de ocupação da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul” (Lima, 2022).

dos recursos hídricos e a exploração dos usos múltiplos da bacia. Aborda aspectos relacionados à formação e distribuição espacial dos solos (pedologia), à geologia e relevos da superfície terrestre (geomorfologia), à hidrografia de águas subterrâneas (hidrogeologia) e ao uso e cobertura do solo.

A tabela a seguir identifica as fontes de dados utilizadas na construção da base cartográfica e suas respectivas escalas espaciais de referência.

**Tabela 1.1** Fontes disponíveis de dados espaciais da bacia do rio Paraíba do Sul.

Dados	Fonte	Escala
Limites dos estados e do país	IBGE	NA
Limites dos municípios do Sudeste	IBGE	NA
Limites da bacia do rio Paraíba do Sul	CEIVAP	NA
Topografia	IBGE	Cotas de 100 m
Hidrografia	ANA	1:1.000.000
Hidrogeologia	IBGE	1:250.000
Geologia	CEIVAP	1:1.000.000
Geomorfologia	CEIVAP	1:1.000.000
Pedologia	CEIVAP	1:1.000.000
Uso e cobertura do solo	CEIVAP	1:250.000
Localização das estações fluviométricas	ANA	NA
Microbacias	ANA	NA

NA: não há escala

Para compatibilizar dados de diferentes fontes, estes foram redefinidos para o mesmo sistema de coordenadas e projeção do *Universe Transverse Mercator* (UTM), Zona 23S, com *datum* SIRGAS 2000.

O QR Code, a seguir apresentado, permite acesso às fontes de dados referenciadas na Tabela 1.1. Essas fontes caracterizam a missão institucional e a função complementar que cada organização desempenha para promover a gestão dos recursos hídricos e a viabilidade econômico-financeira da bacia hidrográfica, visando o seu desenvolvimento sustentável.



Fontes primárias de dados institucionais.

O uso adequado das informações geradas por essas organizações contribui para a caracterização fisiográfica da bacia como um todo, subsidiando o monitoramento e acompanhamento dos dados das estações hidrológicas e meteorológicas. Para ilustrar o potencial das ferramentas de análise disponíveis, destaca-se o Sistema de Informações Geográficas e Geoambientais da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (SIGA Web)<sup>2</sup>, permitindo não apenas a construção de mapas dinâmicos das diversas variáveis e características da bacia, mas a superposição de “camadas de informação”. A título de ilustração, este capítulo inclui alguns mapas característicos de aspectos da bacia, como, também, descreve as ferramentas web disponíveis que permitem a sua contínua atualização.

Ao estudar uma bacia da complexidade da bacia do Paraíba do Sul, é importante ter em mente que o seu monitoramento exige constante atualização, já que algumas de suas estruturas sofrem obsolescência diária. A climatologia é específica para cada região, resultando em hidrografia diversa e hidrogeologia igualmente plural. A soma das diversidades físicas, químicas e biológicas (pedologia) acarreta a formação de solos específicos, que apresentam usos e coberturas distintos, especialmente por intervenções antrópicas.

### Área de estudo

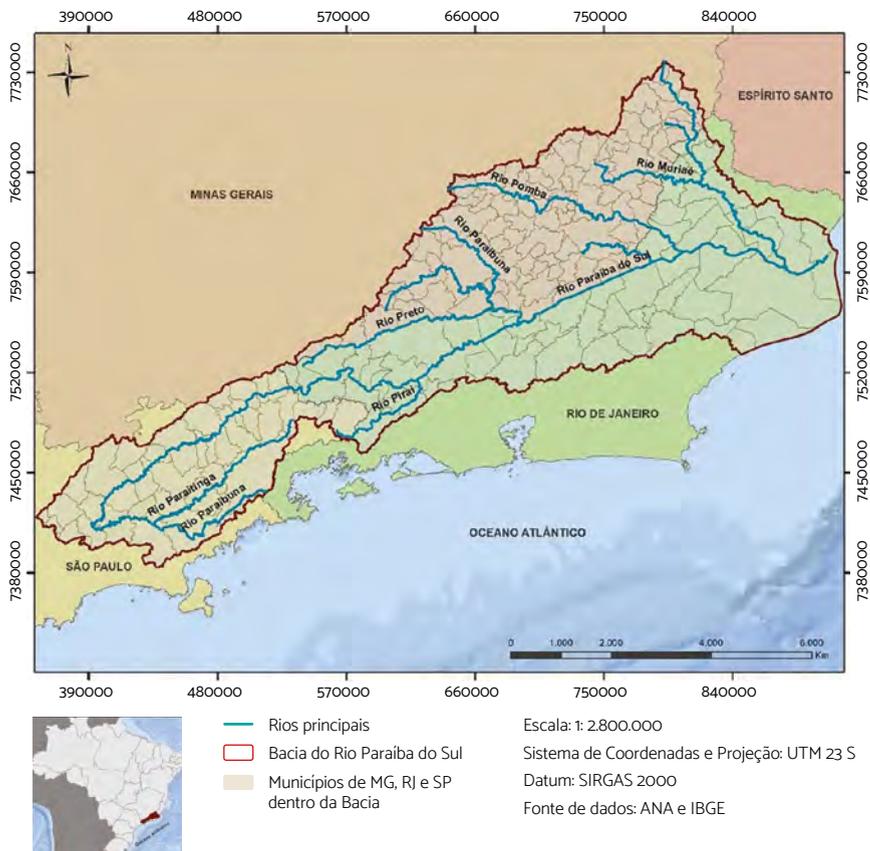
A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul distribui-se ao longo de cerca de 55.500 km<sup>2</sup> de três estados da região sudeste. Conforme ilustrado no mapa da Figura 1.1, inicia-se em São Paulo, ocupando 13.900 km<sup>2</sup> da região conhecida como Vale do Paraíba Paulista; 20.900 km<sup>2</sup> de grande faixa do Estado Rio de Janeiro e 20.700 km<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Acessível on-line via link: <http://sigaceivap.org.br/siga-ceivap/map#>.

em Minas Gerais, na região conhecida como Zona da Mata Mineira. Localizada entre as coordenadas 20° 26' e 23° 00' de latitude sul e 41° 00' e 46° 30' de longitude oeste.

Figura 1.1 Mapa da Área de Estudo da bacia do rio Paraíba do Sul.

Fonte: Projeto MoVaSC.



O principal rio da bacia é o rio Paraíba do Sul, que nasce no estado de São Paulo, na confluência do rio Paraitinga (com nascente no município de Areias) com o rio Paraitubuna (nascente no município de Cunha), ambos a 1.800 m de altitude, percorrendo 1.180 km até desaguar na praia de Atafona, na cidade de São João da Barra, no estado do Rio de Janeiro, finalmente alcançando o

oceano. Além destes, uma grande rede de rios e afluentes contribui para o aumento do volume de águas do rio Paraíba do Sul, cuja área de drenagem está 39% localizada no estado do Rio de Janeiro, 37% no de Minas Gerais e 24% no estado de São Paulo (ANA, 2007; Demanboro, 2015). Por se tratar de uma extensa área, que percorre três diferentes estados, o perímetro é formado por uma geologia e uma geomorfologia diversificadas.

## Geologia da bacia

Ao longo de milhões de anos, o terreno que compreende a área estudada foi sendo formado e transformado. Nesse período, sofreu diversas alterações físicas e químicas, como a maior parte – para não dizer o todo – do planeta. Ainda hoje, o terreno sofre ações diretas de fortes processos físicos de erosão e escorregamentos e assoreamentos (acúmulo de sedimentos no fundo e/ou nas margens do rio, o que diminui seu leito), que continuam alterando o relevo da área.

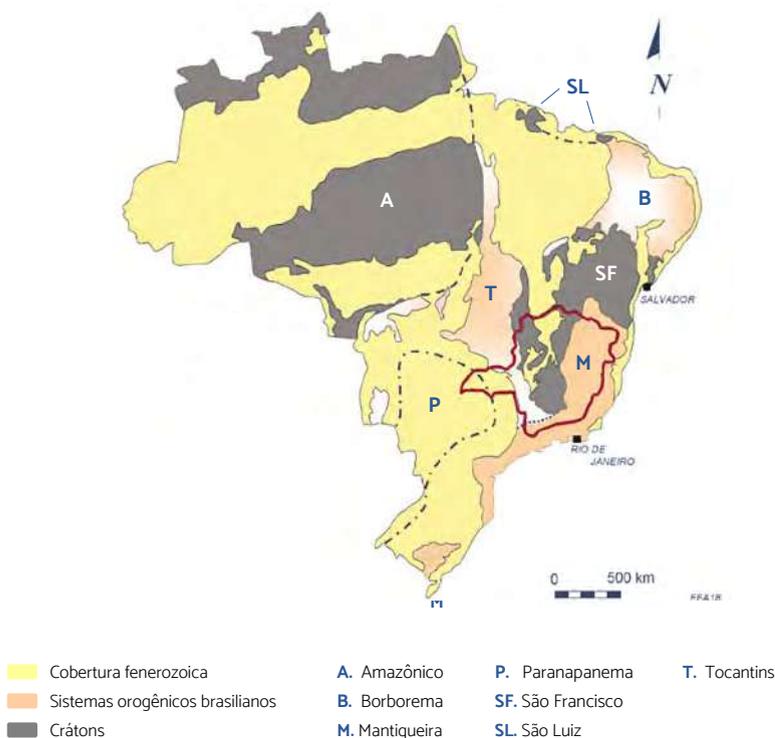
Eventos dinâmicos ocorridos na superfície da Terra ocasionaram a estabilização geológica do ambiente, com a formação de crátons (rochas ricas em minerais metálicos) e cadeias de montanhas (formadas pelas colisões entre placas tectônicas). Sob a perspectiva geológica, o território brasileiro possui dois tipos de terreno, um mais antigo e outro mais jovem (Schobbenhaus e Brito, 2003).

O terreno mais antigo é formado por rochas da idade pré-cambriana, período geológico de cerca de 4,6 bilhões de anos. Este tipo forma o substrato continental, que é a parte do solo que não é visível, cuja idade é superior a 541 milhões de anos. Nele, há o predomínio de rochas metamórficas (aquelas que sofrem alteração de suas características devido à pressão e temperatura diferenciadas de sua localização de origem) e ígneas formadas a partir da solidificação do magma.

Já o terreno mais jovem é formado por rochas da idade fanerozoica (idade geológica a partir da qual a vida é possível e que abrange desde as primeiras formas de vida até os dias de hoje). Esses terrenos compõem a cobertura sedimentar, superfície visível do solo (Souza, 2018).

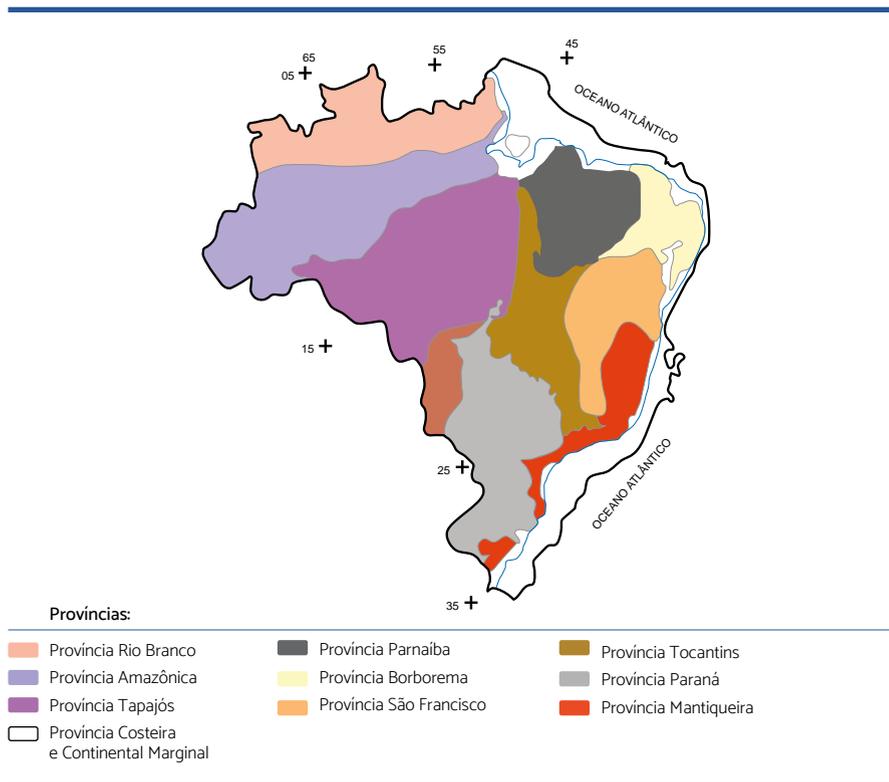
A Figura 1.2, a seguir, mostra a configuração do território brasileiro com os terrenos de idade pré-cambriana, e os de idade fanerozoica. Os terrenos pré-cambrianos são caracterizados por dois subtipos: os crátons e os sistemas orogênicos brasileiros. Estes últimos formam um conjunto de montanhas que surgiram entre 630 a 541 milhões de anos, ao longo do amplo período orogenético Neoproterozoico-Cambriano. Este evento foi responsável pelas falhas e linhamentos presentes nas rochas que, posteriormente, formaram as cadeias montanhosas da Serra da Mantiqueira e Serra do Mar com os processos de rifting, isto é, processos tectônicos que levam a grandes fraturas e falhas na superfície terrestre (Genaro, 2008; Souza, 2018).

Figura 1.2 Mapas da constituição geológica do Brasil.



O território brasileiro possui um histórico complexo, com embasamentos e coberturas distintos. Para destacar as diferenças, foi dividido em dez categorias, ou dez províncias estruturais, que caracterizam grandes regiões com aspectos estratigráficos (dos estratos ou camadas de rochas), tectônicos, metamórficos (das rochas que sofreram alterações) e magmáticos (Almeida et al., Dantas, citados por Dantas e Lima Filho, 2007), como mostra a Figura 1.3, abaixo.

Figura 1.3 Províncias estruturais.



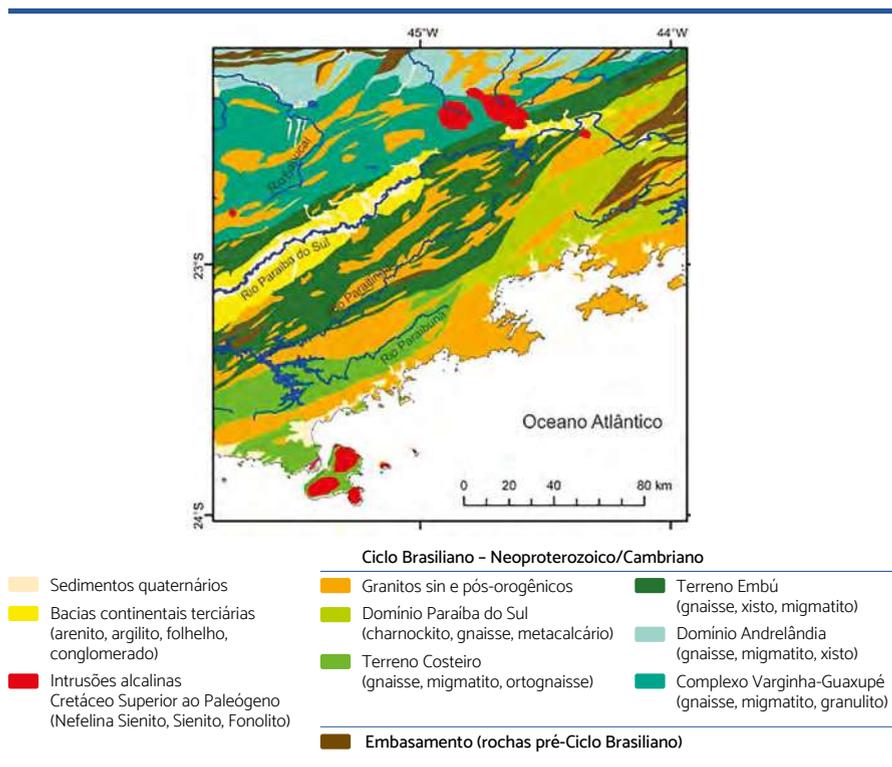
Fonte: Dantas (1980) citado por Dantas e Lima Filho (2007).

A Província da Mantiqueira se estende do Uruguai (paralelo 33°S) até o sul da Bahia (paralelo 15°S) e possui cerca de 3.000 km de extensão e largura média de 200 km. É nesta província que a bacia do rio Paraíba do Sul está localizada.

A região da Província da Mantiqueira apresenta-se em terreno com embasamento do éon arqueano (período que corresponde cerca de 4 até 2,5 bilhões de anos atrás) até a era paleoproterozoica (há cerca de 2,5 a 1,6 bilhões de anos), sendo sobreposto por sedimentos e intrusões vulcânicas, isto é, corpos de rocha ígnea cristalizados no interior da crosta terrestre.

A Figura 1.4 mostra o complexo gnáissico-migmático do segmento central dessa província, caracterizando seus aspectos geológicos.

Figura 1.4 Geologia do leste da região sudeste.



Fonte: Souza (2018).

Segundo Mineropar (2004), citado por Patittucci (2017), essa estrutura geológica composta por várias associações de rochas arqueanas e paleoproterozoicas compreende:

- migmatitos estromáticos com paleossoma de biotitahornblenda gnaiss, mica-quartzo xisto, ultrabásito, metabásito, anfíbolito;
- migmatitos homogêneos, constituídos por rochas de granulação grossa, essencialmente feldspáticos, aspecto granitoide e com paleossoma de gnaisses graníticos;
- granitos gnáissicos e anatexitos, incluindo biotita-anfíbólio tonalitos e biotita-anfíbólio granodioritos;
- gnaisses cataclasados, rosados, com variações locais para gnaisses graníticos e migmatitos cataclasados.

A Província da Mantiqueira passou por uma série de eventos entre 251 e 65 milhões de anos atrás, que correspondem, respectivamente, ao Paleozoico e ao Neojurássico. Estes processos podem ser divididos em três (Souza, 2018):

- **Rifteamento I** – de 220 a 140 milhões de anos, abrangendo a parte norte da Plataforma Sul-Americana durante a abertura do Atlântico Central;
- **Rifteamento II** – de 140 a 110 milhões de anos, na margem atlântica leste e sudeste do Brasil (que corresponde à área de estudos do projeto de pesquisa MoVaSC), configurando a ruptura do Gondwana;
- **Rifteamento III** – de 113 a 98 milhões de anos, na margem Atlântica Equatorial.

Os processos tectônicos provocaram grandes fraturas e falhas (rifteamento) na superfície terrestre, resultando na criação de grandes escarpas (formações que apresentam um de seus lados íngreme e outro com uma inclinação mais suave). A Serra do Mar, a Serra da Mantiqueira e o rebaixamento das áreas entre seus relevos são exemplos desse fenômeno geológico que contribuiu para a formação de bacias sedimentares. Estas formações são também observadas no Vale do Paraíba (entre a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira) e nas bacias de Santos, Campos e Espírito Santo, no Atlântico.

Eventos geológicos posteriores sugerem que, na era mesozóica, entre 145 e 65 milhões de anos atrás, no Cretáceo, houve um soerguimento das montanhas costeiras, o que modificou os padrões

de sedimentação das bacias, introduzindo uma série de corpos alcalinos no embasamento cristalino (Souza, 2018). Em um período compreendido entre 24 milhões e 1,8 milhão de anos atrás, durante o Neógeno, houve um aumento de finos sedimentos suspensos nas águas da bacia de Campos e a formação do chamado delta – quando partículas carregadas pelas águas do rio são depositadas e formam uma espécie de triângulo na desembocadura da foz do rio Paraíba do Sul –, levando à bacia sedimentos de outros terrenos e rochas, os chamados sedimentos clásticos (Contreras et al., 2010, citado por Souza, 2018).

Inseridas no contexto do Rift Continental do Sudeste do Brasil, as bacias sedimentares se formaram durante o período terciário e parte do quartenário (cerca de 65 milhões a 1,8 milhão de anos atrás), a partir do acúmulo nos fundos dos mares de sedimentos fluviais e aluvionares, respectivamente pela ação do curso dos rios e dos terrenos formados por depósitos de matérias orgânicas e inorgânicas deixados pelas águas. Estudos confirmam (Riccomini, 1989; Riccomini et al., 2004) que as bacias possuem uma coluna estratigráfica integrada, isto é, suas várias camadas de rochas indicam que os eventos e processos ocorreram ao longo de milhões de anos, permitindo reconhecer cinco sistemas deposicionais:

- **Formação Resende** – sedimentos formados pelo sistema de leques aluviais (depósito de sedimentos clásticos em formato de um grande leque triangular) associados a planícies aluviais (formadas pela deposição ao longo do tempo de sedimentos trazidos por um ou mais rios) de rios entrelaçados, compostos por arenitos, conglomerados, argilitos e siltitos. Tal formação ocorre tanto na bacia de Taubaté quanto na de São Paulo;
- **Formação Tremembé** – sedimentos de sistema de água doce, compostos por depósitos continentais flúvio-lagunares (de rios e lagunas) de idade terciária (entre 70 e 12 milhões de anos), e sedimentos aluvionares (provindos de depósitos de matérias orgânicas e inorgânicas deixado pelas águas) de idade quaternária (de 1,5 milhão de anos até os dias de hoje). Estes incluem

argilitos, folhelhos e calcários dolomíticos. Esta formação ocorre tanto na parte central da bacia de Taubaté quanto na região da bacia de São Paulo;

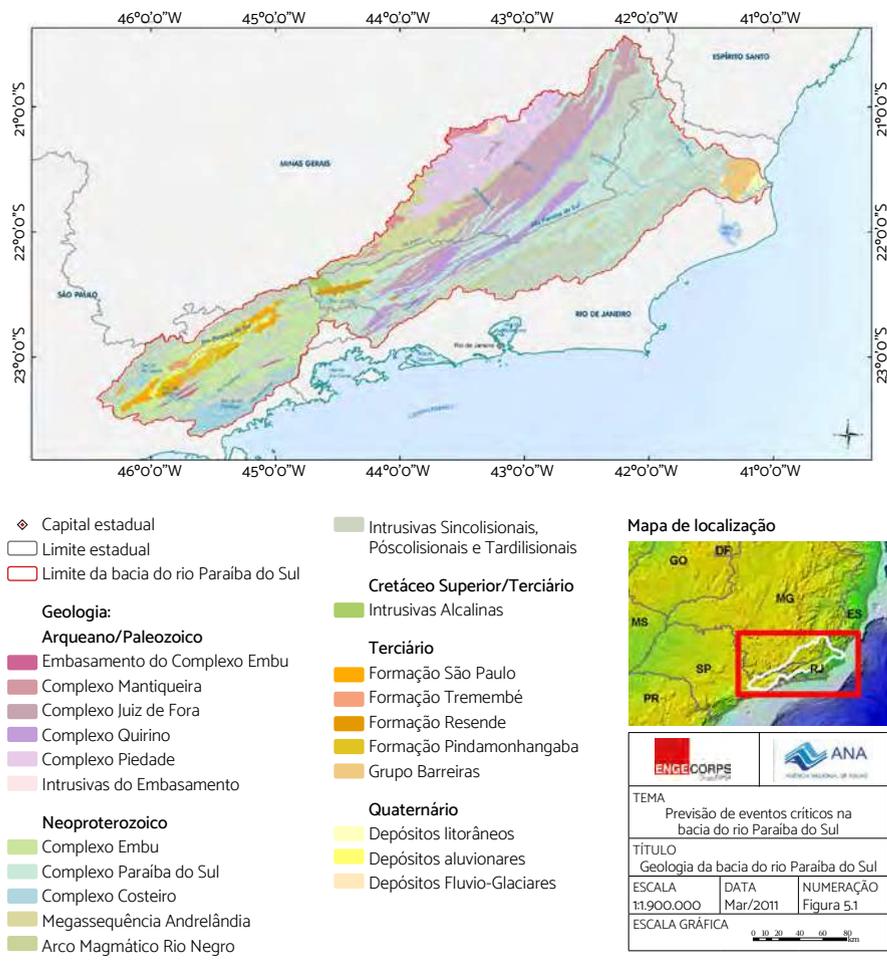
- **Formação São Paulo** – sedimentos de sistema fluvial meandrante, compostos por arenitos, argilitos, siltitos e arenitos conglomeráticos. Ocorre na bacia de São Paulo e na porção sudeste da bacia de Taubaté;
- **Formação Itaquaquecetuba** – sedimentos de ambiente fluvial entrelaçado, compostos por lamitos arenosos, arenitos, conglomerados e brechas polimíticas. Restrita à bacia de São Paulo;
- **Formação Pindamonhangaba** – sedimentos depositados no âmbito de um sistema fluvialmeandrante (sistema de rios sinuosos), compostos por arenitos, conglomerados, argilitos e siltitos. Ocorre apenas na porção central da bacia de Taubaté.

Três unidades geológicas-geomorfológicas bem distintas são identificadas na região da bacia do rio Paraíba do Sul (Soares et al., 2008):

- rochas pré-cambrianas associadas com relevos de morros e serras;
- sedimentos terciários associados a relevos suaves;
- sedimentos quaternários associados a extensas planícies aluvionares.

A Figura 1.5 apresenta uma visão resumida da geologia da bacia do rio Paraíba do Sul, destacando diferentes idades geológicas de formação da bacia.

Figura 1.5 Mapa geológico da bacia do rio Paraíba do Sul.



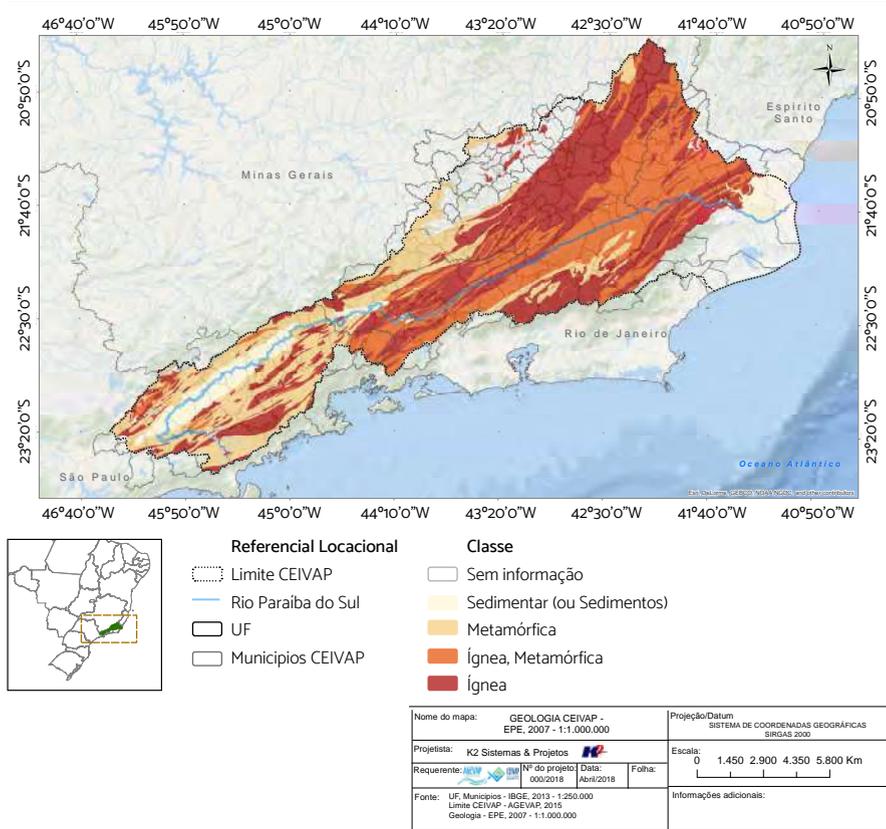
Fonte: ANA, 2011.

A Figura 1.6 mostra um mapa das subclasses litológicas da bacia, construído com dados gerados pelo Comitê de Integração da Bacia do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP) para ilustrar três unidades geológicas de rochas (ígneas, metamórficas e sedimentares) características da bacia. A região sedimentar da bacia está localizada em uma área de agradiação (deposição progressiva e generalizada de sedimentos no leito), cujas condições de acúmulo caracterizam-se por ser um ambiente fluvial contendo depósitos quaternários de matérias orgânicas e inorgânicas deixados pelas águas.

Nas áreas mais baixas, há a ocorrência de rochas sedimentares e sedimentos predominantemente arenosos e silto-argilosos (mistura dos tipos de solo silte e argila). Na região da foz do rio, há predomínio de sedimentos flúvio-marinhos (Fernandes et al., 1992, citado por CEIVAP, 2014a).

Já o embasamento da bacia é representado majoritariamente por rochas cristalinas (rochas cuja formação provém do lento resfriamento do magma, o que permite a formação de grandes cristais, visíveis a olho nu) da era pré-cambriana, ígneas (granito) e metamórficas (gnaisse, mica xisto e quartzo xisto).

Figura 1.6 Mapa das Subclasses Litológicas da bacia do rio Paraíba do Sul.

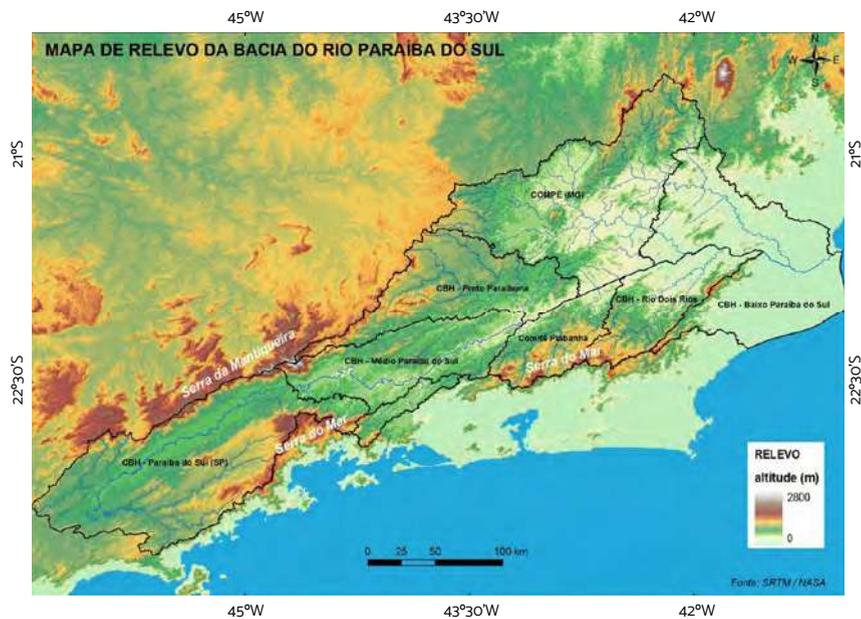


Fonte: UF, Municípios - IBGE, 2013 - 1:250.000 - Limite CEIVAP - AGEVAP, 2015 - Geologia - EPE, 2007 - 1:1.000.000

## Geomorfologia da bacia

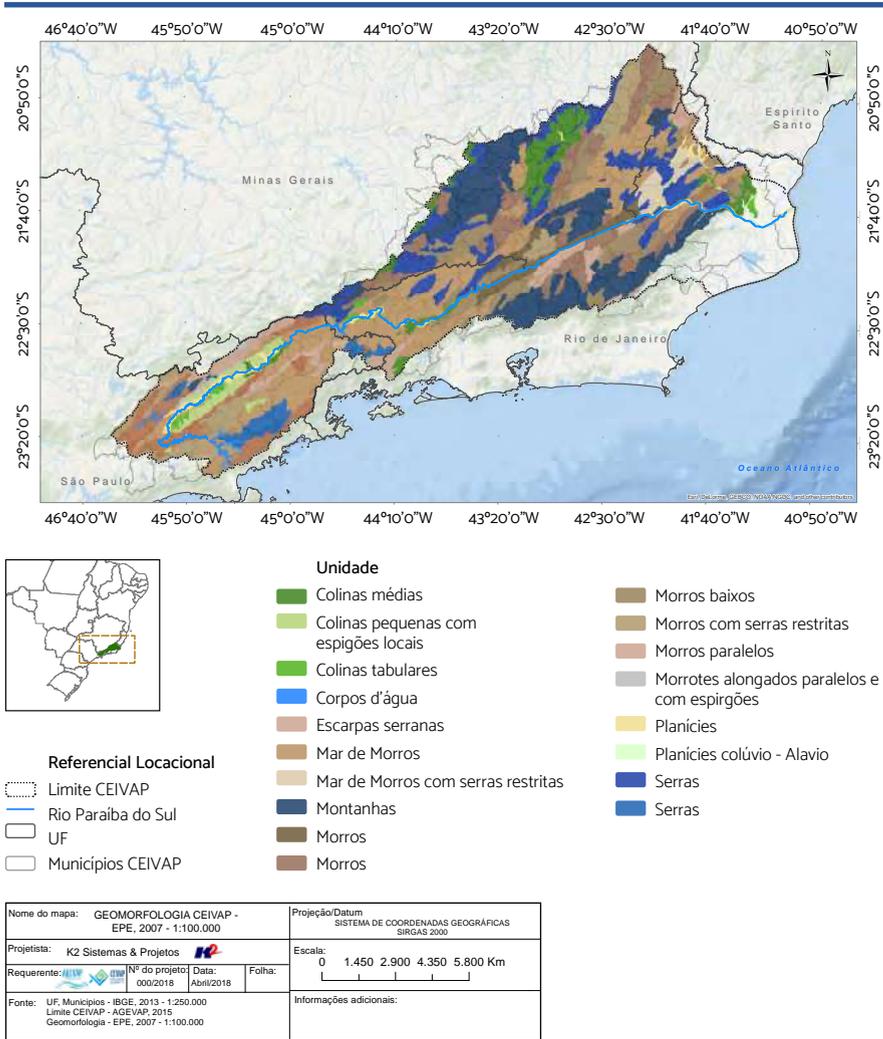
Fundamentado em estudos sobre a origem, composição, estrutura e evolução da Terra – a Geologia –, e das formas e relevos da superfície – a Geomorfologia –, consolidou-se conhecimento indispensável para fundamentar o planejamento ambiental. Isto porque a identificação dos tipos de relevo permite a delimitação das bacias de drenagem (bacias hidrográficas) e a orientação para localizar estações pluviométricas (Guerra e Cunha, 1996). Adicionalmente, a variação de relevo – se mais íngremes ou mais suaves – impacta a capacidade de infiltração da água no solo (discutido na seção Hidrogeologia), na velocidade de escoamento superficial nas encostas e na delimitação das áreas de inundação nas planícies (esses dois últimos relacionados ao subcapítulo Hidrografia). A Geomorfologia é um elemento fundamental para a identificação das áreas de recarga dos aquíferos, cujo potencial de armazenamento de água depende, entre outros fatores, da declividade e da forma dos relevos (CEIVAP, 2014b). Os dois mapas (Figuras 1.7 e 1.8) foram gerados com base em dados oficiais para ilustrar as altitudes da bacia (Figura 1.7) e a sua Geomorfologia (Figura 1.8).

Figura 1.7 Mapa altimétrico da bacia do rio Paraíba do Sul.



Fonte: Fonte: AGEVAP, 2014, p. 24.

Figura 1.8 Mapa geomorfológico da bacia do rio Paraíba do Sul.



Fonte: UF, Municípios - IBGE, 2013 - 1:250.000 - Limite CEIVAP - AGEVAP, 2015 - Geomorfologia - EPE, 2007 - 1:100.000

A bacia do rio Paraíba do Sul está inserida entre duas cadeias de montanhas paralelas à costa (Serra do Mar e Serra da Mantiqueira), cujos padrões de forma compreendem serras, planícies fluviais e flúvio-marinho.

As serras são destacadas no mapa altimétrico pelas altas elevações atingindo 2.500 metros nos contornos da bacia do alto Paraíba. Já no baixo Paraíba, as elevações são mais baixas (morros, colinas e morrotes), sub-região de planícies e bacias sedimentares. A morfologia, entretanto, apresenta variação de altitude praticamente a cada 200 metros.

No mapa geomorfológico, observam-se planícies fluviais e marinhas ao longo das margens do rio Paraíba do Sul e na área em direção à sua foz (a jusante). A maior parte da bacia é composta por relevos menores de declividades mais suaves, formadas por colinas, morros e morrotes. Relevos mais acentuados também se fazem presentes pelas montanhas, serras e escarpas ao longo da bacia.

As unidades de relevo podem ser tanto fruto de processos acumulativos/deposicionais (agradacionais) quanto de processos erosivos (degradacionais), que contêm características diferenciadas tanto na sua composição quanto nas suas propriedades hídricas (CEIVAP, 2013; 2014a). São elas:

### Planícies Inundacionais

Formações cuja diferença entre o maior e menor ponto do relevo (amplitude topográfica) é inferior a 20 m, variação das vertentes (superfícies inclinadas com atuação direta no transporte de sedimentos e no escoamento de água) praticamente nula, formadas por material inconsolidado de composição diversa como argilo-arenosas e fluviais e alúvio-coluviais em terrenos com drenagem variável. Estas áreas possuem nível freático próximo à superfície e são altamente suscetíveis a processos inundacionais e a problemas relacionados à ocupação urbana.

<b>Relevos de Colinas</b>	<p>Formações cuja amplitude topográfica é inferior a 100 m e gradiente das vertentes suave, formados por topos amplos e arredondados com declividades suaves raramente atingindo 20%. A densidade de drenagem (comprimento médio de canais de uma bacia por unidade de área) dessas formações é baixa, com predominância de padrões de drenagem dendríticos. São formadas por coberturas inconsolidadas (colúvios e aluviões). Os relevos colinosos são, de uma maneira geral, menos suscetíveis aos processos de degradação do meio físico, apresentando-se pouco desmatados, com vertentes curvadas (positiva ou negativamente, denominadas convexas e convexo-côncavas) e topos arredondados.</p>
<b>Relevos de Morros</b>	<p>Formações de relevos cuja amplitude topográfica varia entre 200 m e 400 m, formados por topos arredondados ou alongados, com variação de vertente entre média e elevada, formados por depósitos inconsolidados, compostos por colúvios (sedimentos misturados ou não selecionados) e depósito de pedaços de rocha (talus). Essas áreas possuem alta densidade de drenagem e padrões de drenagem variável. Os relevos de morros podem favorecer o aparecimento de movimentos de massa, particularmente em áreas onde ocorrem intervenções humanas (e.g., construção de loteamentos e a abertura de estradas).</p>
<b>Relevos de Serras e Escarpas Serranas</b>	<p>Formações cuja amplitude topográfica e gradientes de vertentes são muito elevados, com predomínio de amplitudes topográficas maiores que 400 m, com geometria dos topos aguçados ou em cristas alongadas. Possuem coberturas inconsolidadas formadas por colúvio e depósito de talus, solos rasos e aparecimento de rochas. A densidade de drenagem nestas áreas é muito alta e os padrões de drenagem são variáveis (dendrítico ou paralelo, treliça ou retangular). Nessas regiões, os processos morfodinâmicos são muito intensos favorecendo os movimentos de massa tanto naturais quanto induzidos pela presença do homem.</p>

## Climatologia

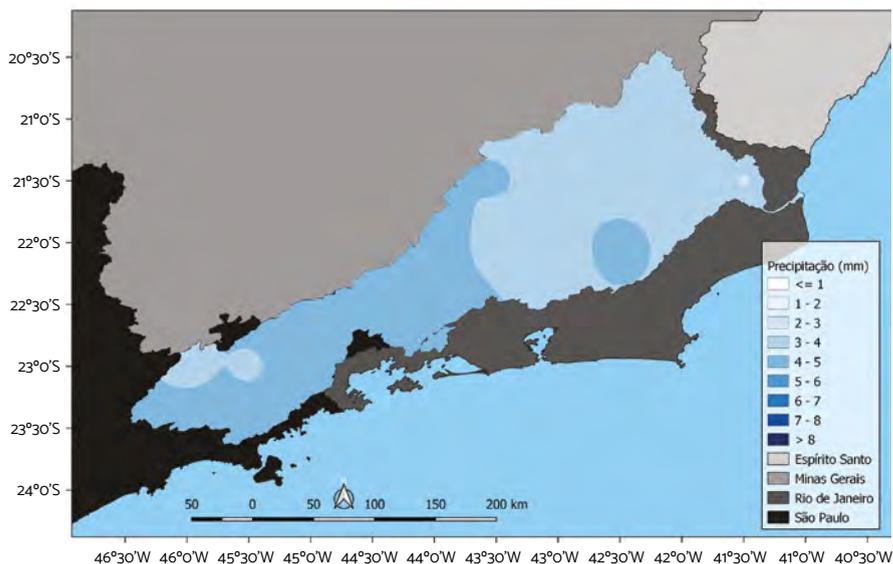
Climatologia é o estudo dos fenômenos climáticos em um determinado período. Os aspectos físicos da bacia referidos na seção anterior, com suas diferentes formas e relevos e respectivas interações com o meio, levam a um clima específico em cada região.

Dentre outras fontes oficiais, o projeto MoVaSC gerou mapas a partir do banco de dados *Physical Sciences Laboratory (PSL) South America Daily Gridded Precipitation*, que fornece informações de precipitação em grade e em frequência diária, compreendendo o período entre 1938 a 2012, com resolução horizontal espacial de 0,5° x 0,5° latitude-longitude, com base na precipitação observada em estações localizadas na América do Sul (Liebmann e Allured, 2005). No Brasil, as principais fontes que compõem estes dados são: Empresas de Energia Elétrica, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e o Instituto Nacional de Meteorologia e órgãos estaduais<sup>3</sup>. A Figura 1.9 ilustra um mapa da climatologia da precipitação anual na bacia do rio Paraíba do Sul.

---

<sup>3</sup> Os dados foram obtidos no endereço: [https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.south\\_america\\_precip.html](https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.south_america_precip.html).

Figura 1.9 Climatologia da precipitação anual (mm/dia) na bacia (1938-2011).



Fonte: Elaborada pela equipe do Projeto MoVaSC – Climatologia.

De modo geral, a precipitação média total anual (Figura 1.9) entre os anos de 1938 até 2011 na bacia do rio Paraíba do Sul está concentrada em torno de 4 mm/dia. As áreas localizadas nas regiões norte, nordeste, leste e sudeste da bacia apresentam valores pluviométricos inferiores às áreas localizadas a oeste e sudoeste. Próximo ao município de Resende, no estado do Rio de Janeiro e ao município de Guararema no estado de São Paulo, ocorrem os valores máximos de precipitação de 4,5 mm/dia. Já as áreas em torno dos municípios de Cardoso Moreira e Cambuci (ambos no RJ) concentram as menores precipitações: de 3 mm/dia e 3,3 mm/dia, respectivamente. Assim, a bacia possui uma variação em torno de 3 mm/dia a 5 mm/dia de precipitação ao longo das décadas analisadas.

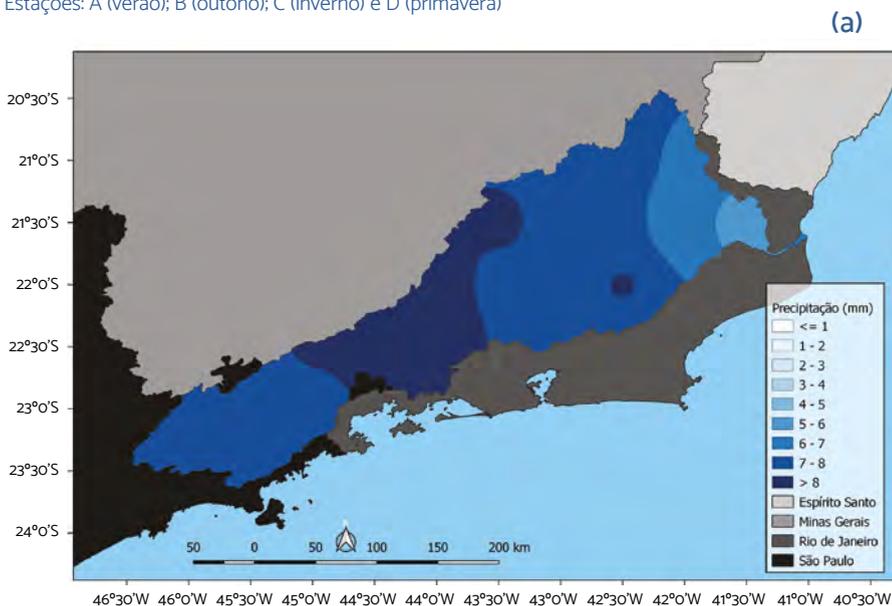
Separadas por estações, as análises em relação à distribuição da precipitação climatológica são modificadas. Conforme mostrado

nas imagens da Figura 1.10 (Fig. 1.10a a Fig. 1.10d), aproximadamente 80% da precipitação da bacia concentra-se nos meses de outubro a março, o que sugere um regime chamado monçônico na região, isto é, com duas estações bem definidas no ano: uma quente e chuvosa e outra seca, com temperatura mais amena. O cavado monçônico sobre a América do Sul corresponde à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sazonal (Reboita et al., 2010), que se forma no final da primavera, permanece no verão e, muitas vezes, dura até o início do outono.

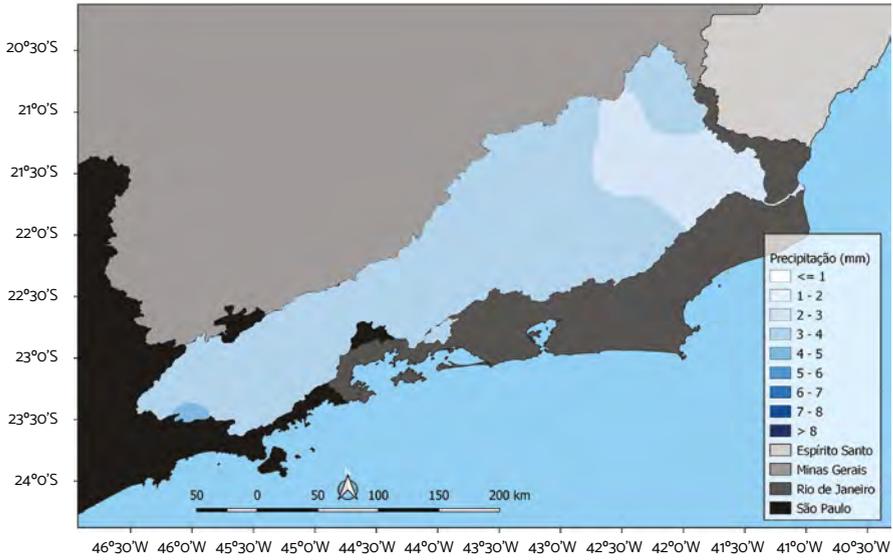
A região do estudo da bacia do rio Paraíba do Sul está justamente localizada na faixa de formação de ZCAS (Brasiliense et al., 2020), uma faixa de grande instabilidade meteorológica na massa de ar, que se estende desde o sul da Amazônia até o Sudeste brasileiro e o Oceano Atlântico Sul adjacente (Kodama, 1992).

**Figura 1.10** Distribuição espacial da climatologia sazonal (1938-2011) da precipitação (mm/dia).

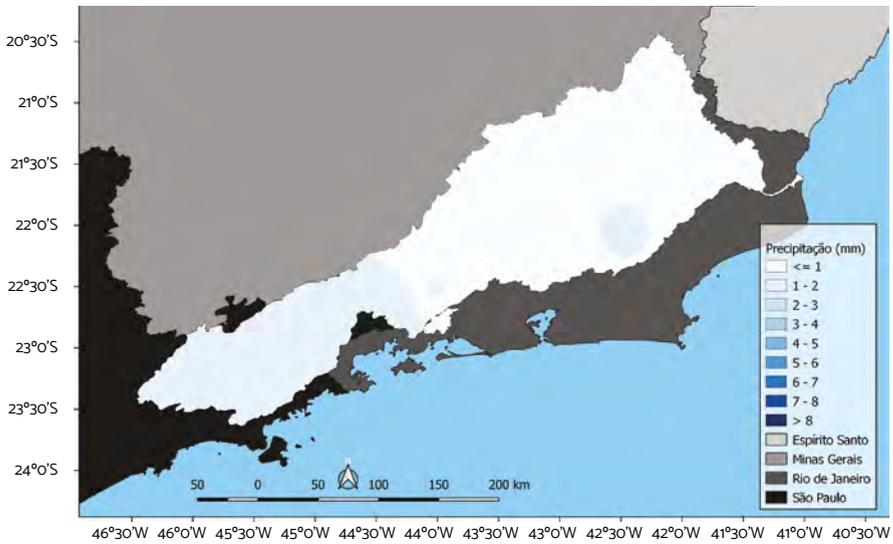
Estações: A (verão); B (outono); C (inverno) e D (primavera)

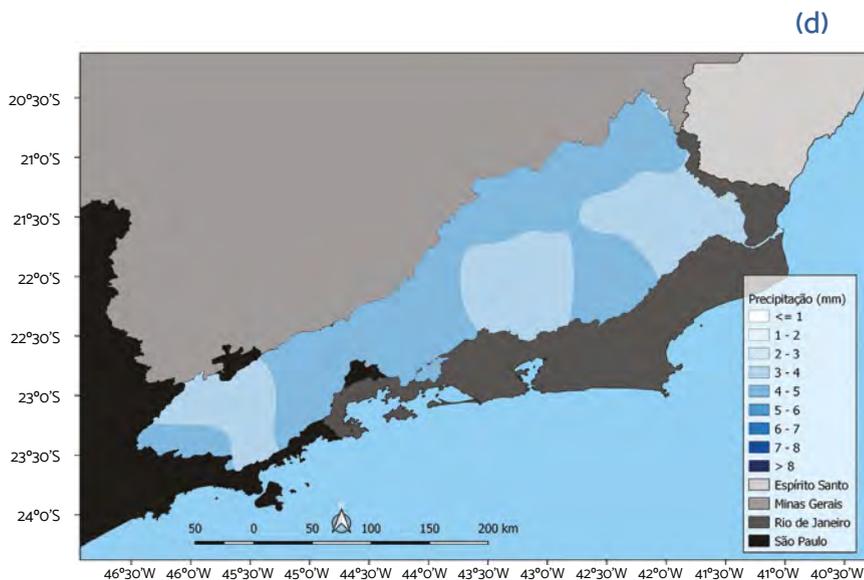


(b)



(c)



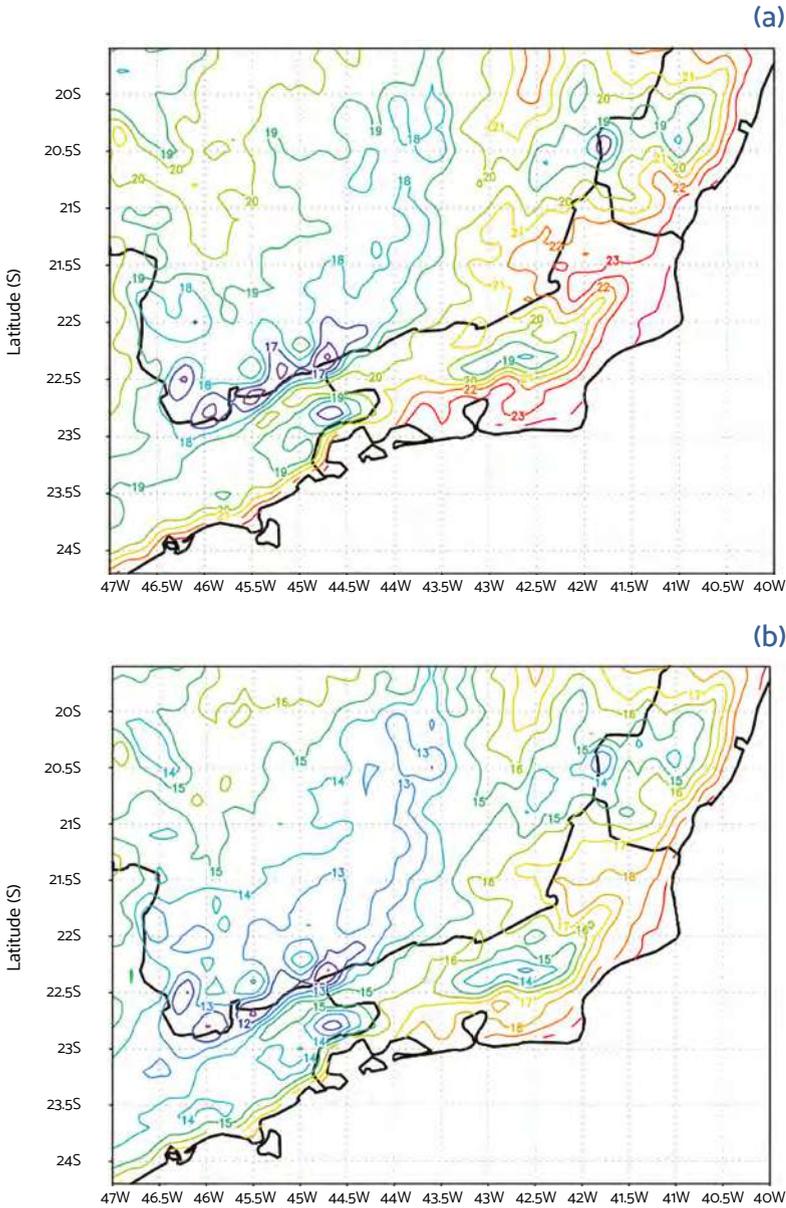


Fonte: Projeto MoVaSC.

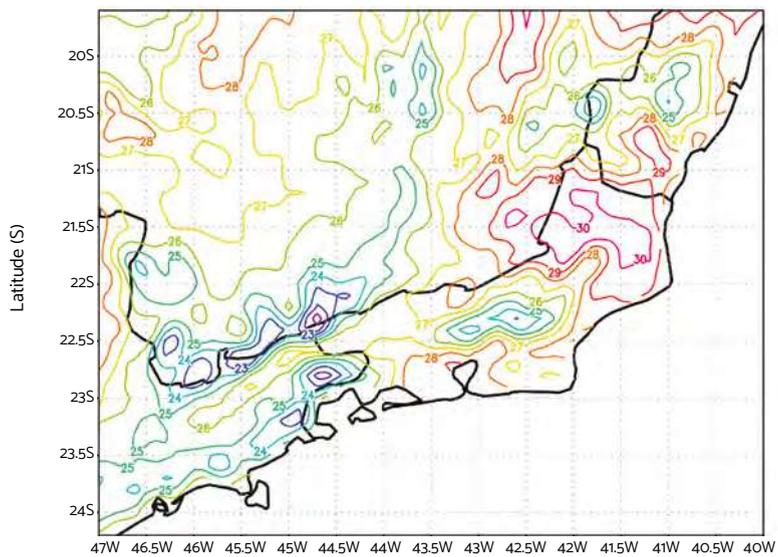
Com todos os aspectos citados, o clima da bacia do rio Paraíba do Sul é caracterizado como subtropical quente, com temperatura média anual variando entre 18 °C e 24 °C (Marengo e Alves, 2005). Evidentemente, há uma grande variabilidade anual, devido aos sistemas que predominam na região. Os mapas da Figura 1.11 (separadas nas figuras 1.11a a 1.11d), igualmente elaborados pelo Projeto MoVaSC para orientar o estudo climatológico da bacia, mostram a distribuição espacial das climatologias sazonais para verão e inverno, especificando as temperaturas máxima e mínima diárias sobre a região que contém a bacia do rio Paraíba do Sul. Nesses mapas, as isotermas mostradas em diferentes cores estão expressas em graus Celsius (°C), observando-se, como era de se esperar, temperaturas maiores no verão e menores no inverno. A temperatura do ar é maior nas regiões Norte e Noroeste Fluminense (temperatura máxima superior a 30 °C, no verão, Figura 1.11c); menor na região Serrana do Rio de Janeiro (temperatura mínima inferior a 13 °C, no inverno, Figura 1.11b); no Sul da bacia do rio Paraíba do Sul, em São José dos Campos, em Paraíba, Mogi das Cruzes e Barbacena, localizada no estado de Minas Gerais. Nas demais áreas da bacia, as temperaturas máxima e mínima apresentam um gradiente que aponta da fronteira norte da bacia para a direção do litoral.

**Figura 1.11** Climatologias das temperaturas médias sazonais de temperatura (isotermas expressas em °C).

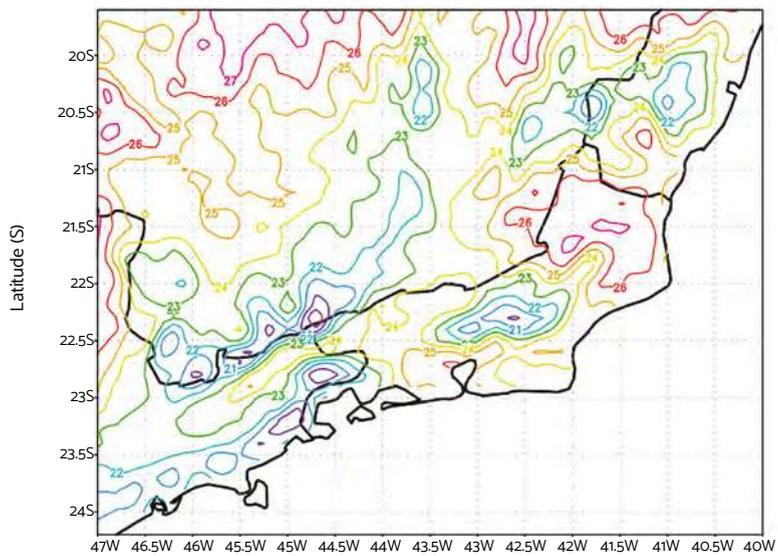
- A) temperatura mínima para o verão; B) temperatura mínima para o inverno;
- C) temperatura máxima para o verão; D) temperatura máxima para o inverno.



(c)



(d)



Em regiões de altitude elevada (e.g., Barbacena, Juiz de Fora, Nova Friburgo e Parque Nacional de Teresópolis), cujas estações de medição encontram-se instaladas acima dos 850 m de altitude, os valores indicados das temperaturas máximas e mínimas médias na bacia do rio Paraíba do Sul costumam ser menores, à exceção de São José dos Campos, no Vale do Paraíba. Apesar de estar a uma altitude de 644 m, lá é registrada a menor temperatura mínima média dentro da bacia do rio Paraíba do Sul. Uma possível explicação para isso é que a cidade de São José dos Campos é mais frequentemente afetada pelas passagens de frentes frias, com consequente canalização do ar frio no extremo Sudoeste do Vale do Paraíba. São José dos Campos está localizada em uma região de transição entre os trópicos e as latitudes médias, de Sudoeste para Nordeste da bacia do rio Paraíba do Sul, o que acarreta uma variação térmica de aproximadamente 8 °C em apenas 500 km de extensão (Brasiliense et al., 2020).

## **Hidrografia da bacia**

Por ser extenso e bem variado, desde 1972 o território brasileiro passou a ser dividido pela Agência Nacional de Águas (ANA) em sub-bacias hidrográficas. O objetivo é ampliar e melhorar a oferta de dados e obter mais confiabilidade na caracterização de seus processos hidrológicos de caracterização de intervenções impostas pela ação humana.

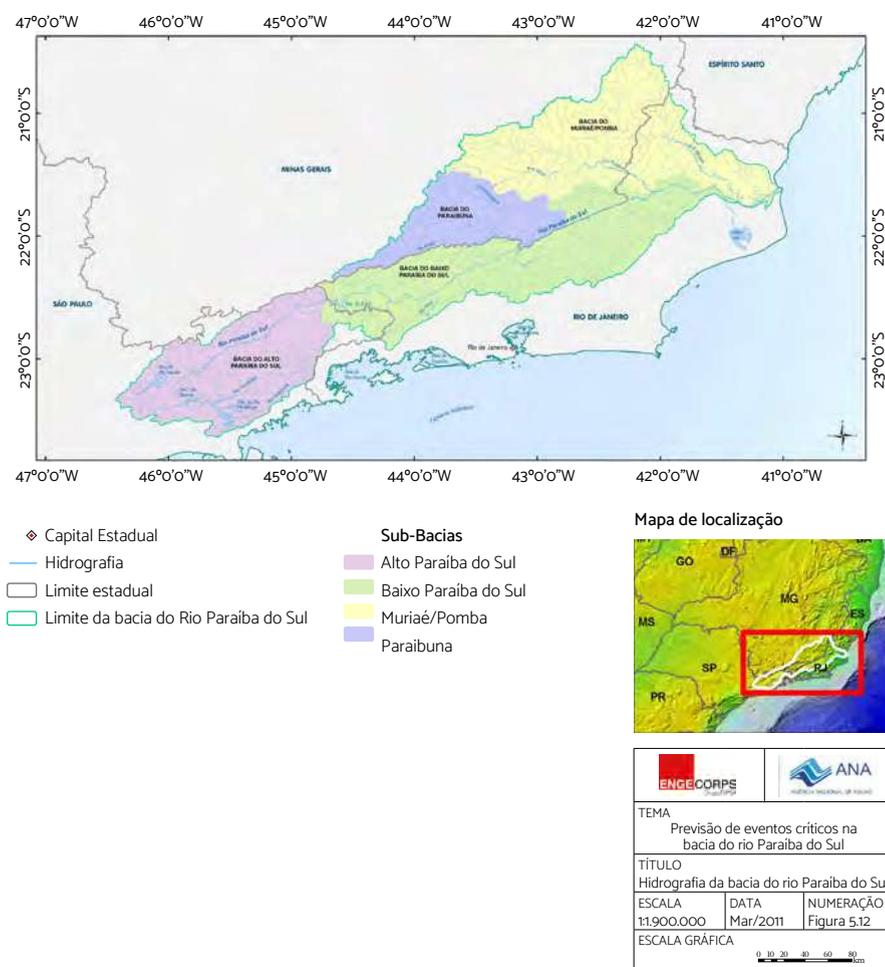
A soma dos aspectos físicos e climáticos das regiões que compõem a bacia estudada resulta em uma hidrografia diversa. O rio Paraíba do Sul é formado pelos rios Paraibuna e Paraitinga, cujas nascentes localizam-se, respectivamente, na Serra do Indaiá e na Serra da Bocaina, ambas no estado de São Paulo, próximas à divisa com o Rio de Janeiro.

No trecho superior, nas sub-bacias dos rios Paraibuna e Paraitinga seu curso tem o sentido geral Sudoeste e, a partir da cidade de Guararema (SP), sofre uma curvatura de aproximadamente 180°, passando a escoar no sentido Nordeste até sua foz no Oceano

Atlântico, próximo à cidade de São João da Barra, no Rio de Janeiro (ANA, 2011).

O mapa hidrográfico da Figura 1.12 destaca os rios, seus principais afluentes e afluentes secundários.

Figura 1.12 Mapa Hidrográfico da bacia do rio Paraíba do Sul.



Os principais afluentes do rio Paraíba do Sul pela margem esquerda são:

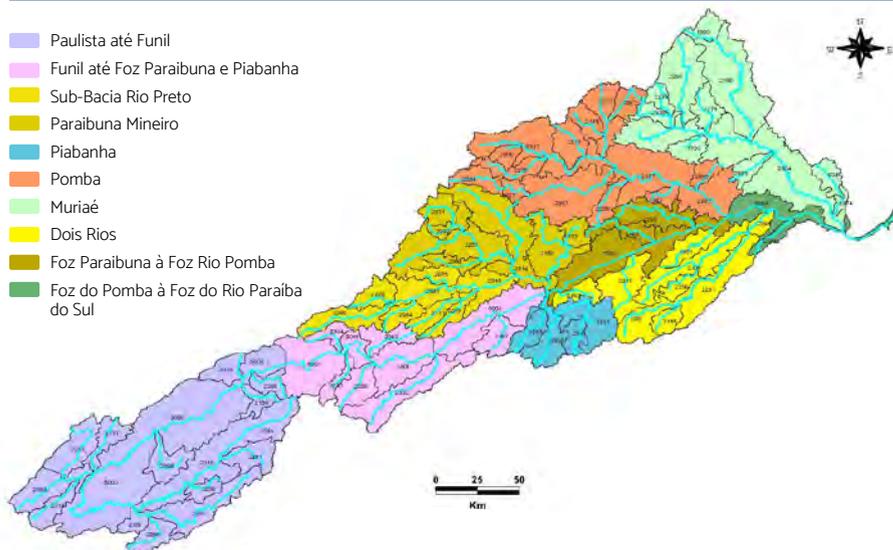
- **Rio Jaguari:** com nascente no estado de São Paulo, atravessa os municípios de Igaratá, Jacareí e São José dos Campos, possui uma área de drenagem com cerca de 1.757 km<sup>2</sup>. Seu principal afluente é o rio do Peixe e, por causa da barragem da Usina de Jaguari em São José dos Campos, é represado próximo à sua foz;
- **Rio Paraibuna:** nasce no município de Antônio Carlos (MG), com 170 km de extensão. Seus principais afluentes são os rios: do Peixe, Cágado e Preto, desaguando no rio Paraíba do Sul, próximo à cidade de Três Rios (RJ). A sub-bacia do rio Paraibuna possui uma área de drenagem de 8.558 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 15,4% da área de drenagem total da bacia do rio Paraíba do Sul. Dentre os municípios que banha, destaca-se Juiz de Fora, importante polo industrial de Minas Gerais;
- **Rio Pomba:** com 265 km de extensão, apresenta uma área de drenagem de 8.616 km<sup>2</sup>, o equivalente a 15,5% da área de drenagem total da bacia do rio Paraíba do Sul. O rio Pomba abrange 38 municípios, sendo 35 (ou 92,1%) mineiros e três (ou 7,9%) fluminenses. As cidades de maior importância banhadas por ele são Cataguases, Leopoldina, Santos Dumont, São João Nepomuceno, Ubá e Visconde do Rio Branco, em Minas Gerais, e Santo Antônio de Pádua e Miracema, no Rio de Janeiro. Seus principais contribuintes são os rios Novo, Piau, Xopotó, Formoso e Pardo;
- **Rio Muriaé:** formado pela confluência dos rios Bom Sucesso e Samambaia, possui 300 km de extensão e seus principais afluentes são os rios Santo Antônio e Carangola. No Rio de Janeiro, de Italva até a sua foz, desenvolve-se em região plana, constituindo planície de inundação nas grandes cheias. Com uma área de drenagem de 8.162 km<sup>2</sup> (14,7% da área de drenagem total da bacia do rio Paraíba do Sul), abrange 26 municípios, sendo 19 (ou 73,1%) mineiros e sete (ou 26,9%) fluminenses. Os municípios mais representativos são: Muriaé (MG), Carangola (MG) e Itaperuna (RJ).

Os principais afluentes do rio Paraíba do Sul na margem direita são:

- **Rio Pirai:** o rio Pirai é um curso de água que banha o estado do Rio de Janeiro. A sua foz é no rio Paraíba do Sul, no município de Barra do Pirai. Suas características hidráulicas e sedimentológicas encontram-se bastante modificadas devido aos dois barramentos, Tocos e Santana. O rio Pirai é represado pela barragem de Santana, controlada pela Light Serviços Elétricos S/A. Também no rio Pirai está localizada a elevatória de Vigário. O rio Pirai é represado pela barragem de Santana, controlada pela Light Serviços Elétricos S/A. Também no rio Pirai está localizada a elevatória de Vigário;
- **Rio Piabanha:** com 80 km de extensão e bacia com área de drenagem de 2.065 km<sup>2</sup>, abrange quatro municípios fluminenses: Areal, Petrópolis, Teresópolis e São José do Vale do Rio Preto. O rio Piabanha tem como principal afluente o rio Paquequer, com curso de 75 km;
- **Rio Dois Rios:** é formado pelo encontro das águas dos rios Negro e Grande, cujas bacias hidrográficas fazem parte da Região Serrana. Do ponto de encontro desses rios até a sua foz, no Paraíba do Sul, o rio Dois Rios tem aproximadamente 300 km de extensão. Sua bacia hidrográfica tem uma área de drenagem de 3.200 km<sup>2</sup>, e abrange nove municípios fluminenses: Nova Friburgo, Cantagalo, Cordeiro, Duas Barras, Macuco, Bom Jardim, São Sebastião do Alto, Santa Maria Madalena e Trajano de Morais.

Em 2006, a CEIVAP definiu as sub-bacias como áreas prioritárias para a recuperação e conservação na bacia do rio Paraíba do Sul. Para isso, foi adotado como critério um limite de área mínima de 200 km<sup>2</sup>. As sub-bacias com áreas menores foram agrupadas, conforme ilustrado na Figura 1.13.

Figura 1.13 Sub-bacias com mais de 200 km da bacia do rio Paraíba do Sul.

**Trecho paulista até funil**

2238 - Rio do Chapéu  
 2291 - Rio Jacuí  
 2316 - Rio Paratinga TR  
 2295 - Rio Lourenço Velho  
 2315 - Rio Paraibuna TR  
 5000 - PbSul - Paraibuna até Funil TR  
 2319 - Rio Paratêi  
 2251 - Rio do Peixe  
 2294 - Rio Jaguarí TR  
 2177 - Rio Buquira  
 2368 - Rio Uma  
 2035 - Ribeirão Passa-Vinte  
 2199 - Rio do Bocaina  
 2288 - Rio Itagaçaba

**Trecho Funil até Foz Paraibuna/Piabanha**

5001 - PbSul - Funil até Santa Cecília TR  
 2334 - Rio Pirapetinga  
 2230 - Rio Barreiro de Baixo  
 2229 - Rio do Bananal  
 2363 - Rio Turvo  
 2332 - Rio Pirai  
 5002 - PbSul - Santa Cecília até Foz Paraibuna/Piabanha  
 2367 - Rio Ubã

**Bacia do rio Paraibuna Mineiro**

2228 - Rio do Bananal  
 2354 - Rio São Fernando  
 2171 - Rio Bonito  
 2219 - Rio das Flores TR  
 2075 - Ribeirão Santana

2340 - Rio Preto TR  
 2303 - Rio Monte Verde ou Santa Clara  
 2371 - Rio Vermelho  
 2282 - Rio Grão-Mongol TR  
 2250 - Rio do Peixe TR  
 1970 - Ribeirão Espírito Santo  
 2180 - Rio Cágado TR  
 2314 - Rio Paraibuna TR

**Bacia do Rio Piabanha**

2243 - Rio do Fagundes  
 2311 - Rio Paquequer  
 2341 - Rio Preto TR  
 2325 - Rio Piabanha TR

**Bacia do Rio Pomba**

2254 - Rio do Pinho  
 2327 - Rio Piau TR  
 2307 - Rio Novo TR  
 2006 - Ribeirão Lontra  
 2275 - Rio Formoso  
 2317 - Rio Paraopeba  
 2148 - Ribeirão Ubã  
 2267 - Rio dos Bagres  
 2373 - Rio Xopotó TR  
 2320 - Rio Pardo  
 1942 - Ribeirão dos Monos  
 2095 - Ribeirão Santo Antônio  
 2337 - Rio Pomba TR

**Bacia do Rio Muriaé**

2278 - Rio Fumaça

2338 - Rio Preto TR  
 2280 - Rio Glória  
 2279 - Rio Gavião  
 1703 - Ribeirão Cachoeira Alegre  
 1689 - Ribeirão Bom Jesus  
 2186 - Rio Carangola TR  
 2353 - Rio São Domingos  
 634 - Córrego da Onça  
 2374 - Vale da Onça TR  
 2304 - Rio Muriaé TR

**Bacia do Rio Dois Rios e outros**

2115 - Ribeirão São José  
 2281 - Rio Grande TR  
 2296 - Rio Macucu  
 2305 - Rio Negro TR  
 2265 - Rio Dois Rios TR  
 2182 - Rio Calçado  
 2310 - Rio Paquequer  
 1801 - Ribeirão das Areias

**Trecho Foz Paraibuna/Piabanha até Foz do Rio Pomba**

5003 - PbSul - Três Rios e Itaocara TR  
 2163 - Rio Angu  
 2333 - Rio Pirapetinga

**Trecho do Rio Pomba até a Foz do Rio Paraíba do Sul**

5004 - PbSul - Itaocara à Foz  
 2239 - Rio do Colégio

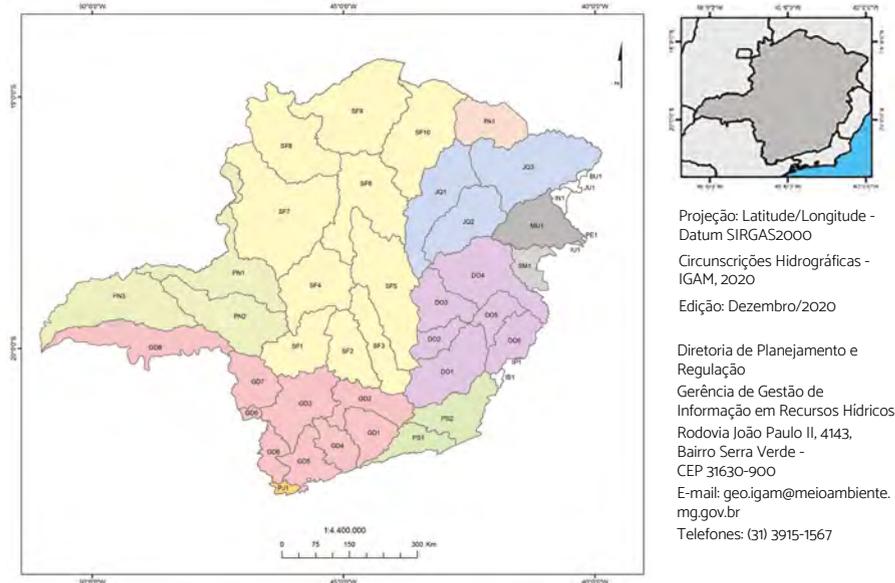
OBS: TR - trechos com sub-bacias que têm menos de 200 km<sup>2</sup>

No estado de São Paulo, uma subdivisão de trabalho da CEIVAP é encarregada dos estudos da bacia do Alto Paraíba do Sul, priorizando as ações estabelecidas pelo comitê da bacia.

Três dos principais reservatórios artificiais do sistema hidráulico do rio Paraíba do Sul estão localizados na porção paulista da bacia do Rio Paraíba do Sul. São eles: Jaguari, Paraibuna/Paraitinga e Santa Branca, que constituem os maiores espelhos d'água da bacia. Além dos grandes reservatórios de geração de energia elétrica, há duas instalações PCH (Pequenas Centrais Hidrelétricas) e cinco CGH (Centrais Geradoras Hidrelétricas) referenciadas (CBH-PS, 2016). Há, também, vários lagos artificiais de tamanhos variados, a exemplo dos antigos reservatórios de geração de energia elétrica, cujas estações de geração de energia foram desativadas; tanques de rejeito de mineração; cavas de mineração desativadas; cavas de mineração de areia, cuja extração é realizada pelo método de cava submersa; açudes (represas) em área de agricultura para garantir a irrigação; açudes de piscicultura; e açudes de lazer.

Em Minas Gerais, o Instituto de Gestão de Águas Mineiro (IGAM) garante a gestão compartilhada e descentralizada das sub-bacias hidrográficas que integram a bacia do Paraíba do Sul em seu território, assegurando a oferta adequada de água em qualidade e quantidade sob a perspectiva do desenvolvimento sustentável. A Figura 1.14 ilustra as circunscrições hidrográficas do estado de Minas que fazem parte da bacia do rio Paraíba do Sul.

Figura 1.14 Circunscrições hidrográficas e sub-bacias no estado de Minas Gerais.

**Bacia hidrográfica do Rio Doce**

- DO1 - CBH do Rio Piranga
- DO2 - CBH do Rio Piracicaba
- DO3 - CBH do Rio Santo Antônio
- DO4 - CBH do Rio Suaçuí
- DO5 - CBH do Rio Caratinga
- DO6 - CBH Águas do Rio Manhuaçu

**Bacia hidrográfica do rio São Francisco**

- SF1 - CBH dos Afluentes do Alto São Francisco
- SF2 - CBH do Rio Pará
- SF3 - CBH do Rio Paraopeba
- SF4 - CBH do Entorno de Represa de Três Marias
- SF5 - CBH do Rio das Velhas
- SF6 - CBH dos Rios Jequitai e Pacui
- SF7 - CBH do Rio Paracatu
- SF8 - CBH do Rio Uruçuia
- SF9 - CBH dos Afluentes Mineiros do Médio São Francisco
- SF10 - CBH dos Afluentes Mineiros do Rio Verde Grande

**Bacia hidrográfica do Rio Grande**

- GD1 - CBH dos Afluentes Mineiros do Alto Rio Grande
- GD2 - CBH Vertentes do Rio Grande
- GD3 - CBH do Entorno do Reservatório de Furnas
- GD4 - CBH do Rio Verde
- GD5 - CBH do Rio Sapucaí
- GD6 - CBH dos AFLUENTES Mineiros Rios Mogi-Guaçu e Pardo
- GD7 - CBH dos Afluentes do Médio Rio Grande
- GD8 - CBH dos Afluentes do Baixo Rio Grande

**Bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha**

- JG1 - CBH dos Afluentes Mineiros do Alto Jequitinhonha
- JQ2 - CBH do Rio Araçuaí
- JQ3 - CBH dos Afluentes Mineiros do Médio e Baixo Rio Jequitinhonha

**Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba**

- PN1 - CBH dos Afluentes Mineiros Alto Paranaíba
- PN2 - CBH do Rio Araguaí
- PN3 - CBH dos Afluentes Mineiros do Paranaíba

**Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul**

- PS1 - CBH dos Afluentes Mineiros Rios Pretos e Parabuna
- PS2 - CBH dos Afluentes Mineiros Rios Pomba e Muriaé

**Bacia hidrográfica do rio Pardo**

- PA1 - CBH do Rio Mosquito e Demais Afluentes Mineiros do Rio Pardo

**Bacia hidrográfica dos rios Piracicaba / Jaguari**

- PI1 - Rios Piracicaba e Jaguari

**Bacia hidrográfica do rio Mucuri**

- MU1 - CBH dos afluentes Mineiros do rio Mucuri

**Bacia hidrográfica do rio São Mateus**

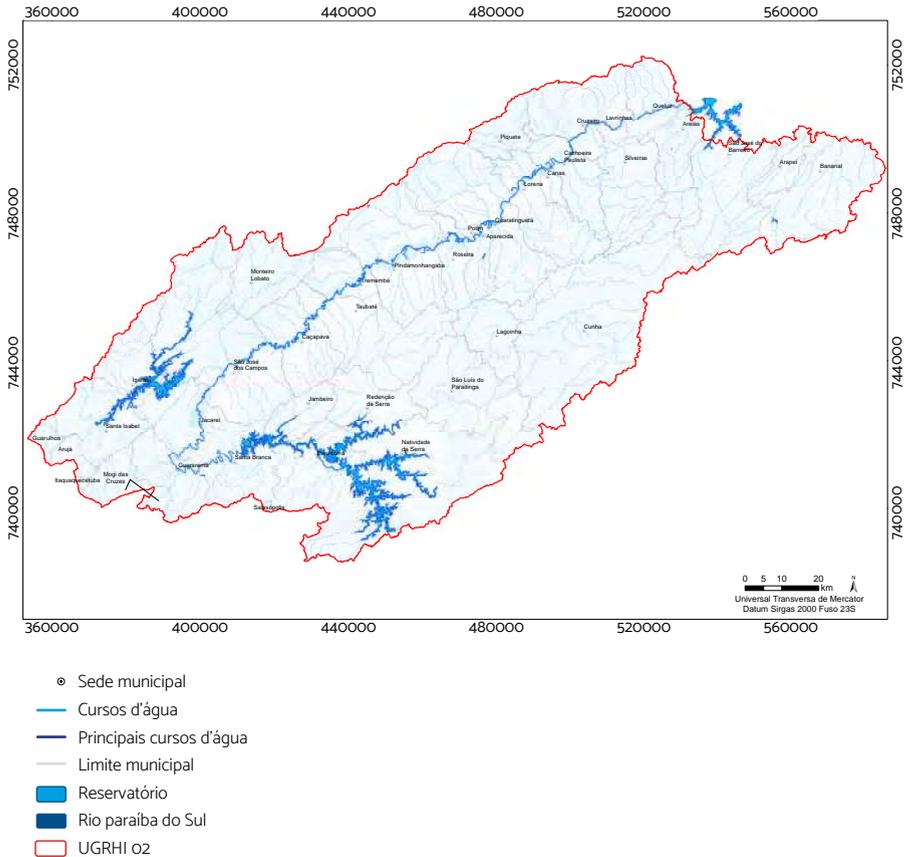
- SM1 - CBH do rio São Mateus

**Circunscrições Hidrográficas das bacias do Leste**

- BU1 - Rio Buranhém
- IB1 - Rio Itabapoana
- IN1 - Rio Itanhém
- IP1 - Rio Itapemirim
- IU1 - Rio Itaúnas
- JU1 - Rio Jucuruçu
- PE1 - Rio Peruípe



Figura 1.16 Curso d'água e reservatórios do rio Paraíba do Sul no estado de São Paulo.



Fonte: Cedida pelo Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP).

## Hidrogeologia da bacia

Esta seção trata de aspectos da água subterrânea (hidrogeologia) e sua interação com o meio ambiente. A hidrogeologia da bacia do rio Paraíba do Sul é fortemente relacionada com seus processos históricos de formação e transformação das superfícies e relevos que deram origem à região. Dentre os aquíferos que integram o Sistema

Aquífero Sedimentar da sub-região paulista da bacia do Paraíba do Sul, destaca-se o aquífero Taubaté. De forma alongada na direção Sudoeste-Nordeste, estende-se por uma área de 2.340 km<sup>2</sup>, formada de sedimentos arenosos e argilosos de grande variabilidade litológica na subsuperfície, com predomínio de camadas arenosas depositadas em ambiente fluvial na sua parte basal. Trata-se de um aquífero poroso, permitindo a circulação de água pelos poros dos solos e grãos constituintes das rochas sedimentares, contrapondo-se aos aquíferos com terrenos ígneometamórfico fissural, em que a água circula pelas fraturas, fendas e falhas abertas nas rochas. O Aquífero de Taubaté estende-se no estado de São Paulo, entre Jacareí e São José dos Campos, e entre Guaratinguetá e Lorena. Nessas porções da bacia do Paraíba do Sul, o aquífero possui boa produtividade e vazões sustentáveis da ordem de 120 m<sup>3</sup>/h por poço, enquanto na parte central do aquífero, entre as cidades de Taubaté a Pindamonhangaba, predomina a porção mais argilosa, formada em ambiente lacustre, com produtividade aquífera mais baixa, inferior a 10 m<sup>3</sup>/h (DAEE/IG/IPT/CPRM 2005; CEIVAP, 2006).

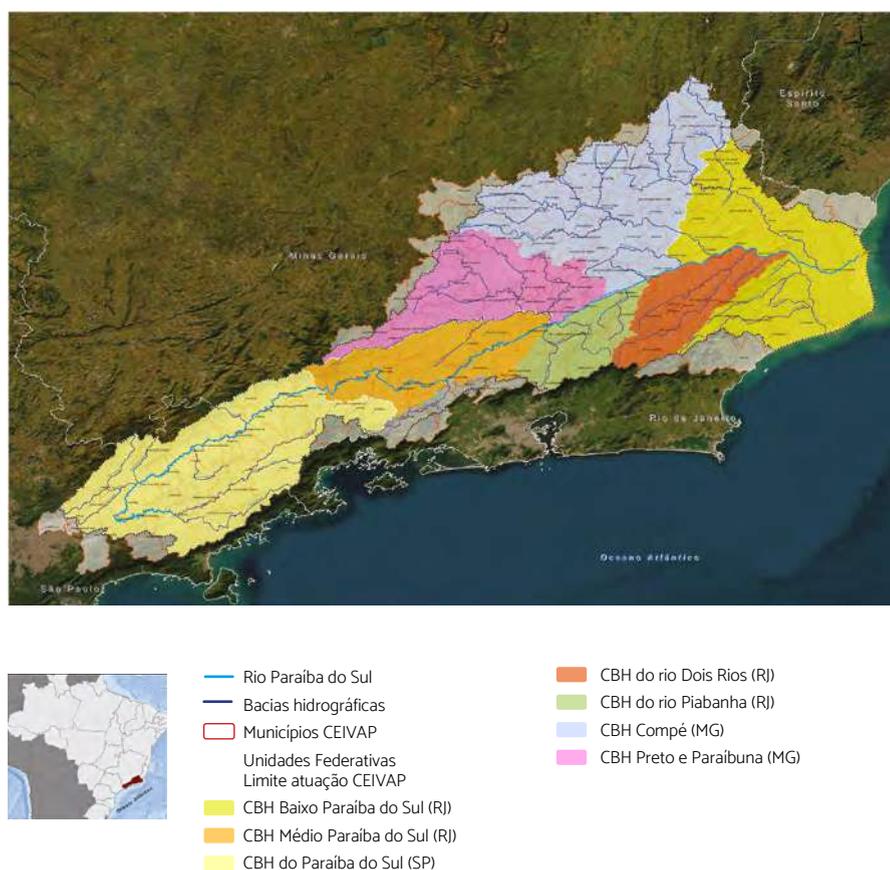
No estado do Rio de Janeiro, 80% da área é constituída por aquífero fissural, com propriedades heterogêneas e aleatórias, especialmente da bacia sedimentar de Resende e de Volta Redonda (CEIVAP, 2006). Os outros 20% são de aquíferos porosos, que incluem os sedimentares permeáveis e depósitos aluviais (de rios, portanto água doce) e marinhos (água salgada) (Martins et al., 2006).

Já os aquíferos do trecho mineiro da bacia do rio Paraíba do Sul, localizado dentro da Zona da Mata Mineira, dividem-se em dois tipos: um poroso ou granular, formado por aquífero superficial associado ao manto de alteração de rochas e depósitos aluvionares e outro fissural, representados pelas rochas cristalinas (Gonçalves et al., 2005).

