

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

JULIANE MACEDO MAGERSKI

PROJEÇÕES HIDROLÓGICAS EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE
CENÁRIOS FUTUROS IMPACTADOS POR MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO SÉCULO
XXI

PONTA GROSSA

2020

JULIANE MACEDO MAGERSKI

PROJEÇÕES HIDROLÓGICAS EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE
CENÁRIOS FUTUROS IMPACTADOS POR MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO SÉCULO

XXI

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental na Linha de Pesquisa de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens Filho.

PONTA GROSSA

2020

M192 Magerski, Juliane Macedo
Projeções hidrológicas em duas bacias hidrográficas a partir de cenários futuros impactados por mudanças climáticas no século XXI / Juliane Macedo Magerski. Ponta Grossa, 2020.
132 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Estadual de Ponta Grossa e Unicentro.

Orientador: Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens Filho.

1. Espacialização dados hidrológicos. 2. Modelagem hidroclimatológica. 3. Aquecimento global. I. Virgens Filho, Jorim Sousa das. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Unicentro. Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. III.T.

CDD: 628.4



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

Certificado nº 07/2020 PPGESA



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Título da Dissertação: **“PROJEÇÕES HIDROLÓGICAS EM DUAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE CENÁRIOS FUTUROS IMPACTADOS POR
MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO SÉCULO XXI”**

Nome: **JULIANE MACEDO MAGERSKI**

Orientador: **Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens Filho**

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens Filho
UEPG/Ponta Grossa (PR)

Josiclêda D. Galvêncio

Prof^ª. Dr^ª. Josiclêda Domiciano Galvêncio
UFPE - Universidade Federal de Pernambuco (PE)

M^a Ligia Cassol Pinto

Profa. Dr^ª. Maria Ligia Cassol Pinto
UEPG/Ponta Grossa (PR))

Ponta Grossa, 11 de dezembro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Ao Universo por ter proporcionado esta oportunidade de crescimento como pessoa e acadêmica.

Aos meus pais, pelo suporte e demonstração de apoio sem igual em todos os momentos dessa etapa na minha vida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), assim como à Fundação Araucária, pela concessão da bolsa de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens Filho, pela contribuição com seus conhecimentos na orientação deste trabalho e pela dedicação, mesmo nas fases de maiores dificuldades.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual de Ponta Grossa, à coordenação e a todos os professores do curso, que se mostraram disponíveis para contribuir sempre que solicitados.

Aos meus amigos queridos que prestaram suporte em todas as esferas possíveis ao decorrer do mestrado.

E a todos que de, forma direta ou indireta, contribuíram o desenvolvimento desta dissertação e para o entendimento de como é feita a pesquisa científica.

Quem anda no trilho é trem de ferro. Sou água que
corre entre pedras - liberdade caça jeito.
(Manoel de Barros)

RESUMO

Com base na importância dos recursos hídricos para os indivíduos, como forma de subsistência e desenvolvimento econômico, além de ser um dos componentes essenciais para o meio ambiente equilibrado, o objetivo dessa pesquisa foi realizar projeções hidrológicas na Sub-bacia do Baixo Rio Ivaí (SBRI) e na Sub-bacia do Alto Rio Tibagi (SART) no estado do Paraná, em períodos sazonais e anual, com base em variáveis hidroclimatológicas, por meio de cenários futuros impactados por mudanças climáticas no século XXI. Inicialmente, a técnica de krigagem ordinária, utilizando o modelo geoestatístico estável, foi aplicada em dados pluviométricos do Instituto Águas Paraná, INMET e do IAPAR resultando em mapas gerados com os dados observados apresentando falha contrapondo os dados preenchidos. A verificação da eficiência da modelagem foi conduzida por meio da avaliação das estatísticas EMA, REQM, índices r , d (Willmott), NS (Nash-Sutcliffe) e do teste de Wilcoxon a 5%. Em paralelo, foi desenvolvido um modelo híbrido determinístico-estocástico de chuva-vazão, utilizando registros hidroclimatológicos históricos das sub-bacias obtidos junto ao Instituto Águas Paraná, sendo aplicado, em um primeiro momento, o conceito de vazão equivalente para posterior aplicação de um modelo regressivo entre as vazões acumuladas observadas e estimadas. Os resultados foram avaliados pelos testes de Shapiro-Wilk (S-W), de Komogorov-Smirnov (K-S), de Wilcoxon (WCX), e Brown-Forsythe (B-F) ao nível de 5% de significância. Por fim, para geração das vazões, considerando dois cenários de possíveis mudanças climáticas (C1 e C2), o *software* PGECLIMA_R foi utilizado acoplado ao modelo chuva-vazão híbrido determinístico-estocástico e os resultados de precipitação foram representados espacialmente empregando o modelo estável enquanto que os de vazão, foram representados pontualmente. Em relação aos resultados da primeira análise, notou-se valores relativamente baixos de EMA e REQM, assim como valores expressivos dos índices r , d e NS, principalmente, na SART, que apresentou um menor percentual de falhas. Os testes estatísticos aplicados nos resultados do modelo chuva-vazão indicaram desempenho muito bom na projeção das vazões, com resultados ótimos para o teste K-S. No que diz respeito à última etapa deste trabalho, as projeções de vazões impactadas por mudanças climáticas previstas para o final do século, indicaram que possivelmente haverá aumento no fluxo, principalmente dos períodos chuvosos. Sendo assim, por meio da pesquisa realizada foi possível estimar prováveis mudanças na precipitação e nas vazões, podendo ser usada como ferramenta para estudos mais aprofundados, assim como ferramenta para embasar a ação de tomadores de decisão futuramente.

Palavras-chaves: espacialização de dados hidrológicos, modelagem hidroclimatológica, aquecimento global.

ABSTRACT

Bearing in mind the importance of water resources for individuals, as a means of subsistence and economic development, in addition to being one of the essential components for a balanced environment, the objective of this research was to obtain hydrological perspectives in the Lower Rio Ivaí Sub-basin (SBRI) and in the Upper Rio Tibagi Sub-basin (SART) in the state of Paraná in seasonal and annual periods, based on hydroclimatological variables, through future scenarios impacted by climate changes in the 21st century. Initially, the ordinary kriging technique, using the stable geostatistical model, was applied to pluviometric data from the Águas Paraná Institute, INMET and IAPAR resulting in maps generated with the observed data showing gaps against the filled data. The verification of the modeling efficiency was conducted through the evaluation of the EMA, REQm, r , d (Willmott), NS (Nash-Sutcliffe) statistics and the 5% Wilcoxon test. In parallel, a deterministic-stochastic hybrid rainfall-runoff model was developed, using historical hydroclimatological records of the sub-basins obtained from the Águas Paraná Institute, in which initially the equivalent flow concept was applied for later application of a regressive model. between observed and estimated accumulated flows. The results were evaluated by the Shapiro-Wilk (S-W), Komogorov-Smirnov (K-S), Wilcoxon (WCX), and Brown-Forsythe (B-F) tests at the 5% significance level. Finally, for the generation of flows, considering two scenarios of possible climate changes (C1 and C2), the PGECLIMA_R program was used coupled to the deterministic-stochastic hybrid rainfall-runoff model and the precipitation results were represented spatially using the stable model while flow rates were represented on time. Regarding the results of the first analysis, there were relatively low values of EMA and REQm, as well as expressive values of the r , d and NS indices, mainly in SART, which had a lower percentage of failures. The statistical tests applied to the results of the rain-flow model indicated very good performance in the projection of flows, with optimal results for the K-S test. With regard to the last stage of this work projections of flows impacted by climatic changes predicted for the end of the century, indicated that there will possibly be an increase in flow, mainly in the rainy periods. Thus, through the research carried out, it was possible to estimate probable changes in precipitation and flows, which can be used as a tool for further studies, as well as a tool to support the action of decision makers in the future

Keywords: spatialization of hydrological data, hydroclimatological modeling, global warming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização dos tipos climáticos encontrados na SBRI e na SART, com os respectivos postos pluviométricos utilizados no Paraná.....	29
Figura 1.2 - Series históricas da espacialidade pluviométrica sazonais na SBRI: com falhas e corrigida por krigagem.....	37
Figura 1.3 - Series históricas da espacialidade pluviométrica anual na SBRI: com falhas e corrigida por krigagem.....	41
Figura 1.4 - Series históricas da espacialidade pluviométrica sazonais na SART: com falhas e corrigida por krigagem.....	43
Figura 1.5 - Series históricas da espacialidade pluviométrica anual na SART: com falhas e corrigida por krigagem.....	47
Figura 2.1 - Localização dos tipos climáticos encontrados na SBRI e na SART, com as respectivas duplas de postos pluviométricos e fluviométricos utilizadas no Paraná.....	55
Figura 2.2 - Gráficos da vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) em cada período referentes aos postos localizados na SBRI, com a representação das médias e os desvios padrões dos valores observados e projetados.....	70
Figura 2.3 - Gráficos da vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) em cada período referentes aos postos localizados na SBRI, com a representação das médias e os desvios padrões dos valores observados e projetados.....	78
Figura 3.1 – Hidrografia e tipos climáticos encontrados na SBRI e na SART, com as respectivas duplas de postos pluviométricos e fluviométricos utilizadas no Paraná.....	86
Figura 3.2 - Representações estacionais -verão- de vazão na SBRI do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	90
Figura 3.3 - Representações estacionais -outono- de vazão na SBRI do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	91
Figura 3.4 - Representações estacionais -inverno- de vazão na SBRI do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	92
Figura 3.5 - Representações estacionais -primavera- de vazão na SBRI do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	93
Figura 3.6 - Representações estacionais -anual- de vazão na SBRI do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	94

Figura 3.7 - Representações estacionais -verão- de vazão na SBRI do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	95
Figura 3.8 - Representações estacionais -outono- de vazão na SBRI do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	97
Figura 3.9 - Representações estacionais -inverno- de vazão na SBRI do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	98
Figura 3.10 - Representações estacionais -primavera- de vazão na SBRI do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	99
Figura 3.11 - Representações estacionais -anual- de vazão na SBRI do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	100
Figura 3.12 - Representações estacionais -verão- de vazão na SART do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	102
Figura 3.13 - Representações estacionais -outono- de vazão na SART do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	103
Figura 3.14 - Representações estacionais -inverno- de vazão na SART do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	105
Figura 3.15 - Representações estacionais -primavera- de vazão na SART do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	106
Figura 3.16 - Representações estacionais -anual- de vazão na SART do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	107
Figura 3.17 - Representações estacionais -verão- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	109
Figura 3.18 - Representações estacionais -outono- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	110
Figura 3.19 - Representações estacionais -inverno- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	112
Figura 3.20 - Representações estacionais -primavera- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	113
Figura 3.21 - Representações estacionais -anual- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Postos pluviométricos utilizados na SBRI.....	30
Tabela 1.2 - Postos pluviométricos utilizados na SART.....	32
Tabela 1.3 - Percentuais médios de falhas de dados observados sazonalmente e anualmente nas sub-bacias SBRI e SART.....	36
Tabela 1.4 - Análise estatística confrontando os dados com falhas e os dados preenchidos por krigagem referentes as pluviometrias sazonais e anuais na SBRI.....	39
Tabela 1.5 - Análise estatística confrontando os dados com falhas e os dados preenchidos por krigagem referentes as pluviometrias sazonais e anuais na SART.....	44
Tabela 2.1 - Dados sobre aos postos analisados, incluindo a identificação da dupla (ID) dos postos fluviométricos e pluviométricos e a sub-bacia onde estão localizados, seguido pelo código, coordenadas geográficas, nome do posto, intervalo da série histórica e área de drenagem (km ²).	56
Tabela 2.2 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 1F-SBRI.....	63
Tabela 2.3 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 2F-SBRI.....	64
Tabela 2.4 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 3F-SBRI.....	65
Tabela 2.5 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 4F-SBRI.....	66
Tabela 2.6 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 5F-SBRI.....	67
Tabela 2.7 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 6F-SART.....	71
Tabela 2.8 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 7F-SART.....	72
Tabela 2.9 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 8F-SART.....	73
Tabela 2.10 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 9F-SART.....	74

Tabela 2.11 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 10F-SART.....	75
Tabela 3.1 - Dados sobre aos postos analisados, incluindo a identificação da dupla (ID) dos postos fluviométricos e pluviométricos e a sub-bacia onde estão localizados, seguido pelo código, coordenadas geográficas, nome do posto, intervalo da série histórica e área de drenagem.....	86

LISTA DE SIGLAS

AR5	<i>Assessment Reports 5</i>
B-F	Brown-Forsythe
BRR	Bacia do Rio Ribeira
EMA	Erro Médio Absoluto
GEE	Gases de Efeito Estufa
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDP	Inverso da Distância Ponderada
IDW	<i>Inverse Distance Weighted</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
K-S	Komogorov-Smirnov
MCG	Modelo Climático Global
MCR	Modelo Climático Regional
NS	índice de Nash-Sutcliffe
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PNRH	Política Nacional dos Recursos Hídricos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
REQM	Raiz do Erro Quadrado Médio
RNA	Redes Neurais Artificiais
SARI	Sub-bacia do Baixo Rio Iguaçu
SART	Sub-bacia do Baixo Rio Ivaí
SBRI	Sub-bacia do Alto Rio Tibagi
SCC	Sistemas de Classificação Climática
SIG	Sistema de Informação Geográfica
S-W	Shapiro-Wilk
WCX	Wilcoxon

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	13
REVISÃO GERAL	16
CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE KRIGAGEM ORDINÁRIA UTILIZANDO O MODELO GEOESTATÍSTICO ESTÁVEL, NO PREENCHIMENTO DE FALHAS EM SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA, DE SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS LOCALIZADAS EM REGIÕES CLIMATICAMENTE DISTINTAS NO ESTADO DO PARANÁ	23
1.1 INTRODUÇÃO	24
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	28
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
1.4 CONCLUSÃO	49
CAPÍTULO 2 - MODELO HÍBRIDO DETERMINÍSTICO-ESTOCÁSTICO DE CHUVA-VAZÃO PARA PROJEÇÃO DE VAZÕES SAZONAIS E ANUAL EM SUB-BACIAS DO ESTADO DO PARANÁ	50
2.1 INTRODUÇÃO	51
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	54
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
2.4 CONCLUSÃO	79
CAPÍTULO 3 - PROJEÇÃO DE VAZÕES OBTIDAS POR UM MODELO CHUVA- VAZÃO HÍBRIDO DETERMINÍSTICO-ESTOCÁSTICO EM SUB- BACIAS LOCALIZADAS EM REGIÕES CLIMATICAMENTE DISTINTAS NO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO FUTUROS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	82
3.1 INTRODUÇÃO	82
3.2 METODOLOGIA	84
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
3.4 CONCLUSÃO	118
CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
REFERÊNCIAS	120

INTRODUÇÃO GERAL

É de conhecimento universal que o clima é composto por vários elementos que são interligados. Através dos anos, relatos de quem tem mais proximidade e que depende economicamente do meio ambiente, apontam mudanças na ocorrência do mesmo. Para se entender tais mudanças, é necessário o estudo aprofundado de algumas variáveis e apesar haver estudos sobre a temática desde o início da ciência, atualmente este ato que vem sendo realizado por diversos pesquisadores a fim de se aprofundarem em algumas particularidades.

Uma dessas variáveis, de forma direta ou indireta, inclui os recursos hídricos, que são designados a múltiplas formas de uso, sendo essenciais a várias atividades humanas, entre as quais se evidenciam o abastecimento público e industrial, a irrigação agrícola, a produção de energia elétrica e as atividades de lazer e recreação, bem como a preservação da vida aquática (PARANÁ, 2010a).

A Lei estadual nº 12.726/99 institui a Política Estadual de Recursos Hídricos no Paraná, além de adotar as bacias hidrográficas como unidade de planejamento, reconhecendo a água como um bem finito e vulnerável e o seu valor econômico (PARANÁ, 1999).

Uma bacia hidrográfica, é uma porção territorial em que as águas provenientes das chuvas, das montanhas, subterrâneas ou de outros rios escoam para um determinado curso d'água. No Paraná, são estabelecidas em 16 unidades: Litorânea, Iguaçu, Ribeira, Itararé, Cinzas, Tibagi, Ivaí, Paranapanema 1, Paranapanema 2, Paranapanema 3, Paranapanema 4, Pirapó, Paraná 1, Paraná 2, Paraná 3 e Piquiri. A Bacia do Rio Iguaçu, Tibagi e Ivaí são divididas em unidades hidrográficas de gestão de recursos hídricos, conhecidas como sub-bacias (PARANÁ, 2010a).

A região hidrográfica do rio Ivaí abrange um território que abriga uma população de 1.229.767 habitantes, sendo que grande parte dessa população se encontra em Maringá, Apucarana e Campo Mourão, que são as principais cidades da bacia. Por sua vez, a região hidrográfica do rio Tibagi abriga uma população de 1.493.876 habitantes, sendo Londrina e Ponta Grossa as principais cidades (PARANÁ, 2010b).

A maioria das bacias hidrográficas do estado do Paraná, também fazem parte da grande região hidrográfica nacional do rio Paraná, com a exceção das localizadas ao leste, que compõem a região hidrográfica nacional do atlântico sudeste. Os trabalhos nacionais e internacionais sobre o clima geralmente utilizam de regiões hidrográficas nacionais como área de pesquisa (PARANÁ, 2010a, 2010b).

As questões climáticas entraram em maior evidência a partir de 1980, uma prova disso é a criação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel of Climate Change – IPCC*), que foi criado com objetivo de realizar avaliações regulares de base científica da mudança do clima, seus impactos e riscos futuros e opções de adaptação e mitigação (IPCC, 2013a). Esta organização formada por pesquisadores de diferentes países, já apresentou uma série de relatórios sobre as mudanças climáticas globais que vem acontecendo e que futuramente poderão ser de magnitude muito maior, a partir das políticas públicas tomadas na atualidade.

O quinto relatório do *IPCC* (AR5), teve grande repercussão pela projeção da temperatura média global apresentada, indicando que no pior cenário de mudanças climáticas a temperatura poderia variar de 2,6 °C à 4,8 °C até o fim do século (IPCC, 2013b). O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, ao realizar estudos nos mesmos moldes dos apresentados pela organização internacional, chegou as mesmas conclusões para o Brasil, de que essa alteração na temperatura pode provocar várias outras alterações no meio, diretas ou não, como o aumento do nível e pH do mar, do ciclo e intensidade das precipitações e etc. (PBMC, 2017).

Mendonça (2006) afirmou que as mudanças climáticas influenciarão na evaporação e pluviosidade, causando chuvas intensas em algumas áreas e em outras áreas poderão haver secas, dificultado o cultivo de certas culturas agrícolas.

Diante disso, este trabalho teve como objetivo principal projetar alterações hidroclimatológicas nas sub-bacias do baixo rio Ivaí e alto rio Tibagi no estado do Paraná, por meio de simulações de cenários impactados por mudanças climáticas no século XXI. Para tanto, foram elaborados três artigos que são apresentados em formato de capítulos, compondo uma dissertação acerca da temática proposta.

O primeiro artigo (capítulo 1) teve como objetivo avaliar a técnica de krigagem ordinária, utilizando o modelo geoestatístico estável, no preenchimento de falhas em séries mensais de precipitação pluviométrica, bem como na sua espacialização em períodos sazonais, localizadas em regiões climaticamente distintas. O segundo artigo (capítulo 2) apresenta um estudo que objetivou desenvolver um modelo híbrido determinístico-estocástico de chuva-vazão, utilizando para tanto, registros hidroclimatológicos históricos das sub-bacias, ainda nas mesmas regiões, sendo nas sub-bacias do baixo Rio Ivaí e do Alto Rio Tibagi. Por sua vez, o terceiro artigo (capítulo 3) foi realizado com o objetivo de projetar as vazões em períodos sazonais e anual em ambas sub-bacias, localizadas em regiões climaticamente distintas no estado do Paraná, utilizando para tanto, um modelo chuva-vazão híbrido determinístico-estocástico acoplado ao gerador de dados climáticos PGECLIMA_R, cujo qual, no processo de

simulação da precipitação, pode gerar perturbações estatísticas como uma consequência da elevação da temperatura do ar, que por sua vez, está prevista para o final do século XXI conforme cenários de mudanças climáticas descritos no quinto relatório do *IPCC* (IPCC, 2013).

Nesse sentido, é possível observar que a divisão do trabalho se baseou em uma sequência ordenada do objetivo principal, que dependia de dados pluviométricos e fluviométricos. A partir dos dados pluviométricos, analisados no primeiro capítulo, foi possível observar e caracterizar o regime de chuvas nas duas sub-bacias em questão, regime este que foi representado espacialmente e que, posteriormente, foi utilizado no terceiro capítulo. Em conjunto com os dados de precipitação, no segundo capítulo, fez-se uso de dados históricos de fluviometria, a fim de ambos serem aplicados no desenvolvimento de um modelo que pudesse simular a vazões presentes e futuras. Sendo assim, o terceiro capítulo deste trabalho, foi composto por dados pluviômetros, que foram impactos climaticamente, utilizando para tanto, o programa *PGECLIMA_R*, tendo em vista as possíveis mudanças climáticas até o final do século. Os dados pluviométricos, foram utilizados como variável de entrada para o modelo chuva-vazão, que conseqüentemente apresentou vazões impactadas. A precipitação, assim como no primeiro estudo, foi representada espacialmente por meio de uma interpolação geoestatística, enquanto que a vazão foi representada de forma pontual.

REVISÃO GERAL

BACIAS HIDROGRÁFICAS DO PARANÁ

O estado do Paraná está inserido na região Sul do Brasil, fazendo fronteira com os estados brasileiros de São Paulo e Santa Catarina, e com o Paraguai e Uruguai. De acordo com a SEMA (2010), o estado do Paraná tem uma área de 196.490,1 km², ocupando uma posição de transição entre regiões tropicais e subtropicais, caracterizando-se como um território que apresenta uma variedade de clima, relevo, hidrografia, solos, vegetação, altitude, e latitude, propiciando diferentes culturas agrícolas e núcleos populacionais.

Este estado é composto por 16 bacias hidrográficas, sendo elas: a bacia Litorânea, a bacia do Ribeira, a bacia do Cinzas, a bacia do Iguaçu, as bacias do Paraná 1, 2 e 3, a bacia do Tibagi, a bacia do Ivaí, a bacia do Piquiri, a bacia do Pirapó, a bacia do Itararé, as bacias do Paranapanema 1, 2, 3 e 4.

A bacia hidrográfica, por definição de Tucci e Braga (2003), é a área de captação de água da precipitação, demarcada por divisores topográficos, onde toda a água captada converge para um único ponto de saída.

Dada a grande importância da água como via de circulação para transporte, para a geração de energia elétrica, como fonte de abastecimento urbano e industrial e irrigação agrícola, a produção de energia elétrica e as atividades de lazer e recreação e caminho para a diluição de efluentes domésticos e industriais, a bacia hidrográfica tem se transformado em uma unidade básica para planejamento e gestão ambiental. Esse pensamento é corroborado por meio da Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), lei nº 9.433 (BRASIL, 1997), também conhecida como a Lei das Águas, que determina que a bacia hidrográfica é a unidade territorial de atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

A lei Estadual de Recursos Hídricos, nº 12.726 (PARANÁ, 1999), elenca como princípios a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento, os usos múltiplos, o reconhecimento da água como um bem finito e vulnerável, o reconhecimento do valor econômico da água e o da gestão descentralizada e participativa.

O planejamento é de grande importância, visto a indiscutível necessidade do uso racional e consciente na utilização dos recursos hídricos para garantir a sobrevivência das futuras gerações. Dessa forma, o conhecimento dos padrões predominantes de precipitação pluviométrica em diferentes escalas e sua variabilidade tem uma importância ainda maior no planejamento dos recursos hídricos, no estudo hidrológico, no planejamento urbano e no

planejamento agrícola, entre outros. Segundo Tommaselli (2012), o regime pluviométrico e mudanças de cobertura da terra, são elementos que podem modificar o fluxo dos rios.

Um dos motivos que justificam adotar a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento é a de que todas as atividades realizadas na bacia desenvolvida por indústrias, propriedades rurais e cidades refletem na qualidade da água do rio, desde suas nascentes até a sua foz, sendo uma relação de causa-efeito.

Bacia do rio Ivaí e do rio Tibagi

De acordo com a SEMA (2010), o rio Ivaí surge da confluência dos rios dos Patos e São João, na região sul do estado do Paraná, precisamente na região denominada Serra da Boa Esperança, na divisa dos municípios de Prudentópolis e Ivaí, percorrendo 680 km. Por outro lado, o rio Tibagi tem sua nascente localizada na Serra das Almas entre Ponta Grossa e o município de Palmeira, possuindo 550km de extensão. Respectivamente, cada bacia corresponde à 12% e 13% do território paranaense.

As duas unidades hidrográficas são grandes extensões territoriais que compõem a bacia hidrográfica do Paraná, e de acordo com Andrade e Nery (2011) e Leite, Adacheski e Virgens Filho (2011), as duas áreas sofrem efeitos de massas de ar vinculadas à Oscilação Sul (ENOS) cuja ocorrência afeta positivamente ou negativamente os índices anuais de pluviosidade em anos de El Niño e La Niña.

Segundo a classificação de Köppen (KÖPPEN; GEIGER, 1928), o clima predominante na bacia do rio Ivaí, incluindo o baixo Ivaí, é o Cfa, enquanto a bacia do rio Tibagi é mista, com predominância do clima Cfb no alto Tibagi (CAVIGLIONE et al., 2000; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2002). O clima Cfa é caracterizado como subtropical, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, sem estação seca definida, já o clima Cfb é considerado um clima subtropical temperado propriamente dito, com verões frescos e sem estação seca definida (PARANÁ, 2009; ITCG, 2008).

O estudo realizado por Mendonça e Danni-Oliveira (2002) compara os aspectos climatológicos dentro da bacia do rio Tibagi. Na área do alto Tibagi (composta pelas cidades Teixeira Soares, Castro e Ponta Grossa) o inverno é, predominantemente, mais rigoroso e registra uma ocorrência maior de geadas do que a área do baixo Tibagi. De acordo com os autores, os valores térmicos em Ponta Grossa, no outono, tendem ao aquecimento, enquanto no restante do ano a tendência é de redução das temperaturas, já em Teixeira Soares esses valores

retratam um resfriamento nos meses de julho e setembro e uma tendência ao aquecimento no resto do ano.

Caramori (1989) citado por Baldo (2006), afirma que na porção do baixo Ivaí, os maiores totais médios mensais de temperatura ocorrem em dezembro, janeiro e outubro, enquanto os menores valores acontecem nos meses de agosto, julho e abril e as geadas começam a ocorrer no início de maio, com uma baixa frequência no primeiro decêndio (uma a cada 15 anos). O fenômeno concentra-se mais intensamente nos meses de junho e julho, quando apresentam elevada frequência.

MODELOS HIDROLÓGICOS

O número escasso de postos fluviométricos, as falhas encontradas em séries fluviométricas e a grande dificuldade de se obter dados de vazão de pequenas bacias, são motivos para que métodos e fórmulas geralmente sejam empregados, utilizando de dados de precipitação, para a estimativa da vazão (PAIVA; PAIVA, 2003).

Conhecer a dinâmica entre a relação da chuva com a vazão auxilia na gestão hidrológica, sendo assim, de acordo com Almeida e Serra (2017), há aproximadamente um século, a partir do equacionamento de alguns processos hidrológicos, foi que surgiu a modelagem hidrológica.

Segundo Paiva e Paiva (2003), ao associar vazão, características físicas e climáticas das bacias, uma relação que pode ser feita de diversas formas, inclusive por meio da equação de regressão, as características mais utilizadas são: a área de drenagem, a precipitação média, a declividade e o comprimento do curso d'água principal e a densidade de drenagem.

A fim de obter séries completas e longas de variáveis necessárias para a realização de uma modelagem hidrológica, por vezes, são utilizados simuladores climatológicos. Richardson (1981), que foi um dos pioneiros a pesquisar sobre o tema, apresentou um modelo para geração estocástica de dados climáticos diários, que em conjunto com modelos matemáticos determinísticos, foram utilizados para avaliar mudanças hidrológicas.

Recentemente, o PGECLIMA_R (VIRGENS FILHO et al, 2013) é um dos simuladores estocásticos diários que vem sendo utilizados na simulação de dados climáticos em diversas áreas como saúde (LEITE et al., 2014), construção civil (SGARBOSSA; VIRGENS FILHO, 2020), setor florestal (WREGGE et al., 2016), recursos do solo (NETTO; VIRGENS FILHO; NEVES, 2018), assim como sendo antecessor da aplicação de modelos hidrológicos (NEVES et al., 2020).

Outra ferramenta que pode ser utilizada para estimar as variáveis climatológicas são os modelos climatológicos globais ou regionais, conhecidos respectivamente, como MCG's ou MCR's. Esses modelos de baseiam em aspectos físicos para gerar seus resultados. Os modelos existentes podem ser utilizados isolados, ou ainda, acoplados, como é no caso do IPCC, que utilizou no AR5, os modelos acoplados CMIP5, composto por 32 MCG's (IPCC, 2013).

No que diz respeito aos modelos hidrológicos mais aplicados no Brasil, são os modelos físicos "SWAT", "IPH II" e o "MGB-IPH". O "*Soil and Water Assessment Tool*" foi desenvolvido pelo departamento de agricultura dos EUA (USDA), o que reforça a necessidade de sua calibração para que seja aplicado. É um modelo distribuído que permite a análise de diferentes processos em bacias hidrográficas a partir de parâmetros espacialmente distribuídos em nível de sub-bacias e em caráter temporal contínuo e diário (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994).

O modelo "IPH II", desenvolvido por Tucci (1998), recebeu tal nome por ter sido desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidrológicas, vinculado à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e trata-se de um modelo hidrológico concentrado com sete parâmetros que podem ser calibrados. O modelo "MGB-IPH", elaborado por Collischonn e Tucci (2001), é um modelo hidrológico distribuído de simulação contínua, sendo composto por módulos específicos que representam matematicamente os processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica de mais de 10^4 km².

MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, promulgada pelo Decreto nº 2.652 de 1998, define que mudança do clima pode ocorrer de maneira a ser, direta ou indiretamente, atribuída à atividade humana que altere a composição da atmosfera mundial e que se some àquela provocada pela variabilidade climática natural (BRASIL, 1998). Tucci e Braga (2003), reforçam que as mudanças climáticas são atribuídas às atividades humanas que alteram a composição atmosférica.

Em 1988, a Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization* - WMO) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (*United Nations Environment Programme* - PNUMA) estabeleceram o IPCC, que é responsável por revisar estudos científicos existentes para avaliar possíveis cenários futuros de mudanças climáticas. Conforme Marengo (2008), o IPCC foi instituído para fornecer informações técnicas e científicas sobre as mudanças

climáticas. O processo utilizado para produzir essas avaliações é criado para assegurar alta credibilidade tanto na comunidade científica como na política.

O *IPCC* publicou cinco Relatórios de Avaliação (*Assessment Reports - AR*) em 1990, 1995, 2001, 2007 e o quinto em 2013. Cada um deles é composto por quatro partes, sendo uma para cada um dos Grupos de Trabalho mais uma síntese. De cada relatório é feito um sumário para os tomadores de decisão, ou seja, para ser lido pelos vários setores que podem influir em políticas públicas e nas ações de adaptação e mitigação (INICIATIVA VERDE, 2015).

Sendo assim, o último relatório do *IPCC* (*IPCC*, 2013) documentou que a influência humana no sistema climático é clara e, as recentes emissões antropogênicas de Gases de Efeito Estufa (GEE) são as mais elevadas da história. Essas emissões aumentaram desde a era pré-industrial, impulsionadas em grande parte pelo crescimento econômico e populacional, sendo que de 2000 a 2010, ocorreram as emissões mais altas registradas.

Outro fator que contribuiu com os dados apurados foi o rápido crescimento demográfico registrado entre 1960 e 1980, quando a população mundial passou de 1,65 bilhão para 6 bilhões, registrando o maior pico na taxa média de crescimento anual (2% ao ano) e o maior incremento anual de pessoas por ano (86 milhões ao ano) (OJIMA, 2011). Portanto, pode-se relacionar o aumento das emissões de GEE com as altas taxas de consumismo e crescimento populacional.

Além disso, mais da metade do aumento da temperatura média global da superfície observada entre 1951 e 2010 foi causada pelo crescimento das concentrações antropogênicas dos GEE e outras fontes combinadas. Observou-se que em cada uma das últimas três décadas, registrou a superfície da Terra sucessivamente mais quente do que qualquer década anterior desde 1850. O período entre 1983 e 2012 foi provavelmente o mais quente de 30 anos dos últimos 1400 anos (*IPCC*, 2014).

O aquecimento global do planeta implica em mudanças, não somente na variabilidade dos valores de temperatura, mas também no ritmo esperado de outras variáveis climáticas como a precipitação pluvial, os ventos e a umidade relativa do ar. Os dados da temperatura média global, combinada com a da superfície terrestre e oceânica, estimados por uma tendência linear, mostram um aquecimento médio de 0,85 °C no período de 1880 a 2012. O aumento total entre a média do período 1850-1900 e o período 2003-2012 é de 0,78 °C, com base no conjunto de dados mais longo disponível (*IPCC*, 2014).

Um relatório especial publicado pelo *IPCC*, como prévia do sexto relatório que está sendo elaborado, afirma que a média de temperatura global da superfície observada para a década 2006–2015 foi de 0,87 °C, valor acima da média no período de 1850 a 1900 (confiança

estatística muito alta). Estima-se que o aquecimento global antropogênico esteja aumentando a 0,2 °C por década, devido a emissões passadas e contínuas (IPCC, 2018).

Os impactos causados pelas mudanças climáticas são de acordo com as localidades, sendo dependentes das características geológicas de cada região bioclimática, níveis de desenvolvimento e vulnerabilidade, e das escolhas e implementação das ações de adaptação e mitigação de cada local (IPCC, 2018).

Silva *et al.* (2015) analisaram as tendências de extremos climáticos a partir de séries de dados diários de temperatura e precipitação durante 35 anos de 20 postos meteorológicas do Paraná e, seus indicadores apontaram um aumento significativo nas temperaturas em grande parte do estado. Os autores verificaram que os índices de temperatura mínima tendem a ser significativamente mais elevados que os de temperatura máxima. Através da pesquisa pode-se concluir, que a porcentagem de dias e noites quentes no estado aumentou consideravelmente a uma taxa de 0,1 a 0,4% ao ano entre 1976 e 2010. Da mesma forma, destaca-se um aumento aproximado nas médias anuais das temperaturas máximas e mínimas de 0,02°C.ano⁻¹, no mesmo período, em quase todo o estado.

Segundo o IPCC (2018), o aquecimento ocorre a partir de emissões antrópicas desde o período pré-industrial e deverá persistir por séculos a até milênios, ou seja, continuará a causar novas mudanças de longo prazo no sistema climático. Supõe-se que algumas áreas sofreriam prejuízo com o aumento do calor, escassez de água e alimentos.

Confalonieri (2003) explica que o clima atua na saúde humana de duas formas: de maneira contínua, influenciando os fenômenos biológicos, e de forma episódica, através dos eventos climáticos extremos. No primeiro caso, os fatores tais como temperatura, umidade relativa do ar, precipitação pluvial e a evapotranspiração, afetam a capacidade de reprodução e sobrevivência de agentes patogênicos e dos vetores de agentes infecciosos, tais como os mosquitos envolvidos na transmissão da malária, da febre, da dengue, entre outras.

O aumento da temperatura global intensifica também a evaporação nos corpos hídricos e a evapotranspiração, que provem da vegetação. Isso reduz a água residente no solo e nos corpos hídricos e, pode contribuir na intensidade das chuvas (PRIMAVESI; ARZABE; PEDREIRA, 2007; TUCCI; BRAGA, 2003).

Outrossim, as projeções das mudanças climáticas amplificam os riscos já existentes relacionados ao clima e criam novos riscos para os sistemas naturais e humanos (INICIATIVA VERDE, 2015). Estima-se que a fração da população mundial que enfrente escassez de água e a fração afetada por grandes inundações de rios aumentem de nível, com o aquecimento (IPCC, 2014).

A mudança climática pode reduzir a qualidade da água não tratada e apresentar riscos à qualidade da água potável, mesmo com o tratamento convencional. A isso, pode se atribuir a interação entre os seguintes fatores: o aumento da temperatura; o aumento da sedimentação, o e da concentração de nutrientes e cargas poluentes provenientes de chuvas intensas; o aumento da concentração de poluentes durante as secas; interrupção de instalações de tratamento durante as cheias (IPCC, 2014).

CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE KRIGAGEM ORDINÁRIA UTILIZANDO O MODELO GEOESTATÍSTICO ESTÁVEL, NO PREENCHIMENTO DE FALHAS EM SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA, DE SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS LOCALIZADAS EM REGIÕES CLIMATICAMENTE DISTINTAS NO ESTADO DO PARANÁ

RESUMO

O monitoramento hidroclimatológico é de grande relevância nos problemas concernentes às questões socioeconômicas e ambientais. A precipitação pluviométrica é um fator impactante no inter-relacionamento entre clima e hidrografia, sendo importante a avaliação de suas características e distribuição espaço-temporal, sendo utilizada como ferramenta no planejamento territorial urbano. O presente trabalho objetivou avaliar a técnica de krigagem ordinária, utilizando o modelo geoestatístico estável para o preenchimento de falhas em séries mensais de precipitação, bem como analisar sua espacialização em períodos sazonal e anual nas sub-bacias hidrográficas do Alto Rio Tibagi e do Baixo Rio Ivaí, localizadas em regiões climaticamente distintas no Estado do Paraná. Foram utilizados dados mensais de postos pluviométricos pertencentes ao Instituto Águas Paraná, INMET, e IAPAR no período de 1974-2018. O *software* ArcGis foi usado para interpolação e geração dos mapas georreferenciados e uma análise estatística para verificação da eficiência da modelagem foi conduzida por meio da avaliação das estatísticas EMA, REQM, índices r , d (Willmott), NS (Nash-Sutcliffe) e do teste de Wilcoxon a 5%. De maneira geral, as classes de precipitação foram representadas similarmente nos mapas gerados com os dados observados e preenchidos a partir do modelo estável. A análise dos indicadores estatísticos ratificou satisfatoriamente a eficiência da modelagem nos períodos sazonais e anual, mostrando valores relativamente baixos de EMA e REQM, assim como valores expressivos dos índices r , d e NS, principalmente, na sub-bacia do Alto Rio Tibagi. Mesmo estando em zonas climáticas distintas, não foram verificadas interferências no processo de modelagem e espacialização dos dados nas sub-bacias, motivadas por fatores locais.

Palavras-chave: Interpolação, representação espacial, análise estatística.

ABSTRACT

Hydroclimatic monitoring is of great relevance in the problems related to socioeconomic and environmental issues. Rainfall is an impacting factor in the interrelationship between climate and hydrography, and it is important to evaluate its characteristics and space-temporal distribution. The present work aims to evaluate an ordinary kriging technique, using the stable geostatistical model in to fill monthly series with faults, as well to analyze its spatialization in seasonal and annual statistics in the hydrographic sub-basins of the Upper Tibagi River and the Lower Ivaí River, located in different climatic regions in the State of Paraná. Monthly data of rainfall stations belonging to the Instituto Águas Paraná, INMET and IAPAR from 1974 to 2018 were used. ArcGis software was used for interpolation and generation of georeferenced maps and a statistical analysis to verify the efficiency of the modeling, was conducted using the evaluation of EMA, REQM, r , d (Willmott), NS (Nash-Sutcliffe) statistics and Wilcoxon test at 5%. In general, the rainfall classes were represented in a similar way in the maps generated

with data observed and filled using the stable model. An analysis of the statistical indicators ratified satisfactorily an efficiency of the modeling in the seasonal and annual periods, showing low minimum values of EMA and REQM, as well as expressive values of the indexes r, d and NS, mainly, in the sub-basin of the Upper Tibagi River. Even being in different climatic zones, there were no interferences in the data modeling and spatialization process in the sub-basins, motivated by local factors.

Keywords: Interpolation, spatial representation, statistics analysis.

1.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das condições climáticas e hidrológicas de longo tempo, permeia aspectos fundamentais no progresso da população humana em especial no processo de urbanização. Com o crescimento das atividades econômicas baseadas em sustentabilidade, algumas áreas estratégicas das atividades humanas como agricultura, gestão de recursos hídricos e ecologia necessitam de informações hidroclimatológicas para auxílio na tomada de decisões.

Entende-se que o clima é um conjunto de condições atmosféricas médias que caracteriza uma região, que de acordo com Deitch, Sapundjieff e Feirer (2017), se constitui sendo uma das características do sistema humano-natural, visto que influencia fortemente na biota, se estendendo ao desenvolvimento humano.

Os Sistemas de Classificação Climática (SCC) são empregados com o intuito de sintetizar as características climáticas de um dado local, ajudando a identificar espacialmente as áreas com características climáticas similares (MARTINS et al., 2018). O SCC de Köppen e Geiger (KÖPPEN; GEIGER, 1928) é um dos mais aplicados e utiliza-se de dados mensais de temperatura do ar e da precipitação pluvial média em sua aplicação.

Havendo entendimento de fatores hidrológicos e climáticos, pode-se elaborar uma gestão para que não haja grandes imprevistos para uma comunidade ou população.

Apesar das pesquisas que utilizam fatores hidroclimatológicos serem aplicadas em áreas que podem considerar alguns tipos de critérios na delimitação da área analisada, como limites municipais e estaduais, as bacias hidrográficas são as áreas preferencialmente utilizadas para o estudo do ciclo hidrológico. Inclusive, dentro deste contexto, a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), lei nº 9.4330 (BRASIL,1997), também conhecida como a Lei das Águas, tem como quinto fundamento que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implementação da PNRH e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Freire e Baldo (2017) sintetizam a justificativa de vários autores ao trabalharem com

bacias hidrográficas como base para análises ambientais, considerando o ciclo hidrológico, no qual a precipitação é a entrada efetiva de água na bacia hidrográfica que tem uma grande quantidade convertida para um único ponto de menor cota da área, ou seja, a precipitação que incide na área pode contribuir em toda extensão do rio e, conseqüentemente, em toda a bacia hidrográfica.

A precipitação pluviométrica é um dos principais elementos do ciclo hidrológico e é a forma mais importante de precipitação. Portanto é essencial entender suas características, assim como sua distribuição espaço-temporal para apoiar a formulação de medidas específicas de políticas públicas e a implementação de políticas econômicas (BRITO *et al.*, 2016).

Molina-Sanchis *et al.* (2016), explicam que a maioria dos estudos que relacionam precipitação e hidrologia classificam as chuvas em eventos, o que não é algo simples, visto que a distribuição da precipitação no tempo é altamente irregular.

Sardinha *et al.* (2016) afirmam que estudos hidroclimatológicos são ferramentas que compõem o planejamento urbano, a fim de atuarem por meio da mitigação e adaptação no tocantes aos desastres naturais que podem causar perturbação do funcionamento de uma comunidade ou de uma sociedade ao envolver perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais de grande extensão, afetando a capacidade da comunidade ou da sociedade de arcar com seus próprios recursos.

A pluviosidade é associada aos maiores impactos sociais e econômicos, podendo ser relacionados a excesso, como inundações, ou escassez, como as secas (BRITO *et al.*, 2016). Aparecido *et al.* (2016) e Alves *et al.* (2016) afirmam que o conhecimento sobre a sazonalidade e o padrão espacial, é necessário em pesquisas sobre zonas de culturas, projetos de irrigação e mudanças climáticas, a fim de manter a sustentabilidade, além de uma infinidade de atividades nas quais a precipitação tem uma interferência menos direta, mas não menos importante.

O monitoramento das variáveis hidroclimatológicas é uma ferramenta necessária para gestão dos recursos hídricos, que é essencial para o seu gerenciamento. Bielenki Júnior *et al.* (2018) explicam que é comum encontrar falhas em dados pluviométricos, seja por falta de observador, erros nos mecanismos de registro, perda de anotações e dados ou na transcrição dos registros feitos pelos operadores, e também pelo fechamento de pontos de observação.

Entretanto, a maioria das aplicações exigem séries completas, sendo necessário o preenchimento das falhas que, dependendo da porcentagem das mesmas, podem resultar em valores que apresentam pouca conformidade com a realidade. Bielenki Júnior *et al.* (2018) relatam dificuldades em encontrar estações com séries históricas relativamente longas e sem

falhas, sendo uma situação comum principalmente em bacias com baixo potencial hídrico e pouco urbanizadas.

Há uma variedade de métodos para o preenchimento destas lacunas. Um dos métodos mais conhecidos para a estimativa de dados pluviométricos é o Polígono de Thiessen, porém, de acordo com Marciano, Barbosa e Silva (2018) não produz resultados satisfatórios para aplicação em terrenos acidentados.

Bier e Ferraz (2017) realizaram um estudo na região sul do Brasil onde avaliaram algumas das várias metodologias de preenchimento de falhas de pluviosidade, como a média aritmética simples (MA), a regressão linear múltipla (RLM), a ponderação regional (PR) e a interpolação geoestatística do inverso da distância ponderada (IDP), também conhecida pela sigla em inglês *IDW- Inverse Distance Weighted*. Todos os métodos aplicados utilizaram dados dos postos vizinhos mais próximos para o preenchimento das séries e nenhum deles se apresentou como satisfatório para utilização na região avaliada.

Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são utilizados para a manipulação de séries históricas de dados geoespacializados. Segundo o IBGE (2019), um dado georreferenciado, é aquele em que a dimensão espacial está associada à sua localização na superfície terrestre, em determinado instante ou período de tempo e juntamente às coordenadas geográficas ou cartográficas, onde se encontra o conhecimento científico sobre um elemento. Para que esses dados sejam utilizados de maneira efetiva em uma área, é necessário que haja a representação desses dados pontuais gerando um produto em forma de grade, utilizando-se de técnicas de interpolação espacial.

O processo de interpolação se baseia no raciocínio de que, em média, o valor do atributo em um determinado ponto não amostrado, tende a ser semelhante aos valores encontrados em pontos mais próximos do que os valores observados em locais mais distantes (MORAIS; ARAÚJO, 2015).

A interpolação pode ser classificada de várias formas, em relação à utilização do conjunto de pontos, podendo ser locais ou regionais, ou em relação a avaliação de erros associados aos valores interpolados, podendo ser determinísticos ou geoestatísticos. ESRI (2003) explica que os métodos determinísticos usam apenas funções matemáticas para interpolação, enquanto que os métodos geoestatísticos, além de funções matemáticas, utilizam estatística, podendo ser usados para avaliar a incerteza das previsões.

De acordo com Pires *et al.* (2016), os interpoladores determinísticos fazem uso de métodos tradicionais de estimativa por médias ponderadas ou por médias móveis, como ocorre no inverso de distância ponderada (IDP) e no vizinho natural (VN), enquanto que a Krigagem

e a Cokrigagem são interpoladores geoestatísticos, e que, segundo os trabalhos realizados por Chaves, Conceição e Guerrero (2018) e Ataíde *et al.* (2020), apresentam vantagens em relação aos interpoladores determinísticos, uma vez que requerem análise variográfica, que dispõe de modelagem adequada na determinação do semivariograma que, conforme Pires *et al.* (2016), é mais do que uma função da distância entre pontos, e utiliza-se da existência ou não do efeito pepita, da amplitude e da presença de anisotropia, que são elementos geoestatísticos.

Para Yamamoto e Landim (2013) a interpolação geoestatística calcula estimativas em um âmbito regido por um fenômeno natural com distribuição no espaço e, desse modo, supõe que os valores das variáveis, consideradas como regionalizadas, sejam espacialmente correlacionados. É interessante perceber o aspecto no qual as variáveis regionalizadas podem ser tachadas de incoerentes, visto suas características estruturais e de aleatoriedade (LADIM, 2006).

Em relação à krigagem, Machado *et al.* (2010), afirmam que a mesma utiliza-se da dependência espacial contida no semivariograma entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro da área espacial analisada, sem tendência e com variância mínima, sendo ótimos estimadores para a precipitação, que de acordo com Freire e Baldo (2017), possui variabilidade considerável no tempo e no espaço. Existem vários tipos de krigagem, como a krigagem universal, a krigagem simples e a krigagem ordinária. Ainda de acordo com autor, a cokrigagem é uma regressão linear que utiliza duas ou mais variáveis em um determinado local, em um mesmo domínio espacial que apresentam certo grau de correlação utilizando os dados em diferentes propriedades. Destaca-se que a cokrigagem, é classificada por alguns autores como um método a parte de interpolação, mas também pode ser classificada como um tipo de krigagem, como encontrado em Cunha Neto *et al.* (2019).

A krigagem universal é uma técnica de interpolação que incorpora correlação espacial entre as observações e as covariáveis medidas no mesmo modelo de previsão (STEIN; CORSTEN, 1991). Em teoria, a krigagem simples é aplicável a fenômenos que não apresentam uma tendência devido à suposição de estacionariedade, ou seja, quando suas características estatísticas são constantes ao longo do tempo, diferentemente da krigagem ordinária que pondera a média flutuante por toda a área, utilizada quando não apresenta estacionariedade (Ma, 2019).

A krigagem ordinária é um dos métodos de interpolação estocástica mais preferidos para a estimativa da precipitação espacial a partir dos dados pontuais da precipitação (RIGHI; BASSO, 2016; ALVES *et al.*, 2016; PIRES *et al.*, 2016). Kumar Adhikary, Muttil e Gokhan Yilmaz (2016) explicam que a eficiência da sua modelagem depende muito do modelo de

variograma, sendo que a maior dificuldade associada ao método é a dificuldade de calibrar os modelos, que tendem a ser o esférico, exponencial ou gaussiano, como é possível observar em Alves *et al.* (2016), Pires *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2018).

Giustini, Brillì e Patera (2016), com o objetivo de mapearem os isótopos estáveis de oxigênio da precipitação na Itália, analisaram algumas técnicas de interpolação e alguns modelos de variograma e decidiram aplicar a krigagem ordinária com o modelo estável de semivariograma em seus dados, tendo em vista que esta modelagem apresentou o menor erro estimado.

O modelo estável é encontrado em alguns *softwares* de SIG's, sendo os mais conhecidos o ArcGis e o Vesper, sendo uma combinação dos modelos exponencial e gaussiano. Este modelo apresenta um parâmetro de ajuste do semivariograma, que varia de 0 a 2, sendo que o valor nulo, torna o modelo estável idêntico ao modelo exponencial, e se o parâmetro ajustado resultar em 2, o modelo passa a ser o gaussiano (FERREIRA; SANTOS; RODRIGUES, 2013). Apesar de ser pouco utilizado, em pesquisas hidroclimáticas, o modelo foi aplicado em pesquisas batimétricas (FERREIRA; SANTOS; RODRIGUES, 2013), e em representações espaciais de precipitação (RIGHI; BASSO, 2016).

Diante do exposto, esta pesquisa objetivou avaliar a técnica de krigagem ordinária, utilizando o modelo geoestatístico estável, no preenchimento de falhas em séries mensais de precipitação pluviométrica, bem como analisar sua espacialização em períodos sazonais e anual nas Sub-bacias Hidrográficas do Baixo Rio Ivaí e do Alto Rio Tibagi, localizadas respectivamente em regiões climaticamente distintas no Estado do Paraná.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

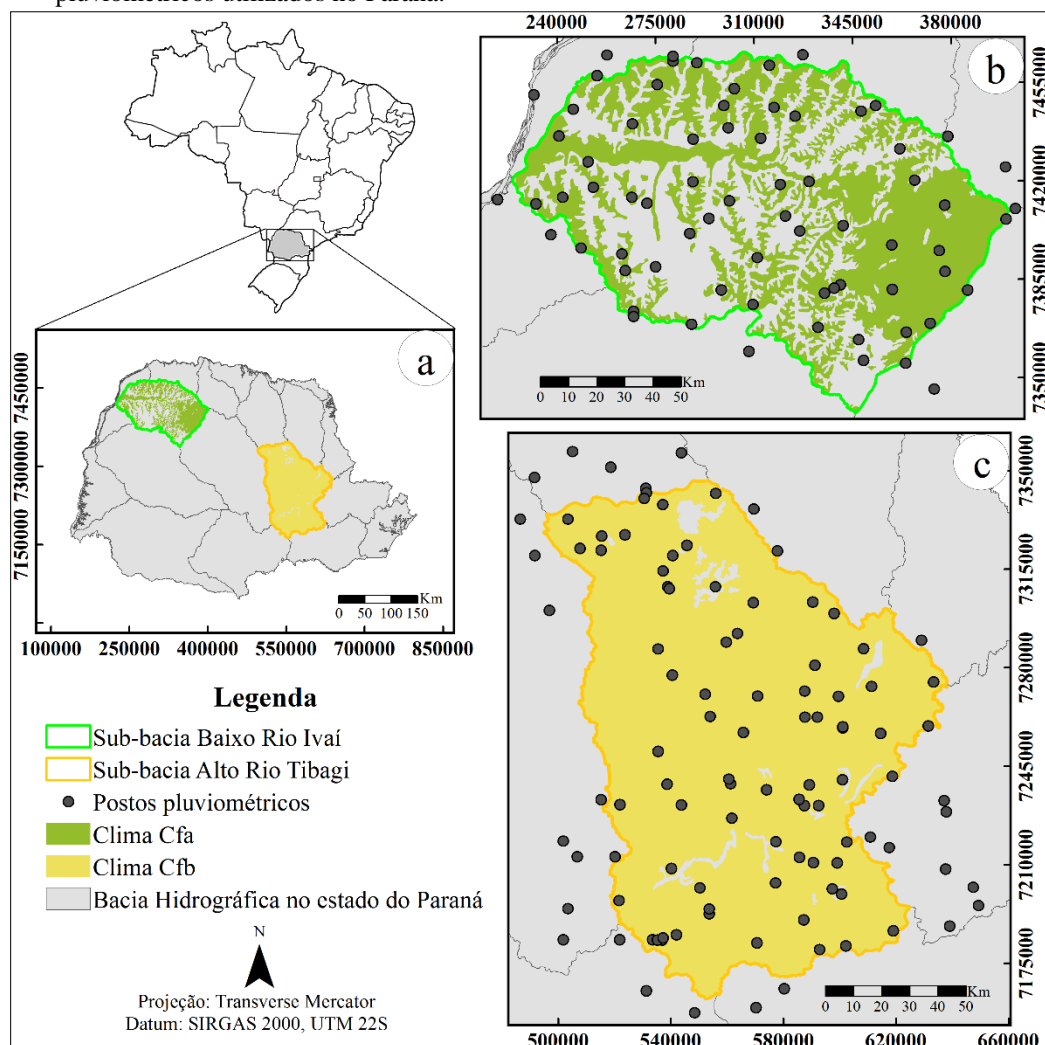
Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Estatística Computacional e Aplicada – LECA da Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG, localizada no Estado do Paraná.

De acordo com SEMARH (2010), o estado do Paraná tem uma área de 196.490,1 km² e está situado na região sul do Brasil, fazendo divisa ao norte com o estado de São Paulo e ao sul com o estado de Santa Catarina, possuindo 16 bacias hidrográficas, entre elas a bacia do rio Ivaí e do rio Tibagi.

O estado do Paraná apresenta os tipos climáticos dominantes Cfa e Cfb, na porção noroeste e na porção sudeste, próximo ao centro, respectivamente (Rauen *et al.*, 1977; Nitsche *et al.*, 2019), sendo que as Sub-bacias do Baixo Rio Ivaí (SBRI) com área de 13.431,5 km², e

Alto Rio Tibagi (SART), com área de 16.100,4 km², estão inseridas respectivamente em regiões de cada um dos dois tipos climáticos, como mostra a Figura 1.1a.

Figura 1.1 – Localização dos tipos climáticos encontrados na SBRI e na SART, com os respectivos postos pluviométricos utilizados no Paraná.



Fonte: A autora, 2020.

Sobre os componentes que integram os aspectos físicos das bacias, entende-se que rio Ivaí nasce no Segundo Planalto e corta todo o Terceiro Planalto em sentido noroeste. De acordo com Maack (1981), na porção noroeste da bacia do rio Ivaí, encontra-se o arenito da Formação Caiuá do grupo Bauru do período Cretáceo. Essa formação é constituída por apresentar arenitos de coloração vermelho-arroxeadas, conhecida como “terra vermelha”.

Ainda de acordo com o autor, a bacia do rio Tibagi é encontrada nos três planaltos, também denominados como Planalto de Curitiba (primeiro planalto), Planalto de Ponta Grossa (segundo planalto) e o Planalto de Guarapuava (terceiro planalto). A área onde a SART está localizada encontra-se o primeiro planalto representado por rochas do embasamento cristalino, que correspondem aos grupos Castro e Açungui e o segundo planalto, representado

geologicamente pela sequência de sedimentos da Bacia Sedimentar do Paraná, ou seja, desde o Grupo Rio Ivaí até a Formação Botucatu.

Por serem de grandes extensões, as bacias hidrográficas possuem uma variedade muito grande de solos, como argissolos, cambissolos, latossolos e neossolos, que é de predominância do tipo flúvico na SBRI, e litólico na SART (Embrapa, 1999).

Segundo o Manual Técnico da Vegetação Brasileira do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1992), a cobertura vegetal primitiva na bacia hidrográfica do rio Ivaí é formada pela Floresta Ombrófila Mista, savana, estepe e Floresta Estacional Semidecidual, mais presente na SBRI, enquanto que a bacia do rio Tibagi, além de ser também formada Floresta Ombrófila Mista e estepe, apresenta ainda Floresta Ombrófila Densa e os chamados “capões”, onde são encontradas a árvore característica do Paraná, a Araucária angustifolia.

Foram utilizados dados pluviométricos mensais de precipitação provenientes do Instituto Águas Paraná, INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e IAPAR (Instituto Agrônômico do Paraná) dos postos inseridos na área da SBRI e da SART, como se pode observar na Figura 1b e Figura 1c. Com o intuito de melhorar a espacialização, adicionalmente, foram incluídas alguns postos circundantes das bacias avaliadas, cujo período de dados está compreendido e 1974 a 2018, totalizando 45 anos de intervalo histórico. Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas respectivamente informações sobre os postos pluviométricos da SBRI e da SART.

Tabela 1.1 - Postos pluviométricos utilizados na SBRI.

(continua)					
Postos	Coord. Y	Coord. X	Alt.(m)	Código	Agência
Águas do Jacu	7411943	271968	270	2353042	Águas Paraná
Alto alegre	7388001	264314	500	2353046	Águas Paraná
Amaporã	7445923	317193	396	2352051	Águas Paraná
Aparecida do Ivaí	7434713	288459	300	2353041	Águas Paraná
Araruna	7356053	349029	650	2352028	Águas Paraná
Bairro centenário	7371583	267299	550	2353011	Águas Paraná
Bernadelli	7392529	311187	500	2352043	Águas Paraná
Cianorte	7382944	340757	484	23395232	IAPAR
Cianorte-IAPAR	7381781	338559	530	2352019	Águas Paraná
Cianorte-COPEL	7379928	335151	510	2352065	Águas Paraná
Cidade Gaúcha	7412798	301298	422	2352046	Águas Paraná
Comur	7446586	299308	362	2352060	Águas Paraná
Cop. do Norte	7397036	359040	358	2352053	Águas Paraná
Cruz. do Oeste	7368821	287821	480	2353004	Águas Paraná
Dep. José Afonso	7442874	324629	383	2352052	Águas Paraná
Douradina	7414044	266623	450	2353033	Águas Paraná
Doutor Camargo	7395066	375818	500	2352054	Águas Paraná

Tabela 1.1 - Postos pluviométricos utilizados na SBRI.

(continuação)					
Postos	Coord. Y	Coord. X	Alt.(m)	Código	Agência
Eng. Beltrão	7369231	372642	520	2352034	Águas Paraná
Est. criação estado	7446566	353217	480	2352017	Águas Paraná
Estr. Pernambuco	7400663	237849	400	2353026	Águas Paraná
Faz. São Mateus	7461839	289700	292	2253009	Águas Paraná
Floraí	7460884	315444	521	2352037	Águas Paraná
Guairaçá	7450424	231840	530	2252026	Águas Paraná
Guaporema	7464592	257820	400	2352047	Águas Paraná
Herculândia	7420028	367142	300	2353045	Águas Paraná
Icaraíma	7438637	300838	450	2353031	Águas Paraná
Icatu	7457272	254318	399	2253010	Águas Paraná
Igarité	7367748	332770	572	2352031	Águas Paraná
Indianópolis	7402007	326247	501	2352044	Águas Paraná
Ivaitinga	7431269	361896	497	2352039	Águas Paraná
Japurá	7403965	341691	500	2352045	Águas Paraná
Loanda	7462303	281258	494	2253012	Águas Paraná
Loanda-COPEL	7464118	281231	395	2253017	Águas Paraná
Malu	7381288'	359220	474	2352035	Águas Paraná
Maria Helena	7387463	275099	372	2353023	Águas Paraná
Maringá	7410282	454025	542	2351013	Águas Paraná
Maringá-COPEL	7406321	399588	570	2351067	Águas Paraná
Nordestina	7435034	312377	350	2352049	Águas Paraná
Nova esperança	7435723	378916	582	2352062	Águas Paraná
Nova olímpia	7401154	287179	453	2353029	Águas Paraná
Ourizona	7411231	377782	561	2352038	Águas Paraná
Ouroverde	7381128	298468	447	2352042	Águas Paraná
Paranavaí-COPEL	7444638	348114	440	2352064	Águas Paraná
Peabiru	7355002	364000	527	2352029	Águas Paraná
Plan. do Paraná	7453300	359443	433	2352050	Águas Paraná
Porto bananeira	7381092	385937	520	2352010	Águas Paraná
Porto Camargo	7413212	218868	350	2353030	Águas Paraná
Porto jundiá	7435773	240669	300	2353037	Águas Paraná
Porto P. do Norte	7420113	380691	250	2352000	Águas Paraná
Porto São Carlos	7415406	344238	293	2352036	Águas Paraná
Pulinópolis	7424804	399462	430	2351049	Águas Paraná
Querência do Norte	7444322	194579	349	2353010	Águas Paraná
Rondon	7407453	321215	400	2352059	Águas Paraná
Saltinho	7367278	364196	550	2352033	Águas Paraná
Santa Eliza	7395926	248549	441	2353027	Águas Paraná
St. Isabel do Ivaí	7454066	275652	400	2353001	Águas Paraná
Santa Mônica	7406482	294030	380	2353017	Águas Paraná
São José do Ivaí	7440145	266810	350	2353038	Águas Paraná
Silviolândia	7345835	374092	425	2352030	Águas Paraná
Sítio floresta	7387671	377950	339	2352061	Águas Paraná

Tabela 1.1 - Postos pluviométricos utilizados na SBRI.

(conclusão)					
Postos	Coord. Y	Coord. X	Alt.(m)	Código	Agência
Tapejara	7375894	309703	470	2352011	Águas Paraná
Tapira	7419572	288334	401	2353034	Águas Paraná
Taquarimbé	7363448	347225	600	2352032	Águas Paraná
Tuneiras do Oeste	7359259	308252	400	2352012	Águas Paraná
Umuarama IAPAR	7373460	267269	480	2353008	Águas Paraná
Venda do Paulo	7417545	252897	500	2353032	Águas Paraná
Vila Carbonela	7393828	263056	455	2353028	Águas Paraná

Fonte: Adaptado do IAPAR, INMET e INSTITUTO ÁGUAS PARANÁ, 2019.

Tabela 1.2 - Postos pluviométricos utilizados na SART

(continua)					
Postos	Coord. Y	Coord. X	Alt.(m)	Código	Agência
Abapã	7241459	618718	1007	2449026	Águas Paraná
Acamp.Mirandinha	7308788	555796	950	2450029	Águas Paraná
Alto Amparo	7262628	553927	950	2450055	Águas Paraná
Aparição	7262456	587661	1100	2450023	Águas Paraná
Apiava	7197232	521523	872	2550043	Águas Paraná
Bairro biquinha	7299299	598032	1250	2450032	Águas Paraná
Bairro dos pintos	7336408	569458	900	2450047	Águas Paraná
Bairro olarias	7319912	540611	1050	2450033	Águas Paraná
Bairro três vendas	7347646	491551	1011	2351041	Águas Paraná
Barra ribeirão das antas	7342202	531268	1000	2450003	Águas Paraná
Bateias	7232387	649673	890	2549045	Águas Paraná
Bocaina	7236728	574011	950	2450021	Águas Paraná
Bom jardim	7268171	552291	750	2450009	Águas Paraná
Bomjardim do Sul	7231374	521885	900	2550052	Águas Paraná
Boqueirão	7238453	589163	1050	2450022	Águas Paraná
BR-376	7201480	597590	830	2550059	Águas Paraná
Campina alta	7286709	535450	900	2450041	Águas Paraná
Campina do guararema	7280920	591125	1100	2450028	Águas Paraná
Capão alto	7256722	614553	920	2449027	Águas Paraná
Capinzal	7289789	629041	1026	2449032	Águas Paraná
Castro	7259042	601092	1008	83813	INMET
Castro	7258704	601089	1009	2450010	Águas Paraná
Catanduva de fora	7240217	600953	1000	2450024	Águas Paraná
Caxambu	7269789	599484	1100	2450027	Águas Paraná
Cerro azul	7250323	535498	905	2450054	Águas Paraná
Chácara cachoeira	7262392	597155	975	2450013	Águas Paraná
Colônia Iapó	7271715	587579	1015	2450026	Águas Paraná
Colônia Tapera	7218056	602498	1100	2549066	Águas Paraná
Col. Witmarsun	7186571	618993	950	2549065	Águas Paraná
Curiuva	7342004	555927	750	2450046	Águas Paraná
Eng. Rosaldo	7238791	561208	780	2450056	Águas Paraná
Faxinal Grande	7181172	602218	1000	2549064	Águas Paraná

Tabela 1.2 - Postos pluviométricos utilizados na SART

(continuação)					
Postos	Coord. Y	Coord. X	Alt.(m)	Código	Agência
Faxinalzinho	7332856	503387	900	2450044	Águas Paraná
Faz. Fortaleza	7303192	569296	850	2450030	Águas Paraná
Faz. Manzanilha	7292177	563584	730	2450012	Águas Paraná
Fazenda R. R.	7246124	505049	758	2350038	Águas Paraná
Faz. Santana sol	7326882	515377	715	2450071	Águas Paraná
Faz. São Carlos	7269965	570818	1200	2450025	Águas Paraná
Fernandes pinheiro	7185157	541919	893	2550025	Águas Paraná
Gleba 5	7351297	518654	850	2350039	Águas Paraná
Gonçalves Júnior	7183359	521808	797	2350039	Águas Paraná
Guaiaca	7165940	580290	856	2550037	Águas Paraná
Guamiranga	7212891	520149	850	2550057	Águas Paraná
Guaragi	7203488	577215	1000	2550039	Águas Paraná
Guarauna	7196145	563728	900	2550046	Águas Paraná
Guaricanga	7291806	616532	962	2450031	Águas Paraná
Imbituva	7208663	540230	869	2550048	Águas Paraná
Ipiranga	7231322	543716	890	2550051	Águas Paraná
Irati	7184063	537196	836,95	83836	INMET
Irati	7183326	536887	837	2550007	Águas Paraná
Irati	7183335	533508	812	2550018	Águas Paraná
Irati-COPEL	7183331	535183	1011	2550061	Águas Paraná
Itaiacoca	7219866	610885	1012	2549052	Águas Paraná
Itapara	7183377	501703	900	2550053	Águas Paraná
Ivaí	7233200	513480	808	2550006	Águas Paraná
Ivaí	7300379	496789	850	2550056	Águas Paraná
Jusante do Rio faca	7327301	523701	490	2451056	Águas Paraná
Lageado bonito	7343833	531017	850	2450043	Águas Paraná
Lageado liso	7323556	545699	640	2450062	Águas Paraná
Lga.-monte alegre	7321776	515231	885	2450014	Águas Paraná
Leal-Faz. Monte alegre	7314385	537240	825	2450020	Águas Paraná
Mal	7215970	593075	650	2450005	Águas Paraná
Mandaçais	7216087	617601	951	2550042	Águas Paraná
Mato queimado	7319968	491567	800	2549046	Águas Paraná
Mirim	7322582	507672	650	2451024	Águas Paraná
Ortigueira	7202011	647492	789	2450008	Águas Paraná
Ourofino de baixo	7257041	565698	781	2549048	Águas Paraná
Palmito	7190476	587199	800	2450038	Águas Paraná
Papagaios novos	7210698	599056	950	2550047	Águas Paraná
Prq. Est. Vila velha	7192635	503353	880	2550024	Águas Paraná
Patos velhos	7162616	610413	750	2550054	Águas Paraná
Pedras	7203488	577215	1100	2449029	Águas Paraná
Pinhalzinho	7332850	486478	750	2451007	Águas Paraná
Pinheirinho	7232857	637118	517	2549056	Águas Paraná
Pirai do Sul	7286764	608497	1068	2449011	Águas Paraná
Piriquitos	7218222	577299	1000	2550050	Águas Paraná

Tabela 1.2 - Postos pluviométricos utilizados na SART

Postos	Coord. Y	Coord. X	Alt.(m)	Código	Agência
Poço cachoeira	7277438	540488	1000	2450039	Águas Paraná
Pombal	7238688	538692	950	2450045	Águas Paraná
Ponta Grossa	7219527	585427	885	25135005	IAPAR
Ponta Grossa- COPEL	7231112	587461	1011	2550066	Águas Paraná
Rebouças	7165253	531315	918	2550038	Águas Paraná
Região KM 9	7201739	550332	950	2550049	Águas Paraná
Rio dos patos	7212904	506744	690	2550000	Águas Paraná
Sabará	7210757	590661	833	2550062	Águas Paraná
Saltinho	7218442	501707	750	2550055	Águas Paraná
Sabará	7210757	590661	833	2550062	Águas Paraná
Saltinho	7218442	501707	750	2550055	Águas Paraná
Santa cruz	7212635	585635	790	2550003	Águas Paraná
Sta. Maria	7240454	560571	1000	2450057	Águas Paraná
Santo das antas	7337944	537076	604	2450069	Águas Paraná
S. João do triunfo	7159229	570242	800	2550036	Águas Paraná
São Silvestre	7228819	637890	800	2549022	Águas Paraná
Sapopema	7356347	543683	764	2350061	Águas Paraná
Socavão	7259402	631428	1051	2449028	Águas Paraná
Sumidouro-Us. São Jorge	7231078	592506	850	2550002	Águas Paraná
Tabor	7275043	633292	1100	2449030	Águas Paraná
Taqueral	7188193	639125	800	2549044	Águas Paraná
Teixeira Soares	7194343	553658	950	2550045	Águas Paraná
Telêmaco Borba	7308105	539421	754	24205037	IAPAR
Telêmaco Borba IAPAR	7308845	538888	768	2450011	Águas Paraná
Tibagi	7289088	559658	720	2450002	Águas Paraná
Três córregos	7208545	637685	800	2549047	Águas Paraná
Turvo	7157449	548493	790	2550035	Águas Paraná
Us. Manoel Ribas	7199611	600652	870	2550015	Águas Paraná
Usina Mauá	7340205	530501	550	2450006	Águas Paraná
Uvaia	7226546	561630	975	2550016	Águas Paraná
Ventania	7321571	577877	1050	2450034	Águas Paraná
Vieiras	7182268	570559	892	2550041	Águas Paraná

Fonte: Adaptado do IAPAR, INMET e INSTITUTO ÁGUAS PARANÁ, 2019.

A partir dos dados observados foi realizada sua consistência bem como o preenchimento de falhas (dados faltantes). Para contabilização da porcentagem de falhas e para análises posteriores, os dados mensais foram organizados em cinco grupos, quatro deles levando em consideração as estações do ano: verão (jan., fev. e mar.), outono (abr., mai. e jun.), inverno (jul., ago. e set.), primavera (out., nov. e dez.) e anual.

Para o preenchimento de falhas das séries, utilizou-se o software ArcGis 10.7.1 para a interpolação geoestatística por meio da krigagem ordinária com a aplicação do modelo estável, realizada por meio da ferramenta *Geostatistical Analyst* que gerou superfícies visualizadas pela extensão integrante do ArcGis.

O modelo estável (Equação 1.1), utilizado nesta pesquisa, consiste numa combinação linear entre os modelos exponencial e gaussiano, cuja definição é apresentada em ESRI (2003).

$$\gamma(h) = \theta_s \left[1 - \exp \left(-3 \left(\frac{|h|}{\theta_r} \right)^{\theta_e} \right) \right] \quad (1.1)$$

em que:

h: módulo da distância entre um par de pontos;

θ_s : parâmetro de contribuição;

θ_r : parâmetro de alcance;

θ_e : parâmetro de ajuste da modelagem ($0 \leq \theta_e \leq 2$).

A anisotropia foi utilizada quando se verificou direções privilegiadas no comportamento da precipitação em certos anos, como por exemplo, aqueles com ocorrência de fenômenos ENOS, que refere-se a um sistema acoplado entre oceano e atmosfera no Oceano Pacífico equatorial, com oscilação de 3 a 6 anos e representa 18% da variação total do clima mundial (LIZUMI et al. 2014). Sua constatação é percebida nos semivariogramas quando o alcance ou o patamar, ou ambos, variam conforme a direção angular (PEREIRA et al., 2018). Conforme Berveglieri, Meneguette Junior e Piteri (2011) as pesquisas que utilizam de interpolação geoestatística devem ser tratadas de forma independente, pois a modelagem está de acordo com as percepções de quem a manipula.

Para avaliação da eficiência da modelagem geoestatística aplicada, além da análise espacial realizada pela comparação de mapas, análises estatísticas foram realizadas com o auxílio de planilhas eletrônicas e do *software* R, a partir das médias mensais calculadas para os períodos sazonais e anual. Tendo em vista a exigência de normalidade para uso do teste “t” de Student, preliminarmente utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk. Uma vez que houve a rejeição da hipótese de normalidade para todos os períodos das sub-bacias, o teste não-paramétrico de Wilcoxon foi utilizado na comparação das diferenças. O nível de significância adotado para todos os testes foi de 5%. Para verificação da acuracidade do modelo estável aplicado à dados de precipitação, foi realizada uma análise do viés das médias estimadas em relação às médias observadas. Para tanto, assim como em Cardoso e Quadros (2017), utilizou-se o coeficiente de correlação (r), o Erro Médio Absoluto (EMA), o Raíz do Erro Quadrático Médio (REQM), o

índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), que pode variar entre $-\infty$ a 1, mas $0 < NS < 1$ apresenta um modelos de performance aceitável, de acordo com Moriasi *et al.* (2007), e o coeficiente de concordância “*d*” de Willmott que varia entre 0 e 1 (WILLMOT; CKESON; DAVIS,1985), de acordo com a Equações 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5.

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_{obs} - \theta_{est}|}{n} \quad (1.2)$$

$$REQM = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{obs} - \theta_{est})^2}{n}\right)} \quad (1.3)$$

$$NS = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{obs} - \theta_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (\theta_{obs} - \bar{\theta})^2}\right) \quad (1.4)$$

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{obs} - \theta_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (|\theta_{est} - \bar{\theta}| + |\theta_{obs} - \bar{\theta}|)^2}\right) \quad (1.5)$$

em que:

θ_{obs} : valor observado;

θ_{est} : valor estimado;

$\bar{\theta}$: média dos valores observados;

n: número total de pares de valores observados e estimados.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1.3 é apresentada o percentual médio de falhas presentes no período histórico da base de dados adotada das duas sub-bacias utilizadas nesta pesquisa.

Tabela 1.3 - Percentuais médios de falhas de dados observados sazonalmente e anualmente nas sub-bacias SBRI e SART.

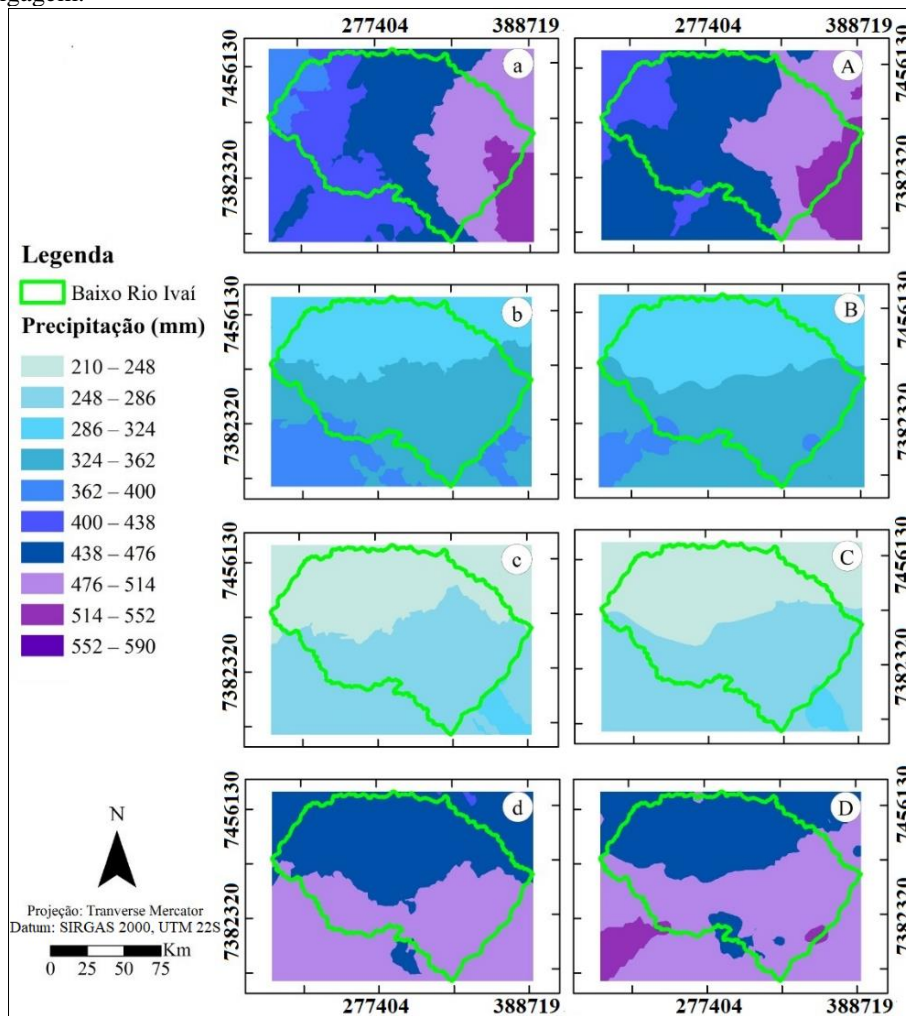
Sub-bacia	verão (%)	outono (%)	inverno (%)	primavera (%)	anual (%)
SBRI	23,453	23,119	23,682	23,515	23,442
SART	33,529	33,535	33,724	33,053	33,460

Fonte: A autora, 2020.

É possível observar que de maneira geral as percentagens médias sazonais e anual de falhas na SBRI e na SART se situaram próximas de 23% e 33%, respectivamente.

Na Figura 1.2 é possível verificar que os mapas onde os postos pluviométricos apresentaram falhas nos dados e os mapas em que os postos pluviométricos tiveram suas séries totalmente preenchidas, de modo geral, apresentam as frequências similares ao serem representadas e áreas muito similares tanto em relação à localização quanto à dimensão.

Figura 1.2 - Séries históricas da espacialidade pluviométrica sazonal na SBRI: com falhas e corrigida por krigagem.



Fonte: A autora, 2020.

Nota: mapas com as letras de “a/A” a “d/D” representam respectivamente o verão, o outono, o inverno e primavera, sendo que os mapas com letras minúsculas em destaque são os gerados com falhas nos dados e, os mapas com letras maiúsculas são os gerados com as falhas preenchidas com os dados estimados a partir da krigagem ordinária usando o modelo estável.

Numa perspectiva sazonal, observa-se que na primavera (Figuras 1.2d e 1.2D) e no verão (Figuras 1.2a e 1.2A) são encontrados os maiores índices pluviométricos, caracterizando o período mais chuvoso para a SBRI. Por outro lado, no outono (Figuras 1.2b e 1.2B) e no inverno (Figuras 1.2c e 1.2C), os índices pluviométricos são menores indicando um período mais seco. Anteriormente, Terassi, Silveira e Oliveira Júnior (2017) utilizaram da média ponderada para o preenchimento de falhas no período histórico de 1976 a 2012 nas bacias hidrográficas dos rios Pirapó e Paranapanema IV, que são vizinhas à SBRI, e concluíram que as períodos sazonais de maiores índices pluviométricos foram verão e primavera, sendo outono e inverno as de menores totais precipitados. Baldo (2006), ao trabalhar na área com dados

pluviométricos entre os anos de 1976 a 2001 também encontrou a primavera como sendo a estação mais chuvosa, sendo que o inverno, se apresentou com a menos chuvosa.

Em relação ao verão, a área ao noroeste na Figura 1.2a, delimitada pelas coordenadas X 7464143 e 7400286 e pelas coordenadas Y 282913 e 219115, incluem os postos Porto Camargo (7413212 - 218868), Faz. Sta. Fé (7450424 - 231840), Porto Jundiá (7435773 - 240669) e Loanda (7462303 - 281258), localidade esta que possui um dos maiores percentuais de falhas aproximando-se de 71,1%. Com exceção do posto Loanda, que estava representada na 6ª classe (400-438mm) e passou para a 7ª classe (438-476mm), as demais se deslocaram da 5ª (362-400mm) para a 6ª classe (400-438mm), o que implica que na interpolação houve uma atualização de seus valores em torno de 38mm (amplitude das classes), conforme pode se notar comparando as Figuras 1.2a e 1.2A. Próximo à região central da SBRI, os postos Rondon (7407453 - 321215), Guaporema (7418507 - 319376) e Guairaçá (7464717 - 327394), apresentaram aumento dos índices pluviométricos, de maneira que transitaram da 7ª classe (438-476mm) para a 8ª classe (476-514mm), alteração esta decorrente do preenchimento de suas falhas. A área delimitada pelas coordenadas Y 7420193 e 7358165 e pelas coordenadas X 309126 e 238614, que inclui o sul e sudoeste da SBRI, apresenta postos pluviométricos que em sua grande maioria obtiveram acréscimo em seus valores, como por exemplo as estações Águas do Jacu (7411943 - 271968), Tapejara (7375894 - 309703) e Estr. Pernambuco (7400663 - 237849) que mudaram de classe, deixando de ser representadas na 6ª classe e passando a ser representadas na 7ª classe. Por sua vez, a posto Cianorte-IAPAR (7381781 - 338559), ao ser preenchida, teve seus valores decrescidos, como é possível verificar comparando as Figuras 1.2a e 1.2A. De uma forma genérica observa-se nas Figuras 1.2a e 1.2A, um comportamento de diminuição gradativa dos valores pluviométricos no sentido montante a jusante, concordando com o que foi encontrado por Baldo (2006). Conforme é observado, no trabalho desse autor, que analisou a região por meio de dados históricos no período de 1976 a 2001, os valores de precipitação encontrados são similares aos expostos na Figura 1.2a, entretanto Nitsche *et al.* (2019) ao trabalharem com período histórico entre 1974 a 2015 para o estado do Paraná, apresentaram resultados mais próximos aos exibidos na Figura 1.2A, mostrando que o preenchimento espacial realizado por meio do modelo estável foi bastante satisfatório.

Complementando com uma análise estatística (Tabela 4), verifica-se que apesar dos valores de precipitação observados e krigados serem considerados diferentes significativamente ao nível de 5% pelo teste de Wilcoxon, numa análise de viés para determinar a concordância e acuracidade dos resultados, verificou-se um bom desempenho do modelo estável, uma vez que os valores de r , NS e d foram superiores a 0,8 com o EMA e REQM apresentando valores

próximos de 18 e 32 mm, respectivamente, o que representa flutuações relativamente pequenas na comparação dos dados observados e krigados, tendo em vista uma magnitude geral próxima de 450 mm na extensão da SBRI no verão.

Tabela 1.4 - Análise estatística confrontando os dados com falhas e os dados preenchidos por krigagem referentes as pluviometrias sazonais e anuais na SBRI.

	verão	outono	inverno	primavera	anual
p-Wilcox	3,89E-04	6,02E-06	0,454	1,53E-06	0,058
r	0,843	0,917	0,912	0,779	0,921
NS	0,819	0,797	0,806	0,550	0,811
d	0,907	0,936	0,936	0,839	0,940
EMA	17,971	8,468	9,495	14,640	28,025
REQM	32,119	13,087	10,997	24,129	49,671

Fonte: A autora, 2020.

Nota: os dados foram avaliados de acordo com o teste de Wilcoxon (p-Wilcox), coeficiente de correlação (r), índice eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), índice de Willmott (d), Erro Médio Absoluto (EMA) e Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM).

No que se refere à estação outono, conforme se verifica nas Figuras 1.2b e 1.2B, na região de transição entre as classes de maiores áreas, que são a 3ª classe (286-324mm) e a 4ª classe (324-362mm), estão presentes os postos Sta. Mônica (7406482 - 294030), Venda do Paulo (7417545 - 252897), Florai, (7420028 - 367142), Rondon (7407453 - 321215), e Herculândia (7426717 - 251066), localidade esta que possui o maior percentual de falha da SBRI. Estes postos, que depois do preenchimento apresentaram seus valores diminuídos, foram responsáveis por ampliar a área de representação da 3ª classe. O surgimento da pequena porção de área que está representada na 5ª classe (362-400mm), conforme Figura 1.2B foi decorrente da modelagem utilizada para espacialização, que promoveu uma transição desta classe que estava na periferia da SBRI, de acordo com a Figura 1.2b. Os resultados encontrados nessa estação sazonal, são concordantes com os trabalhos realizados por Baldo (2006) e Nitsche *et al.* (2019).

Ao avaliar as informações presentes na Tabela 1.4, verifica-se que apesar da análise estatística indicar que os valores observados e estimados possuem diferenças estatísticas significativas pelo teste de Wilcoxon em seus valores médios, a análise da concordância e acuracidade do modelo apresenta o índice NS adequado, além de apresentar um dos melhores resultados para os índices r e d , superiores a 0,91%. É importante destacar que para este período o EMA foi o menor valor encontrado dentre os demais períodos do ano, confirmando o bom desempenho do modelo estável, no preenchimento das séries pluviométricas no outono.

Concernente ao inverno, ao oeste, está a estação Porto São Carlos (7415406 - 344238) que deixa de ser representada pela 1ª classe (210-248mm), conforme mostra a Figura 2c, para

ser representada na 2ª classe (248-286mm) como está exibido na Figura 1.2C. Em contrapartida, os postos Cidade Gaúcha (7412798 - 301298) e Ivaitinga (7431269 - 361896) mudaram da 2ª classe para a 1ª classe, revelando que a interpolação diminuiu seus valores em torno de 38mm. Os postos próximos aos citados tiveram a mesma tendência de acréscimo ou decréscimo dos seus valores, mas que não foram suficientes para alterar suas classes de representação, mesmo influenciando o seu entorno, o que justifica a mudança de disposição da faixa transitória entre as classes de maiores áreas. Na pesquisa realizada por Baldo (2006) e por Nitsche *et al.* (2019) é possível verificar a similaridade dos resultados encontrados pelos autores com os apresentados nas Figuras 1.2c e 1.2C. Pela Tabela 1.4, é possível ratificar por meio das análises estatísticas que o inverno foi um dos melhores períodos representados utilizando do modelo estável, visto que os valores médios observados e preenchidos não diferiram significativamente pelo teste de Wilcoxon e, que os índices r , d e NS foram superiores a 0,8, sendo considerados muito bons. Os valores do EMA e do REQM foram relativamente pequenos, com valores próximos a 9,5mm e 11mm, respectivamente.

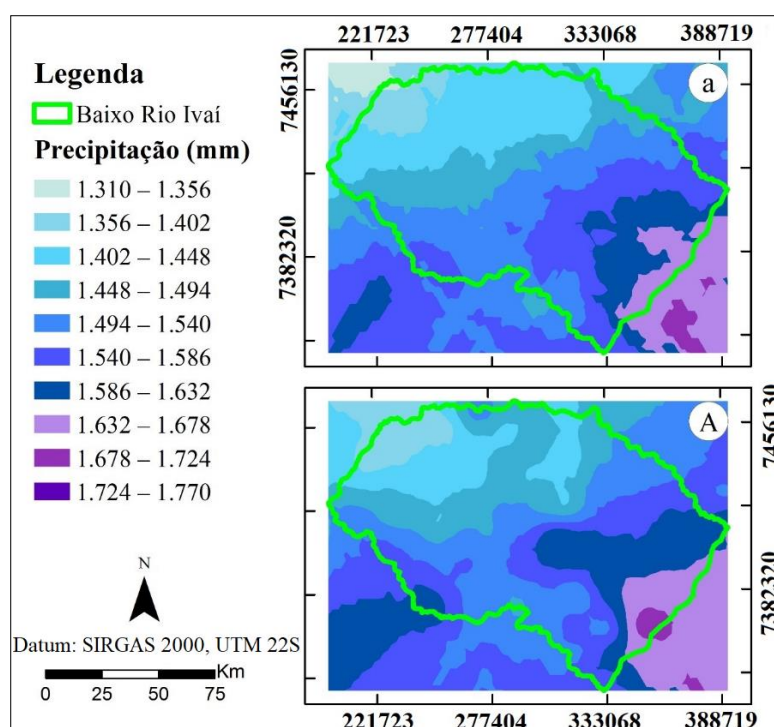
Para a primavera, ao norte da SBRI, a posto Faz. Erechim (7461839 - 289700), apresentou alteração em sua representação, que estava na 7ª classe, conforme Figura 2d e ascendeu para a 8ª classe (Figura 1.2D), em decorrência da proximidade com a localidade de Loanda-COPEL (7464118 - 281231), que apresentou 73,3% de falhas. Na região de transição entre a 7ª classe e 8ª classe estão as estações Águas do Jacú (7401154 - 287179), Nova olímpia (7401154 - 287179), Bernadelli (7392529 - 311187), Indianópolis (7402007 - 326247), Japurá (7403965 - 341691), e Ivaitinga (7431269 - 361896), que também exibiram acréscimo em seus valores mudando da 7ª para a 8ª classe. Por outro lado, os postos Ourizona (7411231 - 377782), Maringá (7410282 - 454025) e Maringá-COPEL (7406321 - 399588), sofreram acréscimos em seus valores, mudando da 7ª classe para a 8ª classe. Na região sudeste e sudoeste, onde estão localizados os postos Saltinho (7367278 - 364196) e Bairro centenário (7371583 - 267299) que tiveram aumento em seus valores deixando de ser representadas na 8ª classe (Figura 1.2d) e passando a ser representadas na 9ª classe (514-552mm) na Figura 1.2D. Nos trabalhos realizados por Baldo (2006) e Nitsche *et al.* (2019) não foram encontrados valores superiores a 500mm, havendo similaridade, portanto, com os valores encontrados na Figura 1.2d.