## Pedologia da bacia

As diversidades físicas, químicas e biológicas discutidas nas seções anteriores referem-se à formação específica de solos. A Pedologia é a área do conhecimento que se dedica ao estudo dessa formação e sua distribuição espacial. A título de contextualização, esta seção discute sucintamente os tipos de solos e sua disposição na bacia do rio Paraíba do Sul. A Figura 1.17 apresenta as unidades federativas que delimitam a atuação da Secretaria Executiva do Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), demarcando as sub-regiões denominadas de Baixo e Médio Paraíba do Sul e outras associadas aos principais afluentes. Com base em dados gerados pela CEIVAP, este mapa orienta a discussão dos tipos de solos e sua disposição na bacia do rio Paraíba do Sul. Nos relevos mais montanhosos, em vertentes de maior declividade, há solos mais rasos e ou a presença de rochas, enquanto que em declives mais suaves geralmente encontram-se solos mais desenvolvidos e profundos. Esta grande diversidade geológica-geomorfológica tem contribuído para o desenvolvimento de diversas unidades pedológicas, a exemplo de latossolos, argissolos, cambissolos e gleissolos melânicos (Oliveira et al., 1999, citado por Soares et al., 2008).

Figura 1.17 Mapa da bacia do rio Paraíba do Sul.



Fonte: Cedida pelo Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP).

O mapa acima mostra três importantes unidades da região do alto Paraíba do Sul: Cambissolos háplicos, Latossolos vermelho-amarelo e Argissolos vermelho-amarelo. No estado do Rio de Janeiro, há predominância dos solos Argissolos vermelho-amarelos, Latossolo vermelho-amarelo e Cambissolos háplicos. Nas bacias do rio Dois Rios e do baixo Paraíba do Sul, há predomínio de Argissolos vermelhos. No estado de Minas Gerais, na bacia do Paraibuna, predominam Latossolos vermelho-amarelo e Cambissolos háplicos.

No geral, a bacia é coberta por três principais tipos pedológicos, que cobrem 70% da região: Latossolos vermelho-amarelos distróficos, ocupando 39,3% da área; Cambissolos háplicos distróficos, correspondentes a 15,2% do local; e Argissolos vermelho-amarelos distróficos, ocupando 14,5% (CEIVAP, 2013).

Baseando-se apenas nas classes dos solos, pode-se inferir que o tipo latossolo vermelho-amarelo é o que possui melhor capacidade de infiltração, sendo o mais profundo e com macroporosidades (volume de espaços maiores por onde a água passa) mais elevadas. Os solos cambissolo háplicos e cambissolo húmicos podem apresentar moderada infiltração. Os argissolos vermelho-amarelo possuem baixa capacidade de infiltração e, por conterem argila, tornam-se praticamente impermeáveis. Os gleissolos melânicos possuem a mais baixa capacidade de infiltração, com lençol freático (espécie de reservatório natural de água, permitindo que a chuva se infiltre) próximo à superfície, representando condições de descarga de aquífero (CEIVAP, 2013).

### Uso e cobertura do solo

Os diferentes tipos de solos possuem diferentes coberturas, afetados por princípios ativos de plantas, raízes, folhas e sementes e por ações antrópicas que podem comprometer os mananciais e causar a extinção de espécies, inundações, erosões e poluição, impactando em mudanças climáticas.

Como parte do bioma Mata Atlântica, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (Köppen-Geiger, IBGE, 1990), o clima na região é subtropical oceânico e tropical sazonal, com duas estações bem definidas, sendo a estação seca no inverno. Devido à sua localização geográfica, forma de relevo, geologia e o clima, a formação arbórea original das planícies fluviais é de vegetação ombrófila densa (caracterizada pela vegetação de folhas largas, sempre verdes e perenes, além de frequentes e grandes volumes de chuva, já que, praticamente, não ocorre período de seca) e vegetação de várzea menos abundante, mas adaptada a inundações (Simi et al., 2009).

De acordo com relatos históricos, o início do uso e ocupação dessa área, de acelerada modificação e degradação, deu-se no período colonial, seguindo o curso do rio Paraíba do Sul. Pequenos povoados surgiram com a chegada dos bandeirantes e a instalação da Igreja Católica. No ciclo do ouro, que teve início no século XVII e seu auge no XVIII, foram criadas estradas para transportar o minério do sul de Minas Gerais para o porto do Rio de Janeiro com destino a Portugal (Sousa e Vitale, 2014; Andrade et. al, 2015). O sistema Köppen-Geiger faz uso de cores e tonalidades para classificar o mundo em cinco zonas climáticas com base em critérios, a exemplo da temperatura, que favorece diferentes crescimentos de vegetação. O sistema de classificação climática de Köppen categoriza as zonas climáticas em todo o mundo com base na vegetação local.

Em seguida, veio o ciclo do café, com início ainda no século XVIII e em terras fluminenses. Somente na primeira metade do século XIX a cafeicultura surgiu no estado de São Paulo, quando foi construída a ferrovia Rio-São Paulo. Esta atividade agrícola, porém, promoveu a degradação ambiental do solo, seguida por uma estagnação econômica, que, por sua vez, motivou culturas de subsistência e pecuária leiteira, que passaram a ser exercidas então (Sousa e Vitale, 2014).

Em 1940, as primeiras indústrias foram instaladas e, em 1946, no pós-guerra, a Companhia Siderúrgica Nacional iniciou suas atividades. Com a industrialização, houve um aumento da urbanização na região da bacia, bem como o início da extração de areia, que durou mais de 50 anos, e ocorreu no leito do rio. Contudo, com o esgotamento dos leitos, ela passou a ser feita em cavas (buracos relativamente grandes que ficam inundados). Outra alteração promovida pela ação humana foi a chamada retificação dos rios, cujas modificações artificiais foram feitas para aumentar a profundidade ou alargar o seu leito com o propósito de facilitar a navegação. Atualmente, trechos próximos à foz, com aproximadamente 90 km de extensão e outro superior, próximo a Cachoeira Paulista e Guararema, com extensão de 280 km, ainda podem ser navegados.

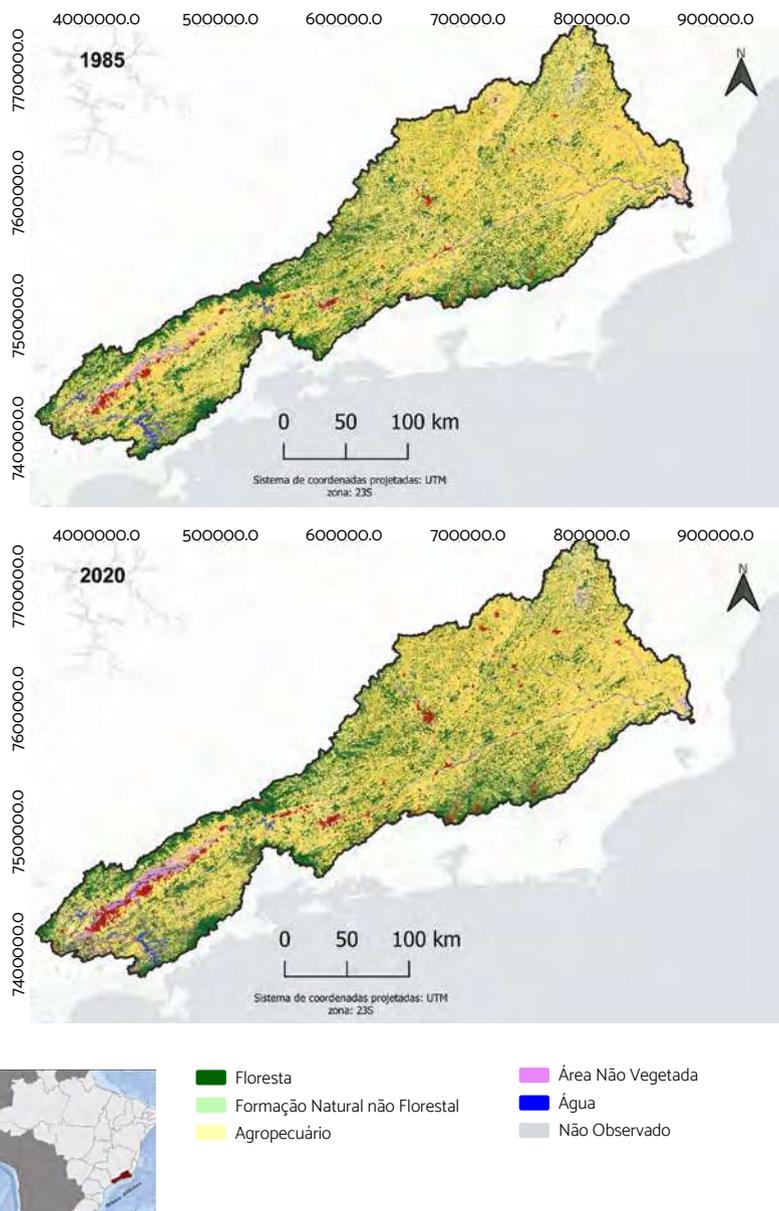
Como resultado dos processos de ocupação e uso do solo na região da bacia do rio Paraíba do Sul, a cobertura vegetal original de Mata Atlântica foi devastada, sendo reduzida para cerca de 11% do território original. Com isso, sobraram poucas espécies remanescentes em diversos estágios de regeneração, normalmente restritos a pequenas manchas frequentemente isoladas e cercadas basicamente por pastagens (ANA, 2001).

A dinâmica de alteração da cobertura do solo e seus significantes impactos na gestão ambiental, notadamente na gestão dos recursos hídricos, requer o acompanhamento dessa variável. Não por acaso, nas últimas décadas, multiplicaram-se os instrumentos que permitem o acompanhamento sistematizado da evolução do uso e cobertura do solo, e a possibilidade de avaliação de seus múltiplos impactos. Progressos esses que resultaram dos avanços na computação (*hardware* e *software*); no acesso a bases de dados especializadas, que documentam resultados de sensoriamento remoto e sofisticação de técnicas de análise e processamento de grandes massas de dados associados à variabilidade climática, produção de sedimentos e disponibilidade hídrica.

Dentre esses instrumentos, a partir de 2015, o projeto de mapeamento anual de uso e cobertura da terra – MapBiomas (MapBiomas, 2020; Souza et al., 2020), cujo foco é o monitoramento dos desmatamentos e queimadas nos principais biomas brasileiros (e.g., Amazônia, Pantanal e Cerrado) – passou a gerar mapas de uso e cobertura do solo para todo o território brasileiro, documentos esses com excelente qualidade técnica e rigor científico.

A partir da plataforma de dados MapBiomas, foi possível produzir mapas e estatísticas para diferentes recortes territoriais do país, por biomas e por bacias hidrográficas, referenciados a séries históricas desde 1985. A título de exemplo, a Figura 1.18 (elaborada pela Equipe do Projeto MoVaSC) ilustra dois desses mapas de uso e cobertura do solo na bacia do rio Paraíba do Sul, caracterizando as alterações observadas num período de 15 anos (entre 1985 e 2020).

Figura 1.18 Mapas de uso e cobertura do solo da bacia do rio Paraíba do Sul.

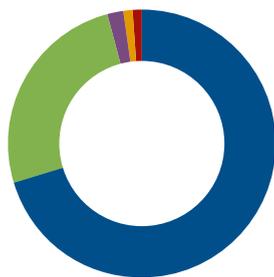


Fonte: Projeto MoVaSC.

Nesses MapBiomias, as diferentes classes de uso e ocupação do solo são discretizadas em quatro níveis (o nível 1 refere-se ao de maior síntese, desdobrado em subclasses nos níveis 2 a 4). A Figura 1.19 quantifica o percentual das classes de usos e coberturas dos solos na bacia do rio Paraíba do Sul para os anos 1985 e 2020, caracterizadas na Figura 1.18. Conforme documentado, as classes dominantes são Florestas (exibindo uma modesta tendência de recomposição da cobertura florestal, de 26% para 28%), seguidas de uma similar redução da atividade agropecuária (de 71% para 68%) entre esses dois anos de observação; variação essa, entretanto, dentro da margem de erro dessas avaliações. Mais detalhes sobre essas matrizes de transição encontram-se discutidos no Capítulo 5, que discute resultados produzidos pelo projeto de P&D MoVaSC, inspirador deste livro.

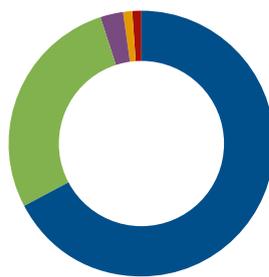
**Figura 1.19** Estatística das principais classes (nível 1) de Uso e Cobertura do Solo da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul (1985 e 2020).

Percentuais das Classes de Uso e Cobertura do Solo (Nível 1 - 1985)



- Agropecuário – 71%
- Floresta – 26%
- Área não vegetada – 2%
- Água – 1%
- Formação Natural Não Florestal – 1%

Percentuais das Classes de Uso e Cobertura do Solo (Nível 1 - 2020)



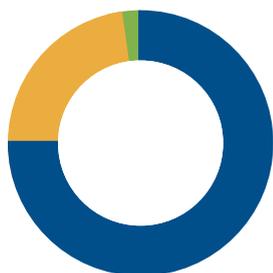
- Agropecuário – 68%
- Floresta – 28%
- Área não vegetada – 3%
- Água – 1%
- Formação Natural Não Florestal – 1%

Fonte: Projeto MoVaSC.

A Figura 1.20 detalha, para os anos de 1985 e 2020, as classes dominantes, com pequenas variações ao longo desse período. As subclasses Pastagem (75%) e Agricultura (24%) mantiveram-se dentro da margem de erro. Observa-se que a tendência de redução do uso agropecuário pode ser explicada pela redução nas áreas de pastagem, reduzidas em 4% no período de 1985 a 2020 e que, juntamente com as áreas transicionais de mosaicos de agricultura e pastagens, perfazem cerca de 95% da área da bacia. Já pelo lado das subclasses de menor representatividade, chama a atenção, positivamente, a expansão da silvicultura, praticamente inexistente (0,02%) em 1985 para 2%, em 2020. Se a expansão dessas atividades (intrinsecamente relacionadas com a manutenção e exploração racional das florestas) confirma a tendência de substituição de áreas de pastagem por áreas de floresta, pode-se prever um potencial animador de recuperação da cobertura florestal, de forma econômica e ambientalmente sustentável.

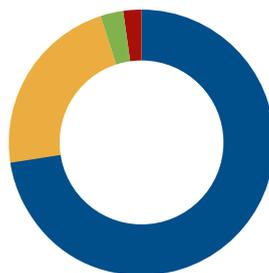
**Figura 1.20** Subclasses (nível 2) de Uso e Cobertura do Solo para a bacia do Paraíba do Sul (1985 e 2020).

Percentuais das subClasses de Uso e Cobertura Agropecuário ( Nível 2 - 1985)



■ Pastagem – 75%  
 ■ Mosaico de agricultura e pastagem – 23%  
 ■ Agricultura – 2%  
 ■ Silvicultura – 0

Percentuais das SubClasses de Uso e Cobertura Agropecuário (Nível 2 - 2020)



■ Pastagem – 71%  
 ■ Mosaico de agricultura e pastagem – 24%  
 ■ Agricultura – 3%  
 ■ Silvicultura – 2%

Embora esta classificação seja amplamente adotada, e elucidativa para o entendimento da dinâmica relacionada ao uso e cobertura do solo, ela não é suficiente para orientar a modelagem hidrológica da bacia, que requer criteriosos ajustes e sistemas de classificação associados a parâmetros físicos representativos do comportamento hidrológico da bacia como um todo. Os procedimentos de reclassificação e detalhamento das análises da dinâmica de evolução do uso e cobertura do solo são apresentados e discutidos no Capítulo 5, que sintetiza resultados desenvolvidos no âmbito do projeto de P&D MoVaSC e que contribuem para a atualização do sistema de informações relacionados ao uso e cobertura do solo na bacia do rio Paraíba do Sul.

O levantamento de dados das características físicas da bacia do rio Paraíba do Sul demonstra alta complexidade, não somente pelo fato de a bacia estar localizada em três estados do país, mas, também, pela natureza variada dos processos que caracterizam a sua formação. Os resultados gerados pelo P&D MoVaSC, a cronologia das ações de assoreamento e os impactos causados pelo clima e pela ação do tempo são relevantes para compreender as características e propriedades gerais da bacia, cuja geologia e geomorfologia vêm sendo modificada ao longo de milhões de anos. Igualmente, a variação desses aspectos físicos resultou em uma climatologia específica em cada região, desenvolvendo diversificada hidrografia e uma hidrogeologia específica em cada área da bacia. A soma das diversidades físicas, químicas e biológicas leva a solos específicos, que por sua vez apresentam coberturas e usos distintos, especialmente pela ação humana.

As condições de ocupação da área desde a colonização do Brasil foram impensadas e imprudentes no que concerne à sustentabilidade da região, principalmente quando se consideram as gerações e usos futuros do solo. Isso, porque, ao longo de sua existência, a bacia do Paraíba do Sul forneceu água para pecuária, pastagem, reflorestamento, agricultura, atividade industrial e, desde 1908, para geração de energia elétrica, expondo-se, assim, a intensas atividades antrópicas de grande impacto na dinâmica de variáveis

do uso e cobertura do solo, com consequências marcantes em seus regimes hidrológicos e hidrodinâmicos (Frota et al., 2021a). Essas ações, somadas à crescente urbanização e ao aumento da demanda dos recursos hídricos, vêm agravando diversos problemas ambientais, dentre os quais destacam-se a erosão dos solos e enchentes.

Embora esforços venham sendo realizados pelo governo, ainda há lacunas de informação sobre as características discutidas que merecem ser estudadas. É importante observar que os mapas são representações espaciais e temporais das áreas, com base nas quais são realizadas interpolações. Ainda que modelos computacionais sejam sempre representações simplificadas da realidade, um maior número de informações e calibrações no campo resulta em um melhor desempenho do modelo. Portanto, nos capítulos que seguem, discute-se um refinamento de dados e atribuição de parâmetros em pontos estratégicos de maneira a atender aos objetivos do projeto de P&D MoVaSC levando em consideração os interesses específicos da concessionária Light Energia S.A. (financiadora do projeto e gestora da bacia em sua área de concessão), atribuído-se, assim, mais abrangência e confiabilidade no processamento da informação.

Este livro foi estruturado em seis capítulos, cada um refletindo um dos módulos temáticos que compuseram o projeto de P&D MoVaSC (Frota et al., 2021a):

- Este Capítulo 1 apresentou uma retrospectiva dos estudos realizados sobre a bacia do rio Paraíba do Sul, tendo gerado uma publicação nos *Proceedings* de um evento internacional especializado, discutindo os desafios impostos e apresentando o grupo de pesquisa interdisciplinar criado para desenvolver o projeto de P&D MoVaSC (Frota et al., 2021b);
- O Capítulo 2 discute a climatologia da bacia, em particular, fenômenos atmosféricos de baixa frequência, cujos resultados foram sintetizados em artigo científico recentemente publicado no periódico *Theoretical and Applied Climatology* (Senna et al., 2023);
- O Capítulo 3 discute os resultados da simulação de eventos meteorológicos típicos da bacia, em processo de publicação no *Journal of Pure and Applied Geophysics* (Souza et al., 2023);

- O Capítulo 4 apresenta (i) o estudo de assoreamento pela técnica de datação do  $^{210}\text{PB}$ , cujos resultados foram discutidos em um evento internacional especializado (Vieira et al., 2021) e (ii) discute o detalhado estudo relacionado aos processos de assoreamento e perfis de sedimentos metálicos no reservatório de Vigário (reservatório de acumulação de água do complexo hidrelétrico de Piraí/RJ), cujos resultados foram publicados no periódico internacional *Environmental Earth Sciences* (Vieira et al., 2022);
- Os Capítulos 5 e 6 discutem a hidrologia da bacia e os resultados da modelagem hidrometeorológica integrada, entendida como ferramenta estratégica de gestão do complexo hídrico da bacia do Paraíba do Sul.

## Referências

- AGEVAP. 2014. *Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e planos de ação de recursos hídricos das bacias afluentes relatório de diagnóstico*. RP-06, Tomo I.
- AGEVAP. 2017. Website da Agência de Bacias. Disponível em: <http://www.agevap.org.br/aagevap.php>. Acesso em: 15/12/2019.
- AGEVAP. 2011. *Relatório de situação 2010: Região hidrográfica do Médio Paraíba do Sul*. Disponível em: <http://www.cbhmedioparaiba.org.br/pdf/relsitua2011.pdf>. Acesso em: 15/12/2019.
- ANA. 2001. *Bacia do rio Paraíba do Sul*. Livro da Bacia. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2001/BaciadoRioParaibadoSul.pdf>. Acesso em: 15/12/2019.
- ANA. 2007. Website da Agência Nacional de Águas. *Estudos auxiliares para a gestão do risco de inundações: Bacia do rio Paraíba do Sul*. Disponível em: <http://gripbsul.ana.gov.br/Hidrografia.html>. Acesso em: 15/12/2019.
- ANA. 2011. *Elaboração de estudos para concepção de um sistema de previsão de eventos críticos na bacia do rio Paraíba do Sul e de um sistema de intervenções estruturais para mitigação dos efeitos de cheias nas bacias dos rios Muriaé e Pomba e investigações de campo correlatas: R 02*. Coleta de Dados. Disponível em: <http://gripbsul.ana.gov.br/rels/R02.Coleta%20de%20dados.pdf>. Acesso em: 15/12/2019.
- ANDRADE, M.P. de; RIBEIRO, C.B.deM.; LIMA, R.N. de S. 2015. Avaliação do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul na primeira década do século XXI a partir de imagens MODIS – *Land*

- cover. *XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. João Pessoa, PB, abril. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0388.pdf>. Acesso em: 15/12/2019.
- BRASILIENSE, C.S.; DERECZYNSKI, C.P.; SATYAMURTY, P.; CHOU, S.C.; CALADO, R.N. 2020. 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(1), p. 355–365.
- CBH DO BAIXO PARAÍBA. Website do Comitê da bacia Hidrográfica do Baixo Paraíba do Sul e Itabapoana. Disponível em: <http://www.cbhbaixoparaiba.org.br/area-atuacao.php>. Acesso em: 15/12/2019.
- CBH-PS (Comitê das Bacias Hidrográficas do Rio Paraíba do Sul). 2016. *Revisão e atualização do plano de bacias da UGRHI 02. Plano de Bacia (produto 08/II)*. São Paulo. Dezembro. Disponível em: <http://www.comiteps.sp.gov.br/arquivos/planos/1/01-ugrhi-02-plano-de-bacia-parte-1-diagnostico.pdf>. Acesso em: 15/12/2019.
- CEIVAP. 2006. *Plano de recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul – Resumo: Diagnóstico dos recursos hídricos – Relatório Final. PSR-010-R0. Relatório Contratual R7*. Disponível em: <http://www.ceivap.org.br/downloads/PSR-010-R0.pdf>. Acesso em: 15/12/2019.
- CEIVAP. 2007a. *Plano de recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul – Resumo: Caderno de ações – área de atuação do Piabanha. Anexo 4 do Relatório contratual R-10*. Disponível em: <http://www.ceivap.org.br/downloads/cadernos/PIABANHA.pdf>. Acesso em: 15/12/2019.
- CEIVAP. 2007b. *Plano de recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul – Resumo: Caderno de ações – área de atuação do BNG-2. Anexo 6 do Relatório contratual R-10*. Disponível em: <http://www.ceivap.org.br/downloads/cadernos/BNG2.pdf>. Acesso em: 15/12/2019.
- CEIVAP. 2013. *Recursos hídricos subterrâneos, geologia, geomorfologia e minerais: P3 – Diagnóstico ambiental (caracterização)*. Avaliação ambiental integrada das baías dos rios Muriaé, Pomba, Piabanha, Paraibuna e Preto, afluentes do rio Paraíba do Sul. Março. Disponível em: [http://www.sigaceivap.org.br:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arg\\_pubMidia\\_Processo\\_09-2011\\_P03.3-RHSGGM.pdf](http://www.sigaceivap.org.br:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arg_pubMidia_Processo_09-2011_P03.3-RHSGGM.pdf). Acesso em: 15/12/2019.
- CEIVAP. 2014a. *Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e planos de ação de recursos hídricos das baías afluentes: Relatório de diagnóstico RO-06. Tomo I*. Disponível em: <http://ceivap.org.br/conteudo/relatoriodiagnostico-rp6-tomo1.pdf>. Acesso em: 15/12/2019.
- CEIVAP. 2014b. *Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e planos de ação de recursos hídricos das bacias afluentes*. Contrato nº. 21/2012. Disponível em: (<http://www.ceivap.org>).

- br/arqforum/Cohidro/COH403-REV0-FEV14.pdf). Acesso em: 15/12/2019.
- CEIVAP. 2014c. *Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e planos de ação de recursos hídricos das baias afluentes: Relatório de diagnóstico RO-06. Tomo II*. Disponível em: <http://ceivap.org.br/conteudo/relatoriodiagnostico-rp6-tomo2.pdf>. Acesso em: 15/12/2019.
- CEIVAP. 2014d. *Plano integrado de recursos hídricos da Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e planos de ação de recursos hídricos das baias afluentes: Relatório de diagnóstico RO-06. Tomo III*. Disponível em: <http://ceivap.org.br/conteudo/relatoriodiagnostico-rp6-tomo3.pdf>. Acesso em: 15/12/2019.
- COPPETEC – Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente. 2007. *Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul - Resumo*. AGEVAP.
- DANTAS, J.R.A.; LIMA FILHO, C.A. 2007. *Departamento Nacional de Produção Mineral*. Disponível em: [http://www.dnpm-pe.gov.br/Sint\\_PE/SintesePE\\_02.htm](http://www.dnpm-pe.gov.br/Sint_PE/SintesePE_02.htm)[http://www.dnmpme.gov.br/Sint\\_PE/SintesePE\\_02.htm](http://www.dnmpme.gov.br/Sint_PE/SintesePE_02.htm). Acesso em: 15/12/2019.
- DEMANBORO, C. 2015. Gestão ambiental e sustentabilidade na macrometrópole paulista – Bacia do rio Paraíba do Sul. *Sociedade & Natureza*, v. 27(3). Uberlândia. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1982-45132015000300515](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-45132015000300515). Acesso em: 15/12/2019.
- FROTA, M.N.; FRANÇA, G.B.; SOUZA, E.P.; ARAUJO, A.A.M.; VIANA, L.Q. 2021a. *Relatório Técnico Final Projeto de P&D Light/Aneel 5161-0016/2019* (“MOVASC – Modelagem de Vazão, Sedimento e Clima na bacia do rio Paraíba do Sul), Contrato nº: 4500428146.
- FROTA, M.N.; FRANÇA, G.B.; SOUZA, E.P.; GODOY, J.M.; ARAUJO, A.A.M.; VIANA, L.Q. 2021b. *Mobilization towards an integrated research network for studying runoff, sediment transport and climate of the Paraíba do Sul basin*. International conference on water, energy, food and sustainability. Published in the Proceedings of the 1st International Conference on Water Energy Food and Sustainability – ICoWEFS 2021. Leiria/Portugal: Springer Nature, p. 904–913.
- GENARO, D.T. 2008. *Contribuição ao conhecimento de processos atuantes no Rifteamento continental, por traços de fissão em zircões e apatitas, aplicados no rift continental do sudeste do Brasil, bacias de Taubaté, Resende, Volta Redonda e Circunvizinhanças*. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geologia) – Universidade Estadual Paulista. Rio Claro.
- GONÇALVES, J.A.C.; SCUDINO, P.C.B.; SOBREIRA, F.G. 2005. Reservas renováveis e caracterização dos aquíferos fissurais do leste da Zona da Mata de Minas Gerais e adjacências. *Revista do Instituto de Geociências*

- USP, v.5(1), p. 19–27. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/gusp/article/view/27404/29176>. Acesso em: 15/12/2019.
- GROOT, R.S.de; ALKEMADE, R.; BRAAT, L.; HEIN, L.; WILLEMEN, L. 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision-making. *Ecological Complex*. Vol. 7, Issue 3, pp. 260–272. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>
- GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B. 1996. *Geomorfologia e meio ambiente*. São Paulo: Bertrand Brazil, p. 77–92.
- IGAM. 2005. Disponível em: <http://comites.igam.mg.gov.br/comites-estaduais-mg/psl-cbh-dos-rios-preto-e-paraibuna>. Acesso em: 15/12/2019.
- IBGE. 1990. Classificação Climática Köppen-Geiger. Disponível em: IGAM. 2018. Website do Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Disponível em: <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/Comites-de-Bacia>. Acesso em: 15/12/2019.
- KODAMA, Y. 1992. Large-Scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zones, the SPCZ, and the SACZ), part I: Characteristics of subtropical frontal zones. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 70, p. 813–836.
- LIEBMANN, B.; ALLURED, D. 2005. Daily precipitation grids for South America. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 86, p. 1567–1570.
- LIMA, L.E.C. Viagem histórica sobre os 400 anos de ocupação da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, 2022. Disponível em [www.profluizeduardo.com.br](http://www.profluizeduardo.com.br).
- MAPBIOMAS. 2020. *MapBiomas General Handbook. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)*, collection 5, version 1.0. Disponível em: <https://mapbiomas.org/download-dos-atbds>.
- MARTINS, A.M.; CAPUCCI, E.; CAETANO, L.C.; CARDOSO, G.; BARRETO, A.B.C.; MONSORES, A.L.M.; LEAL, A.S.; VIANNA, P. 2006. *Hidrogeologia do estado do Rio de Janeiro: Síntese do estágio atual do conhecimento*. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.
- MARENGO, J.A.; ALVES, L.M. 2005. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20(2), p. 215–226.
- PATITUCCI, G. de S. 2017. *Cartografia dos estimadores estatísticos em projetos de prospecção mineral*. Bacharelado em Geologia. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <http://www.geologia.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2018/11/GabrielPatitucci-TCC.pdf>. Acesso em: 15/12/2019.
- REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P. da; AMBRIZZI, T. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(2), p. 185–204.

- RICCOMINI, C. 1989. *O RIFT continental do sudeste do Brasil*. Tese de Doutorado (Doutorado em Geociências) – Universidade de São Paulo.
- RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L.G.; FERRARI, A. 2004. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO NETO, V. et al. (Eds.). *Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: BECA, p. 385-405.
- SCHOBHENHAUS, C.; DE BRITO NEVES, B.B. 2003. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Capítulo I. CPRM. Brasília. Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/publique/media/recursos\\_minerais/livro\\_geo\\_tec\\_rm/capI-a.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/recursos_minerais/livro_geo_tec_rm/capI-a.pdf). Acesso em: 15/12/2019.
- SENNA, M.C.A.; FRANÇA, G.B.; PEREIRA, M.F.; SILVA, M.S.; SOUZA, E.P.; DRAGAUD, I.C.D.V.; SOUZA, L.S.; MORAES, N.O.; ALMEIDA, V.A.; ALMEIDA, M.V.; FROTA, M.N.; ARAUJO, A.A.M.; CARDOZO, K.N.; VIANA, L.Q. 2023. A teleconnection study between oceanic oscillations and trends in precipitation extremes in the Paraíba do Sul River Basin. *Theoretical and Applied Climatology*.
- SIMI JUNIOR, R.; DE MELLO, M.P.; ARCOVERDE, G.F.B. 2009. Atualização e digitalização do traçado do rio Paraíba do Sul no trecho da bacia hidrográfica correspondente ao Vale do Paraíba Paulista. *II Seminário de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação de Áreas Degradadas, Serviços Ambientais e Sustentabilidade*. Taubaté. Dezembro, p. 57-64. Disponível em: (<http://www.ipabhi.org/serhidro/anais/anais2009/doc/pdfs/p69.pdf>). Acesso em: 15/12/2019.
- SOARES, P.V.; PEREIRA, S.Y.; SIMÕES, S.J. C.; BERNARDES, G. de P.; BARBOSA, S.A. 2008. Mapa de infiltração do alto e médio Vale do Paraíba do Sul com base em elementos do meio físico e na precipitação. *Revista Ambiente & Água*, v. 3(1). Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/26510290\\_Map\\_of\\_infiltration\\_of\\_the\\_Paraiba\\_do\\_Sul\\_basin\\_using\\_physical\\_elements\\_and\\_precipitation](https://www.researchgate.net/publication/26510290_Map_of_infiltration_of_the_Paraiba_do_Sul_basin_using_physical_elements_and_precipitation). Acesso em: 15/12/2019.
- SOUZA, D.H.de. 2018. *Reativações pós-rifte e evolução do relevo da área central da margem continental do sudeste brasileiro: relações entre dinâmicas de longo e curto prazo no tempo geológico*. Tese de doutorado (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Rio Claro, São Paulo. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/154309/souza\\_dh\\_dr\\_rcla\\_int.pdf?se=quence=4&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/154309/souza_dh_dr_rcla_int.pdf?se=quence=4&isAllowed=y). Acesso em: 15/12/2019.
- SOUZA, L.S.; SILVA, M.S.; ALMEIDA, V.A.; MORAES, N.O.; SOUZA, E.P.; SENNA, M.C.A.; FRANÇA, G.B.; PEREIRA, M.F.; ALMEIDA, M.V.; FROTA, M.N.; ARAUJO, A.A.M.; CARDOZO, K.N.; VIANA, L.Q. 2021. Evaluation of cumulus and microphysical parameterization schemes of the WRF model for precipitation prediction in the Paraíba do Sul

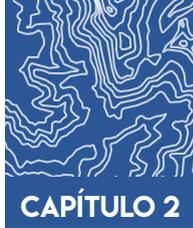
river basin, southeastern Brazil. Submitted for publication in the *International Journal of Pure and Applied Geophysics*.

SOUZA, S.P.de; VITALE, M. 2014. *Gestão da bacia do rio Paraíba do Sul e políticas urbanas e ambientais: uma integração possível*. Tese de doutorado (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo.

VIEIRA, C.D.; GODOY, J.M.; FROTA, M.N.; VIANA, L.Q.; FARIAS, C.A.S.; OLIVEIRA, D.F.C. 2021. Evaluation of the sediment rate of the water reservoir of a hydroelectric plant using the  $^{210}\text{Pb}$  dating technique: Case study of the Vigário reservoir, Piraí, RJ/Brazil. Published in the Proceedings of the *1<sup>st</sup> International Conference on Water Energy Food and Sustainability – ICoWEFS 2021*. Leiria/Portugal: Springer Nature, p. 821–891.

VIEIRA, C.D.; OLIVEIRA, D.F.C.; FROTA, M.N. et al. 2022. Siltation processes and metal sediment profiles in a hydroelectric power plant reservoir in the Paraíba do Sul river Basin, Southeastern Brazil. *Environ Earth Sci* 81, p. 523. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10653-w>





# TENDÊNCIAS DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO E IMPACTO DE OSCILAÇÕES OCEÂNICAS NA BACIA

## Contextualização

Nas últimas décadas, vem se observando um aumento considerável na frequência anual de eventos climáticos extremos (Marengo et al., 2007). Essa intensificação tem sido atribuída às atividades antrópicas e às mudanças climáticas (Alexander et al., 2006; Carvalho et al., 2014; Marengo et al., 2020; Ávila et al., 2020a). Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), existem fortes evidências de que o sistema energético utilizado pela sociedade atual terá impactos significativos sobre o clima em virtude do acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera, influenciando os padrões futuros de temperatura e precipitação em todo o globo (IPCC, 2018). Essas modificações podem acarretar sérios problemas em regiões vulneráveis, particularmente nos setores da agricultura e recursos hídricos, que já sofrem impactos da variação climática natural, e podem ter o quadro agravado em um clima mais quente e com possíveis mudanças nos padrões regionais de chuva (Chadwick et al., 2016; Zilli et al., 2017; Abou Rafee et al., 2020).

As águas do rio Paraíba do Sul abastecem aproximadamente 15 milhões de pessoas, majoritariamente de regiões metropolitanas do estado do Rio de Janeiro que, essencialmente, dependem dessa bacia hidrográfica (Lopes, 2018; Ferreira, 2019; Brasiliense et al., 2020). A bacia do Paraíba do Sul abrange uma das regiões mais industrialmente desenvolvidas do Brasil, responsável por cerca de 10% do Produto Interno Bruto nacional, além de possuir um potencial hidrelétrico total de 3,8 mil MW, correspondendo a 1,5% do total brasileiro. No leito do rio estão localizados importantes reservatórios de usinas hidrelétricas, dentre os quais Paraibuna, Santa Branca, Santana, Vigário e Funil (ANEEL, 2013). O seu principal fator ambiental é a distribuição espacial e temporal da precipitação. Tendo em vista que o ciclo da água está diretamente ligado ao clima, suas mudanças – que alteram o regime de chuvas – podem provocar o aumento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, a exemplo de inundações e/ou longos períodos de seca. Esses eventos afetam o suprimento de recursos hídricos e a consequente oferta de água (Marengo e Alves, 2007; Teixeira e Satyamurti, 2011; Ribeiro, 2020), com potencial para causar expressivo impacto na sociedade e nos ecossistemas, superior às variações indicadas pelos valores médios calculados (Frich et al., 2002; Ávila et al., 2020b). Groisman et al. (2005) mostraram que, em uma escala global, mudanças nas precipitações intensas tendem a ser mais impactantes do que as alterações nos totais médios de precipitação, e que aumentos de eventos com precipitação extrema ocorreram em muitas regiões onde nenhuma mudança dos totais médios ou até mesmo uma diminuição da precipitação tenha sido observada.

A variabilidade da precipitação resulta de efeitos combinados das variações na dinâmica de sistemas atmosféricos e das condições de superfície dos oceanos (Nobre e Shukla, 1996; Luiz-Silva et al., 2020). O continente sul-americano localiza-se entre os dois maiores oceanos, o Pacífico e o Atlântico. Portanto, compreender os fenômenos que ocorrem nesses oceanos e seus respectivos acoplamentos atmosféricos é de fundamental importância para estudos da dinâmica da precipitação na região (Siqueira, 2012).

Marengo (2006) fez um estudo para o período de 1979–2000, tendo constatado reduções na precipitação, no escoamento e na convergência de umidade em anos de El Niño<sup>1</sup>, e aumentos dessas variáveis em anos de La Niña no norte da América do Sul, incluído o nordeste do Brasil. A Região Sul do Brasil apresenta comportamento oposto do que ocorre no Norte e Nordeste, ou seja, durante El Niños (La Niñas), a taxa de precipitação aumenta (diminui) sobre esta região. Observa-se, ainda, que durante os eventos La Niña, a temperatura média global do ar tende a permanecer abaixo da normal climatológica.

Cardoso e Cataldi (2012) observaram que a vazão de rios brasileiros possui relações significativas com diferentes padrões climáticos e de teleconexões, com destaque para a correlação com os padrões de variabilidade de mais baixa frequência, como a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA). As modificações nos modos de circulação atmosférica, associadas à ODP na América do Sul, se caracterizam pelo fortalecimento da circulação de Walker<sup>2</sup> durante a fase fria da ODP e pelo seu enfraquecimento durante a fase quente. Já nas circulações de Hadley<sup>3</sup> e de monções sobre a América do Sul, apenas pequenas alterações foram identificadas durante as fases fria e quente da ODP (Garcia e Kayano, 2008).

Kayano e Andreoli (2007) assinalam que a influência do El Niño–Oscilação Sul (ENOS) através de teleconexões sobre as

---

1 *El Niño* e *La Niña* apresentam características diversas. Enquanto o *El Niño* consiste no aquecimento anormal das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial por causa do enfraquecimento dos ventos alísios, o *La Niña* se caracteriza pelo resfriamento anormal das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial.

2 Modelo conceitual do fluxo de ar na troposfera; i.e., na parte mais baixa da atmosfera, aproximadamente nos primeiros 20 km da região tropical.

3 A célula de Hadley, em homenagem a George Henley, é uma circulação atmosférica tropical em escala global que apresenta o ar subindo perto do Equador, fluindo em direção aos polos a uma altura de 10 a 15 quilômetros acima da superfície da Terra, descendo no subtropical e retornando em direção ao equador próximo à superfície.

precipitações na América do Sul são consideradas fortes quando o ENOS e a ODP encontram-se na mesma fase, criando um efeito construtivo; já quando estão em fases opostas, o resultado é destrutivo. De acordo com Mendonça e Romero (2012), o padrão de anomalia de temperatura do ar também é mais evidente quando ocorrem simultaneamente a La Niña e a fase fria da ODP, do que quando acontece o El Niño e a fase fria da ODP ou La Niña e fase quente da ODP.

Capozzoli et al. (2017) caracterizaram os principais padrões de variabilidade espacial e temporal de vazões de rios nas principais bacias hidrográficas brasileiras, relacionando-os com padrões climáticos por meio da Análise de Componentes Principais. Os principais modos de vazão dos rios apresentaram variações interanuais associadas ao fenômeno ENOS e correlações significativas com a temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico tropical. Padrões climáticos associados às variabilidades multidecadal do oceano Atlântico e decadal do oceano Pacífico possuem relações persistentes com os seis primeiros modos de vazão.

Vários estudos mostraram a existência de uma variabilidade na escala interdecadal na precipitação da Argentina e Uruguai, e nas vazões de rios no sudeste da América do Sul (Castañeda e Barros, 1994; Krepper e Sequeira, 1998; Robertson e Mechoso, 1998). Santos et al. (2011) mostraram que a fase positiva da Oscilação do Atlântico Norte (OAN) afeta significativamente a faixa tropical, inibindo a convecção ao longo da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e intensificando os movimentos ascendentes no norte da América do Sul.

Sabe-se que a precipitação sobre o Atlântico tropical é deslocada para norte durante a fase quente da OMA; isto implica em uma posição anômala da ZCIT mais ao norte, o que diminui a precipitação durante a estação chuvosa do norte do Nordeste brasileiro, de março a maio (Knight et al., 2005). No entanto, a sequência do ciclo da OMA pode reverter esse sinal ao forçar a ZCIT para sul e, desta forma, oscilar entre décadas mais secas e mais úmidas (Knight et al., 2005). Ao analisar dados sedimentares da

bacia do Rio da Prata, Chiessi et al. (2009) encontraram uma periodicidade de 64 anos ligada à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e às monções na América do Sul, que foi atribuída à OMA. Assim, a fase fria da OMA (fase quente da OMA) corresponde a um Atlântico Sul mais quente (frio), o que aumenta (diminui) a atividade da ZCAS também devido à posição da ZCIT, e desloca a banda principal de precipitação da monção da América do Sul para Sul (Norte).

A bacia hidrográfica do Paraíba do Sul localiza-se em uma área intermediária entre as regiões que apresentam sinais fortes e opostos dessas oscilações oceânicas nos seus regimes de precipitação. Dessa forma, o objetivo do capítulo é detectar possíveis mudanças nos índices de extremos climáticos de precipitação para a bacia hidrográfica e investigar a correlação desses índices com as oscilações oceânicas ENOS, ODP, OAN e OMA.

## Precipitação e oscilações oceânicas na bacia hidrográfica

### Área de estudo

Ilustrada na Fig. 2.1, a bacia ocupa uma área de drenagem com cerca de 55.500 km<sup>2</sup>, em três estados da região Sudeste do Brasil, compreendida entre os paralelos 20°26'S e 23°00'S e os meridianos 41°00'W e 46°30'W. É limitada ao Norte pelas bacias dos rios Grande e Doce e pelas serras da Mantiqueira, Caparaó e Santo Eduardo. A Nordeste, a bacia do rio Itabapoana estabelece o limite da bacia. Ao Sul, o limite é formado pelos trechos paulista e fluminense da Serra do Mar (CEIVAP, 2006). O rio Paraíba do Sul nasce na Serra da Bocaina, no estado de São Paulo, a 1.800 m de altitude, e deságua na Região Norte Fluminense, no município de São João da Barra, percorrendo uma extensão aproximada de 1.180 km.

A pluviosidade se apresenta com dois períodos bem característicos: uma estação seca (de junho a agosto, caracterizada por condições tropicais de natureza continental, com baixa umidade relativa do ar) e uma estação chuvosa, de outubro a março,

caracterizada pelo domínio da massa de ar continental equatorial úmida e instável, com umidade relativa do ar elevada e altos índices de precipitação (ANA, 2010). Além dessas duas estações bem definidas, existem os períodos de transição: da estação seca para a úmida (setembro e outubro) e da estação úmida para a seca (abril e maio) (Brasiliense et al., 2020).

Segundo Nimer (1989), os fatores que atuam na intensidade e distribuição da precipitação nessa região podem ser classificados em estáticos e dinâmicos. Dentre os estáticos, destacam-se: a topografia acidentada, que favorece as precipitações, pois aumenta a turbulência do ar pela ascendência orográfica; a posição latitudinal, que por receber forte radiação solar propicia melhores condições à evaporação; e sua posição na borda ocidental do oceano, que é influenciada pela proximidade com o ambiente costeiro e favorece a existência de núcleos de condensação estimulando a formação de nuvens. Os fatores dinâmicos são mecanismos atmosféricos que interferem nos fatores estáticos. Dentre os principais atuantes estão: o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), a ZCAS, os Sistemas Frontais (SF), as Linhas de Instabilidade, os Sistemas Convectivos de Mesoescala, e as brisas (Brito et al., 2017). De acordo com Dereczynski et al. (2009), dentre estes sistemas meteorológicos, os mais influentes no regime de chuvas são os SF durante o inverno e a ZCAS durante o verão.

Brasiliense et al. (2018) analisaram as características de um evento de chuvas intensas ocorrido na bacia do rio Paraíba do Sul. Este evento esteve relacionado com a configuração de um episódio de ZCAS, que durou oito dias, após a chegada de uma frente fria ao estado de São Paulo. Houve convergência sobre o Sudeste do Brasil, do fluxo de umidade do sul da Amazônia e do Atlântico Sul tropical, fornecendo grandes quantidades de umidade para atividade convectiva. O aspecto mais notável deste evento foi o desenvolvimento de um vórtice ciclônico embutido na ZCAS, sobre o Oceano Atlântico, com um núcleo quente na baixa troposfera e um núcleo frio em níveis mais elevados, o que intensificou as chuvas na região de estudo.

## Dados de precipitação

Bancos de dados de precipitação baseados em medidores dotados de confiabilidade metrológica assegurada e densidade suficiente fornecem uma estimativa fidedigna da precipitação em uma determinada área. Em função da falta de séries históricas diárias e confiáveis de fácil acesso, muitos trabalhos científicos fazem uso de conjuntos de dados em grade regular derivados de estações de superfícies (*e.g.* Liebmann e Allured, 2005; Zilli et al., 2017). Um banco de dados de precipitação em grade possui a vantagem de permitir a análise geral dos padrões regionais e, em grande escala, das tendências de precipitação.

Neste estudo realizado no âmbito do projeto de P&D MoVaSC, utilizou-se o banco de dados *Physical Sciences Laboratory (PSL) da South America Daily Gridded Precipitation*, que fornece dados de precipitação em grade e em frequência diária, compreendendo o período entre 1938 a 2012, com resolução horizontal espacial de 0,5° x 0,5° latitude-longitude, com base na precipitação observada em estações localizadas na América do Sul (Liebmann e Allured, 2005). No Brasil, as principais fontes que compõem estes dados são: empresas de energia elétrica, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e outros órgãos estaduais que atuam no setor<sup>4</sup>.

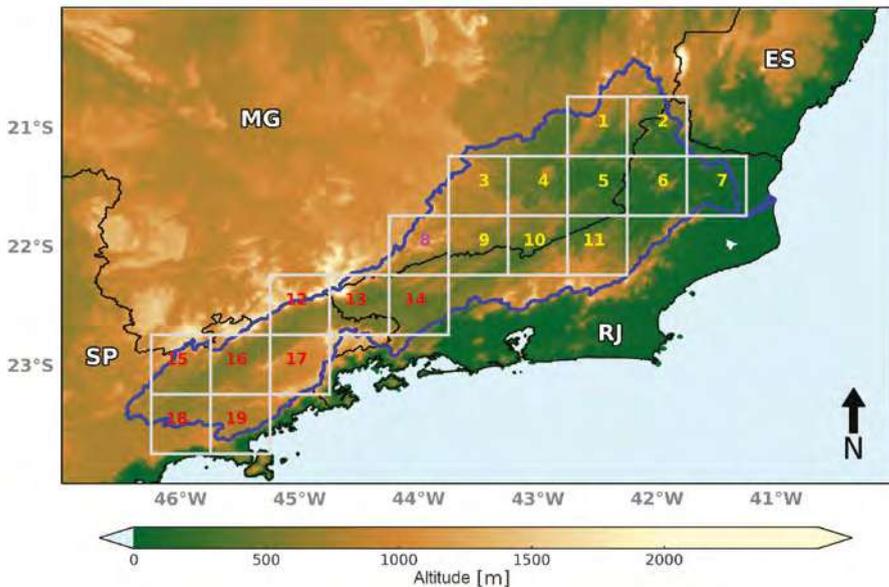
Utilizando-se o NCL (*NCAR Command Language*), foram elaborados scripts para recortar os dados de precipitação somente dentro do *shapefile* da bacia do rio Paraíba do Sul (disponibilizado pela empresa concessionária Light Energia S.A.). Em seguida, foram analisadas as séries temporais de precipitação de cada um dos 19 pontos de grade dentro da região de estudo (Figura 2.1), em busca de dados espúrios. Não foi encontrado nenhum valor inferior a 0 mm e todos os valores acima de 100 mm foram verificados manualmente. Nenhum valor precisou ser excluído já que se tratava de dias com ocorrência de precipitação intensa em

---

<sup>4</sup> Os dados foram obtidos no endereço [https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.south\\_america\\_precip.html](https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.south_america_precip.html).

áreas vizinhas e/ou com ocorrência de chuva nos dias anterior ou posterior. Em seguida, foi obtido o percentual de dados faltantes em relação à série temporal total, que foi inferior a 0,5%. Portanto nenhum dos pontos de grade precisou ser removido. Os 19 pontos de grade mostrados na Fig. 2.1 e caracterizados na Tabela 2.1, compreendem diferentes cidades dos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, mas apenas uma cidade por grade foi selecionada para nortear uma discussão mais detalhada dos resultados obtidos (Tabela 2.1).

**Figura 2.1** Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (delimitada por uma linha azul), e seus 19 pontos de grade referentes ao banco de dados de precipitação utilizado. Os pontos de grade em amarelo representam as áreas na direção nordeste, o ponto rosa a direção noroeste, e os pontos em vermelhos a direção sudoeste da bacia.



**Tabela 2.1** Cidade correspondente a cada ponto de grade.

Ponto de Grade	Cidade Correspondente
1	Muriaé (MG)
2	Itaperuna (RJ)
3	Santos Dumont (MG)
4	São João Nepomuceno (MG)
5	Recreio (MG)
6	Cambuci (RJ)
7	Cardoso Moreira (RJ)
8	Bom Jardim de Minas (MG)
9	Belmiro Braga (MG)
10	Chiador (MG)
11	Duas Barras (RJ)
12	Cruzeiro (SP)
13	Resende (RJ)
14	Pinheiral (RJ)
15	São Francisco Xavier (SP)
16	Taubaté (SP)
17	Cunha (SP)
18	Santa Branca (SP)
19	Natividade da Serra (SP)

Fonte: Projeto MoVaSC.

### Índices de extremos climáticos de precipitação

Em busca de um método que sirva de análise de extremos climáticos, a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) criou um grupo de trabalho que construiu índices de monitoramento e detecção de mudanças climáticas. Esse grupo elaborou um software denominado RCLimDex, que propicia uma interface amigável para o cálculo de índices de extremos climáticos. Diversos pesquisadores como Silva e Azevedo (2008), Santos et al. (2009), Souza e Azevedo (2012), Silva e Dereczynski (2014), Valverde e Marengo (2014), Oscar Jr. (2015), Dantas et al. (2015), Regoto et al. (2018)

têm utilizado a ferramenta para monitorar as tendências climáticas em vários estados do Brasil. O RCLimDex se baseia na linguagem computacional R e em planilha eletrônica, e apresenta os índices estimados por meio de figuras e planilhas, além de informações estatísticas, tais como tendência linear calculada pelo método de mínimos quadrados, nível de significância estatística da tendência obtida pelo teste *t-student* (valor *p*), coeficiente de determinação ( $R^2$ , em porcentagem) e erro padrão de estimativa (Zhang e Yang, 2004). O valor *p* calculado representa o nível de significância estatística (caso o valor *p* de um índice qualquer seja igual ou inferior a 0,1, a tendência do índice é estatisticamente significativa em 90%; se for igual ou inferior a 0,05, em 95% e, para *p* menor que 0,01, denota uma tendência com significância estatística de 99%).

Neste estudo, dos vinte sete índices de detecção de mudanças climáticas produzidos pelo RCLimDex (Zhang e Yang, 2004), utilizou-se apenas os referentes aos dados de precipitação (Tabela 2.2).

**Tabela 2.2** Lista dos índices de extremo de precipitação utilizados e suas definições básicas.

Índice	Definição	Unidade
RX1day	Quantidade máxima de precipitação em 1 dia	mm
RX5day	Quantidade máxima de precipitação em 5 dias consecutivos	mm
SDII	Índice simples de intensidade diária	mm.dia <sup>-1</sup>
R10	Número de dias com precipitação acima de 10 mm	dia
R25	Número de dias com precipitação acima de 25 mm	dia
CDD	Dias secos consecutivos	dia
CWD	Dias úmidos consecutivos	dia
R95p	Dias muito úmidos (quantidade de precipitação diária > 95º percentil)	mm
R99p	Dias extremamente úmidos (quantidade de precipitação diária > 99º percentil)	mm
PRCPTOT	Precipitação total anual	mm

Fonte: [http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml).

## Índices das oscilações oceânicas

O ENOS é caracterizado pelo Índice da Oscilação Sul (SOI), definido pela diferença entre os desvios normalizados de pressão atmosférica ao nível do mar entre as seguintes regiões do Oceano Pacífico: Taiti (17°S; 150°W), Polinésia Francesa e Darwin (12°S; 130°E), no norte da Austrália.<sup>5</sup>

A ODP tem sido comumente representada pelo Índice PDO (IPDO). O IPDO é definido como o primeiro componente principal das anomalias das temperaturas da superfície do mar (TSM) no Pacífico Norte, entre as latitudes 20°N e 90°N, com a retirada da tendência climática.<sup>6</sup>

A OAN é representada por um índice dado pela diferença da pressão atmosférica, ao nível do mar, entre a Islândia e os Açores (INAO).<sup>7</sup>

A OMA é caracterizada por um índice (IAMO), que considera as anomalias da TSM da região norte do Atlântico e da região do Golfo do México. Após esse cálculo inicial entre 0° e 70° Norte, realiza-se a padronização dos dados usando-se a climatologia da TSM.<sup>8</sup>

## Correlação entre índices das oscilações oceânicas e de extremos de precipitação

O cálculo das correlações entre os índices de extremo climático de precipitação e os índices das oscilações dos Oceanos Atlântico

---

5 A série temporal mensal do SOI foi obtida no site da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), no endereço: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>. O período disponível é de 1951 até o presente.

6 A série temporal mensal do IPDO foi obtida no site da NOAA, no endereço: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>. O período disponível é de 1854 até o presente.

7 A série temporal mensal do INAO foi obtida no site da NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/nao/>). O período disponível é de 1950 até o presente.

8 A série temporal mensal do IAMO foi obtida no site da NOAA (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>). O período disponível é de 1856 até o presente.

e Pacífico foi feito por meio do coeficiente de correlação de Pearson (R), adequado para estimar o grau de relacionamento entre variáveis quaisquer. O coeficiente de correlação de Pearson varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Uma correlação perfeita (-1 ou 1) indica que o escore de uma variável pode ser determinado exatamente ao se saber o escore da outra. No outro oposto, uma correlação de valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis. A Tabela 2.3 mostra as diferentes classes com os valores de correlação entre as variáveis e suas interpretações (Hinkle et al., 2003).

**Tabela 2.3** Valores e interpretação dos coeficientes de correlação.

Valores de Correlação (módulo)	Interpretação
0,00 a 0,19	Correlação Muito Fraca
0,20 a 0,39	Correlação Fraca
0,40 a 0,69	Correlação Moderada
0,70 a 0,89	Correlação Forte
0,90 a 1,00	Correlação Muito Forte

Fonte: Hinkle et al., 2003.

### **Transformada *wavelet***

Para se decompor as séries temporais unidimensionais da precipitação no duplo domínio tempo-frequência, permitindo assim a identificação dos principais modos da variabilidade e suas variações no tempo, foi utilizada a Transformada *wavelet* (Torrence e Compo, 1998; Morettin, 1999; Vitorino et al., 2006; Echer et al., 2008). A análise da *wavelet* foi utilizada de acordo com os métodos apresentados em Torrence e Compo (1998), com retificação do viés seguindo o método proposto por Liu e Weisberg (2007). Tendo em vista o uso frequente na análise de dados geofísicos (Liu e Weisberg, 2007), a *wavelet* de Morlet foi escolhida como a função básica da *wavelet*. A média temporal da potência foi calculada

para todo o espectro local, produzindo o espectro global da *wavelet* (Torrence and Compo, 1998). A *wavelet* de Morlet é definida como uma onda exponencial complexa, modulada por uma Gaussiana, descrita pela seguinte expressão:

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (1.1)$$

Nesta expressão,  $\Psi_0(\eta)$  é o valor da *wavelet* no tempo adimensional  $\eta$ , e  $\omega_0$  é a frequência adimensional, igual a 6 neste estudo para satisfazer uma condição de admissibilidade; i.e., a função deve ter média zero e ser localizada no espaço do tempo e frequência para ser “admissível” como uma *wavelet* (Torrence e Compo, 1998). Para esses cálculos foram elaborados *scripts* na linguagem *Python*.

Esta abordagem de utilizar a *wavelet* em dados de precipitação já foi aplicada em outros estudos, e permite associar as variabilidades existentes com processos atmosféricos e oceânicos (e.g. Costa et al., 2016; Adepitan e Falayi, 2019).

## Resultados e discussão

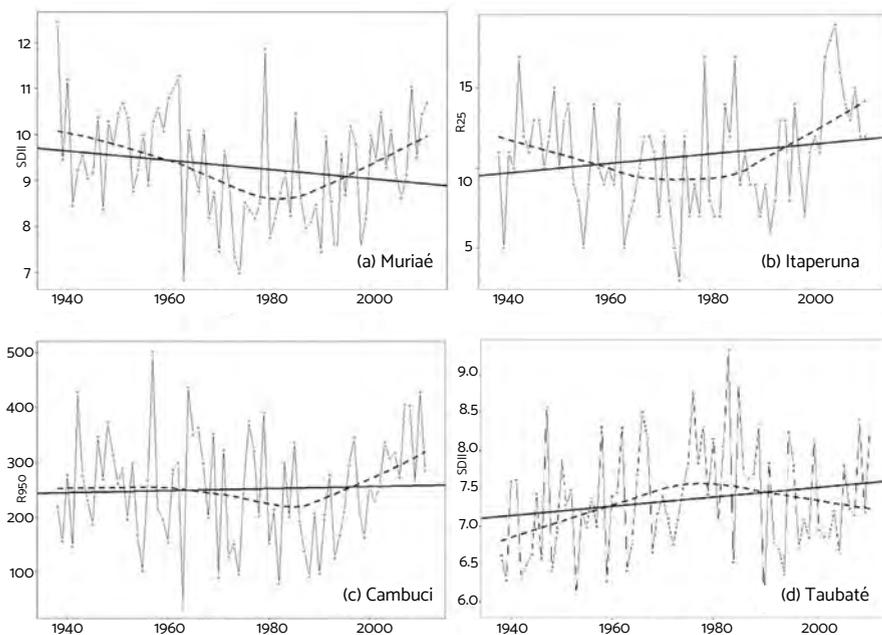
Esta seção discute (i) a distribuição espacial das tendências de precipitação, (ii) a correlação entre os índices de oscilações oceânicas e extremos de precipitação e (iii) a técnica de *wavelet*, para verificar a possível existência de diferentes padrões de frequência a partir das correlações investigadas.

### Distribuição espacial das tendências climáticas da precipitação

Os quatro gráficos da Figura 2.2 (Fig. 2.2a – Fig. 2.2d) representam, respectivamente, exemplos de curvas de tendências dos índices SDII, R25, R95p e SDII, determinados para as localidades de Muriaé, Itaperuna, Cambuci e Taubaté, respectivamente, no período de 1938 a 2011. Observam-se tendências distintas antes e após o início da década de 1980 em diversas regiões da bacia

e associadas a diferentes índices. Mudanças nas tendências dos índices climáticos de precipitação durante a década de 1980, especialmente aqueles referentes à precipitação extrema (RX1day, R95p, R99p), foram identificadas em diversos trabalhos (e.g.: You et al. (2011), na China; Longueville et al. (2016), em Burkina Faso/África; Donat et al. (2016) e Dong et al. (2021), em diversas partes do globo). Os estudos de Min et al. (2011), Zhang et al. (2013), Donat et al. (2016) e Dong et al. (2021) indicam que o aumento dos extremos de precipitação pode ser atribuído a ações antrópicas, associadas à crescente emissão de gases de efeito estufa.

**Figura 2.2** Tendências linear (linha cheia) e não linear (linha tracejada) dos índices SDII, R25, R95p e SDII, cujas localidades estão indicadas nas Figuras (2a - 2d), no período de 1938 a 2011.



Fonte: Projeto MoVaSC.

As imagens de (a) a (j) da Figura 2.3 ilustram a distribuição espacial das tendências dos índices de extremos climáticos de precipitação, descritos na Tabela 2.2, referentes à bacia do Paraíba do Sul, no período de 1982 a 2011 (e não à série temporal completa, tendo em vista as tendências observadas na Figura 2.2). Os símbolos na forma de triângulo cheio (na cor vermelha ou azul) indicam tendências estatisticamente significativas (superiores a 90% de confiança) e a posição do vértice do triângulo indica a tendência positiva (para cima) ou negativa (para baixo).

De forma geral, os setores leste e nordeste da bacia do rio Paraíba do Sul apresentam tendências positivas no índice PRCPTOT, como ilustra a Figura 2.3a, com destaque para a região ao redor de Itaperuna, com uma tendência estatisticamente significativa de 8,6 mm/ano. Já as regiões oeste e sudoeste da bacia apresentam o oposto, tendências negativas de PRCPTOT, destacando-se a região ao redor de Santa Branca, com tendência estatisticamente significativa de -9,3 mm/ano. Os resultados para a sua região central indicam um padrão de zona de transição, uma vez que há alternâncias entre tendências nulas, positivas ou negativas, todas sem significância estatística.

O índice CDD caracterizado na Figura 2.3b demonstra, de modo geral, tendências negativas no setor central da bacia, principalmente na região da cidade de Resende, com um valor de -0,6 dias/ano com significância estatística. Nas regiões leste e nordeste encontram-se alguns pontos com tendência positiva do CDD, dentre eles destacam-se Chiador e Cambuci, com 0,3 dias/ano e 0,4 dias/ano, respectivamente. Ambos os pontos com significância estatística de valores de tendência do CDD. Nas regiões oeste e sudoeste da bacia ocorreram tendências variadas, todas sem significância estatística.

Na Figura 2.3c identificam-se tendências negativas e nulas do índice CWD na maior parte da região, exceto por duas áreas com acréscimo de CWD (em Cunha e São João Nepomuceno). Na região central, as tendências do referido índice são majoritariamente negativas, enquanto os setores nordeste e sudoeste não indicam tendência. Dentre as localidades analisadas, a região de

Santa Branca merece destaque, pois apresenta significância estatística com tendência negativa de CWD de  $-0,6$  dias/ano.

A Figura 2.3d mostra a tendência positiva do índice R10 em algumas regiões do nordeste da bacia, com destaque para Itaperuna, cuja significância estatística assegura confiabilidade quanto ao acréscimo de  $0,4$  dias/ano. Conforme já documentado na Figura 2.3a, essa mesma região também apresentou significância estatística na tendência positiva do índice PRCPTOT. Na região sudoeste concentram-se algumas regiões com tendência negativa de R10, mas nenhuma com significância estatística. Já na região central, concentra-se uma variação entre áreas com tendência nulas e com tendências negativas para esse mesmo índice.

Analisando o índice R25 na Figura 2.3e, observa-se que os setores leste e nordeste da bacia concentram áreas com tendência de R25 positiva, quatro delas com significância estatística. Tais regiões são: Muriaé, Itaperuna, Cambuci e Duas Barras, com tendências de cerca de  $0,2$  dias/ano. Nos setores oeste e central encontram-se tendências nulas na maioria dos pontos. Já no setor sudoeste observam-se tendências nulas alternadas com algumas poucas regiões de tendência negativa do R25, mas todas sem significância estatística.

A Figura 2.3f ilustra o comportamento do índice R95p (dias muito úmidos), observando-se tendências positivas na maior parte da bacia, especialmente nos setores central, leste e nordeste. Vale ressaltar que as tendências de R95p possuem significância estatística para as regiões localizadas em Muriaé, Itaperuna, Cambuci, Cardoso Moreira e Duas Barras, com valores de tendência iguais a  $8,5$ ;  $5,5$ ;  $6,5$ ;  $4,1$  e  $5,9$ , tendências essas expressas em mm/ano, respectivamente. Os setores oeste e sudoeste apresentam tendências negativas do índice R95p, porém sem significância estatística.

A Figura 2.3g ilustra a distribuição espacial da tendência do índice R99p. Nota-se que nos setores leste e nordeste ocorre uma variação entre tendências nulas e positivas de dias extremamente úmidos. Destacam-se as regiões nas vizinhanças de Cambuci e Duas Barras, cujas tendências de R99p apresentam significância

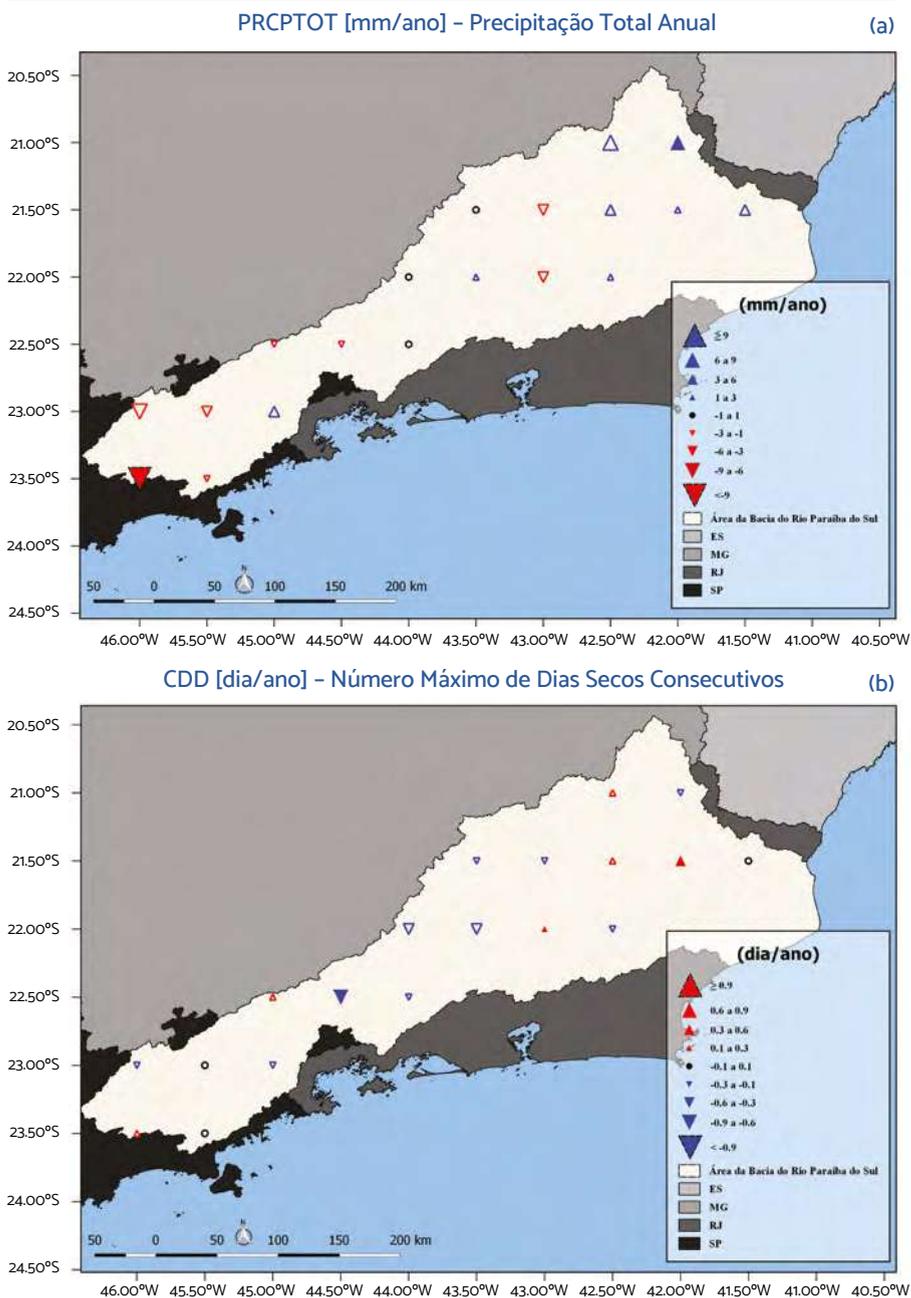
estatística com seus valores iguais a 3,2 mm/ano e 4,2 mm/ano, respectivamente. No setor central, observam-se valores de tendências negativas e positivas de R99p, mas a região de Pinheiral se diferencia das demais, pois apresenta tendência de R99p de 3,2 mm/ano com significância estatística. Para a região oeste e para as regiões dos municípios de Santa Branca e Natividade da Serra, a sudoeste, são identificados valores com tendências nulas e negativas, respectivamente.

Para o índice RX1day, conforme ilustrado na Figura 2.3h, observa-se que apenas uma área apresenta tendência negativa, localizada no município de Santos Dumont, setor norte da bacia. Nas regiões nordeste e leste identificam-se tendências positivas do RX1day, com destaque para Cardoso Moreira e Duas Barras, com valores de tendências estatisticamente significativas de 0,5 mm/ano e 0,9 mm/ano, respectivamente. Nas regiões central e sudoeste são encontrados valores de tendências de RX1day variando de nulas a positivas, porém sem significância estatística.

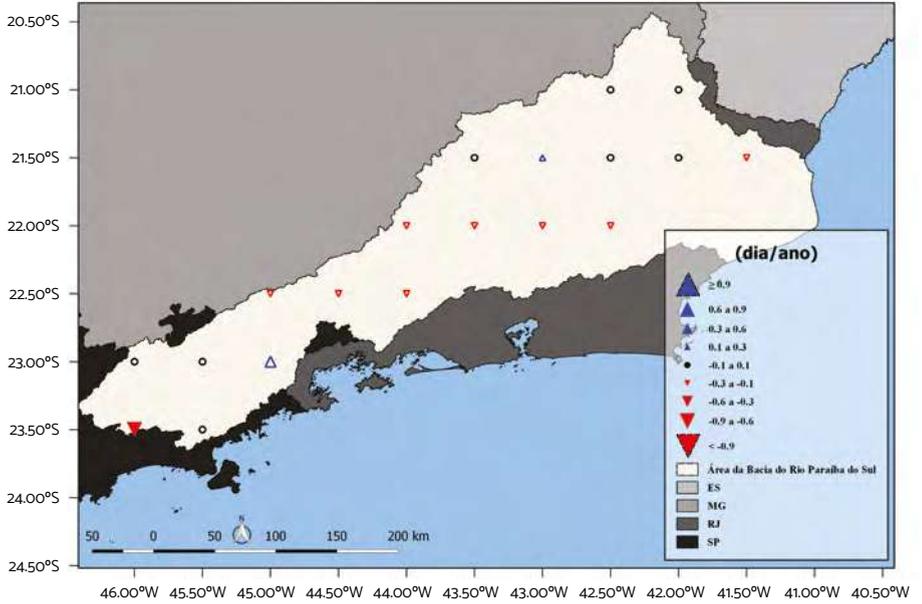
A Figura 2.3i mostra a distribuição espacial das tendências do índice RX5day. Nota-se que há predominância de tendência positiva do RX5day na maior parte da região, exceto em quatro localidades com tendências negativas e em duas neutras ou nulas, todas associadas a índices sem significância estatística. À leste, nordeste, oeste e sudoeste da bacia, verificam-se tendências positivas de RX5day, com destaque para Muriaé, Itaperuna, Cambuci, Cardoso Moreira, Duas Barras e Cunha com tendências estatisticamente significativas de 1,4; 2,0; 1,4; 2,3; 1,3 e 1,3, tendências essas expressas em mm/ano, respectivamente.

O mapa do índice SDII mostrado na Figura 2.3j apresenta tendências nulas em toda a bacia do rio Paraíba do Sul. Na sua região nordeste, as tendências de SDII com significâncias estatísticas ocorrem nas regiões de Muriaé, Itaperuna, Cambuci e Cardoso Moreira.

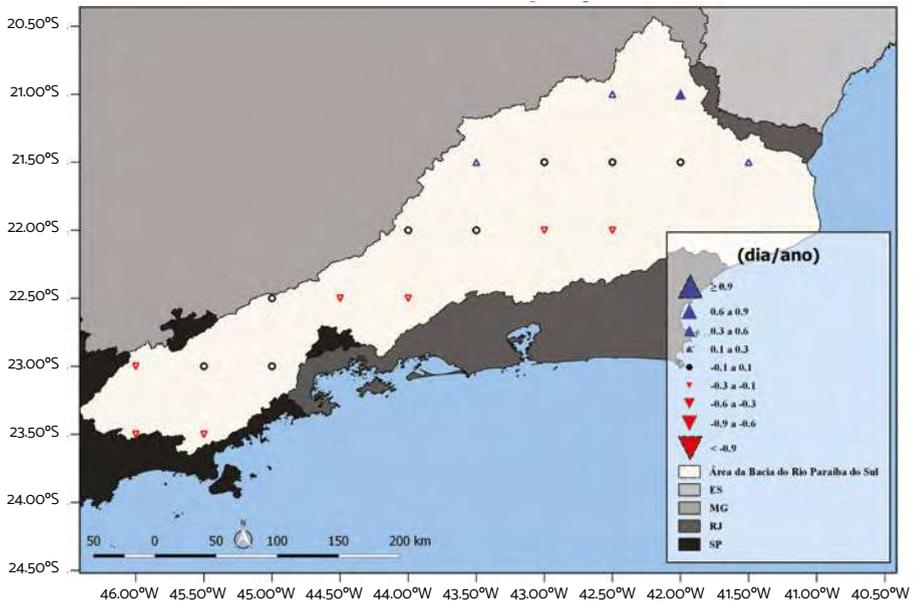
**Figura 2.3** Distribuição espacial das tendências dos índices estatísticos relevantes (bacia do rio Paraíba do Sul – 1982 a 2011).



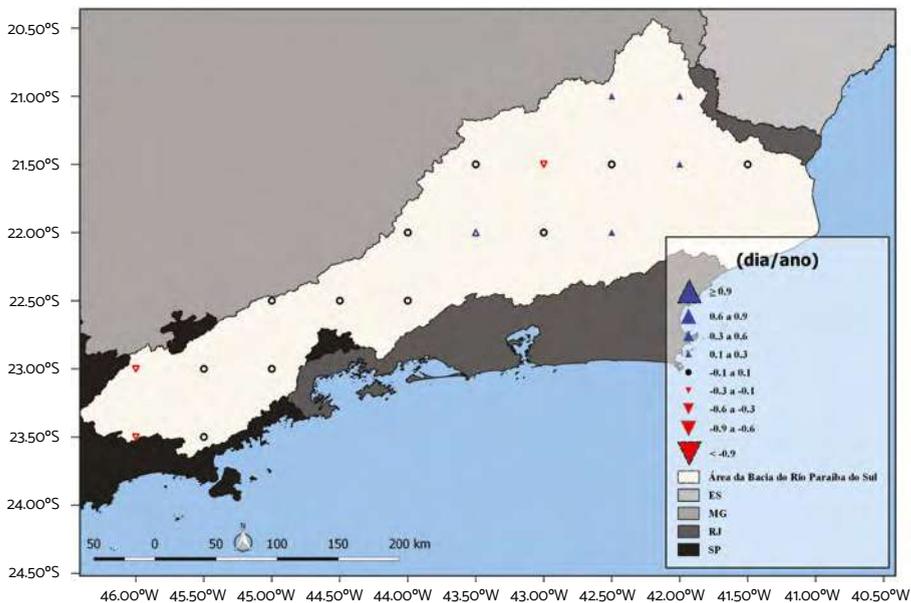
CWD [dia/ano] – Número Máximo de Dias Úmidos Consecutivos (c)



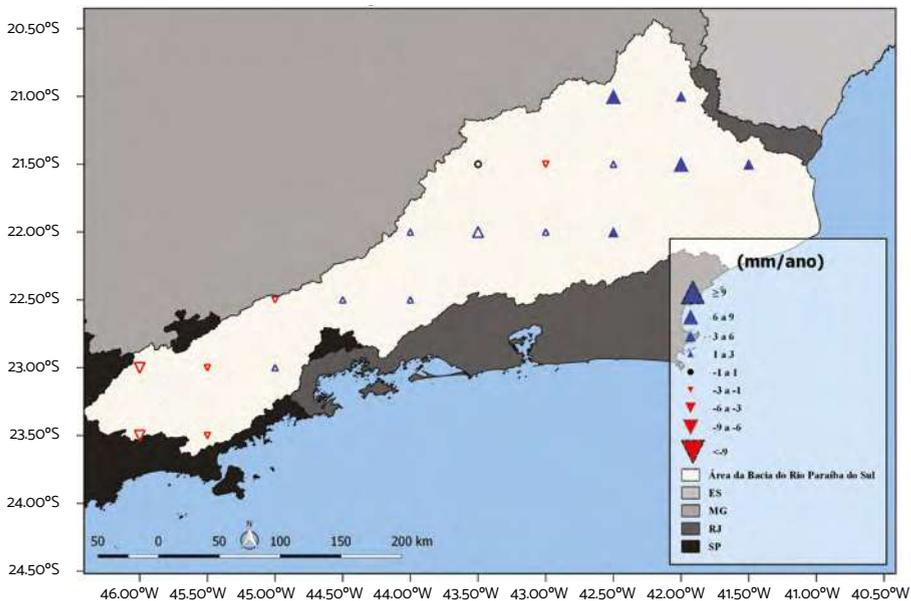
R10 [dia/ano] – Número de Dias com Precipitação acima de 10 mm (d)



R25 [dia/ano] - Número de Dias com Precipitação acima de 25 mm (e)

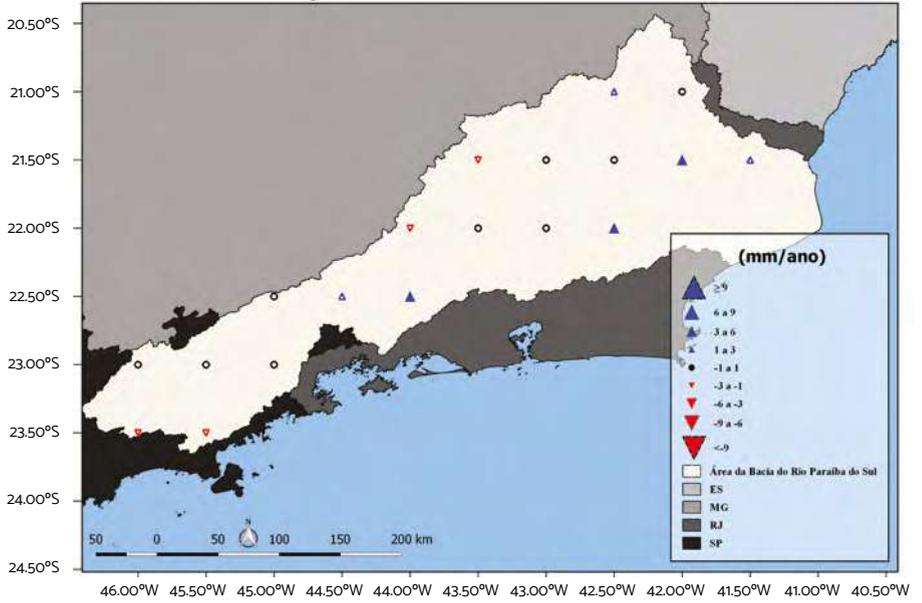


R95p [mm/ano] - Dias Muito Úmidos (f)



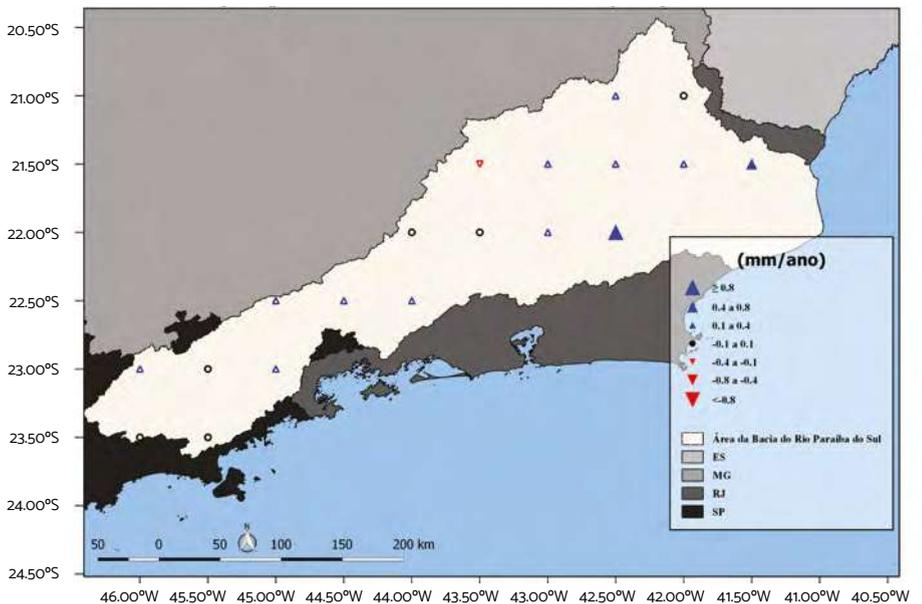
R99p [mm/ano] - Dias Extremamente Úmidos (g)

(g)

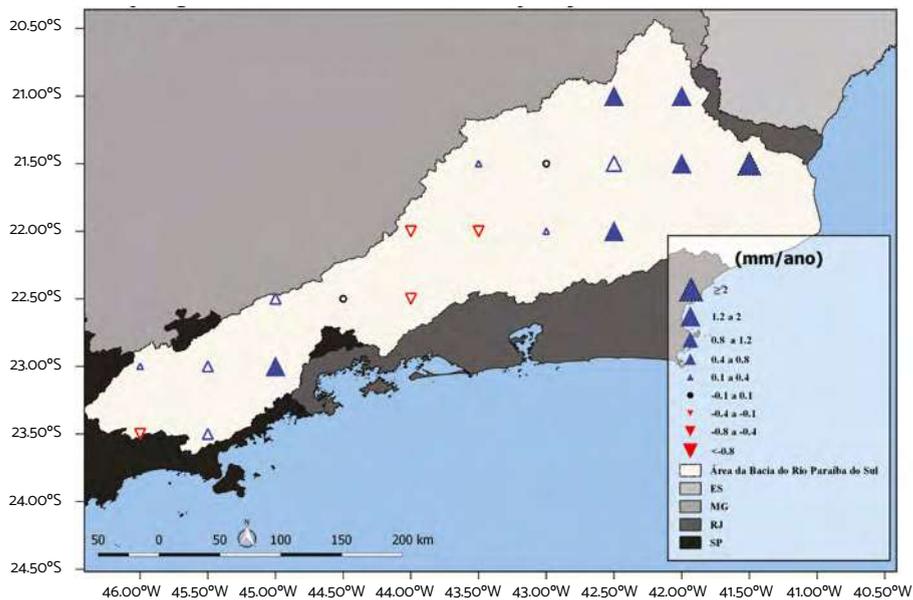


RX1day [mm/ano] - Quantidade Máxima de Precipitação em 1 dia (h)

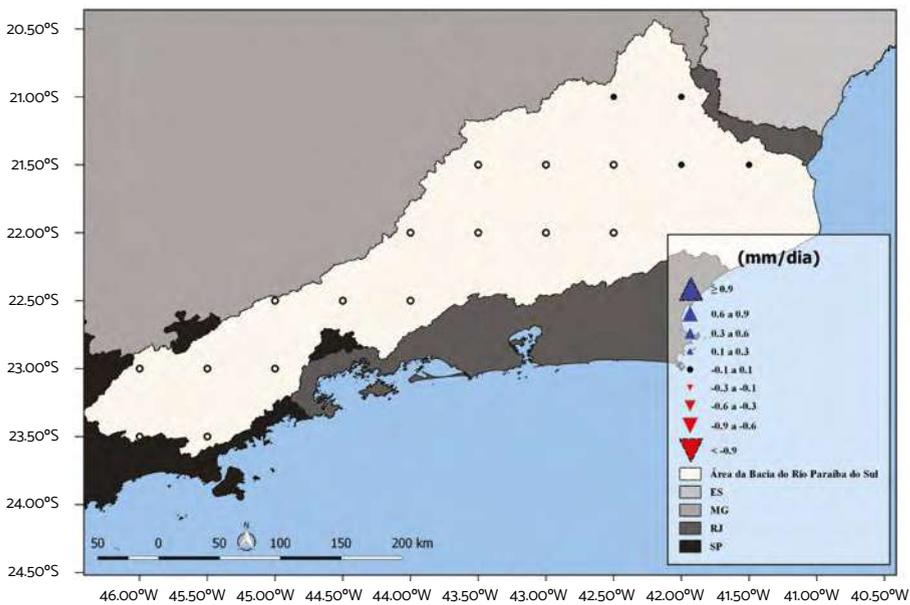
(h)



RX5day [mm/ano] – Quantidade Máxima de Precipitação em 5 dias Consecutivos (i)



SDII [mm/(dia.ano)] – Índice Simples de Intensidade Diária (j)



As distribuições espaciais das tendências dos índices de extremos de precipitação evidenciaram algumas características distintas dos setores da bacia do rio Paraíba do Sul. As regiões leste e nordeste possuem o maior número de áreas com tendências estatisticamente significativas dos índices utilizados. As tendências associadas a essas regiões, de uma forma geral, refletem aumento na precipitação total anual (índice PRCPTOT), dias muito úmidos (R95p), quantidade máxima de precipitação em 1 dia (RX1day) e na quantidade máxima de precipitação em 5 dias consecutivos (RX5day). De forma menos generalizada, algumas regiões apresentam tendências positivas no número máximo de dias secos consecutivos (CDD) e no número de dias com precipitação acima de 25 mm (R25). O aumento no número de dias consecutivos secos, juntamente com a combinação das outras tendências citadas, indica uma distribuição temporal heterogênea da precipitação na bacia. Este resultado sugere um aumento na ocorrência de eventos extremos intensos num espaço de tempo igual ou inferior a cinco dias.