Integrando a análise espacial do período com uma a análise estatística, conforme a Tabela 4, observa-se que os valores médios de precipitação observados e krigados foram considerados significativamente diferentes, pelo teste de Wilcoxon. Numa avaliação do viés, verificou-se os menores valores dos índices r , d e NS dentre todos os períodos sazonais, sendo que o valor de NS foi de 0,550 indicando um desempenho satisfatório do modelo estável. Os

valores de EMA e REQM apresentaram respectivamente magnitudes de 18 e 32 mm, o que representa flutuações relativamente pequenas na comparação entre dados observados e krigados, tendo em vista uma grandeza em termos gerais próxima de 470mm na extensão da SBRI no verão.

A Figura 1.3 mostra os valores referentes aos totais médios anuais, na qual os mapas são similares na apresentação das frequências e na localização das áreas apresentadas. Ao oeste da SBRI, estão localizados os postos Porto São Carlos (7415406 - 344238), Estr. Pernambuco (7400663 - 237849) e Alto Alegre (7388001 - 264314) que obtiveram acréscimos em seus valores, sendo que os dois primeiros transitaram da 4ª classe (1448-1494mm) para a 5ª classe (1494-1540mm), enquanto que o último, mudou da 5ª para a 6ª classe (1540-1586mm). Ao noroeste, encontra-se o posto São José do Ivaí (7440145 - 266810) que deixou de ser representado na 2ª classe (1356-1402mm) para ser representado na 3ª classe (1402-1448mm) em decorrência do aumento de seus valores. No que diz respeito ao norte da bacia, a área delimitada entre as coordenadas Y 7464596 e 7438300, e coordenadas X 317108 e 283286, foi influenciada pelo posto Loanda, que possui 70,7% de falhas e obteve um grande crescimento em seus valores krigados, impactando principalmente seu posto vizinho, o posto Faz. Erechim (7461839 - 289700) que apresentou alteração em sua representação deixando de estar na 3ª classe para ser representado na 5ª classe, de acordo com as Figura 1.3a e 1.3A, respectivamente.

Figura 1.3 - Séries históricas da espacialidade pluviométrica anual na SBRI: com falhas e corrigida por krigagem.



Fonte: A autora, 2020.

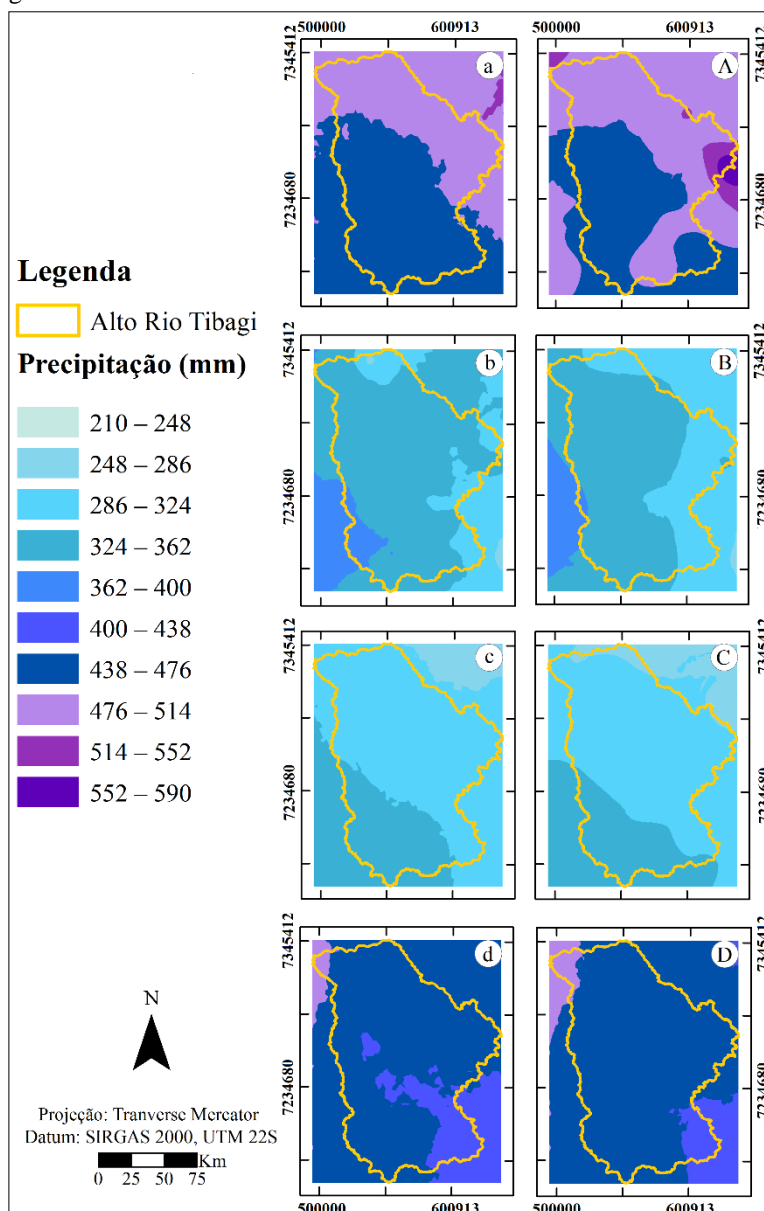
Nota: o mapa com letra minúscula em destaque é o gerado com falhas nos dados e, o mapa com letra maiúscula é o gerado com as falhas preenchidas com os dados estimados a partir da krigagem ordinária usando o modelo estável.

Ao comparar os resultados apresentados com os encontrados por Baldo (2006), observa-se que apesar dos valores máximo e mínimo apresentarem maior similaridade com a Figura 1.3a, o comportamento espacial das classes é mais próximo ao que é apresentado na Figura 1.3A. Nitsche *et al.* (2019) expõem as alturas pluviométricas anuais variando entre 1200-1800mm, como é encontrado nas Figuras 1.3a e 1.3A. Andrade e Nery (2011) quando avaliaram toda bacia do rio Ivaí, no período de 1975 a 2005 por meio de um dendrograma, classificaram os postos pluviométricos analisados em 5 grupos, onde cada um dos grupos apresentou características semelhantes na intensidade e na frequência de ocorrência da precipitação, sendo que a SBRI foi representada à noroeste, pelo grupo I, seguido por grande parte do grupo II e uma parcela do grupo IV e V, com médias anuais de variando entre 1300 a 1700mm, que estão de acordo os resultados apresentados (Figuras 1.3a e 1.3A). Aparecido *et al.* (2016), utilizando dados climatológicos do período de 1989 a 2014 e o método de krigagem com o modelo esférico, representaram a SBRI, em sua maior parte, com o total anual de precipitação entre 1200-1400mm e no extremo sudeste, com a precipitação variando entre 1400-1550mm, sendo que para mesma região os valores encontrados foram superiores em conforme pode ser observado nas Figuras 1.3a e 1.3A. Além do mais, no trabalho realizado por Andrade e Nery (2003) na SBRI, no período de 1974 a 2001, os mesmos afirmaram que à jusante da bacia se encontra os menores valores de precipitação, concordando com as Figuras 1.3a e 1.3A.

Ao analisar a Tabela 1.4, nota-se pelo teste de Wilcoxon, que as médias dos valores observados e krigados não apresentaram diferenças estatisticamente significantes. Na perspectiva do viés ou erro sistemático, o índice NS (Nash-Sutcliffe) foi considerado adequado e que no período se verificou os maiores valores dos índices de correlação (r) e de concordância (d), ambos superiores a 0,91. O EMA e o REQM, próximos a 28 e 50mm, respectivamente, foram considerados pequenos em relação ao montante médio encontrado na região.

De maneira geral na Figura 1.4, referente à sub-bacia do Alto Rio Tibagi (SART) é possível verificar que os mapas onde os postos pluviométricos apresentam falhas nos dados (Figuras de 1.4a a 1.4d) e os mapas em as falhas dos postos pluviométricos foram totalmente preenchidas (Figuras de 1.4A a 1.4D), apresentaram classes equivalentes ao serem representadas e, com as áreas muito semelhantes, tanto em relação à localização quanto à dimensão.

Figura 1.4 – Séries históricas da espacialidade pluviométrica sazonal na SART: com falhas e corrigida por krigagem.



Fonte: A autora, 2020.

Nota: mapas com as letras de “a/A” a “d/D” representam respectivamente o verão, o outono, o inverno e primavera, sendo que os mapas com letras minúsculas em destaque são os gerados com falhas nos dados e, os mapas com letras maiúsculas são os gerados com as falhas preenchidas com os dados estimados a partir da krigagem ordinária usando o modelo estável.

De acordo com o panorama sazonal, observa-se que no verão (Figuras 1.4a e 1.4A) e na primavera (Figuras 1.4d e 1.4D) foram encontrados os maiores índices pluviométricos, caracterizando o período mais chuvoso para a SART. Por outro lado, no inverno (Figuras 1.4c e 1.4C) e no outono (Figuras 1.4b e 1.4B) os índices pluviométricos são menores indicando um período mais seco.

Em relação ao verão, a área delimitada pelas latitudes pelas coordenadas Y 7221610 e 7170350, e coordenadas X 619302 e 553562, apresentam os postos Mato queimado (7216087

- 617601), Itaiacoca (7219866 - 610885), Guaragi (7203488 - 577215), Mandaçaia (7215970 - 593075) e Sabará (7210757 - 590661), posto este que apresentou 82,2% de falhas. Estes postos deixaram de representar a 7ª classe, na Figura 1.4a, e passaram para a 8ª classe, na Figura 1.4A, como consequência do seu preenchimento de falhas. Na Figura 1.4A, as áreas representadas pela 9ª e 10ª classe, possuem valores próximos aos da Figura 1.4a, mas que não foram representadas na mesma, ou seja, a presença dessas classes na Figura 1.4A não foi em decorrência do preenchimento de falhas, mas provavelmente um efeito do processo de espacialização, devido à variabilidade dos dados. Terassi e Galvani (2017) utilizaram alguns postos pluviométricos encontrados na SART, com séries históricas de 1976 a 2015 que possuíam até 5% de falhas e foram preenchidas pelo método de ponderação regional, para analisar a distribuição espacial da precipitação mensal em três bacia hidrográficas ao leste do estado do Paraná, entre elas estavam a Sub-bacia do Alto Rio Iguaçu (SARI) e a Bacia do Rio Ribeira (BRR) que fazem divisa com a SART e encontraram para a área delimitada pelas coordenadas Y 7197296 e 7161061, e coordenadas X 650964 e 566906, inserida na SARI, resultados semelhantes aos da Figura 1.4A, enquanto que a área delimitada pelas coordenadas Y 7289589 e 7197766, e pelas coordenadas X 651982 e 600639, que está inclusa BRR, apresentou concordância com a Figura 1.4a. No levantamento realizado por Nitsche *et al.* (2019) percebeu-se uma similaridade do que foi exposto pelos autores com os resultados apresentados nas Figuras 1.4a e 1.4A, visto que os mesmos estabeleceram que a região apresentou alturas pluviométricas entre 401-600mm.

Nos resultados da Tabela 1.5 verificou-se, pelo teste de Wilcoxon, que os dados observados e krigados são estatisticamente diferentes entre si. Os valores de EMA e REQM, próximos de 18,8 e 34,2mm, respectivamente, apesar de serem os maiores valores no período sazonal, apresentaram flutuações relativamente pequenas em relação ao montante da SART, que foi próximo de 470mm. Apesar dos índices *r*, *d* e NS, terem exibido os menores valores dos períodos, o modelo estável estimou satisfatoriamente a precipitação para o verão na região avaliada.

Tabela 1.5 - Análise estatística confrontando os dados com falhas e os dados preenchidos por krigagem referentes as pluviometrias sazonais e anuais na SART.

	verão	outono	Inverno	primavera	anual
p-Wilcox	0,369	2,76E-06	0,057	0,002	0,489

(continua)

Tabela 1.5 - Análise estatística confrontando os dados com falhas e os dados preenchidos por krigagem referentes as pluviometrias sazonais e anuais na SART.

	verão	outono	Inverno	primavera	(conclusão) Anual
<i>r</i>	0,752	0,821	0,812	0,802	0,892
NS	0,551	0,631	0,648	0,599	0,764
<i>d</i>	0,817	0,863	0,882	0,843	0,916
EMA	18,808	14,334	10,915	16,168	37,171
REQM	34,239	22,790	18,966	28,015	57,614

Fonte: A autora, 2020.

Nota: os dados foram avaliados de acordo com o teste de Wilcoxon (p-Wilcox), coeficiente de correlação (*r*), índice eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), índice de Willmott (*d*), Erro Médio Absoluto (EMA) e Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM).

Para o outono, ao norte, está a posto Lagoa Monte alegre (7323556 - 545699), que apresentou 86,7% de falhas e que transitou da 3ª para a 4ª classe, de acordo com as Figuras 1.4b e 1.4B. Do leste ao sudeste, as postos Pedra (7162616 - 610413), Capão alto (7256722 - 614553), Boqueirão (7238453 - 589163), Faxinal grande (7181172 - 602218) e BR-376 (7201480 - 597590), este último com 84,4% de falhas, mudaram da 4ª para a 3ª classe, pois obtiveram decréscimo ao serem submetidos ao processo de preenchimento de falhas dos dados. Ao sudoeste, a região entre as coordenadas Y 7209200 e 7179591, e coordenadas X 550249 e 520143, estão os postos Imbituva (7208663 - 540230), Região KM 9 (7201739 - 550332), Apiava (7197232 - 521523), Gonçalves Júnior (7183359 - 521808) e Irati-COPEL (7183331 - 535183) que também tiveram decréscimos em seus valores, deixando de ser representados pela 5ª classe, para ser representados pela a 4ª classe. Terassi e Galvani (2017) expõem o valor total médio de precipitação da área considerada na BRR que possui equivalência na mesma região representadas nas Figuras 1.4b e 1.4B, enquanto que na área considerada na SARI, há semelhança com a Figura 1.4B. Nitsche *et al.* (2019) exibiu a SART variando entre 301-400mm, que se aproximaram dos resultados expostos nas Figuras 1.4d e 1.4D, apesar dos valores mínimos verificados nos respectivos mapas partirem de 286mm. Utilizando das estatísticas (Tabela 1.5), verificou-se que os totais médios observados e preenchidos diferiram estatisticamente pelo teste de Wilcoxon. Na avaliação da acuracidade e concordância, foram encontrados valores do EMA e REQM relativamente pequenos em relação ao total médio do período, sendo que os índices *r* e *d* foram acima de 0,8, indicando forte correlação e concordância. Esses índices, juntamente com o NS, revelam um ajuste satisfatório, utilizando o modelo estável para o outono.

Quanto ao inverno, ao norte, no limite da sub-bacia, a posto Ventania (7321571 - 577877) se moveu da 3ª para a 2ª classe, como consequência do preenchimento dos dados. O

posto Pombal (7238688 - 538692), ao oeste, também passou da 4ª para a 3ª classe, indicando que houve redução de até 38mm da altura pluviométrica, como mostra a Figura 1.4C quando em comparação aos valores da Figura 4c. Em Terassi e Galvani (2017) o total médio encontrado para o período na área considerada da BRR e na área considerada da SARI foram concordantes com os resultados encontrados na Figura 1.4C. Nitsche *et al.* (2019) representaram a área com valores similares aos resultados mostrados nas Figuras 1.4c e 1.4C.

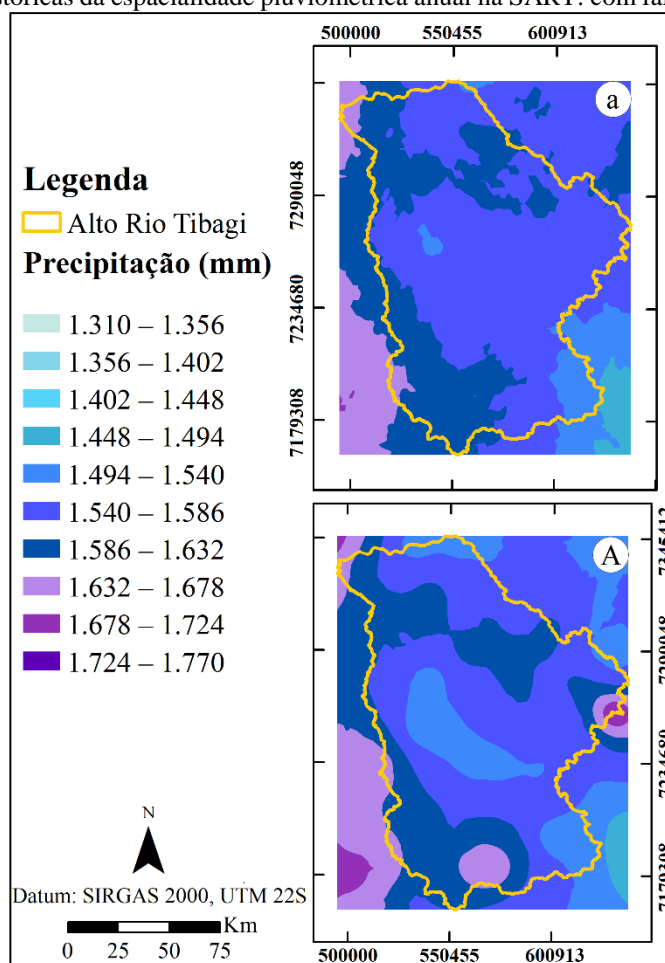
Pela Tabela 1.5, notou-se pelo teste de Wilcoxon, que as médias dos valores observados e krigados não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, que o EMA e REQM ficaram próximos de 11 e 19mm, respectivamente, sendo os menores valores sazonais da SART. Assim como o outono, o índice r e d foram acima de 0,8, apresentando correlação e concordância fortes. Analisando esses índices conjuntamente com o valor do NS, os mesmos apontaram que o modelo estável permitiu estimativas adequadas para período do inverno.

No tocante à primavera, os valores pluviométricos dos postos Faxinal grande (7181172 - 602218), Uvaia (7226546 - 561630) e Sumidouro (7231078 - 592506) apresentados na Figura 1.4d, transitaram da 6ª para a 7ª classe, de acordo com seus valores preenchidos apresentados na Figura 1.4D. Ao sudoeste, as postos Leal – Faz. Monte (7321776 - 515231) (que possui a maior percentagem de falhas 89,6%) e Faz. Santana Sol (7326882- 515377) (onde se encontrou 87,4% de falhas), passaram da 7ª para a 8ª classe em decorrência do preenchimento dos dados falhados. Terassi e Galvani (2017) apresentaram valores médios da área considerada na BRR sendo semelhantes aos representados na Figura 1.4d, bem como os valores na área considerada na SARI, se aproximam dos representados da Figura 1.4d e 1.4D. A análise realizada por Nitsche *et al.* (2019) indicou que há similaridade dos valores pluviométricos encontrados pelos autores com os representados nos mapas das Figuras 1.4d e 1.4D. Na Tabela 1.5, percebeu-se que os totais médios observados e preenchidos diferiram estatisticamente, conforme o teste de Wilcoxon. Os valores de EMA e REQM, próximos de 16,1 e 28,0mm, respectivamente, foram relativamente pequenos em relação ao total médio da SART, que foi próximo de 450mm. Apesar dos índices NS ter apresentado um valor relativamente baixo, os índices r e d ficaram acima de 0,8, o que apontou para estimativas satisfatórias da precipitação realizadas pelo modelo estável, para a primavera na região avaliada.

A Figura 1.5 mostra os valores referentes aos totais médios anuais, a qual os mapas se assemelham na representação das classes e na localização das regiões inseridas dentro da SART. Ao norte, o posto Mal (7314385 - 537240) mudou da 4ª (1540-1586mm) para a 5ª classe (1586-1632mm) como pode ser observado comparando as Figura 1.5a e 1.5A. A região ao centro da Figura 1.5A, delimitada pelas coordenadas Y 7290048 e 7216386, e coordenadas X 601317 e

424418, apresentam as estações Bom jardim (7268171 - 552291) e Uvaia (7226546- 561630) que passaram da 6ª (1540-1586mm) para a Figura 1.5a classe em decorrência do preenchimento dos totais médios anuais acumulados. Na Figura 1.5a não foram representadas as 8ª e 9ª classes, que se revelaram na Figura 1.5A, ou seja, a presença dessas classes não foi decorrente do preenchimento de falhas, mas provavelmente um efeito do processo de espacialização, devido à variabilidade dos dados.

Figura 1.5 - Séries históricas da espacialidade pluviométrica anual na SART: com falhas e corrigida por krigagem.



Fonte: A autora, 2020.

Nota: o mapa com letra minúscula em destaque é o gerado com falhas nos dados e, o mapa com letra maiúscula é o gerado com as falhas preenchidas com os dados estimados a partir da krigagem ordinária usando o modelo estável.

Aparecido *et al.* (2016) avaliando o clima do Paraná, onde estava inclusa a região onde se situa a SART, verificaram que a precipitação ao norte variava entre 1200-1400mm e ao sul entre 1400-1550mm, destoando dos resultados exibidos (Figura 1.5a e 1.5A) uma vez que na Figura 1.5a a área com maior precipitação se verificou ao norte, com a Figura 1.5A apresentando valores muito superiores ao sul e ao leste. Terassi e Galvani (2017) afirmaram que a região considerada na BRR possuía total médio anual de 1515mm, enquanto que a área tida

como sendo da SARI apresentou total médio anual de 1560mm, havendo correspondência dessas áreas com as apresentadas na Figura 1.5a. No levantamento realizado por Nitsche *et al.* (2019) o período avaliado pelos autores apresentou no geral alturas pluviométricas compatíveis aos resultados mostrados nas Figuras 1.5a e 1.5A, porém não houve semelhança na disposição das áreas de menor e maior classes, principalmente na Figura 1.5A. Posteriormente, num outro trabalho realizado por Terassi *et al.* (2019) na SARI, onde foram utilizados 21 postos pluviométricos para o período de 1976 a 2015, onde alguns dos quais apresentaram falhas menores que 5% e que foram posteriormente preenchidos pelo método de ponderação regional, constatou-se totais médios anuais próximos de 1571mm em regiões vizinhas à SART que correspondem aos valores dos totais médios anuais nas Figuras 1.5a e 1.5A.

Pela Tabela 1.5, notou-se pelo teste de Wilcoxon, que as médias dos totais anuais observados e krigados não apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Em relação ao erro sistemático, o EMA e o REQM, próximos de 37 e 58mm, respectivamente, apresentaram magnitudes maiores por incluir mais meses do que os períodos sazonais, mas que foram relativamente menores, visto que os totais anuais são, conseqüentemente, maiores. Os índices NS, r e d foram os maiores da SART, evidenciando uma adequabilidade muito boa da aplicação do modelo estável para o período anual.

Comparando os resultados encontrados em SBRI e SART nos períodos analisados, observou-se pelas Tabelas 1.4 e 1.5, que os períodos, com exceção do verão, apresentaram a mesma consonância em relação aos valores médios analisados pelo teste de Wilcoxon. No verão foi possível verificar nas duas sub-bacias, os maiores valores de EMA e REQM sazonais, enquanto que os menores valores de EMA foram no outono e no inverno, respectivamente. Por outro lado, os menores valores de REQM ocorreram no inverno nas duas sub-bacias. No período anual, encontrou-se os maiores valores do coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), índice de eficiência (NS), EMA e REQM de todos os períodos avaliados nas duas sub-bacias. Analisando os indicadores entre as sub-bacias, os melhores resultados foram verificados na SBRI, possivelmente em virtude da mesma apresentar uma diferença de cerca de 10% a menos no percentual de falhas, significando que o modelo estável apresentou uma pequena sensibilidade em função da quantidade de dados faltantes.

Ao comparar espacialmente, notou-se que a distribuição sazonal da precipitação ocorreu de maneira diferente nas sub-bacias, visto que os totais médios da SART foram categorizados em menos classes nos períodos de menores e maiores alturas pluviométricas. De acordo com Ruen *et al.* (1977), essa diferença é um fator característico em regiões onde se verifica o tipo climático Cfb, tal qual a região onde está inserida a SART, em relação às regiões de tipo

climático Cfa, onde está localizada a SBRI. Ao pesquisar sobre a homogeneidade pluviométrica no Paraná, Fritzsons *et al.* (2011) afirmaram que a região onde está situada a SBRI, foi classificada como apresentando estiagem no inverno, enquanto que a região onde está localizada a SART a precipitação está distribuída mais uniformemente durante o ano. No que diz respeito ao período anual, verificou-se que os mapas (Figuras 1.3 e 1.5) se mostraram de acordo com a tendência observada sazonalmente nas sub-bacias, onde o verão, outono e inverno da SBRI apresentaram totais médios inferiores aos encontrados na SART, sendo um dos motivos que podem favorecer um maior valor de REQM na mesma. Andrade e Nery (2011) explicam que a SBRI quando comparada a bacia inteira do rio Ivaí (que está numa região de clima Cfb), possui os menores valores de precipitação em consequência da orografia, uma vez que está localizada em áreas de altitudes inferiores ao restante da bacia.

1.4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados pode-se afirmar que a técnica de krigagem ordinária utilizando o modelo estável, de maneira geral mostrou satisfatoriamente eficiente no preenchimento das falhas de dados mensais nas sub-bacias do Baixo Rio Ivaí e Alto Rio Tibagi, apesar do modelo estável apresentar uma pequena sensibilidade ao percentual de falhas. Além disso, a espacialização realizada gerou padrões georreferenciados esperados dos regimes pluviométricos nas sub-bacias analisadas em todos os períodos avaliados, independentemente das regiões climáticas onde as mesmas estão inseridas no estado do Paraná.

CAPÍTULO 2

MODELO HÍBRIDO DETERMINÍSTICO-ESTOCÁSTICO DE CHUVA-VAZÃO PARA PROJEÇÃO DE VAZÕES SAZONAIS E ANUAL EM SUB-BACIAS DO ESTADO DO PARANÁ

RESUMO

A estimativa e/ou simulação de variáveis hidroclimatológicas é de grande relevância na gestão hídrica regional, uma vez que têm a finalidade de mitigar efeitos nas esferas socioeconômicas e ambientais. Nesse contexto, os modelos chuva-vazão, baseados em períodos sazonais e anuais, podem se configurar numa importante ferramenta para a gestão regional dos recursos hídricos, contribuindo para tomada de decisão. O presente trabalho objetivou desenvolver um modelo híbrido determinístico-estocástico de chuva-vazão, utilizando para tanto, registros hidroclimatológicos históricos das sub-bacias do baixo Rio Ivaí e do Alto Rio Tibagi, localizadas no estado do Paraná. O modelo foi elaborado utilizando dados pluvio-fluviométricos mensais de dez localidades obtidos junto ao Instituto Águas Paraná, os quais foram convertidos em períodos sazonais e anual. Inicialmente, aplicou-se o conceito de vazão equivalente para posterior aplicação de um modelo regressivo entre as vazões acumuladas observadas e estimadas. Os resultados foram avaliados pelos testes de Shapiro-Wilk (S-W), de Komogorov-Smirnov (K-S), de Wilcoxon (WCX), e Brown-Forsythe (B-F) ao nível de 5% de significância. Foram observadas diferenças significativas em relação à homogeneidade das séries estimadas. Assim, foram realizados procedimentos estatísticos para correção do viés por meio de simulação estocástica. Após esse processo, os testes S-W, K-S, WCX e B-F novamente foram aplicados e em todas os locais, apresentaram resultados muito bons, considerando que, no geral, as distribuições, médias e variâncias das vazões observadas e projetadas foram muito similares, com raras diferenças significativas encontradas no teste B-F. Além disso, numa análise gráfica, os dados de vazões observadas e projetadas apresentaram a mesma tendência. Ademais, o modelo híbrido determinístico-estocástico de chuva-vazão mostrou uma aplicabilidade simples, não apresentando disformidades motivadas por fatores locais de natureza climatológica, uma vez que as sub-bacias estavam localizadas em regiões climaticamente distintas.

Palavras-chave: bacias hidrográficas, previsão sazonal, modelo hidrológico.

ABSTRACT

The estimation and/or simulation of hydroclimatological variables is of great quality in regional water management, since it has a goal of mitigating effects in the socioeconomic and environmental spheres. In this context, the rainfall-runoff models, based on seasonal and annual periods, can be configured as an important tool for the regional management of water resources, contributing to decision making. The present work aimed to develop a deterministic-stochastic hybrid rainfall-runoff model, using historical hydroclimatological records of the sub-basins of the lower Rio Ivaí and the upper Rio Tibagi, state in the state of Paraná. The model was developed using pluvio-fluviometric monthly rainfall data from ten locations obtained from the Águas Paraná Institute, which were converted into seasonal and annual periods. Initially, the equivalent flow concept was applied for later application of a regressive model between the

observed and estimated accumulated flows. The results obtained by the Shapiro-Wilk (S-W), Komogorov-Smirnov (K-S), Wilcoxon (WCX), and Brown-Forsythe (B-F) tests at the 5% significance level. Relevant differences were observed in relation to the homogeneity of the estimated series. Thus, statistical procedures were performed to correct bias by means of stochastic simulation. After this process, the S-W, K-S, WCX and B-F tests were again given and in all locations, with very good results, considering that, in general, as distributions, averages and variances of the observed and projected flows were very similar, with rare founded in the B-F test. In addition, in a graphical analysis, the observed and projected flow data source represents the same trend. In addition, the deterministic-stochastic hybrid rainfall-runoff model revealed a simple applicability, not to apply deformities motivated by climatic nature sites, since the sub-basins were before the climatically distinct regions.

Keywords: hydrographic basins, seasonal forecast, hydrological model.

2.1 INTRODUÇÃO

De acordo as os levantamentos realizados pela Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) (IBGE, 2019) o Paraná foi dos maiores produtores agrícolas do país, principalmente em soja, sendo este o setor que mais utiliza água, fazendo uso da outorga de direito de uso de recursos hídricos. A outorga é um dos mecanismos da gestão hídrica, instituída pela Lei Federal nº 9.433 (BRASIL, 1997) e pelo Decreto Estadual nº 4.646/2001 (PARANÁ, 2001), que dispõe sobre o regime de outorga no estado do Paraná e exige que no processo haja estudos referentes ao balanço entre disponibilidade e demanda hídrica, tanto em termos quantitativos quanto em termos qualitativos, identificando potenciais conflitos de uso.

Nesse contexto, nota-se que os estudos para quantificação de disponibilidade hídrica são limitados tendo em vista a pequena quantidade de postos fluviométricos no país, principalmente em rios de baixa vazão, pois a rede hidrometeorológica do Brasil atende essencialmente as grandes e médias bacias hidrográficas, em razão dos possíveis aproveitamentos hídricos, principalmente o hidrelétrico (CALDEIRA *et al.*, 2018).

Inicialmente, os estudos hidrológicos se baseavam na homogeneidade das séries de vazão (Q), ou seja, as estatísticas da hidrologia não apresentavam muitas alterações temporais. No entanto, com o passar do tempo observou-se a presença de uma heterogeneidade motivada por causas isoladas e combinadas, como a falta de representatividade das séries históricas, alterações físicas, químicas e biológicas na bacia hidrográfica e, mais atualmente as possíveis mudanças climáticas (TUCCI; BRAGA, 2003).

De acordo com Salmoral *et al.* (2015), os processos causadores das mudanças observadas nas vazões podem ser variados, incluindo o represamento de rios, as alterações no

clima e o uso e cobertura do solo, que interagem de maneira integrada e dificultam a separação da influência de cada processo sobre o regime das vazões.

Lavenne *et al.* (2016), explicaram que a dinâmica do fluxo do rio, depende de três fatores, sendo o menos impactante, o manejo por interferência humana, como por exemplo a construção de represas, seguido, respectivamente, pela heterogeneidade da área da bacia hidrográfica e a variabilidade espacial da precipitação pluviométrica (P), que por sua vez, possui maior impacto. Conforme Villela e Mattos (1975), os aspectos da precipitação que contribuem para a alteração da vazão são a duração, intensidade, distribuição espacial e seu regime local. Segundo os autores, quanto maior for a intensidade da chuva, maior será a velocidade com que o solo atinge sua capacidade de infiltração, resultando em um excedente pluvial que escoará superficialmente, enquanto que, em chuvas de intensidade constante, a facilidade de escoamento estará relacionada com sua maior duração. Além do mais, a ocorrência de precipitações antecedentes também é um fator impactante, uma vez que, com o solo úmido, devido a chuvas anteriores, haverá um maior escoamento.

No que diz respeito ao gerenciamento dos recursos hídricos, a fim de minimizar possíveis impactos na vazão dos rios, procura-se realizar análises do regime hidrológico em função das mudanças climáticas por meio de modelos meteorológicos e climatológicos, que vem sendo elaborados com resolução na ordem de 100 a 200 km em modelos globais e, entre 10 a 40 km em modelos classificados como regionais, embora Tucci (1998) afirme que essas escalas, não se adequam para modelagem hidrológica de transformação de chuva-vazão, devido às particularidades locais.

Conhecer como a dinâmica da relação da chuva com a vazão auxilia na gestão hidrológica no que se refere à análise da estimativa de disponibilidade hídrica, a avaliação da variação do ciclo hidrológico de acordo com as mudanças naturais ou antrópicas, dos transtornos de mobilidade urbana ocasionados por alagamentos, aos processos erosivos e etc (MARINHO FILHO *et al.*, 2012)

Almeida e Serra (2017) relataram que a modelagem hidrológica surgiu há mais de um século, a partir do equacionamento de alguns processos hidrológicos. Conforme os autores, Mulvaney (1850) propôs o “Método Racional”, que foi aplicado em projetos de redes de esgoto, método esse que era destinado a prever a vazão máxima causada por um evento de chuva. Desde então, a modelagem hidrológica tem sido aperfeiçoada e tem originado diversos modelos, variando de acordo com os objetivos e a escala de aplicação.

Em relação à classificação dos modelos, Tucci (1998) e Almeida e Serra (2017) discutiram explicando que quanto à gênese, ou seja, quando são levados em consideração os

processos físicos, os modelos são classificados como conceituais e, quando usam relações baseadas em observações, são denominados empíricos, sendo esses últimos menos complexos, porém são intransferíveis para outros locais de aplicação. Ainda conforme os autores, no tocante à existência ou não de relações espaciais, os modelos podem ser definidos como concentrados, quando toda a bacia é representada por uma precipitação média, não sendo considerada a variabilidade espacial, ou distribuídos, quando as variáveis dependem do espaço e/ou tempo, podendo ser modelados por sub-bacias ou por grades. Quanto aos tipos de variáveis utilizadas, os modelos que envolvem pelo menos uma variável aleatória, são denominados estocásticos, e os que não forem regidos pelos conceitos de probabilidade, são considerados determinísticos.

A aplicação de modelos hidrológicos distribuídos com base nos processos físicos requer a avaliação de um número relativamente grande de parâmetros relacionados ao solo, à vegetação e aos aspectos topográficos em uma dimensão espacial, o que, de acordo com Fenicia *et al.* (2016), geralmente dificulta a elaboração e aplicação da modelagem, uma vez que, mesmo que não haja dificuldade no processo de avaliação dos parâmetros, não existe garantia que a modelagem se adequará melhor do que uma modelagem concentrada e/ou empírica.

O “*Tank Model*” é um modelo determinístico e conceitual desenvolvido no Japão por Sugawara (1979), o qual foi utilizado por Costa e Honório (2020) na análise dos dados de séries históricas de precipitação e de evapotranspiração na bacia do ribeirão Santa Bárbara em Goiás, apresentando resultados satisfatórios de vazões mensais, apesar dos poucos dados de entrada. Os autores concluíram que esse desempenho ocorreu, principalmente, pelo fato de que a aplicação da técnica de programação não-linear conseguiu proporcionar de forma simples e eficiente do regime hidrológico entendimento da bacia.

Segundo Cirilo *et al.* (2020), o “CAWM-IV” (*Campus Agreste Watershed Model Version IV*), é um modelo conceitual desenvolvido com o intuito de contribuir principalmente para a modelagem hidrológica de bacias inseridas em regiões semiáridas. Com o objetivo de favorecer o processo de regionalização para outras bacias similares, particularmente devido à escassez de dados de vazão, o modelo tem como principais características o número reduzido de parâmetros para calibração e a incorporação das características físicas da bacia no cálculo de diversos atributos. Ainda conforme os autores, o modelo “CAWM-IV”, quando foi aplicado para quatro bacias localizadas no estado de Pernambuco, apresentou desempenho adequado para 55 a 92% dos eventos simulados, dependendo dos critérios dos indicadores utilizados na análise.

Uliana *et al.* (2019) avaliaram o desempenho dos modelos chuva-vazão “SAC-SMA” (*Soil Moisture Accounting*) e do “IPH II” (modelo do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da

UFRGS) para predição de vazões na bacia do rio Teles Pires, localizada na região amazônica do estado de Mato Grosso, Brasil, e concluíram que ambos os modelos se mostraram adequados na modelagem de vazões diárias.

O “SWAT” (*Soiland Water Assessment Tool*), desenvolvido pelo departamento de agricultura dos EUA (USDA), é um modelo distribuído amplamente utilizado. Viana *et al.* (2018) explica que o modelo permite a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas e a análise de diversos cenários. Ao ser aplicado na Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama-PE, utilizando dados médios de precipitação entre outras variáveis de entrada no período histórico de 2000 a 2006, o modelo subestimou as vazões quando comparadas às séries observadas.

De acordo com Formiga *et al.* (2016), o “SWMM” (*Storm Water Management Model*) foi desenvolvido para a simulação qualitativa e quantitativa do escoamento de pequenas bacias. Ao ser aplicado na bacia hidrográfica do Arroio Cancela-RS, verificou-se que o mesmo foi passível de ser empregado, principalmente para eventos de grande intensidade e em bacias menores, onde não há levantamento fluviométrico.

Chierice Júnior e Landim (2014) trabalhando na bacia hidrográfica do Rio Pardo-SP, apresentaram uma modelagem para estimativa da vazão em função da precipitação, que se baseou na técnica de dupla massa, que é um procedimento considerado relativamente simples e muito utilizado em hidrologia. Os autores encontraram resultados expressivos quando compraram os valores estimados e observados, uma vez que as vazões estimadas se aproximaram às observadas.

Tendo em vista apresentar uma alternativa simples e objetiva para projeção de vazões a partir de dados de precipitação pluvial, este trabalho objetivou desenvolver um modelo híbrido determinístico-estocástico de chuva-vazão, utilizando para tanto, registros hidroclimatológicos históricos das sub-bacias do baixo Rio Ivaí e do Alto Rio Tibagi, localizadas no estado do Paraná.

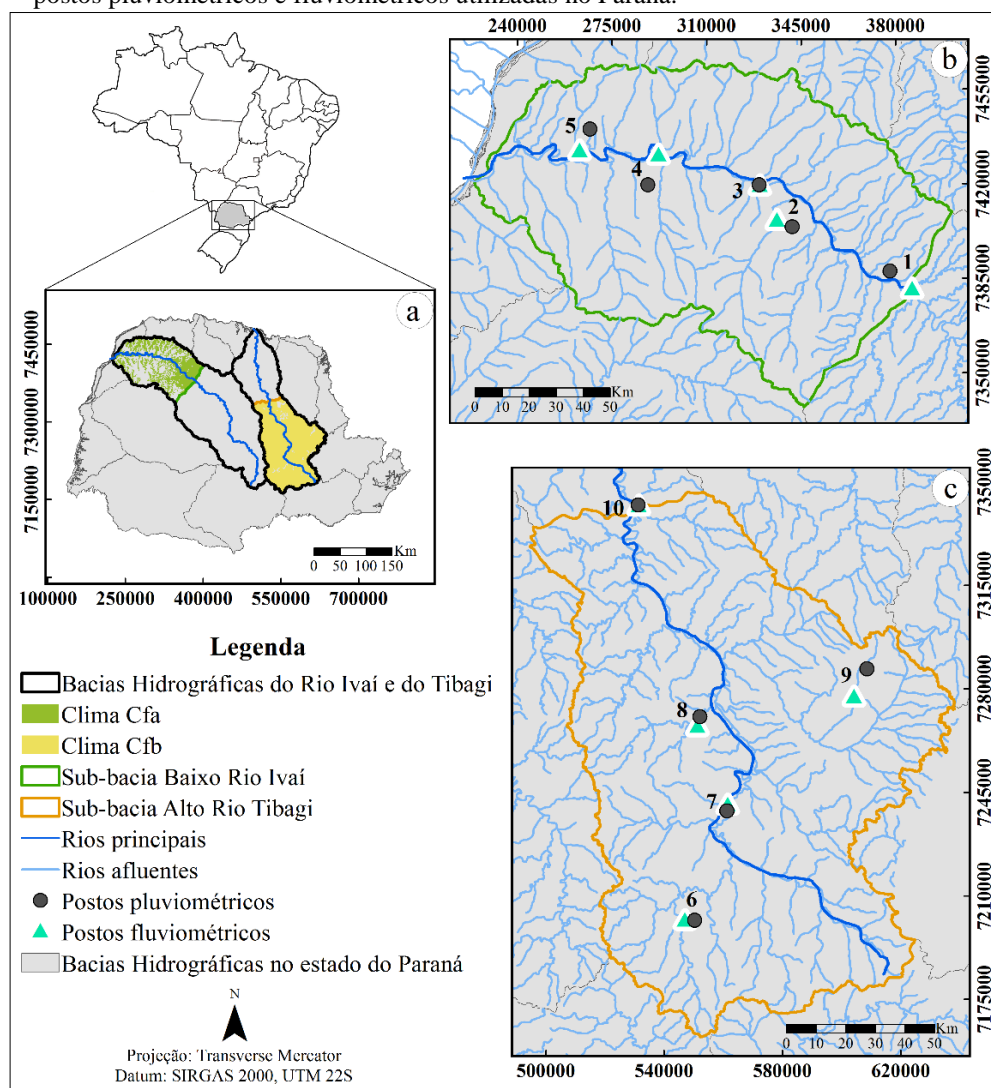
2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi realizada no Laboratório de Estatística Computacional e Aplicada – LECA da Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG, localizada no estado do Paraná.

De acordo com SEMARH (2010), o estado do Paraná tem uma área de 196.490,1 km² e está situado na região sul do Brasil, fazendo divisa ao norte com o estado de São Paulo e ao sul com o estado de Santa Catarina, possuindo 16 bacias hidrográficas, entre elas a bacia do rio Ivaí e do rio Tibagi.

O estado do Paraná apresenta os tipos climáticos dominantes Cfa e Cfb, na porção noroeste e na porção sudeste, próximo ao centro, respectivamente (RAUEN *et al.*, 1977; NITSCHKE *et al.*, 2019), sendo que as Sub-bacias do Baixo Rio Ivaí (SBRI) com área de 13.431,5 km², e Alto Rio Tibagi (SART), com área de 16.100,4 km², estão inseridas respectivamente em regiões de cada um dos dois tipos climáticos, como mostra a Figura 1a.

Figura 2.1 – Localização dos tipos climáticos encontrados na SBRI e na SART, com as respectivas duplas de postos pluviométricos e fluviométricos utilizadas no Paraná.



Fonte: A autora, 2020.

Sobre os componentes que integram os aspectos físicos das bacias, entende-se que rio Ivaí nasce no Segundo Planalto e corta todo o Terceiro Planalto em sentido noroeste. De acordo com Maack (1981), na porção noroeste da bacia do rio Ivaí, encontra-se o arenito da Formação Caiuá do grupo Bauru do período Cretáceo. Essa formação é constituída por apresentar arenitos de coloração vermelho-arroxeadas, conhecida como “terra vermelha”.

Ainda de acordo com o autor, a bacia do rio Tibagi é encontrada nos três planaltos, também denominados como Planalto de Curitiba (primeiro planalto), Planalto de Ponta Grossa (segundo planalto) e o Planalto de Guarapuava (terceiro planato). A área onde a SART esta localizada encontra-se o primeiro planato representado por rochas do embasamento cristalino, que correspondem aos grupos Castro e Açungui e o segundo planalto, representado geologicamente pela sequência de sedimentos da Bacia Sedimentar do Paraná, ou seja, desde o Grupo Rio Ivaí até a Formação Botucatu.

Por serem de grandes extensões, as bacias hidrográficas possuem uma variedade muito grande de solos, como argissolos, cambissolos, latossolos e neossolos, que é de predominância do tipo flúvico na SBRI, e litólico na SART (EMBRAPA, 1999).

Segundo o Manual Técnico da Vegetação Brasileira do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1992), a cobertura vegetal primitiva na bacia hidrográfica do rio Ivaí é formada pela Floresta Ombrófila Mista, savana, estepe e Floresta Estacional Semidecidual, mais presente na SBRI, enquanto que a bacia do rio Tibagi, além de ser também ser formada Floresta Ombrófila Mista e estepe, apresenta ainda Floresta Ombrófila Densa e os chamados “capões”, onde são encontradas a arvore característica do Paraná, a *Araucaria angustifolia*.

Foram utilizadas séries de dados mensais de vazão (Q_m) e precipitação pluviométrica (P_m) provenientes de postos fluviométricos e pluviométricos pertencentes ao Instituto Águas Paraná. Uma vez que os postos fluviométricos e pluviométricos inseridos na SBRI e na SART, respectivamente, não estão localizados exatamente no mesmo local, como se observa nas Figuras 2.1b e 2.1C, circunstancialmente, foi associado a cada posto fluviométrico um posto pluviométrico mais próximo possível, respeitando uma distância perimetral máxima de 15 km, critério também utilizado por Blanc, Secretan e Frave (2006). A Tabela 2.1 apresenta as informações referentes aos postos fluviométricos e pluviométricos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 2.1 - Dados sobre aos postos analisados, incluindo a identificação da dupla (ID) dos postos fluviométricos e pluviométricos e a sub-bacia onde estão localizados, seguido pelo código, coordenadas geográficas, nome do posto, intervalo da série histórica e área de drenagem (km²).

(continua)							
ID	Código	Posto	Lat.	Long.	Alt.	Histórico	Área
1F-SBRI	64675002	Porto Bananeiras	23° 40'	52° 07'	520	1974-2018	23107,6
1P- SBRI	2352061	Sítio Floresta	23° 37'	52° 11'	339		
2F-SBRI	64682000	Japurá	23° 07'	53° 13'	285	1977-2015	818
2P-SBRI	2352045	Japurá	23° 28'	52° 33'	500		

Tabela 2.1 - Dados sobre aos postos analisados, incluindo a identificação da dupla (ID) dos postos fluviométricos e pluviométricos e a sub-bacia onde estão localizados, seguido pelo código, coordenadas geográficas, nome do posto, intervalo da série histórica e área de drenagem (km²).

ID	Código	Posto	Lat.	Long.	Alt.	Histórico	(conclusão)
							Área
3F-SBRI	64685000	Porto P. do Norte	23° 19'	52° 39'	250	1974-2018	28427
3P-SBRI	2352000	Porto P. do Norte	23° 19'	52° 40'	250		
4F-SBRI	6468900	Tapira	23° 13'	53° 01'	240	1976-1990	31955
4P-SBRI	2353034	Tapira	23° 19'	53° 04'	480		
5F-SBRI	64693000	Novo Porto Taquara	23° 11'	53° 18'	240	1974-2018	34432
5P-SBRI	2353038	São José	23° 07'	53° 16'	339		
6F-SART	64441020	ETA – Irati	25° 17'	50° 31'	750	1987-2003	240
6P-SART	2550049	Região KM 9	25° 18'	50° 30'	950		
7F-SART	64447000	Eng. Rosaldo Leitão	24° 56'	50° 23'	830	1976-2011	5731
7P-SART	2450056	Eng. Rosaldo	24° 57'	50° 23'	780		
8F-SART	64460000	Bom jardim	24° 42'	50° 29'	750	1978-2018	722
8P-SART	2450009	Bom jardim	24° 42'	50° 28'	750		
9F-SART	64477020	Tijuco preto	24° 36'	49° 58'	970	1980-2015	197
9P-SART	2449011	Pirai do Sul	24° 31'	49° 55'	1068		
10F-SART	64491000	Br. Rib. das antas	24° 01'	50° 41'	1000	1974-2012	16102
10P-SART	2450003	Br. Rib. das antas	24° 01'	50° 41'	1000		

Fonte: Adaptado do INSTITUTO ÁGUAS PARANÁ, 2020.

Nota: As duplas dos postos fluviométricos e pluviométricos foram apresentadas por um número, seguido por “F” ou “P” e por “SBRI” ou “SART”.

Neste trabalho foram priorizados os postos fluviométricos com séries de dados mensais de vazão maiores que 5 anos, conforme recomendação de Tucci (1998). Tendo em vista a escassez de postos fluviométricos com séries de dados de vazão completas, quando necessário as falhas foram preenchidas utilizando-se a média aritmética mensal para cada local avaliado, sendo o cálculo realizado de acordo com a Equação 2.1.

$$\overline{Q}_m = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} Q_{m_i}}{n_a} \quad (2.1)$$

em que,

$\overline{Q_m}$ é a média aritmética da vazão mensal (em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) da série;

Q_{m_i} é a vazão mensal (em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) de cada ano da série;

n_a é o número de anos da série.

A partir dos dados de Q_m e de P_m dos locais avaliados, foram determinados quatro períodos sazonais (correspondendo às estações verão, outono, inverno e primavera) e um período anual. Uma vez que os dados utilizados estão na escala mensal consideraram-se os meses de janeiro, fevereiro e março pertencentes ao verão; abril, maio e junho, pertencentes ao outono; julho agosto e setembro, pertencentes ao inverno; outubro, novembro e dezembro, pertencentes à primavera.

Os valores de P_m foram acumulados para os quatro períodos sazonais, bem como para o período anual, denotados por P_{pe} . Por sua vez, os valores de Q_m para os períodos sazonais e anuais, foram representados pelas vazões médias denotados por Q_{pe} , nos respectivos períodos definidos.

Para a estimativa do volume de chuva que incide nas bacias hidrográficas em cada período considerado, sem levar em consideração as perdas por evaporação, evapotranspiração e outros fatores, assim como em Chierice Júnior e Landim (2014) e Blanc, Secretan e Frave (2006), foi utilizada a Equação 2.2.

$$V_{pe} = A * P_{pec} * 1000 \quad (2.2)$$

em que,

V_{pe} é o volume de chuva na sub-bacia (em m^3) no período considerado;

A é a área de drenagem da sub-bacia (em km^2);

P_{pec} é a precipitação cumulativa local (em mm) no período considerado.

Com o intuito de relacionar hidrológicamente em nível de bacia hidrográfica a quantidade de chuva com a vazão, aplicou-se o conceito de vazão equivalente ao volume precipitado em um período de tempo, conforme Gonçalves *et al.* (2018) e Cecílio *et al.* (2018), cuja determinação é realizada por meio da Equação 2.3.

$$Q_{peqv} = \frac{V_{pe}}{n_a * 86400} \quad (2.3)$$

em que,

Q_{peqv} é a vazão equivalente ao volume precipitado (em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) no período considerado;

V_{pe} como definido na Equação 2.2;

n_d é o número de dias do período que será multiplicado por 86400 para conversão da escala de tempo para segundos (s).

No estabelecimento de uma relação entre a Q_{pe} e Q_{peqv} nos períodos considerados (sazonal e anual) para cada local, os valores de cada ano foram acumulados para o período total da série e, submetidos a um modelo linear regressivo relacionando a Q_{pe} cumulativa com a Q_{peqv} cumulativa, conotadas no modelo respectivamente como variáveis independente e dependente. Chierice Júnior e Landim (2014), também utilizaram esta relação para gerar informações que contribuam na gestão dos recursos hídricos regional. Esta relação também é utilizada numa técnica denominada “curva de dupla massa”, desenvolvida pelo serviço geológico dos Estados Unidos, conforme descrição em Searcy e Hardison (1960), para ajustar inconsistência de dados hidrológicos. A Equação 2.4, 2.5 e 2.6 compõem o modelo regressivo linear relacionando Q_{pe} cumulativa com Q_{peqv} cumulativa.

$$Q_{pec_i} = \alpha + \beta * Q_{peqvc_i} \quad (2.4)$$

em que,

$$Q_{pec_i} = \sum_{j=1}^i Q_{pe_j} \quad (2.5)$$

sendo que,

Q_{pec_i} é Q_{pe} cumulativa (em $m^3 \cdot s^{-1}$) até o ano i da série no período considerado;

Q_{pe_j} é Q_{pe} (em $m^3 \cdot s^{-1}$) no ano j da série no período considerado;

e,

$$Q_{peqvc_i} = \sum_{j=1}^i Q_{peqv_j} \quad (2.6)$$

sendo,

Q_{peqvc_i} é Q_{peqv} cumulativa (em $m^3 \cdot s^{-1}$) até o ano i da série no período considerado;

Q_{peqv_j} é Q_{peqv} (em $m^3 \cdot s^{-1}$) no ano j da série no período considerado;

A partir da aplicação do coeficiente angular β da Equação 2.4, foi determinada uma vazão estimada para o período considerado (sazonal ou anual) para um ano qualquer conforme Equação 2.7.

$$Q_{pest} = Q_{peqv} * \beta \quad (2.7)$$

em que,

Q_{pest} é Q_{pe} estimada (em $m^3.s^{-1}$) para um ano qualquer no período considerado;

Q_{peqv} como definido na Equação 2.3;

β é o coeficiente angular da reta do modelo linear regressivo.

Inicialmente, tendo em vista a não normalidade das séries de vazões observadas (Q_{pe}), bem como das séries das vazões estimadas, verificadas pelo teste de Shapiro-Wilk, testes não paramétricos foram utilizados. Sendo assim, foram comparadas as médias das séries de vazões de Q_{pe} e Q_{pest} para os períodos considerados (sazonal e anual) para cada local avaliado, e verificou-se que estas não apresentaram diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Wilcoxon. No entanto, quando se comparou as respectivas variâncias por meio do teste de Brown-Forsythe para os períodos e locais considerados, constatou-se que as mesmas não apresentavam homogeneidade (variâncias heterocedásticas). Sendo assim, foi necessário fazer um ajuste no erro (viés) nas séries Q_{pest} , para que as mesmas se apresentassem mais semelhantes com as séries de Q_{pe} no tocante à média, à variabilidade e à distribuição dos dados.

Nesse sentido foi desenvolvida uma modelagem estocástica para correção dos valores estimados pela Equação 2.7, por meio da simulação do erro (viés) original das séries de vazões observadas (Q_{pe}) para cada local e período considerado. Para tanto foi computado o erro de cada valor da série de Q_{pe} , por meio da Equação 2.8.

$$\varepsilon_{Q_{pe_i}} = Q_{pe_i} - \overline{Q_{pe}} \quad (2.8)$$

em que,

$\varepsilon_{Q_{pe_i}}$ é o erro de Q_{pe} (em $m^3.s^{-1}$) no ano i do período considerado;

Q_{pe_i} é a vazão observada (em $m^3.s^{-1}$) no ano i do período considerado;

$\overline{Q_{pe}}$ é a média da série de Q_{pe} (em $m^3.s^{-1}$) no período considerado.

Em seguida foi realizado uma transformação em $\varepsilon_{Q_{pe_i}}$ de maneira que esse novo valor seguisse uma distribuição normal, conforme mostra a Equação 2.9.

$$\varepsilon_{Q_{peT_i}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{Q_{pe_i}} - \min(\varepsilon_{Q_{pe}})}{\max(\varepsilon_{Q_{pe}}) - \min(\varepsilon_{Q_{pe}})}} \quad (2.9)$$

em que,

$\varepsilon_{Q_{peT_i}}$ é $\varepsilon_{Q_{pe_i}}$ transformado no ano i para o período considerado;

$\min(\varepsilon_{Q_{pe}})$ é o menor $\varepsilon_{Q_{pe_i}}$ da série no período considerado;

$\max(\varepsilon_{Q_{pe}})$ é o maior $\varepsilon_{Q_{pe_i}}$ da série no período considerado.

Sendo $\varepsilon_{Q_{peT_i}}$ uma variável aleatória com distribuição normal, conforme constatação realizada pelo teste de Shapiro-Wilk, para que seja simulada convenientemente por meio do modelo normal padrão, que tem média igual a 0 e desvio padrão igual a 1, foi necessário a padronização dos valores de $\varepsilon_{Q_{peT_i}}$ por meio da Equação 2.10.

$$Z_{\varepsilon_{Q_{peT_i}}} = \frac{\varepsilon_{Q_{peT_i}} - \overline{\varepsilon_{Q_{peT}}}}{s_{\varepsilon_{Q_{peT}}}} \quad (2.10)$$

em que,

$Z_{\varepsilon_{Q_{peT_i}}}$ é $\varepsilon_{Q_{peT_i}}$ padronizado do ano i no período considerado;

$\overline{\varepsilon_{Q_{peT}}}$ é a média de $\varepsilon_{Q_{peT_i}}$ da série observada no período considerado;

$s_{\varepsilon_{Q_{peT}}}$ é o desvio padrão de $\varepsilon_{Q_{peT_i}}$ da série observada no período considerado.

Desta forma, após a padronização, $Z_{\varepsilon_{Q_{peT_i}}}$ pode ser gerada a partir da função inversa de distribuição normal padronizada ($F^{-1}(Z)$), uma vez que Z e $Z_{\varepsilon_{Q_{peT_i}}}$ têm a mesma distribuição. Assim, a partir da geração estocástica de Z e revertendo todo o processo de transformação realizado em $\varepsilon_{Q_{pe_i}}$, o erro simulado ($\varepsilon_{Q_{pesim}}$) para a vazão estimada (Q_{pest}) no período considerado para qualquer ano, que por sua vez tem a mesma distribuição de $\varepsilon_{Q_{pe_i}}$, é obtido pela Equação 2.11:

$$\varepsilon_{Q_{pesim}} = (Z * s_{\varepsilon_{Q_{peT}}} + \overline{\varepsilon_{Q_{peT}}})^2 * (\max(\varepsilon_{Q_{pe}}) - \min(\varepsilon_{Q_{pe}})) + \min(\varepsilon_{Q_{pe}}) \quad (2.11)$$

em que,

$\varepsilon_{Q_{pesim}}$ é o erro simulado para a vazão estimada (Q_{pest}) no período considerado;

Z é uma variável aleatória com distribuição normal padrão;

$\overline{\varepsilon_{Q_{peT}}}$ e $s_{\varepsilon_{Q_{peT}}}$ como definido na Equação 2.10;

$\min(\varepsilon_{Q_{pe}})$ e $\max(\varepsilon_{Q_{pe}})$ como definido na Equação 2.9.

Diante disso, a partir da determinação consistente de um valor para $\varepsilon_{Q_{pest}}$, se pode projetar a vazão sazonal ou anual (em $m^3.s^{-1}$) para um ano qualquer, por meio da Equação 2.12.

$$Q_{Proj} = Q_{pest} + \varepsilon_{Q_{pest}} \quad (2.12)$$

em que,

Q_{Proj} é a vazão projetada (em $m^3.s^{-1}$) no período considerado (sazonal ou anual) para um ano qualquer;

Q_{pest} é a vazão estimada (em $m^3.s^{-1}$) como definido na Equação 2.7;

$\varepsilon_{Q_{pest}}$ é o erro simulado para Q_{pest} conforme definido na Equação 2.11.

Para validação da modelagem desenvolvida foram realizadas análises estatísticas, utilizando o *software* R, confrontando as vazões observadas (Q_{pe}) e as vazões projetadas (Q_{proj}) dos locais analisados nos períodos considerados (sazonal e anual).

Num primeiro momento, foram realizadas verificações de normalidade dos dados utilizando o teste de Shapiro-Wilk nas séries de vazões observadas e projetadas. Tendo em vista a rejeição massiva das hipóteses de nulidade para este pré-requisito da normalidade, testes não paramétricos foram conduzidos. Para verificação da similaridade da distribuição dos dados nas séries, foi efetuado o teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Para constatação de semelhança entre as médias de vazões observadas e projetadas foi utilizado o teste de Wilcoxon (WCX). Com o objetivo de avaliar a homogeneidade das variâncias das vazões observadas e projetadas, o teste de Brown-Forsythe (B-F) foi conduzido. Todos os testes foram realizados considerando o nível de significância de 5%.

Adicionalmente, foram elaborados gráficos mostrando a tendência das médias e respectivos desvios padrões das vazões observadas e projetadas, para todos os locais e períodos considerados.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2.2 são apresentados os resultados relacionados aos testes estatísticos onde são comparadas as vazões observadas e as projetadas em dez replicações do modelo, para cada período no local 1F-SBRI. Como se pode verificar para este local, o modelo apresentou um desempenho muito bom, projetando as vazões médias nos períodos sazonais e anual com muita acuracidade, no que se refere à distribuição das vazões (teste K-S), aos valores médios (teste

WCX) e com relação à homogeneidade da variabilidade (teste B-F). Apenas em uma das projeções efetuadas no verão observou-se uma significância estatística no teste de Wilcoxon, o que de certa forma é natural e sem tendenciosidade, uma vez que uma parte da modelagem desenvolvida é estocástica.

Tabela 2.2 – Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 1F-SBRI.

(continua)												
	Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}	
<u>Ver</u>	Média	557,4	491,7	545,2	510,4	509,0	516,1	525,6	520,3	504,7	539,7	523,4
	DP	262,6	261,2	299,9	275,8	264,4	275,9	301,8	281,8	289,4	278,4	287,4
	K-S	-	0,33	0,95	0,65	0,95	0,65	0,09	0,82	0,65	0,82	0,09
	WCX	-	0,03*	0,73	0,22	0,31	0,29	0,16	0,42	0,09	0,52	0,19
	B-F	-	0,28	0,27	0,96	0,86	0,99	0,55	0,94	0,81	0,70	0,77
<u>Out</u>	Média	510,7	497,3	523,3	472,8	534,3	453,4	535,3	582,8	527,8	502,7	532,3
	DP	344,2	389,9	399,4	301,8	360,4	374,0	347,2	342,0	346,5	330,0	371,9
	K-S	-	0,22	0,82	0,22	0,48	0,05	0,82	0,05	0,33	0,65	0,48
	WCX	-	0,70	0,93	0,40	0,89	0,06	0,96	0,34	0,96	0,88	0,98
	B-F	-	0,17	0,76	0,72	0,24	0,23	0,32	0,47	0,29	0,39	0,26
<u>Inv</u>	Média	482,1	409,9	460,4	515,3	427,7	521,2	492,9	499,6	452,1	478,2	430,2
	DP	277,4	323,2	334,5	295,2	296,7	311,9	316,7	317,9	336,9	303,2	314,7
	K-S	-	0,14	0,22	0,65	0,48	0,48	0,33	0,48	0,48	0,82	0,47
	WCX	-	0,06	0,46	0,39	0,20	0,37	0,87	0,83	0,44	0,61	0,28
	B-F	-	0,54	0,18	0,66	0,60	0,34	0,27	0,34	0,39	0,70	0,44
<u>Prim</u>	Média	557,7	591,3	528,2	513,8	517,9	578,1	548,1	535,8	563,7	546,4	534,5
	DP	285,6	321,2	314,1	287,2	312,0	320,8	296,7	289,7	273,0	320,6	302,9
	K-S	-	0,82	0,82	0,65	0,65	0,94	0,82	0,99	0,07	0,82	0,95
	WCX	-	0,57	0,55	0,32	0,31	0,91	0,52	0,60	0,90	0,75	0,85
	B-F	-	0,25	0,27	0,69	0,27	0,44	0,39	0,78	0,97	0,35	0,70
<u>Anual</u>	Média	528,7	498,5	524,6	506,0	536,7	515,1	506,7	502,9	499,7	466,2	491,7
	DP	178,6	210,7	215,0	192,2	202,9	187,7	172,0	208,5	201,5	187,7	179,0
	K-S	-	0,48	0,48	0,48	0,95	0,48	1,00	0,65	0,22	0,33	0,95
	WCX	-	0,09	0,65	0,49	0,75	0,62	6,63	0,19	0,26	0,05	0,13
	B-F	-	0,88	0,12	0,62	0,35	0,21	0,99	0,34	0,23	0,47	0,69
	B-F	-	0,25	0,27	0,69	0,27	0,44	0,39	0,78	0,97	0,35	0,70

Fonte: A autora, 2020.

Nota: resultados referentes aos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S), Wilcoxon (WCX) e Brown-Forsythe (B-F) comparando as vazões observadas (Q_{pe}) com as dez replicações das vazões projetadas (Q_{proj}).

(*) p-value estatisticamente significativa ao nível de 5%.

No posto 2F-SBRI, como expõe a Tabela 2.3, foram encontradas diferenças significativas mais evidentes nos períodos sazonais do outono e inverno. De maneira geral, essas diferenças foram mais marcantes, no tocante à reprodução da variabilidade interanual, que por sua vez, foram verificadas por meio do teste B-F, sendo que no outono cinco e no inverno oito de dez replicações do modelo que se mostraram não concordantes. No entanto, as distribuições e os valores médios das vazões projetadas foram esboçadas com boa similaridade, pelos testes K-S e WCX, nos quais, raras significâncias estatísticas foram encontradas.

Tabela 2.3 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 2F-SBRI.

(continua)												
		<i>Q_{pe}</i>	<i>Q_{proj1}</i>	<i>Q_{proj2}</i>	<i>Q_{proj3}</i>	<i>Q_{proj4}</i>	<i>Q_{proj5}</i>	<i>Q_{proj6}</i>	<i>Q_{proj7}</i>	<i>Q_{proj8}</i>	<i>Q_{proj9}</i>	<i>Q_{proj10}</i>
Ver	Média	15,6	14,5	15,2	15,6	14,9	14,7	15,3	14,7	15,7	14,9	15,0
	DP	3,9	4,8	5,2	4,5	4,5	4,4	4,7	4,2	4,6	4,5	4,7
	K-S	-	0,25	0,56	0,75	0,56	0,39	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	WCX	-	0,19	0,81	0,98	0,37	0,21	0,86	0,36	0,97	0,64	0,39
	B-F	-	0,52	0,18	0,27	0,36	0,71	0,26	0,96	0,22	0,30	0,28
Out	Média	14,7	15,7	13,9	14,3	13,1	13,4	15,0	14,1	13,1	13,2	13,9
	DP	4,7	6,1	6,0	6,5	6,4	6,5	6,0	6,4	6,0	6,3	6,5
	K-S	-	0,25	0,05	0,38	0,15	0,09	0,56	0,09	0,05	0,01*	0,25
	WCX	-	0,30	0,16	0,53	0,07	0,12	0,78	0,40	0,05	0,01*	0,32
	B-F	-	0,10	0,02*	0,04*	0,10	0,02*	0,03*	0,01*	0,13	0,11	0,09
Inv	Média	14,2	13,7	13,7	14,6	13,6	14,2	14,6	14,7	13,1	16,1	14,2
	DP	4,6	6,4	6,2	6,6	6,6	6,6	6,6	6,4	6,4	5,8	6,4
	K-S	-	0,15	0,25	0,25	0,39	0,39	0,25	0,39	0,09	0,01*	0,39
	WCX	-	0,62	0,61	0,72	0,62	0,98	0,59	0,68	0,55	0,09	0,85
	B-F	-	0,04*	0,06	0,02*	0,03*	0,04*	0,02*	0,04*	0,02*	0,05	0,01*
Prim	Média	15,5	16,4	15,9	15,1	15,1	15,2	15,7	15,4	15,0	15,3	15,9
	DP	5,6	5,2	6,6	6,5	5,6	6,4	6,6	5,8	6,7	6,4	6,6
	K-S	-	0,15	0,15	0,25	0,75	0,39	0,39	0,56	0,15	0,75	0,15
	WCX	-	0,16	0,32	0,93	0,98	0,78	0,62	0,91	0,83	0,91	0,55
	B-F	-	0,79	0,06	0,12	0,31	0,09	0,09	0,30	0,11	0,19	0,03*

Tabela 2.3 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 2F-SBRI.

		(conclusão)										
		Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}
	Média	15,0	14,3	14,4	14,8	14,9	14,3	14,8	14,2	14,5	14,8	14,7
	DP	3,8	4,2	3,4	4,5	4,5	4,1	4,4	3,9	4,1	4,2	3,8
Anual	K-S	-	0,15	0,75	0,25	0,56	0,75	0,39	0,39	0,75	0,75	0,91
	WCX	-	0,32	0,43	0,58	0,92	0,21	0,81	0,19	0,34	0,62	0,42
	B-F	-	0,22	0,05	0,12	0,12	0,28	0,06	0,57	0,61	0,43	0,74

Fonte: A autora, 2020.

Nota: resultados referentes aos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S), Wilcoxon (WCX) e Brown-Forsythe (B-F) comparando as vazões observadas (Q_{pe}) com as dez replicações das vazões projetadas (Q_{proj}).

(*) p-value estatisticamente significante ao nível de 5%.

Nas Tabela 2.4, 2.5 e 2.6 são mostrados os resultados, dos testes K-S, WCX e B-F, para os postos 3F-SBRI, 4F-SBRI e 5F-SBRI. Pode-se observar, para estes locais o modelo apresentou excelente desempenho na reprodução das distribuições, valores médios e variabilidade das vazões sazonais e anual, sendo que em apenas uma situação (posto 3F-SBRI, Inverno, Q_{proj5} , teste de WCX) houve uma pequena dissimilaridade estatística, mostrando que o modelo representou com muita acurácia as distribuições, os valores médios e a variabilidade das vazões observadas.

Tabela 2.4 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 3F-SBRI.

		(continua)										
		Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}
	Média	655,7	630,3	615,0	637,0	662,3	716,8	599,2	656,2	631,2	622,8	613,5
	DP	299,7	346,9	350,6	371,9	355,9	295,0	308,2	306,8	293,9	326,0	289,2
Ver	K-S	-	0,82	0,82	0,65	0,82	0,33	0,82	1,00	0,95	0,95	0,95
	WCX	-	0,62	0,11	0,60	0,63	0,32	0,19	0,68	0,46	0,67	0,18
	B-F	-	0,36	0,62	0,19	0,26	0,70	0,99	0,92	0,65	0,57	0,79
	Média	595,4	674,7	546,1	533,9	571,6	589,4	571,7	588,3	589,2	572,5	623,8
	DP	371,6	396,8	399,3	391,6	416,6	357,4	341,4	354,5	411,0	437,5	423,8
Out	K-S	-	0,22	0,33	0,22	0,14	0,82	0,82	0,48	0,48	0,65	0,82
	WCX	-	0,33	0,27	0,18	0,55	0,83	0,55	0,84	0,66	0,55	0,74
	B-F	-	0,19	0,52	0,54	0,10	0,59	0,64	0,48	0,29	0,32	0,30
	Média	555,1	507,3	585,0	564,7	548,6	471,8	502,2	539,6	604,3	523,1	515,8

Tabela 2.4 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 3F-SBRI.

		(conclusão)										
		<i>Q_{pe}</i>	<i>Q_{proj1}</i>	<i>Q_{proj2}</i>	<i>Q_{proj3}</i>	<i>Q_{proj4}</i>	<i>Q_{proj5}</i>	<i>Q_{proj6}</i>	<i>Q_{proj7}</i>	<i>Q_{proj8}</i>	<i>Q_{proj9}</i>	<i>Q_{proj10}</i>
	DP	299,3	332,8	342,9	345,1	317,2	351,1	339,4	342,2	328,5	332,9	315,1
Iny	K-S	-	0,65	0,95	0,65	0,94	0,08	0,33	0,33	0,22	0,65	0,33
	WCX	-	0,34	0,51	0,80	0,80	0,03*	0,16	0,52	0,25	0,21	0,15
	B-F	-	0,63	0,72	0,27	0,56	0,49	0,39	0,41	0,26	0,57	0,96
	Média	662,1	648,1	699,4	691,1	628,6	643,1	732,6	636,3	774,8	638,3	711,7
	DP	340,8	342,0	347,1	428,8	381,4	383,6	383,3	386,5	418,1	365,2	392,7
Prim	K-S	-	0,94	0,48	0,65	0,82	0,95	0,33	0,65	0,48	0,82	0,65
	WCX	-	1,00	0,43	0,77	0,50	0,69	0,36	0,83	0,15	0,86	0,55
	B-F	-	0,65	0,45	0,08	0,54	0,34	0,16	0,35	0,25	0,26	0,22
	Média	617,2	610,1	610,5	641,0	600,1	585,2	577,0	617,3	586,7	646,5	583,1
	DP	210,2	241,3	254,2	228,2	188,6	234,1	201,9	218,5	209,9	220,6	230,1
Anual	K-S	-	0,82	0,65	0,48	1,00	0,65	0,82	0,82	0,48	0,22	0,22
	WCX	-	0,96	0,90	0,46	0,47	0,45	0,16	0,96	0,34	0,36	0,45
	B-F	-	0,60	0,14	0,45	0,87	0,53	0,92	0,50	0,65	0,47	0,34

Fonte: A autora, 2020.

Nota: resultados referentes aos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S), Wilcoxon (WCX) e Brown-Forsythe (B-F) comparando as vazões observadas (*Q_{pe}*) com as dez replicações das vazões projetadas (*Q_{proj}*).

(*) p-value estatisticamente significativa ao nível de 5%.

Tabela 2.5 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 4F-SBRI.

		(continua)										
		<i>Q_{pe}</i>	<i>Q_{proj1}</i>	<i>Q_{proj2}</i>	<i>Q_{proj3}</i>	<i>Q_{proj4}</i>	<i>Q_{proj5}</i>	<i>Q_{proj6}</i>	<i>Q_{proj7}</i>	<i>Q_{proj8}</i>	<i>Q_{proj9}</i>	<i>Q_{proj10}</i>
	Média	584,4	546,0	527,1	528,4	538,6	658,3	609,6	530,1	589,0	572,4	515,4
	DP	232,8	202,6	199,7	250,4	301,6	271,4	176,0	273,1	250,5	274,2	269,5
Ver	K-S	-	0,94	0,94	0,68	0,68	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,18
	WCX	-	0,64	0,52	0,60	0,60	0,12	0,89	0,45	0,98	0,85	0,39
	B-F	-	0,98	0,59	0,72	0,34	0,53	0,34	0,67	0,64	0,44	0,60
	Média	485,7	510,6	607,1	465,2	529,8	547,9	519,0	580,1	505,5	443,3	464,9
	DP	288,5	382,6	356,9	325,5	323,0	335,8	341,5	344,1	289,7	268,3	279,4
Out	K-S	-	1,00	0,38	0,68	0,94	0,94	1,00	0,94	0,94	0,68	0,68
	WCX	-	1,00	0,49	0,60	0,93	0,76	0,76	1,00	0,85	0,42	0,68
	B-F	-	0,51	0,46	0,46	0,63	0,61	0,08	0,60	0,79	0,52	0,93

Tabela 2.5 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 4F-SBRI.

(conclusão)												
	<i>Q_{pe}</i>	<i>Q_{proj1}</i>	<i>Q_{proj2}</i>	<i>Q_{proj3}</i>	<i>Q_{proj4}</i>	<i>Q_{proj5}</i>	<i>Q_{proj6}</i>	<i>Q_{proj7}</i>	<i>Q_{proj8}</i>	<i>Q_{proj9}</i>	<i>Q_{proj10}</i>	
Inv	Média	520,7	561,4	529,1	499,2	493,5	522,6	499,0	564,0	549,4	523,7	507,2
	DP	202,0	264,8	212,9	256,4	259,8	264,2	251,2	243,7	267,4	237,3	266,6
	K-S	-	0,25	0,56	0,75	0,56	0,39	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	WCX	-	0,19	0,81	0,98	0,37	0,21	0,86	0,36	0,97	0,64	0,39
	B-F	-	0,53	0,49	0,63	0,91	0,63	0,72	0,81	0,95	0,66	0,21
Prim	Média	579,5	496,0	556,8	579,1	561,9	502,2	531,8	558,5	516,0	547,3	529,6
	DP	225,3	266,3	282,3	267,7	229,2	259,4	227,7	241,4	226,4	251,4	293,6
	K-S	-	0,38	0,66	0,66	0,93	0,18	0,93	0,18	0,93	0,93	0,66
	WCX	-	0,12	0,85	0,93	0,76	0,30	0,68	0,85	0,42	0,68	0,45
	B-F	-	0,53	0,49	0,63	0,91	0,63	0,72	0,81	0,95	0,66	0,21
Anual	Média	569,4	634,4	593,3	567,7	537,9	538,2	580,4	593,2	561,0	591,3	605,6
	DP	117,6	178,4	177,6	168,7	155,4	146,6	130,8	146,2	153,7	160,5	134,0
	K-S	-	0,39	0,94	0,94	0,68	0,68	0,94	0,68	0,68	0,94	0,94
	WCX	-	0,12	0,76	0,42	0,52	0,45	0,93	0,80	0,80	0,64	0,52
	B-F	-	0,08	0,46	0,41	0,19	0,41	0,99	0,22	0,72	0,16	0,92

Fonte: A autora, 2020.

Nota: resultados referentes aos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S), Wilcoxon (WCX) e Brown-Forsythe (B-F) comparando as vazões observadas (*Q_{pe}*) com as dez replicações das vazões projetadas (*Q_{proj}*).

(*) p-value estatisticamente significativa ao nível de 5%.

Tabela 2.6 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 5F-SBRI.

(continua)												
	<i>Q_{pe}</i>	<i>Q_{proj1}</i>	<i>Q_{proj2}</i>	<i>Q_{proj3}</i>	<i>Q_{proj4}</i>	<i>Q_{proj5}</i>	<i>Q_{proj6}</i>	<i>Q_{proj7}</i>	<i>Q_{proj8}</i>	<i>Q_{proj9}</i>	<i>Q_{proj10}</i>	
Ver	Média	783,3	741,8	742,5	783,9	779,3	773,8	743,6	727,9	722,8	753,3	755,7
	DP	349,7	438,8	380,1	404,2	389,3	398,4	362,2	369,9	392,9	344,8	356,1
	K-S	-	0,48	0,48	0,95	0,82	0,65	0,94	0,95	0,48	1,00	0,82
	WCX	-	0,43	0,35	0,86	0,89	0,96	0,55	0,54	0,28	0,63	0,58
	B-F	-	0,08	0,46	0,55	0,74	0,34	0,85	0,80	0,60	0,84	0,67
Out	Média	684,8	623,6	664,2	617,4	679,6	701,0	688,9	725,3	654,9	642,2	681,6
	DP	369,4	397,6	391,0	381,3	450,5	412,4	427,3	403,7	373,9	412,5	344,6
	K-S	-	0,48	0,48	0,22	0,48	0,22	0,65	0,05	0,48	0,33	0,65
	WCX	-	0,41	0,55	0,39	0,89	0,87	0,96	0,32	0,52	0,41	0,89
	B-F	-	0,25	0,29	0,42	0,12	0,16	0,40	0,31	0,31	0,28	0,66
Média	659,4	623,1	656,1	675,0	630,6	623,4	673,7	658,6	645,5	686,9	656,8	

Tabela 2.6 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 5F-SBRI.

(conclusão)

		Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}
	DP	372,4	423,3	430,5	403,5	427,7	359,7	416,6	417,8	391,4	396,6	388,1
<u>Inv</u>	K-S	-	0,08	0,48	0,65	0,14	0,48	0,33	0,65	0,14	0,48	0,48
	WCX	-	0,39	0,93	0,67	0,48	1,00	0,81	0,99	0,79	0,92	0,96
	B-F	-	0,10	0,20	0,35	0,22	0,46	0,20	0,35	0,18	0,70	0,42
	Média	750,6	755,2	769,5	742,8	734,7	724,5	759,6	746,8	755,2	720,6	741,5
	DP	361,8	393,6	412,7	393,2	414,5	368,8	339,6	386,8	423,4	394,2	407,3
<u>Prim</u>	K-S	-	0,82	0,94	0,65	0,94	0,95	0,82	0,82	0,48	0,48	0,82
	WCX	-	0,90	0,93	0,73	0,75	0,75	0,96	0,62	0,63	0,68	0,80
	B-F	-	0,50	0,30	0,26	0,28	0,29	0,83	0,76	0,11	0,12	0,18
	Média	723,1	735,4	689,2	708,7	706,4	733,1	719,0	697,1	680,0	686,4	728,8
	DP	240,0	246,0	238,7	266,6	247,5	262,5	253,9	277,6	247,6	242,4	224,0
<u>Anual</u>	K-S	-	0,48	0,82	0,95	0,65	0,95	0,82	0,33	0,33	0,48	0,95
	WCX	-	0,59	0,47	0,49	1,00	0,86	1,00	0,43	0,30	0,42	0,96
	B-F	-	0,73	0,84	0,47	0,51	0,41	0,52	0,11	0,35	0,70	0,97

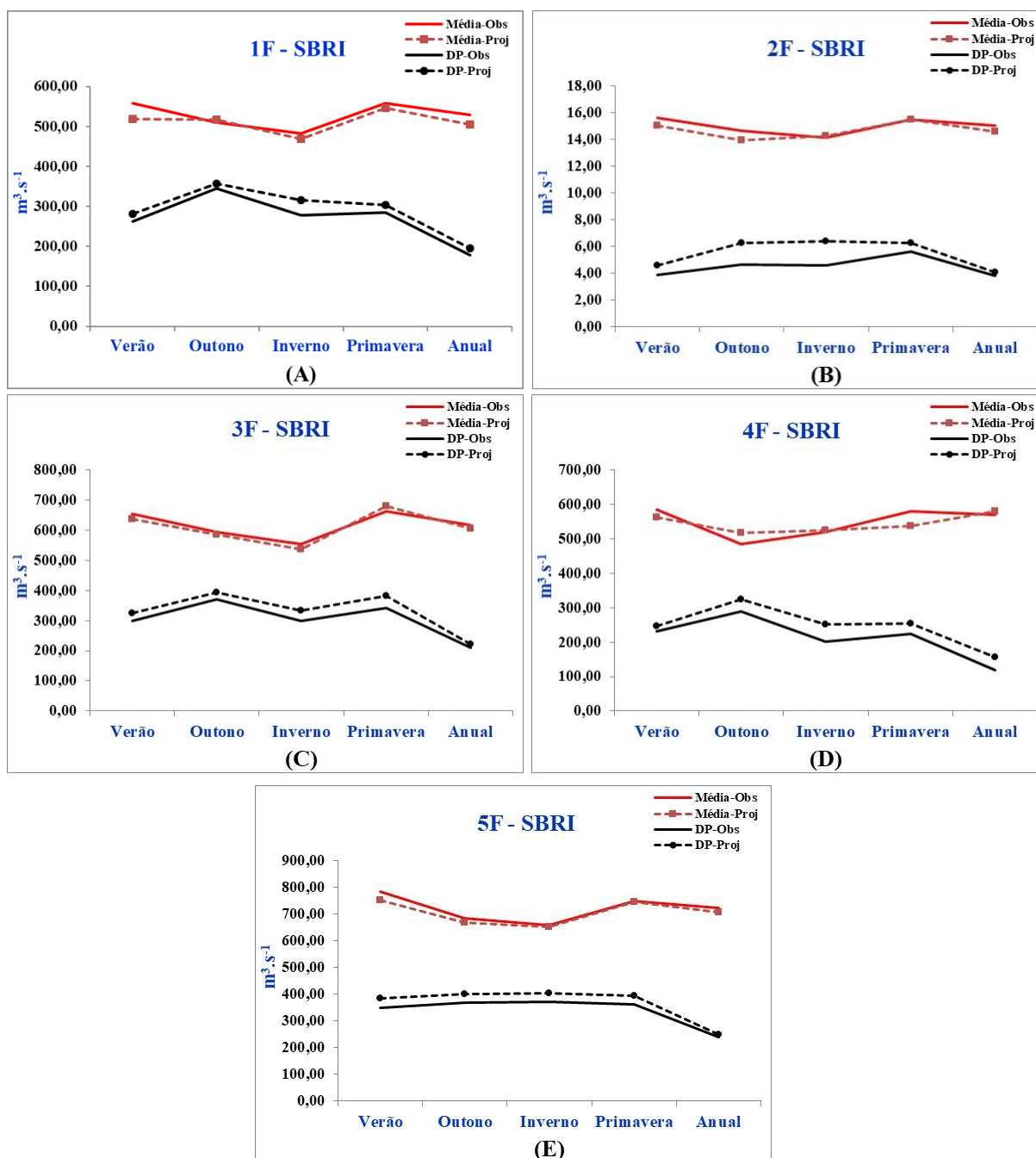
Fonte: A autora, 2020.

Nota: resultados referentes aos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S), Wilcoxon (WCX) e Brown-Forsythe (B-F) comparando as vazões observadas (Q_{pe}) com as dez replicações das vazões projetadas (Q_{proj}).

(*) p-value estatisticamente significativa ao nível de 5%.

Na Figura 2.2, é possível observar que as vazões projetadas seguiram as mesmas tendências das vazões observadas, tanto em termos de valores médios quanto em termos de variabilidade. Destaca-se o fato de que em relação à variabilidade, os gráficos apontaram para uma ligeira superestimativa do desvio padrão projetado, porém, com a mesma tendência nos períodos sazonais e anual. Faz-se apenas uma pequena ressalva nos períodos sazonais de outono e inverno no local 2F-SBRI (Figura 2.2B), que tiveram superestimativas estatisticamente significativas pelo teste B-F, como foi verificado na Tabela 2.3.

Figura 2.2 – Gráficos da vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) em cada período referentes aos postos localizados na SBRI, com a representação das médias e os desvios padrões (DP) dos valores observados e projetados.



Fonte: A autora, 2020.

Pesquisas anteriores realizadas na bacia do Rio Ivaí, também objetivando estimativas de vazão em outras escalas de tempo, alcançaram bons resultados embora utilizando metodologias e métricas diferentes das utilizadas neste trabalho.

Krauskopf Neto, Guetter e Mine (2007a), objetivando a implantação de um sistema de previsão hidrológica na bacia do Rio Ivaí, aplicou um modelo conceitual físico denominado 3R (GUETTER et al.,1996), que requeria como entrada dados de vazão, precipitação e

evapotranspiração potencial, e simulou as vazões diárias na bacia, alcançando resultados satisfatórios. Entretanto, os autores verificaram algumas subestimativas observadas nos hidrogramas simulados nos períodos de pico, o que evidenciou desvios padrões não homogêneos em relação aos das vazões observadas.

Assim como ocorreu na presente pesquisa, em que se fez necessário ajustar a homogeneidade dos desvios padrões projetados com os observados das vazões sazonais, Krauskopf Neto, Guetter e Mine (2007b) também realizaram correções nas estimativas das vazões diárias, utilizando para tanto um estimador de estado dinâmico-estocástico de natureza multivariada, atingindo ganho considerável na acuracidade das previsões realizadas pelo modelo 3R. É interessante salientar que mesmo realizando avaliações hidrológicas na bacia do Rio Ivaí, em escalas temporais diferentes, tanto nesta pesquisa (escalas sazonal e anual) como nas desenvolvidas (escala diária), foi apontada a necessidade de ajustes ou correções visando a homogeneidade da variabilidade das séries de vazões observadas e projetadas. Além do mais, é importante destacar que tanto nesta pesquisa quanto nas pesquisas conduzidas por Krauskopf Neto, Guetter e Mine (2007a) e Krauskopf Neto, Guetter e Mine (2007b), foram utilizados dados fluviométricos dos postos 3F-SBRI e 5F-SBRI.

Santos e Stevaux (2015) tendo como uma das finalidades de sua pesquisa a estimativa da vazão média de longo termo na bacia do Rio Ivaí, utilizaram modelos regressivos tendo como variável de entrada a área de drenagem (km²). Usando dados de 20 postos fluviométricos, dentre os quais os postos 2F-SBRI, 3F-SBRI e 5F-SBRI também utilizados nesta pesquisa, os autores conseguiram bons resultados quando compararam as vazões observadas e estimadas, por meio da avaliação do erro percentual entre os valores observados e estimados. Vale frisar que os autores realizaram as análises para a bacia inteira e em três segmentos da bacia em separado (superior, médio e inferior) os quais, segundo os autores, apresentaram aumento nos erros percentuais das estimativas de vazões, devido alguns trechos terem poucos postos fluviométricos. Diferentemente desta pesquisa, independentemente da quantidade de postos fluviométricos, as projeções das vazões sazonais e anuais foram determinadas localmente para cada ponto da bacia, buscando acuracidade em relação aos valores médios, bem como em relação à homogeneidade da variabilidade observada.

Na Tabela 2.7, são apresentados os resultados pertinentes aos testes estatísticos onde são comparadas as vazões observadas e as projetadas nas dez replicações do modelo, para cada período no local 6F-SART. Neste local, é possível constatar que o modelo apresentou um desempenho muito bom, projetando as vazões médias nos períodos sazonais e anual com uma exatidão muito próxima no que concerne à distribuição das vazões (teste K-S), aos valores

médios (teste WCX) e à homogeneidade da variabilidade (teste B-F). Em uma única replicação, no verão, observou-se significância estatística no teste de Wilcoxon, o que de certa forma é previsível e sem tendenciosidade, uma vez que uma parte da modelagem desenvolvida é estocástica.

Tabela 2.7 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 6F-SART.