A região central apresenta características de uma zona de transição para alguns índices, a exemplo da tendência de distribuição de precipitação anual mostrada na Figura 2.3a, e na quantidade máxima de precipitação em 5 dias consecutivos, mostrada na Figura 2.3i. Neste setor verificam-se tendências heterogêneas dos índices estudados, sendo poucos os casos com significância estatística. No entanto, nota-se, não apenas uma redução no número máximo de dias secos consecutivos (CDD), mas, também, uma redução no número máximo de dias úmidos consecutivos (CWD). Ademais, identifica-se uma tendência positiva para dias muito úmidos (R95p) e dias extremamente úmidos (R99p). Por outro lado, uma tendência negativa na quantidade máxima de precipitação em 5 dias consecutivos (RX5day) é indicativa de uma distribuição mais intercalada de dias úmidos e secos e de uma quantidade menor de precipitação distribuída no tempo.

Para as regiões oeste e sudoeste da bacia, também foram poucos os índices com significância estatística. De maneira geral, o índice PRCPTOT confirma uma tendência negativa na precipitação total

anual. Já o índice R95p indica dias muito úmidos enquanto o índice RX5day indica uma tendência positiva na quantidade máxima de precipitação em 5 dias consecutivos. As regiões nas vizinhanças dos municípios de Santa Branca e Cunha apresentam tendências mais marcantes, algumas bem distintas entre si. Próximo a Santa Branca são identificadas tendências negativas na precipitação total anual (índice PRCPTOT), no número máximo de dias úmidos consecutivos (CWD), no número de dias com precipitação acima de 10mm (R10), bem como no número de dias com precipitação acima de 25 mm (R25). Dentre as regiões estudadas, Santa Branca é a única que possui tendência negativa na quantidade máxima de precipitação em 5 dias consecutivos (RX5day), apresentando, também, tendência positiva de dias secos consecutivos (CDD). Este resultado indica uma mudança da precipitação no local e marca, de forma bem clara, a diferença na sua distribuição ao ser comparada com áreas da região nordeste. A região ao redor de Cunha se diferencia das demais, em particular por ser a única que apresenta tendência positiva na precipitação total anual (PRCPTOT), quer no número máximo de dias úmidos consecutivos (CWD), quer no índice de dias muito úmidos (R95p). Muito provavelmente, tal diferenciação possa ser atribuída a algum fator local próprio da área.

Anomalias negativas da precipitação sobre o sudeste do Brasil, especialmente durante o verão, podem estar relacionadas ao deslocamento do ASAS para oeste da sua posição climatológica, atuando como um bloqueio atmosférico e impedindo a propagação de sistemas transientes (ver Coelho et al., 2016; Reboita et al., 2015). A posição e a intensidade do ASAS podem ser afetadas pelo Modo Anular Sul (SAM, na sigla em inglês). Ou seja, quando se encontra na fase positiva, possui anomalias de altura geopotencial negativas (positivas) nas altas (médias) latitudes austrais, associadas com o deslocamento anômalo do ASAS e da ZCIT para sul. Já o oposto ocorre durante a fase negativa do SAM (Sun et al., 2017; Carpenedo e Ambrizzi, 2020). Estudos mostram uma tendência de maior número de ocorrências da fase positiva do SAM nas últimas décadas, devido, principalmente, ao aumento da concentração de

gases de efeito estufa (Fyfe et al., 1999; Kushner et al., 2001; Stone et al., 2001; Cai et al., 2003; Marshall et al., 2004). Com o ASAS e a ZCIT posicionados mais para o sul, ocorrem déficits de precipitação sobre a região Centro-Sul do Brasil e acréscimos de precipitação na região Norte e Nordeste (Carpenedo e Ambrizzi, 2020).

Além disso, os resultados encontrados concordam com os obtidos por Ferreira (2019), que observou aumento dos índices PRCPTOT, RX5day, R20 e SDII na porção nordeste da bacia do rio Paraíba do Sul, e a diminuição desses mesmos índices na porção central e sudoeste da bacia. Estudos recentes mostram um aumento da precipitação acumulada nos eventos de chuvas extremas e a sua maior frequência de ocorrência (Ávila et al., 2016; Zilli et al., 2017; Regoto et al., 2018; Marengo et al. 2020; Ávila et al., 2020a). Resultado semelhante foi encontrado neste trabalho, pois, na sua maioria, as tendências com significância estatística referem-se à quantidade máxima de precipitação em 5 dias consecutivos, aos dias muito úmidos e ao número de dias com precipitação acima de 25 mm (correspondendo os índices RX5day, R95p e R25), principalmente no lado nordeste da bacia. Por outro lado, a diminuição de dias úmidos consecutivos (CWD) predomina, indicando uma distribuição não homogênea das chuvas ao longo do ano.

### ***Correlação entre índices das oscilações oceânicas e de extremos de precipitação***

Os coeficientes de correlação entre cada índice de extremo de precipitação e cada índice das oscilações oceânicas no período de 1938 a 2011 estão ilustrados nas Tabelas 2.4 e 2.5. A Tabela 2.4 mostra a correlação entre os índices das oscilações oceânicas (SOI, IPDO, INAO e IAMO) e os índices climáticos de precipitação (CDD, CWD, PRCPTOT, R10 e R25). Já a Tabela 2.5 mostra os mesmos índices das oscilações oceânicas (SOI, IPDO, INAO e IAMO), porém relacionando os índices climáticos de precipitação (R95p, R99p, SDII, RX1day e RX5day). Em ambos os casos esses índices foram calculados a partir da precipitação do banco de dados PS-D-NOAA, em cada um dos 19 pontos de grade referentes à bacia

do rio Paraíba do Sul, para o período de 1938 a 2011. Os valores destacados nas cores azul e vermelha indicam correlações fracas e moderadas, respectivamente. Foi utilizado todo o período amostral disponível, pois quando o tamanho de amostra é pequeno, o valor do coeficiente de correlação linear de Pearson precisa ter uma elevada magnitude para ser significativo, e a amostra pode não ser representativa da população (Hair et al., 2005). Foram destacados na cor azul os valores dos coeficientes de correlação considerados fracos e, na cor vermelha, os moderados, seguindo os critérios previamente estabelecidos (Tabela 2.3). A maioria dos índices das oscilações oceânicas teve uma correlação muito fraca com os índices de precipitação para a maior parte dos 19 pontos de grade, que representam a bacia do rio Paraíba do Sul. A única exceção foi a correlação entre o SOI (Índice da Oscilação Sul) e o CDD (Dias Secos Consecutivos), expressos pela sua sigla em inglês, cujos valores enquadram-se nas categorias fraco e moderado, para a maior parte da bacia (12 dos 19 pontos de grade). O maior valor do coeficiente de correlação encontrado entre esses dois índices foi de 0,41, em Chiador. Além disso, todas as correlações entre o SOI e o CDD foram positivas, indicando que esses índices são diretamente proporcionais. Isso implica que valores positivos do SOI, que correspondem ao fenômeno La Niña, podem elevar o número de dias secos consecutivos na região, enquanto valores negativos de SOI (El Niño) podem diminuir o número de dias secos consecutivos.

Em seu estudo, Ferreira (2019) também identificou a máxima quantidade de dias secos consecutivos na região em um evento de La Niña forte, ocorrido em 1988. Constatou-se que existe variabilidade entre os índices de extremo de precipitação na bacia do rio Paraíba do Sul. Mesmo assim, no que se refere à sensibilidade ao ENOS, para ambas as fases positiva e negativa, o projeto de pesquisa MoVaSC identificou predominância de eventos extremos com precipitação frequentes nos anos em que ocorreram El Niño e predominância de eventos de secas nos anos em que ocorreram La Niña.

Entretanto, os baixos valores de coeficientes de correlação encontrados sugerem a existência de outros mecanismos que regem

o comportamento da tendência dos índices extremos de precipitação na região, como fatores antrópicos e outros eventos climáticos. Exemplos desses fenômenos são as ilhas urbanas de calor e as mudanças na posição e intensidade do ASAS, conforme estudos de Marengo et al. (2020) e Ribeiro (2020).

**Tabela 2.4** Correlação entre os índices das oscilações oceânicas (SOI, IPDO, INAO e IAMO) e os índices climáticos de precipitação (CDD, CWD, PRCPOT, R10 e R25).

CDD																			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19
SOI	0,29	0,25	0,23	0,21	0,21	0,27	0,21	0,35	0,22	<b>0,41</b>	0,12	0,14	0,19	0,22	0,08	0,14	0,05	0,24	0,01
IPDO	-0,09	0,01	-0,14	-0,21	-0,14	-0,14	-0,06	-0,28	-0,21	-0,23	0,03	-0,21	-0,15	-0,11	-0,15	-0,08	0,06	-0,16	-0,15
INAO	-0,09	-0,05	-0,09	-0,10	-0,08	-0,19	-0,07	-0,05	-0,07	-0,21	-0,03	-0,07	-0,08	-0,14	-0,02	-0,08	0,03	0,05	0,08
IAMO	-0,06	-0,04	0,08	0,02	0,09	0,18	0,07	-0,04	-0,10	0,11	0,23	0,10	-0,14	0,00	0,02	0,03	0,06	0,04	0,02
CWD																			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19
SOI	-0,12	0,03	-0,12	0,14	0,02	-0,08	0,09	-0,06	-0,06	-0,27	-0,16	-0,10	-0,13	-0,06	0,01	0,03	0,05	-0,14	-0,01
IPDO	-0,06	-0,16	-0,10	-0,03	-0,14	0,01	-0,14	-0,11	-0,07	0,04	-0,06	0,00	-0,09	-0,13	-0,10	-0,15	-0,13	0,07	-0,17
INAO	0,10	-0,01	-0,01	-0,02	0,07	-0,14	-0,08	-0,05	0,10	0,06	0,19	0,15	0,11	0,02	0,04	0,16	0,10	0,14	-0,02
IAMO	0,01	0,03	0,08	0,02	0,05	0,05	0,01	0,03	-0,06	-0,26	-0,17	0,03	-0,03	0,05	0,15	0,03	0,07	-0,04	0,12
PRCPOT																			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19
SOI	-0,06	-0,08	-0,14	-0,16	-0,03	-0,10	-0,06	-0,08	-0,13	-0,21	-0,14	-0,01	-0,03	-0,02	-0,09	-0,06	0,07	-0,07	-0,01
IPDO	-0,05	0,01	0,07	0,04	-0,02	0,03	-0,01	0,00	-0,04	0,03	-0,02	0,07	0,04	-0,05	-0,19	-0,12	-0,02	-0,18	0,13
INAO	0,01	-0,03	0,02	0,04	-0,03	-0,03	-0,19	0,04	-0,01	0,06	0,09	0,02	0,03	-0,05	0,10	0,05	-0,07	0,00	-0,04
IAMO	0,07	0,12	0,05	-0,02	0,01	0,01	0,04	-0,04	0,04	-0,07	-0,15	-0,12	-0,09	-0,09	-0,21	-0,17	-0,05	-0,01	-0,03
R10																			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19
SOI	-0,02	-0,01	-0,09	-0,17	-0,08	-0,12	-0,05	-0,08	-0,11	-0,21	-0,15	0,07	-0,02	-0,07	0,02	0,12	0,12	-0,02	0,02
IPDO	-0,19	-0,03	0,05	0,03	-0,03	0,00	0,01	-0,01	-0,04	0,02	0,00	0,07	0,09	-0,03	0,18	0,10	-0,02	0,18	0,14
INAO	0,01	-0,05	-0,02	0,03	0,06	-0,04	-0,18	0,06	0,01	0,04	0,07	-0,02	-0,04	-0,08	0,00	0,05	-0,07	-0,08	0,07
IAMO	0,07	0,18	0,08	0,00	0,02	0,03	0,04	0,04	0,02	0,00	-0,03	-0,07	-0,15	0,10	-0,14	-0,19	-0,18	-0,05	-0,07
R25																			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19
SOI	-0,03	-0,12	-0,09	-0,18	0,00	0,02	-0,11	0,01	-0,02	-0,13	-0,10	0,10	0,21	0,25	-0,06	-0,05	0,05	0,02	0,03
IPDO	-0,19	0,02	0,04	-0,09	-0,13	0,00	0,10	0,02	-0,02	-0,04	-0,13	-0,01	-0,12	-0,14	0,14	0,00	-0,01	-0,15	0,07
INAO	-0,10	-0,15	0,01	0,01	-0,04	-0,14	-0,24	-0,04	-0,08	0,01	-0,07	0,11	-0,01	-0,09	0,15	0,06	-0,11	0,02	-0,08
IAMO	0,33	0,38	0,04	0,10	-0,01	0,12	0,01	-0,02	0,16	0,04	-0,08	-0,31	-0,10	-0,02	-0,20	-0,24	-0,05	-0,08	-0,04

**Tabela 2.5** Correlação entre os índices das oscilações oceânicas (SOI, IPDO, INAO e IAMO) e os índices climáticos de precipitação (R95p, R99p, SDII, RXday e RX5day).

R95p																			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19
SOI	0,17	-0,07	-0,15	-0,10	0,04	0,04	-0,14	0,01	-0,08	-0,15	-0,11	0,05	0,17	0,29	-0,01	-0,04	0,11	-0,01	-0,01
IPDO	-0,22	0,01	0,10	-0,07	-0,11	-0,05	0,12	0,06	0,01	-0,03	-0,12	-0,01	-0,12	-0,17	0,09	0,05	-0,05	0,13	0,07
INAO	-0,11	-0,17	0,10	0,01	-0,09	-0,18	-0,23	0,01	-0,06	0,00	-0,07	0,09	-0,05	-0,06	0,12	0,04	-0,16	0,01	-0,02
IAMO	0,31	0,44	-0,05	0,05	0,03	0,14	0,03	-0,05	0,12	0,06	0,00	-0,26	-0,06	0,00	0,04	-0,23	-0,05	-0,09	-0,09
R99p																			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19
SOI	0,15	-0,16	-0,12	-0,02	0,12	0,12	-0,17	-0,02	-0,21	-0,07	-0,09	0,13	0,19	0,30	-0,04	-0,01	0,09	-0,14	-0,03
IPDO	-0,10	0,02	0,21	0,05	0,01	-0,03	0,11	0,14	0,12	-0,03	-0,09	-0,03	-0,14	-0,12	0,03	-0,01	-0,13	0,07	0,05
INAO	0,00	-0,05	0,19	0,04	0,00	-0,04	-0,11	0,11	0,07	0,04	0,00	0,01	0,09	-0,15	-0,08	-0,05	-0,01	0,15	0,02
IAMO	0,18	0,15	-0,13	0,01	-0,02	0,05	0,01	-0,13	0,09	0,09	0,04	-0,14	-0,12	0,00	-0,09	-0,12	-0,05	-0,17	-0,08
SDII																			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19
SOI	0,13	-0,01	-0,10	-0,16	0,07	0,11	-0,03	0,01	-0,08	-0,16	-0,11	0,14	0,12	0,08	0,08	0,10	0,11	0,08	0,00
IPDO	-0,17	0,00	0,17	0,03	-0,10	-0,08	0,11	0,06	-0,01	-0,06	-0,05	-0,01	-0,06	-0,02	0,05	0,08	0,02	0,05	0,13
INAO	-0,12	-0,10	0,11	0,06	-0,03	-0,10	-0,17	0,11	0,08	-0,02	-0,02	-0,07	-0,11	-0,11	-0,11	-0,02	-0,08	0,03	-0,04
IAMO	0,33	0,39	0,02	0,16	0,18	0,17	0,03	-0,02	0,08	0,17	0,22	-0,18	-0,08	-0,09	-0,11	-0,24	-0,09	-0,11	-0,03
RXday																			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19
SOI	0,01	0,01	-0,06	-0,05	0,05	-0,02	-0,06	-0,07	-0,06	-0,05	-0,02	-0,02	-0,02	0,01	-0,01	-0,03	-0,02	-0,04	-0,04
IPDO	0,08	0,07	0,12	0,09	-0,02	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,06	0,06	0,02	0,03	0,09	0,10	0,09	0,11	0,11
INAO	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	-0,01	-0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,02	0,04	0,03	0,01	-0,01	0,00	0,05	0,03
IAMO	-0,03	-0,03	-0,10	-0,06	-0,02	-0,03	-0,05	-0,09	-0,03	-0,02	-0,05	-0,12	-0,06	-0,01	-0,13	-0,12	-0,08	-0,04	-0,09
RX5day																			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19
SOI	0,02	0,04	-0,01	-0,02	0,07	-0,01	-0,01	-0,03	-0,04	-0,05	-0,03	-0,01	0,01	0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
IPDO	0,06	0,06	0,08	0,07	-0,03	0,07	0,06	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,10	0,09	0,07	0,10	0,10
INAO	0,01	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	-0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00
IAMO	-0,06	-0,04	-0,09	-0,09	0,00	-0,07	-0,04	-0,09	-0,08	-0,08	-0,10	-0,08	-0,07	-0,08	-0,09	-0,08	-0,05	-0,05	-0,04

Fonte: Projeto MoVaSC.

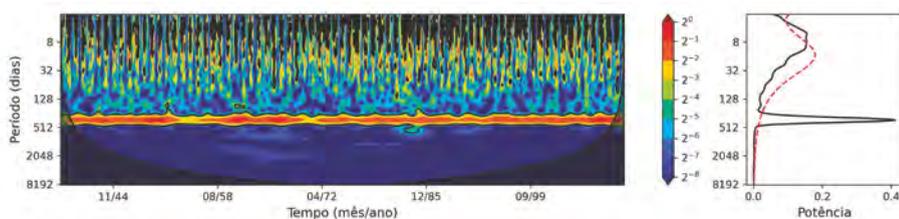
### **Técnica de wavelets**

Uma vez que não foram encontradas correlações significativas entre os índices de extremos de precipitação e os índices oceânicos, aplicou-se a técnica de *wavelet* com o objetivo de verificar a possível existência de padrões de frequências distintos das correlações investigadas. A Figura 2.4 ilustra o espectro de potência *wavelet* para os níveis de precipitação observados na bacia do rio Paraíba do Sul. Por meio da análise do espectro contínuo da *wavelet* comprovou-se a variabilidade anual da precipitação (aproximadamente 365 dias), não apenas se fazendo presente ao longo de todo o período de análise, mas, também, com significância estatística. Esse comportamento é atribuído ao ciclo anual da precipitação na região, com inverno austral seco e verão chuvoso (Brito et al., 2017; Brasiliense et al., 2020; Luiz-Silva et al., 2020). Fazendo-se uso do espectro global, verificou-se que essa variabilidade anual foi a que ocorreu, na média, com maior potência. Similarmente, a variabilidade com período em torno de 5 dias também apresentou significância estatística. Nesta região, esta variabilidade está associada à passagem de sistemas frontais (Dereczynski et al., 2009; Bonnet et al., 2018).

Corroborando os resultados obtidos anteriormente, não se observa nenhuma potência significativa nas baixas frequências analisadas, comumente associadas aos fenômenos oceânicos, como os obtidos por Silva et al. (2010) para uma bacia hidrográfica localizada no nordeste do Brasil.

A Figura 2.4 apresenta o espectro de potência *wavelet* da precipitação para a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul. O gráfico à esquerda da Figura 2.4 ilustra o espectro contínuo. A região hachurada representa o cone de influência, onde os efeitos de borda tornam-se importantes. Os contornos em preto marcam as regiões significativas para o intervalo de confiança de 95%. À direita, no gráfico da mesma figura, a linha preta denota o espectro global e a linha tracejada, na cor vermelha, representa o limite para identificação das periodicidades estatisticamente significativas no nível de 5%.

**Figura 2.4** Espectro de potência *wavelet* da precipitação (bacia hidrográfica do Paraíba do Sul).



Fonte: Projeto MoVaSC

### Considerações finais

Conforme observado pelos resultados do estudo conduzido no âmbito do projeto de P&D MoVaSC, as regiões leste e nordeste da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul apresentam tendências de acréscimo na precipitação total anual, no número de dias muito úmidos, na quantidade máxima de precipitação em 1 dia e em 5 dias consecutivos e tendências de decréscimo do número de dias secos consecutivos. Já as regiões oeste e sudoeste apresentam tendências de decréscimo na precipitação total anual, no número de dias muito úmidos, mas uma tendência de acréscimo na quantidade máxima de precipitação em 5 dias consecutivos. A região central da bacia mostra um comportamento de área de transição dos índices estudados. Todos os padrões descritos para os diferentes setores da bacia indicam que a precipitação intensa se concentra em poucos dias seguidos de períodos de secas, que é um indicativo de que a distribuição temporal da precipitação na região está se modificando. Sinais similares das tendências dos índices de extremo de precipitação, especialmente nos eventos de chuva forte, estão de acordo com os resultados obtidos por outros pesquisadores no Brasil (Carvalho et al., 2014; Silva e Dereczynski, 2014; Zilli et al., 2017; Marengo et al., 2020; Ávila et al., 2020a).

As análises de correlação mostram que a maioria dos índices das oscilações oceânicas possuem uma correlação muito fraca com os índices de extremo de precipitação. Portanto, não é

possível associar secas (anomalias negativas) ou excedentes de chuva (anomalias positivas) à ocorrência dos fenômenos oceânicos estudados. Assim, após a utilização da transformada *wavelet* para decompor a precipitação no domínio tempo-frequência, não se observa nenhuma potência significativa nas baixas frequências comumente associadas aos fenômenos oceânicos, fato que corrobora os resultados das análises de correlação investigadas.

Na sequência da pesquisa realizada, os seguintes desdobramentos do trabalho são propostos: estudo sazonal dos índices extremos de precipitação na região e investigação da influência das condições dinâmicas da atmosfera nesses índices (e.g.: intensidade e localização de sistemas, a exemplo do ZCAS e do ASAS).

Como fundamento do Projeto MoVaSC, os desenvolvimentos discutidos neste capítulo foram de extrema relevância para orientar a compreensão das mudanças climáticas associadas às tendências de extremos de precipitação e impacto de oscilações oceânicas na bacia do Paraíba do Sul. Contribuíram, assim, para orientar o estudo dos fenômenos atmosféricos de baixa frequência na bacia hidrográfica (discutidos no próximo capítulo).

## Referências

- ABOU RAFEE, S.; FREITAS, E.; MARTINS, J. et al. 2020. Spatial trends of extreme precipitation events in the Paraná river basin. *J. Appl Meteorol Climatol*, 59, p. 443-454. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0181.1>
- ADEPITAN, J. O.; FALAYI, E. O. 2019. Variability changes of some climatology parameters of Nigeria using *wavelet* analysis. *Scientific African*, 2, p. 1-11.
- ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. 2010. Previsão de eventos críticos na bacia do rio Paraíba do Sul, R 02 - Coleta de Dados. *Engecorps*, p. 285.
- ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2013. Relatório ANEEL 2012 / Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL.
- ALEXANDER, L. et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys Res.*, 111(D5), p. 1-22.

- ÁVILA, A.; JUSTINO, F.; AARON, W.; BROMWICH, D.; AMORIM, M. 2016. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. *Environ Res. Lett.*, 11(11), p.1-13.
- ÁVILA, A. D.; JUSTINO, F.; LINDEMANN, D. S.; RODRIGUES, J. M.; FERREIRA, G. R. 2020a. Climatological aspects and changes in temperature and precipitation extremes in Viçosa-Minas Gerais. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 92(2).
- ÁVILA, A. D.; BENEZOLI, V.; JUSTINO, F. et al. 2020b. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Clim. Dyn.*, 55, p. 1403-1426.
- BONNET, S. M.; DEREZYNSKI, C. P.; NUNES, A. 2018. Caracterização sinótica e climatológica de eventos de chuva pós-frontal no Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33(3), p. 547-557.
- BRASILIENSE, C. S.; DEREZYNSKI, C. P.; SATYAMURTY, P.; CHOU, S. C.; DA SILVA SANTOS, V. R.; CALADO, R. N. 2018. Synoptic analysis of an intense rainfall event in Paraíba do Sul river basin in southeast Brazil. *Meteorological Applications*, 25(1), p. 66-77.
- BRASILIENSE, C. S.; DEREZYNSKI, C. P.; SATYAMURTY, P.; CHOU, S. C.; CALADO, R. N. 2020. Climatologias da Temperatura do Ar e da Precipitação na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Região Sudeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 43(1).
- BRITO, T. T.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; LYRA, G. B.; GOIS, G.; ZERI, M. 2017. Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 129(5), p. 469-478.
- CAI, W.; WHETTON, P. H.; KAROLY, D. J. 2003. The response of the Antarctic oscillation to increasing and stabilized atmospheric CO<sub>2</sub>. *J. Clim.*, 16, p. 1525-1538.
- CAPOZZOLI, C. R.; CARDOSO, A. O.; FERRAZ, S. R. T. 2017. Padrões de variabilidade de vazão de rios nas principais bacias brasileiras e associação com índices climáticos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 2, p. 243-254.
- CARDOSO, A. O.; CATALDI, M. 2012. Relações de índices climáticos e vazão de rios no Brasil. *Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 17, Gramado. Anais... Rio de Janeiro: SBMET.
- CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T. 2020. Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul Associado ao Modo Anular Sul e Impactos Climáticos no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 4, p. 605-613.
- CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D.; DE OLIVEIRA, A. F.; PINTO, H. S. 2014. Annual maximum daily rainfall trends in the Midwest, Southeast and Southern Brazil in the last 71 years. *Weather Clim Extrem* 5(1), p. 7-15.
- CASTAÑEDA, M. E.; BARROS, V. R. 1994. Las tendencias de la precipitación en el Cono Sur de America al leste de los Andes. *Meteorologica*, 19, p. 22-23.

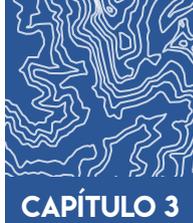
- CEIVAP. 2006. *Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul – Resumo*.
- CHADWICK, R.; GOOD, P.; MARTIN, G.; ROWELL, D. P. 2016. Large rainfall changes consistently projected over substantial areas of tropical land. *Nat. Clim. Chang.*, 6(2), p. 177-181.
- CHIESSI, C. M.; MULITZA, S.; PATZOLD, J.; WEFER, G.; MARENGO, J. A. 2009. Possible impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the South American Summer monsoon. *Geophysical Research letters*, v. 36, L21707, p. 5.
- COELHO, C. A. S.; DE OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T. et al. 2016. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Clim. Dyn.*, 46, p. 3737-3752. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>.
- COSTA, A. S.; SANTOS, N. A.; BRAGA, C. C. 2016. Rainfall diagnosis in different time scales in Maranhão using the wavelet transform. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 6(6), p. 295-304.
- DANTAS, L. G.; SANTOS, C. A. C.; OLINDA, R. A. 2015. Tendências anuais e sazonais nos extremos de temperatura do ar e precipitação em Campina Grande – PB. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30(4), p. 423-434.
- DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S.; MACHADO, C. O. 2009. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. *Rev. bras. meteorol.*, v. 24, n. 1, p. 24-38.
- DONAT, M. G.; LOWRY, A. L.; ALEXANDER, L. V.; O’GORMAN, P. A.; MAHER, N. 2016. More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6, p. 508-513.
- DONG, S.; SUN, Y.; LI, C.; ZHANG, X.; MIN, S. K.; KIM, Y. H. 2021. Attribution of Extreme Precipitation with Updated Observations and CMIP6 Simulations. *Journal of Climate*, 34, p. 871-881.
- ECHER, M. P. S.; ECHER, E.; NORDEMANN, D. J.; RIGOZO, N. R.; PRESTES, A. 2008. Wavelet analysis of a centennial (1895-1994) southern Brazil rainfall series (Pelotas, 31°46’19”S; 52°20’33”W). *Climatic Change*, 87(3-4), p. 489-497.
- FERREIRA, G. R. 2019. *Eventos extremos de precipitação nas bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul*. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada). Universidade Federal de Viçosa / Gabriela Regina Ferreira. – Viçosa, MG, p. 47.
- FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; KLEIN TANK, A. M. G.; PETERSON, T. 2002. Observed Coherent Changes in Climatic Extremes during the Second Half of the Twentieth Century. *Climate Research*, 19, p. 193-212.
- FYFE, J. C.; BOER, G. J.; FLATO, G. M. 1999. The Arctic and Antarctic oscillations and their projected changes under global warming. *Geophys. Res. Lett.*, 26, p. 1601-1604.

- GARCIA, S. R.; KAYANO, M. T. 2008. Climatological aspects of Hadley, Walker and monsoon circulations in two phases of the Pacific Decadal Oscillation. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 91, p. 117-127.
- GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; EASTERLING, D. R.; KARL, T. R.; HEGERL, G. C.; RAZUVAEV, V. A. N. 2005. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, v. 18, p. 1326-1350.
- HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. 2005. *Análise multivariada de dados*. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman.
- HINKLE, D. E.; WIERSMA, W.; JURIS, S. G. 2003. *Applied Statistics for the Behavioral Sciences*. 5ª ed. Boston: Houghton Mifflin.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. 2018. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Eds). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva, Switzerland: *World Meteorological Organization*, p. 1-32.
- KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. 2007. Relation of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. *Int. J. Climatology*, v. 27, n. 4, p. 531-540.
- KNIGHT, J. R.; ALLAN, R. J.; FOLLAND, C. K.; VELLINGA, M.; MANN, M. E. 2005. A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophysical Research Letters*, v. 32, L. 20708. Doi: 10.1029/2005GL024233.
- KREPPER, C. M.; SEQUEIRA, M. E. 1998. Low frequency variability of rainfall in southeastern South America. *Theor. Appl. Climatol.*, 61, p. 19-28.
- KUSHNER, P. J.; HELD, I. M.; DELWORTH, T. L. 2001. Southern Hemisphere atmospheric circulation response to global warming. *J. Clim.*, 14, p. 2238-2249.
- LIEBMANN, B.; ALLURED, D. 2005. Daily precipitation grids for South America. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 86, p. 1567-1570.
- LIU, Y.; LIANG, X. S.; WEISBERG, R. H. 2007. Rectification of the bias in the wavelet power spectrum. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 24, p. 2093-2102, Doi: 10.1175/2007JTECHO511.1.
- LONGUEVILLE, F. D.; HOUNTONDJI, Y. C.; KINDO, I.; GEMENNE, F.; OZER, P. 2016. Long-term analysis of rainfall and temperature data in Burkina Faso (1950-2013). *International Journal of Climatology*, 36 (13), p. 4393-4405.
- LOPES, L. G. 2018. *Mudança na disponibilidade hídrica associada às mudanças climáticas e no uso e cobertura da terra na região paulista da bacia do rio Paraíba do Sul*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biosistemas). Universidade Federal Fluminense, Niterói.

- LUIZ-SILVA, W.; OSCAR-JÚNIOR, A. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; TREISTMAN, F. 2020. An Overview of Precipitation Climatology in Brazil: Space-Time Variability of Frequency and Intensity associated with Atmospheric Systems. *Hydrological Sciences Journal*.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. 2005. Tendências hidrológicas da Bacia do Rio Paraíba do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 215-226.
- MARENGO, J. A. 2006. On the hydrological cycle of the Amazon basin: a historical review and current state-of-the-art. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, p. 1-19.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. A.; LABORBE, R.; ROCHA, R. P. 2007. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório 5, Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio). Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N. J. C.; RAMOS, A. M. 2020. Trends in extreme rainfall and hydro-geometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. *Ann. NY Acad. Sci.*, p. 1-16.
- MARSHALL, G. J.; STOTT, P. A.; TURNER, J.; CONNOLLEY, W. M.; KING, J. C.; LACHLAN-COPE, T. A. 2004. Causes of exceptional atmospheric circulation changes in the Southern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, v. 31, n. 14.
- MENDONÇA, M.; ROMERO, H. 2012. Ondas de frio, índices de oscilação e impactos socioambientais das variabilidades climáticas de baixa frequência na América do Sul. *Acta Geográfica*, Boa Vista, p. 185-203.
- MIN, S. K.; ZHANG, X.; ZWIERS, F. W.; HEGERL, G. C. 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470, p. 378-381.
- MORETTIN, P. A. 1999. *Ondas e Ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.
- NÍMER, E. 1989. *Climatologia do Brasil*. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais.
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. 1996. Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate*, v. 9, n. 10, p. 2464-2479.
- OSCAR, J. R. A. C. S. 2015. Extremos atmosféricos e desastres hidrometeorológicos em Duque de Caxias (RJ). *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 17, p. 189-205.

- REBOITA, M. S.; OLIVEIRA, D. M.; FREITAS, C. H. et al. 2015. Anomalias dos Padrões Sinóticos da Atmosfera na América do Sul nos Meses de Janeiro de 2014 e 2015. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 4, p. 1-12.
- REGOTO, P.; DEREZYNSKI, C.; SILVA, W. L.; SANTOS, R.; CONFALONIERI, U. 2018. Tendências de Extremos de Precipitação para o Estado do Espírito Santo. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 41, p. 365-381.
- RIBEIRO, E. M. 2020. *Variabilidade de baixa frequência, teleconexões e seus efeitos sobre o regime de chuva e vazão do Brasil*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biosistemas). Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- ROBERTSON, A. W.; MECHOSO, C. R. 1998. Interannual and decadal cycles in river flows of southeastern South American. *J. Climate*, 11, p. 2570-2581.
- SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B.; RAMANA RAO, T. V.; MENEZES, H. E. A. 2009. Tendências dos índices de precipitação no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, p. 39-47.
- SANTOS, I.; REBOITA, M. S.; FRANCO, N. 2011. Uma avaliação preliminar do controle dinâmico dos padrões globais de teleconexões. *Simpósio Internacional de Climatologia*, 2011, João Pessoa. Mudanças Climáticas e os seus Impactos em Áreas Urbanas.
- SILVA, D. F.; SOUZA, F. A. S.; KAYANO, M. T. 2010. Análise da Influência das Multi-Escalas Temporais na Precipitação da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú Através do IAC e Ondeletras: Baixo Mundaú. *UNOPAR Cient. Exatas Technol.*, v. 9, n. 1, p. 19-26.
- SILVA, G. B.; AZEVEDO, P. V. 2008. Índices de tendências de mudanças climáticas no Estado da Bahia. *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia*, v. 5, n. 3.
- SILVA, W. L.; DEREZYNSKI, C. P. 2014. Caracterização Climatológica e Tendências Observadas em Extremos Climáticos no Estado do Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 37, p. 123-138.
- SIQUEIRA, A. H. B. 2012. *Variabilidade do clima da América do Sul e sua relação com os índices oceânicos e atmosféricos*. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Alagoas.
- SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. 2012. Índices de Detecção de Mudanças Climáticas Derivados da Precipitação Pluviométrica e das Temperaturas em Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 01, p. 143-159.
- STONE, D. A.; WEAVER, A. J.; STOUFFER, R. J. 2001. Projection of climate change onto modes of atmospheric variability. *J. Clim.*, 14, p. 3551-3565.
- SUN, X.; COOK, K. H.; VIZY, E. K. 2017. The South Atlantic subtropical high: Climatology and interannual variability. *Journal of Climate*, v. 30, n. 9, p. 3279-3296.

- TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. 2011. Trends in the frequency of intense precipitation events in Southern and southeastern Brazil during 1960–2004. *J. Clim.*, 24(7), p. 1913–1921.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A. 1998. Practical Guide to *Wavelet Analysis*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, p. 61–78.
- VALVERDE, M. C.; MARENGO, J. A. 2014. Extreme Rainfall Indices in the Hydrographic Basins of Brazil. *Open Journal of Modern Hydrology*, v. 4, p. 10–26.
- VITORINO, M. I.; SILVA DIAS, P. L.; FERREIRA, N. J. 2006. Observational study of the seasonality of the submonthly and intraseasonal signal over the tropics. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 93, p. 17–35.
- YOU, Q.; KANG, S.; AGUILAR, E.; PEPIN, N.; FLÜGEL, W. A.; YAN, Y.; XU, Y.; ZHANG, Y.; HUANG, J. 2011. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961–2003. *Climate Dynamics*, 36, p. 2399–2417.
- ZHANG, X.; YANG, F. 2004. RCLimDex (1.0) – User Manual. *Climate Research Branch Environment. Canada Downsvieiw*.
- ZHANG, X.; WAN, H.; ZWIERS, F. W.; HEGERL, G. C.; MIN, S. K. 2013. Attributing intensification of precipitation extremes to human influence. *Geophys. Res. Lett.*, 40, p. 5252–5257.
- ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V.; LIEBMANN, B.; SILVA DIAS, M. A. 2017. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. *Int. J. Climatol.*, 37(5), p. 2269–2279.



# FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS DE BAIXA FREQUÊNCIA NA BACIA HIDROGRÁFICA

A energia elétrica no Brasil é essencialmente gerada a partir de recursos naturais renováveis. A água é o principal insumo para a geração, alimentando um complexo de usinas hidrelétricas em operação em diversas bacias hidrográficas do território brasileiro, totalizando 66,9% da geração total em 2019 (EPE, 2020). Essa dependência do ciclo hidrológico coloca a segurança energética do Brasil dependente da oferta dos recursos hídricos e sujeita aos percalços causados pela variabilidade climática, que surgem em períodos de má distribuição de chuvas, como é o caso de 2021.

O Brasil, por conta de suas dimensões continentais, está sujeito a vários sistemas meteorológicos causadores de chuvas. Em um determinado ano, o Brasil pode sofrer uma seca generalizada ou experimentar secas localizadas em algumas regiões e chuvas em outras (Kayano e Andreoli, 2007). O fato de o sistema elétrico brasileiro ser interligado permite que a baixa geração em uma região seja compensada pelo aumento da geração em outra, assim amortecendo, ao longo de anos de distribuição de chuvas irregulares, o impacto sobre o sistema elétrico (EPE, 2020). Considerando o percentual associado à produção de energia elétrica e a dependência da regularidade de ocorrência das chuvas em suas bacias hidrográficas, a capacidade de previsão das chuvas

torna-se fundamental para assegurar a qualidade do processo de gestão dessa importante fonte de energia, quer do ponto de vista quantitativo ou qualitativo.

## A bacia do Paraíba do Sul

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul destaca-se entre uma das mais importantes bacias do Brasil, já que está localizada em uma região densamente povoada, associada a um elevado produto interno bruto e com forte demanda de água para abastecimento industrial, urbano e para geração de energia. Conforme discutido com mais detalhes no capítulo introdutório deste livro, a bacia está localizada no sudeste do Brasil, ocupando uma área de 55.500 km<sup>2</sup>, que se divide em cerca de 13.900 km<sup>2</sup> no estado de São Paulo, 20.700 km<sup>2</sup> no estado de Minas Gerais e 20.900 km<sup>2</sup> no estado do Rio de Janeiro. A água usada para gerar energia hidrelétrica continua disponível para os demais usos ao longo do seu fluxo natural. Não obstante, em períodos de menor oferta de água, a operação de curto prazo impõe um rigor maior na liberação desse recurso para geração de energia, uma vez que as perdas precisam ser minimizadas. Além disso, parte dessa água também é realocada para o sistema Cantareira, para mitigar a vulnerabilidade da principal fonte de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo (Deusdará-Leal et al., 2020). Esta é a razão pela qual a operação de curto prazo demanda fortemente uma boa previsão sobre a recarga dos reservatórios, o que torna a previsão de tempo (*weather forecast*) na variável chuva, em escala de poucos dias, uma ferramenta central no processo de gestão dos reservatórios.

Um sistema capaz de prover previsões meteorológicas confiáveis é indispensável ao bom uso dos recursos hídricos de qualquer bacia. O provimento de informações da previsão de chuvas e de outras variáveis meteorológicas (e.g., vento, umidade do ar, radiação e temperatura) é igualmente relevante para uso como condição inicial em modelos hidrológicos, preditores da vazão de bacias hidrográficas. O modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF)

foi desenvolvido tanto para fins de pesquisa quanto operacionais (Skamarock et al., 2019). O WRF vem sendo amplamente utilizado no Brasil (Ribeiro et al., 2018; Ramos et al., 2013; Comin et al., 2020) para diferentes aplicações. A previsão de precipitação em área limitada requer um modelo computacional que depende fortemente das parametrizações de convecção e de microfísica de nuvens, o que é conseguido pelo WRF, que possui variados esquemas para ambas. Na falta de uma teoria unificadora, cada esquema apresenta suas peculiaridades, que vão causar um melhor desempenho sob determinadas circunstâncias. Considerando a extensa área territorial da bacia do rio Paraíba do Sul, o aspecto de diferentes regimes de precipitação ao longo de sua extensão (Silva e Dereczynski, 2014; Sobral et al., 2018; Brasi-liense et al., 2020) mostra-se relevante uma vez que as maiores taxas de precipitação são historicamente registradas nas regiões montanhosas, enquanto as menores, nas baixadas. Nesse escopo, alguns esquemas de parametrização de cúmulos e de microfísica de nuvens apresentam melhor desempenho para determinados setores da bacia. A utilização de modelos atmosféricos como instrumentos de gestão e operação de usinas hidrelétricas é relevante, apresentando-se de diferentes formas. Ahmad e Hossain (2020) utilizaram o modelo *Global Forecast System* (GFS) para prever a precipitação em até 16 dias, como forçamento do modelo hidrológico de Capacidade de Infiltração Variável (VIC), com o objetivo de refinar a previsão de vazão em reservatórios nos Estados Unidos. A ferramenta mostrou-se eficaz nesta tarefa, proporcionando razoável grau de confiança.

Considerando os aspectos geográficos da América do Sul, onde existe a preponderância de terrenos complexos em praticamente todas as regiões do continente, o aspecto de circulação deve ser bem representado nas simulações numéricas. Em geral, modelos de circulação global apresentam dificuldades em representar esse tipo de circulação (Comin et al., 2020), enquanto os modelos regionais tendem a simular esses eventos com mais propriedade.

Sharma et al. (2019) atualizaram o núcleo dinâmico do Modelo Unificado do Reino Unido (UM) para previsão de chuvas severas e extremas nas regiões montanhosas da Índia. Esse sistema apresentou melhores resultados quando utilizando um modelo de terreno atualizado e em alta resolução espacial, i.e., refinamento passando de 40 km x 40 km (horizontal), 50 níveis verticais para 10 km x 10 km (horizontal) e 70 níveis verticais. A avaliação foi baseada em métricas de verificação, incluindo Probabilidade de Detecção (POD), Taxa de Alarmes Falsos (FAR), Viés de Frequência (Viés) e Índice de Sucesso Crítico (CSI), cujos resultados indicaram que a evolução do modelo de previsões de precipitação de 2007 a 2018 apresentou melhoras em todos os índices estatísticos aplicados.

Moreira de Souza et al. (2018) aplicaram o modelo WRF para a região da Amazônia Brasileira. Dentre seus resultados, dois aspectos foram relevantes: os erros calculados alteravam seus índices tanto sazonal quanto regionalmente. Os melhores resultados foram obtidos no verão e no outono. O refinamento de grade (pelo aumento da resolução espacial) impactou positivamente a maioria dos domínios aplicados. Em geral, o WRF apresentou melhores resultados que os modelos globais, utilizando-se o *downscaling* dinâmico como um artifício capaz de reduzir erros na previsão.

Os sistemas de escala sinótica responsáveis pelos maiores volumes de chuva na região da bacia do rio Paraíba do Sul são as ondas frontais (Marengo et al., 1977; Bannon, 1984; Satyamurty e Mattos, 1989) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul, ZCAS (Quadro, 1999; Lima e Satyamurty, 2010). Já na mesoescala ocorrem sistemas convectivos, SCM – *Mesoscale Convective Systems* – (Houze, 1993; Lin, 2007; Salio et al., 2007; Anabor et al., 2008) e linhas de instabilidade (Bluestein e Jain, 1985; Parker e Johnson, 2000; Houze, 2004), principalmente nas estações de primavera/verão, assim como a ZCAS, em escala sinótica. Testar a sensibilidade dos esquemas de parametrização de convecção e microfísica de um modelo atmosférico para essa região é uma tarefa desafiadora. Previsões em escala semanal devem considerar diferentes aspectos

e condições atmosféricas. Desta forma, são necessários testes em diferentes eventos meteorológicos que garantam a configuração média mais adequada para a previsão das chuvas em uma área heterogênea, como é a da bacia do Paraíba do Sul. Os principais sistemas de tempo atuantes devem, obrigatoriamente, ser considerados na avaliação de desempenho. Esses sistemas atuam em diferentes épocas do ano e estão sujeitos a diferentes “forçamentos da atmosfera”, por exemplo: sistemas frontais são mais influentes durante o inverno enquanto a ZCAS é mais importante durante o verão (Dereczynski et al., 2009). Além disso, por ser uma vasta região de terreno complexo e uso do solo heterogêneo, contemplando montanhas e áreas planas, faz-se necessário verificar se o desempenho dos esquemas terá diferentes respostas de acordo com as sub-regiões da bacia que estão situadas em áreas de influência de diferentes intensidades desses sistemas de grande escala.

A pesquisa realizada no âmbito do projeto de P&D MoVaSC<sup>1</sup> permitiu determinar quais os conjuntos de parametrizações de microfísica e de cúmulos do modelo WRF mais bem representam a precipitação gerada pelos sistemas meteorológicos recorrentes, causadores de volumes de chuva relevantes de acordo com a região da bacia hidrográfica estudada. Na seção a seguir, é apresentada a descrição e caracterização da área de estudo, enquanto nas seções subsequentes deste capítulo são ilustradas a metodologia e as fontes de dados. Na conclusão do capítulo, os resultados são apresentados e discutidos.

### **Caracterização da área de estudo**

A Figura 3.1 mostra a bacia hidrográfica ocupando o Vale do Paraíba, no estado de São Paulo (SP); a Zona da Mata, no estado de Minas Gerais (MG) e, praticamente, a metade do estado do Rio de Janeiro (RJ). Em toda essa extensão, atualmente, há 180

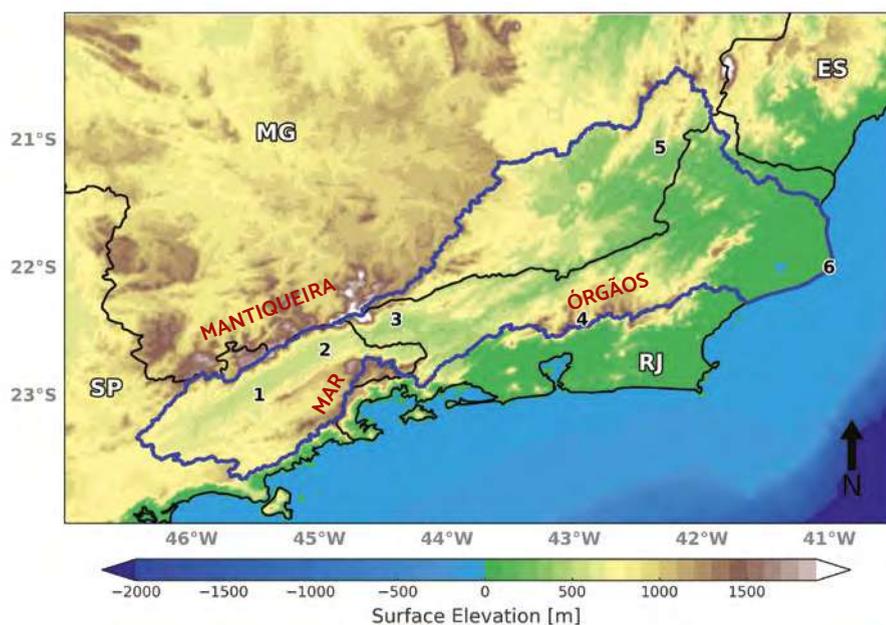
---

1 P&D Light/Aneel 5161-0016/2019, “Modelagem de Vazão, Sedimento e Clima na bacia do rio Paraíba do Sul.

municípios, 36 dos quais beneficiam-se dos recursos hídricos da bacia (Marengo e Alves, 2005). No seu curso natural, o rio Paraíba do Sul, em território paulista, é ladeado pelas Serras do Mar e da Mantiqueira, passando por todo o Vale do Paraíba e adentrando nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, onde deságua no Oceano Atlântico, na cidade de São João da Barra (RJ), depois de ter percorrido 1.180 km (Brasiliense et al., 2020).

Os números indicados na Figura 3.1 ilustram as principais cidades da área de estudo, que são: (1) Taubaté e (2) Cachoeira Paulista, no estado de São Paulo; (3) Resende, (4) Teresópolis e (6) São Tomé, no estado do Rio de Janeiro; e (5) Muriaé, no estado de Minas Gerais. Nessas cidades localizam-se também pontos de monitoramento utilizados na pesquisa realizada pelo Projeto de P&D MoVaSC como pontos de referência para comparação com os resultados obtidos pelo modelo WRF. Ainda na Figura 3.1, as feições topográficas da área de estudo são ilustradas. Como a bacia hidrográfica está situada em área de terreno complexo, há um desafio adicional para as simulações realizadas pelo modelo WRF. A localização da bacia propriamente dita, entre as serras da Mantiqueira, do Mar e dos Órgãos, com seu curso de águas percorrendo os vales entre essas regiões de serra, caracteriza a complexidade de condições para as simulações numéricas realizadas. As dificuldades em encontrar as melhores configurações de simulação resultam dos perfis de forçamentos orográficos em regiões de montanhas, que costumam determinar regimes peculiares de precipitação nas áreas de entorno (Zilli et al., 2016).

**Figura 3.1** Bacia hidrográfica do Paraíba do Sul (contorno em azul), divisão política dos estados (contorno em preto), localização das estações meteorológicas (números em preto) e regiões serranas da área de estudo (nomes em vermelho). Os números indicam a localização das seguintes cidades: (1) Taubaté, (2) Cachoeira Paulista, (3) Resende, (4) Teresópolis, (5) Muriaé e (6) São Tomé.



Fonte: Projeto MoVaSC.

De acordo com Nimmer (1979), a região sudeste do Brasil ocupa uma área que possui referências climatológicas e geográficas relevantes entre (15 - 25°S) e (55 - 40°W). O trópico de Capricórnio atravessa a área e marca uma fronteira conceitual para a influência da área climática tropical. Essa região tem características climatológicas que variam de condições extremas quentes e úmidas-chuvosas a frio e secas, especialmente nas montanhas da região. Também divide os climas temperados, que prevalecem na região Sul do Brasil e os climas equatoriais, que modulam as condições da região Nordeste do Brasil (Ávila et al., 2016). Localizada na zona onde atuam os sistemas de alta pressão subtropical e os sistemas de alta pressão polar recorrentes de inverno, a

região é responsável pelas baixas temperaturas, especialmente nas montanhas. Isso resulta do caráter de transição na climatologia regional do Sudeste, que é expressa em seu regime térmico. Na realidade, o que mais caracteriza a região Sudeste é a predominância de clima quente e úmido durante a estação chuvosa (do final de novembro a março). A estação seca é muito notável (a partir de maio a final de setembro), determinando, também, a estação mais fria e a mais confortável (Brasiliense et al., 2020).

O sistema de geração de eletricidade nessa área é altamente dependente da estação chuvosa, uma vez que as usinas hidrelétricas representam a principal fonte de eletricidade para a região (EPE, 2010). A gestão desse recurso deve estar sob controle para evitar problemas na disponibilidade de energia e demais usos comuns da água.

Coelho et al. (2016) descreveram a estação seca anômala registrada em parte da região do sudeste brasileiro, especialmente no estado de São Paulo. Além de uma anomalia na temperatura da superfície do mar, no Oceano Atlântico sudoeste, a principal razão para essa seca explica-se pela circulação atmosférica em níveis mais baixos da troposfera na América do Sul, canalizando o ar úmido da Amazônia em direção ao Paraguai e ao Norte da Argentina. Esta circulação faz parte de uma conexão de grande escala com a condição de circulação sobre o Oceano Pacífico, induzindo movimentos de subsidência para o sudeste do Brasil e, conseqüentemente, tempo quente e seco durante a estação chuvosa esperada. Em outro estudo focado na seca do estado de São Paulo, entre 2013 e 2014, Coelho et al. (2016) relataram que a área experimentou um déficit de precipitação desde os anos de 1999/2000, culminando com o período de seca recorde de 2013 e 2014, que impôs severas restrições à geração de abastecimento de água e energia. Este evento já foi registrado em décadas passadas, porém esse foi o de maior intensidade. Em 2021 observou-se um evento semelhante.

A heterogeneidade das condições meteorológicas da região impõe desafio para a previsão dessas condições. No que concerne

ao extremo chuvoso e aos eventos potenciais da seca, estes devem ser adequadamente simulados, uma vez que afetam a rotina operacional de geração de eletricidade, igualmente impactando na disponibilidade de água para consumo humano e uso agrícola. Os efeitos da circulação, em mesoescala e em grande escala, também devem ser adequadamente representados pelo modelo WRF sobre a área de estudo.

### **Metodologia e processamento dos dados**

Esta seção descreve o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) para previsão numérica de tempo (*weather forecast*) e estudos climáticos. Define o período do estudo realizado no âmbito do desenvolvimento de projeto de P&D MoVaSC, o recenseamento dos dados, discute a avaliação estatística dos dados processados e a distribuição espacial da precipitação.

#### **O modelo WRF**

O modelo WRF é um código computacional aberto, que contém um sistema de modelagem atmosférica, concebido para pesquisa e previsão numérica do tempo (Skamarock et al., 2019). É um modelo amplamente adotado pela comunidade especialista internacional, com mais de 48.000 usuários registrados em mais de 160 países<sup>2</sup>. O sistema WRF contém dois solucionadores dinâmicos, referidos como o núcleo do ARW (WRF avançado de pesquisa) e o núcleo NMM (modelo de mesoescala não hidrostático). Como o ARW é considerado ferramenta para previsões e pesquisa atmosférica e incorpora mais configurações de física do que o NMM, a versão 4.1.5 do núcleo ARW foi usada no estudo realizado no âmbito do projeto MoVaSC. Entre suas principais características, o WRF-ARW integra as equações de Navier-Stokes para modelar o escoamento do fluido, sem considerar a abordagem hidrostática.

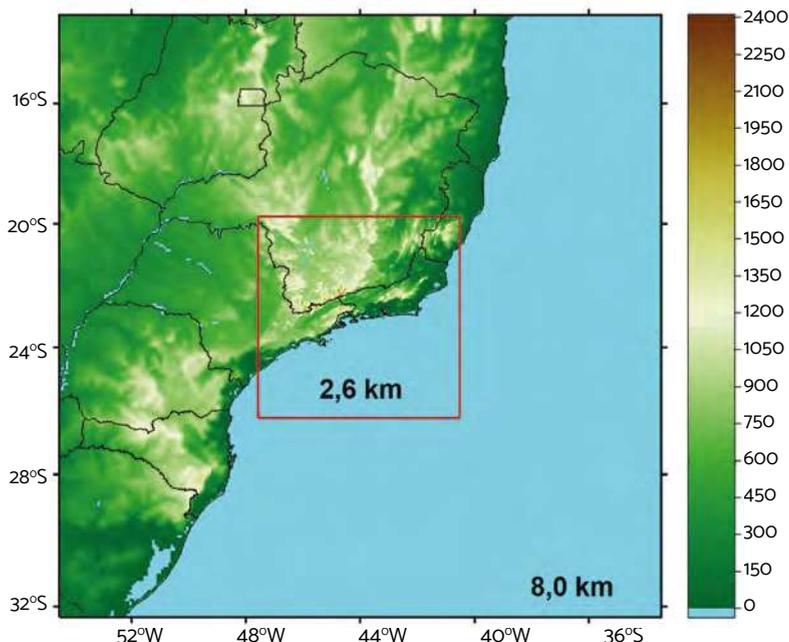
---

<sup>2</sup> <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>

A coordenada vertical segue o terreno e usa uma formulação de pressão sigma híbrida. O arranjo de grade C de Arakawa e o método de diferenças finitas para resolver as equações diferenciais são aplicados. Processos diferentes são representados por parametrizações físicas, que consideram a radiação, a microfísica em nuvem, cúmulos, mistura devido à turbulência, fluxos na superfície da Terra, entre outros parâmetros (Skamarock et al., 2019). As condições iniciais e de contorno são assimiladas pelos conjuntos de dados de análise em grade do *National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Forecast System (GFS) final (FNL)*, com resolução de grade de  $0.25^\circ$  ( $\sim 24$  km) preparadas operacionalmente a cada seis (6) horas. As grades FNLs são preparadas com o mesmo modelo que o NCEP utiliza no Modelo Global de Previsão GFS (Global Forecast System), com um atraso proposital de uma (1) hora após a inicialização do GFS. Esse atraso permite que mais informações observadas sejam utilizadas, reduzindo a propagação de erros. Nesse estudo, em particular, apenas as FNLs foram aplicadas.

Dois domínios aninhados, centrados nas coordenadas  $-23.0$  Latitude e  $-44.0$  Longitude, foram ajustados com a projeção de Mercator e interação unidirecional, conforme ilustrado na Figura 3.2. O fator de escala de mapa foi configurado para estar perto de 1 (Warner, 2011). Para preservar a estabilidade do modelo, a proporção de aninhamento (*nesting*) de domínio foi mantida como 3:1. O maior domínio (D1) possui 8 km de resolução de grade horizontal, com 267 pontos x 267 pontos de grade. O segundo domínio (D2) tem uma resolução de grade de 2,6 km, com 268 pontos x 268 pontos, cobrindo toda a bacia do rio Paraíba do Sul. Todos os domínios têm 45 níveis verticais, a partir do nível do solo, até 50 hPa. A difusão horizontal foi calculada em espaço físico, pois é mais realista e sugerida para regiões com terreno complexo (Chen, 2021). As bases de uso topográfico e de solo usadas no modelo WRF foram: Gtop630, com um espaçamento de grade horizontal de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km) e MODIS (espectro-radiômetro de imagem de resolução moderada), com uma resolução de 500 m, respectivamente.

**Figura 3.2** Domínios do WRF para as simulações realizadas. O domínio externo possui resolução horizontal de 8,0 km e o interno possui resolução de 2,6 km. A topografia da região é caracterizada pela escala de cor apresentada.



Fonte: Projeto MoVaSC.

Uma vez que o objetivo principal do estudo é otimizar o desempenho do modelo na previsão de precipitação, os experimentos realizados no estudo concentraram o foco nas parametrizações de cúmulos e microfísica. Essas parametrizações são duas formas diferentes de representar as nuvens convectivas em um modelo. A primeira considera uma relação das nuvens com as características de grande escala e a segunda considera características associadas à evolução de um espectro de gotas embrionárias até a formação de precipitação. Dessa forma, três opções diferentes foram testadas para cúmulos e cinco para microfísica em nuvem, em um total de 15 experimentos. Seguindo as recomendações da literatura científica especializada, a parametrização de cúmulos foi ativada apenas no domínio D1 (e.g., Comin et al.,

2020). Os demais esquemas físicos foram mantidos inalterados em todos os experimentos realizados. A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos esquemas físicos configurados no WRF para os experimentos programados. Após cada esquema de parametrização de cúmulos e de microfísica foram acrescentados códigos (em negrito) cujas combinações formam os nomes dos experimentos. Existem circunstâncias em que o tempo de processamento é central e a escolha da configuração depende desse tempo. Como diferentes esquemas tendem a ter diferentes demandas de tempo de CPU, os resultados obtidos apresentam a demanda de CPU de cada experimento, para efeito de comparação.

**Tabela 3.1** Parametrizações físicas do WRF utilizadas nos experimentos realizados.

Parametrizações Físicas	Opções
Radiação de onda longa	RRTMG <sup>3</sup> Shortwave and Longwave (Iacono et al., 2008)
Radiação de onda curta	RRTMG Shortwave and Longwave (Iacono et al., 2008)
Uso do solo	Noah-MP <sup>4</sup> Land Surface Model (Niu et al., 2011)
Camada de superfície	Revised MM5 <sup>5</sup> (Jimenez et al., 2012)
Camada Limite Planetária	Yonsei University (YSU) (Hong et al., 2006)
Cúmulos	Kain-Fritsch (Kain, 2004) - CU01 Grell-Freitas Ensemble (Grell and Freitas, 2014) - CU03 Multi-scale Kain-Fritsch (Zheng et al., 2016) - CU11

3 Refere-se a um modelo de superfície terrestre (LSM) que usa várias opções para os principais processos de interação Terra-Atmosfera.

4 Noah-MP refere-se a um modelo de superfície terrestre (LSM) que usa várias opções para os principais processos de interação Terra-Atmosfera.

5 MM5 refere-se a um modelo regional de mesoescala usado para criar previsões meteorológicas e projeções climáticas. É um modelo comunitário mantido pela Penn State University e pelo National Center for Atmospheric Research.

Parametrizações Físicas	Opções
Microfísica	WSM6 - WRF Single-moment 6-class (Hong and Lim, 2006) - MPO6
	WDM6 <sup>6</sup> - WRF Double Moment 6-class (Lim and Hong, 2010) - MP16
	WSM7 - WRF Single Moment 7-class (Bae et al., 2018) - MP24
	WDM7 <sup>7</sup> - WRF Double Moment 7-class (Bae et al., 2018) - MP26
	Morrison Double moment (Morrison et al., 2009) - MP10

Fonte: Projeto MoVaSC.

### **Período de estudo e dados**

No estudo conduzido no âmbito dos desenvolvimentos do projeto MoVaSC, foram escolhidos dez eventos meteorológicos (15 experimentos foram realizados para cada evento) em que ocorreram sistemas meteorológicos em escala sinótica e mesoescala, os quais registraram acumulados de precipitação na maior parte da bacia do Paraíba do Sul, conforme documentado na Tabela 3.2. Os eventos englobam as condições meteorológicas: pré-frontal, frontal e pós-frontal, instabilidade termodinâmica associada ao calor e à alta umidade na Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Os dez períodos ilustrados da Tabela 3.2 foram classificados de acordo com as suas características dinâmicas ou convectivas. A instabilidade dinâmica foi quantificada pela passagem da onda frontal e pela circulação pós-frontal, enquanto as instabilidades que resultaram em convecção estão associadas à condição pré-frontal, instabilidade termodinâmica (calor e umidade) e à ZCAS. Nos casos selecionados, seis são classificados como dinâmicos, dois convectivos e os demais enquadrados na categoria dinâmico/convectivo, períodos em que ocorreram tanto sistema dinâmico quanto convectivo.

6 Esquema microfísico projetado para lidar com a inconsistência física nas propriedades da nuvem entre os processos microfísicos e de radiação.

7 O esquema de microfísica de nuvem de pesquisa e previsão do tempo (WRF) *Double-Moment 7-Class* (WDM7) foi desenvolvido para parametrizar os processos de nuvem e precipitação explicitamente para fenômenos de mesoescala.

**Tabela 3.2** Principais sistemas meteorológicos atuantes na bacia do Paraíba do Sul nos eventos selecionados.

Evento	Período		Principais Sistemas Meteorológicos Atuantes
	Início	Fim	
1	00Z - 16/02/2016	00Z - 22/02/2016	Instabilidade Termodinâmica e Frente Fria
2	00Z - 28/02/2016	00Z - 03/03/2016	Frente Fria e ZCAS
3	00Z - 13/10/2016	00Z - 16/10/2016	Frente Fria
4	00Z - 02/03/2017	00Z - 08/03/2017	Frente Fria
5	00Z - 16/11/2017	00Z - 24/11/2017	Frente Fria
6	00Z - 02/03/2018	00Z - 06/03/2018	Instabilidade Termodinâmica e ZCAS
7	00Z - 14/03/2018	00Z - 18/03/2018	Frente Fria
8	00Z - 19/03/2018	00Z - 23/03/2018	Frente Fria
9	00Z - 26/02/2019	00Z - 03/03/2019	ZCAS
10	00Z - 06/04/2019	00Z - 10/04/2019	Frente Fria

Fonte: Projeto MoVaSC.

Para a identificação e análises dos sistemas meteorológicos foram utilizadas as cartas sinóticas da Marinha do Brasil<sup>8</sup> e do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)<sup>9</sup>. Imagens de satélites e mapas de monitoramento diários de precipitação observadas nas cartas do CPTEC e do Instituto Nacional de Meteorologia<sup>10</sup>, além dos dados horários observados de precipitação das estações do INMET e das estações da Light Energia S.A. (financiadora do projeto de P&D MoVaSC) foram também utilizados, completando, assim, o espectro observacional para comparação dos resultados numéricos. A partir desses dados foram selecionados dez períodos nos quais as condições meteorológicas se mostraram propícias à chuva intensa em curto período (nuvens convectivas) ou um acumulado de chuva contínuo, associado a

8 <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>

9 <http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>

10 INMET; <https://portal.inmet.gov.br/>

características de nuvens estratiformes, em um período de dias mais estendido. Com essa escolha foi possível representar os eventos meteorológicos mais relevantes na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul.

## Avaliações estatísticas

Três técnicas distintas de avaliação de desempenho do modelo foram realizadas para precipitação simulada com diferentes esquemas paramétricos, a saber: (i) verificação pontual da previsão dos valores de precipitação de 24 horas, utilizando o diagrama de Taylor (2001); (ii) verificação pontual da previsão da ocorrência de primeira hora de precipitação como variável binária categórica e (iii) verificação da capacidade do modelo para reproduzir padrões de distribuição espacial da precipitação.

### Diagrama de Taylor

O Diagrama de Taylor (Taylor, 2001) permite uma comparação de resultados de modelos em relação a dados de referência (e.g., dados observados ou resultados de reanálises), considerando três variáveis estatísticas: raiz quadrada do erro médio, correlação entre variáveis e o desvio padrão. A vantagem do uso desse instrumento resulta em uma aplicação estatística de forma objetiva contendo as formas mais recorrentes em uma única imagem. Esse diagrama provê uma descrição simples de como se comportou uma variável simulada, considerando os testes frequentemente utilizados.

Os resultados obtidos pelo diagrama de Taylor permitem a visão mais ampla do desempenho de um sistema de previsão, sob a ótica de avaliação de testes estatísticos agrupados em uma única imagem, o que simplifica a análise (Dantas et al., 2019; Zeyaeyan et al., 2017).

### Variável binária categórica

As medições realizadas pelos pluviômetros instalados na bacia não são normalmente avaliadas de forma instantânea, mas utilizando valores acumulados (Comin et al., 2020). O método utilizado para a análise categórica dos acumulados de precipitação foi referenciado nas seguintes etapas do estudo:

- cálculo da precipitação acumulada em períodos de 24 horas;
- definição de “eventos de chuva”, quando a precipitação acumulada ultrapassa 0,2 mm no período;
- análise da comparação de “eventos de chuva” entre eventos simulados e observados.

As métricas estatísticas são avaliadas a partir da “matriz de contingência”. Essa matriz possui ordem  $N \times N$ , conforme apresentada na Tabela 3.3, em que as colunas representam os valores observados e as linhas representam os valores previstos.

Tabela 3.3 “Matriz de contingência”.

		Observado		
		Sim	Não	Total
Previsão	Sim	Acerto (a)	Falso Alarme (b)	Previsto SIM
	Não	Perdas (c)	Acerto não-evento (d)*	Previsto NÃO
Total		Observado SIM	Observados NÃO	Total

Fonte: Projeto MoVaSC.

\* Como o interesse principal do trabalho é explorar os casos de chuva (previstos ou não previstos pelo modelo), os eventos de não-chuva que o modelo identificou não são analisados.

A Tabela 3.4 apresenta as métricas estatísticas obtidas a partir da “matriz de contingência”.

**Tabela 3.4** Estatísticas obtidas a partir da “matriz de contingência”.

Estatística	Fórmula *	Descrição
Probabilidade de detecção (POD)	$POD = \frac{a}{a+c}$	Mede a fração de eventos observados que foram previstos corretamente. Uma probabilidade perfeita é $POD = 1$ .
Taxa de alarme falso (FAR)	$FAR = \frac{b}{a+b}$	Mede a fração de previsões “sim” nas quais o evento não ocorreu. Uma pontuação perfeita é $FAR = 0$ .
Viés (BIAS)	$BIAS = \frac{a+b}{a+c}$	Mede a razão entre a frequência de eventos de previsão e a frequência de eventos observados. Uma pontuação perfeita é $BIAS = 1$ .
Descritor estatístico CSI	$CSI = \frac{a}{a+b+c}$	Mede a razão entre a frequência de eventos de previsão e mede a fração de eventos observados por todos os eventos “sim” previstos e observados. Uma pontuação perfeita é $CSI = 1$ .

Fonte: Projeto MoVaSC.

\* Observações: nas equações, (a) representa acertos, (b) representa alarme falso e (c) representa erros. Consulte a Tabela 3.3 para obter mais detalhes.

### Distribuição espacial da precipitação

A terceira e última avaliação realizada refere-se a uma análise subjetiva da distribuição espacial de precipitação. Com o propósito de exemplificar, esta seção apresenta apenas o caso de maior volume de precipitação dentre os dez casos considerados no estudo, mais especificamente aquele associado ao período compreendido entre 02/03/2017 e 09/03/2017, condicionado pela passagem de uma frente fria, devidamente documentada na Tabela 3.2. Salienta-se que os resultados obtidos para este período refletem, de forma geral, os resultados obtidos para os demais nove períodos. Para fins de referência e comparação, considerou-se o produto *Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) V2.0* (Funk et al., 2015). O CHIRPS denota um conjunto de dados de precipitação quase global, que possui resolução espacial de  $0.05^\circ$  e temporal de um dia, desenvolvido a partir de dados de sensoriamento remoto, estações pluviométricas e dados de reanálise. Diferente das duas avaliações anteriores, nesta avaliação comparou-se o campo de precipitação acumulada durante todo o período selecionado e não apenas no período de 24 horas.

## Resultados e discussão

### Avaliação do tempo de simulação

Embora o tempo de simulação não seja um fator limitante quando se dispõe de grande poder computacional, é interessante mostrar o tempo de CPU de cada experimento para que se possa fazer uma avaliação relativa. A Tabela 3.5 define a nomenclatura dos experimentos, de acordo com a combinação dos esquemas de parametrização de microfísica e de cúmulos, com o tempo de CPU (Unidade Central de Processamento). Os tempos foram determinados em relação ao experimento com execução mais rápida, que recebeu o valor de 100%.

Do ponto de vista do tempo de execução, a Tabela 3.5 mostra que os esquemas de microfísica *double-moment* são em geral os mais impactantes. O Tempo de CPU expresso em percentual na tabela denota apenas uma escala artificial de comparação para indicar aumentos do tempo de processamento de máquina de cada experimento em relação ao primeiro (MP06\_CU03). Comparando experimentos similares quanto ao número de hidrometeoros e esquema cúmulos, porém diferentes quanto ao momento (*e.g.*: MP06\_CU03 vs MP16\_CU03, MP24\_CU11 vs MP26\_CU11), verifica-se um incremento no tempo de execução de aproximadamente 20% para integrar 24 horas. Os três conjuntos compostos pelo esquema de microfísica WSM6 apresentam os melhores tempos de execução, enquanto os piores tempos de processamento são atribuídos aos três esquemas com WDM7, cerca de 30% de diferença. Não se verifica um padrão de custo computacional entre os esquemas de parametrização de cúmulos.

**Tabela 3.5** Tempo médio relativo de execução para integração de 24 horas dos experimentos numéricos.

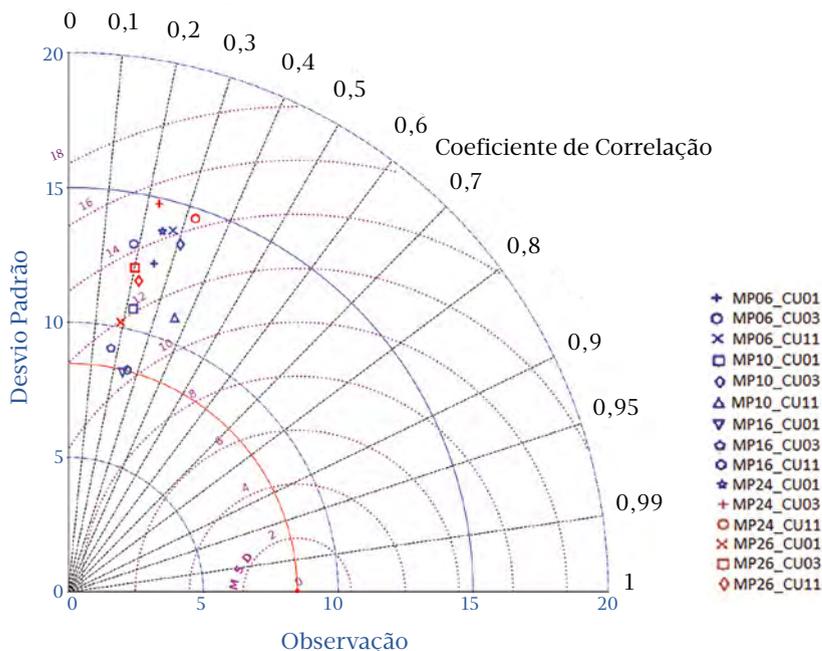
Microfísica	Cúmulos	Experimento	Aumento % do tempo de CPU
WSM6	Grell-Freitas	MP06_CU03	100,00
WSM6	Multi-Scale Kain-Frisch	MP06_CU11	101,06
WSM6	Kain-Frisch	MP06_CU01	101,71
Morrison	Kain-Frisch	MP10_CU01	105,45
Morrison	Multi-Scale Kain-Frisch	MP10_CU11	106,96
WSM7	Grell-Freitas	MP24_CU03	108,68
WSM7	Multi-Scale Kain-Frisch	MP24_CU11	109,45
Morrison	Grell-Freitas	MP10_CU03	109,67
WDM6	Grell-Freitas	MP16_CU03	121,47
WDM6	Kain-Frisch	MP16_CU01	121,60
WDM6	Multi-Scale Kain-Frisch	MP16_CU11	121,91
WSM7	Kain-Frisch	MP24_CU01	122,05
WDM7	Kain-Frisch	MP26_CU01	129,99
WDM7	Multi-Scale Kain-Frisch	MP26_CU11	130,30
WDM7	Grell-Freitas	MP26_CU03	130,38

Fonte: Projeto MoVaSC.

### **Análise do Diagrama de Taylor**

A Figura 3.3 apresenta o diagrama de Taylor para comparação do desempenho das diferentes parametrizações em todos os eventos e estações (pontos de controle) analisados. Os parâmetros estatísticos utilizados nesses estudos são compostos de um estado médio dos dez casos de simulações realizadas ao longo da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, considerando-se valores médios na área de estudo, a partir de todos os pontos de monitoramento ao longo da bacia.

**Figura 3.3** Diagrama de Taylor (2001) consolidado para todos os eventos e estações analisados.



Fonte: Projeto MoVaSC.

Neste estudo verificou-se que as melhores correlações médias obtidas foram maiores que 0,3, sendo representadas pelas parametrizações MP24\_CU11; MP10\_CU03 e MP10\_CU11. Na correlação, esses resultados médios são satisfatórios se comparados com os obtidos por Dantas (2019) e Zeyaeyan (2017). Considerando-se os distintos regimes de precipitação espalhados ao longo da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul (Silva, 2014; Sobral et al., 2018), que apresenta valores elevados de precipitação nas montanhas e valores baixos nas regiões de baixada, é possível atestar a destreza do modelo pela correlação demonstrada no extrato médio das comparações realizadas em toda bacia.

Para a raiz do erro quadrático médio (RMSE), os melhores conjuntos foram MP16\_CU03, MP16\_CU11 e MP16\_CU01. Os

conjuntos variaram entre 10 mm e 12 mm de RMSE no qualitativo médio geral previsto para a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul. Ao se avaliar o desvio padrão dos conjuntos, obtém-se os melhores valores providos pelos conjuntos MP16\_CU01, MP16\_CU03 e MP10\_CU11, ambos variando entre 8 mm e 15 mm de desvio. Considerando que eventos convectivos estão embebidos nos sistemas de tempo simulados, visando garantir simulações de circulação frontal, estacionária, além de processos convectivos isolados, os resultados permitem inferir que o modelo WRF produziu resultados quantitativos médios confiáveis de chuva na bacia, quando comparados com resultados obtidos em outros estudos (e.g., Silva e Dereczynski, 2014; Sobral et al., 2018).

Os conjuntos MP10\_CU11 apresentam melhor desempenho na correlação e no desvio padrão, enquanto MP16\_CU03 produzem os melhores resultados do erro quadrático médio e do desvio padrão.

### **Análise da variável binária categórica**

Na Tabela 3.6 são apresentadas as estatísticas de desempenho de cada conjunto de parametrização para cada um dos dez eventos descritos na Tabela 3.2. Neste tópico, os eventos foram agrupados conforme o tipo de instabilidade dos sistemas: convectivo (6 e 9), dinâmico/convectivo (1 e 2) ou dinâmicos (3, 4, 5, 7, 8 e 10). Nos eventos dinâmico/convectivos, os conjuntos MP10\_CU11, MP16\_CU01, MP16\_CU11, MP24\_CU01 e MP24\_CU11 refletem os melhores índices. Para os eventos convectivos, diversas configurações apresentam resultados promissores: MP06\_CU01, MP06\_CU03, MP06\_CU11, MP10\_CU01, MP10\_CU03, MP24\_CU01, MP24\_CU03, MP24\_CU11. Nos seis eventos associados a sistemas meteorológicos dinâmicos, os índices mostram os melhores valores para os eventos 5, 7 e 8. Os conjuntos que obtiveram resultados mais satisfatórios foram MP10\_CU11 e MP24\_CU01. Como ponto de atenção, cabe destacar que, de um modo geral, os índices associados aos eventos selecionados em condições apenas convectivas

são superiores aos índices de situações dinâmicas e convectivas/dinâmicas, fato esse que pode estar relacionado à escolha da parametrização de cúmulos na grade maior, conforme ilustrado por Comin et al. (2020). Analisando o desempenho dos conjuntos com todos os sistemas, destacam-se MP10\_CU11 e MP24\_CU01. Em negrito foram selecionados os melhores desempenhos dos conjuntos considerando margem de 20% de erro nas 4 estatísticas da “matriz de contingência”.

Tabela 3.6 Avaliação estatística categórica por evento.

Eventos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2016-02-16	2016-02-28	2016-10-13	2017-03-02	2017-11-16	2018-03-02	2018-03-19	2019-02-26	2019-04-06	2019-04-14	
MP06_CU01	BIAS	1,15	1,06	0,63	0,56	1,00	<b>1,00</b>	1,15	1,37	0,86	1,20
	POD	0,92	0,92	0,37	0,56	0,83	<b>1,00</b>	0,86	0,97	0,80	1,00
	FAR	0,67	0,38	0,40	0,00	0,50	<b>0,00</b>	0,33	0,35	0,08	0,60
	CSI	0,78	0,83	0,30	0,56	0,73	<b>1,00</b>	0,69	0,78	0,76	0,85
MP06_CU03	BIAS	1,23	1,06	0,90	0,72	1,11	<b>1,00</b>	1,29	1,13	1,05	1,03
	POD	1,00	0,92	0,63	0,67	0,89	<b>1,00</b>	1,00	0,93	0,86	0,83
	FAR	0,67	0,38	0,40	0,33	0,67	<b>0,00</b>	0,33	0,25	0,50	0,60
	CSI	0,83	0,83	0,50	0,62	0,72	<b>1,00</b>	0,83	0,80	0,73	0,70
MP06_CU11	BIAS	1,23	0,98	0,80	0,72	1,11	<b>1,00</b>	1,31	1,27	0,95	1,17
	POD	1,00	0,92	0,63	0,67	0,94	<b>1,00</b>	0,96	0,97	0,81	0,83
	FAR	0,67	0,25	0,30	0,33	0,50	<b>0,00</b>	0,42	0,30	0,42	0,60
	CSI	0,83	0,87	0,53	0,62	0,81	<b>1,00</b>	0,74	0,80	0,73	0,70
MP10_CU01	BIAS	1,23	0,98	0,70	0,72	1,00	<b>0,83</b>	1,11	1,07	<b>0,99</b>	1,08
	POD	1,00	0,92	0,53	0,67	0,83	<b>0,83</b>	0,78	0,87	<b>0,88</b>	0,88
	FAR	0,67	0,25	0,30	0,33	0,50	<b>0,00</b>	0,22	0,25	<b>0,17</b>	0,60
	CSI	0,83	0,87	0,50	0,62	0,72	<b>0,83</b>	0,65	0,73	<b>0,82</b>	0,75
MP10_CU03	BIAS	1,23	0,92	0,70	0,72	1,17	<b>0,83</b>	1,17	1,40	1,08	1,23
	POD	1,00	0,85	0,63	0,67	0,94	<b>0,83</b>	0,92	1,00	0,93	0,93
	FAR	0,67	0,25	0,20	0,33	0,67	<b>0,00</b>	0,17	0,35	0,33	0,70
	CSI	0,83	0,82	0,60	0,62	0,78	<b>0,83</b>	0,81	0,81	0,83	0,73
MP10_CU11	BIAS	1,23	<b>1,00</b>	0,60	0,72	1,17	0,75	1,21	1,20	0,99	1,20
	POD	1,00	<b>1,00</b>	0,53	0,67	0,94	0,75	0,92	1,00	0,85	0,80
	FAR	0,67	<b>0,00</b>	0,20	0,33	0,67	0,00	0,33	0,25	0,42	0,80
	CSI	0,83	<b>1,00</b>	0,50	0,62	0,78	0,75	0,74	0,87	0,76	0,65

MP16_CU01	BIAS	1,07	<b>0,85</b>	0,47	0,57	0,94	0,67	0,76	1,10	0,82	0,65
	POD	0,92	<b>0,85</b>	0,40	0,57	0,83	0,67	0,68	0,90	0,77	0,52
	FAR	0,50	<b>0,00</b>	0,20	0,00	0,33	0,00	0,06	0,25	0,08	0,40
	CSI	0,81	<b>0,85</b>	0,38	0,57	0,76	0,67	0,63	0,77	0,73	0,45
MP16_CU03	BIAS	1,17	1,03	0,60	0,72	1,06	0,92	1,15	1,27	0,74	0,73
	POD	0,93	0,89	0,53	0,67	0,83	0,92	0,86	0,97	0,64	0,60
	FAR	0,67	0,38	0,20	0,33	0,67	0,00	0,33	0,30	0,25	0,40
	CSI	0,78	0,79	0,50	0,62	0,69	0,92	0,70	0,80	0,59	0,52
MP16_CU11	BIAS	1,17	1,00	0,43	0,67	0,89	0,75	1,19	1,13	0,93	0,78
	POD	1,00	0,94	0,37	0,62	0,72	0,75	0,90	0,93	0,79	0,72
	FAR	0,33	0,25	0,20	0,33	0,50	0,00	0,33	0,25	0,42	0,20
	CSI	0,89	0,90	0,33	0,57	0,62	0,75	0,73	0,80	0,71	0,67
MP24_CU01	BIAS	1,15	<b>0,92</b>	0,63	0,62	1,06	<b>1,00</b>	1,21	1,10	0,82	1,20
	POD	1,00	<b>0,92</b>	0,47	0,62	0,89	<b>1,00</b>	0,92	0,90	0,77	1,00
	FAR	0,50	<b>0,00</b>	0,30	0,00	0,50	<b>0,00</b>	0,33	0,25	0,08	0,60
	CSI	0,88	<b>0,92</b>	0,43	0,62	0,77	<b>1,00</b>	0,74	0,77	0,73	0,85
MP24_CU03	BIAS	1,07	1,06	0,90	0,72	1,06	<b>1,00</b>	1,29	1,37	1,08	1,03
	POD	0,83	0,92	0,73	0,67	0,89	<b>1,00</b>	1,00	0,97	0,93	0,83
	FAR	0,67	0,38	0,30	0,33	0,50	<b>0,00</b>	0,33	0,35	0,33	0,60
	CSI	0,72	0,83	0,63	0,62	0,76	<b>1,00</b>	0,83	0,78	0,83	0,70
MP24_CU11	BIAS	1,17	1,06	0,80	0,72	1,06	<b>1,00</b>	1,25	1,17	1,02	1,20
	POD	1,00	0,92	0,73	0,67	0,89	<b>1,00</b>	0,96	0,87	0,88	0,90
	FAR	0,33	0,38	0,20	0,33	0,50	<b>0,00</b>	0,33	0,30	0,42	0,70
	CSI	0,89	0,83	0,70	0,62	0,77	<b>1,00</b>	0,79	0,75	0,79	0,72
MP26_CU01	BIAS	1,15	0,82	0,60	0,47	0,78	<b>0,58</b>	0,86	1,03	0,79	0,63
	POD	1,00	0,75	0,53	0,47	0,72	<b>0,58</b>	0,78	0,73	0,73	0,57
	FAR	0,50	0,25	0,20	0,00	0,17	<b>0,00</b>	0,06	0,30	0,08	0,20
	CSI	0,88	0,72	0,50	0,47	0,69	<b>0,58</b>	0,72	0,62	0,69	0,53
MP26_CU03	BIAS	1,15	0,87	0,43	0,52	1,11	<b>0,83</b>	0,79	1,17	0,91	0,78
	POD	0,92	0,80	0,37	0,47	0,89	<b>0,83</b>	0,63	0,87	0,78	0,55
	FAR	0,67	0,25	0,20	0,33	0,67	<b>0,00</b>	0,11	0,30	0,42	0,50
	CSI	0,78	0,77	0,33	0,43	0,74	<b>0,83</b>	0,58	0,75	0,69	0,48
MP26_CU11	BIAS	1,23	0,95	0,20	0,63	0,94	<b>0,75</b>	1,11	1,27	0,82	0,77
	POD	1,00	0,89	0,20	0,57	0,78	<b>0,75</b>	0,86	0,97	0,68	0,53
	FAR	0,67	0,25	0,00	0,33	0,50	<b>0,00</b>	0,17	0,30	0,42	0,50
	CSI	0,83	0,85	0,20	0,52	0,68	<b>0,75</b>	0,75	0,80	0,60	0,45

Fonte: Projeto MoVaSC.