		(continua)										
		Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}
<u>Ver</u>	Média	4,5	3,5	4,1	4,2	4,5	4,5	4,6	3,9	4,7	4,4	4,6
	DP	2,0	1,9	2,7	2,3	2,3	2,4	2,3	2,0	3,0	2,5	2,2
	K-S	-	0,24	0,73	0,73	0,95	0,75	1,00	0,73	0,75	1,00	1,00
	WCX	-	0,04*	0,45	0,71	0,82	1,00	0,93	0,29	0,89	0,93	0,93
	B-F	-	0,69	0,30	0,45	0,42	0,71	0,87	0,84	0,15	0,40	0,98
<u>Out</u>	Média	3,4	3,1	3,2	3,4	3,1	3,3	2,8	3,6	3,6	3,3	3,3
	DP	1,7	1,7	2,0	2,0	2,0	1,7	1,8	1,8	1,7	2,1	1,9
	K-S	-	0,96	0,96	0,96	0,75	0,96	0,47	0,73	0,96	0,96	0,96
	WCX	-	0,58	0,58	1,00	0,49	0,75	0,12	0,68	0,64	0,38	0,93
	B-F	-	0,86	0,37	0,52	0,27	0,72	0,80	0,66	0,76	0,30	0,77
<u>Inv</u>	Média	4,2	4,4	4,1	4,1	4,1	3,9	4,5	4,1	4,3	4,7	4,1
	DP	1,8	1,8	1,7	1,8	2,1	2,0	2,0	2,1	2,2	2,5	2,4
	K-S	-	0,47	0,96	1,00	0,95	0,75	0,75	0,96	0,75	0,73	0,73
	WCX	-	0,78	0,61	0,90	0,98	0,55	0,64	1,00	1,00	0,52	0,86
	B-F	-	0,68	0,85	0,09	0,34	0,51	0,49	0,50	0,35	0,17	0,15
<u>Prim</u>	Média	4,3	4,8	4,2	5,0	3,8	4,9	4,0	3,5	5,0	4,9	3,7
	DP	2,5	2,5	3,0	2,6	2,1	2,7	2,4	2,6	3,1	2,4	2,3
	K-S	-	0,75	0,75	0,75	0,96	0,75	0,96	0,75	0,75	0,45	0,75
	WCX	-	0,55	0,78	0,46	0,64	0,43	0,82	0,21	0,49	0,46	0,40
	B-F	-	0,85	1,00	0,91	0,42	0,64	0,67	0,75	0,80	0,45	0,72
<u>Anual</u>	Média	4,1	3,9	3,8	4,1	3,8	3,9	4,4	4,3	4,3	4,1	4,1
	DP	1,3	1,6	1,3	1,5	1,7	1,3	1,5	1,4	1,3	1,5	1,2
	K-S	-	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,75	0,25	0,96	1,00	0,75
	WCX	-	0,68	0,38	0,96	0,24	0,89	0,31	0,89	0,75	0,78	0,96
	B-F	-	0,49	0,95	0,66	0,45	0,82	0,60	0,61	0,99	0,62	0,93

Fonte: A autora, 2020.

Nota: resultados referentes aos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S), Wilcoxon (WCX) e Brown-Forsythe (B-F) comparando as vazões observadas (Q_{pe}) com as dez replicações das vazões projetadas (Q_{proj}).
 (*) p-value estatisticamente significativa ao nível de 5%.

As tabelas 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11, mostram os resultados dos testes K-S, WCX e B-F pertencentes aos postos 7F-SART, 8F-SART, 9F-SART e 10F-SART, respectivamente. Pode-se notar que o menor p-value encontrado (posto 9F-SART, Inverno, Q_{proj1} , teste de B-F), não apresentou diferença estatisticamente significativa, logo, para estes locais o modelo indicou um excelente desempenho na reprodução das distribuições, valores médios e variabilidade das vazões sazonais e anual.

Tabela 2.8 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 7F-SART.

(continua)												
	Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}	
Ver	Média	114,6	104,3	125,6	119,3	107,4	120,5	119,7	108,0	122,1	141,0	111,1
	DP	64,1	57,2	66,4	56,1	55,3	60,2	68,1	63,7	77,2	67,8	69,7
	K-S	-	0,88	0,88	0,71	0,88	0,71	0,88	0,88	0,88	0,12	0,98
	WCX	-	0,59	0,65	0,83	0,62	0,50	0,59	0,79	0,81	0,09	0,88
	B-F	-	0,48	0,84	0,75	0,42	0,69	0,52	0,84	0,31	0,98	0,64
Out	Média	109,2	101,8	122,2	123,7	94,9	116,7	114,3	111,1	97,5	112,6	122,4
	DP	84,6	77,5	88,4	91,5	81,1	89,4	84,9	84,8	74,8	102,8	98,8
	K-S	-	0,88	0,12	0,12	0,34	0,50	0,50	0,88	0,50	0,50	0,34
	WCX	-	0,74	0,54	0,44	0,30	0,92	0,72	0,91	0,46	0,72	0,71
	B-F	-	0,84	0,19	0,14	0,64	0,38	0,41	0,52	0,83	0,36	0,14
Inv	Média	130,8	120,9	133,5	130,6	130,5	137,3	129,5	128,7	138,5	124,5	130,5
	DP	81,8	80,3	95,3	97,7	94,2	97,6	95,1	91,6	91,9	68,4	90,6
	K-S	-	0,70	0,50	0,70	0,71	0,34	0,70	0,88	0,51	0,88	0,88
	WCX	-	0,14	0,98	0,79	0,92	0,91	0,34	0,81	0,74	0,44	0,93
	B-F	-	0,94	0,11	0,13	0,53	0,15	0,18	0,42	0,29	0,82	0,51
Prim	Média	136,6	126,4	144,3	126,6	135,5	135,2	133,4	125,8	110,3	139,0	138,9
	DP	74,9	80,0	73,8	78,8	83,1	82,5	72,6	74,2	64,1	84,0	76,3
	K-S	-	0,88	0,88	0,71	0,71	0,88	0,71	0,88	0,34	0,71	0,98
	WCX	-	0,37	0,59	0,57	0,72	0,91	0,72	0,36	0,77	0,99	0,61
	B-F	-	0,86	1,00	0,42	0,29	0,46	0,81	0,99	0,52	0,63	0,86

Tabela 2.8 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 7F-SART.

(conclusão)											
	Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}
Média	122,8	118,2	133,2	130,7	119,8	114,7	123,6	115,1	128,6	123,0	130,3
DP	51,6	56,9	56,4	59,8	49,4	58,5	47,1	54,3	58,4	57,9	53,1
Anual K-S	-	0,71	0,51	0,34	0,98	0,71	0,88	0,71	0,71	0,71	0,34
WCX	-	0,42	0,37	0,80	0,58	0,42	0,91	0,31	0,69	0,77	0,75
B-F	-	0,45	0,53	0,14	0,81	0,87	0,83	0,64	0,29	0,39	0,56

Fonte: A autora, 2020.

Nota: resultados referentes aos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S), Wilcoxon (WCX) e Brown-Forsythe (B-F) comparando as vazões observadas (Q_{pe}) com as dez replicações das vazões projetadas (Q_{proj}).

(*) p-value estatisticamente significante ao nível de 5%.

Tabela 2.9 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 8F-SART.

(continua)											
	Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}
Média	114,6	104,3	125,6	119,3	107,4	120,5	119,7	108,0	122,1	141,0	111,1
DP	64,1	57,2	66,4	56,1	55,3	60,2	68,1	63,7	77,2	67,8	69,7
Ver K-S	-	0,88	0,88	0,71	0,88	0,71	0,88	0,88	0,88	0,12	0,98
WCX	-	0,59	0,65	0,83	0,62	0,50	0,59	0,79	0,81	0,09	0,88
B-F	-	0,48	0,84	0,75	0,42	0,69	0,52	0,84	0,31	0,98	0,64
Média	109,2	101,8	122,2	123,7	94,9	116,7	114,3	111,1	97,5	112,6	122,4
DP	84,6	77,5	88,4	91,5	81,1	89,4	84,9	84,8	74,8	102,8	98,8
Out K-S	-	0,88	0,12	0,12	0,34	0,50	0,50	0,88	0,50	0,50	0,34
WCX	-	0,74	0,54	0,44	0,30	0,92	0,72	0,91	0,46	0,72	0,71
B-F	-	0,84	0,19	0,14	0,64	0,38	0,41	0,52	0,83	0,36	0,14
Média	130,8	120,9	133,5	130,6	130,5	137,3	129,5	128,7	138,5	124,5	130,5
DP	81,8	80,3	95,3	97,7	94,2	97,6	95,1	91,6	91,9	68,4	90,6
Inv K-S	-	0,70	0,50	0,70	0,71	0,34	0,70	0,88	0,51	0,88	0,88
WCX	-	0,14	0,98	0,79	0,92	0,91	0,34	0,81	0,74	0,44	0,93
B-F	-	0,94	0,11	0,13	0,53	0,15	0,18	0,42	0,29	0,82	0,51
Média	136,6	126,4	144,3	126,6	135,5	135,2	133,4	125,8	110,3	139,0	138,9
DP	74,9	80,0	73,8	78,8	83,1	82,5	72,6	74,2	64,1	84,0	76,3
Prim K-S	-	0,88	0,88	0,71	0,71	0,88	0,71	0,88	0,34	0,71	0,98
WCX	-	0,37	0,59	0,57	0,72	0,91	0,72	0,36	0,77	0,99	0,61

Tabela 2.9 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 8F-SART.

(conclusão)

	Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}
B-F	-	0,86	1,00	0,42	0,29	0,46	0,81	0,99	0,52	0,63	0,86
Média	122,8	118,2	133,2	130,7	119,8	114,7	123,6	115,1	128,6	123,0	130,3
DP	51,6	56,9	56,4	59,8	49,4	58,5	47,1	54,3	58,4	57,9	53,1
Anual K-S	-	0,71	0,51	0,34	0,98	0,71	0,88	0,71	0,71	0,71	0,34
WCX	-	0,42	0,37	0,80	0,58	0,42	0,91	0,31	0,69	0,77	0,75
B-F	-	0,45	0,53	0,14	0,81	0,87	0,83	0,64	0,29	0,39	0,56

Fonte: A autora, 2020.

Nota: resultados referentes aos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S), Wilcoxon (WCX) e Brown-Forsythe (B-F) comparando as vazões observadas (Q_{pe}) com as dez replicações das vazões projetadas (Q_{proj}).

(*) p-value estatisticamente significativa ao nível de 5%.

Tabela 2.10 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 9F-SART

(continua)

	Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}
Média	4,1	4,3	4,0	4,3	3,9	3,9	4,0	4,1	4,1	4,3	4,0
DP	1,4	1,5	1,6	1,4	1,4	1,3	1,5	1,6	1,4	1,5	1,6
Ver K-S	-	0,97	0,84	0,65	0,65	0,84	0,65	0,84	0,65	0,84	0,84
WCX	-	0,75	0,90	0,65	0,85	0,50	0,67	0,65	0,94	0,55	0,72
B-F	-	0,60	0,61	0,71	0,86	0,44	0,68	0,51	0,88	0,71	0,47
Média	3,1	3,2	3,0	3,1	2,8	3,2	2,8	3,2	3,1	2,8	3,2
DP	1,8	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	1,7	1,7	1,9	1,9
Out K-S	-	0,37	0,78	0,95	0,78	0,37	0,78	0,37	0,22	0,37	0,56
WCX	-	0,51	0,48	0,83	1,00	0,92	0,55	0,67	0,58	1,00	0,65
B-F	-	0,07	0,08	0,16	0,29	0,12	0,23	0,72	0,61	0,47	0,42
Média	3,2	3,1	3,2	3,1	2,9	3,3	3,0	3,1	3,0	3,4	2,9
DP	1,7	2,0	1,7	1,8	1,6	1,8	1,5	1,5	1,9	1,9	1,7
Inv K-S	-	0,29	0,45	0,45	0,45	0,10	0,84	0,45	0,65	0,17	0,45
WCX	-	0,93	0,83	0,65	0,35	0,71	0,85	0,85	0,67	0,56	0,50
B-F	-	0,05	0,27	0,21	0,45	0,10	0,60	0,67	0,24	0,12	0,42
Média	3,6	3,9	3,5	3,3	3,4	3,4	3,4	3,7	3,4	3,6	3,2
DP	1,9	1,8	2,1	2,0	2,0	1,6	1,9	1,8	2,1	1,8	1,9

Tabela 2.10 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 9F-SART

		(conclusão)										
		Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}
Prim	K-S	-	0,17	0,84	0,45	1,00	1,00	0,65	0,65	0,65	0,45	0,45
	WCX	-	0,19	0,66	0,46	0,78	0,44	0,42	0,74	0,49	0,82	0,62
	B-F	-	0,85	0,39	0,37	0,84	0,85	0,50	0,67	0,40	0,78	0,52
	Média	3,5	3,4	3,6	3,2	3,5	3,7	3,4	3,4	3,5	3,4	3,5
	DP	1,1	1,3	1,1	1,1	0,9	1,1	1,3	1,1	1,3	1,2	1,2
Anual	K-S	-	0,25	0,56	0,75	0,56	0,39	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	WCX	-	0,19	0,80	0,98	0,37	0,21	0,86	0,36	0,97	0,64	0,39
	B-F	-	0,52	0,18	0,27	0,36	0,71	0,26	0,96	0,22	0,30	0,28

Fonte: A autora, 2020.

Nota: resultados referentes aos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S), Wilcoxon (WCX) e Brown-Forsythe (B-F) comparando as vazões observadas (Q_{pe}) com as dez replicações das vazões projetadas (Q_{proj}).

(*) p-value estatisticamente significativa ao nível de 5%.

Tabela 2.11 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 10F-SART.

		(continua)										
		Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}
	Média	342,3	363,7	359,5	365,1	354,7	336,2	365,8	356,0	339,5	351,4	362,2
	DP	149,1	150,8	171,4	173,2	149,8	138,4	154,2	172,6	151,9	170,0	153,7
Ver	K-S	-	0,56	0,56	0,56	0,39	0,75	0,75	0,56	0,75	0,75	0,39
	WCX	-	0,40	0,74	0,58	0,79	0,95	0,61	0,59	0,74	0,96	0,40
	B-F	-	0,66	0,40	0,20	0,93	0,06	0,83	0,31	0,87	0,73	0,74
	Média	288,5	265,2	304,1	272,6	273,8	285,0	292,0	285,8	271,0	296,2	276,7
	DP	198,7	192,8	207,1	183,1	216,1	227,3	175,2	213,9	187,3	181,4	178,6
Out	K-S	-	0,25	0,56	0,38	0,09	0,38	0,91	0,56	0,56	0,75	0,75
	WCX	-	0,15	0,88	0,78	0,43	0,40	0,85	0,61	0,61	0,87	0,67
	B-F	-	0,34	0,25	0,38	0,10	0,18	0,73	0,24	0,44	0,87	0,55
	Média	302,5	280,1	316,1	308,9	285,4	283,1	311,9	302,5	288,6	294,5	283,3
	DP	168,2	189,1	197,7	189,1	185,2	198,9	189,7	184,3	197,3	173,9	188,4
Inv	K-S	-	0,56	0,75	0,56	0,25	0,75	0,25	0,38	0,56	0,75	0,38
	WCX	-	0,47	0,67	0,93	0,75	0,41	0,99	0,88	0,56	0,61	0,59
	B-F	-	0,30	0,18	0,19	0,10	0,21	0,09	0,20	0,44	0,73	0,19
	Média	348,8	305,5	324,6	329,1	322,2	377,1	368,2	340,3	390,7	333,1	338,3

Tabela 2.11 - Média, desvio padrão (DP) e p-values para cada período analisado no posto 10F-SART.

		(conclusão)										
		Q_{pe}	Q_{proj1}	Q_{proj2}	Q_{proj3}	Q_{proj4}	Q_{proj5}	Q_{proj6}	Q_{proj7}	Q_{proj8}	Q_{proj9}	Q_{proj10}
	DP	162,9	176,1	170,4	192,1	177,8	183,0	177,4	190,5	191,3	162,3	179,6
Prim	K-S	-	0,38	0,91	0,75	0,91	0,56	0,75	0,39	0,39	0,91	0,91
	WCX	-	0,19	0,54	0,38	0,12	0,47	0,63	0,85	0,30	0,61	0,69
	B-F	-	0,53	1,00	0,32	0,81	0,22	0,65	0,17	0,47	1,00	0,30
	Média	271,6	254,6	266,9	269,1	279,3	280,3	287,1	269,8	270,9	263,2	264,5
	DP	103,5	112,7	110,5	118,5	92,0	103,2	120,1	111,9	101,3	99,4	97,6
Anual	K-S	-	0,09	0,75	0,39	0,73	0,75	0,75	0,75	0,56	0,56	0,91
	WCX	-	0,48	0,70	0,86	0,53	0,83	0,58	0,79	0,79	0,59	0,54
	B-F	-	0,21	0,35	0,24	0,94	0,47	0,33	0,26	0,37	0,68	0,50

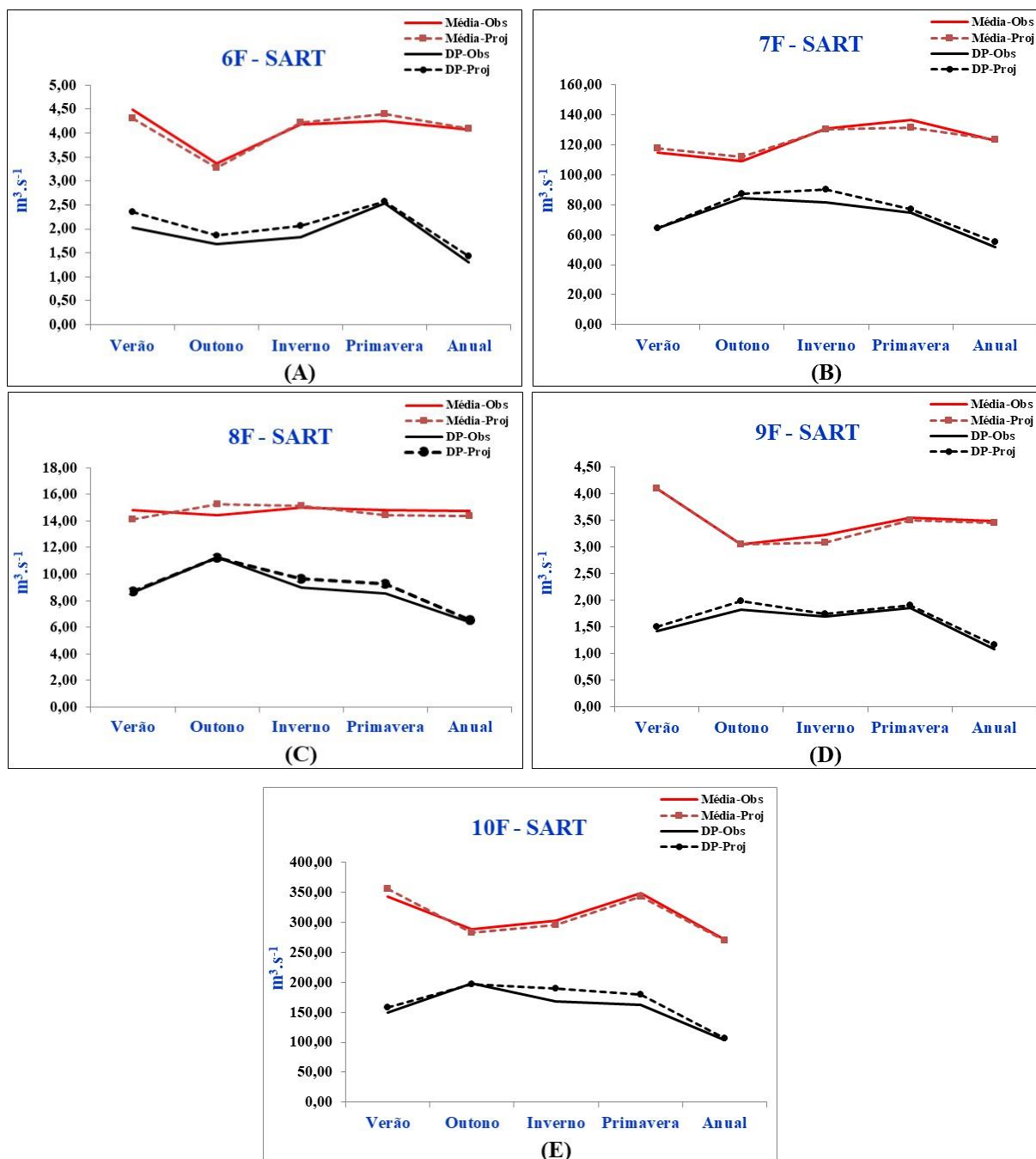
Fonte: A autora, 2020.

Nota: resultados referentes aos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S), Wilcoxon (WCX) e Brown-Forsythe (B-F) comparando as vazões observadas (Q_{pe}) com as dez replicações das vazões projetadas (Q_{proj}).

(*) p-value estatisticamente significativa ao nível de 5%.

Mediante as análises realizadas, constatou-se que o modelo apresentou ótimos resultados em relação aos valores médios projetados das vazões sazonais e anual para os locais analisados na SART. Na Figura 2.3, se pôde verificar que, no geral, para a SART, assim como na SBRI, os gráficos apontaram para uma pequena superestimativa do desvio padrão projetado, porém, as vazões projetadas apresentaram a mesma tendência das vazões observadas, tanto em relação aos valores de vazão média quanto à variabilidade dos períodos sazonais e anual.

Figura 2.3 – Gráficos da vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) em cada período referentes aos postos localizados na SBRI, com a representação das médias e os desvios padrões (DP) dos valores observados e projetados.



Fonte: A autora, 2020.

Sousa *et al.* (2014), apesar de não terem realizado a aplicação de modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica do Tibagi, realizaram considerações acerca do regime hidrológico e suas relações com o regime pluviométrico em postos que compreendem a bacia do rio Tibagi em sua totalidade, apresentando resultados que podem ser comparados ao realizar análises sobre o modelo apresentado. Dentre os postos fluviométricos utilizados, os quais figurava também o 7F-SART, os autores verificaram que os picos de vazão não ocorreram exclusivamente no

período do verão, como é mostrado na Figura 2.3B (na qual o inverno e primavera possuem vazões observadas e projetadas superiores às respectivas vazões do verão) e na Figura 2.3E (onde a primavera apresenta vazões próximas vazões observadas e projetadas do verão). No entanto, na Figura 2.3C não há picos significativos na tendência das vazões médias (observadas e projetadas), sendo possível perceber que o modelo foi capaz de projetar muito bem o regime hidrológico local.

Outros autores trabalharam com outras bacias hidrográficas no estado do Paraná, utilizando modelos de chuva-vazão e métricas de avaliação diferentes, porém com resultados considerados bons.

Scheidt e Brunetto (2011) aplicaram uma modelagem chuva-vazão na bacia do rio Piquiri, localizada a oeste no estado do Paraná, utilizando inicialmente Redes Neurais Artificiais (RNA), e posteriormente, RNA acoplada a Algoritmos Genéticos (AG), que possibilitaram encontrar o erro mínimo do processo de modelagem. Os autores utilizaram cinco postos pluviométricos e um fluviométrico numa escala diária, e concluíram que para as duas metodologias avaliadas os resultados foram bons, frisando que o processo de estimativa apresenta vantagens por envolver apenas duas variáveis hidrológicas, assim como o modelo proposto neste trabalho, que também resumiu o processo de estimativa da vazão como função da precipitação.

É importante destacar que os modelos chuva-vazão geram informações estimadas, que podem servir de entrada em outros modelos hidrológicos, auxiliando por exemplo, sistemas de alerta a inundações. Nesse contexto, objetivando avaliar dados simulados de vazão a partir de dados de chuva de radar meteorológico integrados com dados de pluviometria, Moreira, Mine e Pereira Filho (2007) aplicaram o modelo IPH-II (Tucci, 1998) na bacia do Rio Barigui na região de Curitiba-PR, alcançando resultados satisfatórios, porém com tendência de subestimativas das vazões simuladas em relação às observadas, principalmente em horários onde ocorreram picos de vazão. É de se esperar que modelos para estimativas ou simulações de vazões em escalas temporais menores, tendem apresentar acurácia reduzida no processo de validação. Além do mais, o tamanho do período de registros históricos para o processo de modelagem e/ou calibração dos modelos chuva-vazão, também pode resultar em perda de qualidade dos dados gerados. Diferentemente dessas circunstâncias, o modelo proposto neste trabalho tem como uma de suas prerrogativas para os resultados excelentes encontrados e, conseqüentemente, apresentando ótimo desempenho, o fato de requerer séries de dados maiores, uma vez que as escalas temporais analisadas, também abrangem longos períodos.

É relevante frisar que, no que tange a projeção de variáveis hidrológicas em escalas temporais maiores, as previsões sazonais de vazão podem se configurar como uma importante ferramenta para gestão regional dos recursos hídricos, uma vez que podem disponibilizar hidrogramas originados a partir de previsões climáticas em substituição aos hidrogramas de séries históricas, tornando os sistemas de tomada de decisão hidrológica mais efetivos, principalmente em cenários futuros.

Collischonn *et al.* (2005), assim como no presente trabalho, já tinham destacado o uso de previsões sazonais para variáveis hidrológicas, quando aplicaram um modelo hidrológico de grandes bacias denominado MGB combinado com um modelo climatológico do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), na bacia do Rio Uruguai, localizada na região no sul do país. Os autores demonstraram por meio de hidrogramas que, utilizando a vazão futura gerada com uma estimativa de incerteza num período sazonal, é possível analisar anomalias e estabelecer limites mínimos e máximos de oscilação para o processo decisório hidrológico.

No geral, o modelo desenvolvido apresentou resultados muito bons em relação às projeções dos valores médios, assim como também representou muito bem as variabilidades projetadas das vazões sazonais e anual para os locais avaliados na SBRI e na SART. Além disso, outro aspecto importante que foi avaliado nesta pesquisa, que geralmente não é investigado em estudos de regionalização de vazão, se refere à concordância entre distribuição dos dados das vazões observadas e projetadas (simuladas ou previstas), que geralmente são analisadas por meio de testes de aderência como o teste K-S. Ademais, outro aspecto que é oportuno salientar, foi o fato de que o novo modelo apresentado não provocou distorção ou disformidade nos resultados obtidos, advindos de características ou fatores locais, como por exemplo, da ocorrência dos tipos climáticos Cfa e Cfb nas sub-bacias do baixo Rio Ivaí (SBRI) e do alto Rio Tibagi (SART), respectivamente.

2.4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o modelo híbrido chuva-vazão proposto neste trabalho, cujo qual requer como entrada apenas dados de precipitação pluvial, apresentou desempenho muito bom na projeção das vazões sazonal e anual nas sub-bacias do baixo Rio Ivaí e do Alto Rio Tibagi, localizadas no estado do Paraná.

Além disso, no processo de verificação e validação dos dados gerados, foi constatado estatisticamente que o novo modelo não apresentou disformidade no desempenho, motivada

por fatores locais de natureza climatológica, uma vez que as sub-bacias estavam localizadas em regiões climáticas distintas. Ademais, outro aspecto importante que foi examinado, além da avaliação da concordância dos valores médios e da homogeneidade da variabilidade entre as vazões projetadas e observadas, se refere à apreciação da similitude entre as distribuições dos dados, que neste trabalho foi analisada por meio da aplicação do teste aderência de Kolmogorov-Smirnov, o qual apontou uma ótima correspondência entre as distribuições das séries históricas e projetadas pelo modelo, perspectiva esta que geralmente não é investigada em estudos de regionalização de vazão.

CAPÍTULO 3

PROJEÇÃO DE VAZÕES OBTIDAS POR UM MODELO CHUVA-VAZÃO HÍBRIDO DETERMINÍSTICO-ESTOCÁSTICO EM SUB-BACIAS LOCALIZADAS EM REGIÕES CLIMATICAMENTE DISTINTAS NO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO FUTUROS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

RESUMO

Os estudos sobre o comportamento das variáveis hidroclimáticas são importantes mediante a necessidade de embasar, de forma científica a tomada de possíveis medidas de adaptação ou mitigação de impactos advindos das mudanças climáticas. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo projetar a vazão em períodos sazonais e anual nas Sub-bacias do Baixo Rio Ivaí e do Alto Rio Tibagi, localizadas em regiões climaticamente distintas no estado do Paraná, que dependem de precipitações geradas por perturbações estatísticas como uma consequência de possíveis elevações da temperatura do ar, que por sua vez, estão previstas para o final do século XXI, conforme cenários de mudanças climáticas descritos no quinto relatório do *IPCC*. Para tanto foram utilizados dados pluviométricos e fluviométricos do intervalo de tempo entre 1898-2018 de 27 localidades. O *software* PGECLIMA_R foi utilizado como simulador de dados climáticos tanto preencher dados no intervalo histórico (1898-2018), como projetar dados para os intervalos futuros (2019-2099) onde foram consideradas alterações de 1,7°C, para o cenário C1, e 4,8°C, para o cenário C2. As vazões foram obtidas por meio da aplicação dos dados pluviométricos no modelo chuva-vazão híbrido determinístico-estocástico. Os resultados da precipitação foram apresentados por meio da interpolação geostatística fazendo uso o modelo estável, e os da vazão foram apresentados pontualmente, em cada localidade. Os resultados sazonais e anuais indicam que as possíveis mudanças de vazão projetadas para o cenário C2 são superiores às do cenário C1 nas duas sub-bacias, principalmente nos períodos do verão e da primavera, fato reforçado pelos aumentos observados em 7F-SBRI, 15F-SART e 16F-SART. Sendo assim, é possível concluir que apesar das sub-bacias apresentarem climas distintos, as projeções indicam aumentos de vazão para as ambas regiões ao longo do presente século.

Palavras-chave: bacias hidrográficas, tipos climáticos, aquecimento global, modelo hidrológico.

ABSTRACT

Studies on the behavior of hydroclimatic variables are important due to the need to scientifically support possible measures for adaptation or mitigation of impacts arising from climate change. Therefore, the present work aimed to project the flow in seasonal and annual periods in the Lower Ivaí River and Upper Tibagi River Sub-basins, located in climatically different regions in the state of Paraná, which depend on precipitations generated by statistical disturbances such as a consequence of possible increases in air temperature, which in turn, are predicted for the end of the 21st century, according to climate change scenarios described in the fifth report of the *IPCC*. For this purpose, rainfall and fluviometric data from the time interval between 1898-2018 from 27 locations were used. The program PGECLIMA_R was used as a simulator of climatic data, both to fill data in the historical interval (1898-2018), as well as to project data for future intervals (2019-2099) where changes of 1.7 ° C were considered, for scenario C1,

and 4.8 ° C, for scenario C2. The runoff was obtained through the application of rainfall data in the deterministic-stochastic hybrid rainfall-runoff model. The results of the precipitation were presented by means of geostatic interpolation using the stable model, and the results of the flow were presented punctually, in each location. The seasonal and annual results indicate that the possible flow changes projected for scenario C2 are higher than those of scenario C1 in the two sub-basins, mainly in the summer and spring periods, a fact reinforced by the increases observed in 7F-SBRI, 15F- SART and 16F-SART. Thus, it is possible to conclude that although the sub-basins have different climates, the projections indicate increases in flow for both regions throughout the present century.

Keywords: hydrographic basins, climatic types, climate changes, hydrological model.

3.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das condições hidrológicas e climáticas compõe aspectos fundamentais nos progressos realizados pela humanidade. Atividades como o abastecimento de água potável, e o fornecimento de energia via hidroelétricas, necessitam de informações hidroclimatológicas para auxílio dos gestores na tomada de decisões para que não haja grandes imprevistos para a comunidade ou população.

Nesse contexto, tem-se que a precipitação pluviométrica é a variável climática associada aos maiores impactos sociais e econômicos, podendo ser relacionados a excesso ou escassez (BRITO et al., 2016). Na região sul do Brasil, no período 1990 a 2010, em geral, foram observados os maiores números de registros de desastres hidrológicos em relação ao restante do país, especialmente aqueles associados a chuvas intensas e escoamentos de alta velocidade, ou seja, alagamentos e enxurradas (CARMO; ANAZAWA, 2014).

Entender sobre a sazonalidade e o padrão espacial é indispensável em pesquisas sobre zonas de culturas, projetos de irrigação e mudanças climáticas, além de uma infinidade de atividades nas quais a precipitação tem uma interferência menos direta, mas não menos importante (APARECIDO et al., 2016; ALVES, 2016).

Freire e Baldo (2017) explicam que análises geográficas e ambientais costumam utilizar bacias hidrográficas, tendo em vista o ciclo hidrológico, no qual a precipitação é a entrada efetiva de água na bacia hidrográfica, que posteriormente, tem uma grande quantidade encaminhada para a foz do rio, ou seja, entende-se que a precipitação é capaz de contribuir em toda a extensão do rio.

De acordo com Lavenne *et al.* (2016) e Qiu *et al.* (2016), a precipitação pluviométrica é o fator mais impactante na dinâmica de fluxo do rio e que a relação entre a precipitação e a vazão dos rios é de difícil separação, devido à complexidade dos processos individuais.

As alterações nos padrões de temperatura e precipitação provocadas pelas mudanças climáticas possivelmente causarão impactos na água disponível (volumes e distribuição), tendo em vista a indispensabilidade da mesma (ANA, 2016). Provavelmente uma das primeiras consequências das mudanças climáticas seja afetar os múltiplos usos da água e a população em geral.

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2013), conhecido como *IPCC* estima-se que a influência humana tenha afetado o ciclo global da água desde 1960, por meio de modificações dos padrões de precipitação e evapotranspiração, o que pode impactar diretamente na umidade do solo, reserva subterrânea e a geração do escoamento superficial.

Segundo Krysanova *et al.* (2018), os modelos climáticos são as principais ferramentas das análises atuais para avaliar o clima que provavelmente teremos no futuro. Os Modelos Climáticos Globais (MCG's) são ajustados para simular a circulação da atmosfera em todo o planeta. Em alguns locais, esses modelos poderão representar bem o padrão atmosférico, enquanto que em outros, não. Nesses casos, pode-se realizar a redução dinâmica de escala, usando Modelos Regionais de Clima (MRC's).

Quando as previsões de precipitação são comparadas diretamente com os dados observados, via de regra, nota-se que, para muitas regiões, os MCG's apresentam desvios sistemáticos em relação às observações, em alguns casos sendo necessário, para uma melhor acuracidade dos resultados, um processo adicional para correção do viés (ZHAO *et al.*, 2017). Sampaio e Dias (2014) explicaram que a experiência adquirida com o desenvolvimento dos MCG's, possibilitou o desenvolvimento dos MRC's, sendo que estes apresentam a vantagem de detalhar os resultados simulados por modelos globais com menor esforço computacional.

Valério e Fragoso (2014) explicaram que os modelos climáticos são avaliados quanto à sua capacidade de simular adequadamente o clima atual e o passado em relação às condições médias e suas variações. Portanto, se um modelo consegue representar bem o clima passado até o presente, ele é considerado um modelo aceitável para realizar estimativas futuras.

Além destas ferramentas, existem também os geradores de dados climáticos estocásticos que são aplicados de forma regional sendo capazes de gerar dados considerando as mudanças climáticas, como foi o observado nos trabalhos realizados por Vaghefi e Yu (2017), que fizeram uso do CLIGEN (NICKS; HARP, 1980) ao validar métodos de ajuste dos parâmetros do mesmo usando modelos hidrológicos conceituais aplicados em regiões da Austrália, e por Neves *et al.* (2020), que realizaram um estudo no estado de São Paulo, no qual se utilizou o PGECLIMA_R

(Virgens Filho et al., 2013) para gerar dados que foram aplicados em um modelo hidrológico regionalizado, considerando cenários climáticos impactados com base no 5º relatório do *IPCC*.

Como apontado anteriormente, pesquisas mais regionalizadas e mais específicas são importantes, a fim de evitar erros provenientes de simulação em grande escala, tendo em vista que as consequências do aquecimento global, decorrentes das mudanças do clima, não atingirão uniformemente todas as regiões do planeta.

Nesse sentido, apesar de Sampaio e Dias (2014) informarem que o sul do Brasil apresenta previsibilidade climática sazonal de confiabilidade média, Roland *et al.* (2012) afirmam que há uma grande incerteza em relação aos efeitos de alterações climáticas nos recursos hídricos no Brasil.

Na região sul do Brasil e no norte da Argentina foram observadas tendências para aumento das chuvas e vazões de rios desde meados do século XX (PBMC, 2013). O trabalho de Grimm *et al.* (2012), demonstrou que houve tendência de aumento das precipitações no Sul do Brasil entre 1950-2000, principalmente no período anterior e posterior a década de 70, que consequentemente impactou na vazão regional conforme registros hidrológicos.

Com o intuito de subsidiar futuras ações de adaptação e mitigação, esta pesquisa objetivou projetar a vazão em períodos sazonais e anual nas Sub-bacias do Baixo Rio Ivaí e do Alto Rio Tibagi, localizadas em regiões climaticamente distintas no estado do Paraná, utilizando para tanto, um modelo chuva-vazão híbrido determinístico-estocástico acoplado ao gerador de dados climáticos PGECLIMA_R, cujo qual no processo de simulação da precipitação, pode gerar perturbações estatísticas como uma consequência da elevação da temperatura do ar, que por sua vez, está prevista para o final do século XXI conforme cenários de mudanças climáticas descritos no quinto relatório do *IPCC* (IPCC, 2013).

3.2 METODOLOGIA

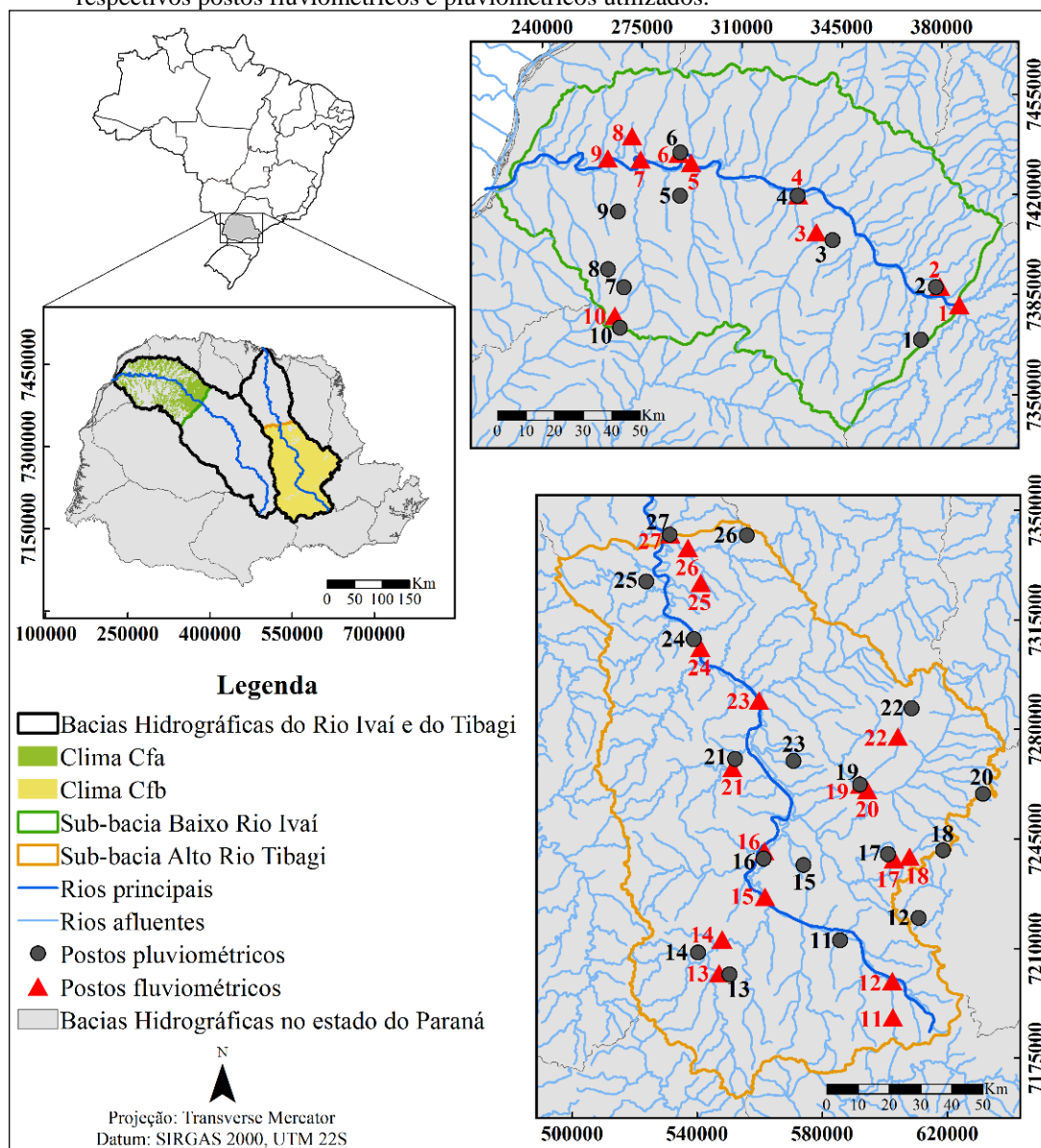
Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Estatística Computacional e Aplicada – LECA da Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG, localizada no estado do Paraná.

De acordo com SEMARH (2010), o estado do Paraná tem uma área de 196.490,1 km² e está situado na região sul do Brasil, fazendo divisa ao norte com o estado de São Paulo e ao sul com o estado de Santa Catarina, possuindo 16 bacias hidrográficas, entre elas a bacia do rio Ivaí e do rio Tibagi.

O estado do Paraná apresenta os tipos climáticos dominantes Cfa e Cfb, na porção noroeste e na porção sudeste, próximo ao centro, respectivamente (RAUEN *et al.*, 1977;

NITSCHKE *et al.*, 2019), sendo que as Sub-bacias do Baixo Rio Ivaí (SBRI) com área de 13.431,5 km², e Alto Rio Tibagi (SART), com área de 16.100,4 km², estão inseridas respectivamente em regiões de cada um dos dois tipos climáticos, como mostra a Figura 3.1a.

Figura 3.1 - Localização, no estado do Paraná, da hidrografia e dos climas encontrados nas SBRI e SART com os respectivos postos fluviométricos e pluviométricos utilizados.



Fonte: A autora, 2020.

Sobre os componentes que integram os aspectos físicos das bacias, entende-se que rio Ivaí nasce no Segundo Planalto e corta todo o Terceiro Planalto em sentido noroeste. De acordo com Maack (1981), na porção noroeste da bacia do rio Ivaí, encontra-se o arenito da Formação Caiuá do grupo Bauru do período Cretáceo. Essa formação é constituída por apresentar arenitos de coloração vermelho-arroxeados, conhecida como “terra vermelha”.

Ainda de acordo com o autor, a bacia do rio Tibagi é encontrada nos três planaltos, também denominados como Planalto de Curitiba (primeiro planalto), Planalto de Ponta Grossa (segundo planalto) e o Planalto de Guarapuava (terceiro planalto). A área onde a SART esta localizada encontra-se o primeiro planalto representado por rochas do embasamento cristalino, que correspondem aos grupos Castro e Açungui e o segundo planalto, representado geologicamente pela sequência de sedimentos da Bacia Sedimentar do Paraná, ou seja, desde o Grupo Rio Ivaí até a Formação Botucatu.

Por serem de grandes extensões, as bacias hidrográficas possuem uma variedade muito grande de solos, como argissolos, cambissolos, latossolos e neossolos, que é de predominância do tipo flúvico na SBRI, e litólico na SART (EMBRAPA, 1999).

Segundo o Manual Técnico da Vegetação Brasileira do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1992), a cobertura vegetal primitiva na bacia hidrográfica do rio Ivaí é formada pela Floresta Ombrófila Mista, savana, estepe e Floresta Estacional Semidecidual, mais presente na SBRI, enquanto que a bacia do rio Tibagi, além de ser também ser formada Floresta Ombrófila Mista e estepe, apresenta ainda Floresta Ombrófila Densa e os chamados “capões”, onde são encontradas a árvore característica do Paraná, a *Araucaria angustifolia*.

Na Tabela 3.1, são apresentadas informações acerca dos postos pluviométricos e fluviométricos inseridos na área da SBRI (Figura 3.1b) e da SART (Figuras 3.1c), cujos dados hidroclimatológicos foram obtidos junto ao Instituto Águas Paraná, sendo que os dados de pluviometria estão na escala diária e os dados de fluviometria na escala mensal, com período compreendido entre 1989 a 2018, totalizando 30 anos de série histórica.

Tabela 3.1 - Informações sobre aos postos analisados, incluindo a identificação da dupla (ID) dos postos fluviométricos e pluviométricos e a sub-bacia, as outras colunas são referentes ao nome do posto, ao código, às coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude (m)) e a área de drenagem (km²).

(continua)						
ID	Posto	Código	Latitude	Longitude	Alt.(m)	Área (km ²)
1F-SBRI	Porto Bananeiras	64675002	23° 40'	52° 07'	520	23107,6
1P- SBRI	Eng. Beltrão	2352034	23° 46'	52° 15'	520	
2F-SBRI	Sítio Ouro Verde	64675800	23° 37'	52° 10'	300	8
2P-SBRI	Sítio Floresta	2352061	23° 37'	52° 11'	339	
3F-SBRI	Japurá	64682000	23° 07'	53° 13'	285	818
3P-SBRI	Japurá	2352045	23° 28'	52° 33'	500	
4F-SBRI	Porto P. do Norte	64685000	23° 19'	52° 39'	250	28427
4P-SBRI	Porto P. do Norte	2352000	23° 19'	52° 40'	250	
5F-SBRI	Tapira	64689000	23° 13'	53° 01'	240	31955
5P-SBRI	Tapira	2353034	23° 19'	53° 04'	401	

Tabela 3.1 - Informações sobre aos postos analisados, incluindo a identificação da dupla (ID) dos postos pluviométricos e pluviométricos e a sub-bacia, as outras colunas são referentes ao nome do posto, ao código, às coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude (m)) e a área de drenagem (km²).