A Tabela 3.7 apresenta as estatísticas de desempenho médio ao longo dos dez eventos estudados de cada uma das parametrizações, associadas às estações consideradas. São apresentadas seis estações que representam o comportamento das parametrizações ao longo da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul. As colunas foram organizadas de forma a representar o comportamento das parametrizações desde a região mais a montante (sudoeste) da bacia, que inclui as cidades de Taubaté e Cachoeira Paulista, localizadas no estado de São Paulo, passando pela região central da bacia hidrográfica, por Resende e Teresópolis e, por fim, mais a jusante (nordeste), pelos municípios de Muriaé e São Tomé. Uma análise geral aponta uma queda de desempenho das parametrizações ao longo da bacia do Paraíba do Sul, ou seja, no eixo principal sudoeste-leste, com maiores valores médios de POD e CSI para as estações Taubaté e Cachoeira Paulista e, com menores valores, para as estações de Muriaé e São Tomé. Este resultado é promissor considerando que a região de maior contribuição de precipitação para o rio Paraíba do Sul é a localizada a montante da bacia (Sobral et al., 2018; Silva e Dereczynski, 2014).

Os conjuntos MP10\_CU03, MP24\_CU01, MP24\_CU03 e MP24\_CU11 tiveram os maiores valores da média de CSI ao longo da bacia hidrográfica estudada. Uma análise mais detalhada do desempenho das parametrizações em cada ponto de monitoramento demonstra que existe alta variabilidade de desempenho das parametrizações ao longo da bacia, conforme (i) enfatizado pelos valores em negrito na Tabela 3.7 e (ii) pelo fato de que esse padrão de comparação pontual caracteriza um extremo para a avaliação do modelo, assim ilustrando a destreza do modelo WRF nas parametrizações destacadas. Contudo, é possível inferir que os esquemas que utilizam as parametrizações de microfísica MP06, MP10 e MP24 são os que apresentam maior consistência ao longo da bacia do rio Paraíba do Sul.

**Tabela 3.7** Estatísticas categóricas médias por estação, considerando todos os eventos estudados. Em negrito foram destacados os melhores desempenhos para cada localidade, considerando-se o valor do descritor estatístico CSI como comparação. Para o caso de valores iguais, ambas as parametrizações foram destacadas. Os números de 1 a 6, abaixo dos nomes das cidades, indicam a sua localização, conforme mostrado na Figura 3.1.

Parametrização	Erro	Cachoeira						Média
		Taubaté 1	Paulista 2	Resende 3	Teresópolis 4	Muriaé 5	São Tomé 6	
MP06_CU01	BIAS	<b>1,08</b>	0,95	1,08	1,11	0,85	1,00	1,01
	POD	<b>0,96</b>	0,85	0,91	0,86	0,67	0,67	0,82
	FAR	<b>0,31</b>	0,30	0,30	0,58	0,33	0,18	0,33
	CSI	<b>0,88</b>	0,77	0,82	0,71	0,59	0,51	0,71
MP06_CU03	BIAS	1,06	<b>1,18</b>	1,10	1,28	1,04	0,75	1,07
	POD	0,90	<b>1,00</b>	0,93	1,00	0,82	0,58	0,87
	FAR	0,38	<b>0,60</b>	0,30	0,75	0,44	0,10	0,43
	CSI	0,80	<b>0,86</b>	0,83	0,80	0,71	0,47	0,75
MP06_CU11	BIAS	0,99	1,03	1,15	1,24	0,99	1,00	1,07
	POD	0,86	0,95	0,98	0,97	0,83	0,58	0,86
	FAR	0,31	0,30	0,30	0,75	0,39	0,31	0,39
	CSI	0,79	0,89	0,88	0,77	0,73	0,40	0,74
MP10_CU01	BIAS	0,98	0,98	1,18	1,12	0,84	0,75	0,98
	POD	0,81	0,88	0,95	0,97	0,69	0,58	0,81
	FAR	0,38	0,30	0,33	0,50	0,28	0,10	0,32
	CSI	0,72	0,81	0,85	0,85	0,63	0,50	0,73
MP10_CU03	BIAS	1,05	1,18	1,15	1,11	0,93	1,00	1,07
	POD	0,89	1,00	0,98	0,96	0,83	0,58	0,87
	FAR	0,38	0,60	0,30	0,50	0,22	0,26	0,38
	CSI	0,79	0,86	0,88	0,85	0,77	0,40	<b>0,76</b>
MP10_CU11	BIAS	0,99	1,08	1,15	1,12	0,94	0,83	1,02
	POD	0,86	0,90	0,98	0,97	0,81	0,50	0,84
	FAR	0,31	0,60	0,30	0,50	0,33	0,26	0,38
	CSI	0,78	0,77	0,88	0,85	0,73	0,39	0,73
MP16_CU01	BIAS	0,85	0,83	0,96	<b>1,04</b>	0,49	0,58	0,79
	POD	0,73	0,77	0,84	<b>0,96</b>	0,46	0,50	0,71
	FAR	0,31	0,20	0,26	<b>0,17</b>	0,06	0,04	0,17
	CSI	0,67	0,73	0,76	<b>0,90</b>	0,45	0,44	0,66

MP16_CU03	BIAS	0,89	1,05	1,06	1,08	0,80	0,75	0,94
	POD	0,78	0,87	0,89	0,93	0,67	0,50	0,77
	FAR	0,31	0,60	0,30	0,50	0,28	0,14	0,36
	CSI	0,72	0,75	0,80	0,82	0,58	0,36	0,67
MP16_CU11	BIAS	1,00	0,98	1,05	1,03	0,71	0,67	0,91
	POD	0,89	0,83	0,90	0,88	0,63	0,50	0,77
	FAR	0,31	0,50	0,19	0,50	0,22	0,10	0,30
	CSI	0,81	0,73	0,82	0,77	0,58	0,39	0,68
MP24_CU01	BIAS	1,06	0,95	1,08	1,09	0,83	<b>0,83</b>	0,97
	POD	0,94	0,85	0,91	0,97	0,71	<b>0,67</b>	0,84
	FAR	0,31	0,30	0,30	0,33	0,22	<b>0,10</b>	0,26
	CSI	0,85	0,77	0,81	0,88	0,66	<b>0,56</b>	<b>0,76</b>
MP24_CU03	BIAS	1,06	<b>1,13</b>	<b>1,13</b>	1,28	1,00	0,92	1,09
	POD	0,90	<b>1,00</b>	<b>0,98</b>	1,00	0,84	0,58	0,88
	FAR	0,38	<b>0,40</b>	<b>0,24</b>	0,75	0,39	0,18	0,39
	CSI	0,80	<b>0,90</b>	<b>0,89</b>	0,80	0,76	0,43	<b>0,76</b>
MP24_CU11	BIAS	<b>1,08</b>	1,05	1,11	1,19	<b>1,06</b>	0,83	1,05
	POD	<b>0,96</b>	0,90	0,96	1,00	<b>0,90</b>	0,50	0,87
	FAR	<b>0,31</b>	0,50	0,19	0,67	<b>0,39</b>	0,22	0,38
	CSI	<b>0,88</b>	0,79	0,88	0,85	<b>0,80</b>	0,38	<b>0,76</b>
MP26_CU01	BIAS	0,75	0,83	0,94	0,99	0,60	0,58	0,78
	POD	0,66	0,77	0,84	0,86	0,57	0,42	0,69
	FAR	0,19	0,20	0,20	0,33	0,06	0,08	0,18
	CSI	0,61	0,73	0,78	0,78	0,55	0,38	0,64
MP26_CU03	BIAS	0,91	0,88	0,96	0,97	0,70	0,67	0,85
	POD	0,83	0,70	0,79	0,81	0,58	0,42	0,69
	FAR	0,19	0,60	0,30	0,50	0,33	0,17	0,35
	CSI	0,78	0,61	0,71	0,71	0,52	0,38	0,62
MP26_CU11	BIAS	0,77	1,00	0,96	0,91	0,82	0,75	0,87
	POD	0,73	0,85	0,79	0,76	0,70	0,42	0,71
	FAR	0,06	0,50	0,30	0,50	0,33	0,22	0,32
	CSI	0,70	0,76	0,70	0,65	0,64	0,28	0,62

Fonte: Projeto MoVaSC.

A Tabela 3.8 apresenta um resumo das estatísticas médias de desempenho de cada uma das parametrizações associadas aos eventos e estações analisados. As médias foram obtidas a partir dos dados comparados em cada ponto disponível para monitoramento, com as saídas do modelo WRF, durante as dez simulações efetuadas. Na comparação entre as estatísticas categóricas médias e as

parametrizações, conforme ilustrado na Tabela 3.8, seis combinações de esquemas apresentam os melhores desempenhos na média dos índices BIAS, POD e CSI: MP06\_CU03, MP06\_CU11, MP10\_CU03, MP10\_CU11, MP24\_CU01; MP24\_CU03 e MP24\_CU11. Os conjuntos MP10\_CU01 e MP16\_CU03 também apresentam BIAS satisfatórios, no entanto tiveram valores menores nos índices POD e CSI, quando comparados com os conjuntos citados anteriormente. Os conjuntos MP16\_CU01 e MP26\_CU01 indicam resultados do FAR mais próximos do ideal. Considerando uma análise conjunta de todos os índices, destacam-se MP10\_CU03 e os esquemas de MP24 (MP24\_CU01; MP24\_CU03 e MP24\_CU11), embora estes não reflitam os melhores resultados do FAR.

Na Tabela 3.8, os valores em negrito são os que mais bem agrupam os índices BIAS, POD e CSI e os melhores para o índice FAR.

**Tabela 3.8** Estatística categórica por parametrização.

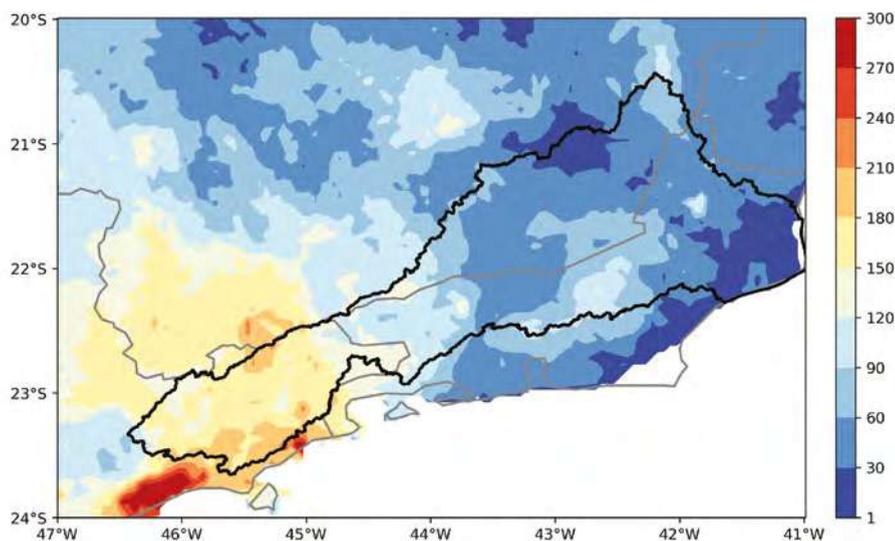
Parametrização	BIAS	POD	FAR	CSI
MP06_CU01	1,01	0,82	0,33	0,72
MP06_CU03	<b>1,07</b>	<b>0,87</b>	0,41	<b>0,75</b>
MP06_CU11	<b>1,07</b>	<b>0,87</b>	0,38	0,75
MP10_CU01	0,98	0,82	0,32	0,73
MP10_CU03	<b>1,06</b>	<b>0,88</b>	0,35	<b>0,77</b>
MP10_CU11	<b>1,02</b>	<b>0,85</b>	0,37	<b>0,75</b>
MP16_CU01	0,79	0,70	<b>0,18</b>	0,65
MP16_CU03	0,93	0,77	0,34	0,67
MP16_CU11	0,91	0,77	0,28	0,69
MP24_CU01	<b>0,98</b>	<b>0,84</b>	0,26	<b>0,76</b>
MP24_CU03	<b>1,08</b>	<b>0,88</b>	0,38	<b>0,77</b>
MP24_CU11	<b>1,06</b>	<b>0,88</b>	0,36	<b>0,78</b>
MP26_CU01	0,78	0,69	<b>0,17</b>	0,64
MP26_CU03	0,85	0,69	0,33	0,63
MP26_CU11	0,87	0,71	0,30	0,63

Fonte: Projeto MoVaSC.

### **Distribuição espacial da precipitação (Simulações WRF versus CHIRPS)**

A Figura 3.4 apresenta a distribuição de precipitação sobre a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e seu entorno. O período analisado foi condicionado à passagem de uma frente fria, cujo sentido do deslocamento usual é Sudoeste–Nordeste. Uma característica das frentes frias que induzem precipitação no Brasil, à medida que estes sistemas avançam, é identificada pelo seu deslocamento para o Oceano Atlântico, conseqüentemente induzindo menos chuvas nas regiões de latitudes mais baixas, dependendo se o sistema é mais ou menos continental (Lanfredi e Camargo, 2018). Esse padrão pode ser visualizado na distribuição de precipitação estimada pelo produto CHIRPS, mostrado na Figura 3.4. Outro fator relevante e que influencia o regime de chuva na bacia do Paraíba do Sul é a sua topografia (Brasiliense et al., 2020). Essa influência da topografia também se encontra destacada na Figura 3.4, que permite constatar que há núcleos locais de precipitação acumulada nas Serras. De maneira oposta, nas porções mais a leste da bacia, são verificados os menores volumes acumulados, destacando-se a região da foz do rio Paraíba do Sul, próximo da localização  $41.5^{\circ}\text{W}$  e  $22^{\circ}\text{S}$ , indicada na Figura 3.4, com predomínio espacial de valores inferiores a 30 mm.

**Figura 3.4** Distribuição espacial da precipitação acumulada (mm) entre 02/03/2017 e 09/03/2017, a partir do CHIRPS. (O contorno em preto delimita a área da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul e o em cinza o limite entre os estados).



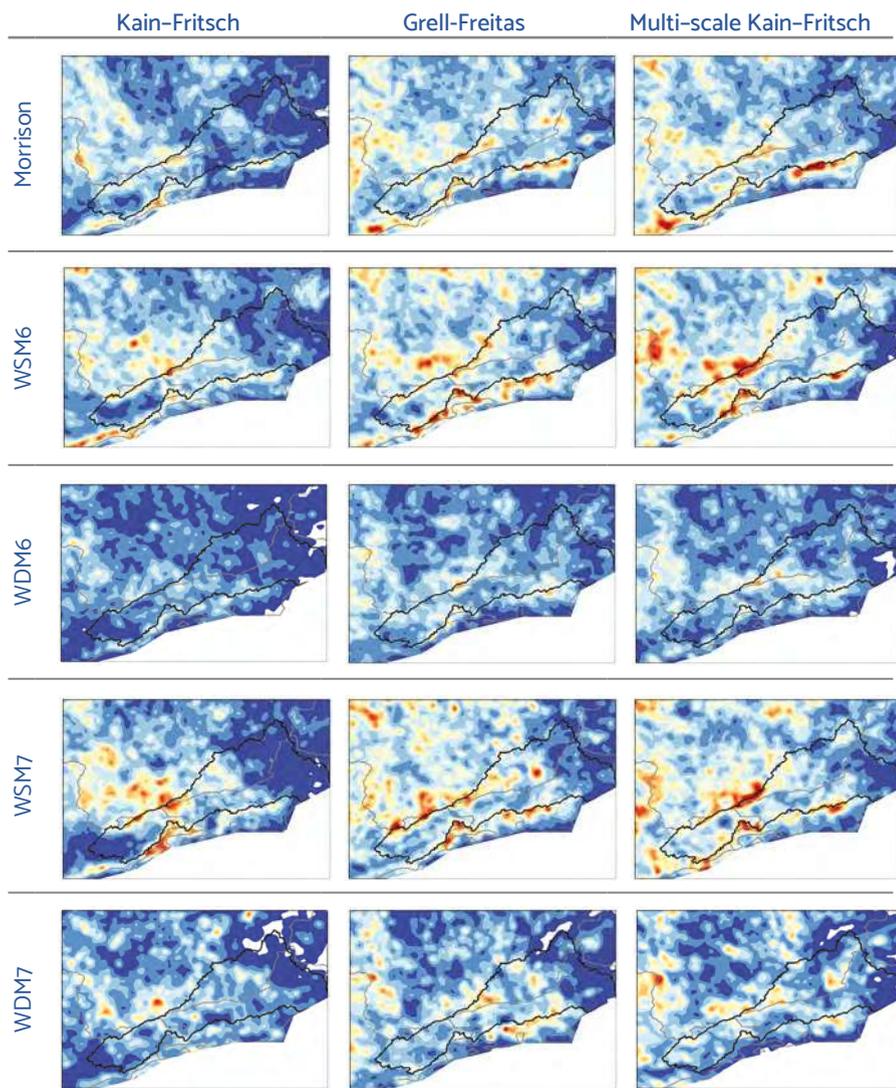
Fonte: Projeto MoVaSC.

A Figura 3.5 apresenta os resultados obtidos para os 15 experimentos realizados, utilizando-se o software aberto WRF. Salienta-se que foi aplicada uma máscara para os valores de precipitação sobre o oceano, de modo a tornar a visualização mais próxima do CHIRPS, conforme mostrado na Figura 3.4, visto que não há estimativas de precipitação sobre o oceano para este último produto. Como pode ser notado na Figura 3.5, identificar o melhor conjunto paramétrico, referente à distribuição espacial de precipitação, não constitui tarefa trivial. De uma forma geral, as principais características indicadas para a distribuição da precipitação com o produto CHIRPS também são verificadas para os experimentos com o WRF, referenciados na Figura 3.5.

Os núcleos mais intensos de precipitação na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul ocorrem nas regiões de maiores altitudes,

isto é, na Serra da Mantiqueira, Serra do Mar e Serra dos Órgãos. Ao contrário, nas porções mais a leste da bacia são verificados os menores volumes acumulados, assim como pode ser verificado nas estimativas via CHIRPS. Apesar de os experimentos com o WRF indicarem sensibilidade aos principais sinais representados pelo CHIRPS, verifica-se que a maioria dos experimentos tendem a superestimar os valores de precipitação nas regiões de maior altitude, exceto os experimentos com o esquema WDM6 (MP16) para microfísica, que subestimam a precipitação na Serra do Mar e Serra da Mantiqueira. O conjunto paramétrico que mais se assemelha aos resultados do CHIRPS é o esquema cúmulos Multi-scale Kain-Fritsch, em conjunto com o esquema microfísica Morrison (MP10\_CU11). Uma segunda opção factível refere-se ao esquema cúmulos Grell-Freitas, com o esquema microfísica Morrison (MP10\_CU03). Este segundo é considerado inferior ao primeiro por apresentar núcleos de precipitação na porção nordeste da bacia e na região de sua foz, núcleos esses que não são verificados por meio do CHIRPS.

Figura 3.5 Distribuição espacial da precipitação acumulada (mm) entre 02/03/2017 e 09/03/2017 para os 15 experimentos realizados com o WRF.



Fonte: Projeto MoVaSC.

## Considerações finais

A análise dos resultados das dez simulações de sistemas de tempo (*weather*) realizadas permitiu avaliar as diferentes parametrizações para microfísica e cúmulos associadas ao modelo WRF, confirmando ser possível inferir que os conjuntos de parametrizações representam de forma adequada os regimes de precipitação simulados na bacia do rio Paraíba do Sul. Todavia, ao aplicar testes objetivos, distintos resultados são obtidos.

O diagrama de Taylor, mostrado na Figura 3.3, sugere que os conjuntos MP24\_CU11; MP10\_CU03 e MP10\_CU11 apresentaram a melhor correlação, cujos resultados médios mostraram-se condizentes com os obtidos por Dantas et al. (2019) e Zeyaeyan et al. (2017). Na avaliação do RMSE, os conjuntos MP16\_CU03, MP16\_CU11 e MP16\_CU01 foram os que apresentaram os melhores valores, enquanto, para o desvio padrão, os conjuntos MP16\_CU01, MP16\_CU03 e MP10\_CU11 são os que apresentaram o melhor resultado. Portanto, os conjuntos MP10\_CU11 apresentam melhor desempenho na correlação e no desvio padrão, enquanto MP16\_CU03 produzem os melhores resultados para o RMSE e para o desvio padrão.

Na sequência de uma análise objetiva, são os eventos dinâmico/convectivos que apresentam um grande número de esquemas com desempenho adequado, refletindo a capacidade de previsão das chuvas em distintas condições meteorológicas, a exemplo das precipitações frequentemente observadas na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul.

Na análise do desempenho espacial dos esquemas ao longo da bacia, observa-se que os esquemas com as parametrizações de microfísica MP10 e MP24 são os que apresentam os melhores resultados, embora não exista uma parametrização de cúmulos específica a ser destacada como a melhor.

O comportamento médio dos esquemas de parametrização ao longo dos dez eventos simulados, e entre todos os pontos de controle utilizados, aponta que os esquemas com microfísica MP06,

MP10 e MP24 são os que possuem o melhor poder de detecção dos eventos de precipitação na região.

As análises subjetivas realizadas comprovaram concordância da maior parte dos elementos de parametrização na localização das chuvas mais intensas, localizadas nas serras e na região a montante da bacia. De forma similar, a destreza de o modelo WRF gerar os menores valores previstos foi ilustrada a leste da bacia, a jusante, onde o processo de multiuso da água pode ser considerado completo. A variação espacial apresentada nesse caso de um único evento com duração de sete dias, alinhada com aquela identificada pelo CHIRPS no campo integrador desse acumulado, ilustra a habilidade de o modelo computacional identificar a distribuição espacial desse elemento ao longo de sua grande extensão territorial.

Ao finalizar este capítulo, é oportuno mencionar que os dados atmosféricos gerados pelo modelo WRF são os dados de previsão do tempo (*weather forecast*) que irão alimentar de forma acoplada o modelo hidrológico SWAT, assim viabilizando a previsão integrada da vazão hídrica de sete dias em diferentes sub-bacias de interesse, ao longo da bacia do Paraíba do Sul, discutida nos capítulos 5 e 6.

## Referências

- AHMAD, S. K.; HOSSAIN, F. 2020. Maximizing energy production from hydropower dams using short-term weather forecasts. *Renewable Energy*, 146, p. 1560-1577. ISSN: 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.126.
- ANABOR, V.; STENSURU, D. J.; MORAES, O. L. de. 2008. Serial upstream-propagating mesoscale convective system events over southeastern South America. *Monthly Weather Review*, v. 136, n. 8, p. 3087-3105. DOI: <https://doi.org/10.1175/2007MWR2334.1>.
- ÁVILA, A.; JUSTINO, F.; WILSON, A.; BROMWICH, D.; AMORIM, M. 2016. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. *Environmental Research Letters*, 11(11), p. 114029. DOI: 10.1088/1748-9326/11/11/114029.
- BAE, S. Y.; HONG, S. Y.; TAO, W. K. 2018. Development of a single-moment cloud microphysics scheme with prognostic hail for the

- Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, (55)2, p. 233–245. DOI: 10.1007/s13143-018-0066-3.
- BANNON, P. R. 1984. Effects of stratification on surface frontogenesis: warm and cold fronts. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(12), p. 2021–2026. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<2021:EOSOSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<2021:EOSOSF>2.0.CO;2).
- BRASILIENSE, C. S.; DERECZYNSKI, C. P.; SATYAMURTY, P.; CHOU, S. C.; CALADO, R. N. 2020. Climatologias da Temperatura do Ar e da Precipitação na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Região Sudeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*. ISSN: 0101-9759 e-ISSN: 1982-3908 (43) 1, p. 355–365.
- BLUESTEIN, H. B.; JAIN, M. H. 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: severe squall lines in Oklahoma during the spring. *Journal of the Atmospheric Sciences*. (42) 16, p. 1711–1732. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1985\)042<1711:FOMLOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1985)042<1711:FOMLOP>2.0.CO;2).
- CHEN, M. 2021. Application of WRF: How to get better performance. *National Center for Atmospheric Research*, Boulder, CO, USA. Retrieved April 25. Disponível em: [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/202001/chen\\_best\\_practices.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/202001/chen_best_practices.pdf).
- COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. 2016. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, Issue 3–4, 125, p. 769–784. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1540-9>.
- COMIN, A. N.; JUSTINO, F.; PEZZI, L. et al. 2020. Extreme rainfall event in the Northeast coast of Brazil: a numerical sensitivity study. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, p. 141–162. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00703-020-00747-0>.
- DANTAS, V. A.; SILVA FILHO, V. P.; SANTOS, E. B.; GANDU, A. W. 2019. Testando diferentes esquemas da Parametrização Cumulus do modelo WRF, para a região norte Nordeste do Brasileiro (Testing different WRF Cumulus parameterization schemes for the north-eastern region of Brazil). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12, 03, p. 754–767. DOI: 10.26848/rbgf.v12.3.p754-767
- DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S.; MACHADO, C. O. 2009. Climatologia da precipitação no Município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24, 1, p. 24–38.
- DEUSDARA-LEAL, K. R.; CUARTAS, L. A.; ZHANG, R.; MOHOR G. S.; CARVALHO L. V. C.; NOBRE C. A.; MENDIONDO, E. M.; BROEDEL, E.; SELUCHI, M. E.; ALVALÁ, R. C. S. 2020. Implications of the New Operational Rules for Cantareira Water System: Re-Reading the 2014–2016 Water Crisis. *Journal of Water Resource and Protection*, 12, p.

- 261–274. ISSN Online: 1945–3108 ISSN Print: 1945–3094. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2020.124016>.
- EPE 2020. Brazilian Energy Balance 2020 Year 2019 – *Empresa de Pesquisa Energética (EPE)*, Rio de Janeiro, 2020. Retrieved May 10, 2021, from [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020\\_sp.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf).
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- GRELL, G. A.; FREITAS, S. R. 2014. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, p. 5233–5250. DOI:10.5194/acp-14-5233-2014.
- HONG, S.-Y.; LIM, J.-O. J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42, p. 129–151.
- HONG, S.-Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. 2006. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), p. 2318–2341. DOI:10.1175/MWR3199.1.
- HOUZE, R. A. 1993. Mesoscale Convective Systems. In: HOUZE R. A. *Cloud Dynamics*. Academic Press Inc., 53, p. 334–404.
- HOUZE, R. A. 2004. Mesoscale convective systems. *Review of Geophysics*, 42, 4. <https://doi.org/10.1029/2004RG000150>
- IACONO, M. J.; DELAMERE, J. S.; MLAWER, E. J.; SHEPHARD, M. W.; CLOUGH, S. A.; COLLINS, W. D. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research*, 113, D13103. DOI:10.1029/2008JD009944
- JIMÉNEZ, P. A.; DUDHIA, J.; GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.; NAVARRO, J.; MONTÁVEZ, J. P.; GARCÍA-BUSTAMANTE, E. 2012. A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation. *Monthly Weather Review*, 140(3), p. 898–918.
- KAIN, J. S. 2004. The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), p. 170–181. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2).
- KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. 2007. Relation of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. *International Journal of Climatology*, 27, 4, p. 531–540. DOI:10.1002/joc.1417

- LANFREDI, I. S.; CAMARGO, R. 2018. Classification of Extreme Cold Incursions over South America. *Weather and Forecasting*, (33) 5. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0159.1>
- LIM, K.-S.; HONG, S.-Y. 2010. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly Weather Review*, 138, p. 1587-1612. DOI:10.1175/2009MWR2968.1
- LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P. 2010. Post - Summer heavy rainfall events in Southeast Brazil associated with South Atlantic Convergence Zone. *Atmospheric Science Letters*. Wiley Online Library, 11, 1, p. 13-20. DOI: <https://doi.org/10.1002/asl.246>
- LIN, Y.-L. 2007. *Mesoscale Dynamics*. New York: Cambridge University Press.
- MARENGO, J.; CORNEJO, A.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C.; SEA, W. 1977. Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. *Monthly Weather Review*, 125, p. 2759-2786.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. 2005. Tendências Hidrológicas da Bacia do Rio Paraíba do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20, 2, p. 215-226.
- MOREIRA DE SOUSA, J.; CANDIDO, L. A.; SILVA, J. T.; ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T.; MANZI, A. M.; SOUZA, R. A. F.; SOUZA, E. B.; VIEIRA, S. O. 2018. Evaluation of the WRF ability to represent the precipitation in the Amazon using a different scale. *Revista Brasileira de meteorologia*, 34, 2, DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863340029>
- MORRISON, H.; THOMPSON, G.; TATARSKII, V. 2009. 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*, 137(3), p. 991-1007. DOI: 10.1175/2008MWR2556.1
- NIMMER, E. 1979. Clima da Região Sudeste. In: Geografia do Brasil. Rio de Janeiro - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE.
- NIU, G.-Y.; YANG, Z.-L.; MITCHELL, K. E.; CHEN, F.; MICHAEL, B. E.; BARLAGE, M.; KUMAR, A.; MANNING, K.; NIYOGI, D.; ROSERO, E.; TEWARI, M.; XIA, Y. 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research*, 116, D12109. DOI:10.1029/2010JD015139
- PARKER, M. D.; JOHNSON, R. H. 2000. Organizational Modes of Midlatitude Mesoscale Convective Systems. *Monthly Weather Review*, 128(10), p. 3413-3436. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129 <3413:OMOMMC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<3413:OMOMMC>2.0.CO;2)

- QUADRO, M. F. L. Case study of the South Atlantic convergence zone (SACZ) over the South America. (1999). *Revista Brasileira de Geofísica*, 17 (2-3). DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X1999000200009>.
- RAMOS D. N. S.; LYRA, R. F.; SILVA JUNIOR, R. S. 2013. Previsão do vento utilizando o modelo atmosférico WRF para o estado de Alagoas. *Revista Brasileira de meteorologia*, 28 (2). DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000200005>.
- RIBEIRO, G. L. M.; HÄRTER, F.; QUADROS, R. S.; BUSKE, D.; MEDEIROS, O. 2018. WRF Model Initialization Applied to a Case of Explosive Cyclogenesis Case in the Southern Region of Brazil. *American Journal of Environmental Engineering*, 8(4), p. 88-98 DOI: 10.5923/j.ajee.20180804.02.
- SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E. J. 2007. Mesoscale Convective Systems over Southeastern South America and Their Relationship with the South American Low-Level Jet. *Monthly Weather Review*, 135(4), p. 1290-1309. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3305.1>
- SATYAMURTY, P.; DE MATTOS, L. F. 1989. Climatological Lower Tropospheric Frontogenesis in the Midlatitudes Due to Horizontal Deformation and Divergence. *Monthly Weather Review*, 117(6), p. 1355-1364. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1355:-CLTFIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1355:-CLTFIT>2.0.CO;2)
- SHARMA, K.; ASHRIT, R.; EBERT, E; MITRA, A.; BHATLA, R.; IYENGAR, G.; RAJAGOPAL, E. N. 2019. Assessment of Met Office Unified Model (UM) quantitative precipitation forecasts during the Indian summer monsoon: Contiguous Rain Area (CRA) approach. *Journal of Earth System Science*, 128, 4 c. DOI: 10.1007/s12040-018-1023-3.
- SILVA W. L.; DEREZCZYNSKI, C. P. 2014. Caracterização Climatológica e Tendências Observadas em Extremos Climáticos no Estado do Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 37, n. 2, p. 123-138. ISSN: 0101-9759 e-ISSN: 1982-3908.
- SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; LIU, Z.; BERNER, J.; WANG, W.; POWERS, J. G.; DUDA, M. G.; BARKER, D. M.; HUANG, X.-Y. 2019. A Description of the Advanced Research WRF Version 4. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR*. DOI:10.5065/1dfh-6p97.
- SOBRAL, B. S.; OLIVEIRA-JUNIOR, J. F.; GOIS, G.; TERASSI, P. M. B.; MUNIZ-JUNIOR, J. G. R. 2018. Variabilidade Espaço-temporal e Interanual Da Chuva No Estado Do Rio De Janeiro. *Revista Brasileira de Climatologia*, 14, 22. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55592>.
- TAYLOR, K. E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, 106(D7), p. 7183-7192. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2000JD900719>.

- WARNER, T. T. 2011. Quality Assurance in Atmospheric Modeling. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(12), p. 1601-1610. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00054.1>.
- ZEYAEYAN, S.; FATTAHI, E.; RANJBAR, A.; AZADI, M.; VAZIFEDOUST, M. 2017. Evaluating the Effect of Physics Schemes in WRF Simulations of Summer Rainfall in North West Iran. *Climate*, (5) 48. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli5030048>.
- ZHENG, Y.; ALAPATY, K.; HERWEHE, J. A.; DEL GENIO, A. D.; NIYOI, D. 2016. Improving High-Resolution Weather Forecasts Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model with an Updated Kain-Fritsch Scheme. *Monthly Weather Review*, 144(3), p. 833-860. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0005.1>.
- ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V.; LIEBMAN, B.; SILVA DIAS, M. A. F. 2016. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. *International Journal of Climatology*, 37, 5, p. 2269-2279. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4840>.



# DINÂMICA DA TAXA DE SEDIMENTAÇÃO: ESTRATÉGIA DE AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DOS RESERVATÓRIOS DO COMPLEXO HIDRELÉTRICO

## Módulo temático assoreamento

Este capítulo apresenta e discute os resultados associados ao desenvolvimento do módulo temático *assoreamento* do projeto de P&D MoVaSC, cujas atividades fundamentaram um amplo estudo de caso em dois reservatórios da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, que são reservatórios de interesse estratégico para a concessionária Light Energia S.A. Mais especificamente, os reservatórios de Santana (reservatório de passagem, para alimentação do reservatório de Vigário) e o de Vigário (reservatório de acumulação de água do complexo hidrelétrico de Piraí/RJ). No contexto da pesquisa realizada, foram feitos cinco estudos investigativos, a seguir caracterizados.

- Batimetria nos reservatórios de Santana e Vigário.
- Amostragem de testemunhos sedimentares para análise de metais.

- Variação temporal da velocidade de sedimentação com base na técnica de datação pelo  $^{210}\text{Pb}$ .
- Medição da taxa de sedimentação por armadilhas de sedimentos.
- Pesquisa da existência de correlação entre a turbidez da água e a concentração de material particulado em suspensão.

Os resultados mais impactantes de cada um desses estudos são apresentados e discutidos em seções subseqüentes deste capítulo.

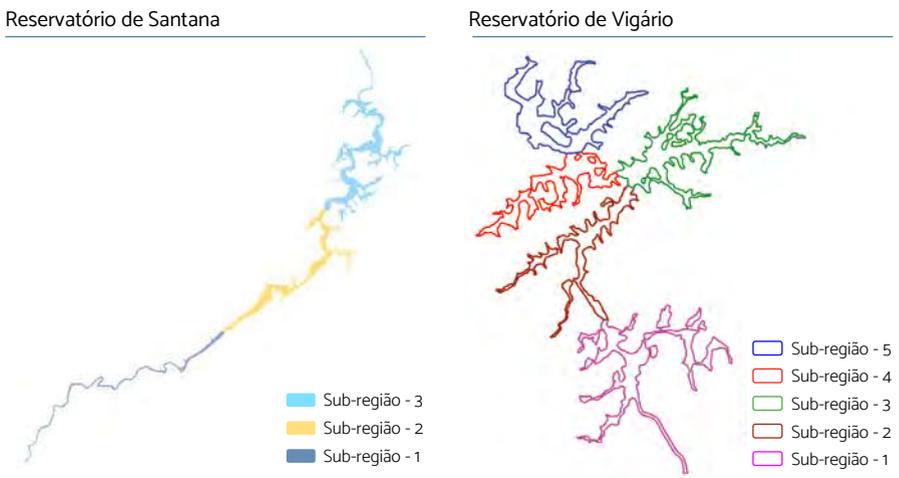
### **Batimetria nos reservatórios de Santana e Vigário**

Uma análise de dados batimétricos<sup>1</sup> referentes a um período de dezesseis anos (2001 a 2017) permitiu determinar a velocidade de sedimentação em diferentes trechos dos reservatórios de Santana e Vigário. Como fundamento deste estudo, o reservatório de Santana foi subdividido em 3 sub-regiões demarcadas, enquanto o reservatório de Vigário em 5 sub-regiões, permitindo calcular os volumes de água e de material assoreados e estimar a velocidade média de sedimentação nesses reservatórios. As imagens da Figura 4.1 ilustram, respectivamente, as sub-regiões demarcadas do estudo para os reservatórios de Santana e de Vigário.

---

<sup>1</sup> Por encomenda da Light Energia S.A., levantamentos batimétricos foram realizados pela empresa Hidrocart Cartografia Ltda. (2001) e pela Rural Tech – Serviços Topográficos e Hidrográficos (2017). O cálculo batimétrico realizado teve por fundamento a elaboração de uma curva anual de assoreamento entre os anos de 2001 (06 a 16 de abril) e 2017 (13 de janeiro a 14 de fevereiro), fazendo-se uso do software Hypack®, da empresa norte-americana Xylem Inc.

Figura 4.1 Sub-regiões demarcadas dos reservatórios de Vigário e Santana.



Fonte: Projeto MoVaSC.

As medições de profundidade nos reservatórios, expressas cartograficamente por curvas batimétricas que unem pontos de mesma profundidade com equidistâncias verticais, semelhantes às curvas de nível topográficas, permitiram caracterizar a topografia do fundo dos reservatórios. Do processamento desses dados foi possível calcular o assoreamento (sedimentos depositados no fundo), a sua capacidade volumétrica e o volume da massa de água.

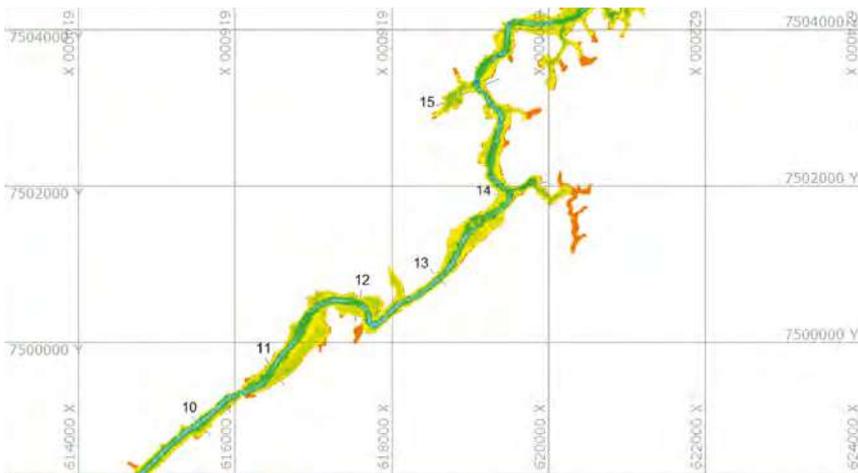
#### **Síntese do estudo batimétrico no reservatório de Santana**

Para o reservatório de Santana, a área considerada para o cálculo batimétrico foi limitada pela cota máxima de operação de 366,06 metros, referenciada ao *datum* vertical Imbituba. Todas as coordenadas estão expressas em metros e referenciadas ao *datum* WGS-84<sup>2</sup> e ao Meridiano Central de 045°W.

<sup>2</sup> O WGS-84 é definido e mantido pela National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) dos Estados Unidos. É consistente, até cerca de 1 cm, com o Quadro Internacional de Referência Terrestre (ITRF). É um dado global, o que significa que as coordenadas mudam ao longo do tempo para objetos fixos no solo.

O estudo das três sub-regiões demarcadas, com detalhamento de 26 perfis demonstrativos, orientou o cálculo fragmentado dos respectivos volumes de água, material assoreado e da velocidade média de sedimentação. Esses perfis encontram-se tecnicamente caracterizados no QR Code inserido no final desta seção. A título de exemplo, entretanto, apenas um desses perfis é mostrado, a seguir. A Figura 4.2 ilustra o “fatiamento” da sub-região em seus 11 perfis (numerados de 10 a 15).

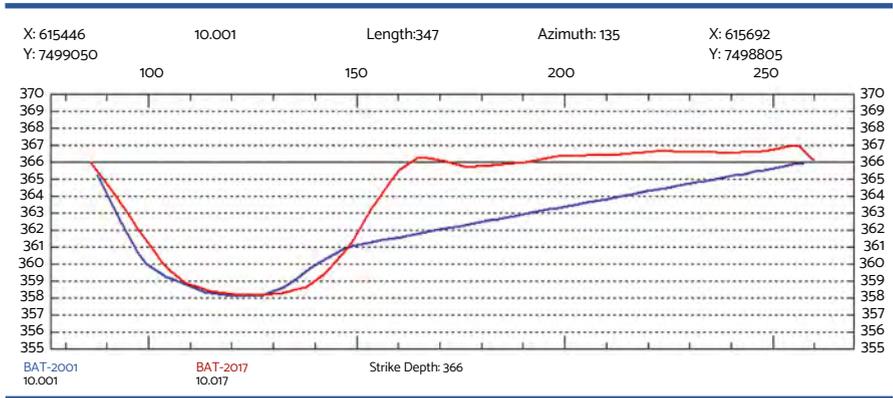
Figura 4.2 Sub-região 2, Localizador dos Perfis 10-15 (reservatório de Santana).



Fonte: Projeto MoVaSC.

Já a Figura 4.3 reproduz o Perfil 10 da Sub-região 2, que faz uso do seguinte código de cor: azul (batimetria de 2001) e vermelho (batimetria de 2017), o que caracteriza um expressivo assoreamento no recorte estudado. Nesta figura, o eixo vertical indica a profundidade do reservatório expressa em metros, referenciada ao *datum* vertical Imbituba. O fundo do reservatório é identificado pelo ponto mais baixo nas curvas batimétricas (nas cores azul e/ou vermelha). Já a cota da superfície livre do espelho d’água do reservatório é indicada pela linha contínua horizontal, na cor preta.

Figura 4.3 Perfil 10 Sub-região 2 (reservatório de Santana).



Fonte: Projeto MoVaSC

Considerada informação relevante para o estudo do reservatório de Santana, cada um dos 26 perfis associados às três sub-regiões estudadas encontra-se batimetricamente caracterizado, podendo ser acessado pelo QR Code apresentado:



QR Code para acesso aos 26 perfis batimétricos (2001 e 2016) associados às três sub-regiões do reservatório de Santana

A Tabela 4.1 resume os resultados do processamento dos dados da batimetria (2001 e 2017), para cada uma das três sub-regiões demarcadas do reservatório de Santana.

Tabela 4.1 Volumes de água, assoreamento e velocidade de sedimentação (Santana).

Trechos Reservatórios	Volume de água em 2001 (m³)	Volume de água em 2017 (m³)	Volume material assoreado (m³)	Área (km²)	Velocidade média de sedimentação (cm/ano)
Sub-região 1	1.962.929	1.910.726	52.203	0,672	0,1
Sub-região 2	5.304.676	4.984.650	320.026	1,920	0,6
Sub-região 3	5.791.284	5.323.012	468.272	2,708	0,3
<b>Total</b>	<b>13.058.889</b>	<b>12.218.388</b>	<b>840.501</b>	<b>5,30</b>	<b>1,0</b>

Fonte: Projeto MoVaSC.

A perda de volume assoreado nesses 16 anos (entre 2001 e 2017) foi estimada em 840,501 mil m<sup>3</sup>, o que corresponde a uma redução de 6,4% da capacidade de água do reservatório em relação ao ano de referência de 2001.

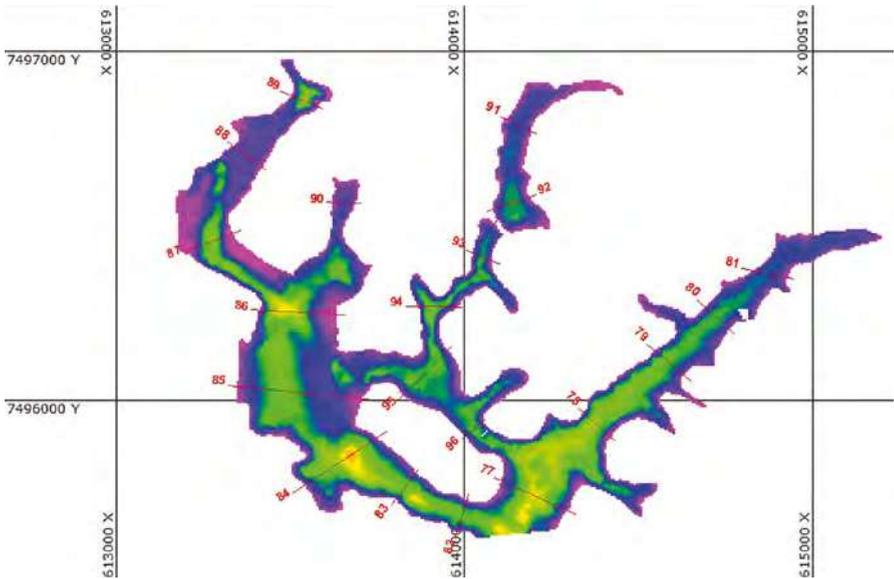
### ***Estudo ampliado das batimetrias realizadas no reservatório de Vigário***

Seguindo metodologia de análise similar (fundamentada nos levantamentos batimétricos no mesmo período de 16 anos), os volumes de água, material assoreado e a velocidade média de sedimentação foram também calculados para o reservatório de Vigário. Para este reservatório, a área considerada para o cálculo foi limitada pela cota máxima de operação, que corresponde à cota 401,50 metros, referenciada ao *datum* vertical Imbituba. Todas as coordenadas são expressas em metros e estão referenciadas ao *datum* WGS-84 e ao Meridiano Central de 045°W.

Entendido como um reservatório estratégico para a geração de energia para o complexo hidrelétrico de Pirai/RJ, a análise batimétrica do reservatório de Vigário (reservatório de acumulação) foi realizada em dois contextos geográficos: (i) análise fragmentada, em que o reservatório de Vigário foi fatiado em cinco sub-regiões demarcadas, com base em 98 perfis, e (ii) análise integrada, em que o reservatório foi subdividido em 62 pequenos trechos, permitindo uma avaliação do reservatório como um todo.

A Figura 4.4 ilustra o “fatiamento” da sub-região 5 do reservatório de Vigário em 22 perfis (77 a 98) de medições batimétricas.

Figura 4.4 Sub-região 5 Localizador dos Perfis 77 a 98 (reservatório de Vigário).

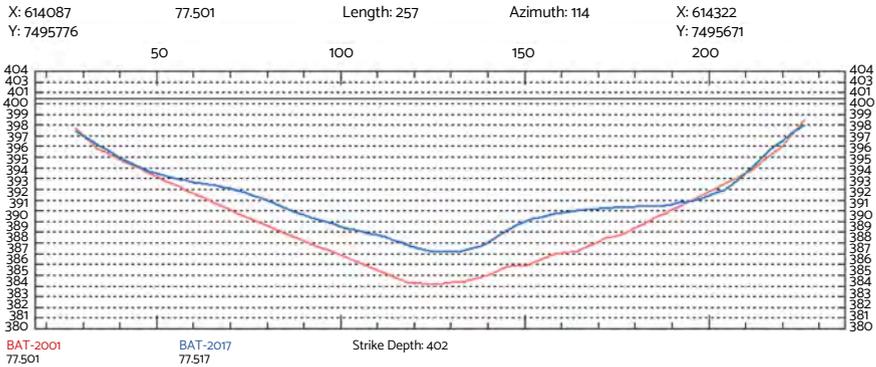


Fonte: Projeto MoVaSC.

Já a Figura 4.5 reproduz, a título de exemplo, o resultado das medições batimétricas para o Perfil 77 (sub-região 5), que faz uso do seguinte código de cor: vermelho (batimetria de 2001) e azul (batimetria de 2017)<sup>3</sup>. A análise desses resultados confirma o expressivo assoreamento ocorrido ao longo do período observado, principalmente na porção mais profunda deste recorte do reservatório. Similarmente ao gráfico elucidativo da batimetria representada na Figura 4.3, o eixo vertical do gráfico da Figura 4.5 indica a profundidade do reservatório expressa em metros, referenciada ao *datum* vertical Imbituba. O fundo do reservatório é indicado pelo ponto mais baixo nas curvas batimétricas (nas cores azul e/ou vermelha). Já a cota da superfície livre do espelho d'água do reservatório é indicada pela linha contínua horizontal, na cor preta.

<sup>3</sup> Embora sem relevância, mas a título de alerta, cabe observar que a nomenclatura utilizada para caracterizar a batimetria realizada em Santana (azul para 2001) difere da utilizada em Vigário (vermelho para 2001).

Figura 4.5 Perfil 77, Sub-região 5 (reservatório de Vigário).



Fonte: Projeto MoVaSC.

Considerada informação relevante para o estudo dos reservatórios, cada um dos 98 perfis associados às cinco sub-regiões estudadas encontra-se caracterizado, podendo ser acessado pelo QR Code a seguir:



QR Code para acesso aos 98 perfis batimétricos (2001 e 2016) associados às cinco sub-regiões do reservatório de Vigário.

A Tabela 4.2 resume os resultados do processamento dos dados da batimetria (2001 e 2017) para cada uma das três sub-regiões demarcadas do reservatório de Vigário.

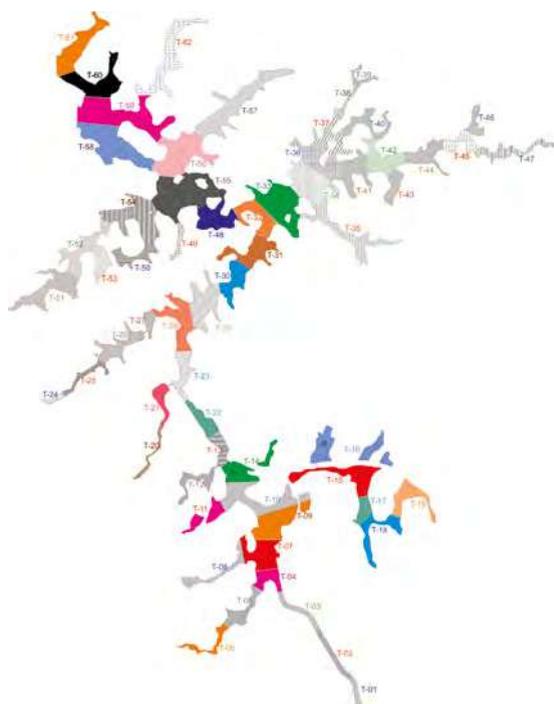
**Tabela 4.2.** Volumes de água, assoreamento e velocidade de sedimentação (Vigário).

Trechos Reservatórios	Volume de água em 2001 (m <sup>3</sup> )	Volume de água em 2017 (m <sup>3</sup> )	Volume material assoreado (m <sup>3</sup> )	Área (km <sup>2</sup> )	Velocidade média de sedimentação (cm/ano)
Sub-região 1	3.581.039	3.120.282	460.757	0,712	4,0
Sub-região 2	3.717.679	3.719.306	-1.627	0,424	0,0
Sub-região 3	5.769.597	6.057.505	-287.908	0,683	-2,6
Sub-região 4	4.388.916	4.243.934	144.981	0,497	1,8
Sub-região 5	5.374.380	4.409.962	964.417	0,656	9,2
<b>Total</b>	<b>22.831.611</b>	<b>21.550.990</b>	<b>1.280.620</b>	<b>2,97</b>	<b>2,7</b>

Fonte: Projeto MoVaSC.

Dada a relevância do reservatório de Vigário para o complexo hidrelétrico da concessionária Light Energia S.A., em Piraí, RJ, um aprofundamento detalhado do estudo de assoreamento do reservatório de Vigário foi realizado com base nos mesmos dados das batimetrias de 2001 e 2017. Para tal, o reservatório foi dividido em sessenta e dois (T-01 a T-62) pequenos trechos, conforme ilustrado na Figura 4.6, mostrada a seguir, em conexão com a tabulação dos resultados das medições batimétricas.

Figura 4.6 Batimetria: refinamento dos trechos do reservatório de Vigário.



Trechos	Volume assoreado (m <sup>3</sup> )	Trechos	Volume assoreado (m <sup>3</sup> )	Trechos	Volume assoreado (m <sup>3</sup> )
T-01	-2.109	T-22	19.849	T-43	-19.575
T-02	-26.698	T-23	-9.762	T-44	-33.891
T-03	-21.956	T-24	-3.543	T-45	-10.805
T-04	7.355	T-25	-14.485	T-46	-13.385
T-05	76.772	T-26	-22.099	T-47	-14.931
T-06	1.464	T-27	-7.226	T-48	1.434
T-07	4.655	T-28	1.718	T-49	-4.009
T-08	-10.971	T-29	-113	T-50	-13.474
T-09	12.300	T-30	3.778	T-51	-11.308
T-10	-11.930	T-31	29.093	T-52	-2.047
T-11	4.569	T-32	18.918	T-53	-3.501
T-12	-20.413	T-33	39.078	T-54	-29.092

Fonte: Projeto MoVaSC.

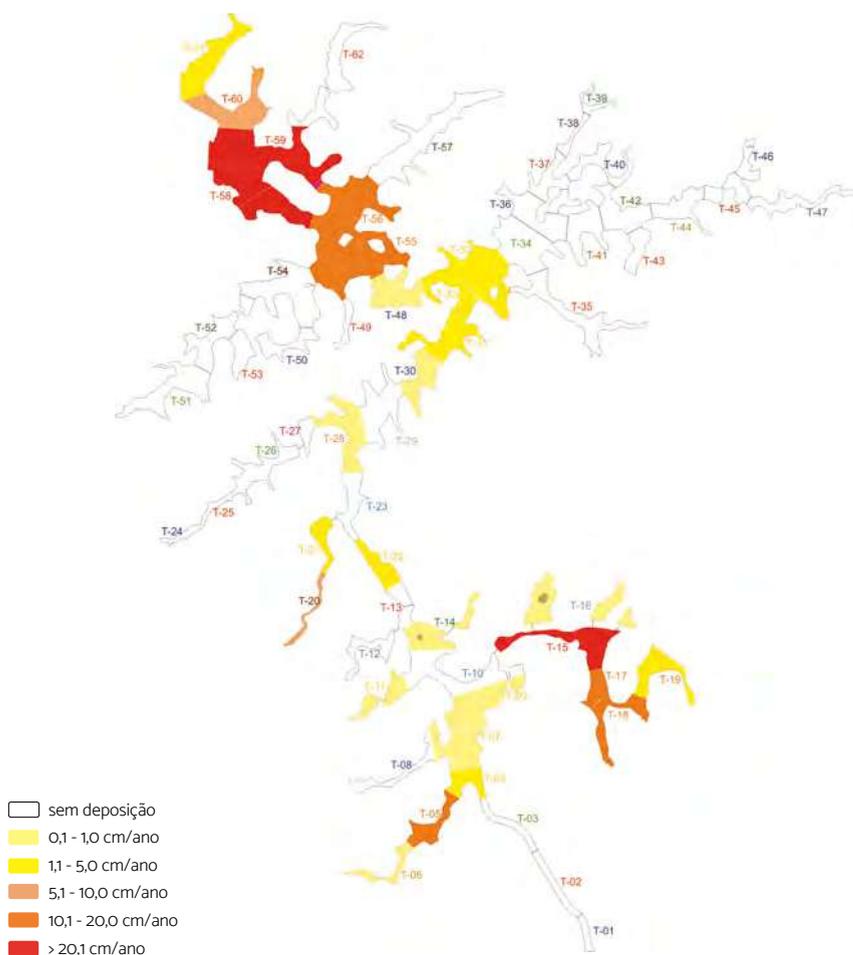
Trechos	Volume assoreado (m <sup>3</sup> )	Trechos	Volume assoreado (m <sup>3</sup> )	Trechos	Volume assoreado (m <sup>3</sup> )
T-13	-22.166	T-34	-14.959	T-55	196.793
T-14	7.300	T-35	-48.385	T-56	135.377
T-15	255.835	T-36	-34.282	T-57	-6.902
T-16	9.384	T-37	-47.287	T-58	377.871
T-17	78.427	T-38	-14.845	T-59	403.121
T-18	88.407	T-39	-5.183	T-60	78.400
T-19	13.123	T-40	-30.037	T-61	16.019
T-20	31.426	T-41	-33.243	T-62	-41.810
T-21	6.763	T-42	-31.308	<b>TOTAL</b>	<b>1.281.501</b>

Fonte: Cálculo realizado pela equipe do projeto MoVaSC com base nos dados das batimetrias realizadas.

O cálculo de volume assoreado foi realizado por análise matemática das superfícies tridimensionais, considerando que as coordenadas cartográficas estão na mesma unidade de medida, gerando assim um resultado de volume em unidades cúbicas (i.e., m<sup>3</sup>). A partir da cota que representa a cota máxima de operação, até o fundo do reservatório em cada trecho, foi calculado o volume de água existente. Com base nestes resultados, foi possível determinar o assoreamento ocorrido no período de observação entre os levantamentos batimétricos realizados, cujo resultado reproduz o resultado anterior, confirmando que o fatiamento original em cinco sub-regiões foi suficiente para caracterizar o volume assoreado.

Com base no detalhamento integrado, considerando-se os sessenta e dois pequenos trechos demarcados no reservatório de Vigário, foi possível calcular, para cada trecho, a velocidade de sedimentação, cujos resultados são mostrados na Figura 4.7.

Figura 4.7 Velocidade de sedimentação calculada por trechos do reservatório de Vigário.



Fonte: Projeto MoVaSC.

Conforme revelado pela batimetria, a estimativa de perda de volume de água nesses 16 anos (entre 2001 e 2017) foi estimada em 1.281.501 m<sup>3</sup>, o que representa 5,6% de volume assoreado em relação ao volume de água existente em 2001, com perda de volume nas partes extremas do reservatório (na entrada: sub-região 5 e na saída: sub-região 1), identificados na Figura 4.1. Para o período

de análise (limitado em 16 anos, entre 2001 e 2017), a velocidade média anual de assoreamento foi estimada em 2,7 cm/ano.

Com base no processamento dos dados batimétricos referentes ao período de abril de 2001 a fevereiro de 2017 foi possível formular as conclusões a seguir descritas.:

- Com base na perda de volume de água ao longo dos 16 anos de intervalo entre as batimetrias (1,281 milhões de metros cúbicos), a taxa média de assoreamento foi calculada em 80.093,81 m<sup>3</sup>/ano.
- Diante da metodologia de cálculo empregada para determinar o volume assoreado (tendo como base a cota máxima de operação de 401.50 m), é possível afirmar que, após o levantamento de 2017, a capacidade de água do reservatório em sua cota máxima era da ordem de 21 milhões de metros cúbicos.
- Na seção de corte dos perfis transversais, nos braços do reservatório, e no corpo principal de cada um dos trechos, foi possível observar que, em grande parte da área, o fundo do reservatório se manteve estável ao longo do período estudado.
- Foi observado, ainda, que nas partes mais estreitas dos braços do reservatório de Vigário a ocorrência de assoreamento se mostrou mais evidente.
- No canal de Vigário, local em que a água flui com maior rapidez, não foi observado nenhum assoreamento.
- Os gráficos dos perfis mostraram-se extremamente úteis e práticos para visualizar os locais em que o assoreamento prevalece sobre os de drenagem. Para o reservatório de Vigário, exemplos marcantes desse fenômeno foram observados (Perfil 77, mostrado na Figura 4.6 e Perfis 84 e 95, da sub-região 5, acessíveis pelo QR Code inserido após a Figura 4.7), comprovando que a própria correnteza pode, ao longo do tempo, transferir sedimentos de uma região para outra.

Os valores calculados do assoreamento ocorrido ao longo desses 16 anos de observação nos reservatórios de Vigário e Santana constituem informações relevantes para validar a técnica de datação pelo <sup>210</sup>Pb, discutida em seção específica deste capítulo.

## Amostragem de testemunhos sedimentares para análise de metais

Complementando os estudos relacionados à batimetria nos reservatórios de Santana e Vigário, que permitiram determinar a capacidade de água desses reservatórios e os respectivos volumes assoreados, testemunhos sedimentares foram coletados em quatro pontos estratégicos de cada um dos reservatórios estudados. As Figuras 4.8 e 4.9 mostram, respectivamente, os locais de coleta dos testemunhos de sedimentos em ambos os reservatórios. Para assegurar redundância dos ensaios, dois testemunhos foram coletados em cada local.

Figura 4.8 Posicionamento dos testemunhos coletados no reservatório de Santana.



Fonte: Projeto MoVaSC

Figura 4.9 Posicionamento dos testemunhos coletados no reservatório de Vigário.



As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam, respectivamente, características dos locais de coleta dos oito testemunhos sedimentares.

**Tabela 4.3** Caracterização dos testemunhos coletados em Vigário.

Testemunho	Coordenadas	Profundidade água (m)	Comprimento (cm)	Total de amostras	Data
V.1.1	22°38'19.10" S; 43°53'46.99" W	6,0	101,5	41	18/02/20
V.1.2	22°38'19.10" S; 43°53'46.99" W	6,0	101,0	43	18/02/20
V.2.1	22°38'49.43" S; 43°53'26.21" W	6,5	99,0	50	18/02/20
V.2.2	22°38'49.43" S; 43°53'26.21" W	6,5	98,0	49	18/02/20
V.3.1	22°38'42.10" S; 43°52'37.62" W	8,0	94,0	46	18/02/20
V.3.2	22°38'42.10" S; 43°52'37.62" W	8,0	99,5	51	18/02/20
V.4.1	22°40'05.43" S; 43°53'04.72" W	6,0	103,0	51	18/02/20
V.4.2	22°40'05.43" S; 43°53'04.72" W	6,0	94,0	47	18/02/20

Fonte: Projeto MoVaSC.

**Tabela 4.4** Caracterização dos testemunhos coletados em Santana.

Testemunho	Coordenadas	Profundidade água (m)	Comprimento (cm)	Total de amostras	Data
S.1.1	22°31'49.38" S; 43°49'21.53" W	1,0	76,5	38	19/02/20
S.1.2	22°31'49.38" S; 43°49'21.53" W	1,0	91,0	45	19/02/20
S.2.1	22°32'56.92" S; 43°49'58.52" W	3,0	95,0	46	19/02/20
S.2.2	22°32'56.92" S; 43°49'58.52" W	3,0	91,5	44	19/02/20
S.3.1	22°33'51.24" S; 43°49'31.13" W	2,5	85,5	42	19/02/20
S.3.2	22°33'51.24" S; 43°49'31.13" W	2,5	87,5	43	19/02/20
S.4.1	22°34'28.56" S; 43°50'39.45" W	2,0	95,5	47	19/02/20
S.4.2	22°34'28.56" S; 43°50'39.45" W	2,0	111,5	56	19/02/20

Fonte: Projeto MoVaSC.

As imagens da Figura 4.10 ilustram o procedimento de obtenção dos testemunhos (imagens *a* e *b*, nos momentos da coleta e avaliação do testemunho antes do seu fatiamento para produção de amostras coletadas em várias profundidades dos reservatórios estudados.).

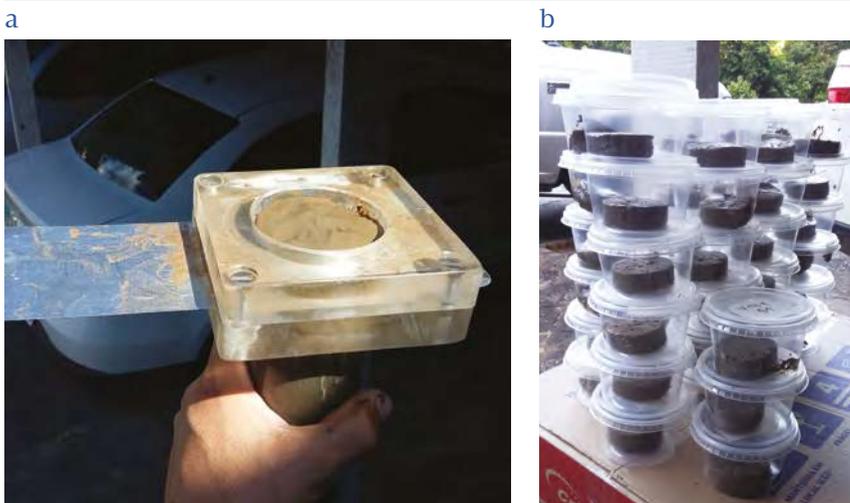
Figura 4.10 Procedimento de coleta (a) e testemunho coletado (b).



Fonte: Projeto MoVaSC.

Já as imagens da Figura 4.11 mostram o processo de fatiamento e as amostras produzidas a partir dos testemunhos coletados.

Figura 4.11 Fatiamento do testemunho (a) e amostras produzidas (b).



Fonte: Projeto MoVaSC.

A qualidade dos testemunhos e a sua validação como amostra factível de ser submetida ao processo de datação pelo  $^{210}\text{Pb}$  requer a secagem das amostras e análise do perfil de variação de sua umidade com a profundidade. A partir dos 16 testemunhos coletados, 734 amostras foram produzidas para estudo do reservatório de Santana e 790 para o de Vigário, perfazendo um total superior a 1500 amostras, assim assegurando uma excelente representatividade dos sedimentos desses reservatórios estratégicos do complexo hidrelétrico Pirai/Light.

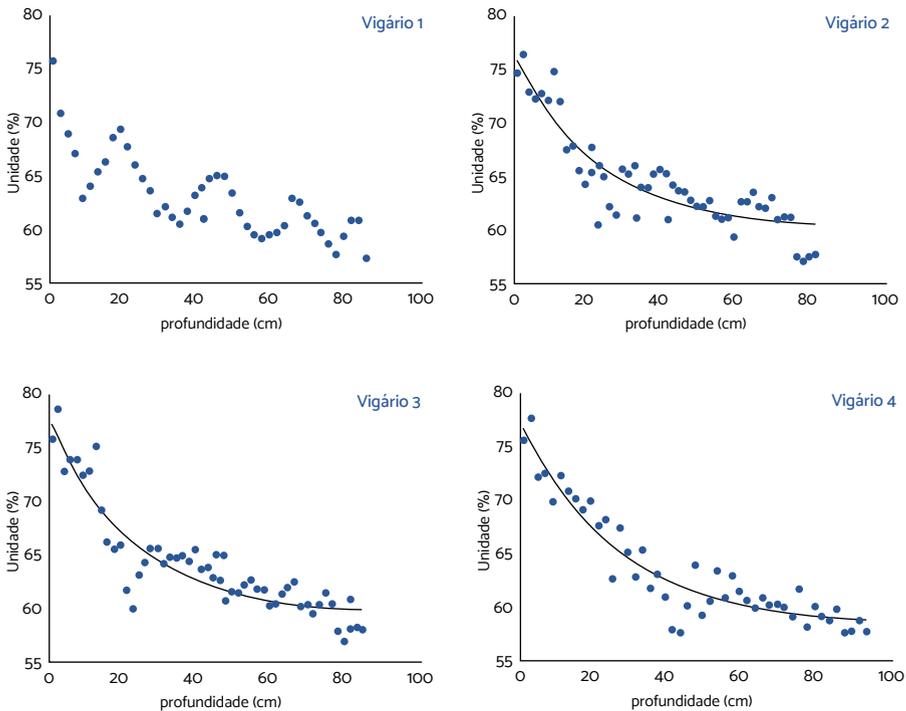
O perfil da umidade pode ser empregado como ferramenta auxiliar do processo de decisão para qualificação dos testemunhos, assim validando para análise apenas os testemunhos que possuem o potencial de fornecer um perfil de  $^{210}\text{Pb}$  “datável”. Na ausência de fatores capazes de causar uma mistura das camadas sedimentares, observa-se um decréscimo exponencial da umidade com a profundidade, descrito pela Equação (4.1) reportada na literatura especializada (Athy, L. F., 1930; Robbins e Edgington, 1975).

$$y = y_0 + a \cdot e^{-b \cdot z} \quad (4.1)$$

Nesta equação,  $y_0$ ,  $a$  e  $b$  são constantes. As análises realizadas nos testemunhos coletados no reservatório de Vigário permitiram qualificar três dos quatro testemunhos para produção de amostras para submissão à técnica de datação pelo  $^{210}\text{Pb}$ . Fundamentado em análises preliminares, o testemunho etiquetado como Vigário-1 foi descartado (a perturbação identificada no material sedimentado pode ser explicada por este ter sido coletado próximo à barragem, local em que a velocidade da correnteza resultante do recalque produzido pela elevatória ainda é elevada). Análises realizadas qualificaram os outros três perfis (testemunhos) como promissores para serem submetidos à técnica de datação pelo  $^{210}\text{Pb}$ .

As imagens da Figuras 4.12 mostram os perfis de umidade que resultaram das análises realizadas nas amostras coletadas no reservatório de Vigário.

Figura 4.12 Perfis de umidade nos testemunhos coletados no reservatório de Vigário.



Fonte: Projeto MoVaSC.

Os dados da Tabela 4.5 documentam os parâmetros da Equação (4.1) para a construção da respectiva curva exponencial que mais bem representa o ajuste dos dados experimentais associados aos perfis de umidade identificados.

**Tabela 4.5** Parâmetros derivados da curva de ajuste (Equação 4.1) do perfil de umidade dos testemunhos coletados (Reservatório de Vigário).

Testemunho	$y_0$	$a$	$e$	$R^2$
Vigário-2	60,09 (0,85)	16,3 (1,2)	-0,0366 (0,0072)	0,812
Vigário-3	59,35 (0,75)	18,3 (1,1)	-0,0371 (0,0060)	0,854
Vigário-4	58,25 (0,74)	19,2 (1,0)	-0,0377 (0,0054)	0,896
Média	59,23 (0,93)	17,9 (1,5)	-0,0371 (0,0006)	

Nota: O testemunho Vigário-1 foi descartado  
 Fonte: Projeto MoVaSC.

Com base na análise de variância realizada e fazendo uso dos valores médios, a Equação (4.1) pode ser reescrita na forma da Equação (4.2) para descrever o decréscimo exponencial da umidade com a profundidade para o caso do reservatório de Vigário, ou seja:

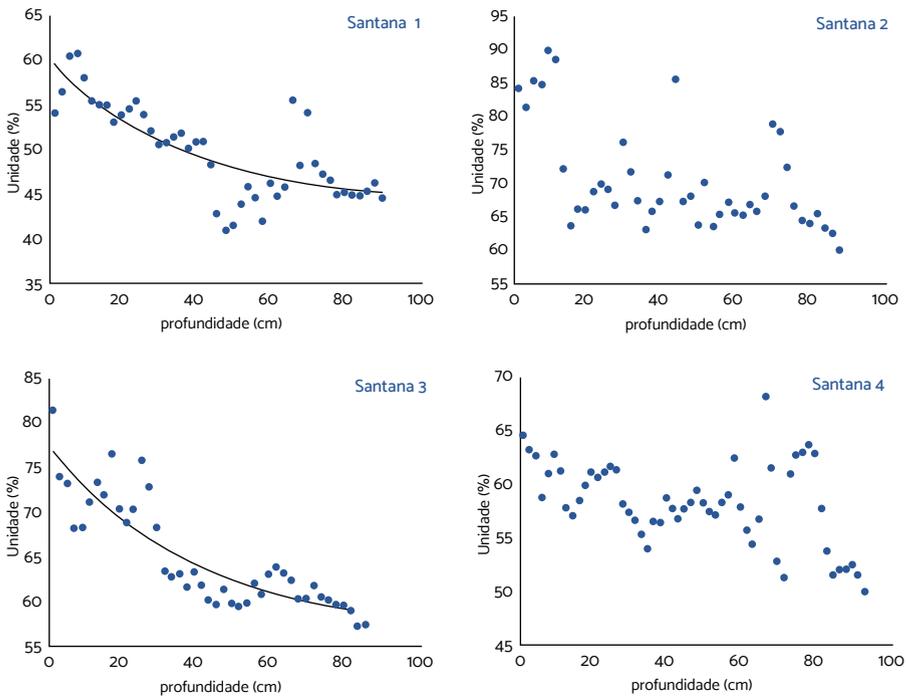
$$y = 59,23 (\pm 3,0) + 17,9 (\pm 2,5).e^{-0,0371(\pm 0,0086).x} \quad (4.2)$$

Os valores de incerteza, que aparecem entre parênteses, resultaram da análise de variância realizada.

Análises realizadas nos testemunhos coletados no reservatório de Santana qualificaram apenas um (Santana-3) dos quatro testemunhos para produção de amostras para submissão à técnica de datação pelo  $^{210}\text{Pb}$ . A razão para o descarte de três dos quatro testemunhos coletados deveu-se à presença (i) de organismos *bivalvos* (moluscos) em amostras do testemunho Santana-1, observados em diferentes profundidades, acarretando no que se denomina *bioturbação* das camadas de sedimentos e (ii) irregularidades por falta de compactação adequada em amostras dos testemunhos Vigário-2 e Vigário-4.

As imagens da Figuras 4.13 mostram os *perfis de umidade* das análises das amostras do reservatório de Santana.

Figura 4.13 Perfis de umidade nos testemunhos coletados no reservatório de Santana.



Fonte: Projeto MoVaSC.

Assim, aplicando os valores obtidos das análises do testemunho investigado, e considerando a confiabilidade estimada desses resultados com base na análise de variância realizada, a Equação (4.1) pode ser reescrita na forma da Equação (4.3).

$$y = 56,3 (\pm 3,0) + 21,3 (\pm 2,5) \cdot e^{-0,0246(\pm 0,0086) \cdot x} \quad (4.3)$$

Os valores de incerteza que aparecem entre parênteses resultaram da análise de variância realizada, que também indica Coeficiente de Determinação  $R^2 = 0,769$ .

## **Análise de metais**

Com o propósito de obter dados secundários para a validação da datação pela técnica do  $^{210}\text{Pb}$ , procedeu-se a determinação de metais nas amostras de sedimentos produzidas a partir dos testemunhos validados e em espécies de peixes nativos da região.

### ***Presença de metais em sedimentos***

A digestão das amostras seguiu o método EPA-3050B, enquanto a determinação dos metais, por ICP-OES<sup>4</sup>, foi realizada com base no método EPA-6010B<sup>5</sup> (EPA, 1996a e 1996b)<sup>6</sup>. Os elementos incluídos foram Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, V e Zn. Foi realizada a determinação dos metais nos testemunhos TV#2, TV#3, TV#4 e TS#3, tomando-se uma fatia a cada duas, sendo cada fatia analisada em duplicata. A cada conjunto de amostras foram analisadas duas alíquotas do material de referência certificado, SRM-2704<sup>7</sup> (*Bufallo River Sediment*), dois “brancos” e um padrão de 1,0 mg/L.

No que concerne às análises de concentração de metais, dois valores-guias são adotados em termos de qualidade de sedimentos, TEL (*Lower Threshold Level*) e o PEL (*Probable Effect Level*), que definem os níveis toleráveis. A adoção do TEL assegura, com um grande grau de confiança, que qualquer contaminante pode ser eliminado de considerações futuras quanto a potenciais danos. Por outro lado, o PEL identifica compostos que possuem uma

---

4 ICP: *Inductively Coupled Plasma*; OES: *Optical Emission Spectrometry Principle*

5 *Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy*

6 Os métodos da EPA (*Environmental Protection Agency*) referem-se a métodos para a análise de elementos dissolvidos e elementos recuperáveis totais em uma ampla variedade de águas, bem como sedimentos, solos e lodo. O método EPA-3050B (*Digestão Ácida de Sedimentos, Lodos e Solos*) é uma orientação baseada em desempenho amplamente utilizada para análise de 31 oligoelementos em águas subterrâneas, solo, sedimentos e resíduos sólidos. EPA-6010B refere-se à análise por Espectrometria de Emissão Atômica-Plasma Acoplado Indutivamente, que determina oligoelementos, incluindo metais, em solução.

7 Certified Reference Material, certificado pelo National Institute of Standards and Technology, NIST/USA.

probabilidade elevada de serem tóxicos. A Tabela 4.6 apresenta os elementos, dentre os estudados, que possuem valores de TEL e PEL (NOAA, 2008).

**Tabela 4.6** Valores guia de qualidade de sedimentos de água doce para metais (NOAA, 2008).

Elemento	TEL (mg/kg)	PEL (mg/kg)
Cadmio	0,6	3,5
Chumbo	35	91,3
Cobre	35,7	197
Cromo	37,3	90
Mercúrio	0,17	0,49
Níquel	18	35,9
Zinco	123	315

Fonte: Projeto MoVaSC.

Como nenhum dos testemunhos apresentou níveis de Cd acima do limite de detecção do método, seus resultados não foram reportados. Foi possível observar que a concentração do elemento Cr fica acima do seu valor de TEL ao longo de todos os testemunhos, porém apresenta concentrações inferiores ao seu valor de PEL em amostras mais recentes, para todos os testemunhos analisados. Já os elementos Zn e Cu, em diversas profundidades dos quatro testemunhos analisados, apresentam concentrações acima do valor de TEL, indicando a possibilidade de que a flora e a fauna estejam manifestando efeitos adversos causados por Zn e Cu. Embora o elemento Pb apresente concentrações acima do valor de TEL para amostras mais antigas de alguns testemunhos, as amostras mais recentes apresentaram valores de concentração abaixo do valor de TEL para todos os testemunhos. As Tabelas 4.7 a 4.10 apresentam a estatística descritiva (Hinkle, 2003) para metais nos testemunhos coletados nos reservatórios de Vigário e Santana.

**Tabela 4.7** Estatística descritiva dos valores de metais medidos no testemunho Vigário-2. (Valores expressos em mg/kg).

Parâmetro	Zn	V	Pb	Ni	Cu	Cr	Ba	Mn	Al	Fe	Hg
Média	136	75,5	30,4	10,37	26,6	80	159,3	899	33870	54478	0,262
Desvio padrão	40	2,4	6,8	0,51	2,3	41	7,1	151	1949	3054	0,042
Mediana	133	75,8	27,6	10,42	26,2	70	157,3	896	33967	54439	0,256
Mínimo	80	70,9	22,4	9,16	22,6	41	149,1	509	29287	46798	0,196
Máximo	253	79,9	49,3	11,47	31,8	180	179,6	1202	37180	58278	0,344
N	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

**Tabela 4.8** Estatística descritiva dos valores de metais medidos no testemunho Vigário-3. (Valores expressos em mg/kg).

Parâmetro	Zn	V	Pb	Ni	Cu	Cr	Ba	Mn	Al	Fe	Hg
Média	146	66,2	33,5	9,89	24,7	81,8	140,9	1029	32572	58570	0,257
Desvio padrão	42	2,2	7,6	0,45	3,1	38,9	8,9	277	1719	3173	0,028
Mediana	142	66,3	30,6	10,00	24,0	73,2	139,4	957	32757	58830	0,255
Mínimo	78	63,0	25,3	8,58	20,2	38,8	122,2	639	27664	51307	0,205
Máximo	272	71,0	53,8	10,57	35,0	170,2	162,2	1895	34834	65822	0,318
N	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	23

**Tabela 4.9** Estatística descritiva dos valores de metais medidos no testemunho Vigário-4. (Valores expressos em mg/kg).

Parâmetro	Zn	V	Pb	Ni	Cu	Cr	Ba	Mn	Al	Fe	Hg
Média	132	76,3	27,3	11,1	26,2	80	172	1102	38084	56496	0,202
Desvio padrão	36	7,0	3,8	1,1	3,7	56	15	266	3684	5436	0,036
Mediana	125	75,9	27,0	11,0	25,3	53	169	1000	37522	56097	0,196
Mínimo	74	66,7	22,8	8,7	21,4	42	143	702	28061	39246	0,137
Máximo	238	89,5	37,6	13,2	31,8	272	206	1802	44995	64701	0,278
N	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24

**Tabela 4.10** Estatística descritiva dos valores de metais medidos no testemunho Santana-3. (Valores expressos em mg/kg)

Parâmetro	Zn	V	Pb	Ni	Cu	Cr	Ba	Mn	Al	Fe	Hg
Média	151	72,5	25,6	11,2	27,6	87	166	582	51369	32408	0,211
Desvio padrão	70	9,6	5,1	2,1	4,0	83	24	135	4348	2079	0,045
Mediana	137	69,8	24,3	10,1	27,0	50	160	573	51519	32920	0,210
Mínimo	84	61,6	19,2	9,3	22,0	41	138	368	42475	25139	0,150
Máximo	404	105,3	38,2	16,4	37,3	351	240	899	59253	34734	0,286
N	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	21

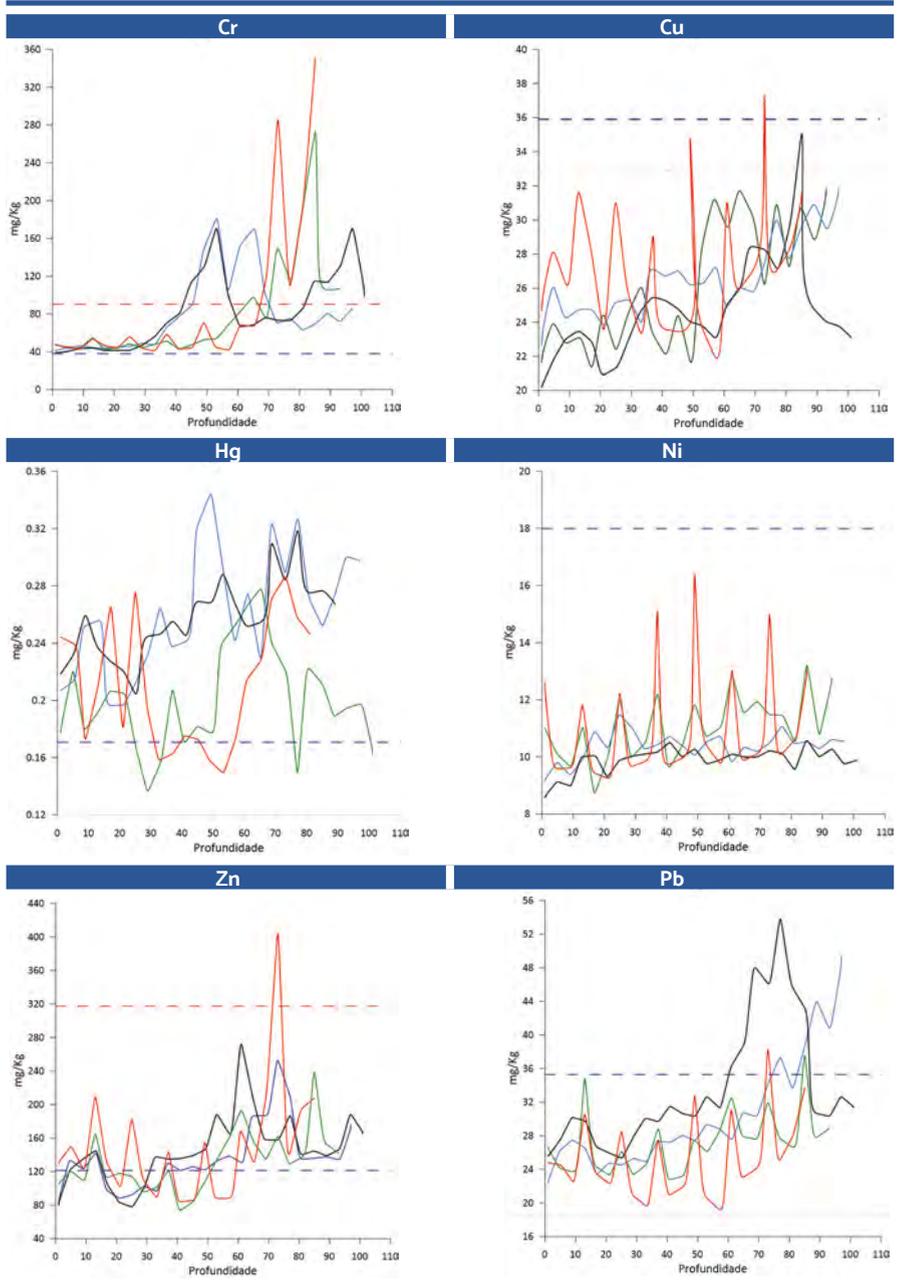
Fonte: Projeto MoVaSC.

Os resultados obtidos para os perfis da concentração dos diversos elementos analisados nos reservatórios de Santana e Vigário, em diferentes profundidades (referentes a quatro testemunhos), são apresentados nos gráficos da Figura 4.14.

Os valores obtidos indicam ser possível que a biota local esteja sendo impactada pelos metais descritos acima. Conforme reportado por Vitória et al. (2015), macrófitas do rio Paraíba do Sul, cuja concentração de Cr e Zn em suas raízes é da ordem de  $25 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $68 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente, também manifestaram mudanças anatômicas no córtex de suas raízes. Almeida, de et al. (2016) alertaram que ovos e alguns tecidos de caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*) presentes no manguezal de Gargaú – foz do rio Paraíba do Sul – apresentaram um aumento na concentração de metais, notadamente, Mn, Ni, Cu, Zn e Cr, ao longo do tempo. E mais, advertiram que, por estarem sempre em contato com o sedimento da região, os embriões contaminados podem afetar futuramente o ciclo reprodutivo e, conseqüentemente, a conservação da espécie. Adicionalmente, Terra et al. (2008) comprovaram que tecidos de peixes coletados no trecho médio do rio Paraíba do Sul exibiram concentrações acima do permitido para os metais Cr, Pb e Zn, sugerindo que a proximidade com as descargas de efluentes de origem urbana e industrial podem estar associadas a este padrão.

Os gráficos da Figura 4.14 documentam os resultados dos perfis de concentração de Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn *versus* profundidade analisados nos testemunhos Santana-3, Vigário-2, Vigário-3 e Vigário-4, bem como o TEL (*Lower Threshold Level*) e PEL (*Probable Effect Level*) para cada elemento analisado. Nesses gráficos, as linhas pontilhadas azul e vermelha indicam, respectivamente, o valor de TEL e PEL para cada elemento analisado.

Figura 4.14 Perfis de concentração de Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn vs. profundidade dos testemunhos de Santana-3, Vigário-2, Vigário-3 e Vigário-4.



Fonte: Projeto MoVaSC.

Em contrapartida, os valores para Hg e Ni não ultrapassaram os valores de TEL ao longo de nenhum dos testemunhos, o que leva a crer que, raramente, serão observados na flora e fauna da região efeitos biológicos adversos causados por esses metais. Ao verificar, de um modo geral, uma tendência de menores concentrações para amostras mais recentes, presume-se que essa baixa de concentração seja efeito de um melhor controle dos efluentes das indústrias instaladas a montante do fluxo no reservatório.

No entanto, em um ambiente de aceleração da velocidade de sedimentação – como será discutido posteriormente – analisar o perfil da concentração de algum poluente associado à profundidade pode levar a conclusões enganosas, uma vez que um maior aporte de sedimentos tem um efeito diluidor. Dessa forma, o cálculo do fluxo pode elucidar se houve realmente uma diminuição da contribuição desse poluente. O modelo CRS (*Constant Rate of Supply*) permite calcular, camada a camada, a velocidade mássica de sedimentação ( $\text{g cm}^{-2} \text{ano}^{-1}$ ). Ao multiplicá-la pela concentração do poluente nessa camada ( $\mu\text{g} \times \text{g}^{-1}$ ), obtém-se a informação do fluxo ( $\mu\text{g cm}^{-2} \text{ano}^{-1}$ ) (Sanchez-Cabeza e Ruiz-Fernandes, 2012).

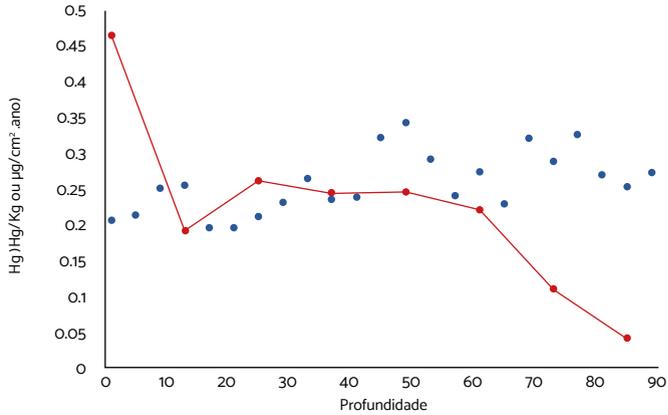
A título de exemplificação, a Figura 4.15 mostra os gráficos das concentrações de Hg e seu fluxo em função da profundidade. Para os três testemunhos, observa-se uma figura similar, com um decréscimo constante na concentração desse metal. Por outro lado, observa-se uma brusca aceleração do fluxo, para os dias atuais, ocasionado pelo fato de a velocidade de sedimentação ter dobrado e, também, um período de máximo em termos de aporte de Hg, correspondente à região de 40 cm – 60 cm, equivalente à década de 2000–2010, época na qual foi noticiada a ação ilegal de garimpos de ouro na região<sup>8</sup>.

---

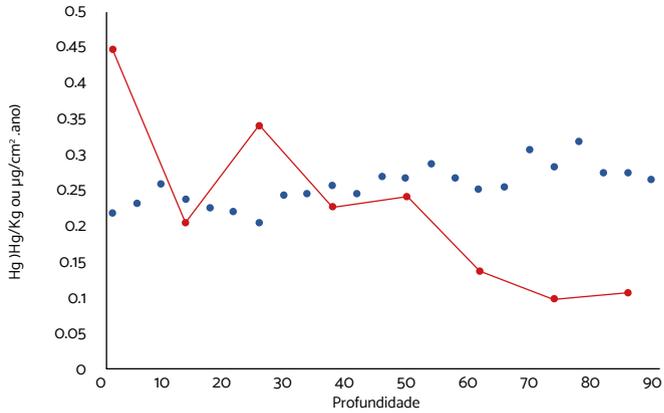
8 <https://sosriodosbrasil.blogspot.com/2009/02/garimpo-ilegal-de-ouro-no-rio-paraiba.html>

Figura 4.15 Comparação entre concentração de Hg ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) e fluxo de Hg ( $\mu\text{g cm}^{-2}\text{ano}^{-1}$ ) nos testemunhos Vigário-2, Vigário-3 e Vigário-4.

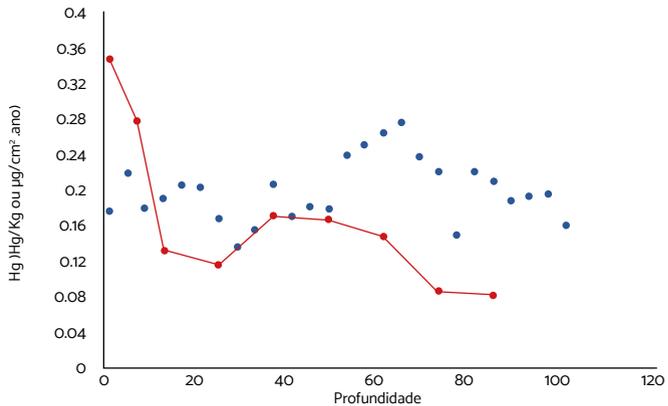
Vigário 2



Vigário 3



Vigário 4



### ***Determinação de metais em amostras de peixes***

Para completar o estudo de concentração de metais de forma mais conclusiva, análises foram realizadas em diferentes espécies de peixes obtidos diretamente de pescadores que atuam no reservatório de Vigário. Em conformidade aos procedimentos de ensaios, amostras do material dos peixes foram produzidas, congeladas e submetidas à análise no laboratório do Departamento de Química da PUC-Rio. Dadas as concentrações de metais encontradas (abaixo dos valores-guia para sedimentos), baixas concentrações de metais eram esperadas para as análises realizadas em cinco espécies de peixes (Pescada, Mandi, Jacundá, Corvina e Tilápia) capturados no reservatório de Santana.

Para a análise, foi feita a retirada dos filés dos peixes: 5,00 gramas reservadas para a determinação de metais e arsênio (As) e 1,00 grama para a determinação de Hg. No caso dos metais, as amostras foram digeridas com água régia e os metais determinados empregando-se um espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). Já em relação ao Hg, foi empregada a mesma metodologia aplicada às amostras de sedimentos. Os resultados do estudo são apresentados na Tabela 4.11.

**Tabela 4.11.** Concentração de metais e arsênio em amostras de peixe coletadas em Vigário. (Valores expressos em mg/kg, base úmida).

<b>Espécie</b>	<b>Al</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>
Pescada	1,8	0,12	0,36	0,41	4,2	0,008	0,01	0,11	4,7
Mandi	1,4	0,10	0,31	1,8	5,9	0,006	< 0,01	0,18	5,8
Jacundá	3,3	0,13	0,38	0,76	6,7	0,03	0,04	0,13	5,1
Corvina	2,3	0,11	0,35	0,16	4,2	0,009	< 0,01	0,11	4,4
Tilápia	8,5	0,06	0,18	0,38	24,9	0,01	0,06	0,26	5,5

Fonte: Projeto MoVaSC.

Espécie	As	Se	Sr	Mo	Cd	Ba	Hg	Pb
Pescada	< 0,02	0,24	2,2	0,02	0,009	0,46	0,061	< 0,005
Mandi	< 0,02	0,47	0,17	0,01	0,009	0,02	0,043	< 0,005
Jacundá	< 0,02	1,1	3,0	0,01	0,009	0,40	0,074	< 0,005
Corvina	< 0,02	0,32	2,3	< 0,01	0,008	0,22	0,11	< 0,005
Tilápia	< 0,02	0,22	0,36	< 0,01	0,002	0,11	0,005	0,04
<b>Anvisa 88/2021</b>	<b>1,0</b>				<b>0,050</b>		<b>0,50</b>	<b>0,30</b>

Fonte: Projeto MoVaSC.

A análise dos resultados comprova que todos os valores encontrados para os elementos regulados, segundo a resolução ANVISA 88 (ANVISA, 2021), situam-se abaixo dos valores limites, indicando que, desse ponto de vista, os peixes estudados encontram-se aptos para o consumo humano. Embora estes resultados pareçam em desacordo com aqueles reportados por Terra et al. (2008), acima do permitido para Cr, Pb e Zn, esta aparente contradição pode ser explicada pelos perfis dos metais da Figura 4.16, que mostram uma redução da concentração dos metais nos sedimentos dosados em anos mais recentes.

### Variação temporal da velocidade de sedimentação com base na técnica do $^{210}\text{Pb}$

A técnica de datação pelo  $^{210}\text{Pb}$  é de importância crucial para uma ampla gama de programas que estuda registros ambientais armazenados em arquivos naturais, a exemplo dos sedimentos em lagos ou acumulações de turfeiras. Dentre os modelos existentes, o modelo CRS (taxa constante de alimentação pelo  $^{210}\text{Pb}$ ) é comumente utilizado. Fundamentado nas amostras pré-qualificadas, foi realizada a determinação da concentração de  $^{210}\text{Pb}$  em uma a cada três camadas, enquanto para a concentração de  $^{226}\text{Ra}$ , uma a cada cinco.

No que concerne ao aspecto metodológico, três gramas de cada camada selecionada foram lixiviadas<sup>9</sup> com 40 mL HBr 0,50 mol/L. Na sequência, 40 mL HBr 0,50 mol/L com 1,0 grama de cloreto de hidroxilamina e a amostra foram agitados por duas horas a 80 °C. Após a adição de 1 mL carreador de Pb (20 mg/mL), foi feita a separação por cromatografia iônica, em meio bromídrico. A solução de alimentação e as duas soluções lavagens (20 mL HBr 0,50 mol/L) foram coletadas para posterior determinação de <sup>226</sup>Ra. A eluição do Pb foi realizada com 100 mL HNO<sub>3</sub> 1,0 mol/L. O eluído foi evaporado até próximo à sua secura, a solução retomada com água e o pH ajustado ≈ 5,0 com acetato de sódio. O chumbo foi precipitado com a adição de Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> (PbCrO<sub>4</sub>), filtrado e pesado para determinação do rendimento químico. A atividade do <sup>210</sup>Pb foi determinada por contagem beta, empregando-se um detector proporcional de baixo background, por 400 min, após crescimento mínimo ao longo de 10 dias (Godoy e Schüttelkopf, 1997; Godoy et al, 1998).

Com a determinação da concentração de <sup>226</sup>Ra, foi possível calcular o <sup>210</sup>Pb em excesso ou de origem atmosférica pela expressão:

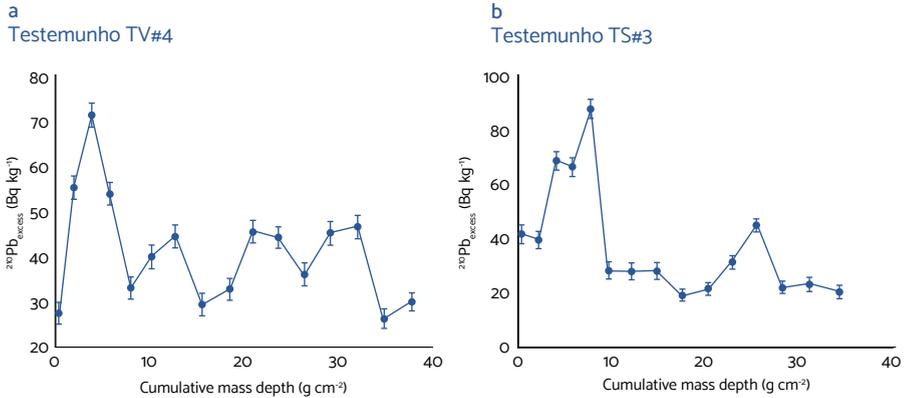
$$^{210}\text{Pb}_{\text{excesso}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{total}} - ^{226}\text{Ra} \quad (4.4)$$

Os resultados obtidos são exemplificados nas imagens da Figura 4.16, para o testemunho TV#4 (Testemunho Vigário-4, na Fig. 4-16a) e TS#3 (Santana-3, na Fig. 4-16b). A concentração de <sup>210</sup>Pb<sub>excesso</sub> não vai a zero pois a barragem possui uma idade de cerca de 70 anos, período insuficiente para um decaimento completo.

---

<sup>9</sup> A lixiviação do solo é um processo erosivo provocado a partir da lavagem da camada superficial do solo pelo escoamento das águas superficiais. Em geral, ela ocorre em solos que não possuem cobertura vegetal e causa a diminuição da sua fertilidade natural ao longo do tempo.

**Figura 4.16** Perfil da concentração de  $^{210}\text{Pb}_{\text{excesso}}$  nos testemunhos analisados (TV#4 e TS#3).

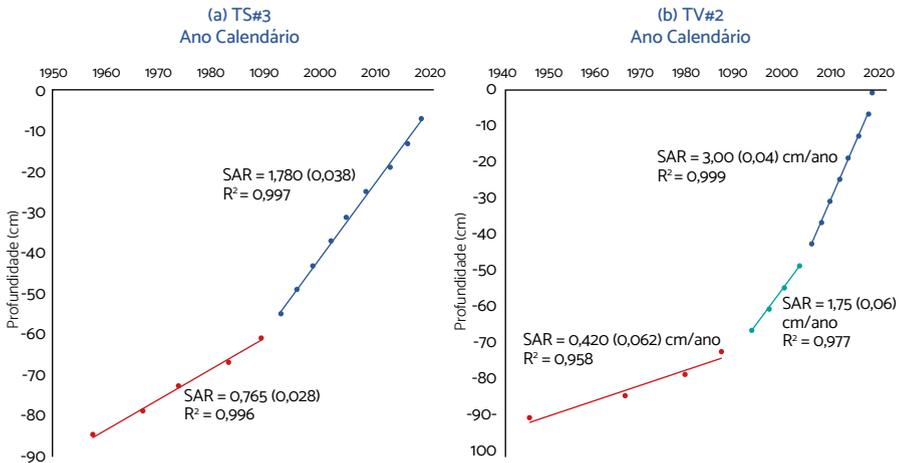


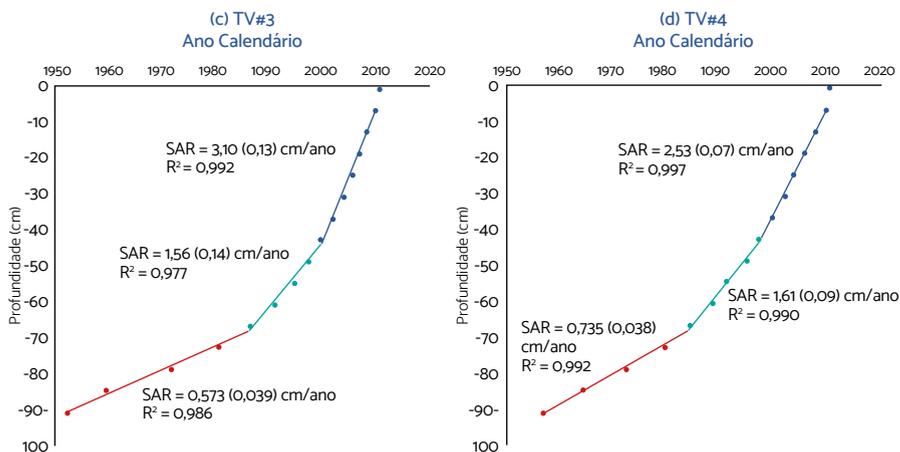
Fonte: Projeto MoVaSC.

Empregando-se o modelo CRS (Sanchez-Cabeza e Ruiz-Fernandes, 2012), foram calculadas as idades das camadas de sedimentos dos testemunhos e, a partir dessas idades, (i) as velocidades de sedimentação (SAR) (cm/ano) e (ii) a velocidade de acumulação mássica (MAR) ( $\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{ano}$ ), apresentadas, respectivamente, nas imagens das Figuras 4.17 e 4.18.

**Figura 4.17** Variação temporal das velocidades de sedimentação (cm/ano).

Velocidades de sedimentação: TS# 3 (4.13a), TV#2 (4.13b), TV#3 (4.13c) e TV# 4 (4.13d).





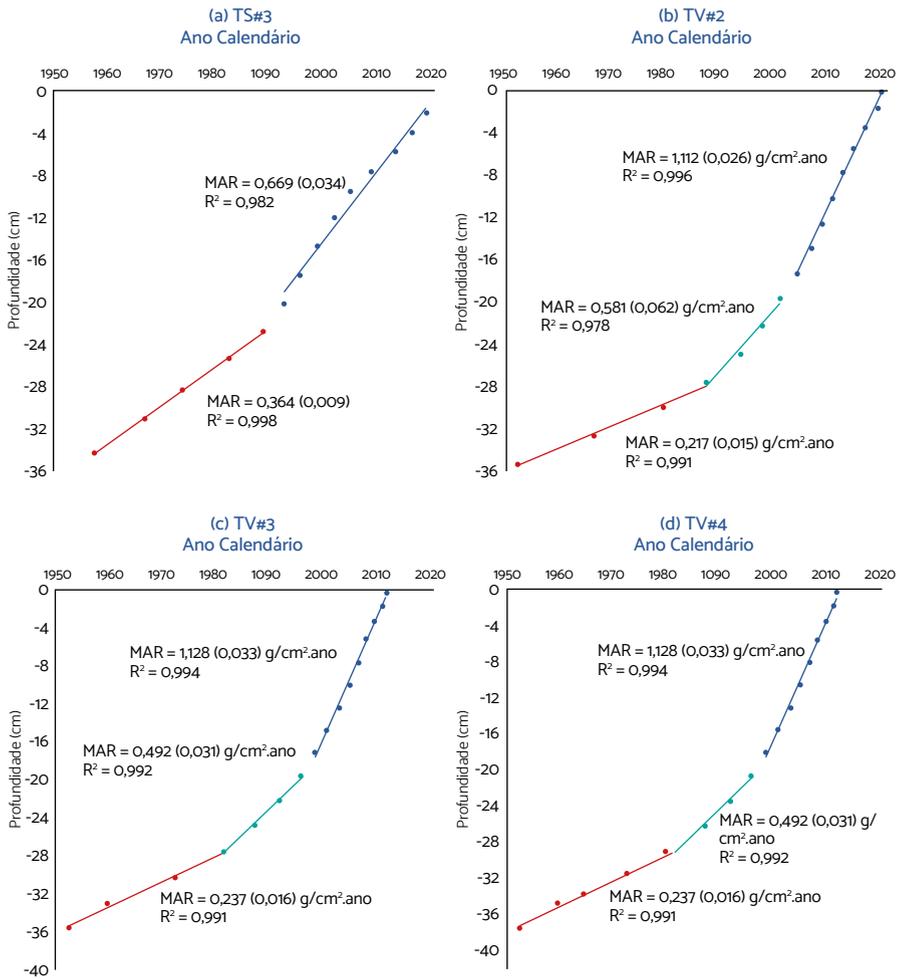
Fonte: Projeto MoVaSC.

Para todos os testemunhos analisados, constatou-se uma aceleração do assoreamento, quer quando expressos em termos da velocidade de sedimentação (SAR) ou da velocidade de acumulação mássica (MAR). Nota-se que as velocidades originais se mostraram semelhantes em todos os locais de amostragem, 0,22 g/(cm<sup>2</sup>.ano) – 0,32 g/(cm<sup>2</sup>.ano) (MAR) e 0,4 cm/ano – 0,6 cm/ano (SAR).

Por outro lado, os aumentos observados em Vigário foram superiores ao verificado em Santana-3, com velocidades médias atuais de 0,96 g/(cm<sup>2</sup>.ano) – 1,1 g/(cm<sup>2</sup>.ano) (MAR) e 2,5 cm/ano – 3,1 cm/ano (SAR), em Vigário e 0,69 g/(cm<sup>2</sup>.ano) (MAR) e 1,8 cm/ano (SAR) em Santana. Cabe ressaltar que a velocidade média de sedimentação calculada, por meio dos levantamentos batimétricos de 2001 e 2017, foi de 2,7 cm/ano para Vigário e de 1,0 cm/ano para Santana, mostrando a coerência dos resultados obtidos pela técnica do <sup>210</sup>Pb.

**Figura 4.18** Variação temporal das velocidades de sedimentação ( $\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{ano}$ ).

Velocidade acumulação de massa ( $\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{ano}$ ): TS# 3 (4.20a), TV# 2 (4.20b), TV#3 (4.20c) e TV#4 (4.20d).

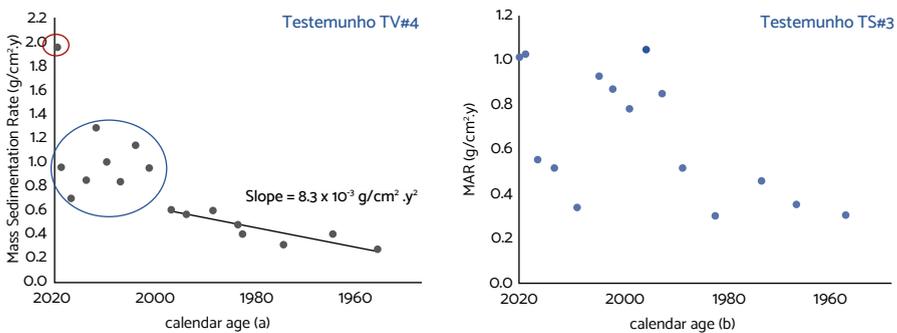


Fonte: Projeto MoVaSC.

A variação anual da velocidade de acumulação de massa (MAR) nos testemunhos TV#4 (Vigário) e TS#3 (Santana) é apresentada nas imagens (a) e (b) da Figura 4.19, respectivamente. O testemunho do reservatório de Vigário revela um lento incremento até o final da década de 1990, quando

há uma grande variação, e mantém-se na faixa de  $1,0 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{ano})$  por um período de aproximadamente 20 anos (região demarcada em azul). Por fim, esse valor dobra em 2020. Já o testemunho de Santana evidencia uma tendência de aumento ao longo dos anos, com uma redução da MAR entre 2008 e 2015, e retorno a velocidades mais altas nos últimos anos, demonstrando que Santana é mais susceptível às variações anuais, atuando como um tampão dessas variações observadas no reservatório de Vigário.

Figura 4.19 Variação anual da velocidade de acumulação de massa (MAR).



Fonte: Projeto MoVaSC.

Os dados da Tabela 4.12 permitem identificar os períodos de variação da velocidade de sedimentação e seus respectivos valores desde a inauguração do reservatório de Vigário. Observa-se que os valores nos três locais são próximos, confirmando um cenário similar de aceleração. Os dados da tabela mostram o cálculo da velocidade de sedimentação expressa em unidades de  $\text{cm}/\text{ano}$  e  $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{ano}$ , esta última via ensaios realizados nas amostras fatiadas dos testemunhos TV#2, TV#3 e TV#4.

**Tabela 4.12** Períodos de variação da velocidade de sedimentação: SAR e MAR. (Testemunhos TV#2, TV#3 e TV#4)

Período de variação/Local	Velocidade de sedimentação (cm/ano)			Velocidade de sedimentação mássica (g/cm <sup>2</sup> ano)		
	TV#2	TV#3	TV#4	TV#2	TV#3	TV#4
Meados 2000 até 2019	3,0	3,1	2,5	1,1	1,1	0,96
Meados 1980 até meados 2000	1,7	1,6	1,6	0,58	0,49	0,61
Inauguração até meados 1980	0,42	0,57	0,74	0,22	0,24	0,32

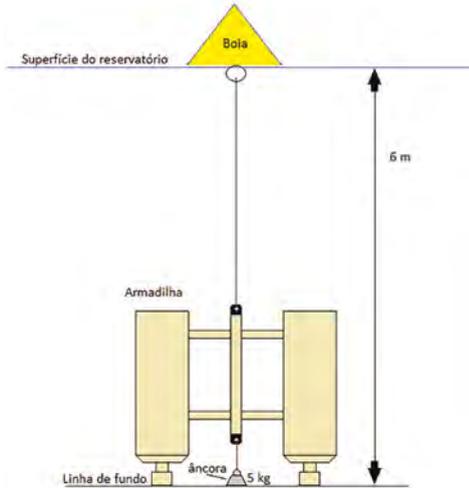
Fonte: Projeto MoVaSC.

### Implantação de armadilhas de sedimentos

A armadilha de sedimentos foi um dispositivo alternativo utilizado para completar o estudo de assoreamento. A Figura 4.20 ilustra a armadilha de sedimentos construída, mostrando suas duas câmaras (A e B) de coleta de sedimentos quando mergulhada nas águas do reservatório objeto do estudo. Conforme mostrado, dois tubos verticais de diâmetro interno nominal de 130 mm (permitem a captura de resíduos ao longo de um tempo de exposição previamente programado, armazenando os resíduos coletados ao longo do tempo nos compartimentos inferiores A e B, que após serem coletados são secados com base em um procedimento normalizado para a determinação de sua massa seca.



Figura 4.21 Instalação da armadilha e seu posicionamento no reservatório.



Fonte: Projeto MoVaSC.

As Figuras 4.22 e 4.23 mostram, respectivamente, o posicionamento da armadilha nos dois locais em que ela esteve exposta nas águas de Vigário, nas proximidades dos pontos de coleta dos testemunhos TV#2 e TV#4. Optou-se por instalar as armadilhas nos locais de coleta dos testemunhos, para que as informações dos testemunhos e da armadilha refletissem informações agregadas para o estudo de datação do reservatório pela técnica do  $^{210}\text{Pb}$ .

**Figura 4.22** Primeira rodada de coleta de sedimentos (próximo ao local de coleta do Testemunho TV#2).



Fonte: Projeto MoVaSC.

**Figura 4.23** Segunda rodada de coleta de sedimentos (próximo ao local de coleta do Testemunho TV#4).



A Tabela 4.13 caracteriza os dois locais georreferenciados onde a armadilha de sedimentos coletou amostras para fundamentar o cálculo da taxa de deposição de sedimentos no reservatório de Vigário. Conforme mostrado, estes locais foram selecionados intencionalmente próximos aos locais dos testemunhos TV#4 e TV#2, coletados no reservatório.

**Tabela 4.13** Locais de instalação da Armadilha de Sedimentos.

Reservatório de Vigário		Armadilha próxima ao local do Testemunho	Coordenadas georreferenciadas do local de instalação da armadilha		Medições realizadas no dia da coleta			
Data e horário da instalação (dd/mm/aa hh:mm)	Data e horário da coleta (dd/mm/aa hh:mm)		Tempo Exposição (horas)	Latitude	Longitude	Profundidade (m)	Turbidez (NTU)	CMP (Mg/L)
09/02/2021 08:47	26/02/2021 08:36	408	TV#4	22°40'05.0" S	43°53'03.5" O	4,2	(medição não realizada)	
26/02/2021 09:10	17/03/2021 09:12	456	TV#4	22°40'06.0" S	43°53'06.1" O	4,5	38,96	12,4
17/03/2021 09:40	12/04/2021 10:39	625	TV#4	22°40'06.0" S	43°53'06.1" O	4,5	23,61	5,8
12/04/2021 11:05	18/05/2021 07:50	861	TV#4	22°40'06.0" S	43°53'06.1" O	4,5	8,93	2,37
18/05/2021 12:25	27/07/2021 11/15	1679	TV#2	22°38'44.2" S	43°53'31.4" O	11,0	6,4	3,6

Fonte: Projeto MoVaSC.

Conforme mostrado, as primeiras 408 horas de observação foram perdidas tendo em vista que a armadilha foi dragada pela correnteza na primeira tentativa de sua instalação. Reforçado o sistema de ancoragem, a armadilha foi reinstalada e permaneceu em vigiância por outras 3621 horas, lentamente armazenando depósitos de resíduos posteriormente secados e analisados em laboratório.

A Equação (4.5) expressa a taxa de sedimentação em  $g/(cm^2 \cdot ano)$ , em função da massa seca (g) de resíduos coletados, da área ( $cm^2$ ) do tubo da câmara de coleta e do tempo  $t(h)$  de exposição da armadilha às águas do reservatório. A constante 8760 nesta equação é o conversor para que o resultado seja expresso em unidades de taxa por ano, a partir de um tempo em horas de coleta.

$$w \left[ \frac{g}{cm^2 \times ano} \right] = (365 \times 24) \frac{m_{seca} (g)}{A^2(cm^2) \times t(h)} = 8760 \frac{m_{seca} (g)}{A^2(cm^2) \times t(h)} \quad (4.5)$$

Assim, fazendo-se uso da equação (4.5), e levando-se em conta o valor de cada área das respectivas câmaras A e B de captação de sedimentos, foi possível calcular a taxa de sedimentação para cada período de coleta, tal qual reportado na Tabela 4.14 abaixo.

Como resultado dos pequenos intervalos de tempo de coleta (tempo de exposição da armadilha no reservatório), as velocidades de deposição mássica calculadas variaram entre 1,00 g/(cm<sup>2</sup>. ano) a 0,39 g/(cm<sup>2</sup>. ano), cuja variabilidade pode estar relacionada com uma transição de uma fase chuvosa para outra mais seca, ou seja, de águas mais turvas para águas com menos material particulado em suspensão. No entanto, na média, o valor mostrou-se coerente quando calculado na média para qualquer uma das câmaras de captação de sedimentos, ou seja, 0,52 g/(cm<sup>2</sup>. ano) e 0,53 g/(cm<sup>2</sup>. ano), respectivamente, quando calculados com dados das Câmaras A e B.

**Tabela 4.14** Armadilha de sedimentos: extrato da planilha de cálculo da taxa de sedimentação.

Armadilha de Sedimentos instalada no Reservatório de Vigário				
Data/horário (Instalação) [dd/mm/aa hh:mm]	Data/horário (Coleta) [dd/mm/aa hh:mm]	Tempo de exposição [h]	Posição (próxima ao Testemunho)	Profundidade (Câmara Coleta) [m]
26/02/2021 09:10	17/03/2021 09:12	456	TV#4	4,5
17/03/2021 09:40	12/04/2021 10:39	625	TV#4	4,5
12/04/2021 11:05	18/05/2021 07:50	861	TV#4	4,5
18/05/2021 12:25	27/07/2021 11:15	1679	TV#2	11,2
Tempo de exposição da Armadilha (h):		3621		

Fonte: Projeto MoVaSC.

Data da Coleta	Câmara A (Armadilha de Sedimentos)			Câmara B (Armadilha de Sedimentos)			Média da Taxa de Sedimentação
	Diâmetro interno (129,97 mm)			Diâmetro interno (130,02 mm)			
	Área de exposição (cm <sup>2</sup> ) = 132,67			Área de exposição (cm <sup>2</sup> ) = 132,773			
	Massa seca	Taxa Sedimentação	Granulometria	Massa seca	Taxa Sedimentação	Granulometria	
[dd/mm/aa]	[g]	[g/(cm <sup>2</sup> .ano)]	[µm]	[g]	[g/(cm <sup>2</sup> .ano)]	[µm]	[g/(cm <sup>2</sup> .ano)]
17/03/21	6,94	1,00	13,8	6,09	0,88	14,5	0,94
12/04/21	6,91	0,73	-	6,41	0,68	-	0,70
18/05/21	4,91	0,38	-	Amostra perdida na coleta			0,38
27/07/21	9,96	0,39	-	9,73	0,38	-	
<b>Total</b>	<b>28,72</b>	<b>0,52</b>	<b>13,8</b>	<b>22,23</b>	<b>0,53</b>	<b>14,5</b>	

## Estudo da correlação entre turbidez e concentração de material particulado

A concentração de particulados em suspensão constitui-se em um indicador crítico para estudos de assoreamento em reservatórios de água.

### Medição do particulado

A determinação da concentração de material (CMP) requer minucioso e moroso trabalho de laboratório (coleta de amostras, filtragem a vácuo fazendo uso de filtros de acetato de celulose, com porosidade de 0,45 micrometros, secagem e determinação da massa do resíduo captado em balança analítica). Tendo em vista esta dificuldade, foi estudada a existência de uma possível correlação entre CMP e algum indicador mensurável capaz de fornecer informações para avaliar a taxa de assoreamento em reservatórios de interesse. A turbidez da água foi a variável independente considerada. Comprovada tal correlação, a medição de turbidez (de fácil realização) pode ser utilizada para inferir o valor da concentração de particulados em suspensão, entendida como parâmetro crítico no estudo de assoreamento de reservatórios.

Outro objetivo deste estudo foi verificar se as águas dos reservatórios de Santana e Vigário seguem a mesma equação de regressão e, caso isto não seja verificado, identificar e explicar os fatores que justifiquem esse achado.

Num primeiro momento deste estudo, concentrou-se (i) na validação da técnica de medição da turbidez da água coletada nos reservatórios, que possui particulados em suspensão, e (ii) na validação dos ensaios de particulados (e.g.: rastreabilidade dos equipamentos, determinação da malha do filtro a ser utilizado na captura de particulados, investigação da existência de aglutinação do particulado e no controle metrológico da determinação do volume de água analisado).

### **Medições de Turbidez**

A *turbidez* é, em geral, medida comparando-se o espalhamento de um feixe de luz ao atravessar a amostra, com o espalhamento obtido com o mesmo feixe, e em iguais condições, ao atravessar uma suspensão padrão. Em geral, é expresso em Unidades Nefelométricas<sup>10</sup> de Turbidez (NTU), por vezes convertidas no seu equivalente em mg/L de SiO<sub>2</sub>, considerando-se, para tal, a turbidez que seria provocada pela presença daquela quantidade de sílica em suspensão.

O Turbidímetro Marca Akso, modelo TU Log, que opera por refração do feixe óptico a 90°, somente foi qualificado para as medições após aprovado em fase prospectiva do estudo, que identificou a influência de efeitos adversos na medição de turbidez (e.g., vibração do motor do barco utilizado para coletar amostras de água nos reservatórios; temperatura e estabilidade das amostras de água; carga da bateria, que energiza o turbidímetro; repetibilidade da medição; blindagem da cubeta de medição; influência da radiação luminosa externa). Aprovado nessa fase, o turbidímetro foi calibrado em um laboratório acreditado da rede Brasileira de

---

<sup>10</sup> *Nephelometry*: em físico-química, o termo “nephelometry” refere-se a um instrumento para estudar a densidade das partículas suspensas em um líquido, medindo-se o grau em que a suspensão espalha a luz.

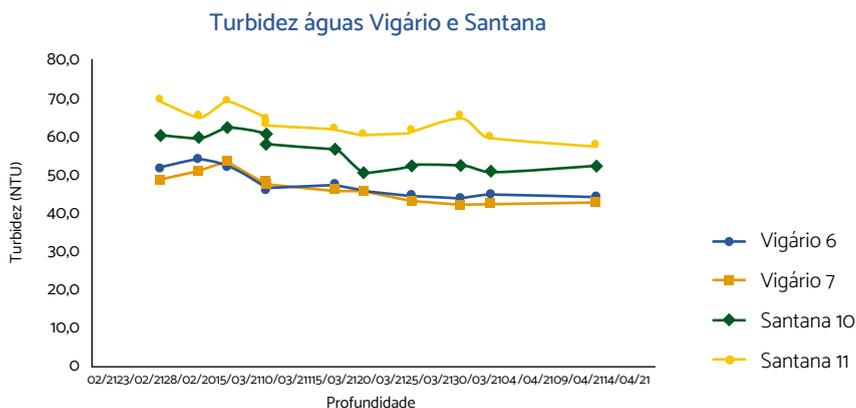
Calibração (RBC), controlada pelo INMETRO, cujas escalas eram ajustadas antes de cada rodada de medições contra fluidos-padrão certificados de turbidez conhecida (turbidez “zero” NTU; 20 NTU; 100 NTU e 800 NTU). Não obstante esses cuidados, o turbidímetro foi metrologicamente validado para uso após a sua participação em um ensaio de proficiência realizado em conformidade à norma ABNT NBR ISO/IEC 17043:2011 (requisitos gerais para ensaios de proficiência), e controlado por um laboratório independente (laboratório acreditado pelo INMETRO), que fez uso de uma amostra de material de referência certificado, com rastreabilidade metrológica a padrões reconhecidos internacionalmente, cujo valor designado (800 NTU, a 25 °C) e sua respectiva incerteza expandida associada ( $\pm 15$  NTU) foram mantidos confidenciais até o término da comparação interlaboratorial, enquadrando-se em ambos os critérios da norma (z-score e erro normalizado).

A Figura 4.24 (que inclui tabela de dados) ilustra réplicas de medições numa mesma amostra realizadas com o turbidímetro pré-qualificado para uso na pesquisa. Os resultados, monitorados ao longo de 45 dias, exibem uma concordância da ordem de 8% em relação ao quociente entre o desvio padrão e o valor médio de réplicas da medição.

A Figura 4.24 ilustra o resultado de medições de turbidez realizadas em quatro amostras de água coletadas nos reservatórios estudados (duas em Vigário, nos locais Vigário-6 e Vigário-7 e duas em Santana, nos locais Santana-10 e Santana-11). Para cada amostra, a medição de turbidez foi realizada *in situ* pelo operador da embarcação utilizada durante a coleta e, repetida em laboratório ao longo de 46 dias, mantendo-se as mesmas condições de armazenamento. Conforme ilustrado, dentro da margem de erro estimada, o valor medido da turbidez da amostra permaneceu praticamente constante, validando a hipótese de que a medição da turbidez não necessariamente precisa ser realizada em campo, no ato da coleta, o que drasticamente retarda as rotinas operacionais da operação nos reservatórios. O processamento dos dados documentados em Frota et al. (2021) comprovou que, para todas as amostras monitoradas,

o quociente entre o desvio padrão das réplicas e o valor médio da turbidez manteve-se em torno de 8%. Conforme esperado, as águas do reservatório de passagem de Santana (mais movimentadas pelo encontro das águas oriundas da Elevatória de Santa Cecília e do rio Piraí, a montante da elevatória de Vigário) possui turbidez superior à das águas do reservatório de acumulação de Vigário.

Figura 4.24 Réplicas da medição de turbidez em amostras de Vigário e Santana.



Data da medição (Coleta: 24/02/21; Medições: entre 25/02 e 11/04/21)

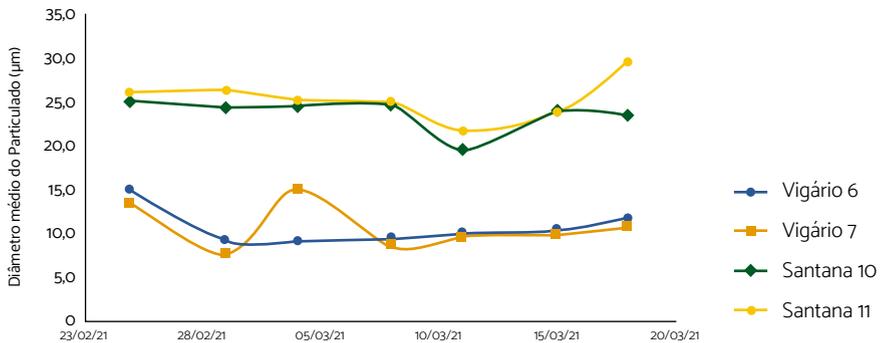
Fonte: Projeto MoVaSC.

### Granulometria das águas de Santana e Vigário

O estudo da granulometria das águas dos reservatórios de Santana e Vigário objetivou explicar diferenças entre os resultados da turbidez medida nessas águas. Para elucidar esta questão, ensaios da distribuição granulométrica foram realizados não apenas nas águas, mas, também, em amostras dos testemunhos de sedimentos coletados nesses reservatórios. Resultados de ensaios independentes realizados em amostras fatiadas desses testemunhos (material sólido) explicam a razão pela qual as águas de Santana (uma mistura de águas do rio Paraíba do Sul e do rio Piraí) possuem um tamanho de particulado, expressivamente maior (cerca de 44%) que o particulado presente nas águas de Vigário.

A Figura 4.25 ilustra resultados dos ensaios de granulometria, que permitiram determinar o diâmetro médio do particulado em suspensão em amostras de água analisadas em ambos os reservatórios. Discutido em relatório do projeto MoVaSC (Frota et al., 2021), os ensaios de distribuição granulométrica, realizados pela técnica CILAS 1190 líquido, permitiu determinar o diâmetro médio do particulado, calculado com base numa média ponderada de medições realizadas com diferentes percentuais de varredura da amostra por um feixe óptico, portanto produzindo um valor médio probabilístico do resultado.

**Figura 4.25** Resultados dos ensaios de granulometria em sedimentos dos reservatórios de Santana e Vigário.



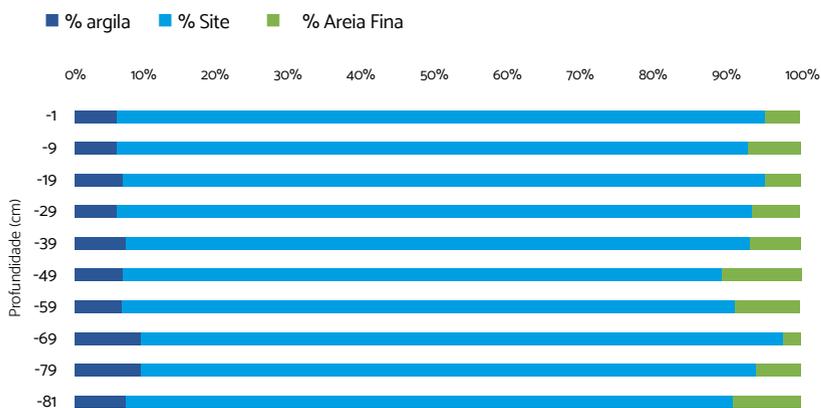
Data da Medição (Coleta: 24/02/21; Medições: entre 25/02 e 13/04/21)

Fonte: Projeto MoVaSC.

Esta diferença de tamanho do particulado pode ser explicada ao se observar que, ao longo da trajetória das águas de Santana até a sua bacia, na entrada de captação de água da elevatória de Vigário, existe uma série de desvios do curso da água que promovem uma segregação das partículas maiores (notadamente areia fina), enquanto as partículas menores permanecem em solução.

Já as Figuras 4.26 e 4.27 ilustram a composição percentual dos sedimentos detectados.

Figura 4.26 Composição percentual de sedimentos nas águas de Santana.



Fonte: Projeto MoVaSC.

Figura 4.27 Composição percentual de sedimentos nas águas de Vigário.



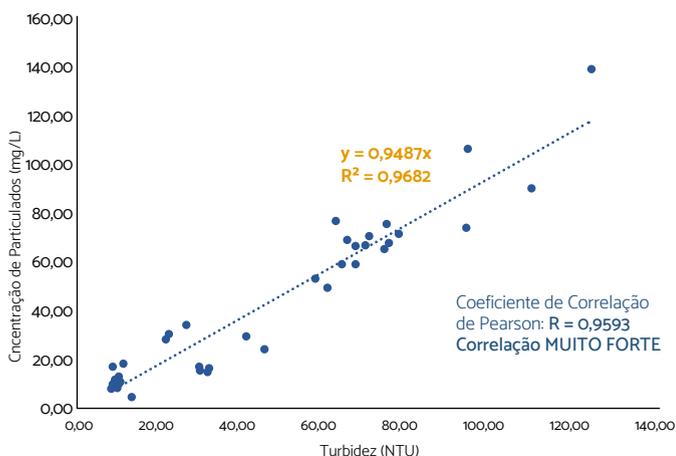
Fonte: Projeto MoVaSC.

Conforme revelado pelos resultados dos ensaios realizados, a presença de areia fina se faz substancialmente mais presente nas águas de Santana, o que explica o maior diâmetro médio do particulado de Santana.

### **Pesquisa de identificação de correlação entre a turbidez da água e a concentração de particulados em suspensão**

Em conformidade aos critérios-filtro estabelecidos, os dados das tabelas anexadas às Figuras 4.28 (Santana) e 4.29 (Vigário) ilustram as respectivas bases de dados utilizadas para a construção das equações de correlação da concentração de material particulado (CMP) com a turbidez (NTU) das águas dos reservatórios estudados. Com base nesses dados foi possível determinar uma correlação entre a turbidez (de medição simples) e a concentração de particulados em suspensão nas águas dos reservatórios (de medição mais complexa).

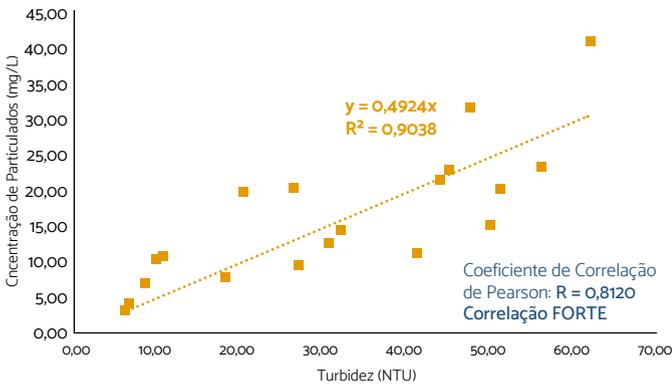
Figura 4.28 Turbidez vs. CMP em águas de Santana (codificação por local de coleta).



Local coleta	Turb (NTU)	CMP (mg/L)
	10,00	10,70
S-1	77,38	71,1
	93,85	106,39
	31,43	16,79
S-2	9,80	10,80
	74,37	75,7
S-3	8,50	17,30
	70,050	70
	93,42	73,71
S-4	31,03	15,89
	8,60	10,20
	73,767	65,4
	8,90	9,20
S-5	74,867	67,5
	123,58	138,68
	30,89	15,66
S-6	9,00	11,50
	67,100	59,2
	9,30	8,40
S-7	63,74	58,9
	109,33	89,97
	29,33	15,43

Local coleta	Turb (NTU)	CMP (mg/L)
S-8	9,10	10,90
	66,92	66,7
	8,30	8,60
S-9	22,00	29,90
	64,78	69,2
S-10	9,20	10,20
	62,21	77,11
	60,12	49,7
	44,93	24,06
	10,20	12,90
S-11	21,50	28,30
	57,10	53,14
	69,38	67,0
	40,58	29,55
S-12	29,18	16,8
	9,00	9,60
S-13	9,70	13,20
	26,30	34,00
S-14	11,00	18,30
	13,10	5,00

Figura 4.29 Turbidez vs. CMP em águas de Vigário (codificação por local de coleta).



Local coleta	Turb (NTU)	CMP (mg/L)	Local coleta	Turb (NTU)	CMP (mg/L)
V-1	9,90	10,50	V-5	6,10	3,10
	26,40	20,40		18,00	7,80
	10,70	10,90		51,20	20,30
V-2	62,00	40,90	V-6	6,10	3,10
	47,59	31,54		45,24	22,74
	32,03	14,55		51,20	18,50
	8,60	6,90		24,04	6,89
V-3	20,30	19,70	V-7	6,20	3,30
	56,10	23,30		41,70	18,68
	43,87	21,36		49,10	16,30
	30,62	12,76		38,96	12,14
	6,60	4,20		23,61	5,83
V-4	50,00	15,00	V-8	5,30	3,10
	41,16	11,13		18,30	7,30
	26,93	9,59			

Fonte: Projeto MoVaSC.

A Tabela 4.15 explicita, separadamente, para as águas de cada reservatório, as equações de regressão, o Coeficiente de determinação  $R^2$ , o grau de correlação segundo os critérios de Pearson (Hinkle et al., 2003) e a incerteza expandida associada à medição de turbidez.

**Tabela 4.15** Resultados validados para fundamentar o estudo de correlação.

Função	Reservatório de Santana	Reservatório de Vigário
Equação de Regressão	CMP = 0,9487 x Turbidez	CMP = 0,4924 x Turbidez
[ $y = ax + b$ ]; com $b = 0$	CMP (mg/L) ; Turbidez (NTU)	
Coefficiente de Determinação	$R^2 = 0,9682$	$R^2 = 0,9038$
Coefficiente de Correlação Pearson	$R = 0,9593$	$R = 0,8120$
Grau de Correlação [CMP (mg/L) vs. Turbidez (NTU)]	MUITO FORTE	FORTE
Incerteza associada à medição de Turbidez: $U = \pm 0,13$ NTU (0 a 20 NTU) $U = 0,6$ NTU (20 a 200 NTU); $U = 3,2$ NTU (200 a 500 NTU); $U = 20$ NTU (500 a 800 NTU)		

Fonte: Projeto MoVaSC.

Comprovada a existência de correlação entre os resultados da medição de turbidez (expressa em unidades NTU) com o resultado da concentração de material particulado (CMP, expresso em mg/L) das águas de Santana e Vigário, as equações de regressão (4.6) e (4.7), respectivamente, caracterizam a correlação identificada com base no Coeficiente de Correlação de Pearson (Hinkle et al., 2003):

- Para as águas do reservatório de Santana (correlação MUITO FORTE):

$$\text{CMP} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = 0,9487 \text{ Turbidez (NTU)} \quad (4.6)$$

- Para as águas do reservatório de Vigário (correlação FORTE):

$$\text{CMP} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = 0,4924 \text{ Turbidez (NTU)} \quad (4.7)$$

Equações essas que podem ser usadas para estimar a concentração de material particulado em função da turbidez medida das águas dos reservatórios indicados.

O *Coefficiente de Correlação de Pearson* (determinado com base nos resultados de medições independentes da turbidez das águas dos reservatórios estudados e da concentração do material particulado em suspensão nas águas de Santana) confirmou uma correlação MUITO FORTE ( $R = 0,96$ ) e uma correlação FORTE ( $R = 0,81$ ) entre as mesmas variáveis para o caso das águas do reservatório de Vigário. Conclui-se, portanto, a existência de uma forte associação linear entre essas duas variáveis ambientais para as águas de ambos os reservatórios. A constatação dessa correlação disponibiliza para os gestores dos reservatórios uma alternativa prática de interesse que permite estimar o valor da CMP (ensaio complexo) pela medição indireta, simples e prática, da turbidez da água.

O coeficiente angular da equação de regressão observado para o reservatório de Santana (0,9487) segue o esperado de 1 ( $1 \text{ NTU} = 1 \text{ mg SiO}_2/\text{L}$ ) (*Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 2018, método 2130). Já o valor observado para Vigário (0,4924) é bem menor do que a unidade. Uma possível explicação para essa diferença está no diâmetro maior do material particulado em suspensão de Santana quando comparado com o de Vigário, o que resultaria em um maior espalhamento da radiação luminosa incidente na cubeta do turbidímetro.

A água é imprescindível para que a sociedade exerça suas atividades, certamente o mais crítico e importante elemento para a vida humana, e considerado insumo essencial para a geração limpa de energia (APHA, 2016). Os resultados descritos neste capítulo foram essenciais para orientar o desenvolvimento do projeto MoVaSC como um todo, notadamente os capítulos a seguir apresentados, que tratam de aspectos relacionados ao uso e ocupação do solo e dos condicionantes para desenvolvimento do modelo hidrometeorológico, objeto central do Projeto de P&D MoVaSC.

## Referências

- ANVISA, AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. 2021. Limites máximos tolerados (LMT) de contaminantes em alimentos. *Instrução Normativa 88*. Disponível em: [http://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/5780314/%281%29IN\\_88\\_2021\\_.pdf/2918ab61-5aba-439b-9969-a9524b0973d3](http://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/5780314/%281%29IN_88_2021_.pdf/2918ab61-5aba-439b-9969-a9524b0973d3).
- ALMEIDA, E. V.; KÜTTER, V. T.; MARQUES, E. D.; SILVA-FILHO, E. V. 2016. First assessment of trace metal concentration in mangrove crab eggs and other tissues. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188 (7), p. 421, SE, Brazil.
- APHA, AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF, WATER ENVIRONMENT FEDERATION. 2018. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 23ª edição.
- ATHY, L. F. 1930. Density, porosity and compaction of sedimentary rocks. *Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 14, p. 1-24.
- EPA, UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1996a. *Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils. Método 3050B*, revisão 2. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>.
- EPA, UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1996b. *Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry. Método 6010B*, revisão 2. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/6010b.pdf>.
- FROTA, M.N.; FRANÇA, G.B.; SOUZA, E.P.; ARAUJO, A.A.M.; VIANA, L.Q. 2021. Relatório Técnico Final Projeto de P&D Light/Aneel 5161-0016/2019 (“MOVASC – Modelagem de Vazão, Sedimento e Clima na bacia do rio Para.ba do Sul”), Contrato n.: 4500428146.
- GODOY, J. M.; SCHÜTTELKOPF, H. 1987. Considerations about the <sup>226</sup>Ra gross alpha counting determination. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 111, p. 329-335.
- GODOY, J. M.; MOREIRA, I.; WANDERLEY, C.; FILHO, F. F. S.; MOZETO, A. A. 1998. An Alternative Method for the Determination of Excess <sup>210</sup>Pb in Sediments. *Radiation Protection and Dosimetry*, 75, p. 111-115.
- HINKLE, D. E.; WIERSMA, W.; JURIS, S.G. 2003. *Applied Statistics for the Behavioral Sciences*. 5th ed. Boston: Houghton Mifflin.
- NOAA, NATIONAL OCEAN AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. 2008. *Screening Quick Reference Tables*. Disponível em: <https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/SQuiRTs.pdf>.

- ROBBINS, J. A.; EDGINTON, D. N. 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 39, p. 285-304.
- SANCHEZ-CABEZA, J. A.; RUIZ-FERNANDES, A. C. 2012. Radiocronologia de Sedimentos Costeros Utilizando  $^{210}\text{Pb}$ : Modelos, Validacion y Aplicaciones. In: SANCHEZ-CABEZA, J. A.; DIAZ-ASENCIO, M.; RUIZ FERNANDES, A. C. (Eds). *International Atomic Energy Agency*, Vienna.
- TERRA, B. F., ARAÚJO, F. G., CALZA, C. F., LOPES, R. T., TEIXEIRA, T. P. 2008. Heavy metal in tissues of three fish species from different trophic levels in a tropical Brazilian river. *Water Air and Soil Pollution*, 187, p. 275-284.
- VITÓRIA, A. P.; SANTOS, J. L. S.; SALOMÃO, M. S. M. B.; VIEIRA, T. O.; CUNHA, M.; PIREDA, S. F.; RABELO, G. R. 2015. Influence of ecologic type, seasonality, and origin of macrophyte in metal accumulation, anatomy and ecophysiology of *Eichhornia crassipes* and *Eichhornia azurea*. *Aquatic Botany*, 125, p. 9-15 (<https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2015.04.001>).





# USO E COBERTURA DO SOLO: INSUMO PARA A MODELAGEM HIDROMETEOROLÓGICA DA BACIA

## Introdução e contexto

Com o avanço da computação e das tecnologias de sensoriamento remoto, que passaram a incorporar sensores em plataformas de monitoramento por satélite e aplicação de algoritmos de pré e pós-processamento de dados, os computadores experimentaram ganhos surpreendentes em seu desempenho operacional. Resultado desses avanços, tornou-se possível gerar diferentes tipos de mapas georeferenciados de interesse para o estudo de fenômenos atmosféricos, taxas de assoreamento e de uso e cobertura do solo, com excepcional resolução espacial, capacidade de discriminação dos alvos e surpreendente resolução temporal. Beneficiando-se dos ganhos de qualidade e de sua inusitada representatividade, mapas especializados são hoje utilizados como ferramenta estratégica de gestão ambiental, notadamente em avaliações do uso e cobertura do solo e de gestão integrada dos recursos hídricos.

Exemplos concretos do potencial das ferramentas computacionais hoje disponíveis são destacados nos diferentes capítulos deste livro. No Capítulo 1 (Bacia hidrográfica do Paraíba do Sul: perspectiva de estudos impactantes), dados do MapBiomas permitiram caracterizar a dinâmica de uso e cobertura do solo da

bacia do rio Paraíba do Sul como um todo. O uso de algoritmos de processamento e análise de dados permitiu reclassificar as diferentes classes MapBiomias (definidas na Tabela 5.1) e utilizadas na adequação da modelagem hidrometeorológica, objeto do desenvolvimento do projeto MoVaSC (discutidas no Capítulo 6). No Capítulo 2 (Tendências de extremos de precipitação e impacto de oscilações oceânicas na bacia) e Capítulo 3 (Fenômenos atmosféricos de alta frequência na bacia hidrográfica), mapas específicos permitiram documentar fenômenos atmosféricos de alta e baixa frequências, a exemplo das oscilações oceânicas e dos extremos de precipitação na bacia, respectivamente. No capítulo 4 (Dinâmica da taxa de sedimentação em reservatórios da bacia: estratégia de avaliação da capacidade dos reservatórios), mapas georreferenciados caracterizaram a batimetria de reservatórios da bacia do Paraíba do Sul. Neste Capítulo 5, os mapas reclassificados contribuíram para definir os parâmetros físicos que foram utilizados no processo de calibração do modelo hidrológico, antes de sua integração *offline* ao código computacional que alimenta o modelo integrado, incorporando informações atmosféricas. Também, no Capítulo 6 (Modelagem da bacia: modelo integrado hidrometeorológico), diversos são os exemplos de mapas elaborados para caracterização da estrutura fisiográfica do modelo, mapas digitais de terreno, uso e cobertura do solo e de tipos de vegetação.

Entendida como ferramenta de estudo da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, a modelagem hidrometeorológica atendeu aos requisitos físicos de uma reclassificação das variáveis de uso e cobertura do solo realizada com base na análise cruzada das classes do projeto MapBiomias. Em particular, nos mapas do SIGA-CEIVAP (Sistema de Informações Geográficas e Geoambientais da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul) e nas classes de uso e cobertura do solo, constantes do banco de dados do modelo SWAT+ (*Soil Water and Assessment Tool*). Assegurou-se, assim, o uso de parâmetros físicos reais, representativos dos tipos de solo e de vegetação que influenciam o balanço hídrico calculado pelo modelo.

A caracterização física de uma bacia hidrográfica envolve um conjunto muito amplo de aspectos relacionados ao uso e cobertura do solo, uma vez que estes representam uma “assinatura” das atividades antrópicas na bacia, fortemente associadas à dinâmica de variabilidade do regime hidrológico. Não obstante, as consequências que resultam das alterações nos usos e coberturas do solo, estas vêm sendo cada vez mais estudadas devido aos seus impactos na hidrologia (com possibilidade de efeitos de *feedback* na meteorologia e clima); na ecologia e no meio ambiente, não se podendo negligenciar os impactos socioeconômicos subjacentes (Anaba et al., 2017; Nasta et al., 2017; Yen et al., 2015).

A construção de modelos físicos distribuídos, a exemplo do modelo SWAT (Arnold e Fohrer, 2005; Arnold et al., 2012), fundamenta-se (i) nas diferentes classes de uso e cobertura do solo (i.e., fragmentos florestais, solo exposto, água, pastagem, agricultura e área urbana) e (ii) na produção dos mapas de uso e cobertura para a bacia estudada, que facilitam a análise do que se denomina “transição das classes”, ano a ano; ou seja, variações nas áreas ocupadas por cada uma dessas classes ao longo do tempo, impactando nos respectivos biomas por elas caracterizados. Para o presente estudo, os mapas construídos para a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul foram gerados por recortes de mapas mais abrangentes construídos pelo projeto MapBiomas (Mapbiomas, 2020; Souza et al., 2020) e devidamente reclassificados para a realidade da bacia do Paraíba do Sul, assim contemplando as classes de uso e cobertura do solo, devidamente ajustadas para alimentar o modelo SWAT+. O acesso a esses mapas e à ferramenta computacional que os construíram permite, então, desenvolver análises relacionadas ao uso e cobertura do solo e estimar as taxas de transição entre essas classes para toda a bacia hidrográfica objeto da análise.

Este capítulo discute como essas diferentes classes variam ao longo do tempo de análise e apresenta os resultados obtidos para as bacias de contribuição que alimentam quatro reservatórios que impactam na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, mais especificamente, os reservatórios de Santa Cecília, Tocós, Vigário e Santana.

## Uso e cobertura do solo e sua aplicação em modelos hidrológicos

A modelagem hidrológica dos processos de escoamento superficial, subterrâneo, e da produção de sedimentos em bacias hidrográficas, é utilizada para caracterizar os impactos que resultam de mudanças climáticas e de ações antrópicas exercidas sobre o meio ambiente. Do ponto de vista conceitual, modelos hidrológicos são ferramentas computacionais concebidas para calcular o balanço hídrico com base em equações de governo (equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros físicos e ambientais específicos). Equações essas que permitem entender o impacto das mudanças no uso da terra e prever alterações futuras nos ecossistemas, no presente caso, representativos dos processos físicos associados à escala geográfica da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul. Via de regra, são dependentes de informações relacionadas às características físicas da bacia (e.g.: topografia, declividades, tipos de solo e cobertura vegetal), o que requer conhecimento específico relacionado ao uso e cobertura do solo da bacia em estudo.

As informações relacionadas às diferentes alternativas de usos e coberturas do solo são produzidas na forma de mapas espaciais, a partir de imagens de sensoriamento remoto. A exemplo do sistema Di Gregório (2016), bastante difundido e utilizado em estudos hidrológicos, esses mapas são usualmente produzidos no formato raster<sup>1</sup>, incorporando uma classificação específica para as diferentes classes de uso e cobertura do solo.

---

1 O formato raster caracteriza-se pelo uso de linhas (horizontais) e colunas (verticais) de pixels, que representam células de dados. Cada pixel representa uma região geográfica, enquanto o valor do pixel representa uma característica dessa região. Tipicamente, as *imagens raster* são imagens fotográficas, ou de satélites, com resolução para exibir detalhes, enquanto as *imagens vetoriais* são mais simples, sendo utilizadas em desenhos técnicos e na construção de mapas. Já pixels, são definidos como pequenos “quadrados”, de diferentes cores que, uma vez juntos, formam imagens. *Ilustrações bitmap* podem ser, por exemplo, fotos de natureza. Essas imagens possuem transição de tons de forma sutil e podem ser compostas por milhões de cores.

Em virtude da limitada disponibilidade de dados e deficiências dos algoritmos de processamento de dados originalmente utilizados, esses mapas costumavam ser tratados como variáveis temporais estáticas. Com a consolidação de uma base de dados mais extensa, e beneficiando-se da surpreendente evolução dos algoritmos de classificação, passou a ser possível agregar a evolução dinâmica dos usos e cobertura do solo nos processos de modelagem computacional.

Já há algum tempo, é consenso na literatura especializada que modelos hidrológicos físicos distribuídos apresentam sensibilidade consistente às variáveis de uso e cobertura do solo. De certa forma, essa era uma realidade esperada, uma vez que estes modelos foram conceitualmente construídos, não exclusivamente, mas, também, com essa finalidade. No caso do código computacional SWAT, ele foi conceitualmente concebido e elaborado para lidar com problemas que envolvem práticas agrícolas e o subjacente uso dos recursos hídricos (Yen et al., 2015).

Esta habilidade em assimilar dados de uso e cobertura do solo no cálculo da vazão motivou uma diversidade de estudos para avaliar o efeito da dinâmica do uso e cobertura do solo na previsão da vazão hídrica e suas variáveis associadas, a exemplo da capacidade de transporte de sedimentos e poluentes (Machado et al., 2018; Anaba et al., 2017; Nasta et al., 2017; Yen et al., 2015; Wilson et al., 2014; Baker e Mille, 2013; Chiang et al., 2010; Wang et al., 2010; Schilling et al., 2008).

Destes estudos aqui referenciados, todos fazem uso do código SWAT. Selecionado como exemplo, Anaba et al. (2017) atestaram a habilidade de o modelo SWAT realizar simulações de vazão em função de diferentes cenários de uso e cobertura do solo. Em particular, consideram estimativas das quantidades de sedimentos transportados e das perdas de nutrientes do solo em uma bacia costeira, no caso específico, fortemente impactada na sua dinâmica de uso e cobertura do solo. Os resultados mostraram um consistente aumento, da ordem de 26%, no escoamento superficial, que foi atribuído à dinâmica de mudança e degradação do uso e cobertura do solo.

Similarmente ao trabalho realizado por Nasta et al. (2017) para investigar os impactos da dinâmica do uso e cobertura do solo nas denominadas *Hydrological Ecosystem Functions*, (discutidas por Groot et al., 2010), o presente estudo faz uso do modelo computacional SWAT para estudar a bacia hidrológica do Paraíba do Sul, sujeita à recomposição natural de vegetação e às práticas de reflorestamento.

Dentre as conclusões de destaque deste estudo, comprovou-se que para o cenário de recomposição natural da floresta e reflorestamento ocorridos na bacia do rio Paraíba do Sul há uma redução na produção de água (o que impacta a vazão hídrica) e um aumento nos fluxos reais de evapotranspiração. Em contraponto, o cenário passado de intenso uso agrícola, demandando elevado aporte de água, drenou sedimentos para o interior da barragem destinada aos usos múltiplos, acompanhada de uma redução nos fluxos de evapotranspiração. A este cenário, associado ao aumento da vazão hídrica, previa-se a intensificação na erosão e degradação do solo, resultando em um aumento significativo do aporte de sedimentos em direção ao reservatório, por sua vez acelerando o processo de assoreamento, cuja consequência é a redução na capacidade de armazenamento do reservatório.

Se por um lado as bases de dados de uso e cobertura consolidam-se e tornam-se disponíveis para orientar estudos específicos sobre o tema, por outro, os códigos computacionais dos modelos utilizados sofisticam-se passando a requerer maior capacidade de processamento e habilidade computacional por parte dos profissionais envolvidos no estudo e simulação da bacia.

O modelo hidrometeorológico adaptado à bacia do Paraíba do Sul pelo projeto MoVaSC permite incorporar os diferentes cenários de uso e cobertura do solo para a bacia, gerando simulações distintas para cada classe de uso e cobertura do solo, ou conjunto delas, quer para um estado inicial de referência, quer para um período suficientemente longo em que as mudanças foram consideradas significativas. Para que a evolução dinâmica dessa informação pudesse ser considerada nas simulações realizadas, fez-se

necessário ajustes nos códigos computacionais e no processo de calibração dos parâmetros físicos utilizados.

### **Metodologia utilizada para a construção dos mapas de uso e cobertura do solo**

À medida que as bases de dados de sensoriamento remoto e as técnicas de processamento de imagens evoluem, as aplicações e demandas para a construção de mapas representativos da evolução espaço-temporal do uso e cobertura da terra se multiplicam.

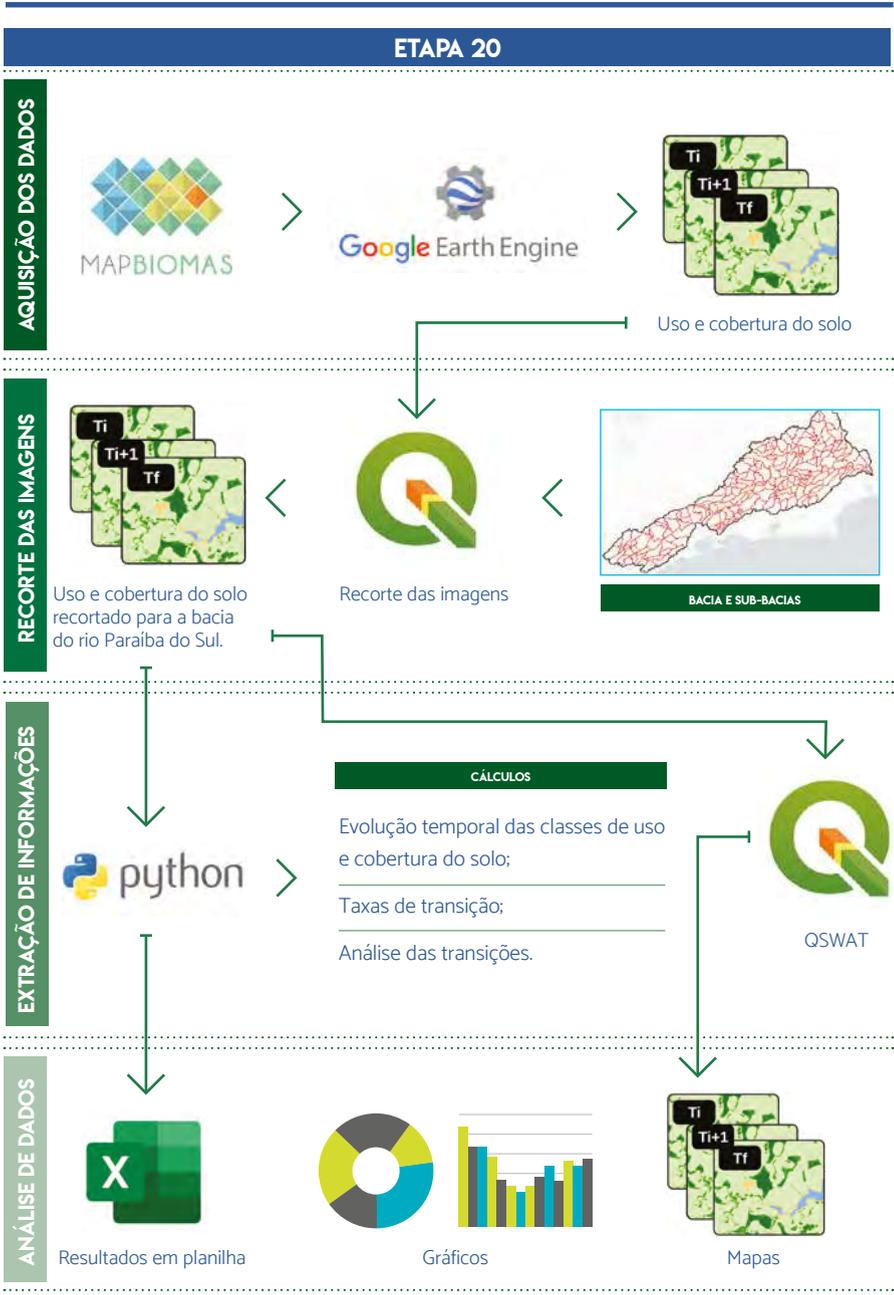
A importância estratégica do tema, enquanto política pública, foi muito bem pontuada por Anderson et al. (1976), em uma revisão da bibliografia sobre sistemas de classificação das diferentes classes do uso e cobertura da terra. Nesse estudo, elaborado como fundamento para o desenvolvimento de bases de dados de sensoriamento remoto, os autores discutem a evolução e crescente utilização dessas técnicas no enfrentamento de problemas relacionados ao desenvolvimento desordenado e descontrolado do uso e cobertura do solo. Em particular, enfatizam os aspectos relacionados à deterioração da qualidade ambiental, à perda de terras agricultáveis e ao comprometimento do bioma.

Estudos e classificações propostos por organismos internacionais (Di Gregorio, 2016) e realizados pela Embrapa relacionados ao uso e cobertura do solo para a região amazônica brasileira estão descritos na literatura especializada (Rodrigues et. al., 1996; Lu et al., 2003). A disponibilidade mais recente de diversas bases de dados de sensoriamento remoto, e a grande evolução das técnicas de processamento de imagem, têm estimulado pesquisadores a perseguirem soluções mais eficazes para equacionar o problema em diferentes regiões do planeta. Mais recentemente, a partir de imagens Landsat, mapas foram construídos com base em técnicas de sensoriamento remoto e processamento de imagens MODIS, permitindo obter mapas de uso e cobertura para a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul (Andrade et al., 2016; Andrade e Ribeiro, 2019 e 2020). A partir de 2015, o projeto de mapeamento

anual de uso e cobertura da terra no Brasil (MapBiomass, 2020; Souza et al., 2020) teve como foco principal o monitoramento dos desmatamentos e queimadas nos principais biomas brasileiros (e.g., Amazônia, Pantanal e Cerrado). Este passou a gerar mapas de uso e cobertura do solo para todo o território brasileiro, com qualidade, resolução e nível de detalhamento bastante elaborados. Na visão especialista de Andrade e Ribeiro (2019 e 2020), as técnicas e os procedimentos consolidados pelo projeto MapBiomass permitem a produção de mapas de uso e cobertura da terra de elevada qualidade técnica.

Sistematicamente submetidos a processos de aprimoramento, esta técnica foi selecionada para gerar os mapas produzidos no âmbito dos desenvolvimentos do projeto de P&D MoVaSC. Contribuindo para o estado da técnica, aprimoramentos foram, entretanto, introduzidos pelo projeto MoVaSC, notadamente para gerar um procedimento de captação, recorte e reclassificação das imagens. Permitiu-se, assim, a compatibilização com o modelo de calibração SWAT+ e a construção de algoritmos de pós-processamento, viabilizando a extração de informações e provendo uma sistemática de análise de dados, fundamentada na geração de estatísticas das áreas estudadas e de suas respectivas taxas de transição entre as diferentes classes de uso e cobertura do solo. De forma esquemática, a Figura 5.1 ilustra as citadas contribuições do projeto MoVaSC, mais especificamente, o fluxograma da metodologia de reclassificação relacionada à evolução temporal das classes de uso e cobertura do solo, taxas de transição e análise das muitas transições ocorridas no longo do tempo do estudo realizado.

Figura 5.1 Fluxograma da metodologia de reclassificação.



Fonte: Projeto de P&D MoVaSC.

### **O Processo de aquisição dos dados**

O processo de aquisição dos dados do projeto MapBiomias pode ser simplificado pelo uso de ferramentas específicas, a exemplo do *MapBiomias User Toolkit*, que permite a construção de *scripts* para acessar e manipular estes mapas na plataforma *Google Earth Engine*<sup>2</sup>, cuja interface é ilustrada na Figura 5.2.

Outra alternativa é a utilização do complementos<sup>3</sup> para QGIS<sup>4</sup>, conforme ilustrado na Figura 5.3, que permite acesso aos mapas de uso e cobertura do solo para o período de 1985 a 2019, para todo o território brasileiro.

### **Características do projeto MapBiomias**

A partir do objetivo de se desenvolver um método rápido, confiável, colaborativo e de baixo custo para produzir séries temporais de mapas de uso e cobertura da terra no Brasil, o projeto MapBiomias, formado em 2015 por um esforço coletivo de cientistas de diversas universidades, organizações e grupos de pesquisa, vem contribuindo, anualmente, com novos mapas de uso e cobertura do solo para todo território brasileiro.

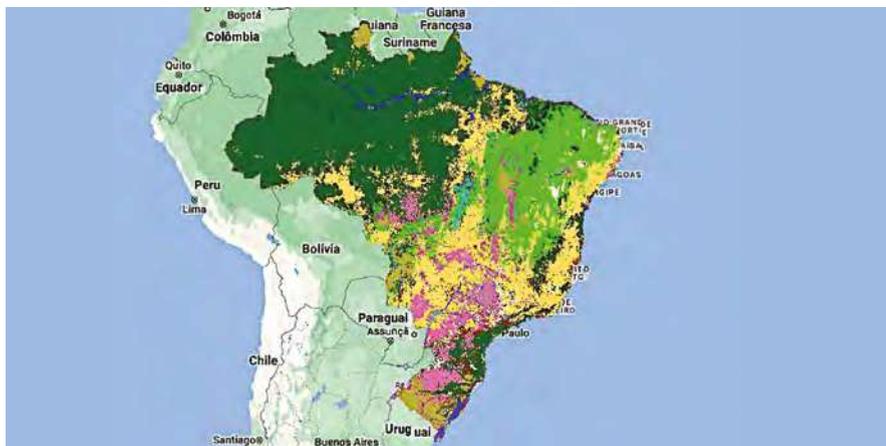
---

2 *MapBiomias User Toolkit-Google Earth Engine*: ferramenta de auxílio para processamento de mapas. O manual para a utilização do *toolkit* encontra-se no endereço: <https://github.com/mapbiomas-brazil/user-toolkit>.

3 Complementos são espécies de *scripts* escritos para serem adicionados no programa QGIS e, neste caso específico, permitem a leitura dos mapas do MapBiomias diretamente no QGIS.

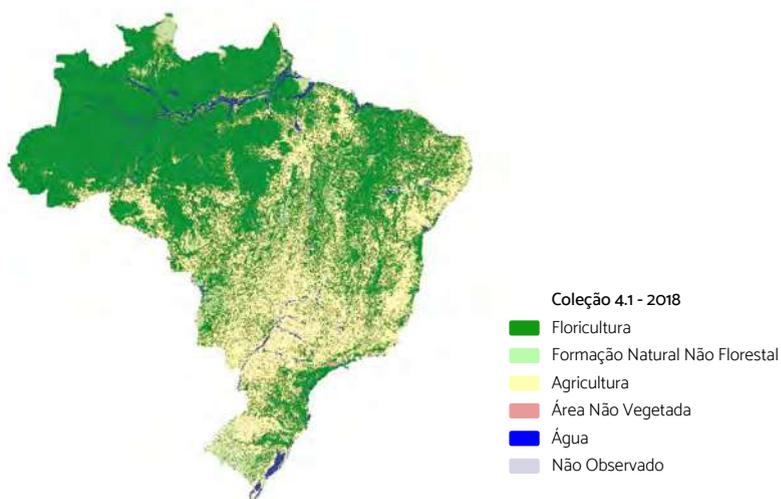
4 QGIS (anteriormente conhecido como *Quantum GIS*) é um software livre, com código fonte aberto, multiplataforma de sistema de informação geográfica (SIG), que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados.

Figura 5.2 MapBiomas *User Toolkit* – Google Earth Engine.



Fonte: Projeto MoVaSC, fazendo uso de imagem capturada pela ferramenta MapBiomas (MapBiomas, 2020).

Figura 5.3 Complemento do MapBiomas Collection 4.1, para QGIS.



Fonte: Projeto MoVaSC, fazendo uso de imagem capturada pela ferramenta MapBiomas (2020).

Esta iniciativa de mapeamento está organizada por biomas (Amazônia, Mata Atlântica, Caatinga, Cerrado, Pampa e Pantanal) e classes temáticas transversais (Pastagem, Agricultura, Plantação Florestal, Zona Costeira, Mineração e Infraestrutura Urbana). O seu desenvolvimento requereu o esforço de um conjunto de especialistas, congregando um amplo espectro de estudos complementares e ações relacionadas às engenharias e outras áreas das ciências humanas (e.g., informática, sensoriamento remoto, silvicultura, geografia, geologia, ecologia, meio ambiente, comunicação).

Desde então, o MapBiomias produziu cinco conjuntos de mapas digitais anuais de uso e cobertura da terra (LCLU)<sup>5</sup>, denominados de “coleções”. Os métodos e algoritmos de classificação para cada coleção foram sendo aperfeiçoados ao longo dos anos. Os detalhes desse processo evolutivo encontram-se descritos em MapBiomias (2020).

A coleção mais atual disponível desses mapas – a “Coleção 5” – cobre o período de 1985 a 2019. Foi produzida em 2020, adicionando-se à série temporal da coleção anterior, além do ano de 2019, diversas melhorias nos métodos de processamento. Dentre os exemplos, destacam-se:

- as áreas úmidas, mapeadas ao longo dos anos no bioma Pantanal;
- as classes savana e formação de pastagens, para o bioma Amazônia, incluídas no processo de classificação;
- as áreas de várzea, mapeadas no bioma Mata Atlântica;
- as safras perenes e temporárias, que foram separadas na agricultura, acrescentando as novas classes soja, açúcar cana, outras culturas temporárias e culturas perenes.

Além das classes de agricultura, uma versão beta de mapas de agricultura irrigada de 2000 a 2019 foi incorporada à Coleção MapBiomias<sup>5</sup>.

Uma visão geral do processo metodológico utilizado no projeto MapBiomias é ilustrado na Figura 5.4. Um mosaico de imagens

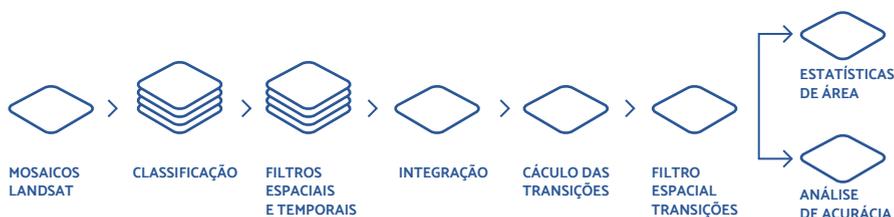
---

<sup>5</sup> Sistema de cobertura e de uso do solo (abordagem dinâmica e flexível para descrever objetos da paisagem).

LANDSAT, com resolução espacial de 30 m (380 imagens para todo o Brasil), constituiu-se na base do processo para os procedimentos de classificação pixel a pixel (algoritmo *Random Forest*). Para estes, foram aplicados filtros espaciais e temporais para conferir consistência aos dados, com a eliminação de ruídos.

O processo é concluído com a produção das estatísticas de área para os biomas e transições. Na sequência, procede-se uma análise de qualidade dos resultados pela verificação de sua capacidade de representar uma situação real.

Figura 5.4 Fluxograma da metodologia utilizada no projeto MapBiomias.

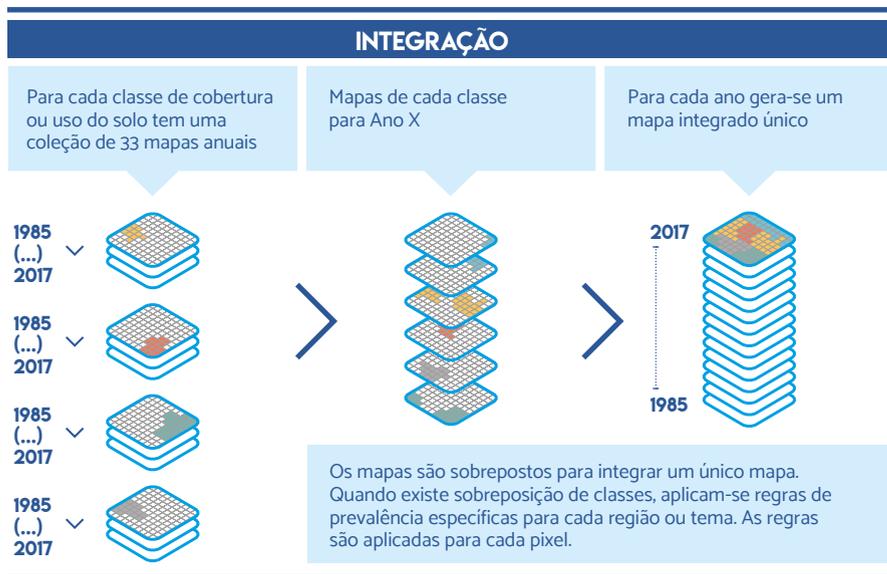


Fonte: Projeto MoVaSC, fazendo uso de informações do MapBiomias.

Ao término das etapas anteriores faz-se necessário proceder a integração dos dados, pois o método de classificação realizado gera mapas anuais para cada classe de uso e cobertura do solo, conforme ilustrado na Figura 5.5. Nos casos em que há sobreposição de pixels, ou seja, existência de duas classes distintas, aplica-se a regra de prevalência, que pode variar dependendo do bioma e da classe estudada<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Detalhes sobre o produto MapBiomias encontra-se disponível no site: [www.mapbiomas.org](http://www.mapbiomas.org)

Figura 5.5 Etapa de integração das classes.



Fonte: Projeto MoVaSC, fazendo uso de informações do MapBiomias (MapBiomias, 2020).