(continuação)						
ID	Posto	Código	Latitude	Longitude	Alt.(m)	Área
6F-SBRI	Fazenda Vitoria	64689800	23° 11'	53° 04'	250	21
6P-SBRI	Aparecida do Ivaí	2353041	23° 10'	53° 04'	300	
7F-SBRI	Sítio St. Antônio	64691000	23° 35'	53° 12'	331	331
7P-SBRI	São José do Ivaí	2353038	23° 07'	53° 16'	339	
8F-SBRI	Barraco de zinco	64690200	23° 07'	53° 13'	280	18
8P-SBRI	São José do Ivaí	2353038	23° 07'	53° 16'	339	
9F-SBRI	Novo Porto Taquara	64693000	23° 11'	53° 18'	240	34432
9P-SBRI	Douradina	2353033	23° 22'	53° 16'	450	
10F-SBRI	ETA-Umuarama	64691040	23° 41'	53° 18'	335	38,5
10P-SBRI	Umuarama IAPAR	2353008	23° 43'	53° 16'	480	
11F-SART	ETA-Palmeira	64429000	25° 25'	49° 58'	810	26,4
11P-SART	Santa Cruz	2550003	25° 12'	50° 09'	790	
12F-SART	Ponta Gr. montante	64430200	25° 19'	49° 58'	800	546,2
12P-SART	Itaiacoca	2549052	25° 07'	49° 54'	1012	
13F-SART	ETA-Irati	64441020	25° 17'	50° 31'	750	240
13P-SART	Região KM 9	2550049	25° 18'	50° 30'	950	
14F-SART	Lajeado	64442800	25° 11'	50° 31'	780	1319
14P-SART	Imbituva	2550048	25° 14'	50° 36'	869	
15F-SART	Uvaia	64444000	25° 04'	50° 23'	975	4450
15P-SART	Bocaina	2450021	24° 58'	50° 16'	950	
16F-SART	Eng. Rosaldo Leitão	64447000	24° 56'	50° 23'	830	5731
16P-SART	Eng. Rosaldo Leitão	2450056	24° 57'	50° 23'	780	
17F-SART	Ronca porco	64449570	24° 57'	49° 58'	925	112
17P-SART	Catanduva de fora	2450024	24° 57'	50° 00'	1000	
18F-SART	Represa Alagados	64449500	24° 57'	49° 55'	900	145,1
18P-SART	Abapã	2449026	24° 56'	49° 49'	1007	
19F-SART	Chác. cachoeira	64477600	24° 44'	50° 05'	970	1604
19P-SART	Chác. cachoeira	2450013	24° 45'	50° 05'	1009	
20F-SART	Fundão	64476000	24° 46'	50° 04'	975	1232
20P-SART	Socavão	2449028	24° 46'	49° 42'	1051	
21F-SART	Bom jardim	64460000	24° 42'	50° 29'	750	722
21P-SART	Bom jardim	2450009	24° 42'	50° 28'	750	
22F-SART	Tibagi	64465000	24° 30'	50° 24'	750	8948
22P-SART	Faz. São Carlos	2450025	24° 40'	50° 18'	1200	
23F-SART	Tijuco preto	64477020	24° 36'	49° 58'	970	197
23P-SART	Piraí do Sul	2449011	24° 31'	49° 55'	1068	
24F-SART	Telêmaco Borba	64482000	24° 21'	50° 35'	700	13803
24P-SART	Telêmaco Borba	2450011	24° 19'	50° 37'	768	
25F-SART	Faz. Santana	64483950	24° 10'	50° 35'	715	296
25P-SART	Lageado Bonito	2450043	24° 22'	50° 19'	850	

Tabela 3.1 - Informações sobre aos postos analisados, incluindo a identificação da dupla (ID) dos postos pluviométricos e pluviométricos e a sub-bacia, as outras colunas são referentes ao nome do posto, ao código, às coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude (m)) e a área de drenagem (km²).

ID	Posto	Código	Latitude	Longitude	Alt.(m)	(conclusão)
						Área
26F-SART	Salto das antas	64490900	24° 04'	50° 38'	604	629,7
26P-SART	Curiuva	2450046	24° 01'	50° 27'	750	
27F-SART	Br. Rib. das antas	64491000	24° 01'	50° 41'	1000	16102
27P-SART	Br. Rib. das antas	2450003	24° 01'	50° 41'	1000	

Fonte: Adaptado do INSTITUTO ÁGUAS PARANÁ, 2019.

Nota: as duplas dos postos pluviométricos e pluviométricos foram apresentadas por um número, seguido por “F” ou “P” e por “SBRI” ou “SART”.

Eventuais falhas verificadas nos dados pluviométricos diários foram preenchidas utilizando o *software* PGECLIMA_R. Após o complemento das séries, não havendo mais falhas nos dados históricos, realizou-se o acumulo mensal para cada posto.

Após o processo de consistência das séries mensais de pluviometria, os dados pluviométricos e os dados fluviométricos foram organizados em cinco períodos, sendo que em quatro deles levou-se em consideração as estações do ano: verão (jan, fev e mar), outono (abr, mai e jun), inverno (jul, ago e set), primavera (out, nov e dez); mais o período anual.

As falhas ocasionais verificadas nos dados fluviométrico sazonais e anuais para os locais avaliados, foram preenchidas pelas projeções efetuadas por meio da Equação 3.1, referenciada no capítulo 2 como Equação 2.12.

$$Q_{Proj} = Q_{pest} + \varepsilon_{Q_{pesim}} \quad (3.1)$$

em que,

Q_{Proj} é a vazão projetada (em m³.s⁻¹) no período considerado (sazonal ou anual) para um ano qualquer;

Q_{pest} é a vazão estimada (em m³.s⁻¹) como definido na Equação 2.7 do capítulo 2;

$\varepsilon_{Q_{pesim}}$ o erro simulado para Q_{pest} conforme definido na Equação 2.11 do capítulo 2.

Para a projeção dos cenários climáticos, foram considerados dois cenários contrastantes, previstos pelo IPCC (RCP 2.6 e RCP 8.5) em seu Quinto Relatório de Avaliação (IPCC, 2013), conhecido como AR5.

A projeção para a precipitação foi baseada na ideia de Pyke (2005), que estabeleceu uma relação entre a variação de temperatura e precipitação, em que para flutuação de cada 1°C, varia-se, aproximadamente, 10% na precipitação. Desta forma, assim como em Tsuneto e

Virgens Filho (2020), considerou-se que para o cenário menos pessimista (RCP 2.6), aqui designado como C1, que prevê um aumento de até 1,7°C nas temperaturas médias até o final do século, foi projetado um aumento de 17% nos níveis mensais de precipitação, enquanto que, para o cenário mais pessimista (RCP 8.5), doravante designado como C2, que prevê um aumento de até 4,8°C, foi concebido um acréscimo de 48% nos totais mensais de precipitação até 2099, para cada local.

Utilizando PGECLIMA_R foram realizadas três replicações da simulação de precipitação para cada cenário e local no intervalo de 2019 até 2099. Na sequência, os dados diários de precipitação das três séries simuladas foram agrupados nos períodos sazonais e anual definidos anteriormente, onde posteriormente foram calculados os totais médios para cada período, para projetar a respectiva vazão por meio da Equação 3.1.

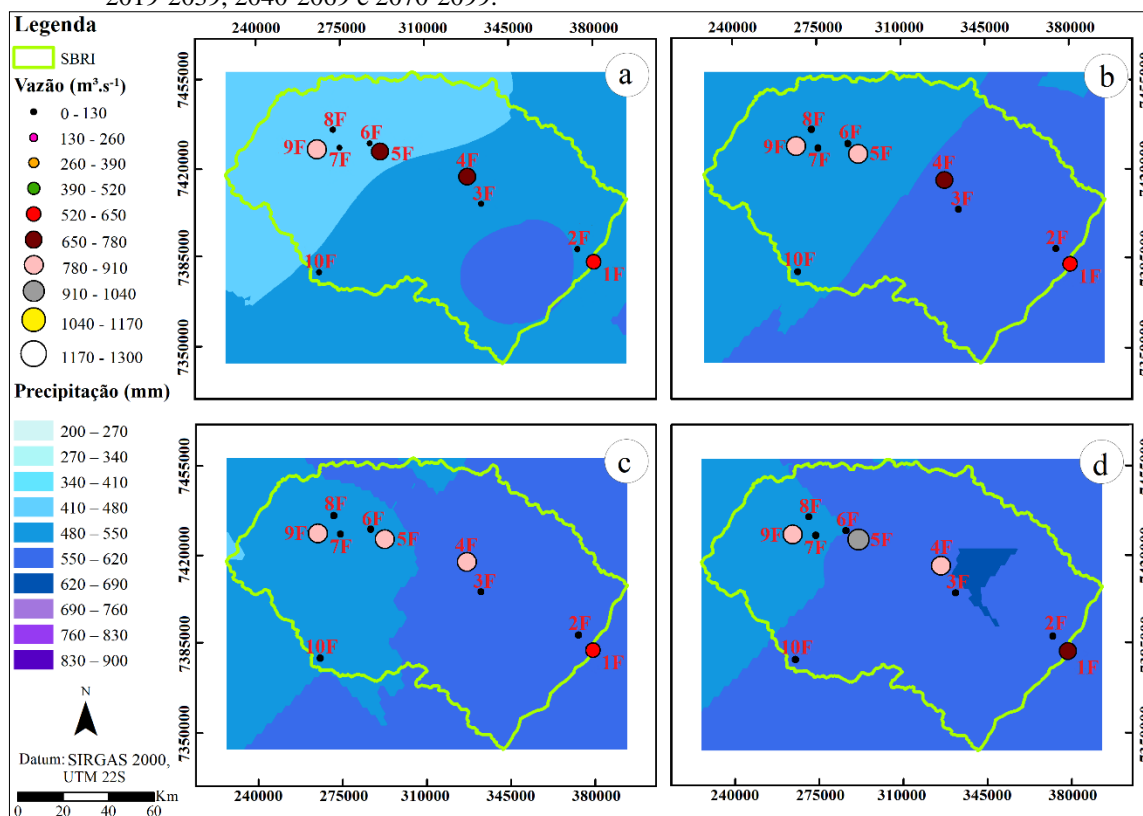
Para elaboração dos resultados que resumissem de forma adequada as informações de precipitação e vazão geradas, os dados foram organizados em quatro intervalos de tempo para cada sub-bacia: 1989-2018 (histórico), 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.

A representação espacial da precipitação e vazão foi elaborada por meio da confecção de mapas para cada sub-bacia, cenário e período considerado, utilizando para tanto *software* ArcGis versão 10.7.1, sendo que para precipitação foi realizada uma interpolação geoestatística por meio da técnica de krigagem ordinária empregando o modelo estável, disponível na solução *Geostatistical Analyst* que integram ArcGis.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A sequência das Figuras de 3.2 a 3.6 mostram os mapas para a SBRI nos períodos estipulados, considerando as mudanças climáticas características do cenário C1, ou seja, com aumento médio mensal de 17% da precipitação.

Figura 3.2 - Representações estacionais -verão- de vazão na SBRI do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.

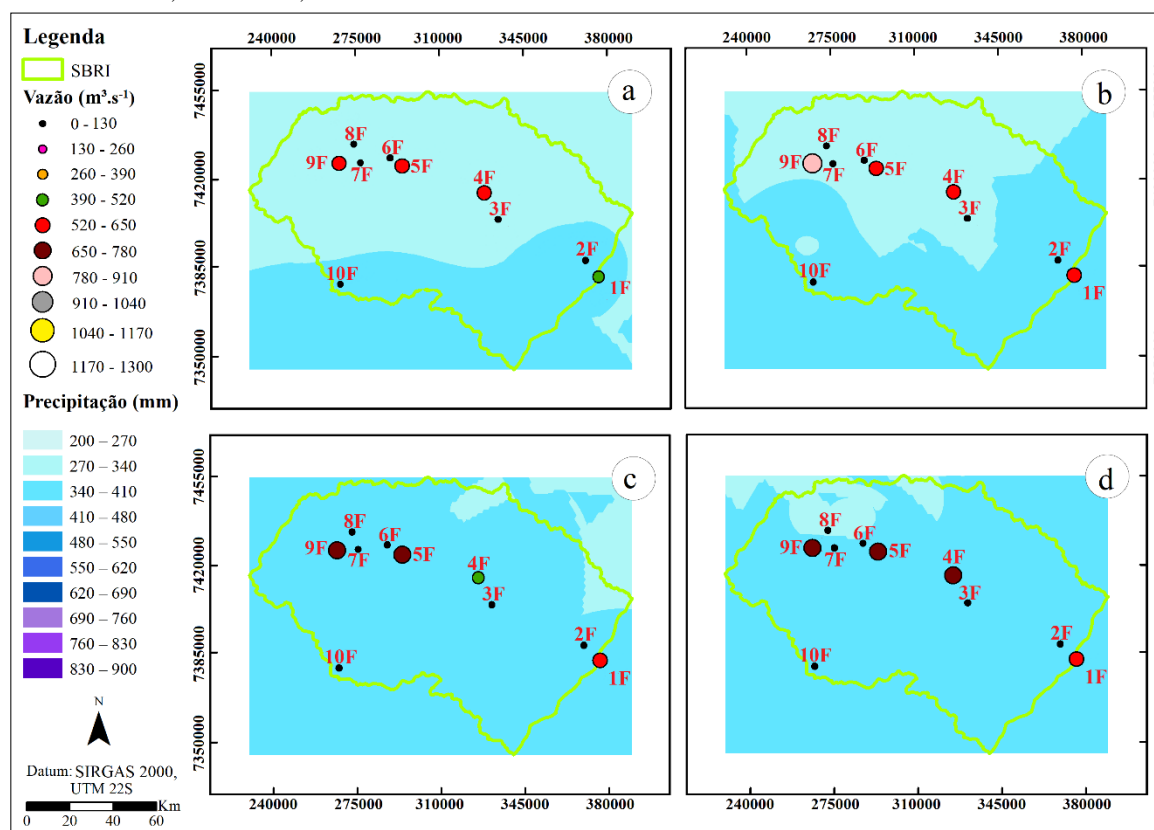


Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

Na Figura 3.2, que apresenta os resultados para o verão, que naturalmente no Brasil é uma estação mais chuvosa, observou-se que para o intervalo de tempo futuro 2070-2099 (Figura 3.2d) quando comparado ao intervalo histórico (Figura 3.2a), foi verificada tendência de aumento da precipitação em grande parte da sub-bacia, sendo que na porção noroeste a precipitação aumentou da classe 410-480mm para 480-550mm e à sudeste de em termos gerais expandiu sua área para a classe 550-620mm. No tocante à vazão, nota-se que apenas os postos 1F-SBRI, 4F-SBRI e 5F-SBRI transicionaram suas classes, sendo que o posto 1F-SBRI alterou sua classe de vazão no intervalo 2070-2099 (Figura 3.2d) para $650-780m^3.s^{-1}$ e o posto 4F-SBRI iniciou sua transição no intervalo 2040-2069 (Figura 3.2c) passando a ser representado na classe $780-910m^3.s^{-1}$. Cabe destacar que o posto 5F-SBRI que mudou sua classe inicial $650-780m^3.s^{-1}$ para a classe $910-1040m^3.s^{-1}$ no final do século (Figura 3.2d), teve sua transição se iniciando no intervalo 2019-2039 (Figura 3.2b). Estas alterações decorreram em virtude do eminente aumento da altura pluviométrica no final do século na sub-bacia.

Figura 3.3 - Representações estacionais -outono- de vazão na SBRI do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



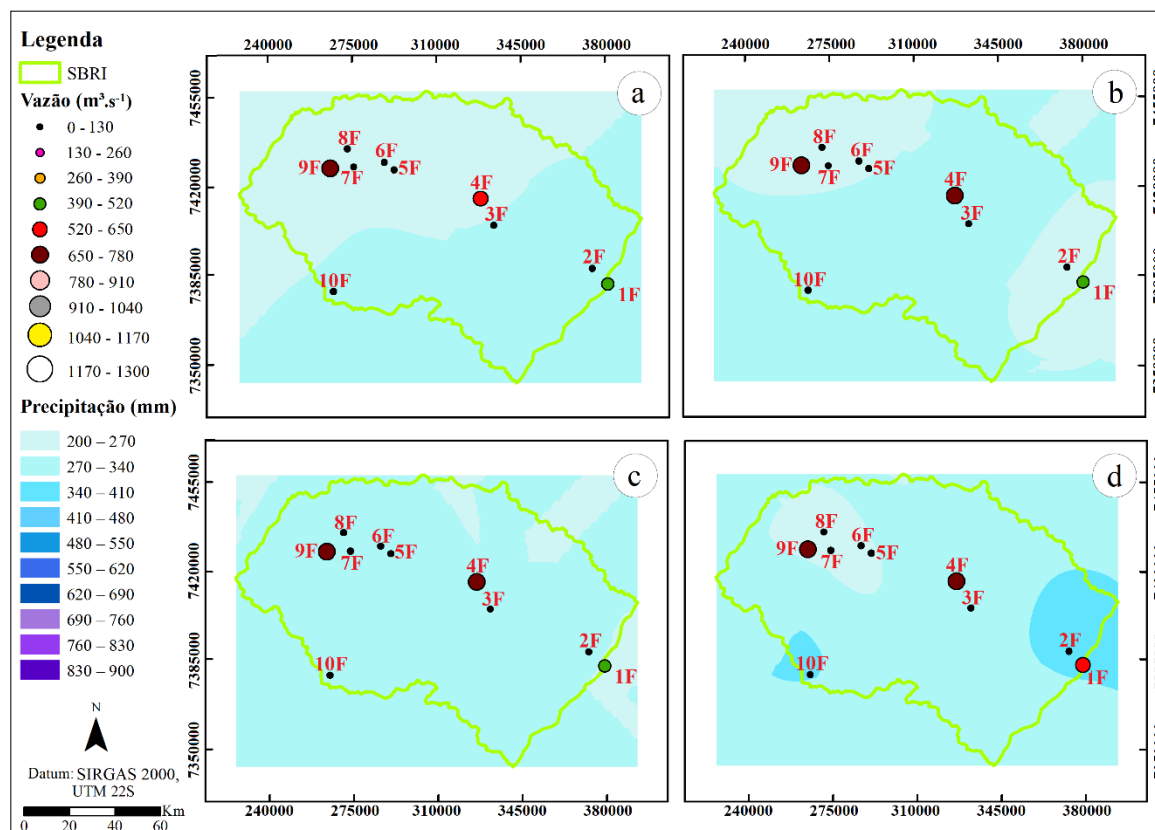
Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

A Figura 3.3 apresenta resultados referentes ao período do outono, em que na comparação dos intervalos 2070-2099 (Figura 3.3d) com o intervalo 1989-2018 (Figura 3.3a), foi verificada a elevação das alturas de precipitação de 270-340mm para 340-410mm, sendo que esta elevação vai progredindo no sentido de sudeste à noroeste da SBRI. No que se refere à vazão, observa-se que os postos 1F-SBRI, 4F-SBRI, 5F-SBRI e 9F-SBRI, tiveram seus fluxos aumentados, sendo que o posto 1F-SBRI transicionou da classe $390-520m^3 \cdot s^{-1}$ para a classe $520-650m^3 \cdot s^{-1}$, tendo sua transição iniciada a partir do intervalo de tempo 2019-2039 (Figura 3.3b). Os postos 4F-SBRI e 5F-SBRI ascenderam da classe $520-650m^3 \cdot s^{-1}$ (Figura 3.3a) para a classe $650-780m^3 \cdot s^{-1}$ no intervalo de tempo 2070-2099 (Figura 3.3d). Entretanto, no intervalo de 2040-2069 (Figura 3.3c), foi observado que o posto 4F-SBRI teve uma diminuição do fluxo cuja classe passou a apresentar vazão entre $390-520m^3 \cdot s^{-1}$, fato este possivelmente provocado por uma variação estocástica natural do modelo hidrológico. No posto 9F-SBRI, foi verificado um aumento do fluxo de $520-650m^3 \cdot s^{-1}$ (Figura 3.3a) para $650-780m^3 \cdot s^{-1}$ no intervalo de tempo 2070-2099 (Figura 3.3d), porém no intervalo 2019-2039 (Figura 3.3b) ocorreu uma elevação brusca do fluxo para a classe ente $780-910m^3 \cdot s^{-1}$, ocasionada supostamente pela expansão da

classe de precipitação entre 340-410mm, concomitantemente com uma variação estocástica inerente ao modelo hidrológico utilizado.

Figura 3.4 - Representações estacionais -inverno- de vazão na SART do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



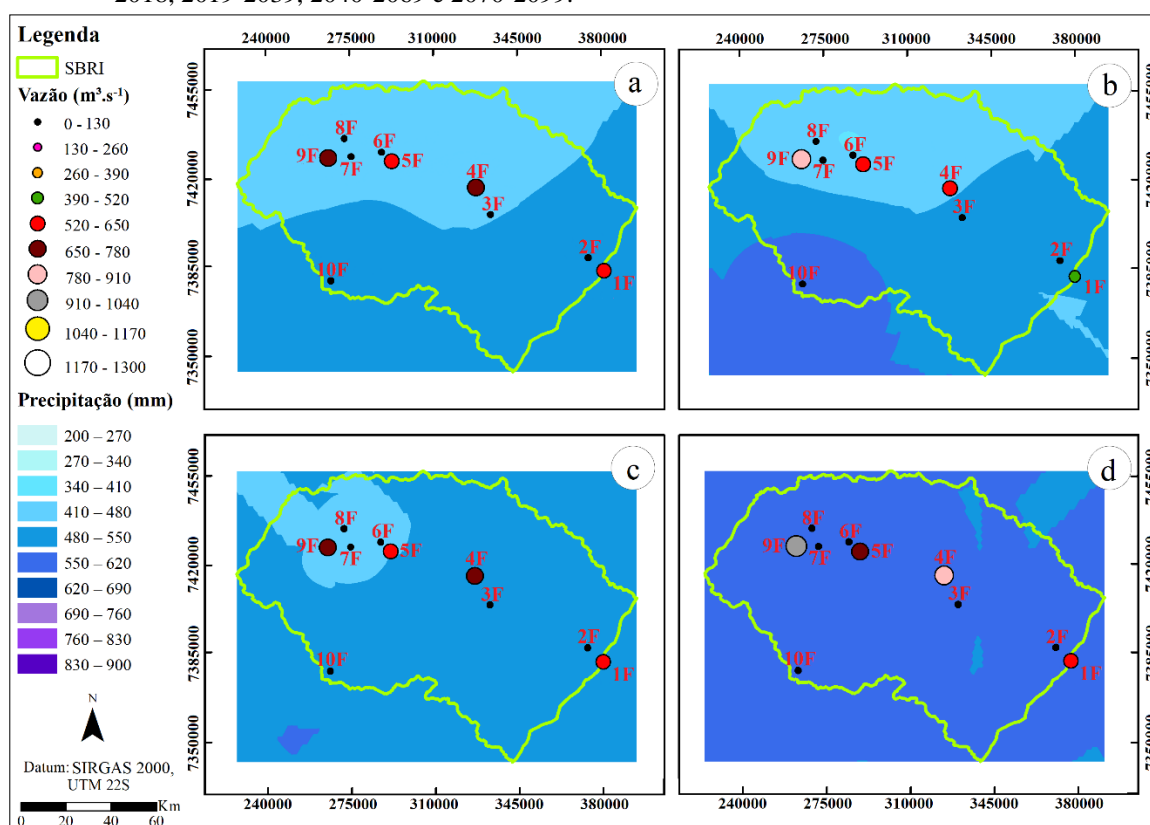
Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

Referente à Figura 3.4, que expõe os resultados do período do inverno, que no Brasil é considerado uma estação menos chuvosa na maioria das regiões, notou-se que no intervalo entre 2070-2099 (Figura 3.4d), quando comparado ao intervalo 1989-2018 (Figura 3.4a), houve uma perspectiva mais generalizada de aumento da precipitação em toda a sub-bacia, pela transição da altura da lâmina para a classe entre 270-340mm, com o surgimento de discretas faixas de precipitação entre 340-410mm próximas aos postos 1F-SBRI, 2F-SBRI e 10F-SBRI verificadas no intervalo 2070-2099 (Figura 3.4d). Em relação à vazão, apenas os postos 1F-SBRI e 4F-SBRI mostraram tendência de elevação do fluxo até o final do século (Figura 3.4d), quando comparados ao intervalo histórico 1989-2018 (Figura 3.4a). No posto 1F-SBRI o aumento do fluxo ocorreu a partir do intervalo de 2070-2099 (Figura 3.4d), onde a vazão passou a ser representada na classe entre $520-650m^3 \cdot s^{-1}$, possivelmente impactada pelo aumento da

precipitação no seu entorno. Por sua vez, o posto 4F-SBRI começou a transicionar para a classe de vazão entre $650-780\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, a partir do intervalo de tempo de 2019-2039 (Figura 3.4b), ocasionada pela elevação da precipitação na área de sua localização. Tendo em vista a pouca pluviosidade na estação inverno, as alterações observadas na vazão tenderam a ser pouco expressivas, de forma que no intervalo entre 2040-2069 (Figura 3.4c) não houveram transições de classes em relação ao intervalo 2019-2039 (Figura 3.4b).

Figura 3.5 - Representações estacionais -primavera- de vazão na SART do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



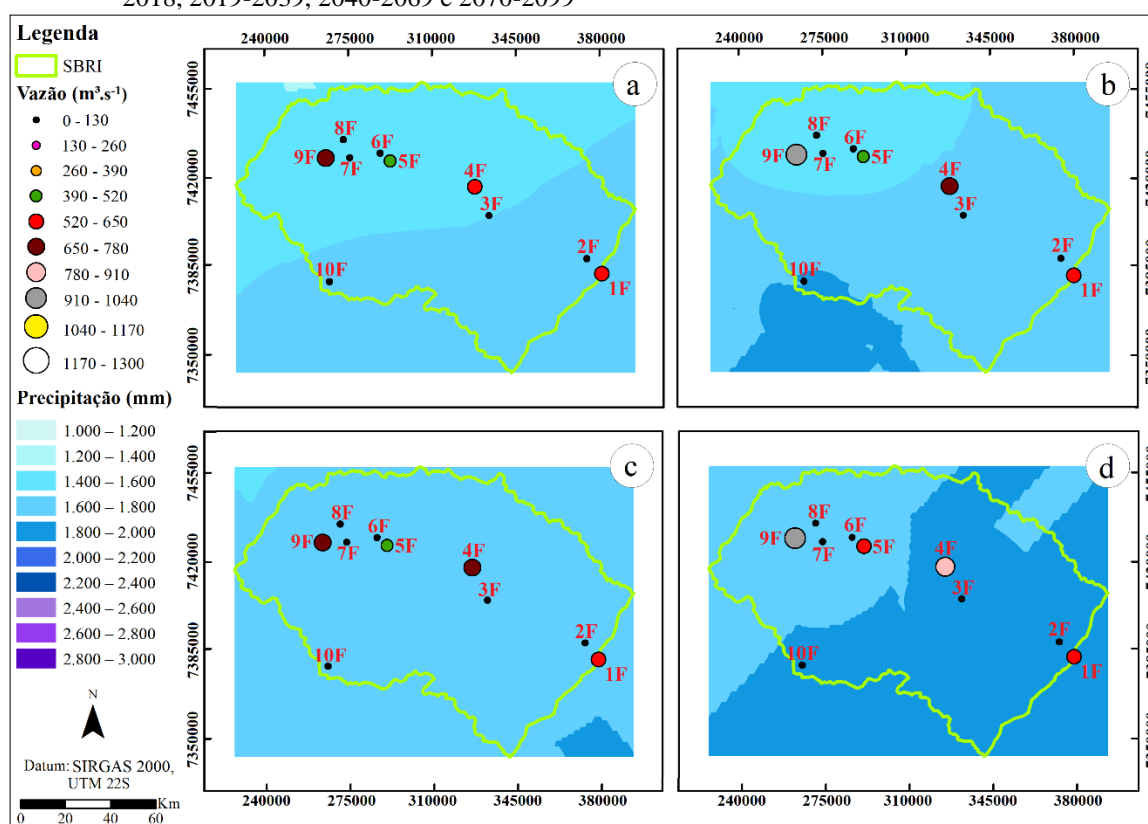
Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

Na Figura 3.5, que apresenta resultados para a primavera, quando comparado o intervalo histórico 1989-2018 (Figura 3.5a) com o intervalo de tempo 2070-2099 (Figura 3.5d), verificou-se que a projeção da altura da precipitação na sub-bacia ficou restrita a uma classe única classe, sendo que inicialmente a região apresentava duas classes dominantes (410-480mm e 380-550mm), e que ao longo do tempo foram tendendo para a faixa de 550-620mm. Concernente à vazão, observa-se que os postos 4F-SBRI, 5F-SBRI e 9F-SBRI, tiveram suas vazões aumentadas, sendo que o posto 4F-SBRI transicionou da classe $650-780\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ para a classe $780-910\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, tendo sua transição iniciada a partir do intervalo de tempo 2070-2099

(Figura 3.5d). O posto 5F-SBRI ascendeu da classe $520-650\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.5a) para a classe $650-780\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ a partir do intervalo de tempo 2070-2099 (Figura 3.5d). Por sua vez, o posto 9F-SBRI transicionou da classe $650-780\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ para a classe $910-1040\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, iniciando sua transição a partir do intervalo 2019-2039 (Figura 3.5b). É importante salientar, que flutuações com tendência de diminuição do fluxo ocorreram nos postos 1F-SBRI e 4F-SBRI no intervalo 2019-2039 (Figura 3.5b) e, no posto 9F-SBRI no intervalo de tempo 2040-2069 (Figura 3.5c). Estas alterações podem estar relacionadas à estocasticidade intrínseca no modelo hidrológico.

Figura 3.6 - Representações estacionais -inverno- de vazão na SART do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099



Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

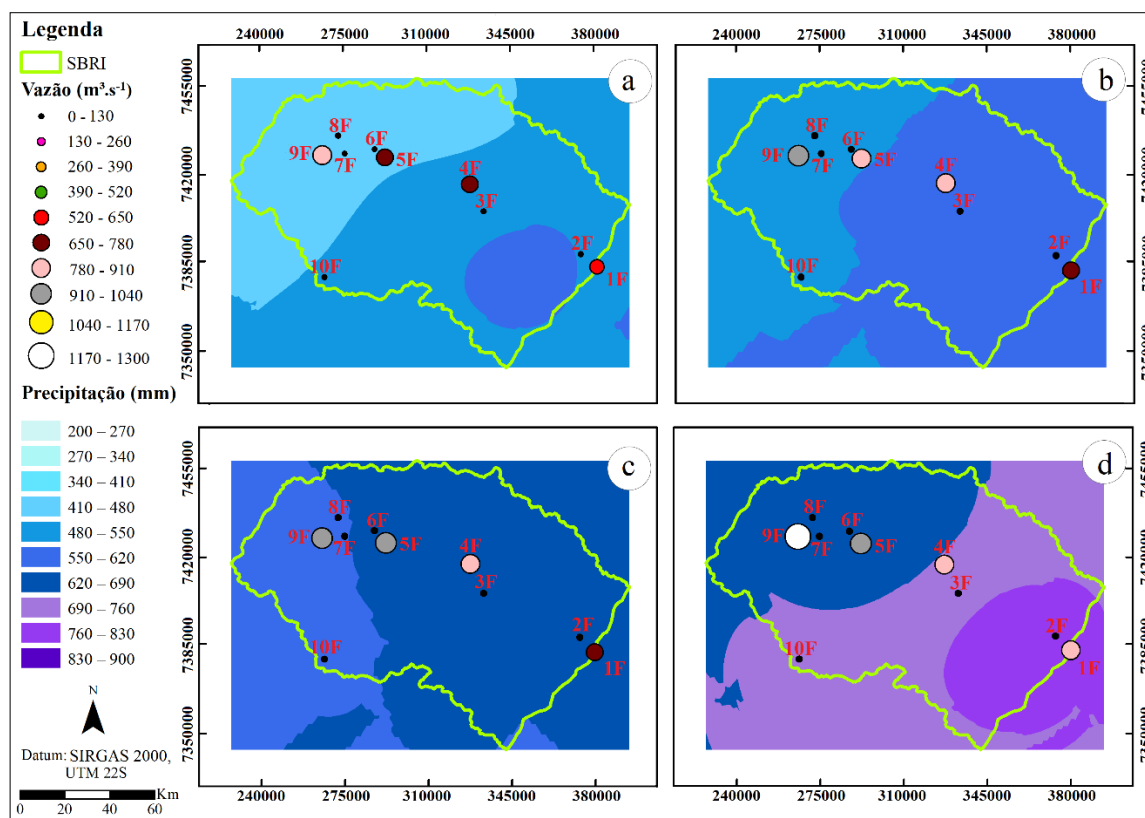
A Figura 3.6 exibe resultados referentes ao período anual, em que na comparação dos intervalos 2070-2099 (Figura 3.6d) com o intervalo 1989-2018 (Figura 3.6a), de forma generalizada, foi observada a elevação das alturas de precipitação com tendência de aumento no sentido do sudoeste ao noroeste, em que ao final do século (Figura 3.6d), se apresentam projeções de valores entre 1800-2000mm e 1600-1800mm, respectivamente. No que diz respeito à vazão, os postos 4F-SBRI, 5F-SBRI e 9F-SBRI tiveram aumento em suas vazões, sendo que o posto 4F-SBRI mudou da classe $520-650\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ para a classe $780-910\text{m}^3.\text{s}^{-1}$,

iniciando sua transição no intervalo de tempo 2019-2039 (Figura 3.6b), e o posto 5F-SBRI alterou sua classe de vazão para valores entre 520-650m³.s⁻¹ no intervalo 2070-2099 (Figura 3.6d). Por sua vez, o posto 9-SBRI apresentou alteração do fluxo entre 650-780m³.s⁻¹ (Figura 3.6a), para 910-1040m³.s⁻¹ (Figura 3.6d), sendo que o início dessa transição de classe ocorreu no intervalo 2019-2039 (Figura 3.6b), porém, apresentando no intervalo 2040-2069 (Figura 3.6c), uma flutuação na vazão entre 650-780m³.s⁻¹, decorrida possivelmente da variação estocástica, comum em modelos com elementos probabilísticos.

Numa abordagem mais generalizada, para o cenário climático C1 na SBRI, o impacto das mudanças climáticas ao longo do século, tende a se mostrar moderadamente adverso para regime hídrico local, quando são defrontados os intervalos de tempo histórico (1989-2018) e futuros (2019-2039, 2040-2069, 2070-2099), uma vez que no decurso da sub-bacia, tanto na escala sazonal quanto na anual, ocorrem oscilações pontuais na projeção da vazão.

As Figuras de 3.7 a 3.11 exibem mapas da SBRI nos períodos analisados, considerando as mudanças climáticas características do cenário C2, em que se projetou um aumento médio mensal de 48% da precipitação.

Figura 3.7 - Representações estacionais -verão- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.

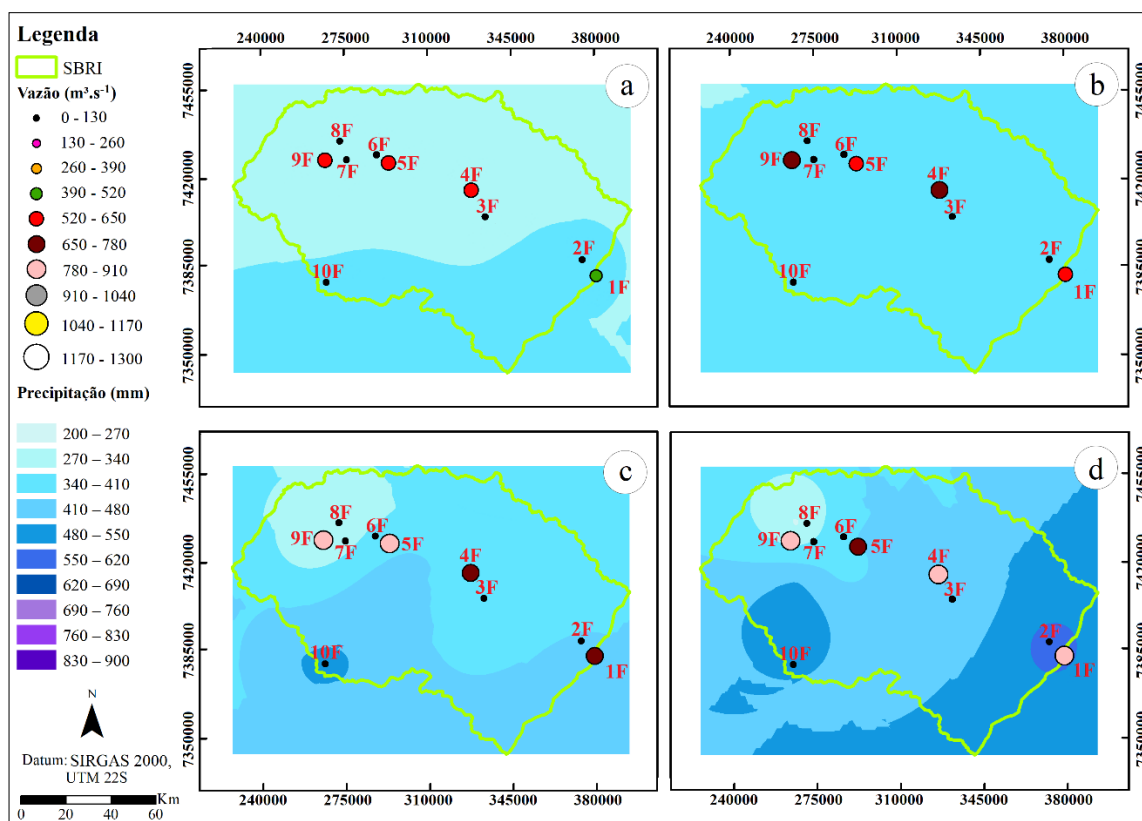


Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

Na Figura 3.7, que apresenta os resultados para o verão, observou-se que para o intervalo de tempo futuro 2070-2099 (Figura 3.7d) quando comparado ao intervalo histórico (Figura 3.7a), foi verificada uma tendência de aumento da precipitação em grande parte da sub-bacia, sendo que na porção noroeste a precipitação aumentou da classe 410-480mm para 620-690mm e na área à sudeste ocorreu mudança da classe 550-620mm, para classe entre 760-830mm. Em relação à vazão, nota-se que os postos 1F-SBRI, 4F-SBRI, 5F-SBRI e 9F-SBRI transicionaram suas classes, sendo que o posto 1F-SBRI alterou sua classe de vazão no intervalo 2070-2099 (Figura 3.7d) para $780-910\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, iniciando sua transição no intervalo 2019-2039 (Figura 3.7b), apresentando vazão entre $650-780\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, enquanto que o posto 4F-SBRI começou sua transição no intervalo 2019-2039 (Figura 3.7b) passando a ser representado na classe $780-910\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ até o final do século (Figura 3.7d). No que lhe diz respeito, o posto 5F-SBRI transicionou da classe $650-720\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.7a) para a classe $910-1040\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 7d), a qual já estava representada no intervalo 2040-2069 (Figura 3.7c), uma vez que a vazão estava em elevação a partir do intervalo 2019-2039 (Figura 3.7b). Por sua vez, o posto 9F-SBRI variou da classe de vazão $780-910\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no intervalo histórico (Figura 3.7a) para a classe $1170-1300\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no intervalo 2070-2099, tendo iniciada sua transição a partir intervalo 2019-2039 (Figura 3.7b). É importante pontuar, que por ser o verão uma estação mais chuvosa, os fluxos de vazão acompanharam a evolução de uma possível elevação da altura de precipitação na sub-bacia, que se mostrou mais acentuada ao longo do século XXI do que no cenário C1.

Figura 3.8 - Representações estacionais -outono- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



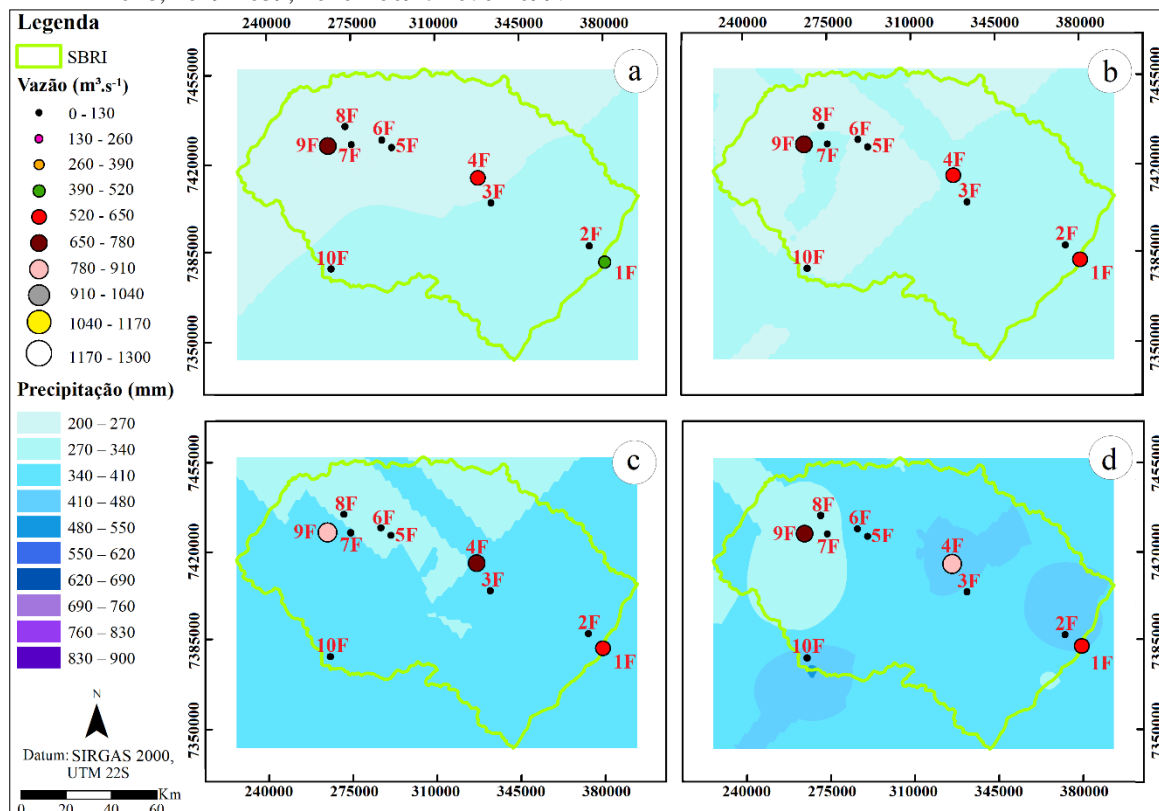
Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

A Figura 3.8 mostra os resultados referentes ao período do outono, em que na comparação dos intervalos 2070-2099 (Figura 3.8d) com o intervalo 1989-2018 (Figura 3.8a), foi verificado a elevação das alturas de precipitação de 270-340mm para 340-410mm no noroeste, e um aumento de 340-410mm para 480-550mm no sudeste da SBRI. No que se refere à vazão, observa-se que os postos 1F-SBRI, 4F-SBRI, 5F-SBRI e 9F-SBRI, tiveram seus fluxos aumentados, sendo que o posto 1F-SBRI transicionou da classe $390-520m^3 \cdot s^{-1}$ no intervalo 1989-2018 (Figura 3.8a) para a classe $780-910m^3 \cdot s^{-1}$ no intervalo 2070-2099 (Figura 3.8d), possivelmente em decorrência de uma elevação da precipitação, específica na área deste posto, entre 550-620mm, tendo a transição iniciada a partir do intervalo de tempo 2019-2039 (Figura 3.8b). O posto 4F-SBRI ascendeu da classe $520-650m^3 \cdot s^{-1}$ (Figura 3.8a) para a classe $780-910m^3 \cdot s^{-1}$ no intervalo de tempo 2070-2099 (Figura 3.8d), tendo iniciada esta transição no intervalo 2019-2039 (Figura 3.8b). Por seu lado, o posto 5F-SBRI ascendeu da classe $520-650m^3 \cdot s^{-1}$ (Figura 3.8a) para a classe $650-780m^3 \cdot s^{-1}$ no intervalo de tempo 2070-2099 (Figura 3.8d), iniciando esta transição no intervalo 2040-2069 (Figura 3.8c). No que se refere ao posto 9F-SBRI, o mesmo apresentou aumento do fluxo de $520-650m^3 \cdot s^{-1}$ (Figura 3.8a) para $780-$

$910\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no intervalo de tempo 2070-2099 (Figura 3.8d), com início da transição de classe de vazão a partir do intervalo 2019-2039 (Figura 3.8b).