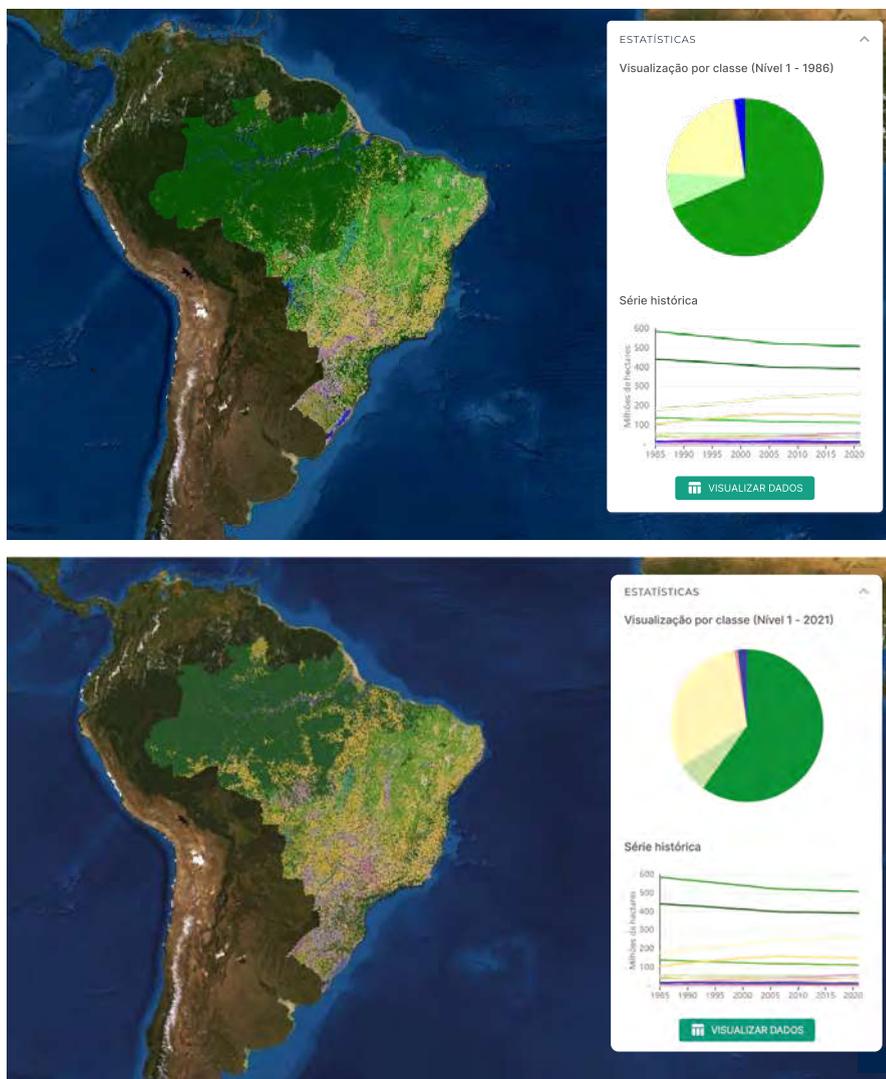
### **Imagens processadas**

A partir do site MapBiomias é possível obter diferentes produtos relativos às variáveis de *uso e cobertura do solo*. Dentre os dados e mapas gerados por essa rede interativa, as imagens da Figura 5.6 caracterizam informações relacionadas ao uso e cobertura do solo no Brasil, nos exercícios de 1986 (imagem a) e 2019 (imagem b), detalhando (i) mapas digitais em formato raster (matricial) de uso e cobertura do solo; (ii) mapas digitais em formato raster das transições de classe de uso e cobertura do solo e (iii) estatísticas dos usos e coberturas predominantes e das transições ocorridas.

A partir do menu “*mapas e dados/acesse a plataforma*”, foi também possível acessar, para fins de visualização, os mapas digitais, que podem ser selecionados para diferentes tipos de recorte territorial. Mais especificamente: país, bioma, estado, região hidrográfica e bacia hidrográfica. Ajustando-se o recorte para bacias hidrográficas e, selecionando-se a bacia do rio Paraíba do Sul, foi possível obter os respectivos mapas digitais ilustrados nas imagens das Figuras 5.6 e 5.7, associados aos anos de 1986 e 2019.

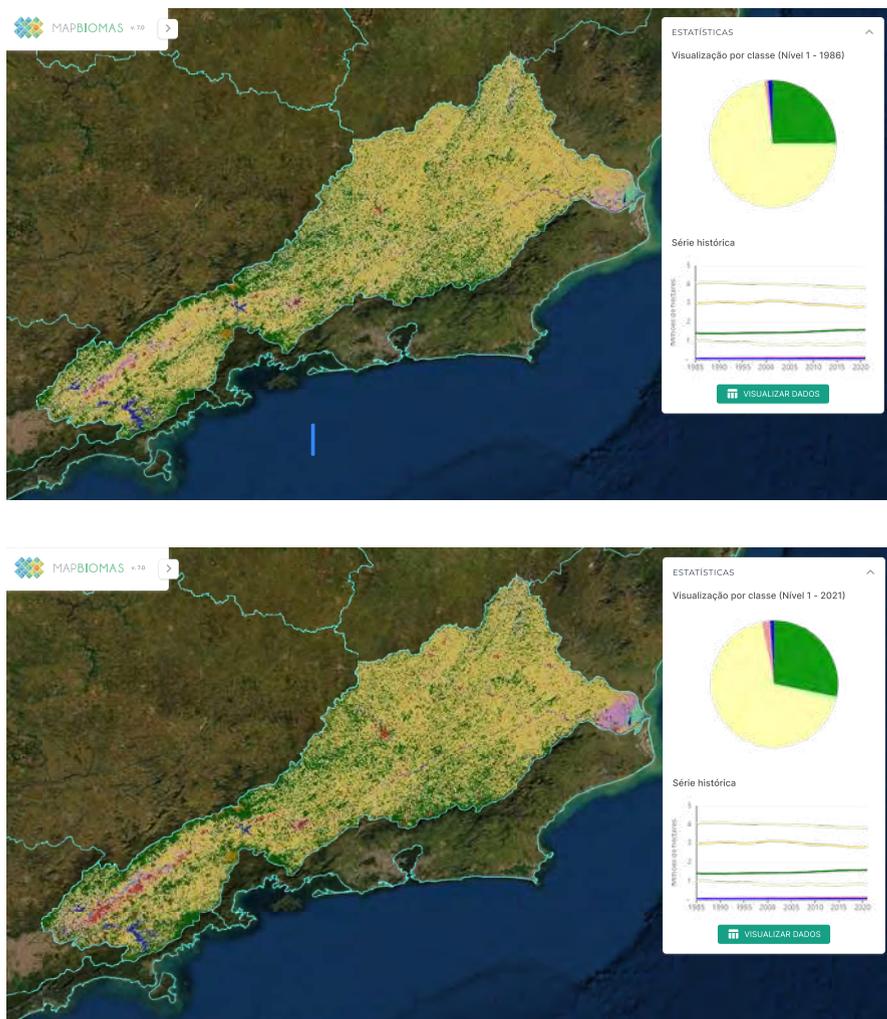
Para o efetivo acesso (*download*) aos dados, a plataforma disponibiliza caminhos via menu “*mapas e dados/download/*”, abrindo uma tela autoexplicativa que, por sua vez, dá acesso à opção “*mapas das coleções*”.

Figura 5.6 Mapa de uso e cobertura do solo (Brasil, nos anos de 1986 e 2019).



Fonte: Projeto MoVaSC, fazendo uso de imagem capturada pela ferramenta MapBiomias (2020).

Figura 5.7 Mapa de uso e cobertura do solo (bacia do Paraíba do Sul, 1986 e 2019).



Fonte: Mapas gerados pelo Projeto MoVaSC, fazendo uso da ferramenta computacional MapBiomas.

### **Recorte e reclassificação das imagens**

Para se obter os mapas e as respectivas estatísticas dos dados da área regionalizada para a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, faz-se necessário proceder o recorte espacial e temporal das imagens e da base de dados subjacente, conforme definido no passo a passo da ferramenta de geração dos MapBiomias. Assim procedendo, foram obtidos os mapas para os anos de 1986 a 2019, para o Bioma Mata Atlântica. Com o auxílio da ferramenta *shapfile* (utilizada no curso de desenvolvimento do projeto MoVaSC) e mantendo-se os limites da bacia hidrográfica, foram realizados os respectivos recortes nas imagens associadas à bacia estudada. A Figura 5.8 ilustra, a título de exemplo, os recortes para os exercícios de 1986 e 2019.

**Figura 5.8** Mapas do Projeto MapBiomias, recortados para a bacia hidrográfica (1986 e 2019).



Todo o processo de reclassificação de imagens foi realizado no ArcGis, via *script* (ArcPy)<sup>7</sup>. O processo de agrupamento das classes do MapBiomias foi realizado de forma criteriosa, identificando-se as classes com características próximas, baseando-se na documentação descritiva das classes do MapBiomias e nos mapas disponíveis no SIGA-CEIVAP (Sistema de Informações Geográficas e Geoambientais da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul).

Desta análise cruzada entre as classes consideradas no projeto MapBiomias, os mapas do SIGA-CEIVAP, e as classes constantes do banco de dados do modelo SWAT+, sinalizam atenção para as seguintes classes de uso e cobertura do solo: *fragmentos florestais*, *solo exposto*, *água*, *pastagem*, *agricultura* e *área urbana*. Os códigos e nomes dos novos tipos de uso e cobertura do solo, bem como a relação com os códigos do projeto MapBiomias, encontram-se caracterizados na Tabela 5.1. Uma análise detalhada dos dados desta Tabela facilita a compreensão da relevância da reclassificação realizada. Tomando como exemplo a primeira linha de dados, observa-se que as classes de uso e cobertura do solo *Formação florestal*, *Formação savânica* e *Floresta plantada* foram agrupadas em uma única classe redefinida como *Fragmentos florestais*. Esta reclassificação ocorre devido ao fato de o banco de dados do modelo SWAT+ não dispor de valores de parâmetros de uso e cobertura do solo para o nível de detalhamento das tipologias encontradas no MapBiomias. Por essa razão, estas classes precisam ser criteriosamente agregadas. A mesma lógica se repete para as demais linhas da Tabela 5.1.

---

7 ArcGIS é um Sistema de Informação Geográfica (GIS) utilizado para exibir dados geográficos, que podem ser utilizados para criar mapas. O ArcPy é um pacote de sites cujo objetivo é criar a base para uma sistemática útil e produtiva de realizar análise de dados geográficos, conversão de dados, gerenciamento de dados e automação de mapas com a linguagem de programação *Python*.

**Tabela 5.1.** Novas classes de uso e cobertura do solo para a bacia do Paraíba do Sul.

Códigos MapBiomas <sup>1</sup>	Classe MapBiomas	Códigos novos	Novas classes de uso e cobertura (compatíveis com o SWAT+)
3	Formação florestal		
4	Formação savânica	1	Fragmentos florestais
9	Floresta plantada		
25	Áreas não vegetadas		
29	Rocha	2	Solo exposto
30	Mineração		
31	Aquicultura	3	Água
33	Rios e lagos		
15	Pastagem	4	Pastagem
21	Mosaico agricultura/pasto <sup>2</sup>		
20	Cana-de-açúcar		
36	Lavoura perene	5	Agricultura
39	Soja		
41	outras lavouras temporárias		
24	Infraestrutura urbana	6	Área urbana

Fonte: Projeto MoVaSC.

1 A descrição das classes originais do MapBiomas, pode ser acessada pelos links:

[https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/\\_PT-BR\\_-\\_C%C3%B3digos\\_da\\_legenda\\_Cole%C3%A7%C3%A3o\\_5.pdf](https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/_PT-BR_-_C%C3%B3digos_da_legenda_Cole%C3%A7%C3%A3o_5.pdf) / [https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/brasil/coverage/classes-description/classes-description\\_pt-BR.pdf](https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/brasil/coverage/classes-description/classes-description_pt-BR.pdf)

2 A classe Mosaico agricultura/pasto foi considerada Pastagem, com base no mapa de uso e cobertura do solo disponível no SIGA-CEIVAP<sup>8</sup>.

### Algoritmos de pós-processamento para extração de informações

Com o auxílio de *scripts* desenvolvidos em linguagem computacional *Python*, dados foram extraídos para a realização das estatísticas de área globalmente regionalizadas para toda a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul. Essa extração refere-se, mais especificamente, às classes existentes de uso e cobertura do solo e suas respectivas transições para as sub-bacias de interesse e áreas no entorno dos reservatórios que alimentam as usinas hidrelétricas existentes na bacia.

8 (<http://www.sigaceivap.org.br/siga-ceivap/map#>).

**Superfícies ocupadas por cada classe de uso e cobertura do solo**

A contabilização das superfícies que cada classe ocupa num determinado ano é obtida integrando-se o número de pixels da imagem de cada classe, em cada ano, multiplicado pelo tamanho do pixel que, no presente estudo, é de 30 m x 30 m, indicando que cada pixel representa uma unidade de 900 m<sup>2</sup>. As rotinas computacionais utilizadas para esse tipo de operação encontram-se disponíveis no QGIS e em algoritmos *Python*. Os resultados dessa operação foram traduzidos em planilhas, cuja análise encontra-se descrita em seção específica deste capítulo.

**Matriz de transições – taxas percentuais de transição**

A transição entre classes de uso e cobertura do solo refere-se à passagem de uma determinada classe (e.g., pastagem) para outra classe (e.g., agricultura), estimada pela área (expressa em km<sup>2</sup> ou percentual da área transferida). Já a taxa de transição é expressa pelo quociente entre a área efetivamente convertida de uma classe para outra e o intervalo de tempo em que esta mudança ocorre. Apenas a título de exemplo, considere a área de pastagem do bioma que ocupa a maior superfície da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, para a qual, ao longo de uma década, a área ocupada pela classe pastagem foi reduzida em 5,3%, acompanhada, aproximadamente, de um crescimento similar da área de cultivo da agricultura (classe agricultura), enquanto as demais classes (fragmentos florestais, solo exposto, água etc.) mantiveram-se praticamente inalteradas nesse intervalo de tempo. No jargão utilizado por especialistas da área, é comum dizer que houve uma “transição de uma classe para outra”. Mais especificamente, a intensidade desta transição entre classes foi estimada a partir do mapa de uso e cobertura do solo para os exercícios de 1986 (ano de referência do início do estudo realizado) e 2020 (último ano do estudo). Com base em autômato celular, o uso do software Dinâmica EGO permitiu estimar, para cada célula, a sua dependência de uma condição inicial, com base em um conjunto de “regras de

transição” que norteará a sua mudança dependendo do conjunto específico de células em sua vizinhança.

As transições entre classes, representadas por uma “matriz de transição”, são modeladas por meio de uma cadeia de Markov<sup>9</sup>. Esta, por sua vez, descreve um sistema que muda em intervalos discretos de tempo, em que o valor de qualquer variável (uma determinada classe de uso e cobertura do solo), em um determinado intervalo de tempo, é obtido pela soma das contribuições (expressas em percentagem da área da respectiva classe) de todas as classes no referido intervalo de tempo de análise (Soares-Filho et al., 2007).

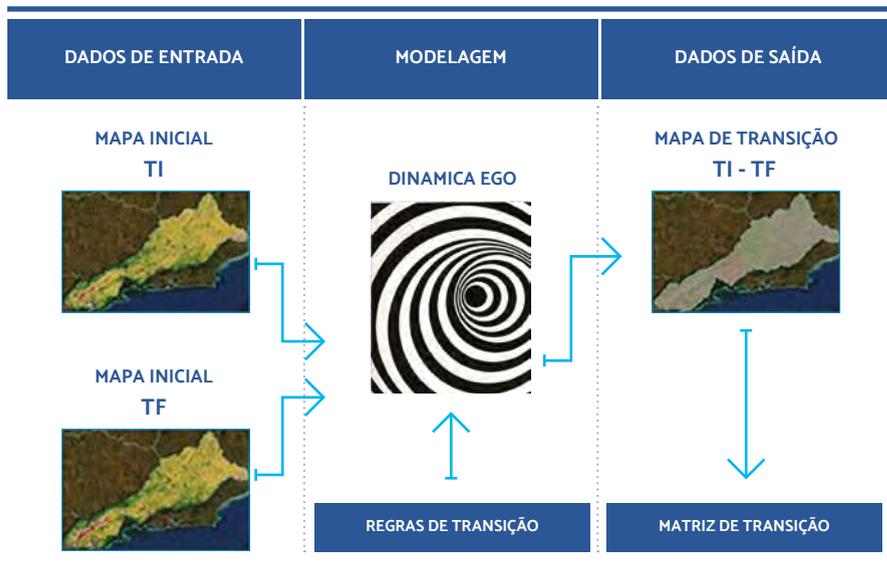
Os mapas de uso e cobertura do solo para os anos inicial e final da análise, juntamente com as regras de transição, são fornecidos como *inputs* ao software Dinâmica EGO<sup>10</sup> (NIT, 2013). Dentre as opções disponíveis para a modelagem da transição, foi utilizada a matriz “*single-step*”, também conhecida como matriz global (Soares-Filho et al., 2007). O fluxograma mostrado na Figura 5.9 ilustra, de forma simplificada, a sequência de operações que levam à obtenção dos mapas e respectivas matrizes de transição.

---

9 Em matemática, uma cadeia de Markov (cadeia de Markov em tempo discreto) é um caso particular de processo estocástico com estados discretos. O parâmetro, em geral o tempo, pode ser discreto ou contínuo, com a propriedade de que a distribuição de probabilidade do próximo estado depende apenas do estado atual e não na sequência de eventos que precederam uma propriedade chamada de Markoviana, denominação em homenagem ao matemático Andrei Andreyevich Markov. A definição dessa propriedade, também denominada de memória Markoviana, deve-se ao fato de os estados anteriores serem irrelevantes para a predição dos estados seguintes, desde que o estado atual seja conhecido. Cadeias de Markov encontram muitas aplicações, dentre as quais a modelagem estatística de processos do mundo real (Norris,1998).

10 O Dinâmica EGO é uma plataforma não comercial para modelagem ambiental com excelentes possibilidades de design desde o modelo espacial estático muito simples até modelos dinâmicos muito complexos. Desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (Soares-Filho et al., 2007 e Soares-Filho et al., 2009), o software inclui algoritmos espaciais complexos para a análise e simulação de fenômenos espaço-temporais.

Figura 5.9 Metodologia utilizada para calcular as taxas de transições entre classes.



Fonte: Projeto MoVaSC, fazendo uso de informações do MapBiomas.

### **Áreas de transição entre classes de uso e cobertura do solo: insumos para a análise**

Nesta seção, duas categorias de informações são analisadas: (i) a área ocupada por uma determinada classe utilizada para compor o mapa de uso e cobertura do solo e (ii) a variação percentual que a área em pauta é ocupada por uma classe de uso e cobertura do solo no intervalo de tempo de um ano, assim caracterizando os mapas de transição entre classes. Esta análise objetiva identificar o valor da área (ou o seu percentual) associado à transformação de uma determinada classe de uso e cobertura do solo em outra classe. Por exemplo, que parcela (ou percentual) da área de floresta foi convertida em pasto e vice-versa.

A partir de dados armazenados em uma planilha eletrônica, os resultados a seguir caracterizados foram estruturados pelo projeto MoVaSC.

- Mapas de uso e cobertura do solo: processados, ano a ano, para o período de 1986 a 2019 (a título de ilustração, e por limitação de espaço, optou-se por apenas incluir neste capítulo dois exemplos, referentes aos anos extremos do estudo, i.e., 1986 e 2019);

- Gráficos de tendência: apresentados para a variação temporal das superfícies de cobertura do solo para cada um dos biomas existentes na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul e para os reservatórios de Santa Cecília, Tocós, Santana e Vigário;
- Gráficos especializados: os gráficos do tipo pizza ilustram a fração ocupada por cada bioma, para cada um dos anos estudados (a título de ilustração, e por limitação de espaço, apenas os gráficos referentes aos exercícios de 1986, 2000, 2010 e 2019 foram incluídos, caracterizando intervalos de cerca de 10 anos entre eles);
- Tabela das áreas de cada bioma: apresentam a dinâmica de variação temporal das superfícies de uso e cobertura do solo, conforme ilustrado nos gráficos de tendência;
- Matriz de transições: a imagem da matriz de transição exhibe para cada cruzamento de ano,  $t_i$  com a transição (classe  $k_j$ ; classe  $l_j$ ) o valor percentual correspondente à taxa líquida de transição entre as classes analisadas;
- Gráficos boxplot<sup>11</sup>: esses gráficos apresentam a distribuição das taxas líquidas de transição para cada transição entre o binômio (classe  $k_j$ ; classe  $l_j$ ).

## Resultados: mapas de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica

Esta seção apresenta os mapas de uso e cobertura do solo que representam a distribuição espacial das classes, acompanhados de tabelas e gráficos representativos da evolução anual das respectivas áreas ocupadas por cada classe na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul. Discute, também, a transformação de uma determinada classe de uso e cobertura do solo para outra, representadas pelos mapas de transição.

---

<sup>11</sup> O *Box Plot*, também chamado diagrama de caixa, é uma ferramenta gráfica utilizada para ilustrar um conjunto de dados. Por meio dele, é possível visualizar a distribuição de dados com base em cinco estatísticas: referências de valores mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil, mediana e *outliers* da base de dados.

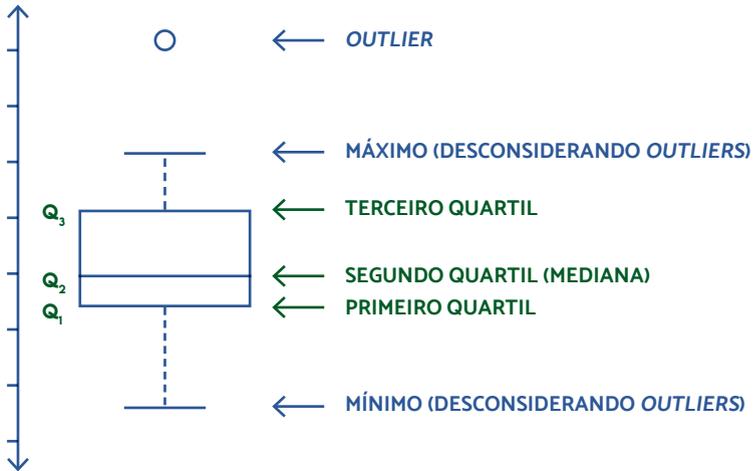
A análise é feita para toda a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, e ampliada para destaques nas bacias de contribuição aos reservatórios de Santa Cecília, Tocós, Vigário e Santana. Tanto para a bacia como um todo, quanto para cada reservatório impactante, foram produzidos dois tipos de mapa. O primeiro apresenta a distribuição espacial das classes de uso e cobertura do solo, com base na classificação resumida na Tabela 5.1. O segundo apresenta as taxas de transição entre classes de uso e cobertura do solo.

Para cada tipo de mapa, apresenta-se um conjunto de gráficos que explora em detalhe as informações mais relevantes. A dinâmica temporal do uso e cobertura do solo é representada por gráficos de tendência que ilustram, ano a ano, a área (expressa em hectares, ha) ocupada por cada classe. Já a representatividade percentual de cada classe é apresentada, em intervalos aproximadamente decenais, por meio de gráficos elucidativos do tipo pizza.

Os mapas das taxas de transição entre classes são analisados também por dois tipos de gráficos. A taxa de transição para cada ano e, para cada transição entre classes, é apresentada segundo uma estrutura matricial. Os percentuais representam a parcela da área de uma classe que “transitou” para outra. Uma escala de cores expressa os percentuais, escala essa em que as cores mais intensas refletem os percentuais maiores, configurando assim uma representação do que se denomina “mapa de calor”.

Complementa a análise das taxas de transição um gráfico do tipo *boxplot*, que apresenta a distribuição de frequência com que as transições ocorrem. O esquema apresentado na Figura 5.10 ajuda o leitor a interpretar os resultados apresentados no gráfico. Entre o valor mínimo (excluídos os *outliers*) definido pela barra inferior e o primeiro quartil ( $Q_1 < 25\%$ ), barra inferior do corpo da caixa, situam-se 25% dos menores valores de transição. Na sequência encontra-se o segundo quartil ( $Q_2 < 50\%$ ), que define a mediana da distribuição de valores de transição. Na barra superior do corpo da caixa está o terceiro quartil ( $Q_3 < 75\%$ ). Por fim, entre  $Q_3$  e a barra superior que delimita o maior valor da distribuição (excluídos os *outliers*) situam-se os 25% dos maiores valores de transição.

Figura 5.10 Interpretação de gráficos do tipo boxplot.



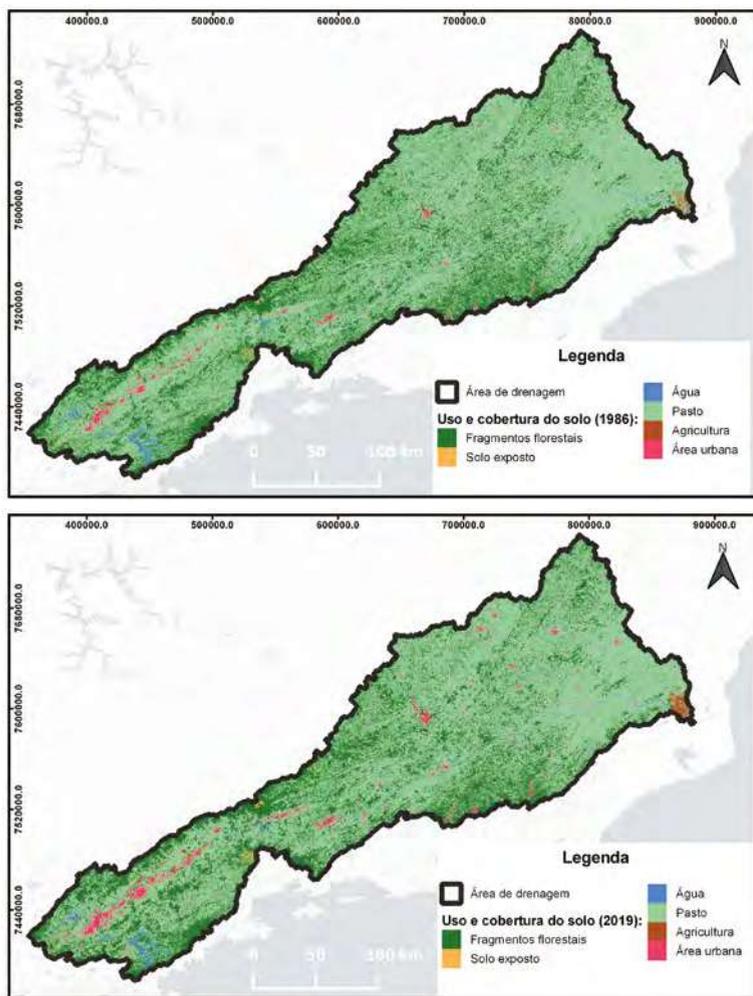
Fonte: Projeto MoVaSC.

Esta estrutura de análise é utilizada para apresentar os resultados para toda a bacia do Paraíba do Sul, bem como o detalhamento dos resultados para as bacias de contribuição aos reservatórios estudados.

### Mapas reclassificados para a bacia do Paraíba do Sul

Os mapas de uso e cobertura do solo, recortados para a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, e reclassificados para as classes do modelo SWAT+, são mostrados na Figura 5.11, para os anos de 1986 e 2019, respectivamente. Estes mapas caracterizam os exercícios inicial e final disponíveis na base de dados MapBiomias.

Figura 5.11 Mapas de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica. (Mapas reclassificados para o modelo SWAT+).

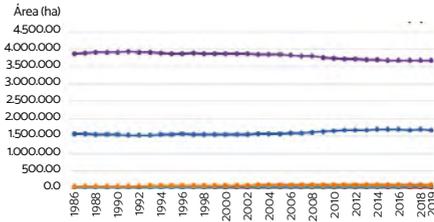


Fonte: Projeto MoVaSC, fazendo uso de informações do MapBiomass.

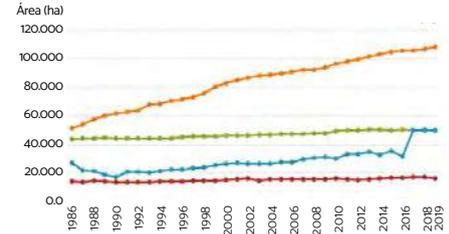
A Figura 5.12 ilustra os gráficos que mostram a evolução anual das respectivas classes de uso e cobertura do solo ao longo do período 1986 a 2019 (a Figura 5.12b, imagem da direita, amplia a escala vertical da Figura 5.12a, para mostrar os gráficos que colapsaram nesta imagem).

**Figura 5.12** Evolução temporal das áreas ocupadas pelos biomas na bacia hidrográfica.

Bacia do Paraíba do Sul (a)



Bacia do Paraíba do Sul (b)



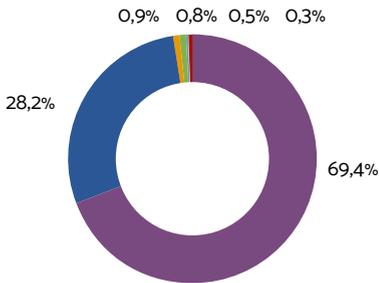
- Frag. florestais (1)
- Solo exposto (2)
- Água (3)
- Solo exposto (2)
- Agricultura (5)
- Pastagem (4)
- Agricultura (5)
- Área urbana (6)
- Água (3)
- Área urbana (6)

Fonte: Projeto MoVaSC.

Já a Figura 5.13 exibe os gráficos que caracterizam a evolução percentual para os exercícios de 1986, 2000, 2010 e 2019, com intervalos de cerca de uma década.

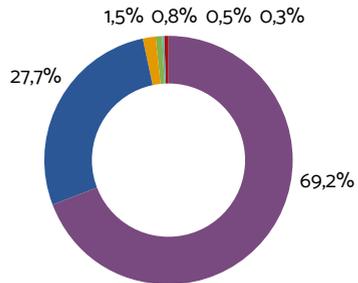
**Figura 5.13** Evolução percentual das classes da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul (BPS). (Exercícios do estudo: 1986, 2000, 2010 e 2019).

BPS - 1986



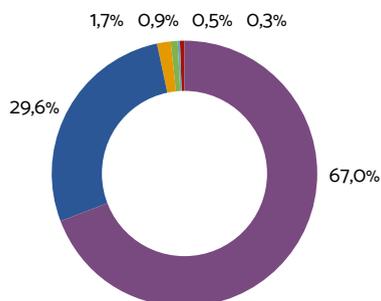
- Pastagem - 69,4%
- Fragmentos florestais - 28,2%
- Área urbana - 0,9%
- Água - 0,8%
- Agricultura - 0,5%
- Solo exposto - 0,3%

BPS - 2000

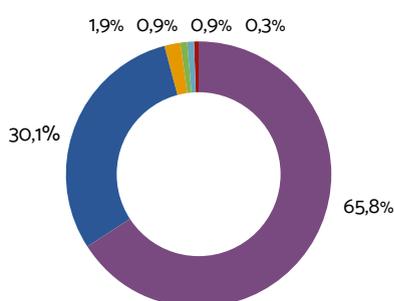


- Pastagem - 69,2%
- Fragmentos florestais - 27,7%
- Área urbana - 1,5%
- Água - 0,8%
- Agricultura - 0,5%
- Solo exposto - 0,3%

BPS - 2010



BPS - 2019



Fonte: Projeto MoVaSC.

Completam esta informação, os dados da Tabela 5.2 e informações relacionadas com os gráficos da Figura 5.14, que mostram a evolução anual dos biomas da bacia hidrográfica estudada.

**Tabela 5.2** Síntese das estatísticas (uso e cobertura do solo na bacia, 1986 a 2019).

Bacia do Paraíba do Sul	Fragmentos Florestais		Solo Exposto		Água		Pastagem		Agricultura		Área Urbana	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Áreas	1.570.457,6	6,5	14.722,5	11,4	44.018,2	12,6	3.867.324,6	-5,3	22.676,0	44,9	35058,90	86
	1.678.786,6		16.608,0		50.370,5		3.671.400,2		50.246,0		65128,22	
Porcentuais	%	Ano	%	Ano	%	Ano	%	Ano	%	Ano	%	Ano
Mínimo	27,2	1991	0,2	1993	0,8	-	65,7	2018	0,3	1989	0,9	1986
Máximo	30,4	2015	0,3	-	0,9	-	70,2	1991	0,9	2017	1,9	2014

ha: hectare

Fonte: Projeto MoVaSC.

O conjunto mais amplo de infográficos similar aos mostrados na Figura 5.13 estão disponíveis via acesso ao QR Code incluído no capítulo, ilustrando

a evolução do uso e cobertura do solo na bacia do rio Paraíba do Sul. Essas informações são consideradas de interesse e estratégicas para estudiosos e gestores da bacia. O resultado da análise mostra que, entre 65,7% e 70,2%, as áreas de *pastagens* representam a classe de uso e cobertura do solo que ocupa a maior superfície da bacia hidrográfica. No período analisado, pode-se identificar uma redução de 5,3% nesta área, tendência que foi intensificada ao longo da última década.

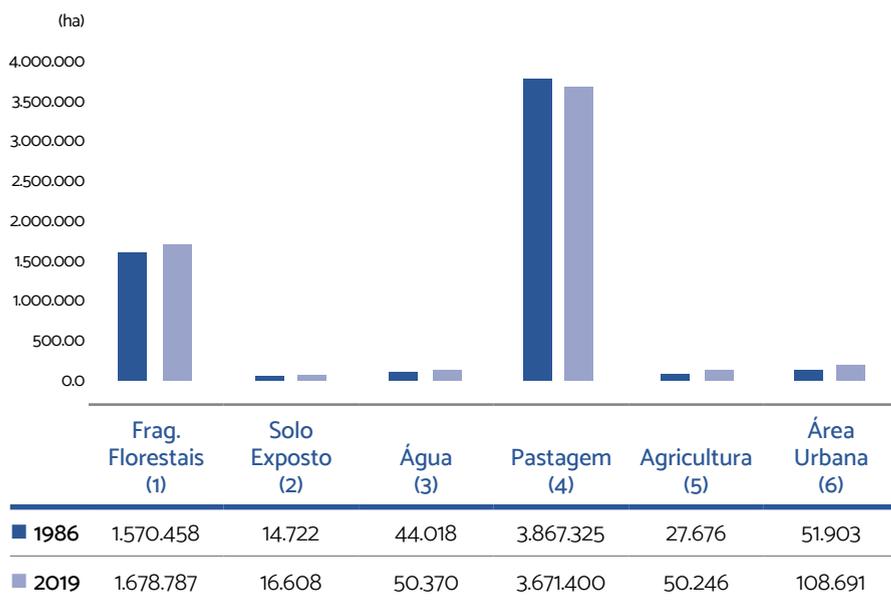
Em termos de superfície ocupada, a segunda classe de uso e cobertura do solo é representada pela classe de *fragmentos florestais*, com valores que variam entre 27,2% a 30,4%, tendo experimentado um crescimento ao longo do período analisado de 6,5%.

Portanto, juntas, as áreas de *pastagem* e *fragmentos florestais* representam, em média, 96,9% da superfície da bacia hidrográfica, variando de 97,5% (1986) para 96% (2019).

Todas as demais classes sofreram expansão no período. A classe denominada *área urbana* foi a que apresentou a maior expansão percentual, crescendo de 51.903 ha (i.e., 0,9% da superfície da bacia), para 108.691 ha (1,9% da superfície), representando um incremento de 52,2%. Na sequência, as áreas ocupadas por práticas agrícolas refletem uma expansão de 45%; as *áreas cobertas por água*, 12,6% e, *solo exposto*, 11,4%. Estes valores encontram-se resumidos de forma integrada (1986 a 2019) na Tabela 5.2. O QR Code no final do capítulo, permite o acesso ao estudo para cada ano avaliado, apresentando estatísticas de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica em questão. Os dados computados na última linha desta tabela, indicam, para cada classe, entre os anos 1986 e 2019, a variação máxima observada, destacando como cada classe se comportou no intervalo de tempo da análise realizada.

Estratificado pelas diferentes classes de uso e cobertura do solo, a Figura 5.14 apresenta a área (expressa em ha) da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul. Os dados são apresentados em função de suas respectivas representatividades no início (1986) e no fim (2019) do período analisado.

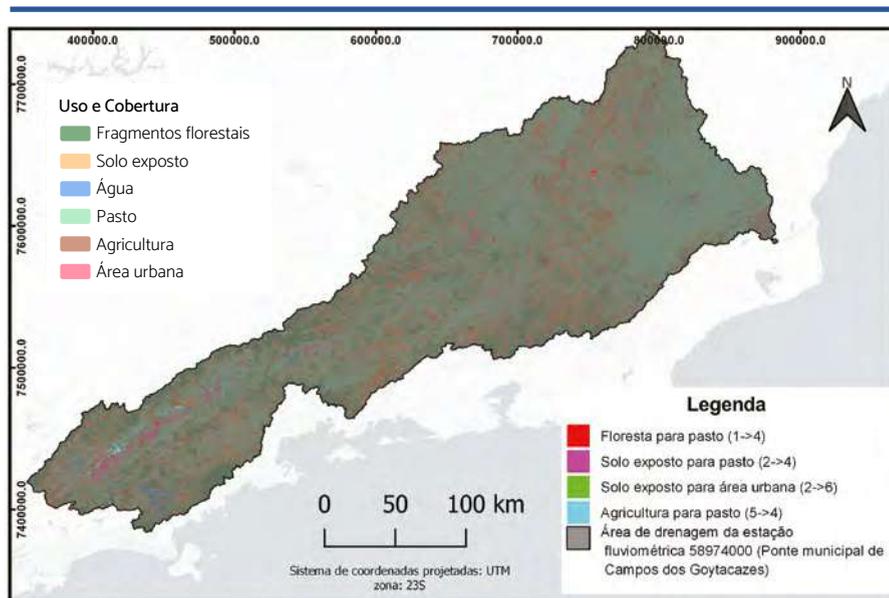
**Figura 5.14** Evolução da área (ha) de uso e cobertura do solo na bacia do Paraíba do Sul. (Anos de observação: 1986 e 2019).



Fonte: Projeto MoVaSC.

As transições entre classes são obtidas a partir da comparação da presença das diferentes classes de uso e cobertura do solo, ano a ano, contabilizadas pelas diferenças de classificação pixel a pixel da imagem. Por exemplo, no mapa de transições, mostrado na Figura 5.15, as manchas vermelhas representam as transições entre a classe fragmentos de floresta para pasto, nos exercícios de 1986 e 2019.

Figura 5.15 Mapa de taxas de transições entre classe de uso e cobertura do solo da bacia.



Fonte: Projeto MoVaSC, fazendo uso de informações do MapBiomass.

A Figura 5.16 apresenta informações associadas à matriz de transições entre as classes de uso e cobertura do solo. Os valores mostrados na matriz de transição (Figura 5.16a) representam os percentuais de pixels que migraram de uma classe específica para outra. Por exemplo, no exercício 1986–1987, houve uma migração de 12% de *solo exposto* para a classe *pasto*. Na Figura 5.16b, o gráfico *boxplot* apresenta a distribuição com que as transições entre classes ocorreram ao longo de todo período analisado.

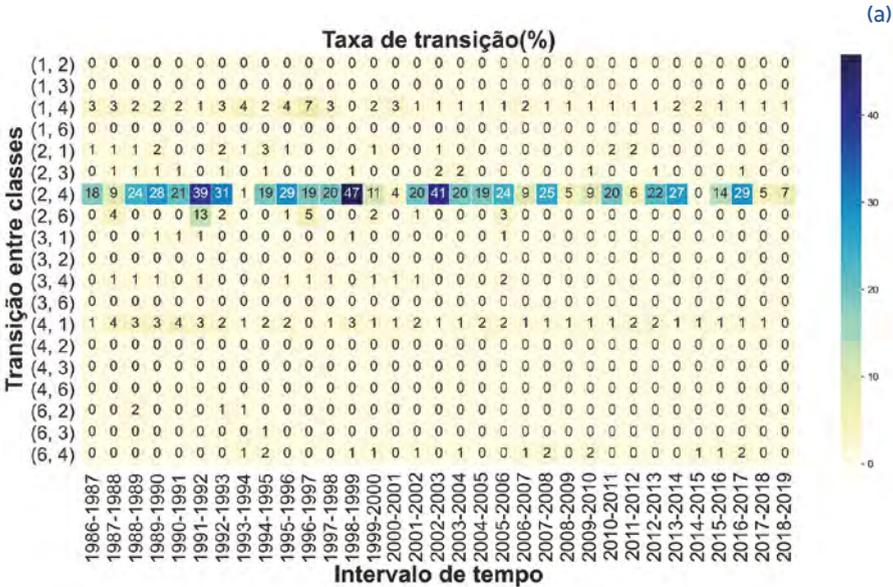
Para exemplificar a leitura do gráfico mostrado na Figura 5.16, cabe observar que a transição da classe de uso e cobertura do solo *agricultura* (5) para *pastagem* (4) reflete índices significativos. A Figura 5.16a apresenta dados da transição entre classes, expressa em percentual da área que foi convertida de uma classe para outra, enquanto a Figura 5.16b apresenta o gráfico *boxplot* da distribuição das respectivas taxas de transição entre as diferentes classes de uso e cobertura do solo definidas para a bacia hidrográfica como um todo.

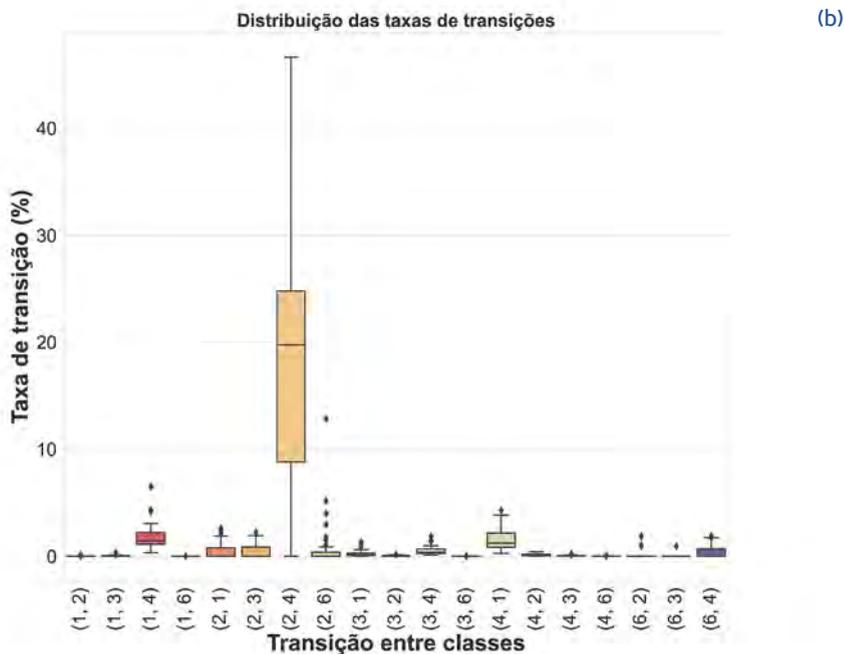
Desses resultados, observa-se que duas transições de classes apresentam taxas de transições mais relevantes, são elas: as transições *agricultura para pasto* (5, 4) e as transições *solo exposto para pasto* (2, 4).

A Figura 5.16 detalha as taxas de transição entre classes de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica, em destaque a transição das classes *agricultura para pasto* (5, 4), 75% dos valores de taxas de transições, distribuídos entre 4% e 7%, enquanto 95% dos valores estão entre 0% e 11%. Os valores acima de 11% (16%, 17% e 22%) estão fora do ajuste da distribuição, ou seja, são considerados *outliers*.

Para a transição (2, 4), 75% dos valores estão distribuídos entre 6% e 9%, enquanto 95% dos valores se encontram entre 5% e 12%. Todas as demais transições apresentam taxas de transições inferiores a 4%.

Figura 5.16 Taxas de transição entre classes de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica.





Fonte: Projeto MoVaSC.

### Recorte para as áreas de contribuição dos reservatórios

Ao considerar neste estudo a escala espacial imposta à bacia do Paraíba do Sul como um todo, detalhes relevantes de características da bacia acabam não sendo capturados. No intuito de investigar com mais cuidado a dinâmica de uso e cobertura do solo nas áreas dos principais reservatórios integrantes do complexo de usinas hidrelétricas (UHs) em operação, as áreas das bacias de contribuição a esses reservatórios (Santa Cecília, Tocós, Santana e Vigário) foram analisadas em separado e discutidas nas seções subsequentes. Esses recortes contribuem para a avaliação dos processos de transição e evolução do uso e cobertura do solo de forma mais pragmática para cada reservatório analisado. Contribuem, também, para a análise de dados e modelagem do complexo processo de assoreamento dos reservatórios que, incontestavelmente, ocorre ao longo dos anos.

Em consonância à análise discutida nas seções anteriores para a bacia do Paraíba do Sul como um todo, os resultados, a seguir, apresentam e detalham os mapas de uso e cobertura do solo, bem como as transições entre classes, fundamentadas nos gráficos de tendência e do tipo pizza.

A Tabela 5.3 resume estes resultados, mostrando uma radiografia da dinâmica de uso e cobertura do solo entre os anos de 1986 e 2019. Uma análise minuciosa dos resultados mostrados na tabela explicita informações relevantes para cada área de contribuição aos quatro reservatórios estudados.

No que concerne ao *reservatório de Santa Cecília*, a classe dominante de uso e cobertura do solo *pastagem* apresenta uma tendência de redução, de 61% (1986) para 54% (2019). Contrastando com essa dinâmica, observa-se que a classe correspondente aos *fragmentos florestais* apresentou um aumento de 33,5% para 37,4% no mesmo período. Parte dessa expansão pode ser explicada pela conversão de áreas de *pastagem* em atividades agroflorestais e *agricultura sustentável*, o que representa uma boa prática em conservação do solo e qualidade ambiental da bacia.

No *reservatório de Tocós*, as classes dominantes de uso e cobertura do solo são as classes *fragmentos florestais*, com 72,7% (1986) e 71,3% (2019) e *água*, com um pequeno aumento de 27,1% para 28,6%, no mesmo período. Não obstante essa pequena redução registrada para a classe *fragmentos florestais*, no mesmo período, as expansões de 144% e 315% das áreas ocupadas pelas classes *solo exposto* e *agricultura* podem estar associadas a uma tendência de substituição de áreas de florestas para a atividade agrícola na região, com potencial incremento de processos de assoreamento.

No *reservatório de Santana*, dividem o cenário de uso e cobertura do solo as classes de *fragmentos florestais* e *pastagem*. A primeira, correspondendo a 55,2% (1986) e 51,3% (2019). Em contraponto, as áreas cobertas pela classe *pastagem* sofreu uma pequena expansão, de 44% para 48% no período estudado. Não obstante a incerteza associada à estas estimativas poder comprometer a análise quando as variações percentuais são pequenas, observa-se o expressivo

aumento (241%) da classe *áreas urbanas* (241%), associado à redução da classe agricultura (81%).

No *reservatório de Vigário*, similarmente ao que foi observado no reservatório de Santana, a região é dominada pelas classes *fragmentos florestais* e *pastagem*. Entretanto, a dinâmica registrada ao longo do período analisado mostra peculiaridades: as *áreas urbanas* expandiram 565%, enquanto as áreas de *solo exposto* sofreram uma redução de 44% no período estudado (1986 a 2019).

No geral, no período (1986 a 2019), observa-se que a dinâmica de variação das áreas cobertas por água apresentou uma variação positiva em todas as bacias de drenagem das áreas de contribuição dos reservatórios estudados, consistente com períodos de maior ou menor armazenamento de água na bacia e seus reservatórios.

**Tabela 5.3.** Resumo das estatísticas de uso e cobertura do solo das bacias de contribuição aos reservatórios, no período 1986 a 2019.

Classes de uso e cobertura		Fragmentos Florestais		Solo Exposto		Água		Pastagem		Agricultura		Área Urbana	
Código da classe		(1)		(2)		(3)		(4)		(5)		(6)	
Reservatórios	Ano	Área [ha]	%	Área [ha]	%	Área [ha]	%	Área [ha]	%	Área [ha]	%	Área [ha]	%
Santa Cecília	1986	557499	33,5	8372	0,5	29550	2	1015381	61	15824	1	35059	2
	2019	629051	37,4	9715	0,6	31400	2	896675	54	29714	2	65128	4
Variação %		13		16		6		-12		88		86	
Tocós	1986	27694	72,7	4	-	10313	27,1	85	0,2	6	-	-	-
	2019	27159	71,3	9	-	10895	28,6	15	-	24	0,1	-	-
Variação %		-2		144		6		-82		315			
Santana	1986	48852	55,2	82	0,1	395	0,4	38879	44	120	0,1	107	0,1
	2019	45374	51,3	80	0,1	461	0,5	42130	48	23	-	367	0,4
Variação %		-7		-1		17		8		-81		241	
Vigário	1986	2099	47,2	24	0,6	226	5,08	2099	47,2	-	-	2	-
	2019	1946	43,7	14	0,3	245	5,50	2232	50,2	-	-	14	0,3
Variação %		-7		-44		8		6				565	

**Obs:** 1. As áreas estão representadas em hectares [ha]; 2. Na coluna (%), ao lado das áreas, esta representa o percentual ocupado por cada classe em cada ano.

Fonte: Elaborada pela equipe do projeto MoVaSC.

A Figura 5.17 ilustra a evolução do uso e cobertura do solo nas áreas de contribuição aos reservatórios de Santa Cecília, Tocós, Santana e Vigário, para os anos de 1986 e 2019, permitindo observar a predominância das classes *fragmentos florestais* e *pastagem* em praticamente todas as regiões contribuintes aos respectivos reservatórios.

Figura 5.17 Evolução do uso e cobertura do solo nas áreas de contribuição aos reservatórios de Santa Cecília, Tocós, Santana e Vigário, em 1986 e 2019.

A) Santa Cecília - 1986



B) Santa Cecília - 2019



Uso e cobertura do solo



A) Tócos - 1986



B) Tócos - 2019



Uso e cobertura do solo



A) Santana - 1986



B) Santana - 2019



Uso e cobertura do solo



A) Vigário - 1986



B) Vigário - 2019



Uso e cobertura do solo

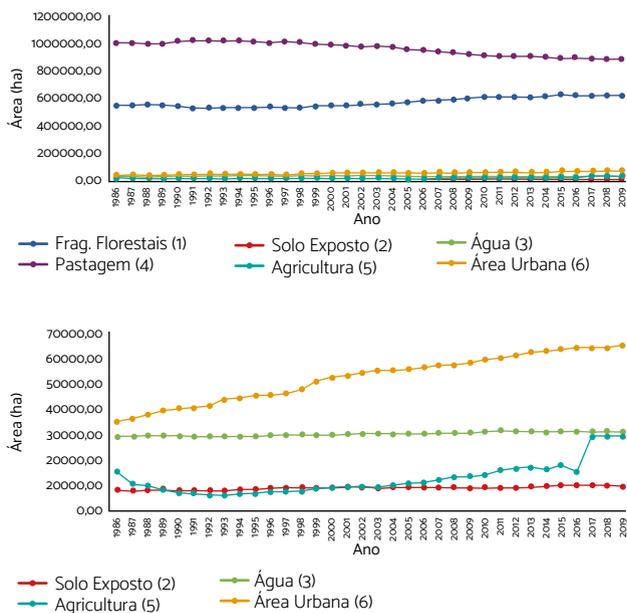


Fonte: Projeto MoVaSC, fazendo uso de informações do MapBiomas.

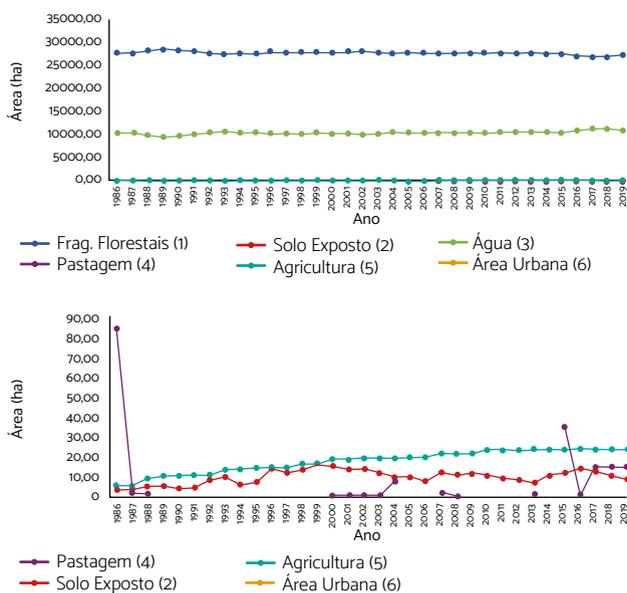
Enquanto a análise acima privilegia a perspectiva da distribuição espacial das classes de uso e cobertura do solo, os gráficos de tendência mostrados na Figura 5.18 exibem a variação temporal de cada classe. Os gráficos apresentados nos painéis inferiores ampliam a escala do eixo vertical dos respectivos gráficos superiores, permitindo visualizar as curvas colapsadas pela falta de resolução do eixo das ordenadas.

Figura 5.18 Evolução temporal das classes de uso e cobertura do solo para os reservatórios de Santa Cecília, Tocós, Santana e Vigário, entre 1986 e 2019.

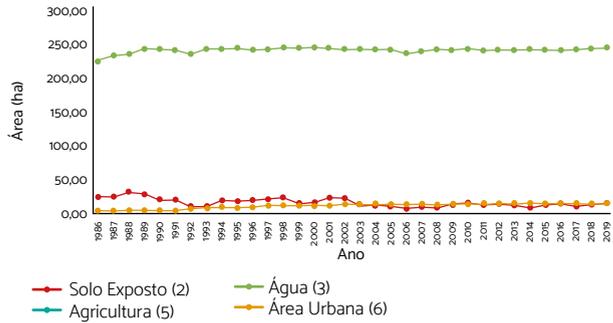
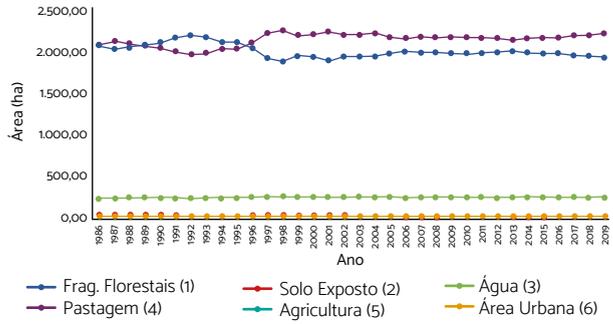
### Reservatório Santa Cecília



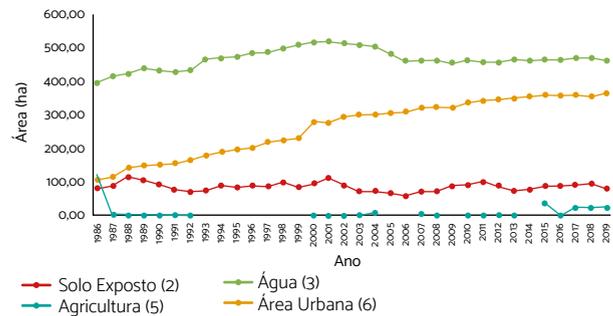
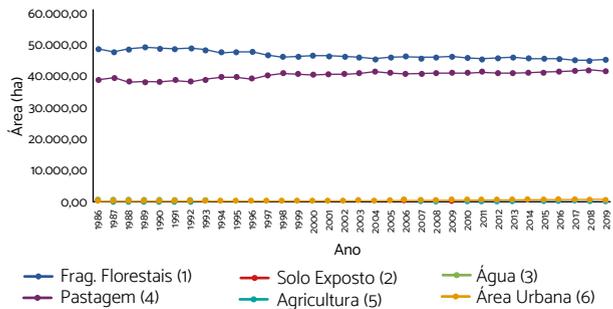
### Reservatório Tocós



### Reservatório Vigário



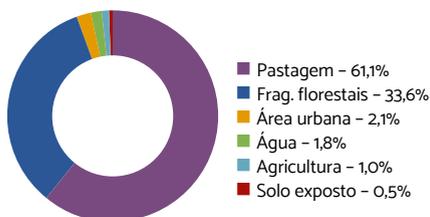
### Reservatório Santana



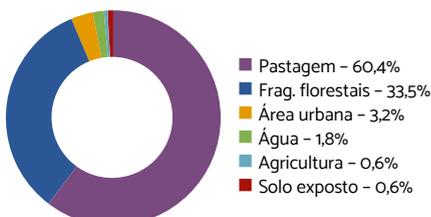
Completando a análise relativa à dinâmica dos usos e coberturas do solo, a Figura 5.19 ilustra, para cada reservatório de contribuição da bacia do Paraíba do Sul, a evolução observada nos exercícios de 1986, 2000, 2010 e 2019, dos percentuais ocupados por cada classe em um determinado ano.

**Figura 5.19** Evolução percentual das classes de uso e cobertura do solo para os reservatórios de Santa Cecília, Tocós, Santana e Vigário (1986, 2000, 2010 e 2019).

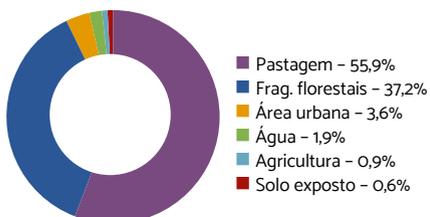
Reservatório Santa Cecília - 1986



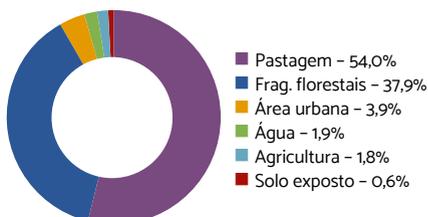
Reservatório Santa Cecília - 2000



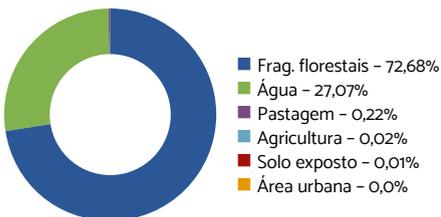
Reservatório Santa Cecília - 2010



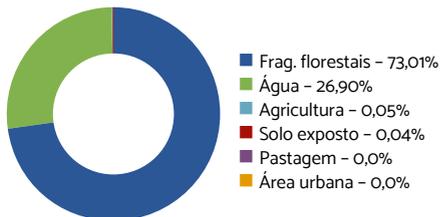
Reservatório Santa Cecília - 2019



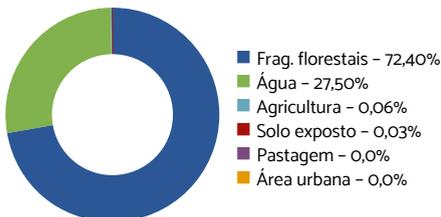
Reservatório Tocós - 1986



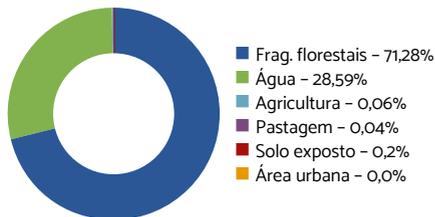
Reservatório Tocós - 2000



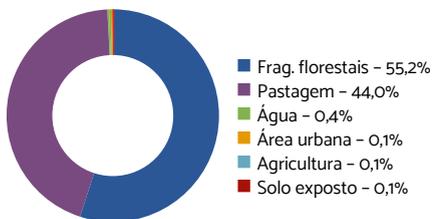
Reservatório Tocós - 2010



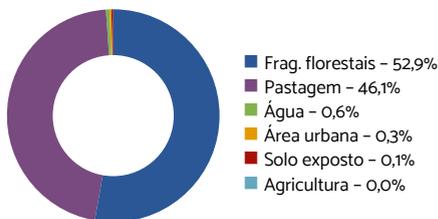
Reservatório Tocós - 2019



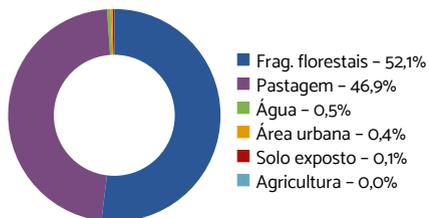
Reservatório Santana - 1986



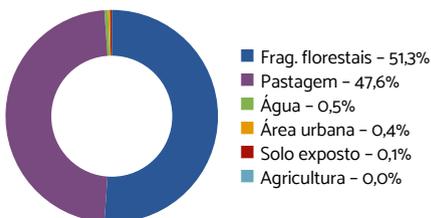
Reservatório Santana - 2000



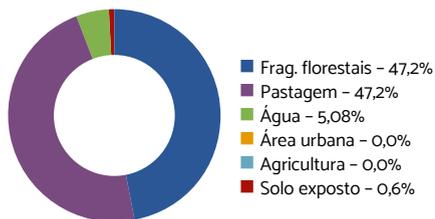
Reservatório Santana - 2010



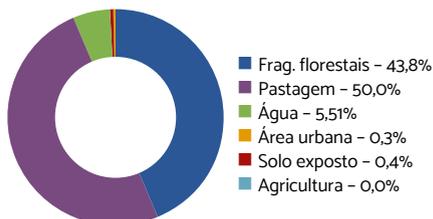
Reservatório Santana - 2019



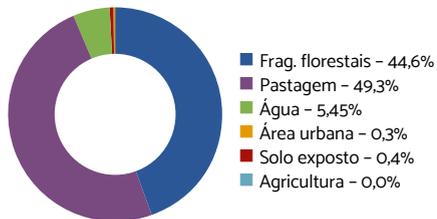
Reservatório Vigário - 1986



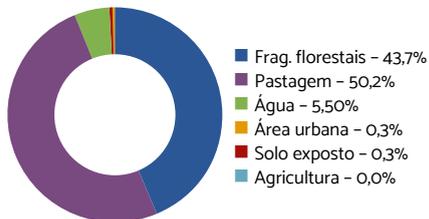
Reservatório Vigário - 2000



Reservatório Vigário - 2010



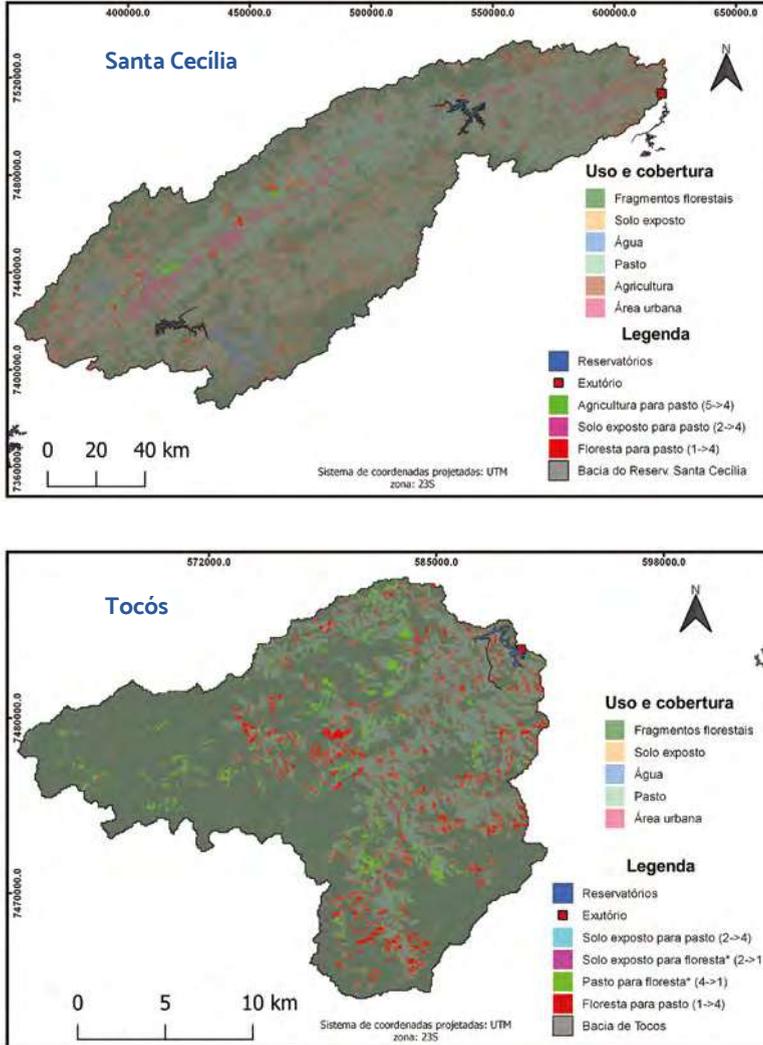
Reservatório Vigário - 2019

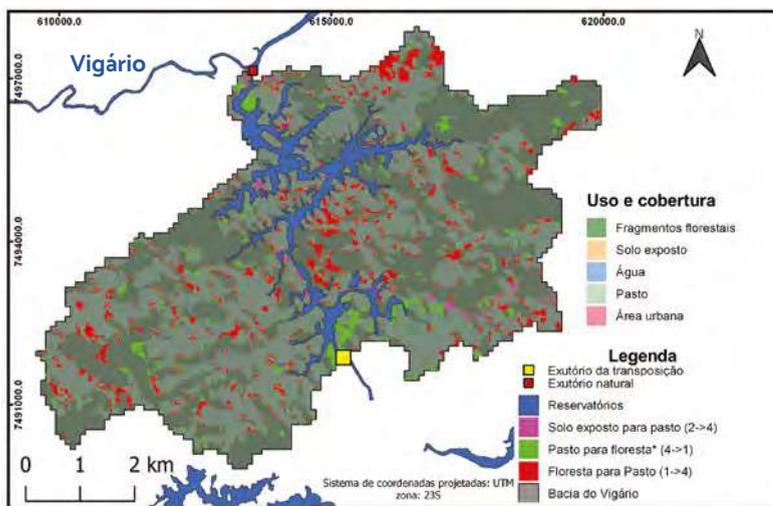
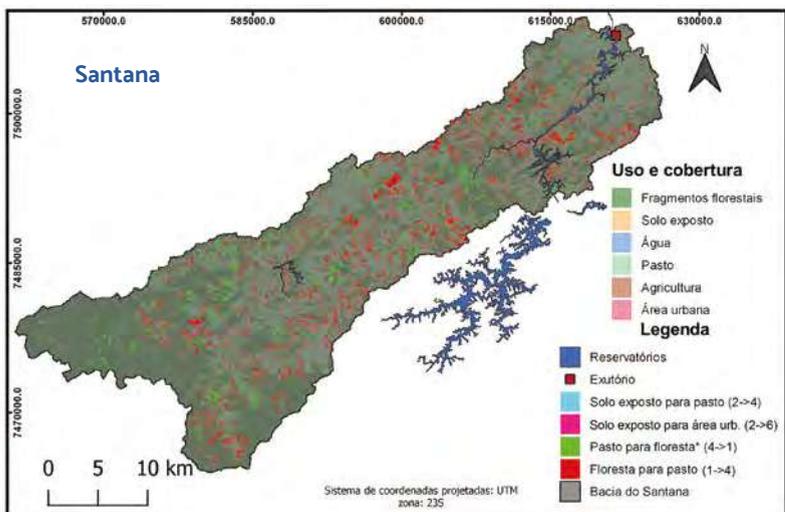


Concluindo uma análise mais detalhada da dinâmica de uso e cobertura do solo nas bacias de contribuição aos reservatórios, a Figura 5.20 apresenta os mapas de transição entre as diferentes classes identificadas. Analogamente ao que foi apresentado para a bacia como um todo, estes mapas indicam as intensidades de alterações sofridas de uma determinada classe de uso e cobertura do solo para outra. Permitem, assim, avaliar quanto de uma área originalmente classificada como *fragmentos florestais* foi convertida em *pastagem*, apenas para citar um exemplo.

Obtidos a partir da diferença entre os mapas de uso e cobertura do solo de um ano para outro, estas transições entre classes podem ser determinadas para cada ano do período estudado. Assim, a figura, a seguir, apresenta os mapas representativos dos reservatórios de Santa Cecília, Tocós, Santana e Vigário, ilustrando a integração das transições ocorridas entre 1986 e 2019.

Figura 5.20 Mapas das taxas de transição entre classes de uso e cobertura do solo nas bacias de contribuição aos reservatórios de Santa Cecília, Tocós, Santana e Vigário, entre 1986 e 2019.





Fonte: Projeto MoVaSC, fazendo uso de informações do MapBiomas.

## Considerações finais

Este capítulo 5 apresentou e discutiu resultados de desenvolvimentos realizados no âmbito do recém concluído projeto de P&D MoVaSC, assim cumprindo o propósito de prover insumos para a construção e validação do modelo hidrometeorológico integrado (precipitação, vazão) da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, cujo código computacional constitui objeto do Capítulo 6 deste livro. Cumpriu, também, o propósito de atualizar a literatura especializada sobre características física de uso e cobertura do solo na bacia estudada.

Conforme discutido, fundamentado no projeto MapBiomias (2020), foi possível construir mapas específicos para as diferentes classes de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, cujos resultados personalizados para a região em estudo permitiu customizar os algoritmos desenvolvidos. Conseguiu-se, assim, recortar e reclassificar as imagens e produzir um conjunto de informações compatíveis com as demandas do modelo hidrológico SWAT+ utilizado na construção do modelo hidrometeorológico, que permite simular a vazão em pontos da bacia considerados estratégicos para orientar a gestão dos recursos hídricos disponíveis para geração hidrelétrica.

Desse esforço foram disponibilizados mapas de uso e cobertura do solo para a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul como um todo, para cada ano do período dos trinta e três anos analisados (1986 a 2019). Adicionalmente a esses mapas, recortes foram realizados com o propósito de ampliar o nível de detalhamento das análises para as bacias de contribuição aos reservatórios de Santa Cecília, Tocós, Santana e Vigário. Os gráficos de linhas de tendências que acompanham os mapas mostram que pastagem e fragmentos florestais são as classes dominantes na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, classes essas que apresentam comportamentos dinâmicos antagônicos. Enquanto as áreas de pastagem mostraram tendência de declínio, acentuando-se ao longo da última década, as áreas de fragmentos florestais exibiram uma tendência clara de expansão.

Embora estas duas classes juntas ocupem praticamente 97% da superfície da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, no período analisado, experimentaram um declínio de cerca de 1, 5 pontos percentuais de sua cobertura para as outras classes de uso e cobertura do solo. Nas áreas de contribuição para os reservatórios, o padrão para toda a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul é seguido em grande medida. A diferença mais marcante fica por conta da área de contribuição ao reservatório de Tocós, cuja classe associada às áreas de pastagem não é detectada, predominando a área ocupada por fragmentos florestais e água. No que concerne aos dados da dinâmica da evolução dos usos e cobertura do solo da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, o estudo destaca as bacias de contribuição aos reservatórios de Santa Cecília, Tocós, Santana e Vigário.

## Referências

- ANABA, L.A.; BANADDA, N.; KIGGUNDU, N.; WANYAMA, J.; ENGEL, B.; MORIASI, D. 2017. Application of SWAT to Assess the Effects of land Use Change in the Murchison Bay catchment in Uganda. *Computational Water, Energy and Environmental Engineering*. v.6:24–60. ISSN(Online): 2168–1570. ISSN(Print):2168–1562.
- ANDERSON, J.R. 1976. A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. *Geological Survey Professional Paper*, nº. 964, U.S. Government Printing Office, Washington DC, 28.
- ANDRADE, M. P.; RIBEIRO, C.B.M. 2019. Alteração do uso e cobertura do solo nas áreas de atuação dos comitês de bacias do rio Paraíba do Sul no período de 1986 a 2015. *III Simpósio de recursos Hídricos da bacia do Rio Paraíba do Sul*. Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF.
- ANDRADE, M. P.; RIBEIRO, C.B.M.; LIMA, R. N. S. 2016. Modelagem dinâmica da mudança do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a partir de imagens Modis e um modelo de sub-regiões. *Revista Brasileira de Cartografia*. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. ISSN: 1808–0936.
- ANDRADE, M. P.; RIBEIRO, C.B.M. 2020. Impacts of land use and cover change on Paraíba do Sul watershed streamflows using the SWAT model. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos/Brazilian Journal of Water Resources*. Versão On-line ISSN: 2318–0331. v.25, e12. Porto Alegre-RS.

- ARNOLD, J.G.; FOHRER, N. 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrol. Process.* 19, 563–572.
- ARNOLD, J.G, MORIASI, D.N., GASSMAN, K. C., ABBASPOUR, M.J., WHITE, M.J, SRINIVASAN, R, SANTHI, C, HARMEL, R.D., VAN GRIENSVEN, A., VAN LIEW, M.W, KANNAN, N, JHA, M.K. (2012). SWAT: Model use, calibration and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol. 55(4): 1491-1508.
- BAKER, T.J.; MILLER, S.N. 2013. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology*. v.486 – 100-111.
- CHIANG, L.; CHAUBEY, I.; GITAU, M.W.; ARNOLD, J.G. 2010. Differentiating Impacts of Land Use Changes from Pasture Management in a CEAP Watershed Using. *American Society of Agriculture and Biological Engineers*. v.53(5): 1569-1584. ISSN: 2151-0032.
- DI GREGORIO, A. 2016. Land Cover Classification System: Classification concepts (version 3). FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Roma.
- GROOT, R.S.; ALKEMADE, R.; BRAAT, L.; HEIN, L.; WILLEMEN, L. 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision-making. *Ecol. Complex.* 7, 260–272.
- LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDIZIO, E. S.; MORAN, E. F. 2003. Classification of successional forest stages in the Brazilian Amazon basin. *Forest Ecology and Management*, 181(3), p. 301-312.
- MACHADO, R.E.; LOPES, M.S.; RIBEIRO, L.C.L.J. 2018. Effect of the Substitutions of Agricultural Uses by Forest on the Hydrological Processes in a Tropical Watershed. Analysis through Hydrological Simulation. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*. v.5(11), nov-2018 – ISS: 2349-6495(P) 2456-1908(O).
- MAPBIOMAS. 2020. MapBiomias General “Handbook”. *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)*, Collection 5, Version 1.0. Link: <https://mapbiomas.org/download-dos-atbds>.
- NORRIS, J. R. 1998. Markov chains. [S.l.]: *Cambridge University Press*. Consultado em 4 de março de 2016.
- NASTA, P.; PALLADINO, M.; URSINO, N.; SARACINO, A.; SOMMELLA, A.; ROMANO, N. 2017. Assessing long-term impact of land-use change on hydrological ecosystem functions in a Mediterranean upland agro-forestry catchment. *Science of the Environmet.* v.605-606:1070-1082.
- NCAR, NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH . *Climate Forecast System Reanalysis – CSFR*. Acessado em: (20/07/2020). Link:

<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>.

- NTI, I. K. Geospatial process modelling for land use cover change. 2013. Tese de doutorado: *School of Computing and mathematical Sciences*, New Zealand, Auckland University of Technology, p.1-233.
- RODRIGUES, T. E.; PEREIRA, L. C.; GAMA, J. R. N. F.; REGO, R. S.; HENRIQUE, L. M. 1996. Uso e ocupação do solo da Amazônia brasileira. In: Congresso Brasileiro e Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do solo, 8, 1990, Londrina. Manejo integrado de solos em microbacias hidrográficas: anais. Londrina: SBCS: IAPAR, p. 145-191. Tipo: Artigo em Anais de Congresso. Biblioteca(s): Embrapa Amazônia Oriental.
- SCHILLING, K.E.; JHA, M. K.; ZHANG, Y.K.; GASSMAN, P.W.; WOLTER, C.F. 2008. Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agriculture watershed: Historical effects and future directions. *Water Resources Research*, v.44, W00A09. Doi:10.1029/2007WR006644.
- SOARES FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; ARAÚJO, W. L.; VOLL, E. 2007. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. *Megadiversidade*, v. 3, n. 1-2, p. 74-76.
- SOUZA JR., C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; et al. 2020. Reconstructing three decades of land use and land cover in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. *Remote Sensing (12)* 2735-2757, doi: 10.3390/rs121727735.
- WANG, X.; SHANGB, S.; YANGC, W.; CLARY, C.C.; YANG, D. 2010. Simulation of land use-soil interactive effects on water and sediment yields at watershed scale. *Ecological Engineering*. v.36 - 328-344.
- WILSON, G.L.; DALZELL, B.J.; MULLA, D.J.; DOGWILER, T.; PORTER, P.M. 2014. Estimating water quality effects if conservation practices and grazing land use scenarios. *Journal of Soil and Water Conservation*. v.69(4) - 330-342.
- YEN, J.D.L.; THOMSON, J.R.; PAGANIN D.M.; KEITH J. M. AND NALLY R.M. 2015 Function regression in ecology and evolution: FREE. Published in *Methods in Ecology and Evolution*, Vol 6, p. 17-26. Doi: 10.1111/2041-210X.12290.



QR Code – Detalhamento do estudo do uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul entre 1986 e 2019.

---



# MODELAGEM HIDROMETEOROLÓGICA DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL: UMA ABORDAGEM INTEGRADA

Este capítulo integra os resultados consolidados pelo projeto MoVaSC como um todo. O Capítulo 1 contextualizou a perspectiva histórica relacionada a estudos impactantes da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul; o Capítulo 2 discutiu os resultados dos estudos de tendências de extremos de precipitação e o impacto de oscilações oceânicas na bacia; o Capítulo 3 tratou dos fenômenos atmosféricos de alta frequência; o Capítulo 4 discutiu a dinâmica da taxa de sedimentação em reservatórios da bacia e mensurou (pela técnica de datação pelo  $^{210}\text{Pb}$ ) a inevitável sedimentação que tão drasticamente impacta a capacidade de armazenamento de água dos reservatórios, enquanto o Capítulo 5 abordou características e especificidades do uso e ocupação do solo na bacia. Concluindo, este Capítulo 6 apresenta os fundamentos que orientaram a modelagem hidrometeorológica integrada em 809 sub-bacias estrategicamente identificadas ao longo da bacia do rio Paraíba do Sul, assim oferecendo informações de interesse para a gestão hídrica da bacia como um todo.

## O Contexto

Discutidos em detalhe (no capítulo anterior) os parâmetros físicos reais, representativos dos tipos de solo e de vegetação que influenciam o balanço hídrico na bacia do rio Paraíba do Sul, estes alimentam informações geográficas e geoambientais, consideradas imprescindíveis para a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica.

Fundamentado nos preceitos metodológicos que orientaram os desenvolvimentos complementares das diferentes fases do projeto de P&D que antecederam a modelagem hidrometeorológica, este capítulo detalha:

- a estrutura de uma página web (*homepage*) instalada no computador da Light Energia S.A., com vistas a integrar os resultados das simulações visando facilitar o seu monitoramento;
- características do desenvolvimento do modelo hidrometeorológico da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, especificamente, os fundamentos do modelo hidrológico;
- a infraestrutura instalada de estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas, cujos relatórios de medições foram utilizados na calibração e validação do modelo;
- a implantação do modelo hidrológico (*The Soil and Water Assessment Tool*, SWAT) e sua adequação para a bacia do rio Paraíba do Sul;
- a calibração do modelo hidrológico (SWAT+), obtido pelo carregamento dos dados físicos impactantes;
- a validação do modelo hidrológico e sua integração com o modelo atmosférico (WRF) e
- a internalização da plataforma de previsão hidrometeorológica na concessionária Light Energia S.A., entendida como ferramenta estratégica de gestão operacional.

Concluindo o livro, este capítulo se encerra apresentando exemplos de resultados da previsão da vazão hídrica de sete dias, gerados pelo modelo hidrometeorológico em sub-bacias de interesse da concessionária.

## Estrutura da página web integradora

No contexto da estratégia de gestão dos resultados do projeto MoVaSC, foi criada uma página web com o propósito de integrar os resultados, à medida que vão sendo gerados. Explícita, assim, as funcionalidades dos modelos WRF e SWAT, que operam de forma integrada para viabilizar a modelagem hidrometeorológica. As Figuras 6.1 e 6.2 ilustram detalhes da página de abertura da referida homepage, explicitando suas funções de pesquisa: Caracterização do P&D; Memória (acesso a relatórios e publicações realizadas) e Modelo Integrado Hidrometeorológico (resultados gerados atualizados).

Cada uma dessas abas permite acesso a informações críticas, a seguir caracterizadas.

Figura 6.1 Menu da homepage do Projeto MoVaSC.



Figura 6.2 Exemplo de desdobramento do menu.



Esses conteúdos são resumidos a seguir:

### Caracterização do Projeto de P&D

**Financiador:** Programa Regulado de P&D Light/Aneel

**Instituições Executoras:**

- Faculdades Católicas (PUC-Rio), por meio de seu Programa de Pós-Graduação em Metrologia;
- Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), por meio de seu Laboratório de Meteorologia Aplicada (LMA-Departamento de Meteorologia) e
- Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), por meio de seu Departamento de Meteorologia.

**Contatos Institucionais:**

- Pela PUC-Rio: Professor Dr. Maurício Nogueira Frota <[mfrota@puc-rio.br](mailto:mfrota@puc-rio.br)> (Coordenador do P&D)
- Pela UFRJ: Professor Dr. Gutemberg Borges França <[gutemberg@lma.ufrj.br](mailto:gutemberg@lma.ufrj.br)>
- Pela UFCG: Professor Dr. Enio Pereira de Souza <[enio.souza@ufcg.edu.br](mailto:enio.souza@ufcg.edu.br)>

Data de assinatura do Contrato: 05/09/2019 (Contrato no. 4500.4281.46)

Natureza do Contrato: Prestação de Serviços de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D)

Data da Reunião de Kick-off: 09/09/2019.

### Objetivos do Projeto

Desenvolvimento de sistema computacional no setor elétrico, integrado operacionalmente, para:

- Previsão de chuva-vazão, baseado em modelos acoplados atmosférico-hidroológico, para aplicação em unidades geradoras de energia elétrica da Light e
- Determinação do histórico de variação do assoreamento dos reservatórios que integram o complexo hidroológico.

### Caráter Inovador do Projeto

Proposta de amplo escopo, que consiste em:

- modelo atmosférico e hidroológico integrados capaz de prover previsões de tempo e vazão, com saída horária para o período de até sete dias, na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul;
- análise detalhada do clima da região vis-à-vis o comportamento do regime de precipitação e
- estudo da evolução do assoreamento dos reservatórios.

### Resultados esperados

- Construção de uma base consistente de conhecimento capaz de orientar tomadas estratégicas de decisão na operação do sistema hidroológico da bacia do Paraíba do Sul (volumes de água disponíveis na bacia hidrográfica; eventos extremos relacionados a cheias e estiagens; simulação de eventos ambientais;
- Acesso a uma metodologia de planejamento e estudo ainda não disponível (modelagem acoplada da bacia, hidroológica e atmosférica, permitindo a simulação de eventos críticos de interesse.
- Estabelecimento de relação de causa-efeito capaz de explicar o aumento do assoreamento na barragem visando subsidiar uma política duradoura de mitigação com o propósito de melhorar a capacidade de geração futura de energia.

### Produtos do Projeto (entregáveis)

Ferramentas computacionais para construir:

- Cenários das condições climáticas e impactos de fenômenos meteorológicos relevantes de baixa frequência, no regime sazonal de precipitação para uma dada condição de assoreamento;
- Modelo de previsão de vazão de rios acoplado ao modelo de previsão de tempo específico (software);
- Modelo de depósito de sedimento por barragem (software);
- Produção de conhecimento, divulgado na forma de artigos técnicos e científicos.

### Motivação para desenvolvimento do Projeto

A principal motivação para desenvolvimento do projeto resulta da baixa confiabilidade dos códigos computacionais existentes de previsão chuva-vazão, notadamente por não incluírem:

- modelos atmosféricos e hidrodinâmicos associados às mudanças climáticas;
- modelagem do sistema hidrológico capaz de refletir o tipo de solo, declividade e densidade da cobertura vegetal das bacias e entornos;
- por não levarem em consideração variabilidades interanuais do clima, resultantes do El Niño, La Niña e oscilações decadais, e de potenciais impactos resultantes do regime de precipitação da bacia hidrográfica e
- taxa de sedimentação (assoreamento), determinável pela técnica de captura do  $^{210}\text{Pb}$  (um radio-núclideo natural) ao longo de um período de até 100 anos;
- por colocar em risco a previsão operacional de descargas dos sistemas na ausência de dados confiáveis relacionados aos volumes de espera de cheias e que reduzem a capacidade de geração das unidades da Light Energia.

### Relevância do Projeto

O projeto de P&D MoVaSC:

- contribui para o setor elétrico como um todo (beneficia os gestores das usinas hidrelétricas da Light e de outras usinas hoje em operação no país, cujos planejamentos da operação enfrentam problemas similares) e
- contribui de forma decisiva para a inovação do setor elétrico, já que equaciona um grave problema que afeta os planos de planejamento, gestão e manutenção de qualquer complexo hidrelétrico.

### Metodologia

- **Modelo atmosférico** — Código computacional para realizar previsões meteorológicas na bacia do rio Paraíba do Sul visando avaliar impactos associados a fenômenos de baixa frequência no regime de precipitação da área de interesse da Light (para períodos de 12 h, 24 h e períodos de até 7 dias na bacia hidrográfica contribuinte).
  - **Estudo de sedimentos** — Código computacional para realizar avaliação do nível real de assoreamento pela técnica inovadora do  $^{210}\text{Pb}$ , assim permitindo recuperar a perda da informação da variação temporal da taxa de sedimentação, cujas consequências resultam na diminuição da previsibilidade do volume de água acumulado e da vida útil do reservatório.
  - **Modelo de simulação chuva-deflúvio** — Código computacional para simular a vazão em pontos estratégicos do rio Paraíba do Sul, agregando informações relacionadas ao uso do solo (alterações do coeficiente de deflúvio); áreas urbanas e rurais, contemplando diversos tipos de culturas, pastos ou florestas; abastecimento de água para atender aumentos do consumo e uso industrial requeridos pela implantação, na região, de novos empreendimentos. O código considera, também, demandas de reservatórios de acumulação (amortecimento de cheias; regulação de vazões e aproveitamento hidroelétrico), bem como transbordo de bacias hidrográficas e industriais. Como resultado final de interesse para a gestão hídrica da bacia, modelo hidrometeorológico realiza a previsão da vazão hídrica para sete dias em sub-bacias de interesse estratégico para a concessionária.
-

O Quadro, a seguir, caracteriza os Módulos Temáticos, estruturados em 24 Etapas de desenvolvimento.