Figura 3.9 - Representações estacionais -inverno- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



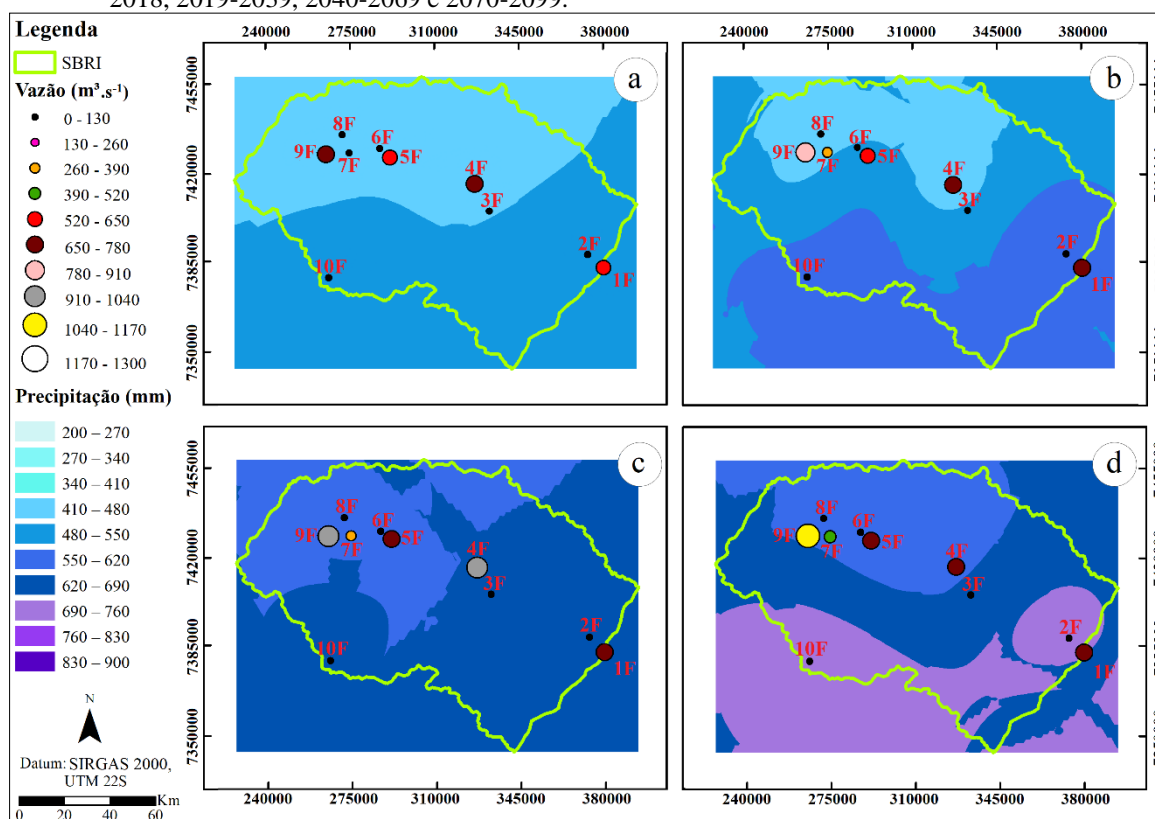
Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

Na Figura 3.9, estão apresentados os resultados referentes ao período do inverno, os quais para o final do século (Figura 3.9d), quando comparado ao intervalo 1989-2018 (Figura 3.9a), houve uma perspectiva mais generalizada de aumento da precipitação em toda a sub-bacia, caracterizada pela transição da altura da lâmina de precipitação para a classe entre 340-410mm e, pelo surgimento de faixas de precipitação entre 410-480mm, próximas aos postos 1F-SBRI, 2F-SBRI, 3F-SBRI, 4F-SBRI e 10F-SBRI, verificadas no intervalo 2070-2099 (Figura 3.9d). No que concerne à vazão, apenas os postos 1F-SBRI e 4F-SBRI mostraram tendência de elevação do fluxo até o final do século (Figura 3.9d), quando comparados ao intervalo histórico 1989-2018 (Figura 3.9a). No posto 1F-SBRI o aumento do fluxo ocorreu a partir do intervalo de 2019-2039 (Figura 3.9b), onde a vazão passou a ser representada na classe entre $520\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, possivelmente impactada pelo aumento da precipitação no seu entorno,

que tende a sofrer elevação de forma progressiva de fato, a partir do intervalo entre 2040-2069 (Figura 3.9c). Por sua vez, o posto 4F-SBRI apresentou de vazão entre $780-910\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.9d), sendo que iniciou sua transição partir do intervalo de tempo de 2040-2069 (Figura 3.9c), ocasionada pela elevação da precipitação na área de sua localização, que já estava em progressão no intervalo 2019-2039 (Figura 3.9b). Cabe destacar que apesar do posto 9F-SBRI ser representado tanto no intervalo histórico (Figura 3.9a), quanto no final do século (Figura 3.9d) na classe $650-780\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, o mesmo sofreu flutuações provenientes da elevação da precipitação no intervalo 2040-2069 (Figura 3.9c), como consequência da variação estocástica da precipitação projetada.

Figura 3.10 - Representações estacionais -primavera- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



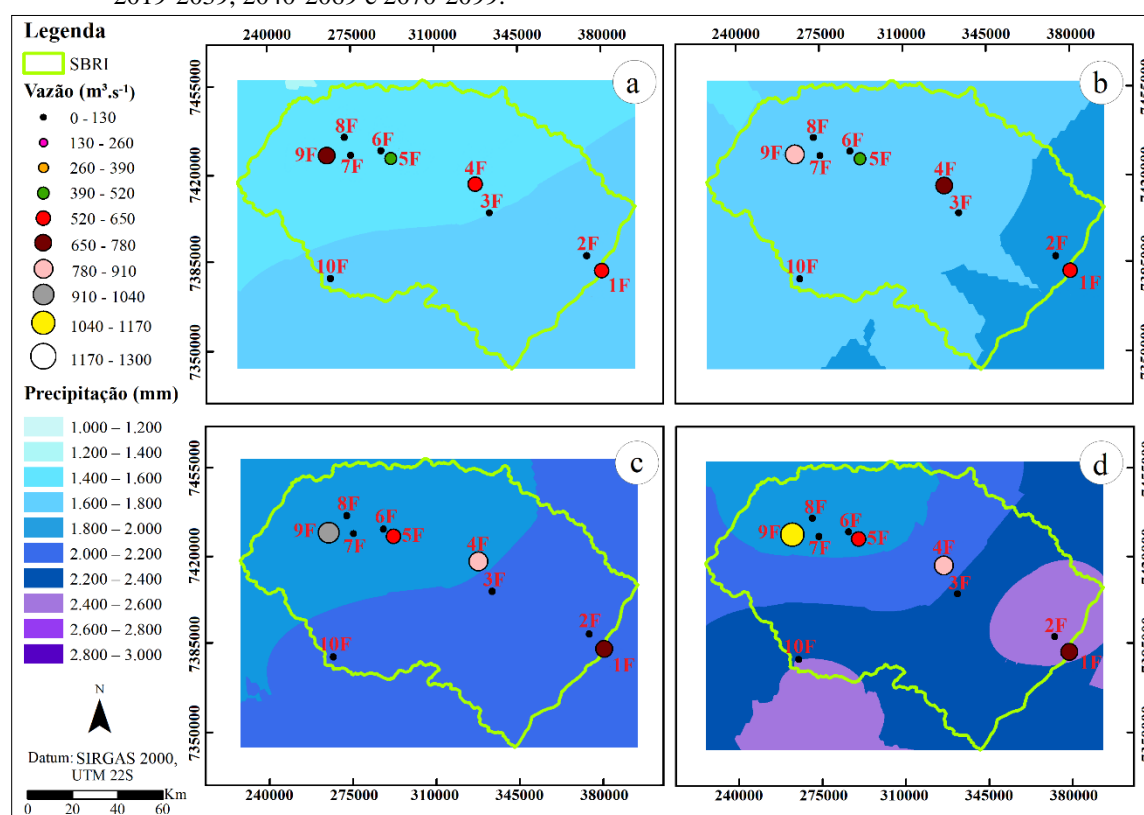
Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

A Figura 3.10 expõe resultados referentes à primavera, em que na comparação do intervalo histórico 1989-2018 (Figura 3.10a) com o intervalo de tempo 2070-2099 (Figura 3.10d), verificou-se uma transição da classe de precipitação de 410-480mm para 550-620mm no noroeste, e um aumento de 480-550mm para 690-760mm no sudeste da SBRI. Concernente

à vazão, observa-se que os postos 1F-SBRI, 5F-SBRI, 7F-SBRI e 9F-SBRI, tiveram suas vazões aumentadas, sendo que o posto 1F-SBRI transicionou da classe 520-650 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.10a) para a classe 650-780 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no intervalo 2070-2099 (Figura 3.10d), tendo sua transição iniciada a partir do intervalo de tempo 2019-2039 (Figura 3.10b). O posto 5F-SBRI ascendeu da classe 520-650 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.10a) para a classe 650-780 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no intervalo de tempo 2070-2099 (Figura 3.10d), sendo que esta transição se iniciou a partir do intervalo de tempo 2040-2069 (Figura 3.10c). Por seu lado, o posto 7F-SBRI, deixou de ser representado pela classe 0-130 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no intervalo histórico (Figura 3.10a), para ser representado pela classe 390-520 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.10d), iniciando sua transição a partir do intervalo 2019-2039 (Figura 3.10b). Em relação ao posto 9F-SBRI, que também apresentou aumentos progressivos em suas classes ao longo dos intervalos de tempo projetados, sendo que o mesmo transicionou da classe 650-780 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.10a), para a classe 1040-1170 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ao final do século (Figura 3.10d), tendo esta escalada de valores iniciada no intervalo 2019-2039 (Figura 3.10b).

Figura 3.11- Representações estacionais -anual- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



Fonte: A autora, 2020.

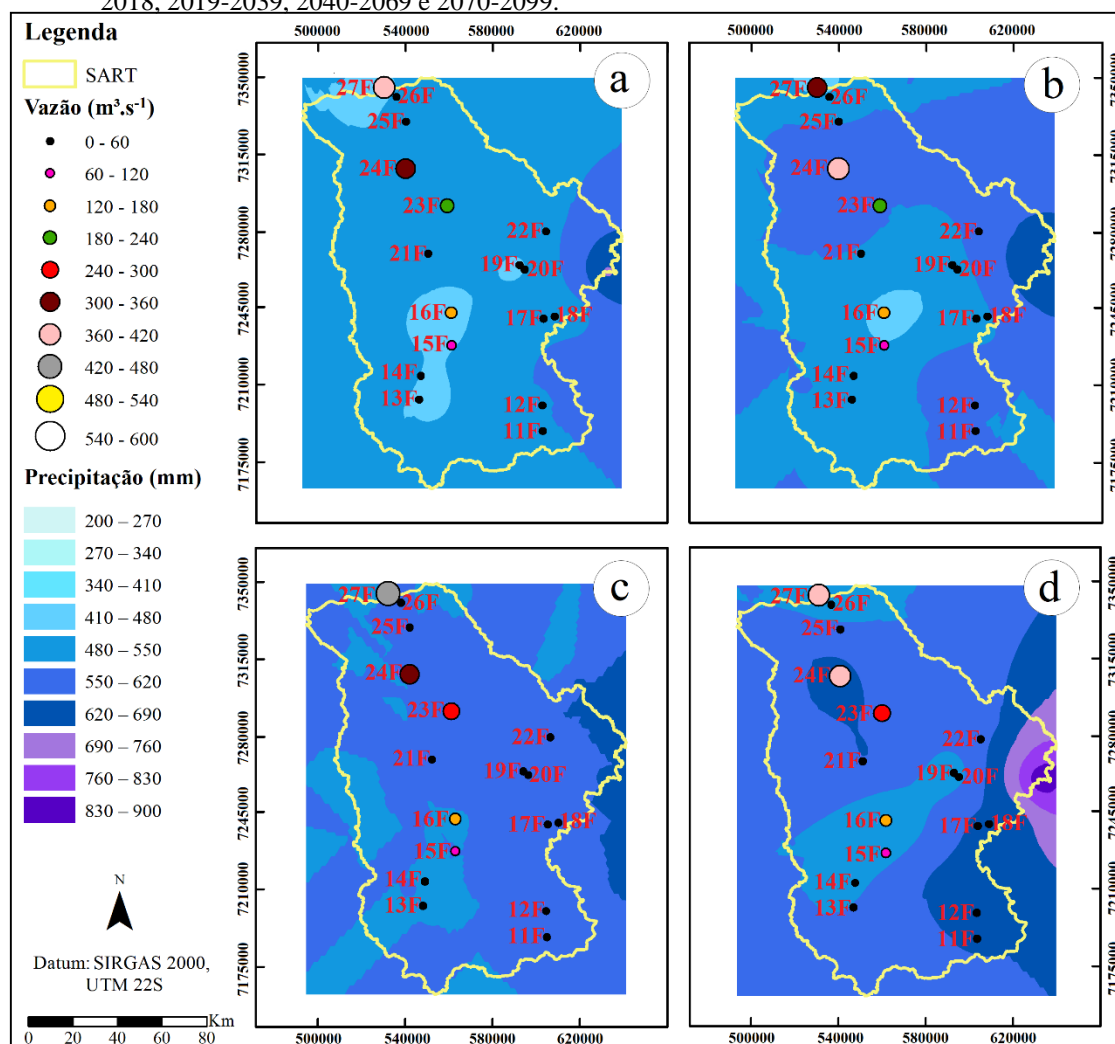
Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

Na Figura 3.11 são mostrados os resultados pertinentes totais anuais, onde foi possível observar que ao comparar o intervalo 2070-2099 (Figura 3.11d) com o intervalo 1989-2018 (Figura 3.11a), onde se observou uma transição da classe de precipitação de 1400-1600mm para 1800-2000mm na porção mais ao noroeste, e um aumento de 1600-1800mm para 2400-2600mm mais a sudeste da SBRI. No que se relaciona à vazão, os postos 1F-SBRI, 4F-SBRI, 5F-SBRI e 9F-SBRI tiveram aumento em suas vazões, sendo que o posto 1F-SBRI mudou da classe $520-650\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no intervalo de tempo 1989-2018 (Figura 3.11a) para a classe $780-910\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.11d), iniciando esta transição no intervalo de tempo 2040-2069 (Figura 3.11c). O posto 4-SBRI transicionou da classe $520-650\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no intervalo histórico (Figura 3.11a) para a classe $780-910\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no fim do século XXI (Figura 3.11d), sendo que este fluxo foi revelado anteriormente no intervalo 2040-2069 (Figura 3.11c), o qual iniciou sua transição no intervalo de tempo 2019-2039 (Figura 3.11b). Por sua vez, o posto 5F-SBRI alterou sua classe passando a exibir vazão entre $520-650\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ a partir do intervalo 2040-2069 (Figura 3.11c). Em relação ao posto 9-SBRI foi verificada uma alteração do fluxo entre $650-780\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.11a), para $910-1040\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no intervalo 2070-2099 (Figura 3.11d), sendo que o início dessa transição progressiva nos intervalos de tempo ocorreu entre 2019-2039 (Figura 3.11b). É importante ressaltar que as progressões do fluxo no período anual, parecem refletir as elevações sucessivas das alturas de precipitação que tendem a se intensificar até o final do século.

Numa análise geral dos resultados encontrados para a SBRI, é possível deduzir que para o cenário C2, o impacto das mudanças climáticas ao longo do século nos valores de precipitação projetados, evidenciou que em todos os períodos analisados se manteve a tendência de alturas de precipitação inferiores ao noroeste da SBRI, quando comparado com as áreas mais a sudeste. Em relação às vazões, notou-se que foram projetadas alterações de grandes proporções no regime hídrico local, quando defrontados os intervalos de tempo futuros (2019-2039, 2040-2069, 2070-2099) com o histórico (1989-2018), tanto na escala sazonal quanto na anual, visto que, os postos de maior vazão (1F-SBRI, 4F-SBRI e 9F-SBRI), em pelo menos uma vez, sofreram aumento do fluxo durante a progressão ao longo do tempo, até mesmo no período do outono e do inverno, que se apresentam como menos chuvosos. Além disso, o impacto projetado no cenário C2 alterou a vazão de postos com vazões muito pequenas, como o posto 7F-SBRI, que na primavera ascendeu da classe entre $0-130\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.10a) para vazões entre $390-520\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no final do século (Figura 3.10d), o que não aconteceu no cenário C1, cujo aumento na precipitação não foi suficientemente relevante para que houvesse uma mudança na classe de vazão.

A série de Figuras de 3.12 a 3.16, mostram os mapas para a SART, considerando as mudanças climáticas características do cenário C1, em que se projetou um aumento médio mensal de 17% da precipitação nos períodos estipulados.

Figura 3.12 - Representações estacionais -verão- de vazão na SART do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



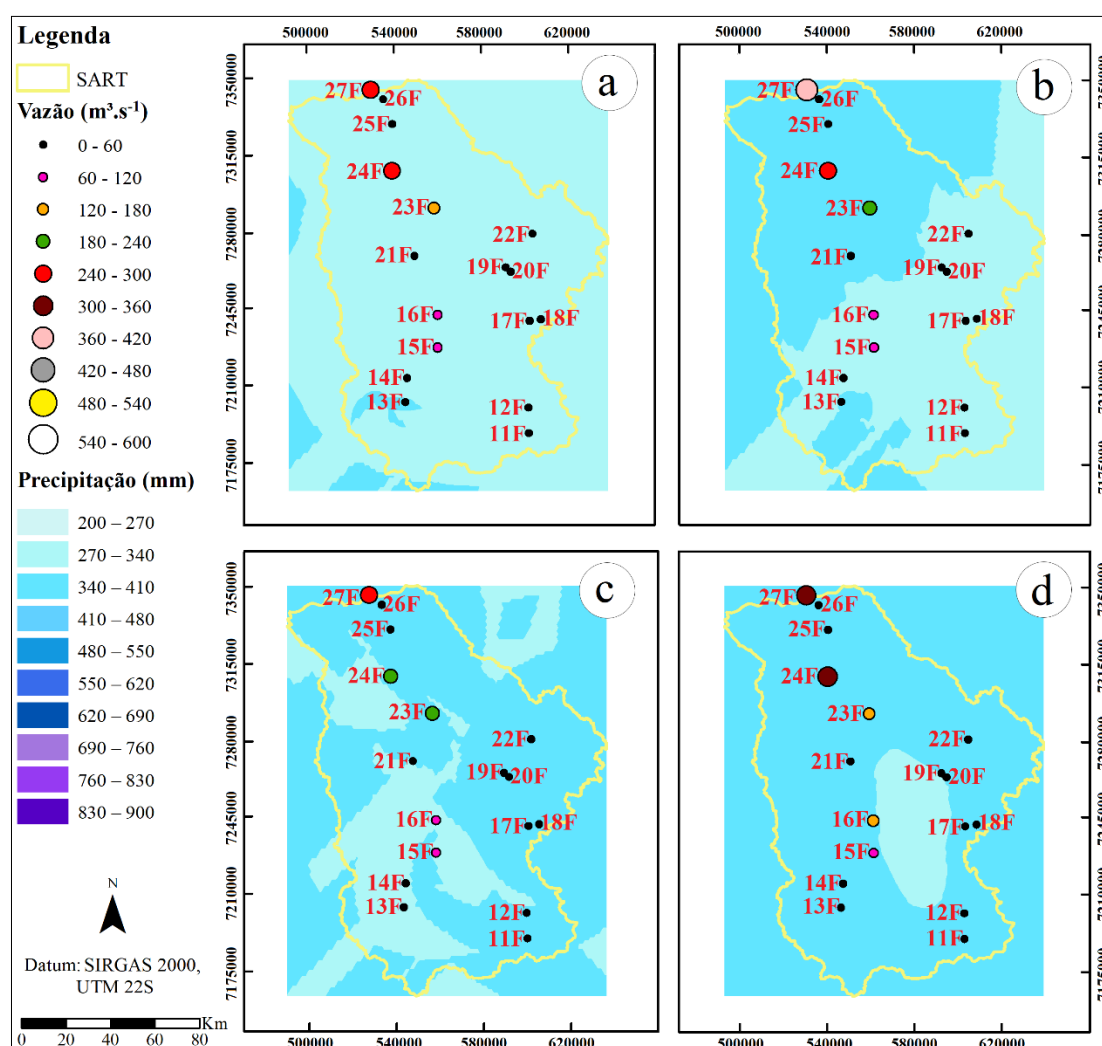
Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras "a", "b", "c" e "d", respectivamente.

Na Figura 3.12, que apresenta os resultados referentes ao verão, nota-se que para o intervalo de tempo futuro 2070-2099 (Figura 3.12d), quando comparado ao intervalo histórico (Figura 3.12a), houve uma progressão da altura de precipitação, com destaque para o leste da sub-bacia, que se manteve com lâminas superiores ao restante da mesma, deixando de ser representada pela classe 620-690mm (Figura 3.12a), para ser representada pela classe 830-900mm (Figura 3.12d). No que diz respeito às vazões, as que sofreram alterações estão localizadas ao norte, sendo pertencentes aos postos 23F-SART e 24F-SART. O posto 23F-

SART, teve aumento de vazão, que antes era descrita entre $180\text{-}240\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, sendo apresentada entre $240\text{-}300\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, com o início da sua transição ocorrendo no intervalo 2040-2069 (Figura 3.12c). Por sua vez, o posto 24F-SART, sofreu alteração de fluxo de $300\text{-}360\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 3.12a), para um valor entre $360\text{-}420\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 3.12d), indicando uma variação entre essas duas classes ao decorrer do século, visto que houve alteração da representação de precipitação ao seu entorno. Ressalta-se ainda que, apesar do posto 27F-SART ser representando pela classe $360\text{-}420\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, tanto no intervalo histórico (Figura 3.12a), quanto no final do século (Figura 3.12d), é possível verificar que o posto expressou flutuação da vazão no intervalo entre 2019-2039 (Figura 3.12b), provavelmente como consequência da variação estocástica natural do modelo hidrológico utilizado.

Figura 3.13 - Representações estacionais -outono- de vazão na SART do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.

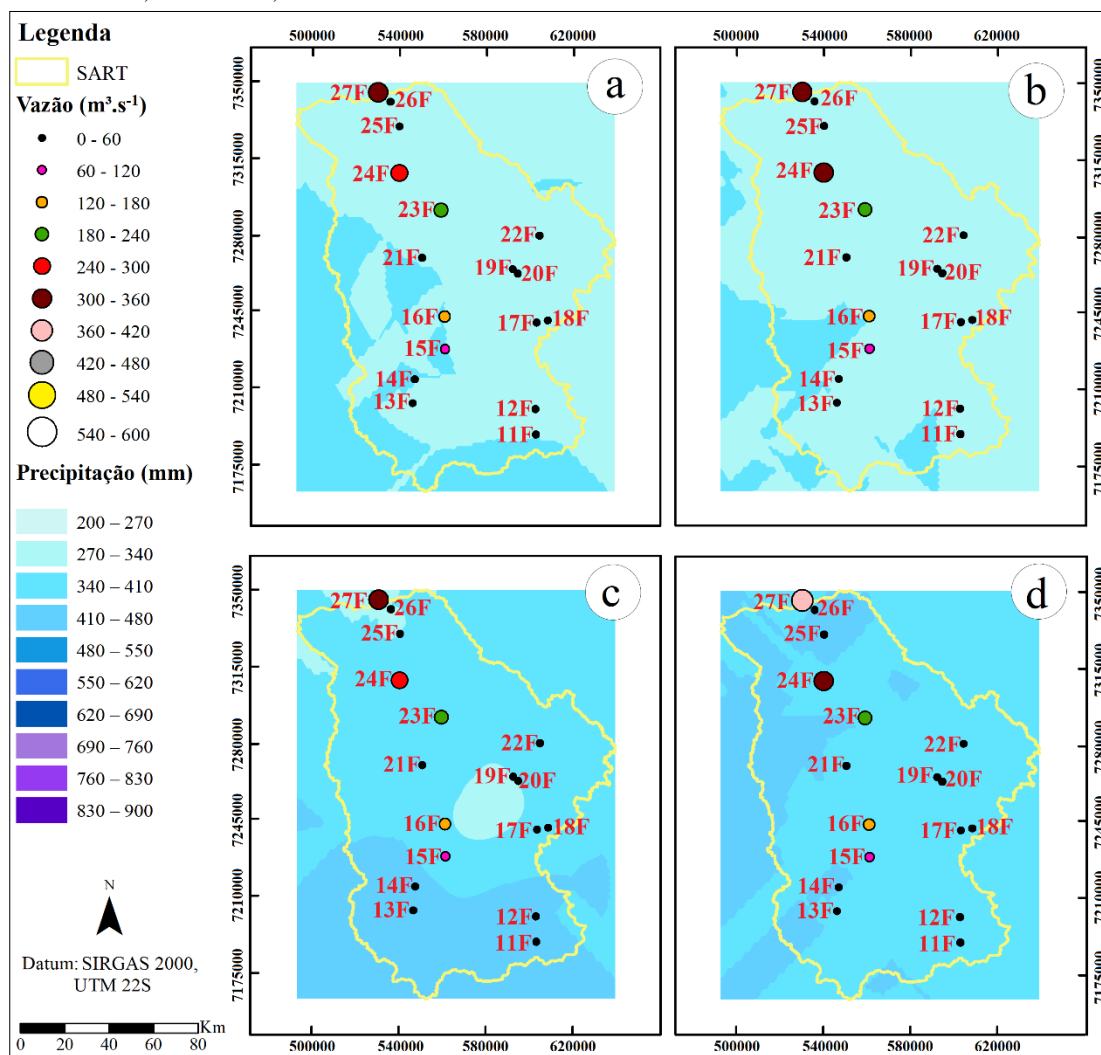


Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

A Figura 3.13 apresenta os resultados referentes ao outono, na qual verificou-se que, apesar de haver apenas duas classes de precipitação através do século, houve aumento da altura de precipitação entre 340-410mm, no final do século (Figura 3.13d), em relação ao intervalo histórico (Figura 3.13a), que apresentava a maior área da sub-bacia variando entre 270-340mm. No que se refere às vazões, foram observados aumentos no fluxo dos postos 16F-SART, 24F-SART e 27F-SART. O posto 16F-SART sofreu alteração para uma vazão entre 120-180m³.s⁻¹ no intervalo 2070-2099 (Figura 3.13d), tendo em vista a precipitação projetada para o final do século. No posto 24F-SART, nota-se que o fluxo teve mudança de classe no final do século (Figura 3.13d), com a vazão entre 300-360m³.s⁻¹, havendo flutuação da mesma no intervalo 2040-2079 (Figura 3.13c), justificada pelo fluxo próximo ao intervalo superior da classe de 180-240m³.s⁻¹, em conjunto com a variabilidade intrínseca ao modelo hidrológico. Por outro lado, o posto 27F-SART, teve elevação da vazão apresentando valor entre 240-300m³.s⁻¹ (Figura 3.13a), para uma vazão entre 300-360m³.s⁻¹ (Figura 3.13d), de modo que no intervalo entre 2019-2039 (Figura 3.13b), foi observada que a vazão apresentou uma elevação superior a todos os outros intervalos, indicando uma possível flutuação ocasionada pela estocasticidade intrínseca ao modelo hidrológico. Da mesma forma, o posto 23F-SBRI, que apesar de ser representando pela mesma classe no intervalo histórico (Figura 3.13a) e no final do século (Figura 3.13d), também indicou alteração de seu valor no intervalo 2070-2099 (Figura 3.13d), em consequência desta variação.

Figura 3.14 - Representações estacionais -inverno- de vazão na SART do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



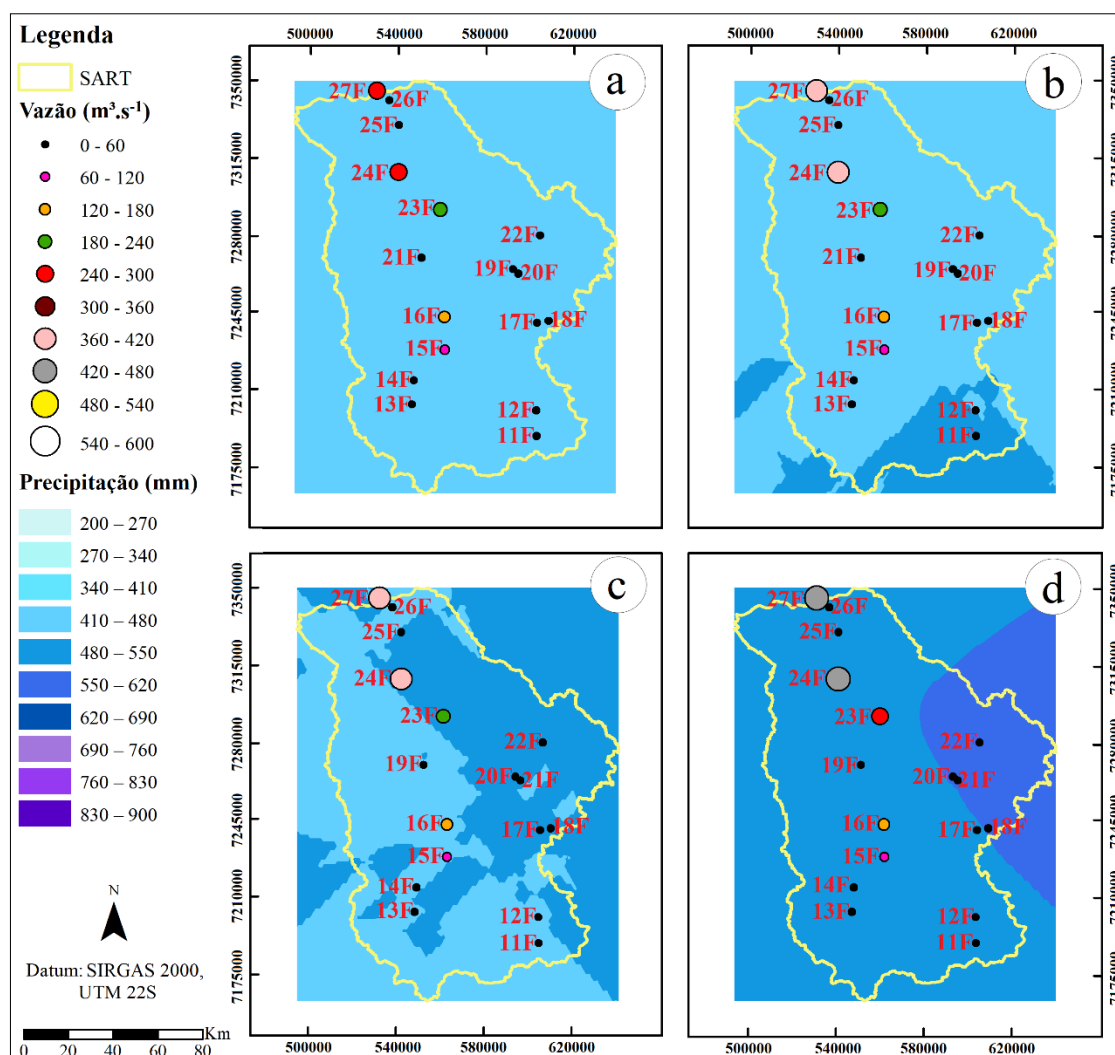
Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

A Figura 3.14 se refere aos resultados do período do inverno, sendo que ao comparar o final do século (Figura 14d) com o intervalo histórico (Figura 3.14d) com o intervalo histórico (Figura 3.14a), foi possível notar que no geral, a precipitação na sub-bacia transitou da classe entre 270-340mm para a classe 340-410mm. No que diz respeito às vazões, houveram impactos nos postos 24F-SART e 27-SART, em que ambos tiveram acréscimo em aproximadamente $60m^3 \cdot s^{-1}$. O posto 24F-SART apresentou mudança da classe $240-300m^3 \cdot s^{-1}$ (Figura 3.14a) para a classe $300-360m^3 \cdot s^{-1}$ (Figura 3.14d), com uma flutuação presente no intervalo 2040-2069 (Figura 3.14c), causada pela variação presente na modelagem hidrológica, e o posto 27F-SART passou da classe $300-360m^3 \cdot s^{-1}$ (Figura 3.14a), para a classe $360-420m^3 \cdot s^{-1}$ (Figura 3.14d). Estas

alterações decorreram em virtude do eminente aumento da altura de precipitação no final do século na sub-bacia.

Figura 3.15 - Representações estacionais -anual- de vazão na SART do cenário C1 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



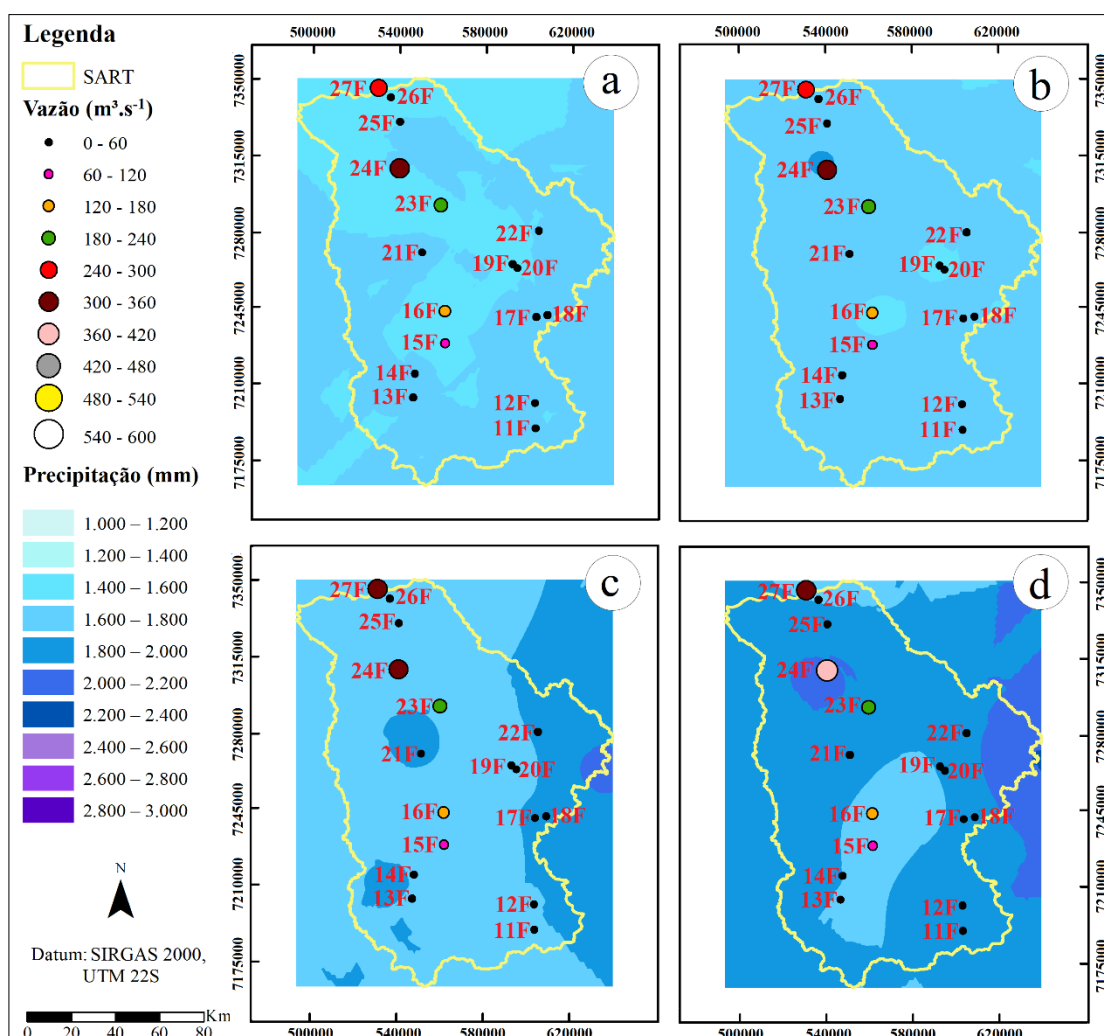
Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

No que diz respeito à Figura 3.15, onde foram apresentados os resultados da primavera, ao confrontar o intervalo 2070-2099 (Figura 3.15d) com o intervalo 1989-2018 (Figura 3.15a), foi possível observar que a precipitação sofreu acréscimo, deixando de ser representada pela classe 410-480mm, para ser representada pelas classes 480-550mm e 550-620mm. Concernente à vazão, verificou-se alterações nos postos 23F-SART, 24F-SART e 27F-SART. O posto 23F-SART, antes representado pelo fluxo entre $180-240m^3.s^{-1}$ (Figura 3.15a), passou a apresentar vazão entre $240-300m^3.s^{-1}$, no intervalo 2070-2099 (Figura 3.15d). Os postos 24F-SART e 27F-

SART, transicionaram de valores entre $240\text{-}300\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, para vazões entre $420\text{-}480\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, tendo o início de suas transições no intervalo 2019-2039 (Figura 3.15b). Apesar de haver mudanças de classe de precipitação do intervalo 2019-2039 (Figura 3.15b) para o intervalo 2040-2069 (Figura 3.15c), as mesmas não apresentaram expressivas diferenças em seus valores para que houvesse diferenças expressivas nas representações dos postos entre os dois intervalos.

Figura 3.16 - Representações estacionais -verão- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

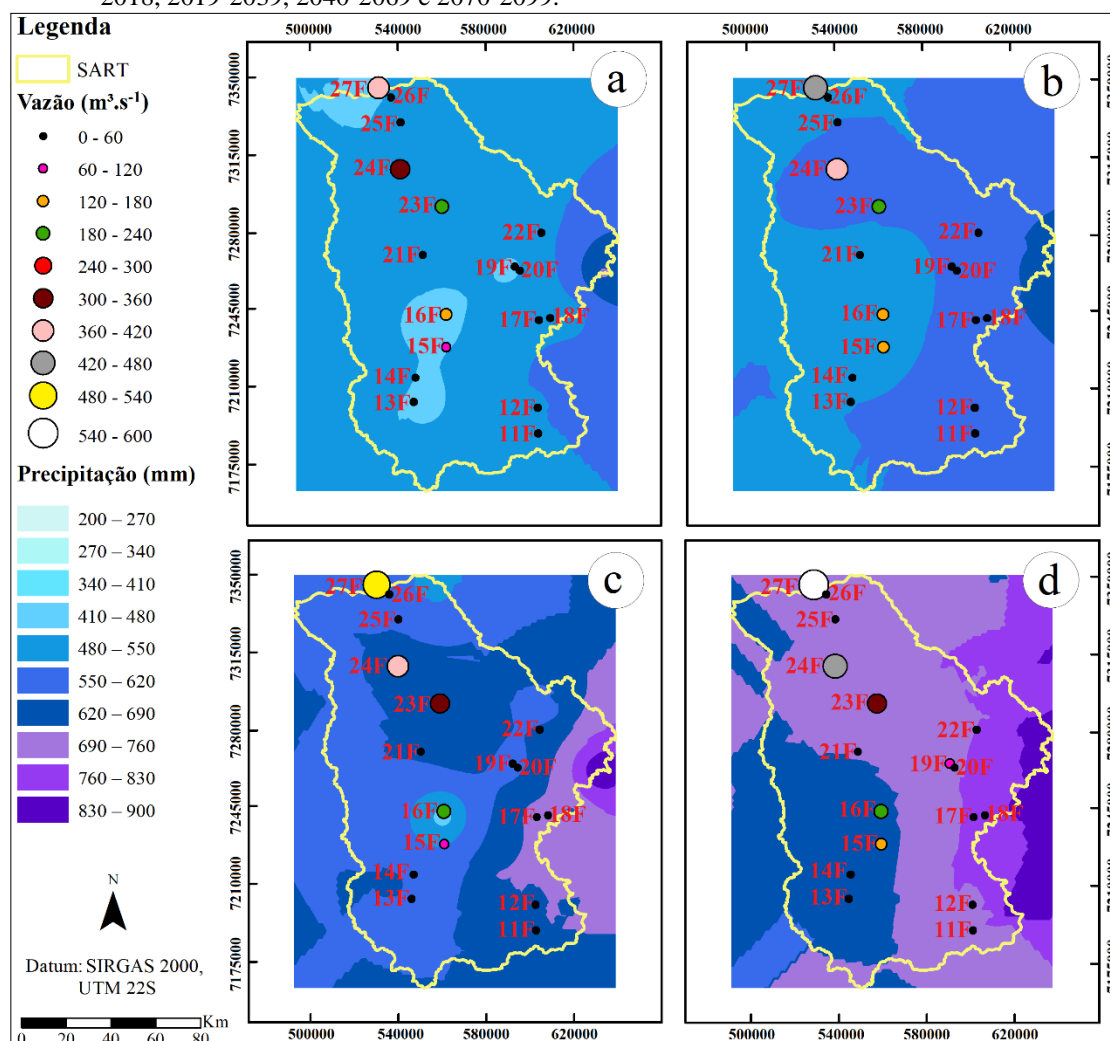
Na Figura 3.16 são apresentados os resultados referentes ao período anual, na qual, ao comparar as projeções realizadas para o final do século (Figura 3.16d), com o intervalo histórico (Figura 3.16a), foi possível constatar que a maior lamina de precipitação deixou de ser entre 1600-1800mm e chegou a ser entre 2000-2200mm. Em relação as vazões, houveram impactos nos postos 24F-SART e 27F-SART, de modo que a mudança ocorrida no posto 24F-SART foi

da transição de vazão entre $300-360\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.16a), para valores entre $360-420\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.16d), enquanto que no posto 27F-SART, a vazão deixou de ser representada entre $240-300\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ e passou a representar um fluxo entre $300-360\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.16d), apresentando início de sua transição no intervalo 2040-2069 (Figura 3.16c). Tanto a precipitação, quanto a vazão, no intervalo entre 1989-2018 (Figura 3.16a) e no intervalo entre 2019-2039 (Figura 3.16b) são similares, visto que o próprio intervalo de tempo e os impactos projetados para 2019-2039, são inferiores às outras projeções no decorrer do século.

Numa abordagem mais generalizada, para o cenário climático C1 na SART, o impacto das mudanças climáticas ao longo do século, tende a se mostrar pouco adverso no que diz respeito ao regime hídrico local, uma vez defrontados os intervalos de tempo histórico (1989-2018) e futuros (2019-2039, 2040-2069, 2070-2099), haja visto que no decurso da sub-bacia, tanto na escala sazonal quanto na anual, ocorrem oscilações pontuais na projeção da vazão.

As Figuras de 3.17 a 3.21 exibem mapas da SART nos períodos analisados, considerando as mudanças climáticas características do cenário C2, em que se projetou um aumento médio mensal de 48% da precipitação.