## Etapas do Projeto

Módulo	Etapa	Título da Etapa	Mês de Início	Mês de Término	Produto esperado ao término da Etapa (Produtos intermediários)
CLIMATOLOGIA	#1	Dados Pretéritos de Precipitação e Preenchimento de Falhas	1	5	Relatório da série histórica de precipitação
	#2	Ocorrência de Fenômenos de baixa frequência (El Niño, ENUS, ODP)	5	8	Classificação de intensidade dos eventos
	#3	Análise Estatística (Série de precipitação versus Fenômenos de baixa frequência)	7	15	Cenários do Regime de Precipitação
	#4	Relatório Integrado da Etapa Climatologia	13	18	Submissão de artigo científico em periódico internacional e Relatório da Etapa
ASSOREAMENTO	#5	Levantamento de dados batimétricos pretéritos	1	3	Mapeamento das regiões de maior taxa de assoreamento
	#6	Amostragem de testemunhos sedimentares	4	6	Testemunhos sedimentares
	#7	Determinação de Pb-210 nos testemunhos (datação dos testemunhos)	5	17	Diagnóstico do comportamento temporal das taxas de assoreamento
	#8	Implantação de armadilhas de sedimentos	5	17	Relatório da taxa de assoreamento e composição química dos sedimentos
	#9	Estudo de correlação e validação dos parâmetros críticos do assoreamento	17	22	Diagnóstico da matriz de correlação (assoreamento, precipitação, vazão e uso e ocupação do solo)
	#10	Relatório Integrado da Etapa Assoreamento	22	23	Submissão de artigo científico em periódico internacional e Relatório da Etapa
PREVISÃO DO TEMPO	#11	Implantação e ajuste do modelo atmosférico em alta resolução	1	8	Modelo implantado e validado em laboratório
	#12	Avaliação dos resultados de previsão interanual do modelo atmosférico	6	17	Diagnóstico do desempenho do modelo para precipitação
	#13	Modelagem numérica da previsão do tempo	8	18	Diagnóstico do desempenho do modelo para variáveis meteorológicas
	#14	Compatibilização dos modelos Atmosférico e Chuva-Vazão	10	20	Modelos Compatibilizados
	#15	Relatório Integrado da Etapa Previsão do Tempo	19	22	Submissão de artigo científico periódico internacional e Relatório da Etapa

Módulo	Etapa	Título da Etapa	Mês de Início	Mês de Término	Produto esperado ao término da Etapa (Produtos intermediários)
HIDROLOGIA	#16	Caracterização Física da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul	1	6	Mapas georeferenciados de Geologia, Pedologia, Hidrogeologia e Uso e Ocupação do Solo
	#17	Coleta e análise de dados fluviométricos	1	4	Relatório de Consistência dos dados e avaliação do sistema de medição instalado
	#18	Implantação do modelo hidrológico	5	12	Carregamento dos dados físicos (mapas) no Modelo hidrológico
	#19	Calibração do Modelo Hidrológico	10	18	Modelo calibrado
	#20	Atualização da caracterização física da bacia do Paraíba do Sul (hidrologia & assoreamento)	12	18	Mapas temporais de uso e ocupação do solo
	#21	Validação do modelo hidrológico	17	20	Relatório de validação do modelo e preparação de artigo científico pela Light
GESTÃO	#22	Internalização na Light dos modelos de Previsão de Tempo e Hidrologia	20	23	Modelo hidrometeorológico implantado e operacional na Light
	#23	Encerramento do Projeto de P&D MoVaSC	23	24	Workshop aberto de repasse de resultados na Concessionária Light Energia S.A.
	#24	Entrega do Relatório Final em Workshop de Apresentação dos Resultados Globais	24	24	Relatório Final do P&D MoVaSC e repasse do código computacional do Modelo Hidrometeorológico integrado

A aba “Modelo Integrado Hidrometeorológico” da *homepage* disponibiliza, em tempo real para os gestores da concessionária, os resultados gerados pelo modelo hidrometeorológico à medida que estes vão sendo gerados. Dentre os resultados típicos gerados destacam-se: precipitação total acumulada; meteogramas; velocidade do vento; informações de assoreamento nos reservatórios; precipitação; coeficientes de correlação de índices climatológicos extremos; e dados de uso e ocupação do solo ao longo da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul.

Resultados típicos gerados pelo Projeto MoVaSC, cujos códigos computacionais já se encontram operacionais na concessionária Light Energia S.A., são exibidos diariamente na *homepage*. Exemplos desses resultados são mostrados nos diferentes capítulos deste livro.

## Modelagem Hidrometeorológica da Bacia

### Fundamentos do modelo hidrológico

O modelo hidrológico desenvolvido para a bacia hidrológica do Paraíba do Sul fundamenta-se, essencialmente, no código computacional SWAT (*The Soil & Water Assessment Tool*), que é uma ferramenta já consagrada de modelagem hidrológica. Via de regra, opera em escala de bacia hidrográfica para simular a qualidade e a quantidade da água superficial e subterrânea. Amplamente utilizado na avaliação da prevenção e controle da erosão do solo, controle de poluição de fonte difusa e gestão regional em bacias hidrográficas, o SWAT, ao realizar previsões de vazão na bacia é, também, capaz de prever o impacto ambiental do uso da terra, práticas de gestão da terra e mudanças climáticas.

De forma estratégica e conveniente, o SWAT é um modelo habilitado para *software* de domínio público, que recebe suporte ativo do USDA (*Agricultural Research Service, Blackland Research & Extension Center* em Temple, Texas, EUA) e *feedback* permanente de grupos especializados de pesquisa, assim assegurando a manutenção e atualização contínua desta sofisticada ferramenta computacional utilizada na modelagem hidrológica.

Não obstante este caráter de *software* aberto de uso irrestrito para produzir resultados de interesse, a ferramenta computacional precisa ser adequada às especificidades e particularidades da bacia hidrográfica objeto de estudo. O código precisa ser calibrado levando-se em conta informações relacionadas ao uso e cobertura do solo, porém com base em medições realizadas por estações meteorológicas e fluviométricas confiáveis e independentes. Precisa, também, ser validado para gerar simulações de vazão em locais de interesse estratégico para os gestores da bacia e do complexo hidrelétrico por eles administrados.

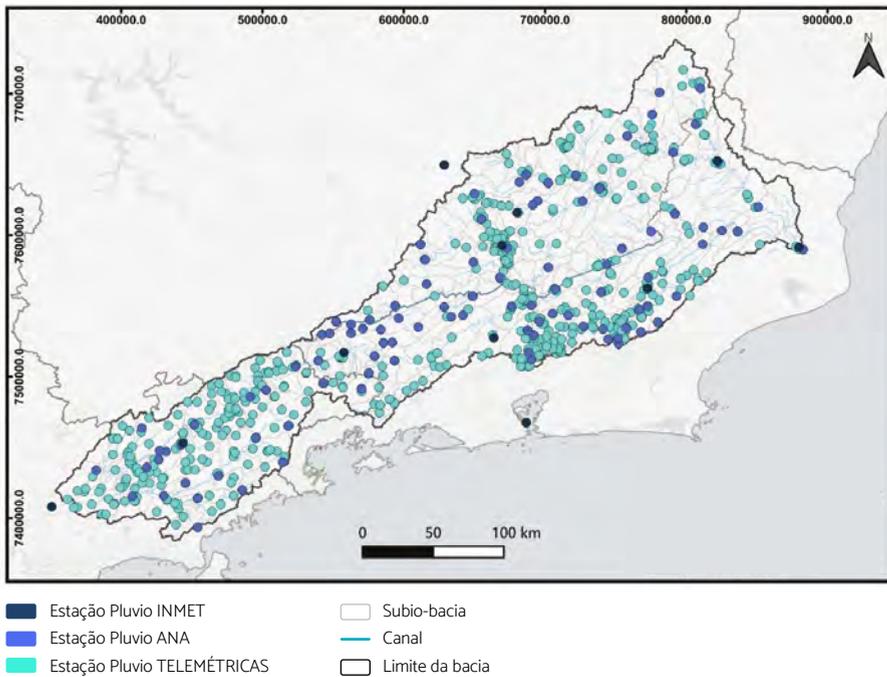
### **Estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas: infraestrutura instalada na bacia**

Uma ampla infraestrutura de estações telemétricas de coletas de dados (meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas), gerenciadas por diferentes organizações públicas e privadas, coloca à disposição dos interessados dados de medição de relevância para o estudo e gestão da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, a seguir caracterizados:

- onze estações meteorológicas, operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), oferecendo dados de medição de pressão atmosférica, temperatura do ar, humidade, radiação solar, velocidade de vento e precipitação;
- oitocentas e dezessete estações pluviométricas, distribuídas entre cento e oito estações, de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), e setecentas e nove estações telemétricas de responsabilidade de diversos órgãos e empresas, dentre as quais se destacam: CEMADEM (240), ANA (100), INEA-RJ (59), INMET (30), LIGHT (21), FURNAS (19), CEMIG (11) e CESP (7);
- vinte e seis estações meteorológicas e pluviométricas integrantes da base de dados N1\_05, que disponibilizam dados atualizados de vazão em regiões críticas da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul e que foram utilizadas no processo de calibração.

A Figura 6.3 ilustra as estações selecionadas de suporte ao processo de calibração do modelo.

Figura 6.3 Estações meteorológicas e pluviométricas instaladas na bacia.

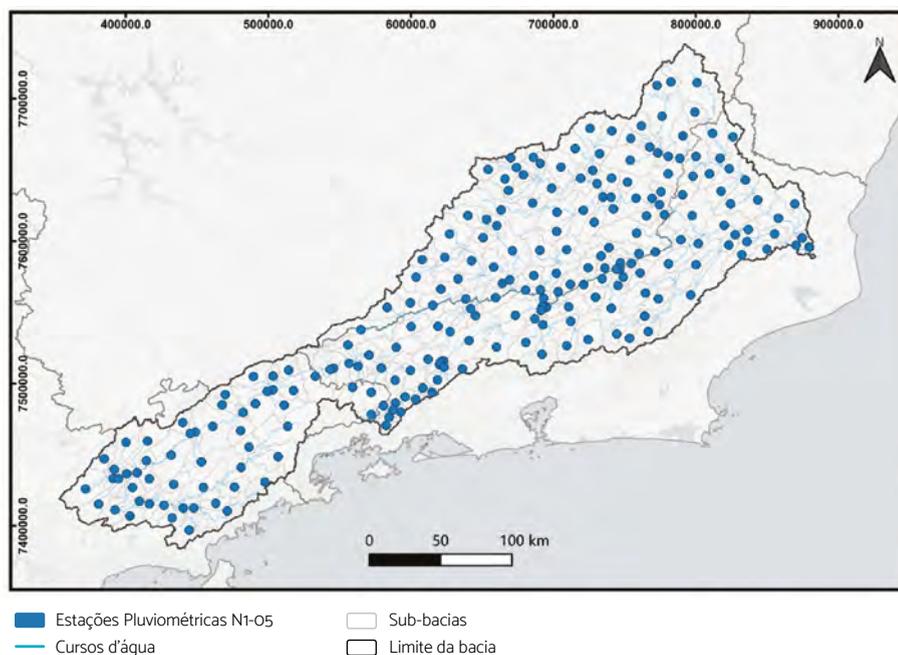


Fonte: Projeto MoVaSC.

Com base na confiabilidade da informação assegurada pelos seus gestores, estas estações foram submetidas a um teste de consistência e controle de qualidade de dados, e a um processo de interpolação espacial, usando estatísticas zonais associadas à grade de modelagem composta pelas sub-bacias. Obteve-se, assim, uma base de dados composta pelas variáveis meteorológicas compatíveis com o processo de assimilação de dados do modelo SWAT+.

A Figura 6.4 exhibe a distribuição espacial dos pontos que contêm as médias espaciais dos dados meteorológicos de entrada fornecidos para o modelo hidrológico. Conforme pode ser observado, esses pontos coincidem com o centroide dos polígonos que representam as sub-bacias, denominados de base N1\_05. Essa abordagem se mostrou eficiente para compatibilizar a densidade de estações meteorológicas e pluviométricas com a estratégia de absorção destes dados pelo modelo hidrológico.

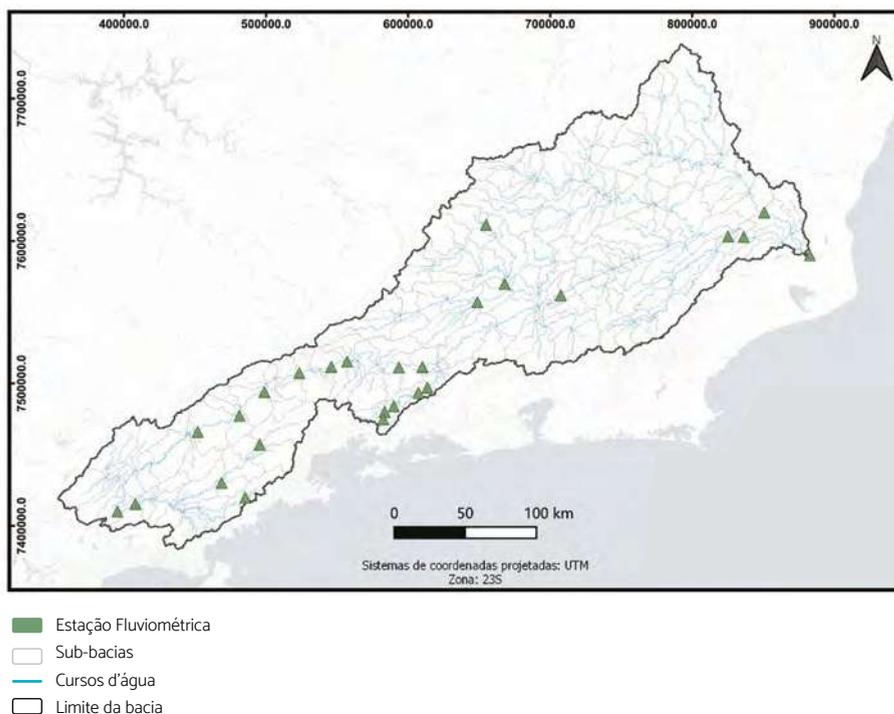
Figura 6.4 Pontos de entrada de dados meteorológicos no modelo SWAT+.



Fonte: Projeto MoVaSC.

Já a Figura 6.5 ilustra as vinte e seis estações fluviométricas, que disponibilizam dados atualizados de vazão em regiões críticas da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul e que foram utilizadas no processo de calibração. Dentre as inúmeras estações instaladas na bacia, estas foram selecionadas, permitindo compatibilizar a qualidade requerida dos dados das estações com a grade de modelagem representada pelas respectivas sub-bacias.

Figura 6.5 Estações fluviométricas instaladas na bacia.



Fonte: Projeto MoVaSC.

Enquanto as estações meteorológicas e pluviométricas oferecem dados de entrada para o modelo hidrológico, as estações fluviométricas oferecem dados observacionais, que permitem verificar a acurácia da previsão realizada pelo modelo desenvolvido.

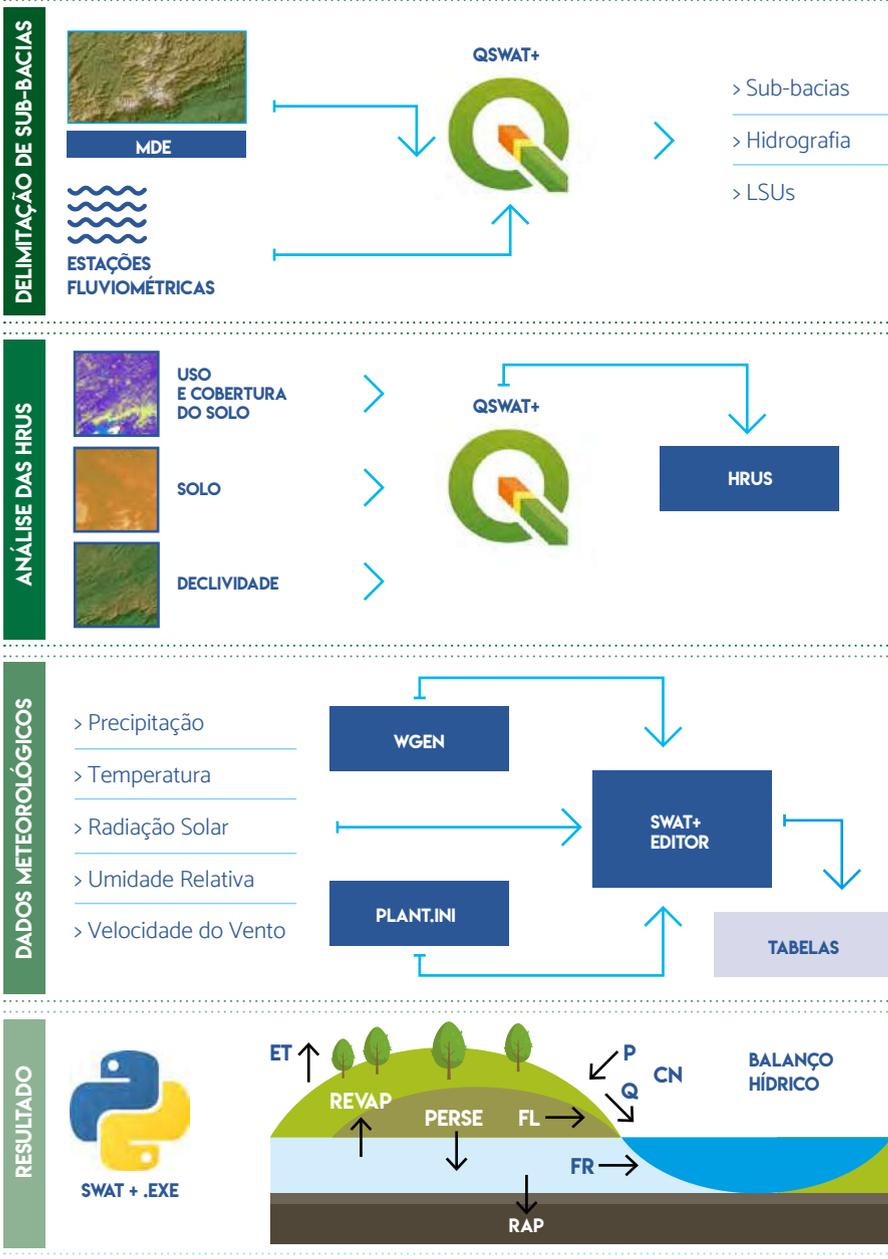
## Implantação do modelo hidrológico SWAT+

Conforme já caracterizado, o modelo SWAT é uma ferramenta de modelagem hidrológica física semidistribuída, aplicável, em princípio, a qualquer bacia hidrográfica. A sua aplicação, entretanto, a uma bacia específica, requer um processo de customização às características fisiográficas e especificidades da topografia, uso e cobertura do solo, rede de drenagem e, também, dos forçantes meteorológicos locais da bacia objeto do estudo.

No projeto de pesquisa e desenvolvimento MoVaSC, essa customização foi realizada ao longo de uma etapa denominada “Implantação do modelo hidrológico”. Dentre as versões disponíveis do modelo SWAT, foi adotada a sua versão mais recente denominada SWAT+, que reflete um código computacional completamente reestruturado, que utiliza a interface de pré-processamento QSWAT+, baseada no software QGIS (aplicativo de sistema de informações geográficas de *desktop* multiplataforma gratuito e de código aberto, que suporta visualização, edição, impressão e análise de dados geoespaciais).

O esquema da Figura 6.6 ilustra a sequência de ações utilizadas para a implantação do modelo SWAT+, estruturada nas seguintes quatro etapas: (i) delimitação das sub-bacias; (ii) criação das unidades de resposta hidrológica (HRUs); (iii) carregamento dos dados meteorológicos (neste bloco, WGEN denota um gerador de dados meteorológicos aleatórios e PLANT.INI, um arquivo de parametrizações, ambos operados pelo código computacional SWAT); e (iv) no último bloco da Figura 6.6., destacam-se as seguintes variáveis internas do SWAT: REVAP (retorno de água do aquífero superficial); PERSE (percolação de água para o aquífero superficial); FL (escoamento/fluxo subsuperficial lateral para o canal); FR (escoamento/fluxo subterrâneo /contribuição lateral para o canal); RAP (recarga para o aquífero profundo); ET (evapotransposição); P (precipitação); Q (vazão superficial); CN (coeficiente da “curva de número”), parâmetros esses que ilustram a abrangência do código computacional.

Figura 6.6 Fluxograma das etapas para modelagem hidrológica pelo SWAT+.



Fonte: Elaborado pela equipe do projeto MoVaSC.

Essas atividades foram realizadas de forma recursiva visando (i) representar o sistema hídrico da bacia do rio Paraíba do Sul e (ii) atender aos objetivos de modelagem do projeto de previsão de vazões afluentes aos principais reservatórios de interesse da concessionária Light Energia S.A.

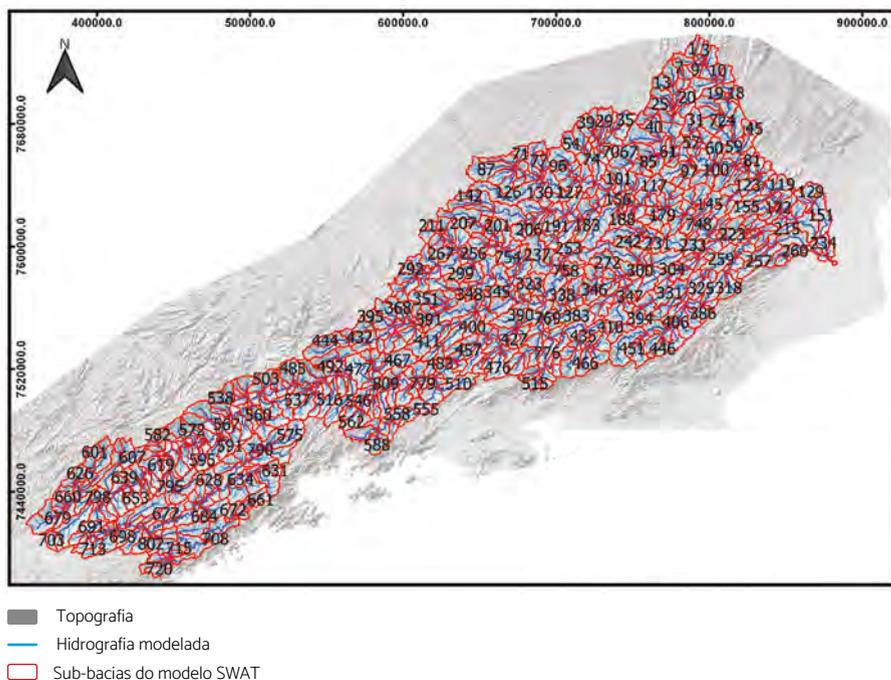
O sequenciamento das atividades desenvolvidas é assistido, de forma estruturada e hierárquica, pela interface principal do modelo SWAT+, associada ao software QGIS e denominada QSWAT+, conforme mostrado na tela da interface operacional do modelo.

Cada uma das quatro etapas da modelagem hidrológica pelo SWAT+ é caracterizada a seguir:

- **Delimitação das sub-bacias** – requer dados do modelo digital do terreno e da rede de drenagem natural, bem como a definição dos pontos (locais de medição) selecionados para que o modelo calcule as séries de vazões modeladas. Esse é o procedimento requerido para cumprir o propósito da calibração e para definir os pontos de interesse de obtenção de séries históricas modeladas. A definição desses pontos levou em consideração dois fatores: a disposição das estações fluviométricas em operação na bacia e os pontos considerados de interesse da concessionária para realizar a modelagem da vazão (Figura 6.4). Esses dados devem ser acompanhados por uma criteriosa definição do circuito hidráulico da bacia do rio Paraíba do Sul, assim permitindo uma representação realista do balanço hídrico no modelo SWAT+. Bem instrumentada, a bacia possui barramentos que controlam o regime hidráulico e as transposições de vazão para o rio Guandu. Alternativamente, a representação no modelo no SWAT+ dos efeitos das estruturas de barramento e transposição pode ocorrer de duas formas: (i) utilizando dados disponíveis (ANA/ONS) de séries de vazões naturais ou (ii) incorporando o elemento reservatório no modelo SWAT. No presente estudo optou-se pela primeira alternativa já que foi possível reconstituir, de forma consistente, a rede de drenagem natural no modelo; ou seja, sem considerar os reservatórios, que foram substituídos pelas respectivas séries de vazões naturais, que já contemplam o

referido balanço. A Figura 6.7 ilustra a grade otimizada do modelo após uma série de refinamentos realizados, resultando em 809 sub-bacias definidas, levando-se em consideração os pontos de medições das estações fluviométricas e os pontos de interesse da concessionária para fins de previsão da vazão hídrica.

Figura 6.7 Configuração final da “grade do modelo”, delimitação de sub-bacias.

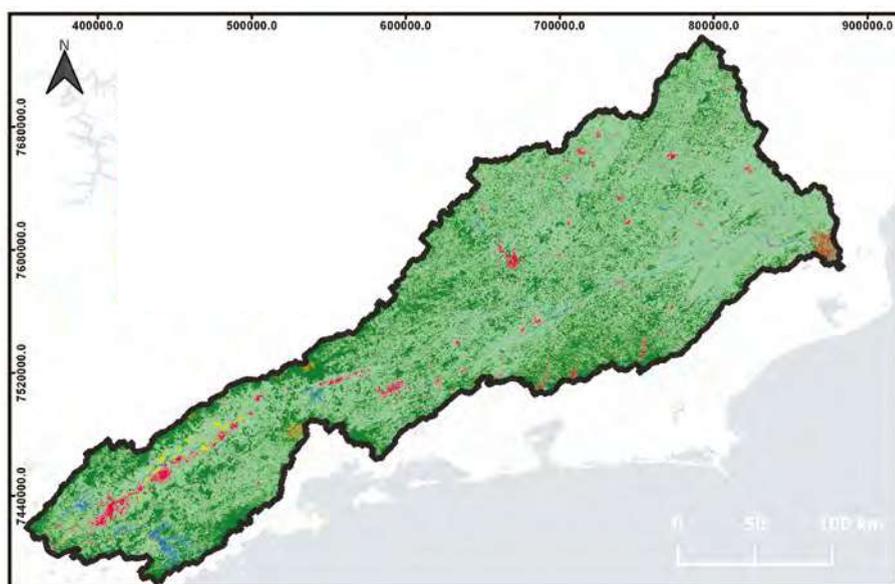


Fonte: Elaborado pela equipe do projeto MoVaSC.

- **Criação das unidades de resposta hidrológica (HRUs)** – a definição de unidades de resposta hidrológica orienta a aplicação distribuída dos parâmetros de calibração de cada sub-bacia. Definidas por sub-bacia, permitem distribuir esses parâmetros para cada HRU, entendida como a menor unidade para atribuição de parâmetros distribuídos para a calibração do modelo. Esta operação demanda informações sobre o uso e cobertura do

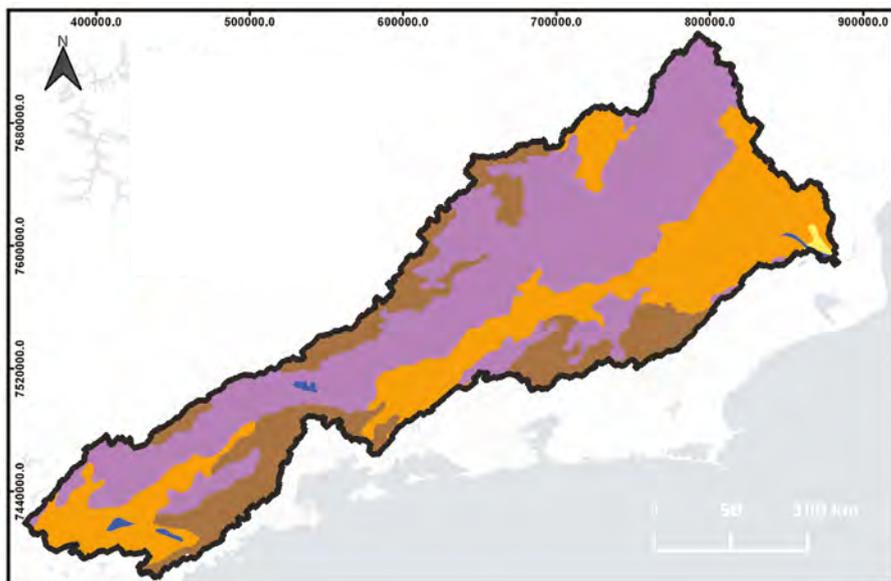
solo, bem como os respectivos parâmetros físicos que representam a física dos solos e a fisiologia da vegetação existente. O modelo SWAT+ disponibiliza uma base de dados padrão de uso e cobertura do solo global. Conforme discutido no Capítulo 5, as especificidades locais da bacia estudada foram adequadamente refletidas no modelo hidrológico. Para tal, foram utilizadas informações relacionadas ao uso e cobertura do solo (discutidas no capítulo anterior e sucintamente ilustradas na Figura 6.8) e pelos tipos de solo (ilustrado pelo mapa da Figura 6.9).

Figura 6.8 Mapa de uso e cobertura do solo da bacia do rio Paraíba do Sul.



- Área de drenagem
- Uso e cobertura do solo:
- Fragmentos florestais
  - Área urbanizada
  - Solo exposto
  - Água
  - Pasto
  - Área agrícola
  - Plantação de cana-de-açúcar

Figura 6.9 Mapa de tipos de solos da bacia do rio Paraíba do Sul.

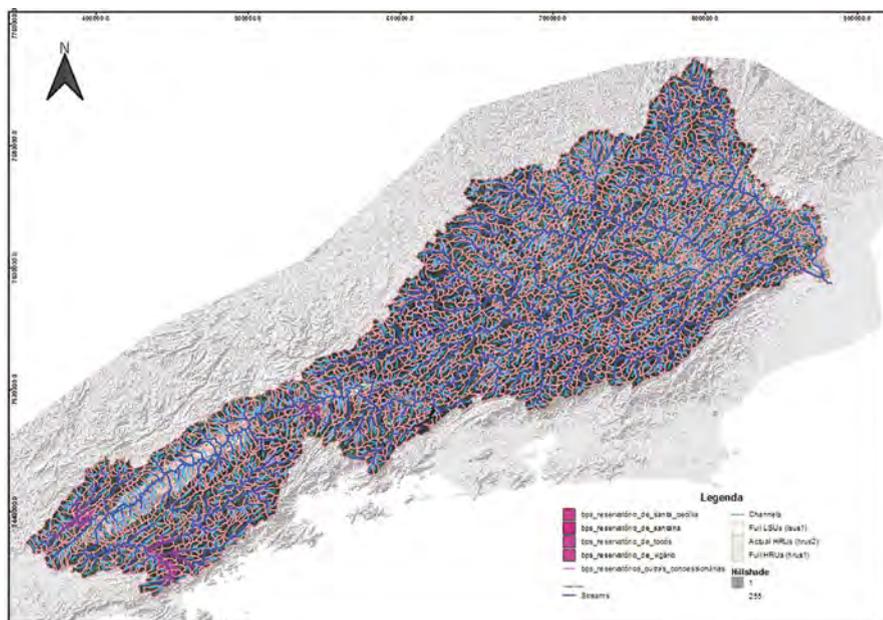


Tipos de solo: (Embrapa, 2011)

- |  |  |
|--|--|
|  Cambissolos |  Neossolos        |
|  Latossolos  |  Argissolos       |
|  Água        |  Área de drenagem |

Complementando a informação, o banco de dados padrão do modelo SWAT+ – que reúne parâmetros físicos do tipo de solo e cobertura vegetal global – foi atualizado para refletir as classes representadas nos respectivos mapas. O resultado final da operação de geração das unidades de resposta hidrológica (HRUs) é mostrado no mapa da Figura 6.10, cujo detalhe mostra as HRUs da sub-bacia que drena para o reservatório de Tocós.

Figura 6.10 Resultado da geração das HRUs.



Fonte: Elaborado pelo projeto MoVaSC.

- **Carregamento dos dados meteorológicos** – fazendo uso da interface SWAT+ Editor, foi possível editar os dados de entrada, ajustar parâmetros, realizar simulações e controlar a importação e edição dos dados do modelo.

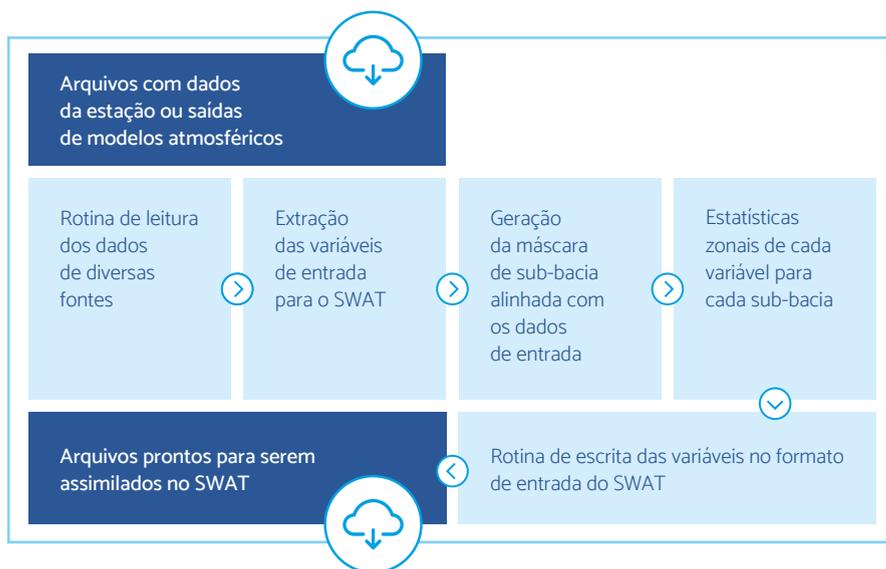
Para assegurar que os dados meteorológicos pudessem ser absorvidos pelo modelo, fez-se necessário uma etapa de pré-processamento, que permitiu converter os formatos das diferentes fontes dos dados meteorológicos disponibilizados para o formato específico do modelo SWAT+. A interface SWAT+ Editor já disponibiliza, na sua versão original, a possibilidade de absorção dos dados do modelo CFSR<sup>1</sup> (NCAR, 2020). O esquemático

1 O CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) é um produto de reanálise de terceira geração. É um sistema global, de alta resolução, acoplado (atmosfera-oceano-terra-gelo marinho), projetado para fornecer a melhor estimativa do estado desses domínios acoplados durante esse período.

da Figura 6.11 ilustra um algoritmo estruturado para generalizar a possibilidade de absorção de múltiplas fontes, a exemplo dos dados das estações meteorológicas do INMET.

Dados de reanálise do modelo meteorológico ERA5<sup>2</sup> e dados do modelo meteorológico WRF (parametrizações ótimas) foram desenvolvidas no curso de desenvolvimento do projeto MoVaSC.

Figura 6.11 Fluxograma do algoritmo de pré-processamento dos dados de entrada.



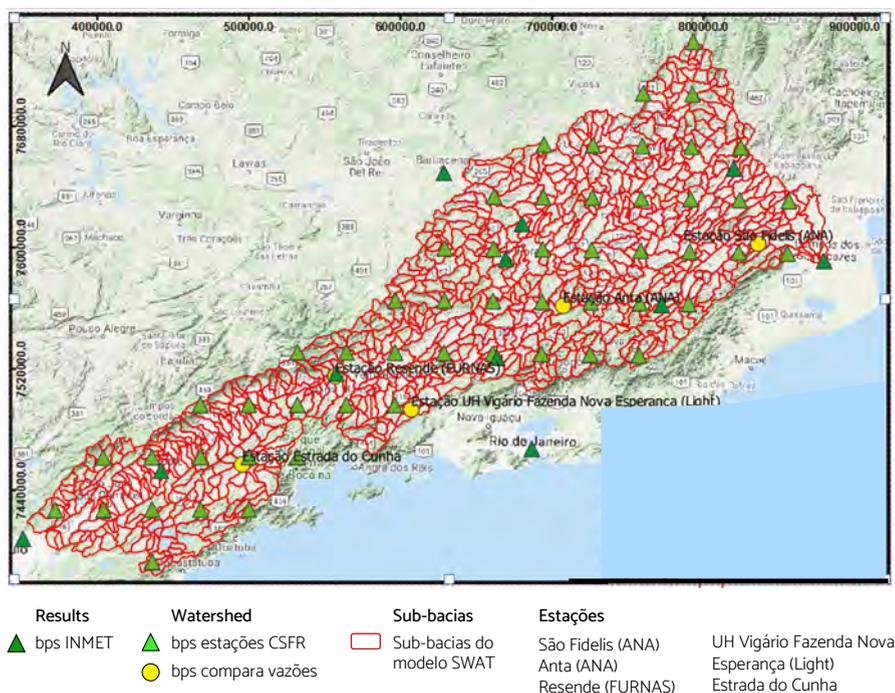
Dados de entrada no modelo SWAT+.

Fonte: Elaborado pela equipe do projeto MoVaSC.

<sup>2</sup> O ERA5 é um sistema online de documentação. Mais especificamente, a reanálise do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), de quinta geração para o clima global e o clima das últimas 4 a 7 décadas. A partir de 1950, os dados estão disponíveis e divididos em entradas do Climate Data Store para 1950-1978 (extensão preliminar para trás) e de 1979 em diante (versão final, incluindo atualizações oportunas). O ERA5 substitui a reanálise ERA-Interim e fornece estimativas horárias de um grande número de variáveis climáticas atmosféricas, terrestres e oceânicas. Os dados cobrem a Terra em uma grade de 30 km e resolvem a atmosfera usando 137 níveis da superfície até uma altura de 80 km. O ERA5 inclui informações sobre incertezas para todas as variáveis em resoluções espaciais e temporais reduzidas.

Em paralelo às parametrizações do modelo WRF (convecção e microfísica de nuvens), a integração dos modelos meteorológico e hidrológico requereu simulações específicas utilizando dados meteorológicos das estações do INMET e do CFSR, cujas respectivas distribuições espaciais são mostradas na Figura 6.12. Esta figura mostra, também, os pontos que correspondem às estações fluviométricas, cujos dados permitiram comparar as vazões observadas com as vazões simuladas com os dados do INMET e do CFSR.

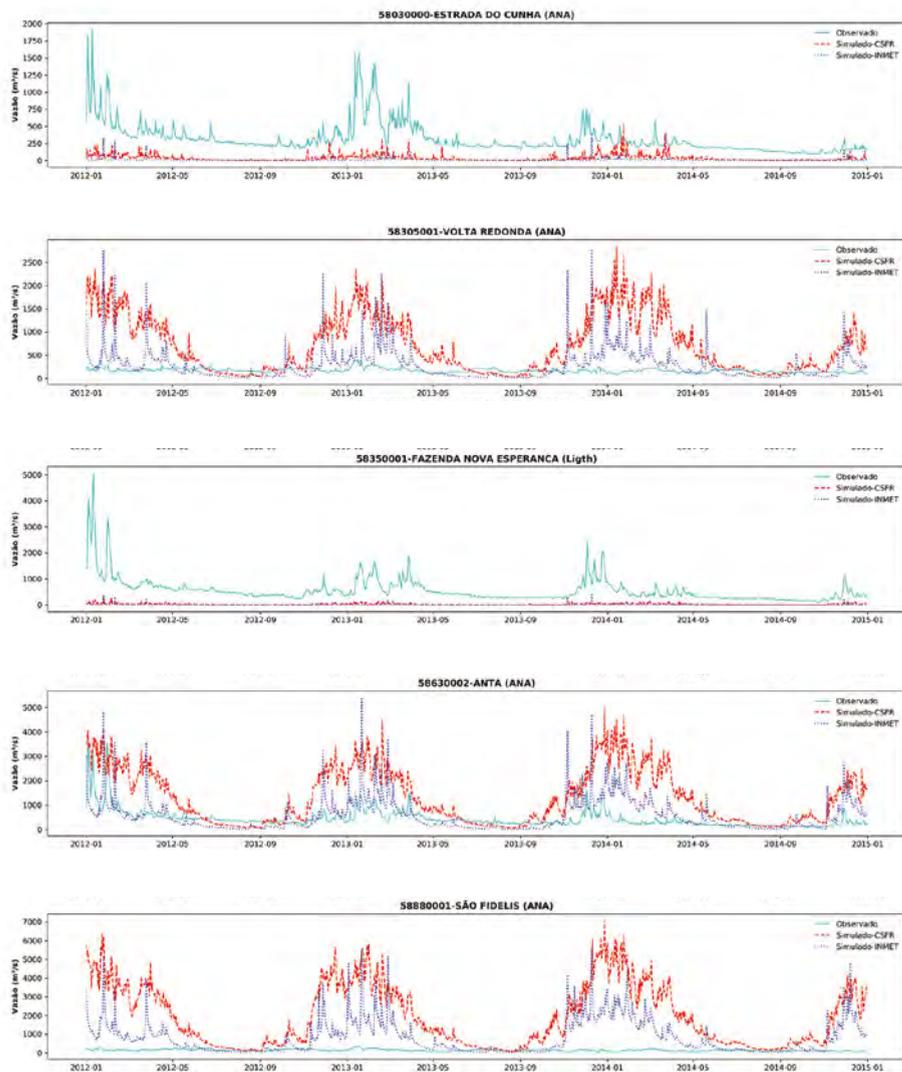
**Figura 6.12** Pontos de comparação das vazões geradas a partir de simulações. Simulações realizadas com base em dados do INMET e do CFSR.



Fonte: Elaborado pela equipe do projeto MoVaSC.

O resultado das simulações e respectivas comparações realizadas, para o período janeiro/2012 a janeiro/2015, é apresentado na Figura 6.13, para as cinco estações seleccionadas.

Figura 6.13 Comparação das vazões geradas a partir de simulações realizadas com base em dados do INMET e do CFSR.



Fonte: Projeto MoVaSC.

Essas simulações foram realizadas com o modelo sem nenhum esforço de calibração, ou seja, com os parâmetros padrões estabelecidos ainda no processo de construção do código computacional. Ainda assim, esse exercício permitiu não apenas a validação da estrutura do modelo customizado para a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, mas, também, verificar que os dados do modelo CFSR tendem a superestimar a previsão da vazão hídrica. Essa constatação preliminar foi confirmada nos primeiros exercícios de calibração, mostrando que, a despeito de uma cobertura espacial bem mais densa em relação às estações do INMET, o exercício de calibração que fez uso dos dados do CFSR foi inferior àquele baseado nos dados do INMET.

### **Calibração do modelo hidrológico**

Concebida e implementada a grade otimizada do modelo, após refinamentos que permitiram validar as 809 sub-bacias da bacia mãe do rio Paraíba do Sul, 22 delas (caracterizadas na Tabela 6.1) foram utilizadas como estratégia de calibração pelo SWAT+. Fazendo uso dos dados de medição gerados pelas estações fluviométricas instaladas, o código computacional foi finalmente calibrado.

A calibração e a análise de incertezas associadas aos resultados produzidos pelos modelos hidrológicos distribuídos requerem uma atenção especial por parte do modelador. Essas questões podem ser definidas pelo seguintes aspectos:

1. Parametrização do modelo;
2. Entendimento do que se denomina “modelo calibrado” e de seus limites de aplicação;
3. Condicionabilidade de um modelo calibrado;
4. Calibração de bacias altamente antropizadas;
5. Problema das incertezas e não-unicidade da solução.

Tais questões, discutidas em Abbaspour et al. (1999) e Abbaspour et al. (2005), foram criteriosamente exploradas ao longo do processo de calibração e da metodologia adotada para o desenvolvimento da etapa de calibração do modelo.

A Tabela 6.1 define, por suas coordenadas georreferenciadas, as 22 sub-bacias selecionadas como fonte primária de informação para calibração do modelo SWAT+. Nesta tabela identificam-se, também, os seguintes parâmetros: o código ANA, o nome atribuído à sub-bacia, o tipo, o seu operador, bem como o código de Canal SWAT atribuído pelo código computacional.

**Tabela 6.1** Sub-bacias selecionadas para fundamentar a calibração do modelo SWAT+.

N	<sup>(1)</sup> Estação Código	Estação Nome	Tipo	Operador	<sup>(2)</sup> Latitude	<sup>(2)</sup> Longitude	Canal SWAT
1	58338500 (*)	UHE NILO PEÇANHA RIO DO BRAÇO	Convencional [58338500] Telemétrica [58338500]	LIGHT	-22.785	-44.188	249
2	58335000 (*)	UHE NILO PEÇANHA LÍDICE	Convencional; Telemétrica [58335000]	LIGHT	-22.8354	-44.197	243
3	Reserv. Tocòs (19098) (*)	UHE NILO PEÇANHA RESERV. TOCOS BARRAMENTO	Vazão natural [19098]	LIGHT	-22.749	-44.125	239
4	---	Passa Três	Vazão calculada	---	-22.687	-44.004	234
5	58350001	Vigário UEL Fazenda Nova Esperança	Vazão natural	LIGHT	-22.66250	-43.95667	231
6	Reserv. Santana (19100) (*)	UEL SANTA CECÍLIA RES. SANTANA BARRAMENTO	Vazão natural [19100]	LIGHT	-22.532	-43.818	222
7	Reserv. Santa Branca (19091) (*)	Estação Santa Branca (ANA)	Vazão natural [19091]	LIGHT	-23.311	-45.971	213
8	58060000 (*)	Estação Ponte Alta	Convencional [58060000]	CPRM	-23.330	-45.144	202
9	58030000 (*)	Estação Estrada do Cunha	Convencional [58030000]	CPRM	-22.994	-45.146	195
10	58110000	UHE SANTA BRANCA JACARÉI	Telemétrica [58110000]	LIGHT	-23.311	-45.971	191
11	---	Santanesia Barra Pirai	Vazão calculada	---	-22.468	-43.826	174
12	Reserv Funil (19093) (*)	UHE FUNIL BARRAMENTO	Vazão natural [19093]	FURNAS	-22.530	-44.567	164
13	58315100 (*)	UEL SANTA CECÍLIA VARGEM ALEGRE	Convencional[58315100] Telemétrica[58315000]	LIGHT	-22.498	-43.930	156
14	58370000	UEL SANTA CECÍLIA BARRA DO PIRAI	Telemétrica [58370000]	LIGHT	-22.450	-43.797	153

15	58650500	UHE ILHA DOS POMBOS RIO PAQUEQUER	Telemétrica [58650500]	LIGHT	-21.922	-42.616	130
16	58585000 (*)	PCH MONTE SERRAT MANOEL DUARTE	Convencional[58585000]; Telemétrica [58586000]	CPRM	-22.084	-43.559	124
17	Reserv Sobragi (19096) (*)	UHE SOBRAGI MONTANTE 1	Vazão natural [19096]	CPRM	-21.967	-43.374	113
18	58636000	UHE ILHA DOS POMBOS SAPUCAIA	Telemétrica [58636000]	LIGHT	-21.986	-42.904	104
19	58643000	PORTO NOVO DO CUNHA	Telemétrica [58643000]	LIGHT	-21.886	-42.698	102
20	---	Rio Aventureiro	Vazão calculada	---	-21.860	-42.633	084
21	58653500	UHE ILHA DOS POMBOS JUSANTE	Telemétrica [58653500]	LIGHT	-21.835	-42.582	54
22	58001000 (*)	CAMPOS - PONTE MUNICIPAL	Convencional [58001000]; Telemétrica [58974000]	CPRM	-21.753	-41.300	43

<sup>(1)</sup> Código utilizado pelo Sistema Nacional de Informações em Recursos Hídricos, SNIR (<https://www.snirh.gov.br/>), sob a gestão da Agência nacional de Águas (ANA).

<sup>(2)</sup> Latitude e Longitude expressas em Coordenadas Geográficas GD (Graus Decimais). Números negativos indicam longitudes oeste e latitudes sul.

A compreensão prévia dos processos de modelagem hidrológica e de calibração de modelos computacionais foram fundamentais tanto para a realização do procedimento de calibração global em si, quanto para a utilização dos resultados produzidos.

Os modelos físicos semidestruídos passaram por uma evolução geral similar. Evoluíram de modelos concentrados (com conjuntos reduzidos de parâmetros) para concepções complexas, considerando um enorme conjunto de parâmetro, tornando os modelos quase impraticáveis de serem calibrados.

Com o suporte de experimentos de campo (dados observacionais), experimentos numéricos de comparação de parametrizações e uso de modelos específicos, tornou-se possível reduzir as parametrizações para um conjunto mais parcimonioso que, com o auxílio de ferramentas especializadas (e.g., SWAT-CUP), permitiu a obtenção de resultados bastante satisfatórios.

Conforme documentado na literatura especializada, diferentes modelos fazem uso de diferentes técnicas para promover

uma redução do número de parâmetros impactantes. No caso do SWAT+, apenas para citar um exemplo que se repetiu na parametrização de outros fenômenos, o uso de Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs – *hydrologic response unit*) e de Unidades de Paisagem (LSUs – *landscape units*) permitiu reduzir parâmetros com base nos compromissos (*tradeoff*), a seguir caracterizados.

- As HRUs e LSUs reúnem regiões que, por terem comportamento hidrológico similar, permitem a representação de suas variabilidades espaciais por um conjunto de parâmetros comuns. Se por um lado foi possível agregar os parâmetros com essa abordagem, reduzindo-se o número de parâmetros, por outro, assegurou-se uma variabilidade espacial baseada nas características de comportamento das HRUs e LSUs, observando-se corretamente as escalas envolvidas e representadas.
- Dependendo das escalas presentes e consideradas na formulação proposta, a resolução espacial adotada para definição das HRUs e LSUs mostrou não ser suficiente para detectar a variabilidade espacial observada, requerendo novas rodadas de calibração para assegurar um desempenho eficiente do modelo.

Abbaspour (2015) afirma que o compromisso entre o número de parâmetros a ser considerado e a escala adotada não é trivial de ser atingido, sugerindo que a escolha da parametrização fatalmente irá afetar o processo de calibração. O uso combinado de dados obtidos em experimentos realizados no campo; de técnicas de análises espaciais que fazem uso de funções de transferência pedológicas; de análise geoestatística e de dados de sensoramento remoto constituiu parte da estratégia perseguida durante o procedimento de calibração do modelo hidrológico.

Para o caso do modelo SWAT+, em sua versão “rev59.3”, há uma lista de 183 parâmetros passíveis de calibração, dos quais 33 foram identificados como diretamente relacionados com o balanço hídrico da bacia estudada. Por essa razão, eles foram preliminarmente selecionados para o processo de análise de sensibilidade do modelo. Estes parâmetros estão reunidos em um arquivo (denominado “cal\_parms.cal”), que integra a estrutura

do modelo e que é atualizado para cada versão modificada. Os demais parâmetros relacionam-se aos aspectos da qualidade da água, sedimentos e práticas agrícolas.

### **Metodologia utilizada na calibração do modelo SWAT+**

O procedimento de calibração e validação adotado para o modelo SWAT+, desenvolvido para a bacia do rio Paraíba do Sul ao longo da etapa de sua implantação, está estruturado em quatro passos, conforme ilustra o fluxograma da Figura 6.14. Esses passos foram realizados com o auxílio do software SWAT+CUP<sup>3</sup> (Abbaspour et al., 2015) e de um conjunto de *scripts Python*, desenvolvido para atender às demandas do projeto MoVaSC, quer nesta etapa de calibração, quer no processo de sua automatização e operacionalização.

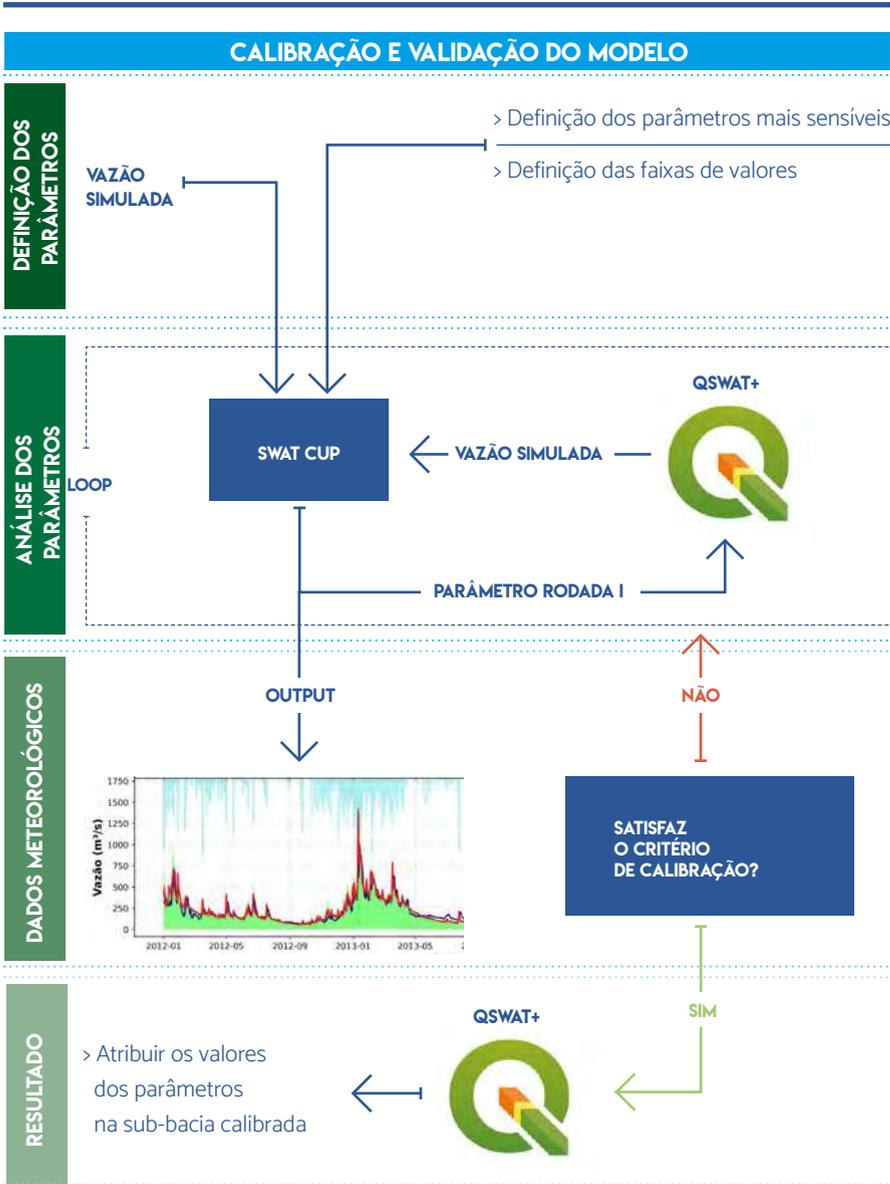
Dentre os dados de entrada do modelo SWAT+, destacam-se os dados meteorológicos, correntemente denominados de forçantes meteorológicos, e constituídos pelas variáveis de precipitação, pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar incidente e refletida.

Conforme será detalhado mais à frente, os forçantes meteorológicos foram considerados de forma hierárquica. O processo de calibração teve início com a rede de dados do INMET que, não obstante dispor de apenas 11 estações para toda a bacia hidrográfica, representa o único conjunto de dados observacionais completos. Ou seja, possui todas as variáveis de entrada demandadas pelo modelo hidrológico concebido.

---

<sup>3</sup> SWAT+CUP, da 2w2eWater - Weather Energy Ecosystem Technology and Data <https://www.2w2e.com/>

Figura 6.14 Fluxograma da metodologia de calibração do modelo SWAT+.



Os demais conjuntos foram adicionados à base de dados. Já o processo de calibração evoluiu de forma hierárquica, das bacias de ordem 1, localizadas mais a montante, para as bacias de ordem superior, a jusante. Efetivamente, dados originados das seguintes estações foram considerados:

1. Estações meteorológicas convencionais do INMET.
2. Estações pluviométricas convencionais da ANA.
3. Estações pluviométricas telemétricas de múltiplas operadoras – NI.

Os dados do CFSR (Saha, et al., 2014), utilizados em etapa específica do Projeto MoVaSC para validar o processo de implantação do modelo SWAT+ na bacia do rio Paraíba do Sul foram descartados por terem mostrado, nas primeiras rodadas de calibração, uma elevada tendência de superestimação dos volumes precipitados sobre a bacia.

Outro nível de hierarquia adotado na estruturação do processo de calibração refere-se aos passos caracterizados na Figura 6.14, realizados de montante para jusante, seguindo-se o curso das águas. Esse encaminhamento privilegia a abordagem de modelagem distribuída, permitindo que os parâmetros variem espacialmente ao longo da bacia hidrográfica.

Aspectos sensíveis e relevantes do ponto de vista do controle do balanço hídrico da bacia também foram considerados. Por exemplo, no caso de reservatórios para os quais se dispõe de séries de vazões naturais consistentes, estas foram utilizadas no processo de calibração do modelo. Nessa abordagem foram considerados os processos naturais da bacia.

A calibração do modelo para cumprir a finalidade de reproduzir as condições reais operativas vigentes na bacia requer um conjunto adicional de dados não completamente disponíveis. Constitui-se boa prática realizar a calibração inicial de forma a refletir as condições naturais para, na sequência, inserir, *pari passu*, os efeitos antrópicos. Uma vez que o modelo se encontra bem ajustado para o estado natural, é possível utilizar o próprio

modelo como ferramenta de auxílio no processo de calibração dos efeitos antrópicos relevantes que se deseja considerar.

Dentre os diversos métodos de calibração disponíveis no SWATPlus-CUP, cabe destacar o método SUFI-2 adotado na escala mensal, bem como o fato de este ser o método mais bem documentado no manual do SWATPlus-CUP (Andrade e Ribeiro, 2020; Louzada e Ribeiro, 2019).

### ***Definição dos parâmetros utilizados no processo de calibração***

Consistente com os desenvolvimentos anteriores, a definição dos parâmetros considerados chave para o processo de calibração – i.e., parâmetros que apresentam maior sensibilidade – deve partir da experiência do modelador, auxiliado por análises de sensibilidade.

Assim, numa primeira filtragem, de um total de 183 parâmetros calibráveis do modelo, numa primeira filtragem, 33 foram inicialmente pré-selecionados e documentados na Tabela 6.2, por estarem diretamente associados ao balanço hídrico da bacia, o que impacta diretamente os processos hidrológicos à ela associados. Dentre os exemplos desses processos destacam-se a interceptação pela vegetação; perdas de outras naturezas associadas, infiltração e geração de escoamento superficial, drenagem pelas camadas de solo e processos de evapotranspiração. Entretanto, conforme discutido na seção subsequente, todos estes parâmetros não necessariamente apresentaram sensibilidade significativa para integrar a função-objetivo associada ao processo de calibração, conforme discutido na seção subsequente. Como se trata de um balanço hídrico, cabe lembrar que os efeitos diretos em um dado processo sempre são acompanhados de desdobramentos em outros, dando origem a fontes de não-linearidades no processo hidrológico. Este é um processo que, certamente, impõe desafios para o exercício de calibração do modelo hidrológico, requerendo parcimônia na definição dos parâmetros que integram a função-objetivo.

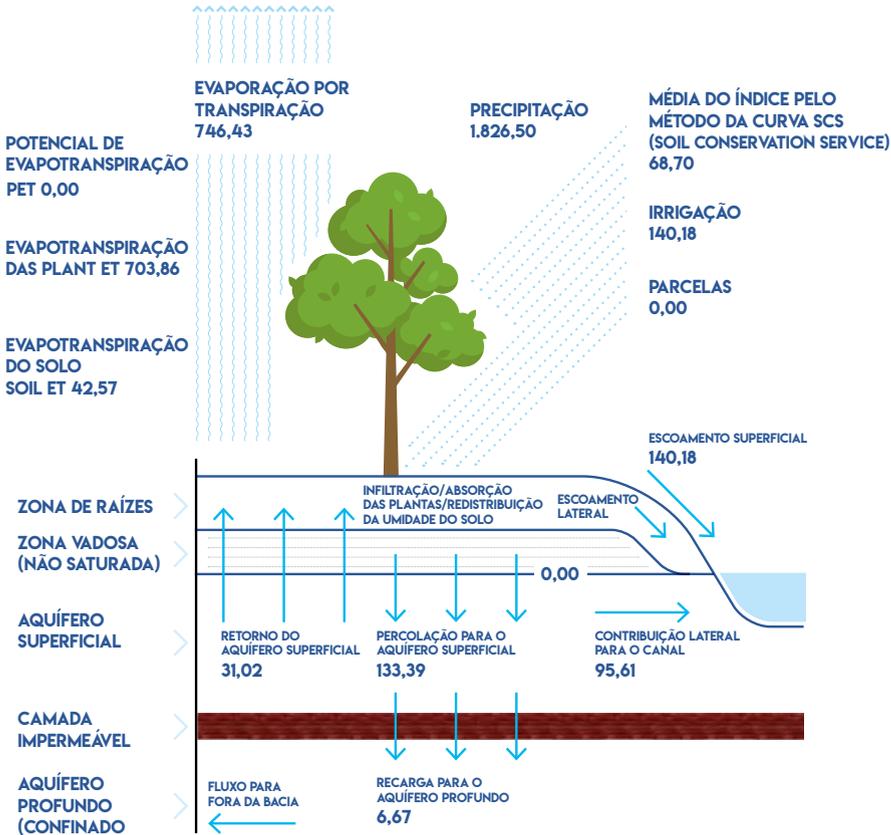
**Tabela 6.2** Parâmetros de calibração relacionados com o balanço hídrico da bacia (Selecionados a partir do arquivo “cal\_parms”).

SWAT Antigo	SWAT+Cup	Influência	Entrada SWAT	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Default
EVLAJ	EVLAJ	BSN	evlai.bsn	0	10	3
EVRCB	EVRCB	BSN	evrch.bsn	0,5	1	0,6
cnFFCB	FFCB	BSN	ffcb.bsn	0	1	0
SURLAG_BSN	SURLAG	BSN	surlag.bsn	0,05	24	15
ALPHA_BF	ALPHA	AQU	alpha.aqu	0	1	0,05
GW_DELAY	DELAY	AQU	delay.aqu	0	120	Modelo
GW_REVAP	REVAP_CO	AQU	revap_co.aqu	0,02	0,2	0,02
GW_SPYLD	SP_YLD	AQU	sp_yld.aqu	0	0,5	0,05
GWQMN	FLO_MIN	AQU	flo_min.aqu	0	10	3
REVAPMN	REVAP_MIN	AQU	revap_min.aqu	0	10	5
CNCOEF	CNCOEF	HRU	cncoef.hru	0,5	2	1
-	PERCO	HRU	perco.hru	0	1	1
CANMX	CANMX	HRU	canmx.hru	0	100	1
CN2	CN2	HRU	cn2.hru	25	98	Modelo
DIS_STREAM	DIS_STREAM	HRU	dis_stream.hru	0	100000	121
EPCO	EPCO	HRU	epco.hru	0	1	1
ESCO	ESCO	HRU	esco.hru	0	1	0,95
HRU_SLP	SLOPE	HRU	slope.hru	0	1	Modelo
LAT_TTIME	LAT_TTIME	HRU	lat_ttime.hru	0	180	0
OVN_RU	OVN	HRU	ovn.hru	0	30	Modelo
SLSOIL	LAT_LEN	HRU	lat_len.hru	0	150	Modelo
SLSUBBSN	SLOPE_LEN	HRU	slope_len.hru	10	150	Modelo
-	CN3_SWF	HRU	cn3_swf.hru	-0,2	1	-
CH_COV1	COV1	RTE	cov1.rte	0	1	Modelo
CH_K(2)	K_CH	RTE	k_ch.rte	-0,01	500	1
CH_N(2)	N	RTE	n.rte	-0,01	0,30	0,05
CH_S(2)	S	RTE	s.rte	-0,001	10	Modelo
SOL_ALB	ALB	SOL	alb.sol	0	0,25	Modelo
SOL_AWC	AWC	SOL	awc.sol	0,01	1	Modelo
SOL_BD	BD	SOL	bd.sol	0,9	2,5	Modelo
SOL_CRK	CRK	SOL	crk.sol	0	1	Modelo
SOL_K	K	SOL	k.sol	0	2000	Modelo
SOL_Z	Z	SOL	z.sol	0	3500	Modelo

Fonte: Projeto MoVaSC.

A título de ilustração, a Figura 6.15 mostra, esquematicamente, as médias anuais do balanço hídrico realizado pelo modelo SWAT+ para a bacia estudada do rio Paraíba do Sul.

Figura 6.15 Representação esquemática do balanço hídrico representado pelo modelo SWAT+.



Fonte: Interface SWAT+Editor.

**Teste dos parâmetros de calibração: análise de sensibilidade**

O teste dos parâmetros de calibração requer uso intensivo de tempo de máquina, impondo ao SWAT+ \_CUP realizar um número grande de simulações, interagindo com o QSWAT+, em busca de um conjunto ótimo de parâmetros, a partir das vazões simuladas e do conjunto de parâmetros mais sensíveis selecionados da Tabela 6.2.

Este passo demandou sucessivos retornos aos passos anteriores, incluindo retornos à etapa de implantação do modelo quando modificações na sua estrutura se mostraram necessárias. Essa situação ocorreu no início do processo de calibração, tendo sido identificadas (i) a necessidade de reconstrução do modelo na região da bacia do rio Pirai e (ii) a exclusão da base de dados de forçantes meteorológicos do modelo CFSR (Saha, et al. 2014).

A análise de sensibilidade dos parâmetros foi determinada calculando-se o sistema de regressão múltipla representado na equação (6.1), que faz a regressão dos parâmetros gerados pelo método *Latin hypercube*, em relação aos valores da função-objetivo adotada (Abbaspour, 2015).

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (6.1)$$

As sensibilidades fornecidas pelo parâmetro  $g$  denotam estimativas das variações médias na função-objetivo, resultantes de mudanças em cada parâmetro, enquanto todos os outros parâmetros também variam. Na sequência, um teste de hipótese “ $t$ ” foi utilizado para identificar a significância relativa de cada parâmetro  $b_i$ . Assim, tem-se as sensibilidades relativas com base em aproximações lineares, o que representa apenas informações parciais sobre a sensibilidade da função objetivo aos parâmetros do modelo.

Uma análise de regressão múltipla é usada para se obter as estatísticas de sensibilidade do parâmetro. O indicador *t-stat* é o coeficiente de um parâmetro dividido pelo seu desvio padrão. Representa uma medida da confiabilidade com a qual o coeficiente de regressão é medido. Se um coeficiente é “grande”, comparado com seu erro padrão, então, provavelmente, ele é diferente de zero

e o parâmetro é sensível, ou seja, tem influência na função-objetivo. É possível comparar o *t-stat* de um parâmetro com os valores na tabela de distribuição *t de Student* para determinar o valor *p-value*. A distribuição *t de Student* descreve como a média de uma amostra com um certo número de observações deve se comportar. Já o valor *p* (*p-value*), para cada termo, testa a hipótese nula de que o coeficiente é igual a zero, ou seja, sem efeito sobre a função-objetivo.

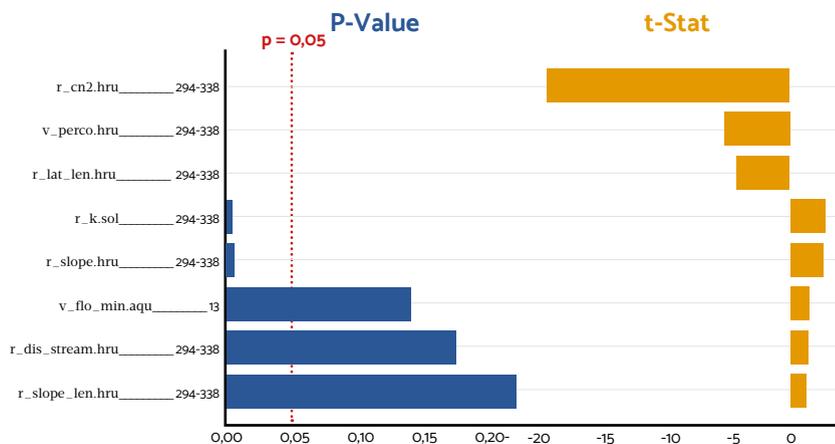
Um valor *p-value* baixo ( $< 0,05$ ) indica a possibilidade de rejeição da hipótese nula. Em outras palavras, um preditor com um valor *p-value* baixo pode significar uma adição significativa ao modelo já que as mudanças no seu valor estão relacionadas às mudanças na variável de resposta do modelo.

Por outro lado, um valor de *p-value* maior ( $> 0,05$ ) sugere que as mudanças no preditor não estão associadas às mudanças na resposta. Portanto, esse parâmetro não é muito sensível. Um valor  $p < 0,05$  é geralmente aceito para rejeitar a hipótese nula (ou seja, o coeficiente desse parâmetro é diferente de 0).

Com *p-value* igual a 0,05, há apenas 5% de chance de o resultado apresentado ter sido gerado a partir de uma distribuição aleatória. O que permite dizer, com 95% de probabilidade de acerto, que a variável está tendo efeito sobre a função-objetivo.

Em síntese, nessa análise, quanto maior, em valor absoluto, o valor do *t-stat*, e quanto menor o valor *p-value*, mais sensível é o parâmetro. A Figura 6.16 apresenta, a título de exemplo, um gráfico com os valores *p-value* e *t-stat* associados aos parâmetros que se mostraram mais sensíveis em uma das etapas do processo de análise de sensibilidade da bacia do rio Pirai.

Os cinco primeiros parâmetros obtiveram *p-value*  $< 0.05$ , indicando que eles são parâmetros sensíveis. Analisando o valor de *t-stat* observa-se que, de maneira geral, esses parâmetros apresentam maior intensidade para subestimar os valores observados. Esse é o caso dos três primeiros parâmetros; já os demais, apresentam tendência para superestimar, entretanto, com mais baixa intensidade.

Figura 6.16 Parâmetros *p-value* e *t-stat* da análise de sensibilidade.

Fonte: Produzido a partir do *scrypt-Python* desenvolvido.

Visando assegurar convergência na seleção dos parâmetros utilizados como referência para iniciar todos os processos de calibração, esta análise de sensibilidade foi realizada para cada canal calibrado. Assim, definido o conjunto de parâmetros de partida e suas respectivas faixas de variação, análises de sensibilidade e exercícios de calibração foram realizados, como parte integrante da avaliação de desempenho do modelo hidrológico.

### **Análise dos resultados de calibração do modelo**

A análise de sensibilidade descrita na seção anterior é realizada concomitantemente ao processo de calibração do modelo hidrológico. Esse processo é repetido até que as métricas (indicadores da qualidade da eficiência do modelo) atinjam faixas consideradas apropriadas para as finalidades da aplicação hidrológica pretendida.

Conforme mostrado no esquemático da Figura 6.14, acima, o processo só avança para o passo seguinte caso os critérios de avaliação da eficiência do modelo sinalizem positivamente nessa direção. Caso contrário, o processo deve retornar ao passo anterior ou, em casos mais extremos, retroceder às etapas iniciais de

parametrização e a uma nova fase de implementação do modelo. O retorno à etapa de estruturação e implantação do modelo é tanto mais raro quanto mais consolidado o modelo vai se configurando. Para o caso da bacia do rio Paraíba do Sul já bastante antropizada, embora penoso, esses refinamentos do processo de calibração produziram benefícios significativos para a qualidade final do modelo hidrológico.

No curso da modelagem hidrológica, o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE – Nash e Sutcliffe, 1970), definido pela Equação (6.2), foi utilizado.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_{i=1}^m (Q_{m,i} - Q_s)^2} \quad (6.2)$$

Nesta expressão,  $Q_m$  denota a vazão observada (medida);  $Q_s$  a vazão simulada (modelada) pelo modelo hidrológico ajustado, considerando um determinado conjunto de parâmetros; enquanto  $m$  denota o período de análise. Assim, a eficiência de Nash é expressa pela diferença entre o valor unitário e a razão entre a variância do erro da série simulada e a variância da série de dados observados.

Desta forma, para um modelo perfeito (i.e., com uma variância do erro igual ao valor zero), o Nash resultante seria  $NS = 1$ . Por outro lado, se um modelo produz estimativas com variância do erro igual a variância da série observada, tem-se que  $NS = 0$ . O que indica que o modelo possui capacidade preditiva similar à média da série observada.

No caso de o modelo produzir uma série simulada como uma variância do erro estimado significativamente maior que a variância das observações, a eficiência do modelo se torna menor do que zero ( $NS < 0$ ). Nesses casos, a média da série observada se torna melhor preditor do que o próprio modelo.

A interpretação adotada para o indicador de eficiência Nash-Sutcliffe é aquela em concordância com o critério descrito em Yen et al. (2014) e resumido na Tabela 6.3.

**Tabela 6.3** Interpretação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe.

Avaliação	Nash-Sutcliffe (função-objetivo)	Interpretação
Muito bom	$0,75 < NS \leq 1,00$	Modelo capaz de produzir previsões de boa qualidade
Bom	$0,65 < NS \leq 0,75$	Modelo capaz de produzir boas previsões
Satisfatório	$0,50 < NS \leq 0,65$	Modelo capaz de produzir previsões úteis
Não-satisfatório	$NS \leq 0,50$	Modelo é pior que a média dos dados observados

Obs: A abreviação NS será utilizada ao longo deste texto para referir ao indicador Nash-Sutcliffe (Nash e Sutcliffe, 1970).

Além do indicador de eficiência Nash-Sutcliffe, outras métricas podem agregar aspectos úteis ao processo de avaliação de desempenho do modelo. O indicador *PBIAS* (*percent bias*) mede a tendência média das estimativas do modelo em relação aos dados simulados. Ou seja, permite identificar se o modelo apresenta tendência a superestimar ou subestimar os dados observados, expresso pela equação (6.3):

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)_i}{\sum_{i=1}^n Q_{m,i}} \quad (6.3)$$

Nesta expressão,  $Q_m$  é a vazão observada (medida pela estação);  $Q_s$ , a vazão simulada (modelada) pelo modelo ajustado com um determinado conjunto de parâmetros e,  $m$ , o período de análise.

Os valores percentuais de tendenciosidade (*PBIAS*) medem a tendência média de os dados simulados serem superiores ou inferiores aos dados observados. O valor ótimo para esse indicador é zero e, portanto, quanto menor a magnitude, mais próximo do ideal se comporta o modelo. Valores positivos de *PBIAS* indicam que o modelo subestima, enquanto valores negativos advertem que o modelo superestima os valores observados (Abbaspour, 2015).

A não linearidade dos processos modelados requer que o clássico Coeficiente de Determinação  $R^2$  (calculado pela equação 6.4 e que expressa a variância dos dados explicada pelo modelo linear) seja avaliado.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^m (Q_{m,i} - Q_m) (Q_{s,i} - Q_s)]^2}{\sum_{i=1}^m (Q_{m,i} - Q_m)^2 \sum_{i=1}^s (Q_{s,i} - Q_s)^2} \quad (6.4)$$

$Q_m$  é a vazão observada;  $Q_s$ , a vazão simulada (modelada) pelo modelo ajustado com um determinado conjunto de parâmetros, enquanto  $m$  denota o período de análise. Tipicamente, o Coeficiente de Determinação varia entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo da unidade, mais representativo será o modelo.

A quantificação do envelope de incertezas associadas a um conjunto de simulações no SWAT+CUP é avaliada por dois indicadores estatísticos: (i) pelo *p-factor*, que indica a percentagem dos dados observados englobados pelo envelope de 95% das incertezas preditas (95 PPU – *Percentage Prediction of Uncertainties*), calculado com base em  $n$  simulações realizadas e (ii) pelo *r-factor*, que denota a espessura do envelope 95 PPU (95 *Percent Prediction Uncertainty*). Recomenda-se utilizar um valor de *p-factor* > 0,7 e *r-factor* próximo de 1.

### **Intercâmbio de informações entre softwares**

Cruciais para o sucesso do esforço de calibração, esta seção descreve, de forma sucinta, os softwares QSWAT+, SWAT+, SWAT+Editor e SWAT+CUP utilizados:

- QSWAT+: interface do software QGIS, desenvolvida especificamente para a fase de implantação do modelo hidrológico SWAT+. O símbolo “+” caracteriza uma atualização da versão SWAT2012;
- SWAT+ (rev59.3): modelo hidrológico propriamente dito, associado à interface do QSWAT+. Ou seja, é o modelo operacional desenvolvido como alternativa para a concessionária Light Energia S.A. realizar a sua gestão da bacia hidrográfica;
- SWAT+Editor: interface que entra em cena após o modelo ter sido implantado (configurado) na interface QSWAT+. Essa interface auxilia na etapa de assimilação dos forçantes meteorológicos e ajustes de parâmetros, bem como nos processos manuais de calibração, mas que não levam em conta análises de incertezas;

- SWATPlus\_CUP: software proprietário, desenvolvido para calibrar o modelo SWAT+ utilizando técnicas de análise de sensibilidade e análises de incertezas, cuja licença de uso foi adquirida para cumprir essa finalidade;

### ***O processo de calibração***

A metodologia sintetizada na Figura 6.14 foi operacionalizada seguindo um roteiro ajustado ao longo de sua execução. O modelo foi calibrado seguindo o percurso das águas, de montante para jusante, enquanto alguns ciclos de calibração ocorreram em paralelo. Dada a percepção da necessidade de uma demanda grande de simulações para se atingir a calibração de cada estação, optou-se pela realização de um teste piloto, que faz uso de um artifício matemático para isolar a bacia do rio Pirai, assim permitindo realizar a calibração de forma independente e sequencial, assegurando-se celeridade ao processo.

A ordem final que foi seguida para a execução dos ciclos de calibração está detalhada na Tabela 6.4, para as regiões de Funil, Pirai, Preto-Paraibuna e sub-bacias incrementais do exutório. Para cada uma destas regiões, foi construído um modelo que inclui os elementos e parâmetros do código completo, gerando-se um modelo recortado para as regiões de Funil, Pirai e Preto-Paraibuna. Considerando que a região da bacia incremental não é independente das demais, esta foi acoplada e calibrada juntamente com o modelo completo, não se beneficiando dos ganhos de tempo global de computação.

A Tabela 6.4 caracteriza, também, as estações fluviométricas e suas respectivas classificações segundo os seguintes tipos: convencionais, telemétricas e séries de vazão natural. Como os canais dos projetos recortados recebem numerações distintas, faz-se necessário mapear esses canais sempre que se realiza o retorno dos parâmetros calibrados associados ao projeto completo. Cada uma dessas etapas de calibração é então configurada no SWAT+CUP.

**Tabela 6.4** Ordem das estações fluviométricas calibradas e respectivos trechos de canal.

Estação	Tipo	Região de Drenagem	Ordem	Rio	Canal SWAT Completo	Canal SWAT Recorte
58030000	Convencional	FUNIL	1	Paraíba do Sul	195	38
58060000	Convencional	FUNIL	1	Paraíba do Sul	202	45
Reserv. Santa Branca (19091)	Vazão natural	FUNIL	2	Paraíba do Sul	213	56
58105300	Convencional (*1)	FUNIL	3	Paraíba do Sul	212	55
58183000	Convencional (telemétrica)	FUNIL	4	Paraíba do Sul	185	28
58204000	Convencional (*1)	FUNIL	5	Paraíba do Sul	171	17
58218000	Convencional (telemétrica)	FUNIL	6	Paraíba do Sul	169	15
58235100	Convencional (telemétrica)	FUNIL	7	Paraíba do Sul	165	11
Reserv Funil (19093)	Vazão natural	FUNIL	8	Paraíba do Sul	164	10
58335000	Telemetria	PIRAÍ	1	Pirai	162	24
58338500	Telemetria	PIRAÍ	1	Rio do Braço	157	30
Reserv Tocós (19098)	Vazão natural	PIRAÍ	2	Pirai	157	20
58345000	Telemétrica (*1)	PIRAÍ	2	Pirai	156	20
58350001	Convencional (telemétrica) (*1)	PIRAÍ	3	Pirai	243	12
Reserv. Vigário (19101)	Vazão natural	PIRAÍ	4	Pirai	249	44
58352000	Convencional (telemétrica)	PIRAÍ	4	Pirai	239	8
Reserv Santana (19110)	Vazão natural	PIRAÍ	5	Pirai	239	3
58585000	Convencional (telemétrica)	PRETO PARAIBUNA	1	Rio Preto	124	16
58700000	Vazão natural (*2)	PRETO PARAIBUNA	1	Paraibuna (MG)	80	4
Reserv Sobragi (19096)	Vazão natural	PRETO PARAIBUNA	1	Paraibuna (MG)	113	11
58242000	Convencional (*1)	EXUTÓRIO	9	Paraíba do Sul	163	9
58585000	Convencional (*1)	EXUTÓRIO	10	Paraíba do Sul	162	8
58305001	Convencional (telemétrica) (*1)	EXUTÓRIO	11	Paraíba do Sul	157	3
58315100	Convencional (telemétrica) (*1)	EXUTÓRIO	12	Paraíba do Sul	156	2
58630002	Convencional	EXUTÓRIO	13	Paraíba do Sul	105	-
58874000	Convencional (telemétrica) (*1)	EXUTÓRIO	14	Rio Grande	72	-
58880001	Convencional (telemétrica)	EXUTÓRIO	15	Paraíba do Sul	47	-
58960000	Convencional (telemétrica)	EXUTÓRIO	16	Muriaé	70	-
58974000	Convencional (telemétrica)	EXUTÓRIO	17	Paraíba do Sul	43	-

Fonte: Projeto MoVaSC.

Na sequência dos ciclos de calibração, os canais são acrescentados na ordem indicada na tabela até que os indicadores de qualidade de ajuste ou atinjam valores previamente definidos ou as iterações revelem convergência da sua capacidade de melhoria do modelo.

Seguindo-se essa abordagem, o modelo SWAT+ construído para a bacia do Paraíba do Sul adquiriu uma característica de modelo físico semidestruído, cujos parâmetros de calibração variam espacialmente para cada conjunto das sub-bacias que contribuem para um ponto de calibração (estação fluviométrica).

### ***Cenários de modelagem***

Com o propósito de sistematizar as diferentes possibilidades de se assimilar os dados meteorológicos forçantes do modelo, cenários de modelagem foram organizados. Estes levam em consideração, de um lado, a distribuição geográfica das diferentes bases de dados disponíveis e, de outro, a forma como o modelo assimila a base de dados.

A base de dados dos forçantes meteorológicos para o projeto está composta por dados de estações meteorológicas convencionais e telemétricas e, também, por dados gerados por modelos numéricos da atmosfera, com diferentes densidades e distribuições espaciais. Integram essa base de dados informações geradas pelas estações de medição e monitoramento.

A Figura 6.17 ilustra como o modelo SWAT+ escolhe a chuva incidente de cada bacia. Os símbolos quadrados na cor verde representam os centroides das sub-bacias; os losangos em azul, a localização das estações pluviométricas selecionadas (cenário N1-00); os círculos em roxo mostram os locais em que a estação está localizada em relação ao centro de massa da bacia que, em princípio, deveria gerar bons resultados, a despeito de o centroide identificado pelo círculo vermelho caracterizar uma situação em que o modelo assimila a chuva da estação associada ao exutório de uma sub-bacia associada à área de contribuição. Destaca-se, aqui, que do ponto de vista hidrológico, essa escolha não se mostrou adequada para a obtenção das médias de chuva sobre a bacia.

Figura 6.17 Critério de escolha da chuva do modelo SWAT+.



Fonte: Projeto MoVaSC.

Com base nessas premissas iniciais, e a partir da combinação das bases de dados que foram sendo acrescentadas e associadas a ajustes finos em parâmetros globais do modelo, foram definidos cinco cenários de modelagem, caracterizados a seguir, com seus respectivos forçantes meteorológicos definidos na Tabela 6.5:

- **Cenário 1:** constituído a partir do modelo *default* e dos dados forçantes da rede meteorológica do INMET. Essa base foi considerada por representar um conjunto de dados meteorológicos observados, que contém, simultaneamente, todas as variáveis demandadas pelo modelo. Essas bases são consistentes e de longo período. Conforme constatado, esta distribuição espacial não é favorável.

- **Cenário 2:** constituído a partir do Cenário 1, incorporando as estações pluviométricas da ANA. Considerando que, especialmente, a precipitação é o forçante mais heterogêneo, estas estações foram incorporadas com o propósito de melhorar a densidade de dados de precipitação.
- **Cenário 3:** constituído a partir do modelo *default* e dos dados forçantes da rede meteorológica do INMET, acrescidas das estações convencionais e telemétricas que apresentaram, no mínimo, mais de 50% de dados ao longo do período de 1998 a 2019. Este conjunto de dados foi denominado de N1, tendo a conotação de um primeiro nível de processamento referente à qualidade dos dados.

Juntamente com essa base de dados, ajustes em parâmetros foram implementados na configuração global do modelo. Assim, para fins de organização, a base de dados N1 associada à estrutura *default* do modelo foi denominada N1-00. Na modificação denominada de N1-01, procederam-se ajustes nas estações de precipitação dentro das sub-bacias fazendo o que, no jargão da área, é denominado de promediação espacial, porém mantendo as respectivas posições geográficas originais. Na modificação N1-02, ajustes foram realizados nos coeficientes de *runoff* do modelo *Curve Number*<sup>4</sup> do *Soil Conservation Service* (SCS, Mishra e Singh, 2003), utilizados para separar o escoamento superficial da infiltração. Na sequência, a modificação N1-03 permitiu a ativação do processo de evaporação das plantas.

- **Cenário 4:** construído a partir da base N1-00 e contemplando as precipitações promediadas por sub-bacias pelo método IDW (Chen et al., 2012), dando origem à base N1-04. Na medida em que o modelo assimila apenas a estação mais próxima do centroide da sub-bacia, este cenário foi concebido a partir da constatação de que não é suficiente apenas intensificar a densidade

---

4 O método da Curva Número (*Curve Number*) é classicamente utilizado por diversos modelos hidrológicos, inclusive o SWAT+ para separação de escoamento em *runoff* e infiltração no solo (Arnold et al., 2012).

de estações, o que poderia resultar em não se considerar uma estação de melhor qualidade.

- **Cenário 5:** constituído a partir da base N1-03 contemplando as precipitações promediadas conforme a base N1-04, ou seja, promediadas pelo método IDW.

**Tabela 6.5** Cenários de modelagem.

Cenário	Modelo	Forçantes meteorológicos
1	Default	INMET: estações meteorológicas convencionais do INMET
2	Default	INMET-ANA: estações meteorológicas convencionais do INMET, acrescido das estações pluviométricas da ANA
3	Default	N1-00: base de dados constituída pelas estações meteorológicas do INMET, convencionais da ANA e telemétricas de diversos operadores
	Default	N1-01: base de dados N1-00 com dados de precipitação pro mediados sem modificar a posição geográfica
	default+ajustes nos CNS (arquivo landuse.lum)	N1-02: base de dados N1-01
	default+ajustes nos CNS + ajustes na evaporação das plantas (arquivo: plant.ini)	N1-03: base de dados N1-02
4	Default	N1-04: precipitações da base N1-00 pro mediadas para cada sub-bacia com o método IDW
5	default+ajustes nos CNS + ajustes na evaporação das plantas	N1-05: precipitações da base N1-03 pro mediadas para cada sub-bacia com o método IDW

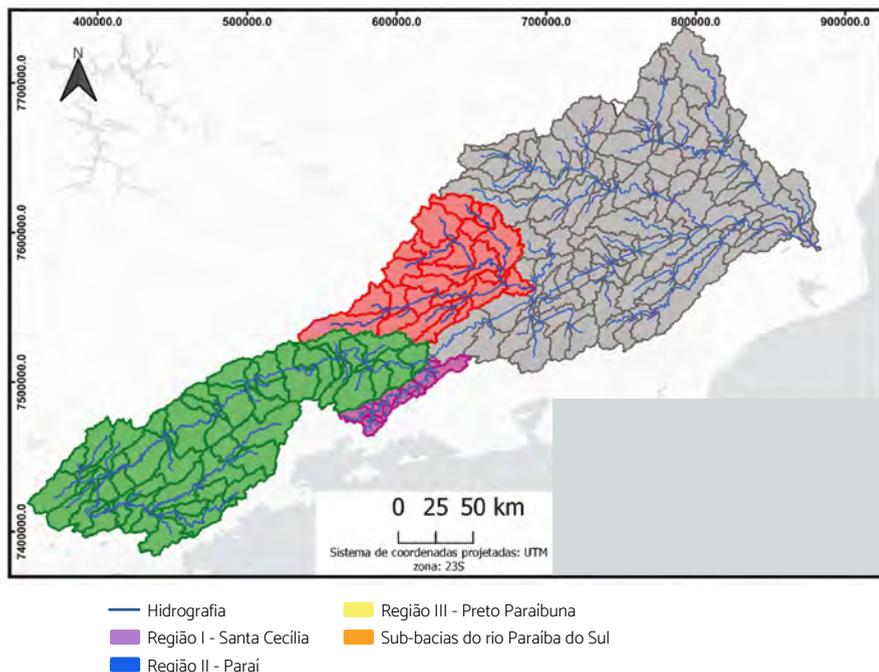
Fonte: Projeto MoVaSC.

### ***Desacoplamento de sub-bacias***

Visando otimizar o tempo de processamento computacional e aumentar a produtividade na etapa de calibração, a bacia do rio Paraíba do Sul foi segmentada em quatro regiões estratégicas: Funil, Pirai, Preto-Paraibuna e a região incremental até o exutório

principal da bacia, conforme ilustrado na Figura 6.18. Seguindo-se esta estratégia alternativa foi possível calibrar a bacia de forma isolada, aumentando-se a sensibilidade e o poder de decisão no momento de se definir os parâmetros de calibração do modelo.

Figura 6.18 Regiões que foram isoladas para otimizar o processo de calibração.



Fonte: Projeto MoVaSC.

A estratégia de calibração segmentada em porções isoladas mostrou-se adequada. Juntamente com a estratégia de hierarquizar os ciclos de calibração de acordo com a ordem das sub-bacias, sempre de montante para jusante, a abordagem adotada mostrou-se exitosa em termos de ganho de tempo de simulação, permitindo um aumento significativo do número de análises de diferentes conjuntos de parâmetros, cenários e iterações das faixas de incerteza, assim assegurando a qualidade dos resultados.

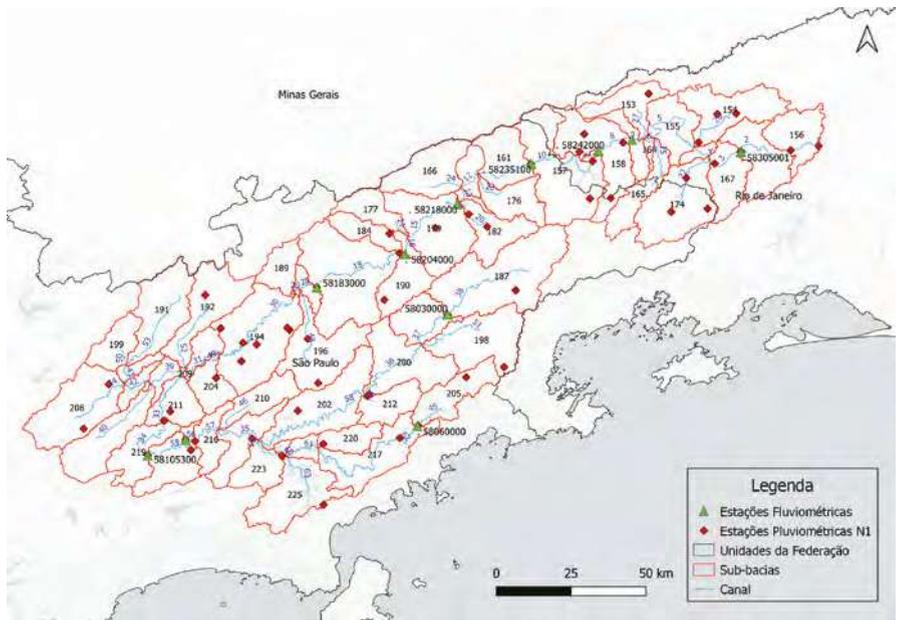
## Resultados dos ciclos de calibração

Testes conclusivos realizados durante este estágio de pré-calibração do modelo confirmam que o Cenário 5, associado à base de dados N1-05, resultou no melhor modelo, tendo sido, portanto, utilizado no processo de calibração igualmente adotado para as regiões de Funil, bacia do rio Piraí e bacias do Preto-Paraibuna. Na sequência, para estas três regiões, os resultados são apresentados na forma de mapas (Figuras 6.19, 6.21 e 6.23), que mostram as respectivas grades dos modelos desacoplados e os gráficos que comparam os hidrogramas observados e modelados de vazão (Figuras 6.20, 6.22 e 6.24).

Em cada uma destas figuras, os gráficos superiores denotam modelo sem calibração. Caracterizam a comparação entre o valor da vazão observada na estação fluviométrica (que corresponde ao exutório da região drenada) e a vazão simulada pelo modelo. Os gráficos inferiores denotam o modelo calibrado, mostrando, além da precipitação, a comparação entre a vazão observada e a vazão simulada pelo modelo calibrado. Conseguiu-se, assim, verificar a capacidade de desempenho do modelo calibrado, fundamentado nas estatísticas, cujos resultados também confirmam a qualidade do modelo, antes de sua calibração.

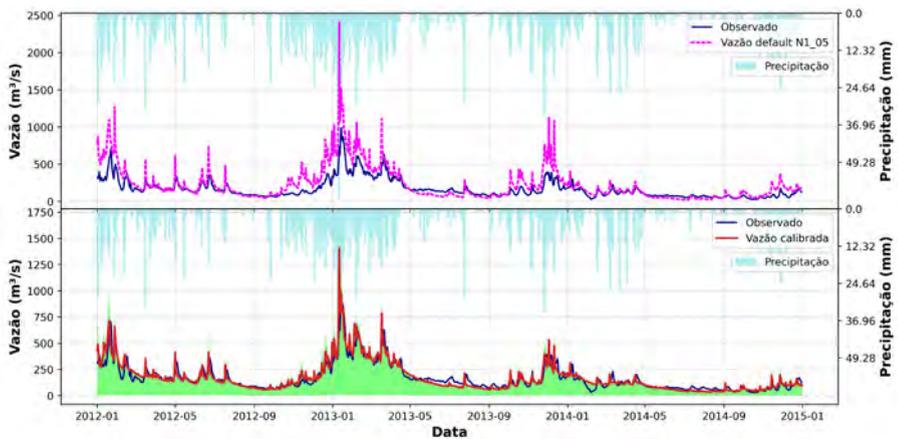
Conforme evidenciado, os resultados do modelo calibrado não apenas reproduzem os resultados observados (fornecidos pelas estações fluviométricas utilizadas) como, também, espelham as tendências impostas pelas condições atmosféricas que alimentam o modelo. Evidenciou-se, dessa maneira, a importância de se obter um modelo *default* bem estruturado, não obstante a necessidade de se proceder o exercício de calibração e o refinamento do código computacional.

Figura 6.19 Projeto desacoplado para a região do reservatório de Funil.



Fonte: Projeto MoVaSC.

Figura 6.20 Calibração da região que contribui para a região do reservatório de Funil.



Quadro superior: Cenário 5 – base N1\_05 sem calibração – NS = -0,30

Quadro inferior: Cenário 5 – base N1\_05 com calibração – NS = 0,84 (p-factor = 0,67; r-factor= 1,45)

Figura 6.21 Projeto desacoplado para a região da bacia do rio Pirai.

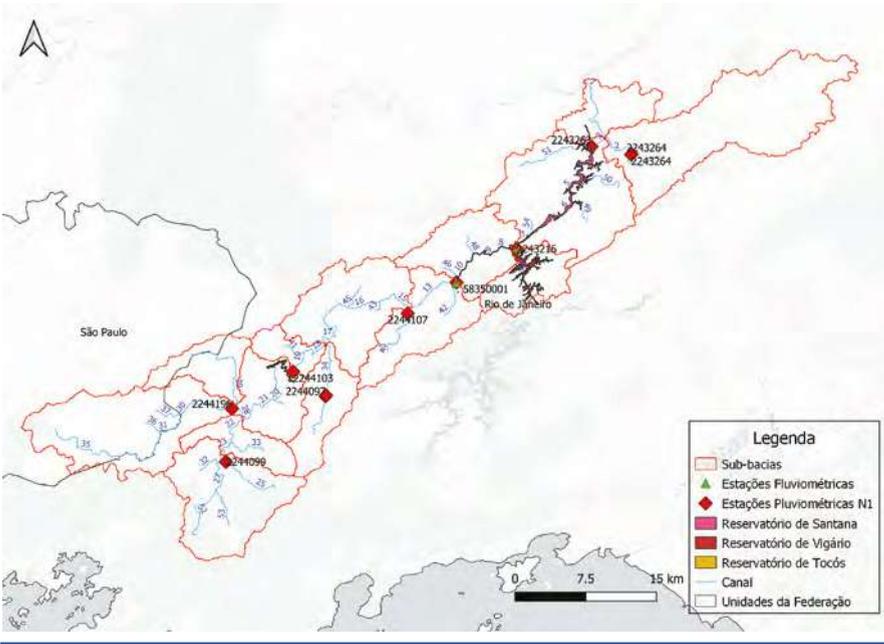
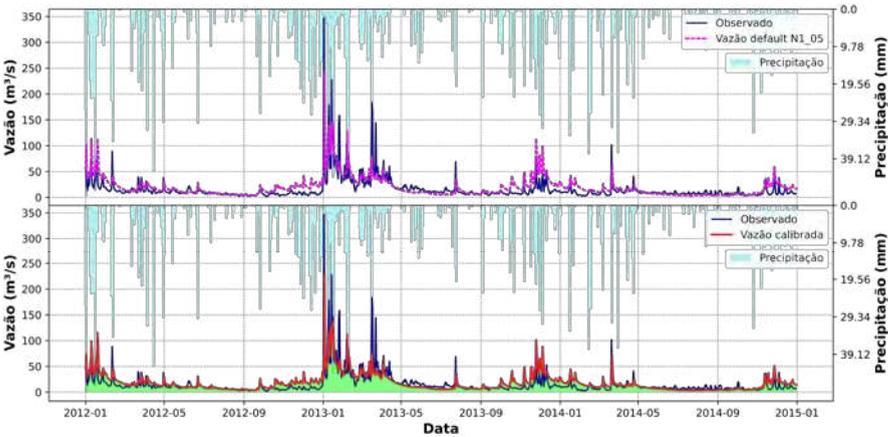


Figura 6.22 Calibração da região que contribui para a região do reservatório de Santana.



Quadro superior: Cenário 5 - base N1\_05 sem calibração - NS = 0,38

Quadro inferior: Cenário 5 - base N1\_05 com calibração - NS = 0,44 (p-factor = 0,70; r-factor= 0,82)

Figura 6.23 Projeto desacoplado para a região das bacias dos rios Preto-Paraíba.

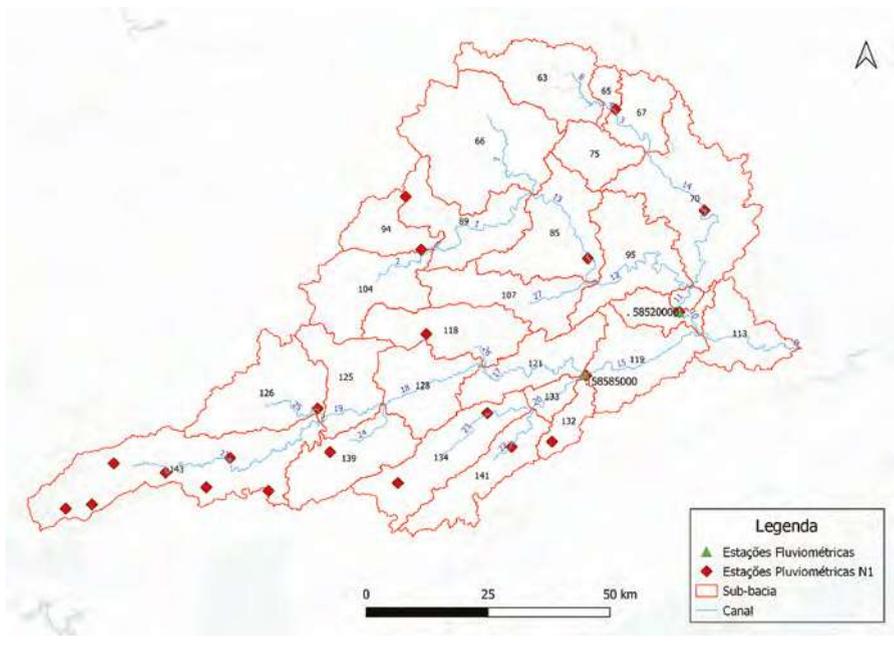
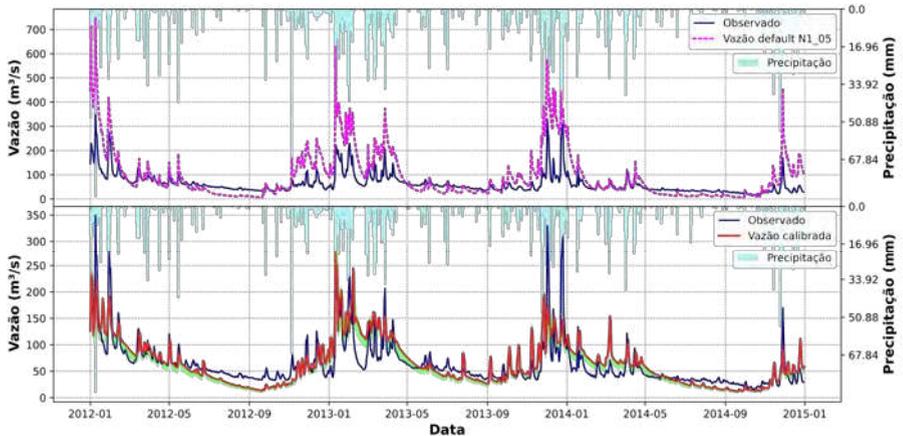


Figura 6.24 Calibração da região drenada pelos rios Preto e Paraíba.



Fonte: Elaborado pela equipe do projeto MoVaSC.

Gráfico superior: Cenário 5 (N1_05) sem calibração – NS = -2,53
Gráfico inferior: Cenário 5 (N1_05) com calibração – NS = 0,81 (p-factor = 0,51; r-factor = 0,32)

A calibração da região incremental às três regiões anteriores e do exutório geral da bacia do Paraíba do Sul é realizada considerando-se o modelo completo (grade mostrada no início do capítulo, na Figura 6.7). Dessa forma, os resultados obtidos para cada uma das três regiões e da região incremental da bacia são considerados durante o exercício de calibração do modelo completo. Os resultados obtidos para este exercício são apresentados na Figura 6.25.

**Figura 6.25** Calibração da região que drena para o exutório da bacia do Paraíba do Sul.

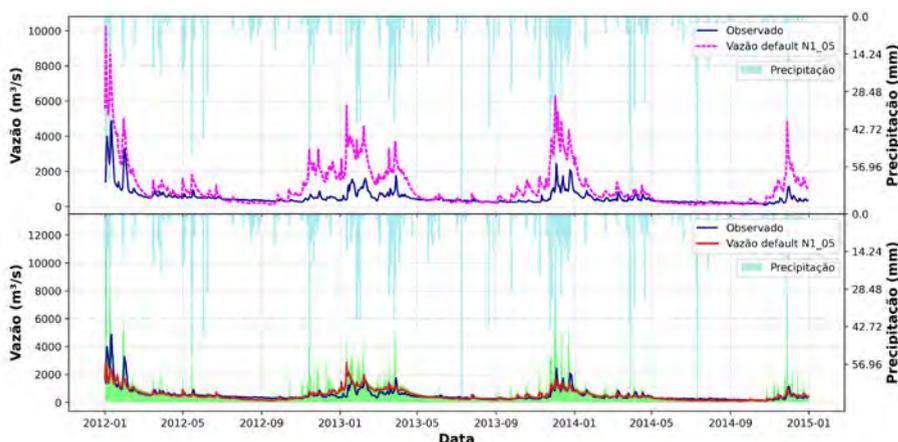
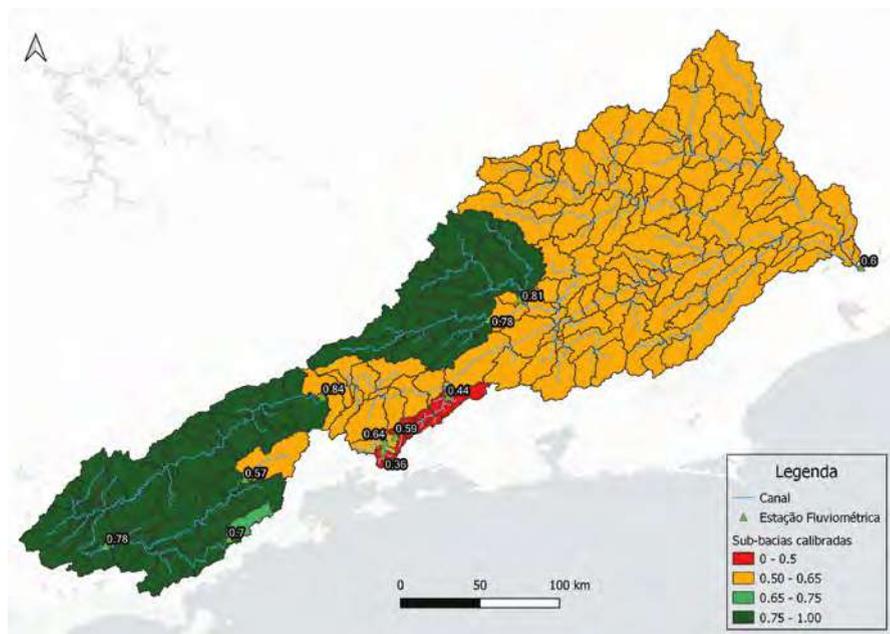


Gráfico superior: Cenário 5 (N1\_05) sem calibração - NS = -4,56

Gráfico inferior: Cenário 5 (N1\_05) com calibração - NS = 0,60 (p-factor = 0,75; r-factor = 1,92)

Para a região da bacia incremental, estes resultados representam a integração do exercício de calibração como um todo. A Figura 6.26 sintetiza os resultados obtidos para o procedimento de calibração, ilustrado pela distribuição espacial da eficiência de Nash do modelo SWAT+ calibrado. De montante para jusante, é possível verificar que, para a região que drena para o reservatório de Funil, NS = 0,84. Para o reservatório de Santana, NS = 0,44; para a região dos rios Preto-Paraibuna, NS = 0,81 e, para região incremental (que coincide com toda a bacia do rio Paraíba do Sul, NS = 0,60.

**Figura 6.26** Distribuição espacial da eficiência Nash do modelo SWAT+. Resultados aplicados à bacia do rio Paraíba do Sul.



Fonte: Projeto MoVaSC.

### Validação do modelo hidrológico e integração com o WRF

Concluída a imprescindível etapa de calibração do modelo hidrológico antes de sua efetiva aplicação para gerar as previsões de vazão para o qual foi concebido, o código computacional foi submetido a um processo de validação, que consiste na sua sistemática aplicação a situações específicas para as quais foi estruturado. Este procedimento significa submeter o modelo a diferentes eventos forçantes do ciclo hidrológico representativo da bacia hidrográfica foco do estudo, assim permitindo avaliar habilidades e capacidades adquiridas pelo modelo no curso do processo de sua calibração.

Mais especificamente, a verificação ou validação de desempenho (*performance validation*) do modelo adaptado significa avaliar a sua capacidade de reproduzir as séries de dados observados (dados

independentes gerados pelas estações de medição e monitoramento). Um método classicamente utilizado é o *split-sample method* (Klemes, 1986), que consiste em dividir a série de dados observados ao longo de dois intervalos de tempo de teste, um de calibração e outro de validação do modelo. Importante aqui lembrar que durante a fase preliminar de construção do modelo hidrológico e de parametrização do modelo meteorológico WRF para seu acoplamento *offline* (Capítulo 3), forçantes de estações meteorológicas já foram utilizados antes dos exercícios de calibração, assim já assegurando um certo grau de confiabilidade aos resultados preliminares pelo modelo em construção.

No que concerne ao processo definitivo de validação, obviamente, este requer um procedimento mais rigoroso. Além de utilizar um intervalo de tempo diferente e mais amplo, o modelo foi forçado com diferentes bases de dados oriundas da modelagem meteorológica independente, previamente realizada pelo código numérico WRF de previsão do tempo (*Weather forecast*), tal qual preconizado pelo método *split-sample*.

Concretizando o objetivo maior do projeto de P&D Light/Aneel MoVaSC, o modelo hidrológico construído com base na já consolidada ferramenta computacional SWAT+ (*Soil and Water Assessment Tool*) foi robustamente validado e integrado ao modelo atmosférico para previsão de precipitação, construído com base na também já consolidada ferramenta WRF (*Weather Research and Forecasting*). O acoplamento dos modelos SWAT+ e WRF seguiu os procedimentos operacionais a seguir discutidos, em absoluta observância ao rigor metodológico controlado por meio de descritores estatísticos consagrados.

### **Integração da modelagem hidrológica (SWAT+) com a modelagem atmosférica (WRF)**

O desempenho operacional do modelo SWAT+, concebido para realizar previsões de vazão na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, alimentado por dados atmosféricos (forçantes meteorológicos)

gerados pelo modelo WRF, foi avaliado com base em 10 eventos distribuídos nos anos de 2016, 2017, 2018 e 2019, caracterizados na Tabela 6.6.

**Tabela 6.6.** Períodos dos eventos utilizados pelo modelo WRF

Evento	Período do evento	Ano
1	16/02/2016 a 22/02/2016	2016
2	28/02/2016 a 03/04/2016	
3	13/10/2016 a 17/10/2016	
4	02/03/2017 a 09/03/2017	2017
5	16/11/2017 a 24/11/2017	
6	02/03/2018 a 06/03/2018	2018
7	19/03/2018 a 24/03/2018	
8	26/02/2019 a 04/03/2019	2019
9	06/04/2019 a 11/04/2019	
10	14/04/2019 a 18/04/2019	

Fonte: Projeto MoVaSC.

Personalizando os dados para a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, esses eventos foram avaliados em pontos de controle da referida bacia, com base em dados de vazão independentemente fornecidos pelas estações fluviométricas, cujos canais modelados estão listados na Tabela 6.7.

**Tabela 6.7.** Estações fluviométricas e respectivos canais de modelagem.

Estação fluviométrica	Código	Canal de modelagem
Estrada do Cunha	58030000	cha195
Ponte Alta 1	58060000	cha202
Reservatório Santa Branca	19091 <sup>(1)</sup>	cha213
Reservatório de Funil	19093 <sup>(1)</sup>	cha164
UHE Nilo Peçanha Lídice	58335000	cha243
UHE Nilo Peçanha Rio do Braço	58338500	cha249
Reservatório de Tocós	19098 <sup>(1)</sup>	cha239
Reservatório de Santana	19110 <sup>(1)</sup>	cha222
Manoel Duarte	58585000	cha124
Reservatório de Sobragi	19096 <sup>(1)</sup>	cha113

Obs: (1) – Séries de vazões naturais.

## Resultados da validação do modelo

Tendo em vista que os eventos de previsão são, usualmente, realizados para um máximo de sete dias de previsão, o que gera um número pequeno de amostras de vazão, optou-se por analisar todos os eventos por canal de modelagem. As métricas estatísticas utilizadas para avaliação das previsões foram as mesmas descritas na seção de calibração, ou seja, o indicador de desempenho de Nash, o Pbias e o erro médio quadrático (RMSE).

Fundamentado na amostra acumulada dos 10 eventos meteorológicos referenciados, os resultados dos testes de acurácia do modelo (NSE, RMSE e Pbias) confirmam que este superestimou a vazão ( $Pbias > 0$ ). Sob a perspectiva dessa visão agregada e, percebendo este padrão que sinaliza uma nítida e consistente tendência de superestimação, optou-se por processos de pós processamento removendo esta tendência, ou *bias* para se usar o jargão da literatura especializada sobre o tema.

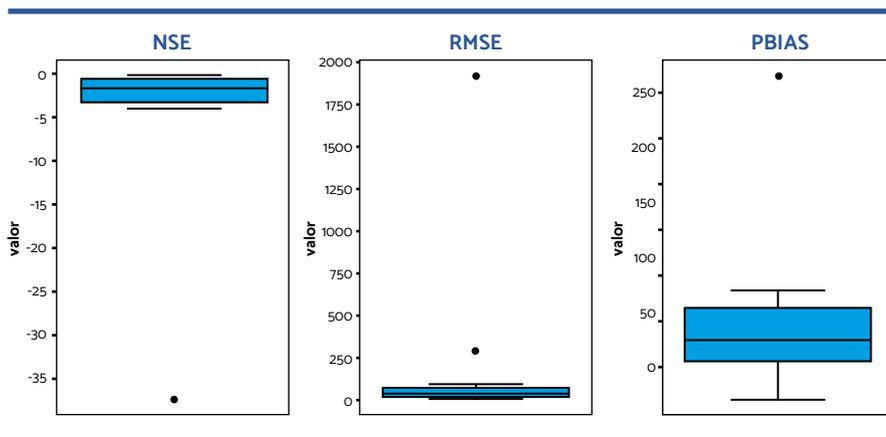
Os valores calculados pelo descritor estatístico NSE, o mesmo que foi utilizado no processo de calibração, não apresentou resultados satisfatórios. Isso era esperado, tendo em vista que este índice não é o mais recomendado para avaliar amostras de pequeno porte, pois a significância do teste pode ser afetada (McCuen et al., 2006). O cálculo do indicador RMSE apresentou erro associado aos canais, ou seja, entre  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $290 \text{ m}^3/\text{s}$  de erro, compilados na Tabela 6.8.

A Figura 6.27 ilustra a estatística associada à distribuição dos resultados NSE, RMSE e Pbias.

**Tabela 6.8** Resumo das estatísticas dos resultados das previsões.

Código	Canal	NSE	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	PBIAS
58030000	cha195	-0,29	18,00	-29,77
58060000	cha202	-0,43	5,00	-17,34
19091 <sup>(1)</sup>	cha213	-2,44	88,00	19,04
19093 <sup>(1)</sup>	cha164	-4,03	290,00	44,23
58335000	cha243	-0,84	6,00	5,89
58338500	cha249	-3,38	12,00	5,01
19098 <sup>(1)</sup>	cha239	-1,57	26,00	24,01
19110 <sup>(1)</sup>	cha222	-1,78	39,00	63,49
58585000	cha124	-0,56	53,00	28,67
19096 <sup>(1)</sup>	cha113	-3,18	61,00	69,03

**Figura 6.27** Distribuição dos resultados do NSE, RMSE e Pbias. Análise estatística levando-se em consideração a vazão de todos eventos juntos por canal.



Fonte: Projeto MoVaSC.

As Figuras 6.28 a 6.37 mostram, respectivamente para cada canal (estação), a comparação entre os hidrogramas previstos (com seus respectivos intervalos de confiança) e os hidrogramas observados, explicitando as distribuições dos dados previstos e observados para cada um dos dez eventos simulados em modo de previsão.

Os hidrogramas, juntamente com a distribuição dos dados e o intervalo de confiança, confirmam, para a maioria dos eventos, que as previsões do modelo WRF se ajustam bem ao modelo hidrológico. Ao analisar, por exemplo, os eventos do canal 222 (reservatório de Santana, Figura 6.34), observou-se grande sobreposição do histograma dos dados. Observou-se, também, que os dados acoplados WRF-SWAT+ foram capazes de acompanhar o comportamento da vazão, com destaque para os eventos 4, 6 e 9, associados aos quais a vazão observada ficou dentro da faixa de 95% do intervalo de confiança.

Com base nos testes realizados, e fundamentado pela análise estatística de validação, pode-se afirmar que *o modelo integrado WRF-SWAT+ foi considerado validado* e adequado para ser instalado no computador da concessionária Light Energia S.A., que é a gestora do complexo hidrelétrico da bacia para realizar previsões de vazão fundamentadas como parte da estratégia de tomada de decisão na gestão de sua área de concessão na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul.

A comparação entre as distribuições estatísticas visa propiciar maior entendimento do desempenho dos modelos, cuja análise estatística extrapola o rigor dos resultados dos indicadores estatísticos avaliados. É preciso ter em mente que, a despeito da perfeita superposição dessas distribuições estatísticas, uma previsão perfeita reflete um conceito teórico, portanto inexistente.

Uma distribuição com maior densidade (pico mais alto) e, conseqüentemente, de base mais estreita, indica a existência de uma variabilidade temporal menor, resultando em um sinal mais constante ao longo do tempo. Em contraponto, uma distribuição mais abatida indica um “sinal atípico”, com maior variabilidade temporal. A distribuição modelada mais adiantada no eixo da vazão é indicativo de tendência de superestimação pelo modelo, o que, notadamente, ocorre com maior frequência.

Essas são as linhas básicas que permitem uma primeira leitura da grande quantidade de informações condensadas nos indicadores estatísticos apresentados por canal. Análises mais intensas e com maior quantidade de eventos, levando-se em consideração

outros aspectos (e.g., variabilidade espacial; características típicas dos eventos meteorológicos; características de a precipitação estar ou não associada a frentes ou eventos locais), podem trazer importantes subsídios para o refinamento de todo o processo de previsão e simulação hidrológica, abrindo desdobramentos deste trabalho e novas frentes de pesquisa e desenvolvimento.

Figura 6.28 Indicadores estatísticos da qualidade de previsão (modelo SWAT-WRF, Canal 164).

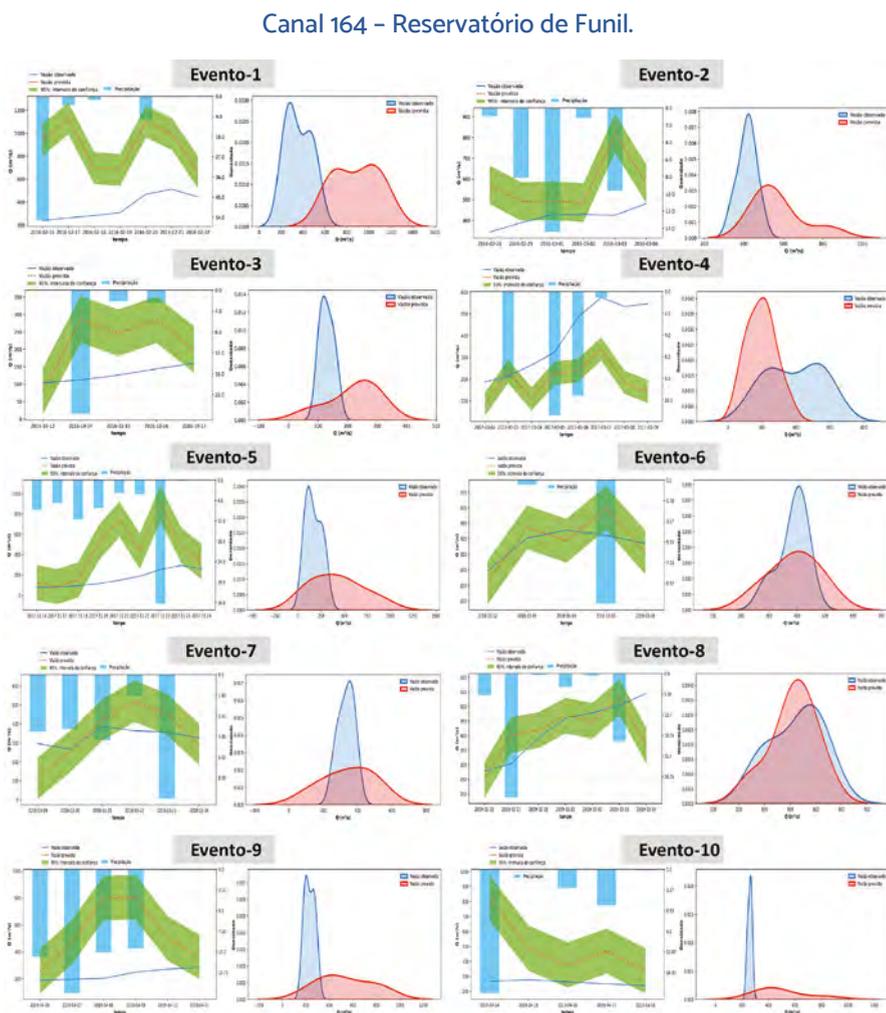


Figura 6.29 Indicadores estatístico da qualidade de previsão (modelo SWAT-WRF, Canal 113).

Canal 113 – Reservatório Sobragi

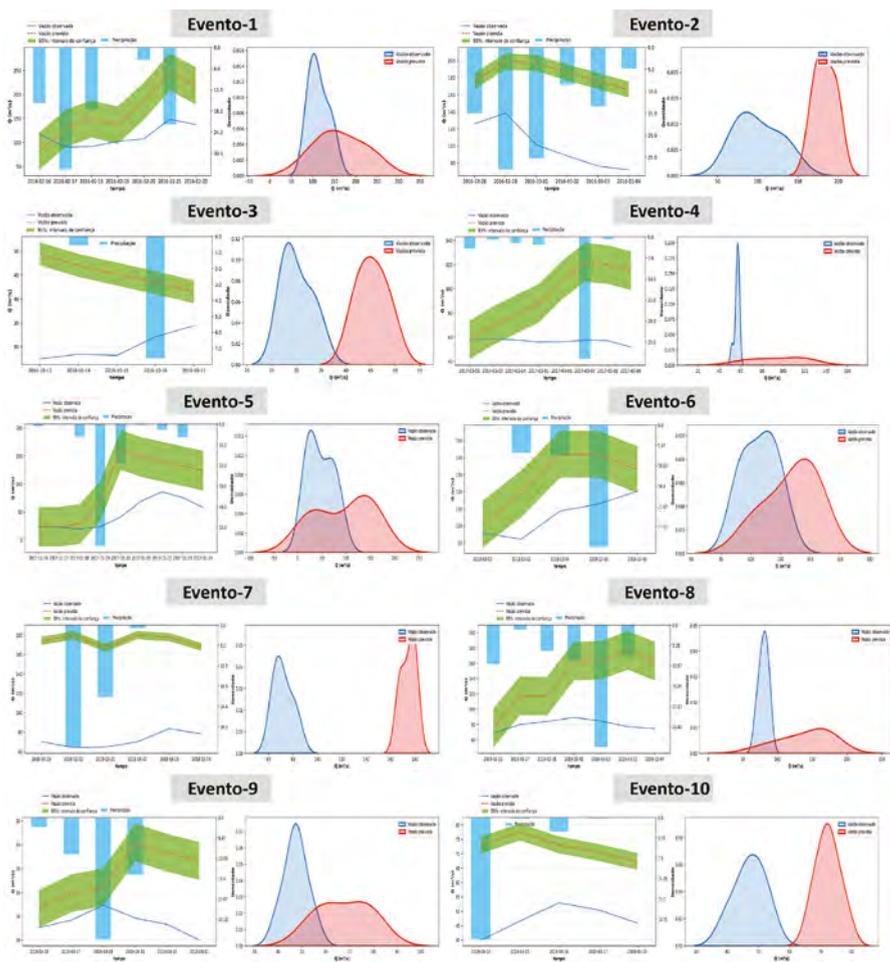


Figura 6.30 Indicadores estatístico da qualidade de previsão (modelo SWAT-WRF, Canal 124).

Canal 124 - Preto - Paraibuna

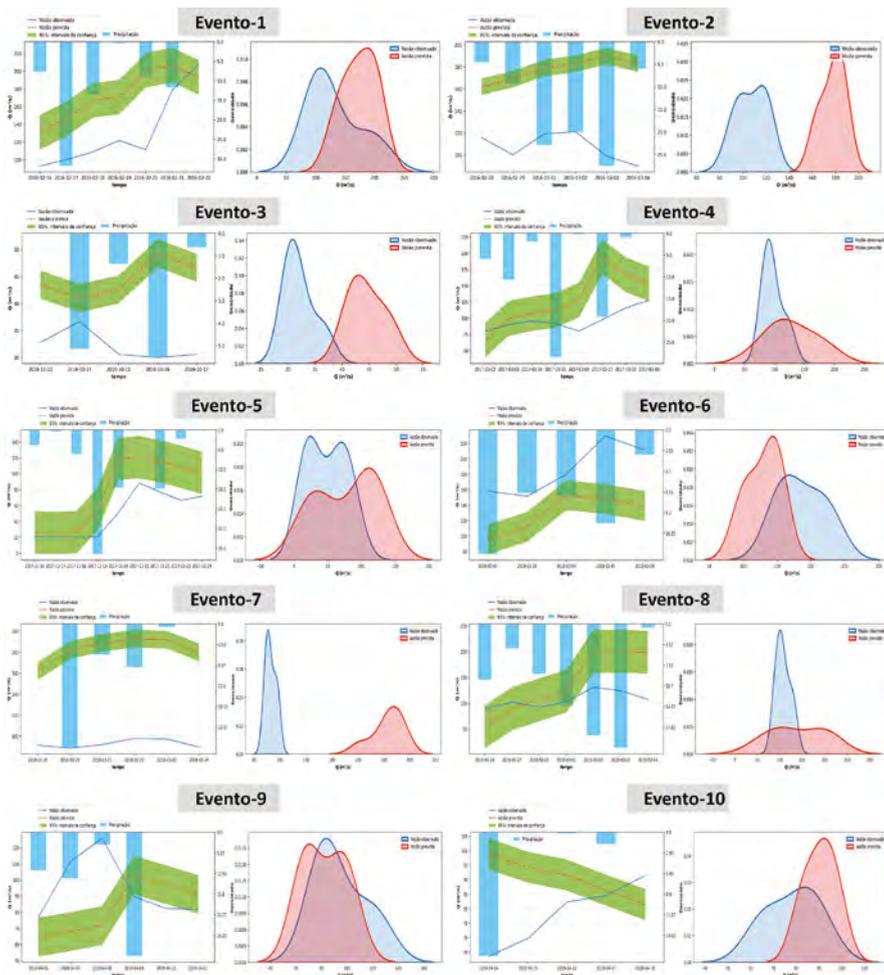


Figura 6.31 Indicadores estatístico da qualidade de previsão (modelo SWAT-WRF, Canal 195).

Canal 195 – Região contribuinte ao Reservatório de Santa Branca

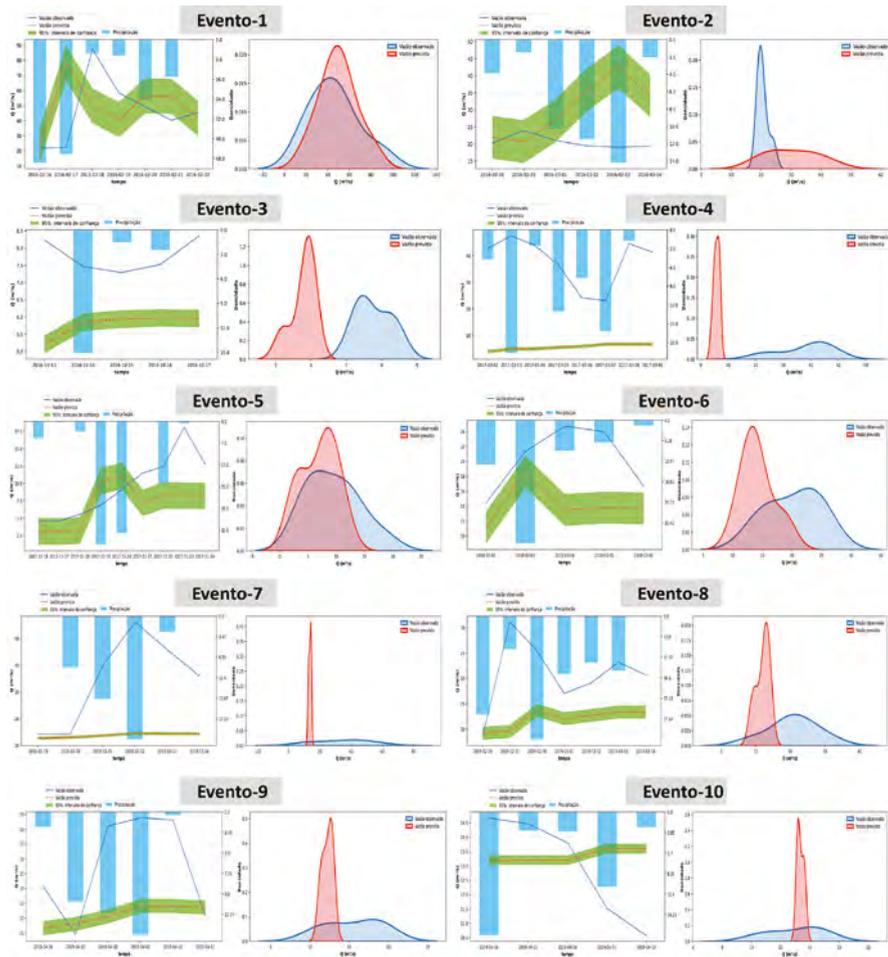


Figura 6.32 Indicadores estatístico da qualidade de previsão (modelo SWAT-WRF, Canal 202).

Canal 202 - Região contribuinte ao Reservatório de Santa Branca

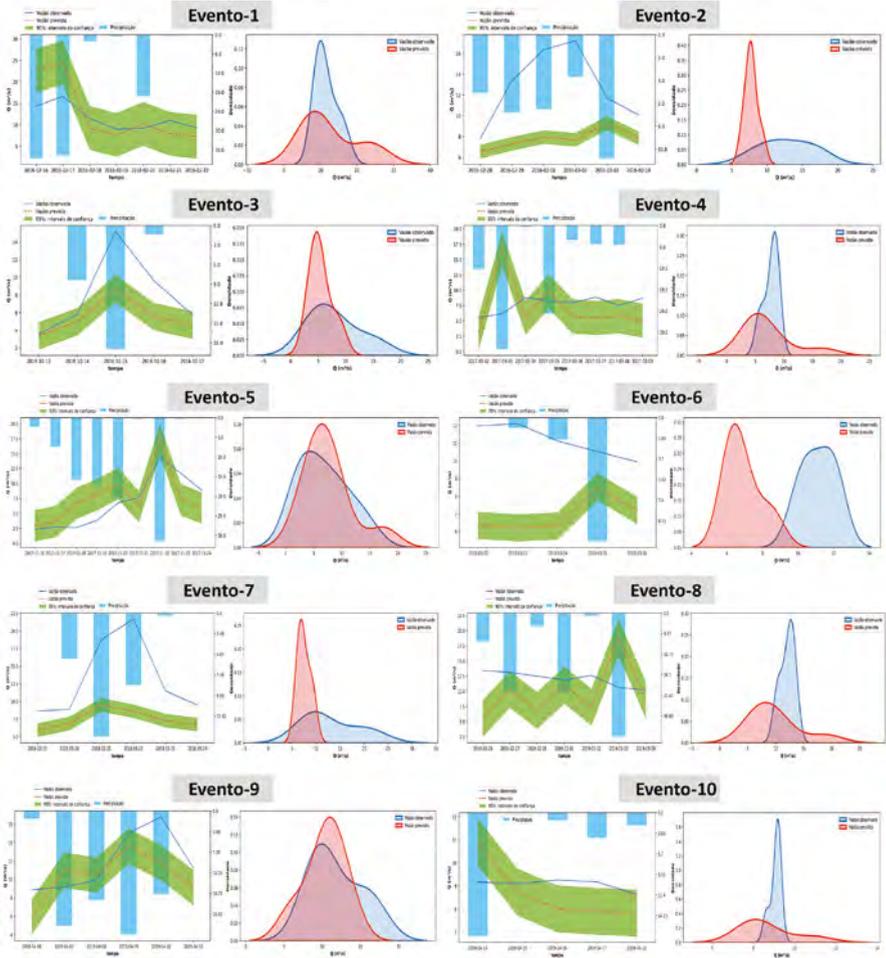


Figura 6.33 Indicadores estatístico da qualidade de previsão (modelo SWAT-WRF, Canal 213).

### Canal 213 - Reservatório de Santa Branca

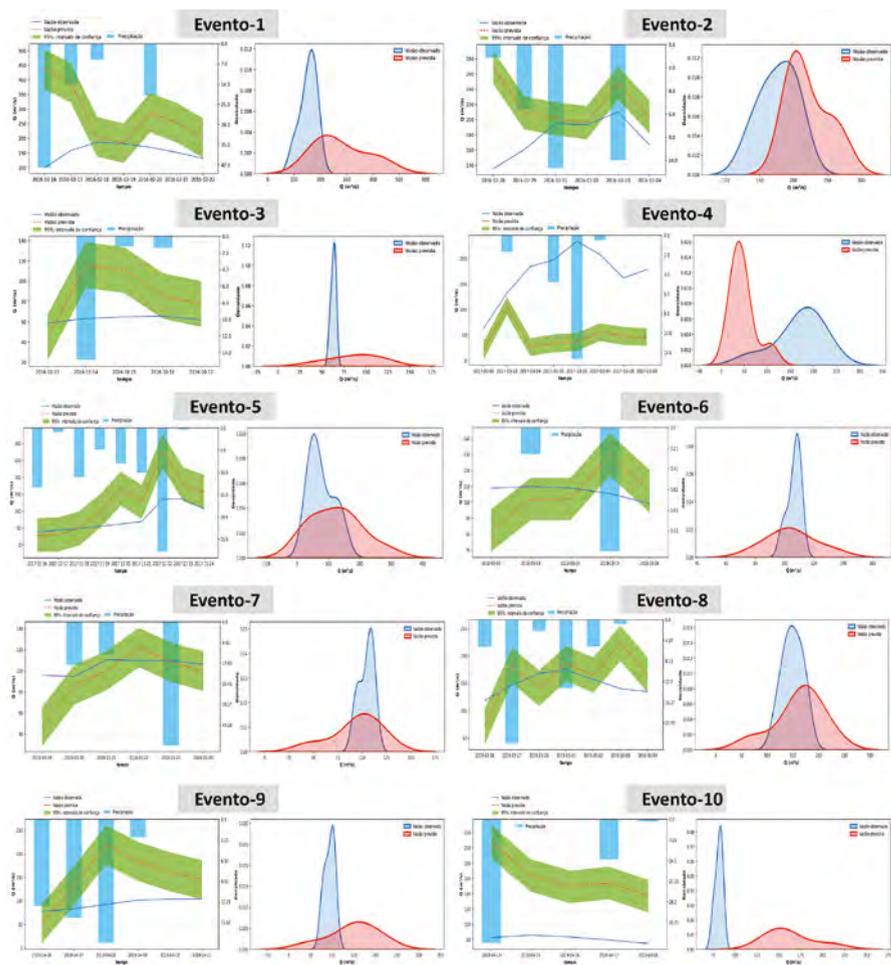


Figura 6.34 Indicadores estatístico da qualidade de previsão (modelo SWAT-WRF, Canal 222).

Canal 222 - Reservatório de Santana

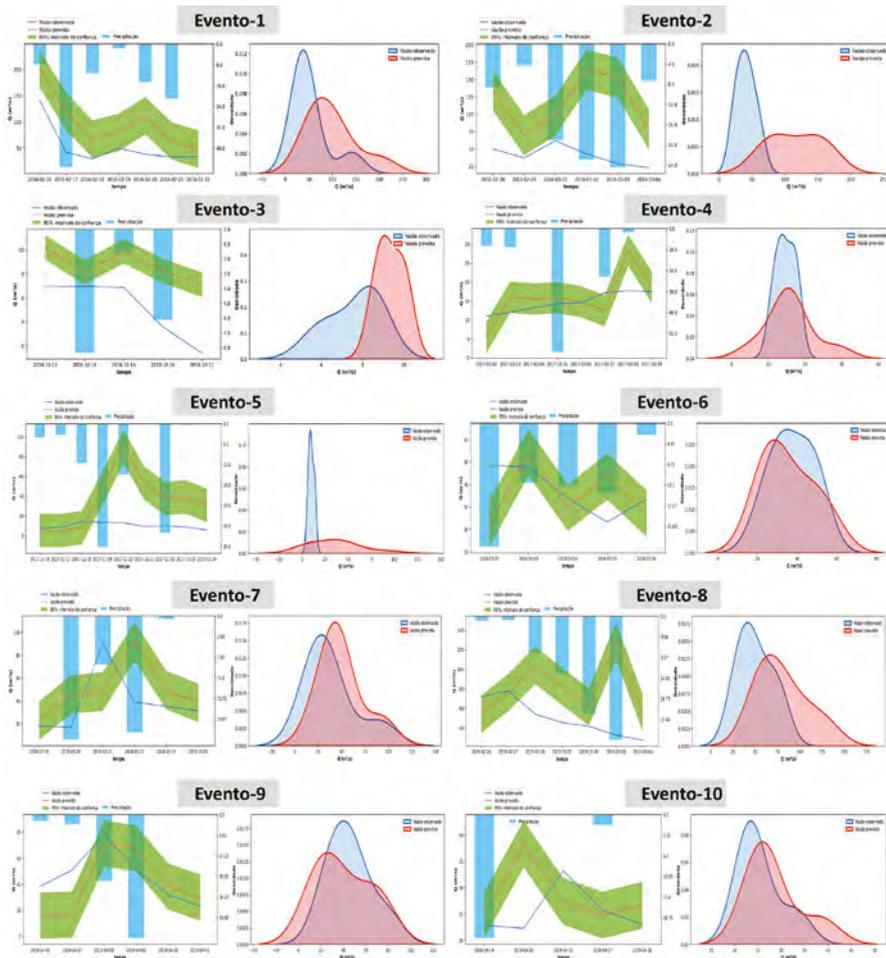


Figura 6.35 Indicadores estatístico da qualidade de previsão (modelo SWAT-WRF, Canal 239).

Canal 239 - Reservatório de Tocós

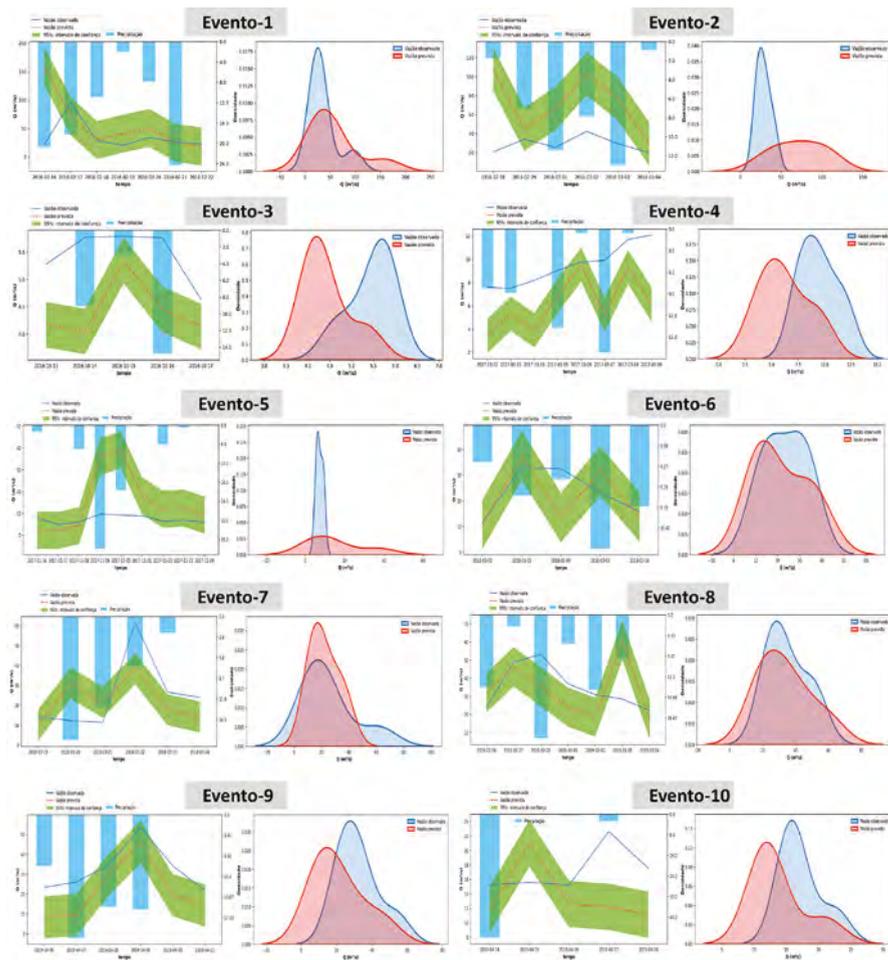


Figura 6.36 Indicadores estatístico da qualidade de previsão (modelo SWAT-WRF, Canal 243).

Canal 243 – Região contribuinte para o Reservatório de Tocós

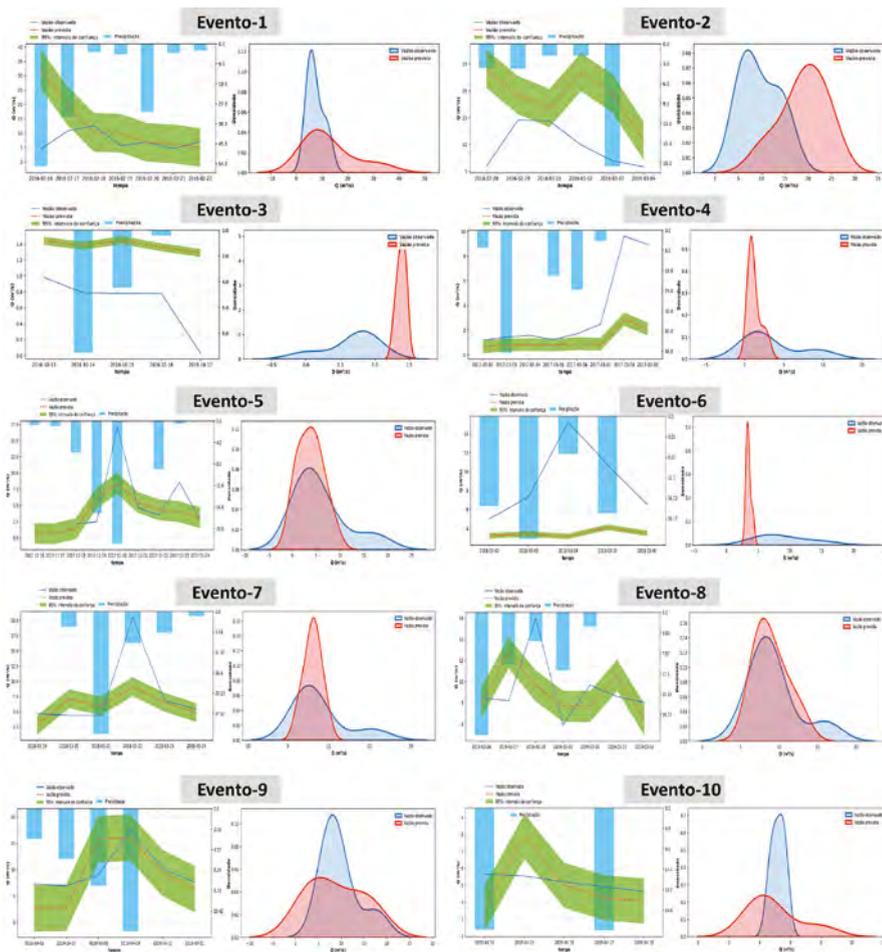
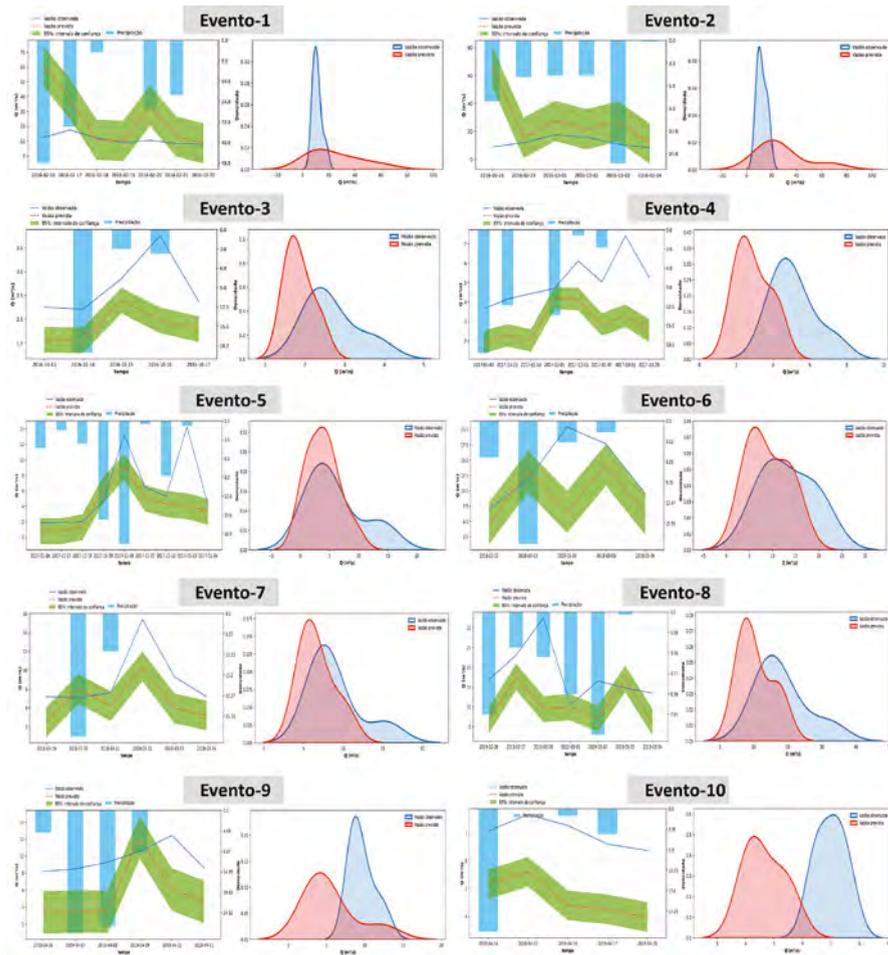


Figura 6.37 Indicadores estatístico da qualidade de previsão (modelo SWAT-WRF, Canal 249).

Canal 249 - Região contribuinte para o Reservatório de Tocós



Fonte: Projeto MoVaSC.

Conforme demonstrado, e ainda que em sua versão 1.0, pode-se dizer que o modelo hidrometeorológico acoplado WRF-SWAT+ foi capaz de produzir resultados de interesse para a gestão da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul. Além de avaliar de forma preditiva dados atmosféricos (precipitação, radiação solar, campos de temperatura, direção e velocidade do vento), o modelo WRF adaptado para a bacia do rio Paraíba do Sul gerou meteogramas, que são automaticamente disponibilizados na *homepage* criada pelo projeto MoVaSC como ferramenta complementar para orientar a concessionária Light Energia S.A. no desempenho de seu papel de gestor da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul em sua área de concessão.

Fundamentado na detalhada análise estatística acima discutida, conclui-se que o exercício de validação foi bem sucedido, qualificando a integração dos modelos SWAT+ e WRF, para produzir resultados e de interesse para os gestores da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul. Os resultados consolidados mostraram-se altamente promissores, a despeito de desdobramentos possíveis já identificados para serem explorados em uma eventual continuidade do recém-concluído projeto de P&D MoVaSC. Conforme discutido, é importante ter em mente que, a despeito do rigor da análise realizada, o modelo hidrológico foi concebido e calibrado com base em dados de estações meteorológicas, portanto habilitado para realizar previsões a partir de forçantes produzidos por modelos numéricos da atmosfera. Em outras palavras, a qualidade da previsão do modelo WRF reflete a robustez do processo de calibração a que foi submetido, assim qualificando o modelo acoplado para os propósitos para o qual foi concebido, ou seja, ferramenta estratégica de apoio à tomada de decisão na gestão da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul.

## Operacionalização da plataforma de modelagem MoVaSC

Conforme demonstrado pelos resultados consolidados do projeto de P&D MoVaSC, e sintetizados no Capítulo 3 deste livro, o modelo atmosférico WRF foi adequadamente ajustado para produzir previsões confiáveis do estado da atmosfera para a bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, em uma grade com resolução média de 3 km x 3 km. Incorporando os dados de entrada do modelo WRF, o modelo SWAT+ calibrado para as condições da mesma bacia do rio Paraíba do Sul igualmente comprovou ser capaz de realizar previsões da vazão hídrica em pontos de interesse para seus gestores. Conclui-se, assim, que a ferramenta computacional objeto do projeto MoVaSC foi validada e considerada operacional para fundamentar a modelagem hidrometeorológica da bacia.

A Figura 6.38 apresenta o diagrama de bloco da operacionalização do modelo integrado chuva-vazão no ambiente da *homepage*. Este é o *scripts* que viabilizou a instalação do software (WRF-SWAT+) na concessionária Light Energia SA, operacionalizado com base em onze processos complementares, a saber: (1) *download* de dados externos; (2) execução do modelo WRF; (3) disponibilização de resultados do modelo WRF para o modelo SWAT+; (4) disponibilização de resultados do modelo WRF para a *homepage*; (5) execução do modelo SWAT+; (6) disponibilização de resultados do modelo SWAT+ para a *homepage*; (7) atualização de dados de climatologia; (8) disponibilização de dados de climatologia; (9) atualização de dados de assoreamento; (10) disponibilização de dados de assoreamento; e (11) atualização de dados na *homepage*.

Figura 6.38 Esquemático da operacionalização no ambiente da homepage criada pelo P&D MoVaSC.



Fonte: Projeto MoVaSC.

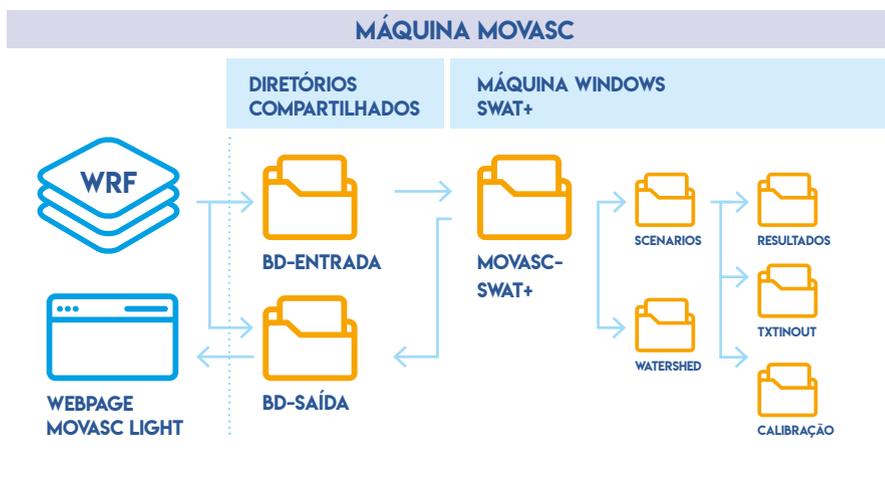
### Detalhamento da estrutura do modelo SWAT+

O esquemático da Figura 6.39 detalha a estrutura de diretórios e armazenamento de dados comandada por um *script Python*, construído ao longo da modelagem hidrológica. Os diretórios denominados *BD-Entrada* e *BD-Saida* são compartilhados entre o modelo WRF (que roda em computador específico instalado na Light Energia S.A.) e o sistema operacional Linux, implantado em outro computador da concessionária, dotado de grande capacidade de armazenamento e velocidade de processamento (computador Dell, CPU full, 24 x 16 GB de memória, 1 TB SSG com 6 x 2 T,4 TB de memória de armazenamento). Original da plataforma Windows, o funcionamento do modelo SWAT+ foi preparado para rodar na versão 10 do sistema operacional Windows. Alternativamente, de forma indiferente para o desempenho do SWAT+, este pode ser operado em máquina virtual de menor porte (64 GB de memória e 900 GB de armazenamento), tipicamente um

desktop padrão (e.g.: processador i7 ou i9 de 10ª geração, 32 GB de memória RAM, SSD 460GB e um HD de 1 T a 2 T), permitindo o armazenamento da base de dados gerada pela modelagem.

No que concerne a estrutura de diretórios instalados no computador que hospeda o software SWAT+ (que roda no sistema operacional Windows), cabe observar a nomenclatura de alguns diretórios, mantidos na forma original (em língua inglesa) de forma a guardar coerência com as interfaces de construção do modelo utilizadas pelo conjunto de interfaces (QGIS/QSWAT); ou seja: (i) o diretório *MoVaSC-SWAT+* é apenas um diretório raiz do projeto, que abriga toda a estrutura e arquivos de banco de dados do modelo; (ii) o diretório *Watershed* abriga a estrutura topológica do modelo; (iii) o diretório *Scenarios* armazena os cenários de modelagem, com os dados de entrada e o modelo propriamente dito (*TxtInOut*) e (iv) o cenário operacional configurado baseia-se no cenário N1\_05, construído ao longo processo de calibração. Já o diretório *Resultados* foi adicionado para abrigar a biblioteca de rotinas que compõem o *script Python* de automação do processo, incluindo as etapas de pré e pós processamento e o processamento em si, operacionalizado pela modelagem hidrometeorológica integrada. Integrando esta estrutura, o diretório *Calibração* foi adicionado para agregar eventuais demandas de ajustes futuros no processo de calibração. Essa estrutura reflete de forma integral a estrutura desenvolvida e utilizada para a construção do modelo hidrometeorológico integrado.

Figura 6.39 Detalhamento da operacionalização do SWAT+.



Fonte: Projeto MoVaSC.

### Internalização do modelo hidrometeorológico integrado na concessionária de energia

Embora devidamente calibrado e validado em diferentes sub-bacias, é importante ter em mente que o código computacional ora disponibilizado em sua versão 1.0 realiza a previsão de vazão hídrica de uma bacia hidrográfica de alta complexidade, como é o caso da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, altamente antropizada, de longa extensão e permeada por um sistema integrado de reservatórios, barragens e usinas hidrelétricas, cuja operação drasticamente interfere no curso natural das águas. Neste contexto, os gráficos da vazão hídrica a seguir apresentados refletem os primeiros resultados para exemplificar a abrangência e potencialidade da ferramenta computacional alimentada por forçantes meteorológicos previstos a partir da modelagem numérica pelo modelo WRF. Modelo que, por sua vez, já foi calibrado para reproduzir a dinâmica da atmosfera sobre a intrincada bacia do rio Paraíba do Sul, assim gerando o modelo hidrometeorológico WRF-SWAT+, calibrado a partir de

dados observados de estações meteorológicas e fluviométricas que, também, dependem de controle metrológico realizado pelas organizações independentes que as controlam (e.g., ANA, INMET).

Não obstante os resultados altamente promissores gerados, aprimoramentos naturais da plataforma computacional de modelagem (WRF-SWAT+) devem ser perseguidos com o propósito de refinamento do modelo hidrometeorológico desenvolvido, dentre os quais: (i) reavaliação dos testes de sensibilidade do modelo WRF para refinamento dos campos meteorológicos previstos; (ii) inserção criteriosa dos chamados efeitos de reservatórios, em contraponto aos dados de vazões naturais; (iii) uso de aprendizado de máquina para fundamentar a calibração integrada em um maior número de sub-bacias estrategicamente selecionadas, referenciadas a estações meteorológicas e fluviométricas de observação confiáveis e com rastreabilidade assegurada. A exemplo do processo natural de evolução e desenvolvimento de qualquer código computacional dessa complexidade, essas são as questões relevantes que deverão ser consideradas na continuidade do Projeto MoVaSC já discutida com os gestores do Programa de P&D Light/Aneel. Na sequência dos desenvolvimentos até aqui consolidados, prevê-se não apenas a incorporação de aprimoramentos capazes de mitigar efeitos adversos que impactam o desempenho da plataforma de modelagem como, também, a ativação do módulo assoreamento do modelo integrado fazendo uso de técnicas de sensoriamento remoto por satélites.

A título de ilustração de resultados típicos gerados pelo código computacional desenvolvido, as Figuras 6.40 a 6.45 documentam, respectivamente, as previsões de vazão realizadas no dia 30/04/2023 em seis sub-bacias que dispõem de estações fluviométricas de interesse para a concessionária: Campos-Ponte Municipal, localizada no exutório (ponto de vazão máxima) da bacia; na estação UHE Nilo Peçanha Rio do Braço, que é uma das estações consideradas na calibração do modelo SWAT, nos reservatórios de Santa Branca, Santana e Vigário, localizados em áreas de concessão da concessionária Light Energia S.A., e na sub-bacia Passa Três que, embora

não esteja na área de concessão da empresa, é uma sub-bacia de interesse para seu planejamento energético e operacional. Para assegurar a adequada resolução destas figuras, do total de 5 anos de aquecimento, resultados de apenas um reduzido período (entre 16/03/2023 e 30/04/2023) foram plotados (destacados na cor azul de fundo no gráfico correspondente). Já a previsão de vazão gerada para o dia 30/04/2023 fornece resultados da previsão de vazão para o período de sete dias subsequentes do modelo atmosférico WRF, i.e., para o período de 01 a 07/05/2023 (destacados na cor rosa), identificados no extremo do gráfico, à direita.

Figura 6.40 Modelagem hidrometeorológica: previsão da vazão hídrica para sete dias, gerada pelo código computacional; WRF-SWAT (Canal cha O43, Cod. 58001000. Estação Campos Ponte Municipal).

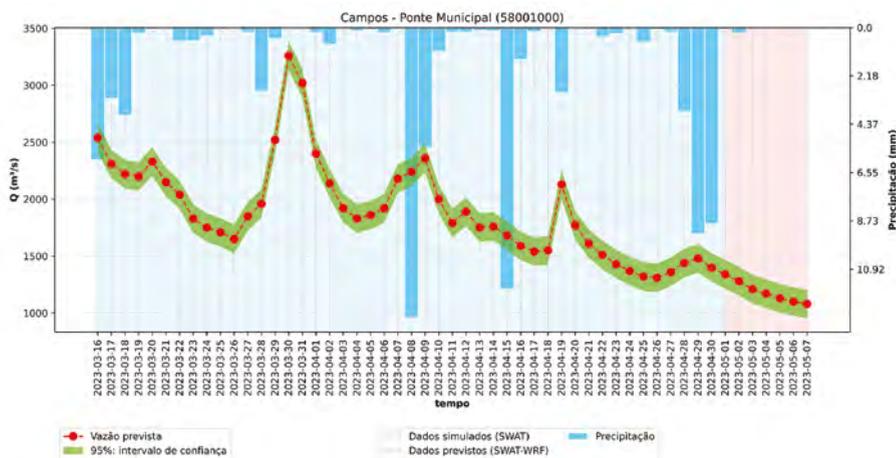


Figura 6.41 Modelagem hidrometeorológica: previsão da vazão hídrica para sete dias gerada pelo código computacional; WRF-SWAT (Canal cha 249, Cod. 58338500. Estação UHE Nilo Peçanha, Rio do Braço).

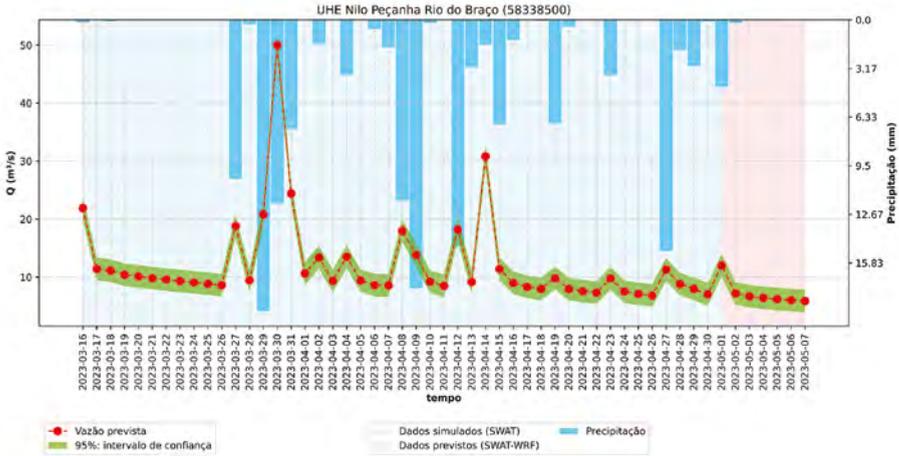


Figura 6.42 Modelagem hidrometeorológica: previsão da vazão hídrica para sete dias gerada pelo código computacional; WRF-SWAT (Canal cha 213, Cod 58095000. Estação UHE Santa Branca Barramento).

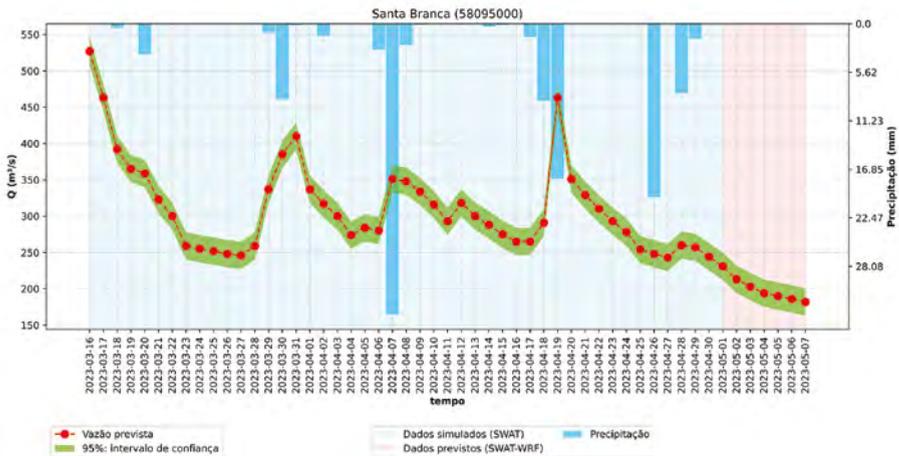


Figura 6.43 Modelagem hidrometeorológica: previsão da vazão hídrica para sete dias gerada pelo código computacional; WRF-SWAT (Canal cha 222, Cod. 58358000. UEL Santa Cecília Reservatório Santana Barramento).

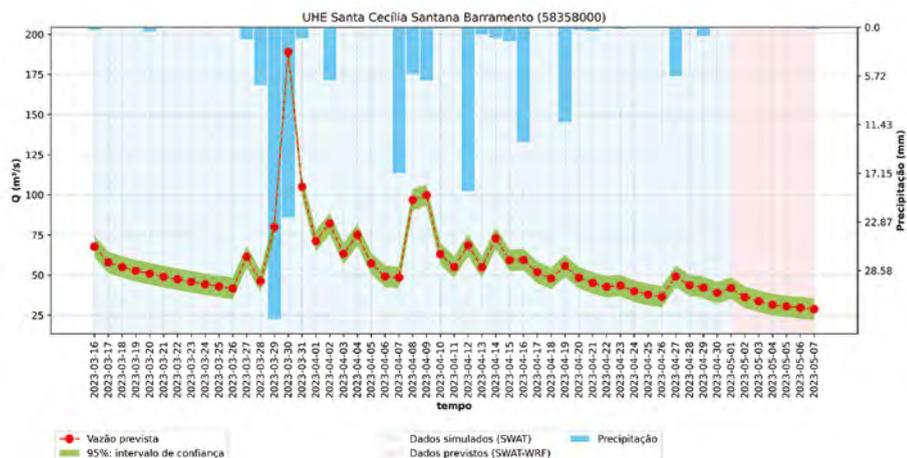


Figura 6.44 Modelagem hidrometeorológica: previsão da vazão hídrica para sete dias gerada pelo código computacional; WRF-SWAT (Canal cha 231, Cod. 58350001. UEL Vigário - Fazenda Nova Esperança).

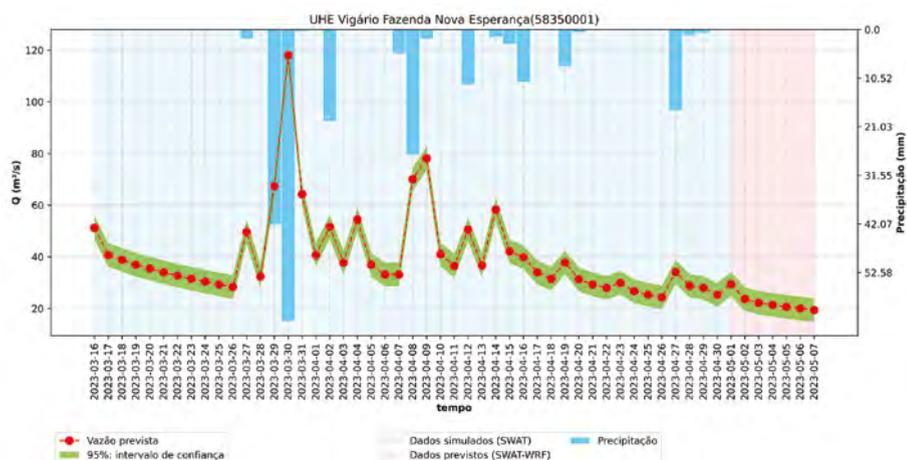
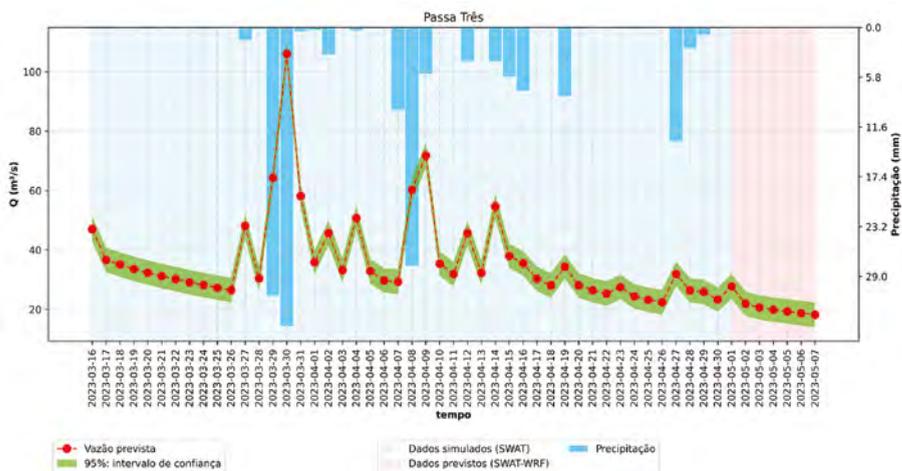


Figura 6.45 odelação hidrometeorológica integrada: previsão da vazão hídrica para sete dias gerada pelo código computacional; WRF-SWAT (Canal cha 234. Estação Passa Três).



## Atualização de resultados

Conforme esperado, a modelagem desenvolvida (previsão de sete dias) da vazão hídrica em distintas sub-bacias do rio Paraíba do Sul reflete de forma adequada os complexos fenômenos de precipitação sobre a bacia. Os resultados acima apenas ilustram alguns exemplos de resultados de interesse de previsão de vazão realizada pelos operadores da ferramenta computacional colocada à disposição de uma das concessionárias de energia gestoras da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul. Ainda a título de ilustração do potencial da ferramenta computacional desenvolvida pelo projeto MoVaSC, o QR Code, abaixo, permite acesso à uma coletânea de resultados da previsão hidrometeorológica para sete dias, em 22 sub-bacias de geração de vazão, em pontos de interesse previamente acordados com a Light Energia S.A. O QR Code cumpre, também, a estratégia de manter o livro atualizado, provendo resultados que poderão ser atualizados com uma periodicidade a ser definida pela concessionária, visando compartilhar resultados operacionais de interesse para se determinar a disponibilidade hídrica da bacia hidrológica do Paraíba do Sul.



Inteiramente automatizado, desde a sua implementação na Light Energia S.A. no dia 25/08/2022, diariamente o modelo hidrometeorológico gera a previsão de vazão para o período de sete dias para as 809 sub-bacias previamente selecionadas pelo projeto de P&D MoVaSC, cabendo ao usuário selecionar para quais dessas sub-bacias deseja plotar os gráficos integrados de precipitação/vazão de interesse.

---

## Referências

- ABBASPOUR, K. C.; SONNELEITNER, M; SCHULIN, R. 1999. Uncertainty in estimating of soil hydraulic parameters by inversing modeling: example lysimeter experiments. *Soil Sci. Soc. Of Am.J.*, 63, p. 501-509.
- ABBASPOUR, K. C. 2005. Calibration of hydrologic models: When is a model calibrated? In: ZERGER, A.; ARGENT, R. *Proc. Intl. Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'05)*, p. 2449-2455. Melbourne, Australia: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.
- ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLOVE, B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWTA model. *Journal of Hydrology*, v. 525, p. 733-752.
- ABBASPOUR, K. C. 2015. SWAT-CUP: SWATCalibration and Uncertainty Programs. *Technical reference of SWAT-CUP*.
- ANDRADE, M. P.; RIBEIRO, C. B. D. M. 2020. Impacts of land use and cover change on Paraíba do Sul watershed streamflow using the SWAT model. *Revista brasileira de recursos hídricos*, v. 25, p. 1-13. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.252020190034>.
- ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R.; HANEY, E.B.; NEITSH, S.L. 2012. *Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation - Version 2012*.
- CHEN, FW.; LIU, CW. 2012. Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy Water Environ* 10, p. 209-222. <https://doi.org/10.1007/s10333-012-0319-1>
- LOUZADA, V. M.; RIBEIRO, C. B. M. 2019. Impacts of land-use change on southeast Amazonia basin streamflow. *Revista Ambiente e água*, v. 14, p. 1. Acessado em: 12/09/2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2303>.
- KLEMES, V. 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Science Journal*, v. 31(1), p. 13-24. Publicado online em 21/12/2009. <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>.
- MCCUEN, R. H.; KNIGHT, Z.; CUTTER, A. G. 2006. Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 11(6), p. 597. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699;](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699;)
- MISHRA, S.K.; JAIN, M.K.; SINGH, V.P. 2003. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Part of the book series: Water Science and Technology Library (WSTL, volume 42). e-book. Berlin: Springer Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1>.

- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. v. 10 (3), p. 282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- NCAR, NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH. *Climate Forecast System Reanalysis – CSFR*. Acessado em: 20/07/2020 – Disponível: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>.
- SAHA, S.; MOORTHI, S.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; BEHRINGER, D.; HOU, Y-T.; CHUANG, H-Y.; IREDELL, M.; EK, M.; MENG, J.; YANG, R.; MENDEZ, M. P.; DOOI, H.; ZHAMG, Q.; WANG, W.; CHEN, M.; BECKER, E. 2014. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, v. 27, p. 2186-2208. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
- YAN, B.; GUO, S.; CHEN, L. 2014. Estimation of reservoir flood control operation risks with considering inflow forecasting errors. *Stoch Environ Res Risk Assess* 28, p. 359-368. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0756-4>

Resultado de um esforço coletivo de pesquisa orientado para o estudo do rio Paraíba do Sul, o livro apresenta uma retrospectiva histórica da bacia, discute aspectos relacionados à climatologia, em particular fenômenos atmosféricos de baixa frequência, resultados da simulação de eventos meteorológicos típicos e do estudo de assoreamento dos reservatórios de Santana e Vigário pela técnica de datação do  $^{210}\text{Pb}$ . Como fechamento, apresenta resultados do modelo hidrometeorológico já operacional na concessionária Light Energia S.A., realizando, diariamente, a previsão da vazão por sete dias em 809 sub-bacias ao longo do rio Paraíba do Sul.