Figura 3.17 - Representações estacionais -verão- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



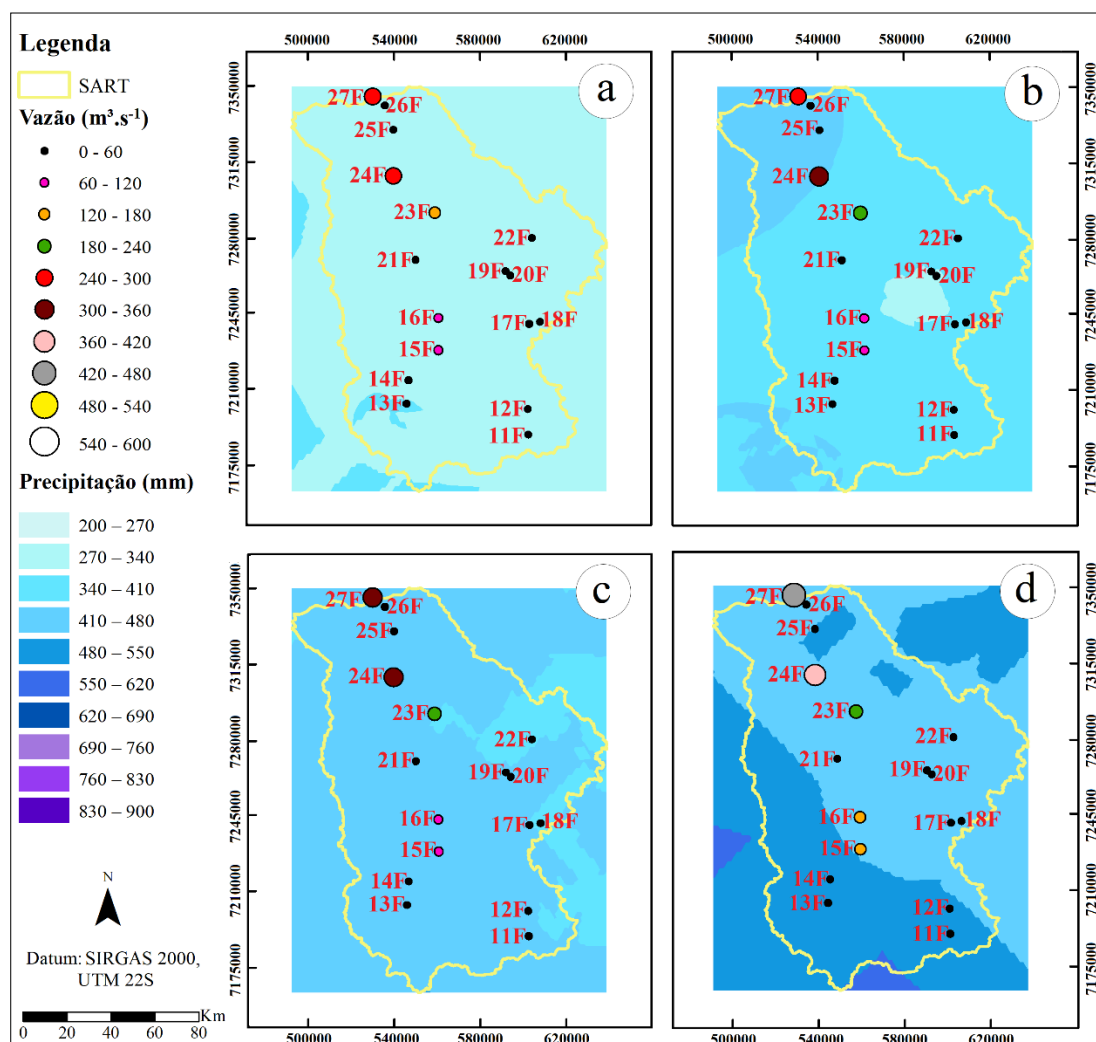
Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

Na Figura 3.17, a qual apresenta os resultados para o verão, observou-se que para o intervalo de tempo futuro 2070-2099 (Figura 3.17d) quando comparado ao intervalo histórico (Figura 3.17a), foi verificada uma tendência de elevação da precipitação na sub-bacia, sendo que na porção leste a precipitação aumentou da classe 620-690mm para 830-900mm. Em relação à vazão, nota-se que os postos 15F-SART, 16-SART, 23F-SART, 24F-SART e 27F-SART apresentaram acréscimos. Os postos 15F-SART e 16-SART, sofreram aumento em aproximadamente $60m^3 \cdot s^{-1}$, sendo que o posto 15F-SART passou da classe $60-120m^3 \cdot s^{-1}$, para a classe $120-180m^3 \cdot s^{-1}$, tendo início de sua transição no intervalo 2040-2079 (Figura 3.17c) e o posto 16F-SART mudou da classe $120-180m^3 \cdot s^{-1}$, para a classe $180-240m^3 \cdot s^{-1}$, com o início da transição ocorrendo no intervalo 2019-2039 (Figura 3.17b). No posto 23F-SART, ocorreu a transição da classe $180-240m^3 \cdot s^{-1}$ (Figura 3.17a) para a classe $300-360m^3 \cdot s^{-1}$ (Figura 3.17d),

sendo representada por esta mesma classe no intervalo anterior, entre 2040-2069 (Figura 3.17c). O posto 24F-SART, alterou seu fluxo, mudando da classe $300-360\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.17a) para a classe $420-480\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.17d), iniciando sua transição de fluxo no intervalo 2019-2039 (Figura 3.17b), com valor entre $360-420\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. No que diz respeito ao posto 27F-SBRI, notou-se que a vazão deixou de ser representada entre $360-420\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.17a), para representar a classe $540-600\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.17d), com o início de sua transição no intervalo 2019-2039 (Figura 3.17b), apresentando progressão em seus valores ao decorrer do século. Estas alterações decorreram em virtude do eminente aumento da altura de precipitação no final do século na sub-bacia.

Figura 3.18 - Representações estacionais -verão- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.

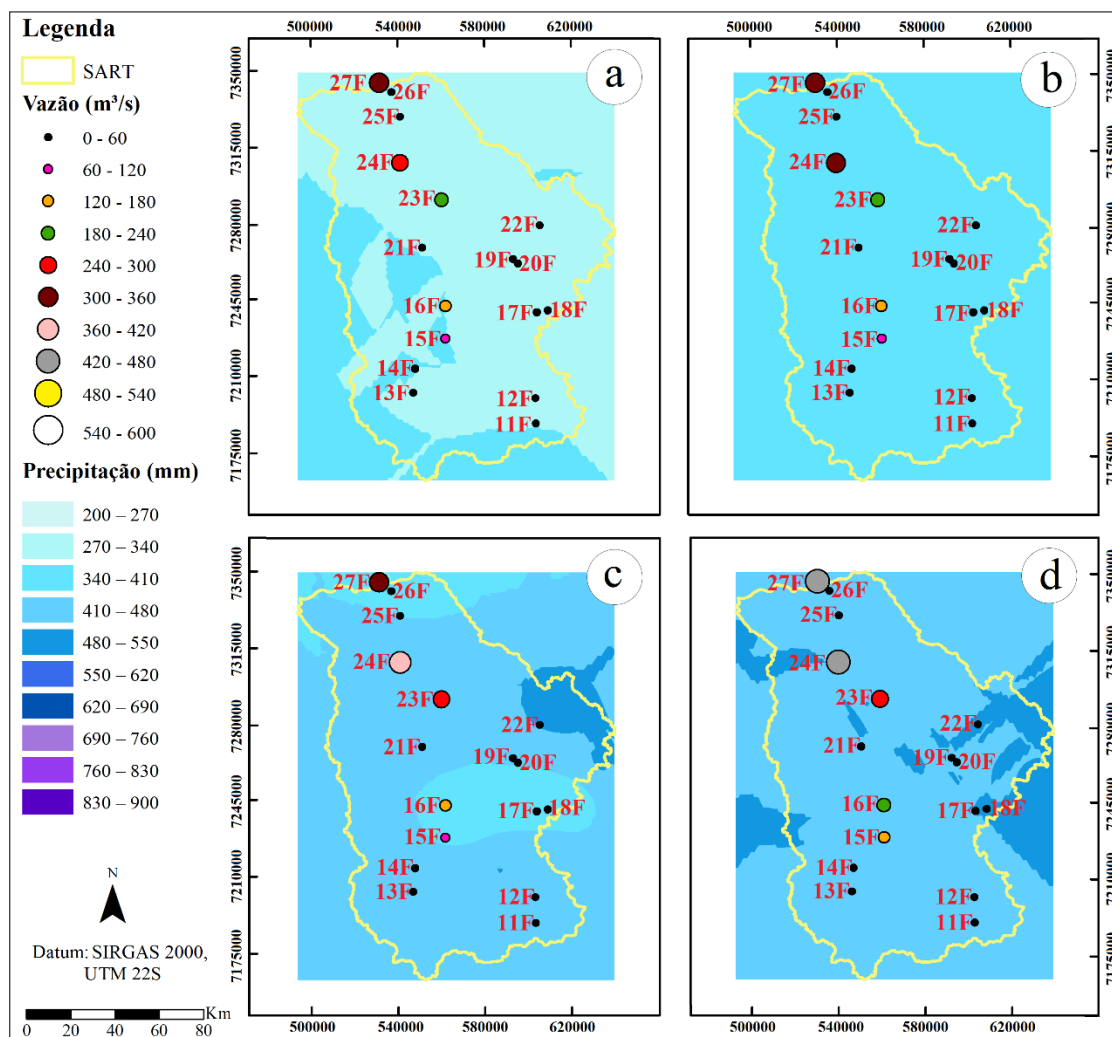


Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras "a", "b", "c" e "d", respectivamente.

A Figura 3.18 expõe os resultados referentes ao outono, na qual, ao confrontar o intervalo 2070-2099 (Figura 18d), com o intervalo histórico (Figura 3.18d), com o intervalo histórico (Figura 3.18a), possibilitou observar que a sub-bacia deixou de representar a precipitação entre 270-340mm, passando a ser representada pelas classes entre 410-480mm e 480-550mm. No que diz respeito à vazão, observou-se que os postos 15F-SART, 16-SART, 23F-SART, 24F-SART e 27F-SART apresentaram elevação. Os postos 15F-SART e 16F-SART mudaram suas classes, transicionando de valores entre 60-120m³.s⁻¹ (Figura 3.18a) para vazões entre 120-180m³.s⁻¹ (Figura 3.18d). No posto 23F, houve mudança da vazão entre 120-180m³.s⁻¹ (Figura 3.18a), para um valor entre 180-240m³.s⁻¹ (Figura 3.18d), tendo o início da transição ocorrendo no intervalo 2019-2039 (Figura 3.18b). Por outro lado, o posto 24F-SBRI sofreu um aumento da vazão deixando de apresentar fluxo entre 240-300m³.s⁻¹ (Figura 3.18a) e passando a indicar vazão entre 360-420m³.s⁻¹ (Figura 3.18d), com o início de sua transição ocorrendo no intervalo 2019-3039 (Figura 3.18b), com o fluxo entre 300-360m³.s⁻¹. Concernente ao posto 27F-SART, notou-se que a vazão transicionou de valor entre 240-300m³.s⁻¹ (Figura 3.18a), para um fluxo entre 420-480m³.s⁻¹ (Figura 3.18d), apresentando o início dessa mudança no intervalo 2040-2069 (Figura 3.18c), com o valor entre 300-360m³.s⁻¹.

Figura 3.19 - Representações estacionais -verão- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



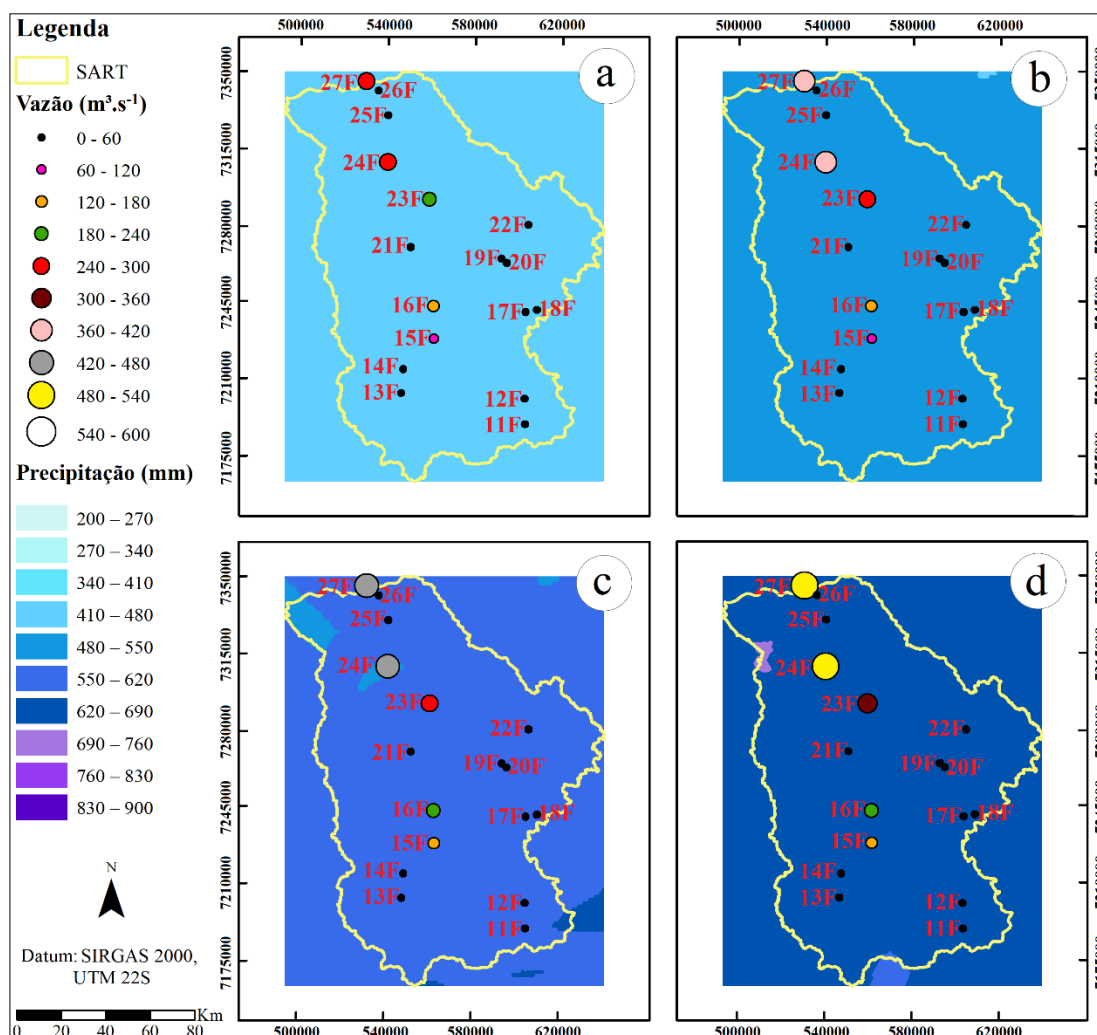
Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

A Figura 3.19 se refere aos resultados do período do inverno, sendo que ao comparar o final do século (Figura 3.19d) com o intervalo histórico (Figura 3.19a), foi possível notar que a precipitação na sub-bacia transitou das classes 270-340 e 340-410mm, para as classes 410-480 e 480-550mm. No que diz respeito às vazões, houveram impactos nos postos 15F-SART, 16F-SART, 23F-SART, 24F-SART e 27F-SART. Os postos 15F-SART e 16F-SART mudaram apenas no final do século, quando deixaram de ser representados pelas classes $60-120\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ e $120-180\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 3.19a), passando para vazões entre $120-180\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ e $180-240\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 3.19d), respectivamente. No posto 23F-SART, o fluxo aumentou de $180-240\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 3.19a), para um valor entre $240-300\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 3.19d), classe esta que foi representada no intervalo anterior, de 2040-2069 (Figura 3.19c). Em contrapartida, o posto 24F-SART transitou da classe $240-300\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 3.19a), para classe $420-480\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura

3.19d), apontando um crescimento progressivo através do século XXI, iniciado no período 2019-2039 (Figura 3.19b). No tocante ao posto 27F-SART, foi possível perceber o aumento de sua vazão da classe 300-360m³.s⁻¹ (Figura 3.19a), para a classe de 420-480m³.s⁻¹ (Figura 3.19d), com o início de sua transição no intervalo 2040-2069 (Figura 3.19c).

Figura 3.20 - Representações estacionais -primavera- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



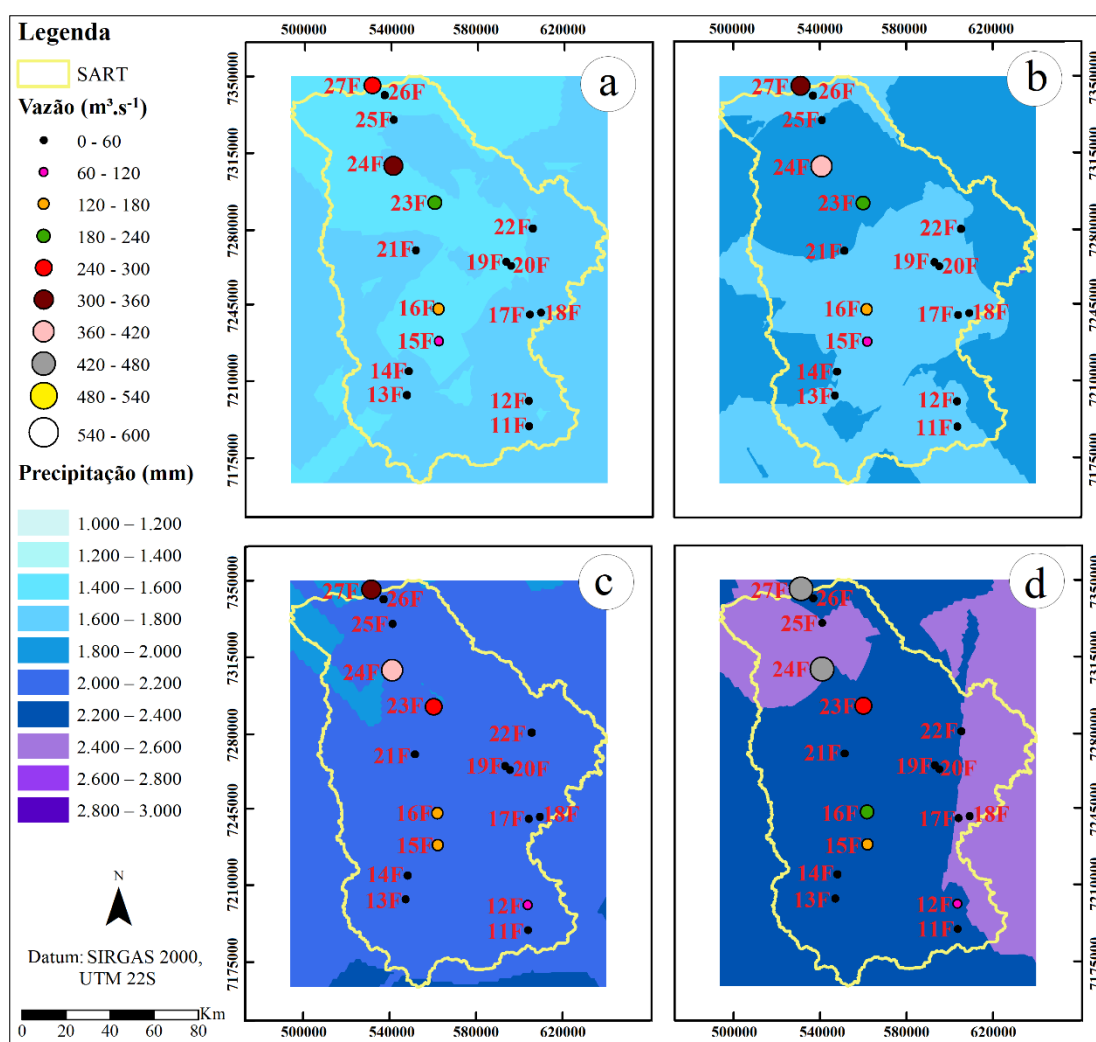
Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente.

No que diz respeito à Figura 3.20, onde foram apresentados os resultados da primavera, ao confrontar o intervalo 2070-2099 (Figura 3.20d) com o intervalo 1989-2018 (Figura 3.20a), foi possível observar que a precipitação sofreu acréscimo, deixando de ser representada pela classe 410-480mm, para ser representada pelas classes 620-690mm. Concernente à vazão, verificou-se alterações nos postos 15F-SART, 16F-SART, 23F-SART, 24F-SART e 27F-SART. Os postos 15F-SART e 16F-SART tiveram aumento em suas vazões, mudando das

classes $60-120\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ e $120-180\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.20a), para vazões entre $120-180\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ e $180-240\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.20d), respectivamente, com o início de transição no intervalo 2040-2069 (Figura 3.20c). No posto 23F-SART, o fluxo aumentou de $180-240\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.20a), para um valor entre $300-360\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.20d), iniciando sua mudança no intervalo de 2019-2039 (Figura 3.20b), com vazão entre $240-300\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Os postos 24F-SART e 27F-SART partiram de valores entre $240-300\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.20a), passando a apresentar valores entre $480-540\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.20d), apresentando início do processo de aumento progressivo a partir do intervalo entre 2019-2039 (Figura 3.20b).

Figura 3.21 - Representações estacionais -anual- de vazão na SART do cenário C2 para os intervalos de 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099.



Fonte: A autora, 2020.

Nota: os intervalos 1989-2018, 2019-2039, 2040-2069 e 2070-2099, foram representados pelas letras "a", "b", "c" e "d", respectivamente.

Na Figura 3.21 são apresentados os resultados referentes ao período anual, na qual, ao comparar as projeções realizadas para o final do século (Figura 3.21d), com o intervalo histórico (Figura 3.21a), foi possível constatar que a maior lâmina de precipitação deixou de ser entre 1600-1800mm e chegou a ser entre 2400-2600mm. Em relação as vazões, houveram impactos nos postos 15F-SART, 16F-SART, 23F-SART, 24F-SART e 27F-SART. No posto 15F-SART, foi possível notar o aumento da vazão pela transição da classe $60-120\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.21a), para a classe entre $120-180\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.21d), que iniciou a sua alteração de valores no intervalo 2040-2069 (Figura 3.21c), enquanto que o posto 16F-SART mudou da classe $120-180\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.21a), para a classe $180-240\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.21d) no intervalo que representa o final do século XXI. No que diz respeito ao posto 23F-SART, houve uma transição do fluxo entre $240-360\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.21a), para valor entre $360-420\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.21d), com início da transição no intervalo 2040-2069 (Figura 3.21c). O posto 24F-SART deixou de apresentar vazão entre $300-360\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.21a) e passou a ser entre $420-480\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.21d), iniciando sua mudança no intervalo 2019-2039 (Figura 3.21b). Por outro lado, o posto 27-SART, deixou de ser representado pela classe $240-300\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.21a) passando a ser representado pela classe $420-480\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 3.21d), transição esta que teve início no intervalo 2019-2039 (Figura 3.21b), sendo ainda possível observar que através do século, uma classe de vazão não foi representada, portanto, acredita-se que a vazão no intervalo 2070-2099 (Figura 3.21d) seja próxima à $420\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, limite inferior da classe representada.

Numa análise geral dos resultados encontrados para a SART, é possível deduzir que para o cenário C2, o impacto das mudanças climáticas ao longo do século nos valores de precipitação projetados, evidenciou que, por vezes, em alguns períodos analisados houveram alturas de precipitação superiores na SART, quando comparado com as demais áreas da sub-bacia. Em relação às vazões, notou-se que foram projetadas alterações de grandes proporções no regime hídrico local, quando defrontados os intervalos de tempo futuros (2019-2039, 2040-2069, 2070-2099) com o histórico (1989-2018), tanto na escala sazonal quanto na anual, visto que, os postos de maior vazão (15F-SART, 16F-SART, 23F-SART, 24F-SART e 27F-SART), em pelo menos uma vez, sofreram aumento do fluxo durante a progressão ao longo do tempo, até mesmo no período do outono e do inverno, que se apresentam como menos chuvosos. Além disso, o impacto projetado no cenário C2 alterou a vazão dos postos 15F-SART e 16F-SART, que apesar de não serem representados pela menos classe, apresentaram alteração em suas classes de vazão em todos os períodos analisados, o que não aconteceu no cenário C1, cujo aumento na precipitação não foi suficientemente relevante para que houvesse uma mudança na classe de vazão.

Várias pesquisas semelhantes a essa temática foram realizadas para diversos locais do globo (AL-SAFI; SARUKKALIGE; 2017; DASH et al., 2020; GEBRESMESKEL; KEBEDE, 2018; WANG; ZHANG, 2016; YIGZAW; HOSSAIN, 2016; YANG, 2017) e também no Brasil (GONDIM et al., 2018; HO; THOMPSON; BRIERLEY, 2016; MENDES; BELUCO, A.; CANALES, 2017; SORRIBAS et al., 2016; SILVEIRA et al., 2019). Todavia, neste trabalho, foram priorizados estudos efetuados em locais próximos à SART e SBRI, que aplicaram metodologias similares.

No estudo realizado Ribeiro Neto *et al.* (2016) que teve como objetivo avaliar os impactos dos cenários de mudanças climáticas do *IPCC* AR5 sobre os recursos hídricos e processos hidrológicos em todo o território brasileiro, fez uso dos MCG's HadGEM2-ES e MIROC5 que tiveram suas escalas reduzidas pelo MCR Eta, sendo estes utilizados em conjunto com o modelo hidrológico de larga escala MGB-IPH, considerando os impactos previstos para o cenário C2. De forma geral, as projeções realizadas para a bacia do rio Paraná, onde estão inclusas o SBRI e a SART, apontaram elevação das vazões diárias em todos os intervalos de tempo para este século, o que concorda com os resultados apresentados nesta pesquisa, embora estando em escalas de fluxos diferentes. Em contrapartida, o trabalho realizado por Silva *et al.* (2020), no qual foi analisado o impacto das mudanças climáticas nas projeções das vazões para o setor elétrico brasileiro, utilizando modelos do projeto *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* acoplado ao modelo hidrológico SMAP, tendo como base o cenário C2 até o final do século XXI, revelou que os postos fluviométricos selecionados para representar o território brasileiro, com exceção os postos da região sul, não demonstraram tendência de aumento das vazões até o ano de 2099.

Numa perspectiva semelhante da avaliada nessa pesquisa, considerando projeções análogas as que caracterizam os cenários C1 e C2, Neves *et al.* (2020) avaliaram os impactos das mudanças climáticas na vazão até o final do século, para a bacia do ribeirão do Lobo, que está localizada numa região definida climaticamente como subtropical úmida (clima Cwa) no centro-leste do estado de São Paulo. Fazendo uso do PGECLIMA_R acoplado ao modelo hidrológico SMAP, os autores verificaram que quando há o aumento da temperatura do ar concomitantemente à elevação de 10% da precipitação, existe a possibilidade de que eventos extremos ocorram elevando o fluxo, que podem acarretar eventos ambientais como inundações e enchentes. Por outro lado, as simulações mostraram que o aumento da temperatura e a diminuição simultânea da precipitação, podem provocar redução na vazão de até 71% na região analisada, causando impactos no regime hídrico local.

Ainda no sudeste do Brasil, a bacia do rio Grande, localizada entre os estados de São Paulo e de Minas Gerais, que apresentam classificação climática Cwa e Cwb, foi estudada por Oliveira *et al* (2017), a qual também foi analisada tendo em vista os impactos das mudanças climáticas na vazão, considerando características referentes ao cenário C2. Para tanto, o modelo SWAT foi utilizado para simular os dados hidrológico após a aplicação dos Modelos Climáticos Regionais Eta-HadGEM-ES e Eta-MIROC5 entre os anos que compreendem o atual século. As projeções apontam que as simulações do Eta-MIROC5 sugerem um impacto menor do que o Eta-HadGEM2-ES, todavia há a possibilidade de grandes reduções da vazão média mensal para todos os períodos de tempo, impactando negativamente o escoamento e mostrando alta vulnerabilidade da região em relação ao uso da água no futuro, ocasionando uma redução no potencial hidrelétrico.

Apesar da pesquisa realizada por Bozkurt *et al.*(2018), ter sido realizada na região central do Chile, que possui um clima Mediterrâneo semiárido, a mesma possui um objetivo próximo ao presente trabalho, que foi de examinar as projeções dos regimes hidroclimáticos sobre as bacias andinas aplicando os cenários caracterizados como sendo o C1 e o C2 no decorrer o século. Foram utilizados conjuntos de dados de precipitação e temperatura diários em grade, baseados em observações e usados para conduzir e validar o modelo hidrológico VIC, além de simulações históricas e futuras de 19 modelos climáticos que compõem o CMIP5, as quais foram ajustadas ao conjunto de dados observados, sendo então aplicadas para realização das projeções hidrológicas. Ao considerar C1, os resultados indicam projeções de déficit hídrico próximo à 3%, enquanto que para C2, o déficit seria próximo à 40%, ocasionando eventos extremos semelhantes ao observado na região entre 2010-2015, conhecido como “mega seca”. Os autores também explicam que as mudanças climáticas podem apresentar impacto significativo no ciclo da água de acordo com a região e a sazonalidade, visto que as projeções indicam derretimento da camada de neve, principalmente no C2, que pode atingir o dobro da porcentagem que foi projetada para C1. Além disso, considerando o cenário C2, existe o risco do aumento da frequência de eventos de inundação que tende a se intensificar até o final do século.

A maioria dos pesquisadores citados afirmam que aplicabilidade de ferramentas computacionais e modelos para projeção de impactos na disponibilidade de água, são de grande valia para pesquisadores e gestores de recursos hídricos, além disso, reiteram a possibilidade de que sejam encontrados resultados diferentes, porém similares, para a mesma localidade, de acordo os *softwares* utilizados.

Sendo assim, entende-se que as projeções exibiram vazões coerentes em ambas as sub-bacias, ainda que as mesmas apresentem tipos climáticos distintos, sendo possível identificar que os postos analisados tendem a apresentar aumento na vazão, mantendo as grandezas apresentadas entre os mesmos no intervalo histórico.

3.4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que as projeções referentes aos postos fluviométricos inseridos nas Sub-bacias do Baixo Rio Ivaí e do Alto Rio Tibagi, que possuem regiões climaticamente distintas no estado do Paraná, tanto para os períodos sazonais, quanto para os anuais, indicaram tendência de aumento de vazão, tendo em vista que os postos que apresentaram maiores fluxos no intervalo de tempo históricos, foram os que transicionaram de classe ao decorrer do século XXI. Além disso, foi verificado que as projeções do cenário C2 tenderam a ter um maior impacto da precipitação na vazão do que foi observado nas projeções do cenário C1, principalmente nos períodos de verão e primavera, que são os períodos mais chuvosos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No primeiro capítulo desta dissertação, referente ao primeiro artigo elaborado, foram apresentados mapas pluviométricos interpolados geostatisticamente pela técnica de krigagem ordinária estável, nos quais foram possíveis de se comparar os dados com falhas e os dados preenchidos. Com os resultados encontrados pode-se verificar que o modelo estável se apresentou com uma atuação satisfatoriamente eficiente em dados mensais nas sub-bacias do Baixo Rio Ivaí e Alto Rio Tibagi, apesar do modelo estável apresentar uma pequena sensibilidade ao percentual de falhas. Como subsídio para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação da variabilidade dos dados observados e preenchidos.

O segundo capítulo, o qual se refere ao segundo artigo, discorre sobre a elaboração de um modelo chuva-vazão que teve como objetivo a simplicidade de sua aplicação, dependendo inicialmente, de uma série de dados pluviométricos e fluviométricos do mesmo intervalo de tempo. O modelo apresentou um desempenho muito bom na estimativa das vazões para as localidades de ambas as sub-bacias. Além disso, no processo de verificação e validação dos dados gerados, foi constatado estatisticamente que o novo modelo não apresentou disformidade no desempenho, motivada por fatores locais de natureza climatológica, uma vez que as sub-bacias estavam localizadas em regiões climáticas distintas.

O artigo apresentado no capítulo três (terceiro artigo), expôs representações espaciais de precipitação e de vazão no intervalo histórico e nos intervalos futuros, considerando possíveis mudanças climáticas projetadas pelo *IPCC*, por meio de alterações na temperatura. Os resultados encontrados demonstram que se espera aumento nos fluxos de vazão em ambas as sub-bacias ao decorrer do século XXI, não havendo distinções relevantes nos resultados de acordo com a região analisada. Como sugestão para trabalhos futuros, tendo em vista a observação dos impactos com maior precisão, recomenda-se que as análises dos rios principais e secundários sejam realizadas separadamente.

Sendo assim, a realização de projeções hidroclimatológicas nas sub-bacias do baixo rio Ivaí e do alto rio Tibagi no estado do Paraná, no estado do Paraná, por meio de cenários impactados por mudanças climáticas do século XXI, evidenciou a importância de pesquisas com essa temática, principalmente para gestores públicos, visto que alterações no ciclo hidrológico podem impactar de forma direta uma grande quantidade de pessoas, sobretudo as atividades essenciais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.; SERRA, J. C. V.; Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Rev. FAE**, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.
- AL-SAFI, H. I. J.; SARUKKALIGE, R. Evaluation of the impacts of future hydrological changes on the sustainable water resources management of the Richmond River catchment. **Journal of Water and Climate Change**, p. 1-19, 2017.
- ALVES, K. C. C. de L. F. et al. Distribuição da precipitação mensal, anual e máxima diária anual na bacia hidrográfica do rio Formoso, Tocantins. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v.12, n.1, p. 49-70, jan./abr. 2016.
- AMARAL, A. A. **As Chuvas e a Erosividade na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão - PR**. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2012.
- AMORIM, J. F. Avaliação do inverse distance weighting para estimar a precipitação na Mesorregião Agreste do Estado de Pernambuco, Brasil. **Sigmae**, v.8, n.2, p. 340-347. 2019.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação**. Brasília: ANA, GGES, 2016. 93 p.
- ANDRADE, A. R. de; NERY, J. T. Análise sazonal e espacial da precipitação pluvial na bacia hidrográfica do rio Ivaí - Paraná. **Bol. geogr.**, Maringá, v. 29, n. 2, p. 107-121, 2011.
- ANDRADE, A. R. de; NERY, J. T. Análise da precipitação pluviométrica diária, mensal e interanual da bacia hidrográfica do Rio Ivaí, Brasil. **Investigaciones Geográficas - UNAM**, n. 52, p. 7-30, 2003.
- APARECIDO, L. E. O. et al. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia (Online)**, Lavras, v. 40, n. 4, p. 405-417, 2016.
- ARAÚJO, A. P. de; ROCHA, P. C. Regime de fluxo e alterações hidrológicas no rio Tibagi-Bacia do rio Paranapanema/Alto Paraná. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. especial VIII SINAGEO, n. 3, set. 2010.
- ARAÚJO, L. E.; MORAES NETO, J. M.; SOUSA, F. A. S. Classificação da precipitação anual e da quadra chuvosa da bacia do rio Paraíba utilizando índice de Anomalia de Chuva (IAC). **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 93-110, 2009.
- ATAÍDE, D. H. dos S. et al. Métodos geoestatísticos e determinísticos na espacialização da altura dominante em povoamento de eucalipto. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 43, p. 98-108, 2020.
- AZEVEDO, L. C. **Análise da Precipitação Pluvial da Bacia do Rio Iguazu - Paraná**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

BACK, A. J. Avaliação da erosividade de chuvas para o vale do rio Itajaí, SC. **Revista Tecnologia e Ambiente**, v. 23, 2017, Criciúma, 2017.

BALDO, M. C. **Variabilidade pluviométrica e a dinâmica atmosférica na bacia hidrográfica do rio Ivaí – PR.**2006, 172 f. Tese (Doutorado em Geografia Área de concentração: Desenvolvimento Regional e Planejamento Ambiental) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.

BARRA, T. S. Caracterização climatológica Caracterização climatológica da severidade de secas do Estado do Ceará – Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.266-272, 2002.

BERVEGLIERI, A.; MENEGUETTE JUNIOR, M.; PITERI, M. A. Aplicação do interpolador krigagem em modelos digitais de terrenos, comparando-se os casos de isotropia e anisotropia. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011. Curitiba. **Anais [...]** Curitiba: INPE, 2011. p.7222-7229.

BIELENKI JÚNIOR, C. et al. Alternative methodology to gap filling for generation of monthly rainfall series with GIS approach. **Revista Brasileira Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 23, ed. 29, 2018.

BIER, A. A.; FERRAZ, S. E. T. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas em dados meteorológicos para estações no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 215-226, 2017.

BLAIN, G. C. et al. Caracterização Climática. In: Instituto Agrônomo do Paraná. Potencial de Variabilidade Amostral de Séries Mensais de Precipitação Pluvial em duas Regiões do Brasil: Pelotas-RS e Campinas-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 24, n. 1, p. 1-11, 2009.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O.; Avaliação e Adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às Condições Climáticas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.4, p.695-705, 2005.

BLAIN, G. C; BRUNINI, O. Análise da Escala Temporal de Monitoramento das Secas Agrícolas e Meteorológicas no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia** (Impresso), v. 22, p. 255-261, 2007.

BLANCO, C. J. C.; SECRETAN, Y.; FAVRE, A. C. Análise, Aplicação e Transposição de um Modelo Chuva-Vazão para Simulação de Curvas de Permanência de Pequenas Bacias da Amazônia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n.1, p. 205-206, 2007.

BOZKUT, D. et al. Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. **Climatic Change**, jun. 2018.

BRASIL. Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março

de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, 1997.

BRASIL. Decreto nº 2.652, de 1º de julho de 1998. Promulga a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, assinada em Nova York, em 9 de maio de 1992. **Diário Oficial da União**, Brasília, 1º de julho de 1998.

BROWN, M. B.; FORSYTHE, A. B. Robust tests for equality of variances. **Journal of the American Statistical Association**, v.69, p.364–367, 1974.

BRITO, T. T. et al. Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state, Brazil. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 129, n. 5, p. 469–478, 2016.

CALDEIRA, T. L. et al. Modelagem hidrológica determinística chuva-vazão em bacias hidrográficas: uma abordagem introdutória. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v.5, n.1, p.22-32, jul. 2018.

CARAMORI, P. H. Caracterização Climática. In: Instituto Agrônomo do Paraná. Potencial de Uso agrícola das áreas de várzea do Estado do Paraná: bacia hidrográfica do baixo Ivaí. **Boletim Técnico**. Londrina, n.24, v.1, p.65-69, 1989.

CARDOSO, C. de S.; QUADRO, M. F. L. de. Análise comparativa de dados de precipitação gerados pelo “Climate Prediction Center – CPC” versus dados observados para o Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.10, n.04, p. 1180-1198, 2017.

CASAGRANDE, A.; SILVA JUNIOR, P.; MENDONÇA, F. Mudanças climáticas e aquecimento global: controvérsias, incertezas e a divulgação científica. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v.8, n.7, p. 30-44, jan./jun. 2011.

CAVIGLIONE, J. H. et al. **Cartas climáticas do Paraná**. CD. Londrina: IAPAR, 2000.

CECÍLIO, R. A. et al. Avaliação de métodos para regionalização das vazões mínimas e médias na bacia do rio Itapemirim. **Revista Scientia Agrária**, v. 19, n. 2, p. 122-132, 2018.

CIRILO, J. A. et al. Desenvolvimento e aplicação de modelo chuva-vazão para regiões semiáridas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, n.15, 2020.

CHAVES, M. E. D.; CONCEIÇÃO, K. V. DA; GUERRERO, J. V. R. Geostatistical analysis for temperature monitoring in the State of Bahia, Brazil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 13, p. 652-660, 2018.

CHIERICE JÚNIOR, N.; LANDIM, P. M. B.; Análise da chuva e vazão na bacia hidrográfica do rio Pardo. **Geociências**, v. 33, n. 2, p.244-260, 2014.

CONDRA, G. F. **Drought, its effects and measure of control in Nebraska**. Conservation Bulletin 25, Conservation and Survey Division, University of Nebraska–Lincoln, 1944.

CONFALONIERI, U. E. C. Variabilidade climática, vulnerabilidade social e saúde no Brasil. **Terra Livre**, São Paulo, v.1, n.20, p.193-204, jan./jul. 2003.

COLLISCHONN, W. et al.; Previsão Sazonal de Vazão na Bacia do Rio Uruguai 2: Previsão Climática-Hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n. 4, p. 61-72, 2005.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2, 2001.

CORREA, M. G. G.; GALVANI, E. Correlação e variabilidade da precipitação e a vazão na bacia hidrográfica do rio Piquiri – PR. **Geo UERJ**, v. 34, n. 40945, 2019.

COSTA, I. A.; HONÓRIO, M. da S. Modelagem do processo chuva-vazão na bacia hidrográfica do ribeirão Santa Bárbara em Goiás, Brasil. **Tecnia**, v.5, n.1, 2020.

COSTA, H. C.; MARCUZZO, F. F. N.; FERREIRA, O. M.; Andrade, L. R. Espacialização e Sazonalidade da Precipitação Pluviométrica do Estado de Goiás e Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geografia Física** 01. 2012

CUNHA NETO, E. M. et al. Eucalyptus spp. volume determined through geospatial interpolation. **Jaboticabal**, v.47, n.4, p.434–440, 2019.

DASH, S. S., et al. A hydrological modelling-based approach for vulnerable area identification under changing climate scenarios **Journal of Water and Climate Change**, p. 1-20, 2020.

DEITCH, M. J.; SAPUNDJIEFF, M. J.; FEIRER, S. T. Characterizing Precipitation Variability and Trends in the World's Mediterranean-Climate Areas. **Water**, v. 259, 2017.

DINDAROGLU, T. The use of the GIS Kriging technique to determine the spatial changes of natural radionuclide concentrations in soil and forest cover. **Journal of Environmental Health Science & Engineering**, v. 12, p. 1-11, 2014.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa Produção de Informação/Embrapa Solos, Rio de Janeiro. 1999. 412p.

ESRI. The principles of geostatistical analysis. In: ESRI. **ArcGis 9: Using ArcGis Geostatistical Analyst**. 2003. p. 49-79.

FERNANDES, D. S. et al. Índices para a quantificação da seca. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, 48 p, 2009.

FERREIRA, I. O.; SANTOS, G. R. dos; RODRIGUES, D. D.; Estudo sobre a utilização adequada da krigagem na representação computacional de superfícies batimétricas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 65, v. 5, p. 831-842, set./out. 2013.

FENICIA, F. et al. From spatially variable streamflow to distributed hydrological models: Analysis of key modeling decisions, **Water Resour. Res.**, v. 52, p. 954–989, 2016.

FORMIGA, K. T. M. et al. Calibração do *Storm Water Management Model* (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. **Eng Sanit Ambient**, v. 21, n. 4, p. 697-707, 2016.

FREIRE, V. H. V.; BALDO, M. C. Variabilidade Pluviométrica na Bacia do Rio Mourão – PR. **Revista Perspectiva Geográfica-Campus Marechal Cândido Rondon**, v. 12, n. 17, p. 135-152, jul./dez. 2017.

FRITZSONS, E. et al. Análise da pluviometria para definição de zonas homogêneas no estado do Paraná. **Raega**, Curitiba, v.23, n.1, p.555-572, 2011.

GEBREMESKEL, G.; KEBEDE, A. Estimating the effect of climate change on water resources: Integrated use of climate and hydrological models in the Werii watershed of the Tekeze river basin, Northern Ethiopia. **Agriculture and Natural Resources**, v. 52, p. 195-207, 2018.

GIUSTINI, F.; BRILLI, M.; PATERA, A. Mapping oxygen stable isotopes of precipitation in Italy. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, p. 162-181, 2016.

GONDIM, R. et al. Climate change impacts on water demand and availability using CMIP5 models in the Jaguaribe basin, semi-arid Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 15, p. 1-14, 2018.

GOIS, G. **Caracterização da seca e seus efeitos na produção da cultura do milho para as diferentes regiões do estado de Minas Gerais**. 2005. 81 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2005.

GONÇALVEZ, C. J. et al. Estudo de regionalização de vazões para bacia hidrográfica do Rio Paranaíba. **Sustentare**, v. 2, n. 2, p. 97-114, 2018.

GRIMM, A. M. et al. Observações ambientais atmosféricas e de propriedades da superfície. In: PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Grupo de Trabalho 1 – Base Científica das Mudanças Climáticas**. Primeiro relatório de avaliação nacional sobre mudanças climáticas. 2012.

GUETTER, A. K.; GEORGAKAKOS, K. P.; TSONIS, A. A. Hydrologic applications of satellite data: 2. Flow simulation and soil water estimates. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D21, p. 26.527-26.538.1996.

HEIM, R.R. A review of twentieth: century drought indices used in the United States. **Bulletin of the American Meteorology Society**. 83, 1149-1163. 2002.

HO, J. T.; THOMPSON, J. R.; BRIERLEY, C. Projections of hydrology in the Tocantins-Araguaia Basin, Brazil: uncertainty assessment using the CMIP5 ensemble. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 3, p. 551-567, 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Avaliação da qualidade de dados geoespaciais**. 2ed. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de Cartografia, Rio de Janeiro, 2019.112p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal – PAM**. 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico da vegetação brasileira. **Manuais Técnicos em Geociências**. Rio de Janeiro, 1992. 92p.

INICIATIVA VERDE. **Sumário para os tomadores de decisão do quinto relatório de avaliação (2014)**. Grupo de trabalho II do IPCC: impactos, adaptação e vulnerabilidade. WGII AR5. Versão em português. São Paulo, 2015.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. 1535 p.

IPCC. **Factsheet: What is the IPCC?** Out, 2013a.

IPCC. **Global Warming of 1.5 °C**. 2018.

IPCC. **The physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013b.

ITCG. **Clima – Estado do Paraná**. 2008.

KÖPPEN, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. Fondo de Cultura Econômica. México. 1948. 479p

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Klimate der Erde, Justus Perthes. **Gotha**. 1928.

KRAUSKOPF NETO, R.; GUETTER, A. K; MINE, M. R. M. Modelo hidrológico com atualização de estado - Parte I: Modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 93-103, 2007.

KRAUSKOPF NETO, R.; GUETTER, A. K; MINE, M. R. M. Modelo hidrológico com atualização de estado - Parte II: Estimador de estado dinâmico-estocástico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 105-115, 2007.

KRYSANOVA, V. et al. How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, n. 5, p. 696–720, 2018.

KUMAR ADHIKARY, S.; MUTTIL, N.; GOKHAN YILMAZ, A. Ordinary kriging and genetic programming for spatial estimation of rainfall in the Middle Yarra River catchment, Australia. **Hydrology Research**, v. 47, ed. 6, p. 1182–1197, 2016.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. **Krigagem Indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. Rio Claro: IGCE/UNESP, 2002.

LANDIM, P. M. B. Sobre Geoestatística e mapas. **Terræ Didática**, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

LAVENNE, A. et al. Spatial variability of the parameters of a semi-distributed hydrological model. **Proc. IAHS**, v. 373, p. 87–94, 2016.

LEITE, M. de L. et al. Análise preliminar da incidência de meningite no município de Ponta Grossa-PR, por meio de modelos matemáticos e cenários climáticos futuros. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, n. 1. 2014.

LIMA, R. P. C. L.; **Avaliação de Índices de Severidade de Seca na Bacia do Rio Doce Visando ao Desenvolvimento de Sistema de Classificação de Secas**. Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

LIZUMI, T., et al. Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. **Nature Communications**, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2014.

LUCAS, T. P. B. et al. Identificação de interpoladores adequados aos dados de chuva a partir de parâmetros estatísticos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 13, jun./dez. 2013.

LYRA, G. B. et al. Evaluation of methods of spatial interpolation for monthly rainfall data over the state of Rio de Janeiro, Brazil. **Theor Appl Climatol**, v.134, p.955–965, 2018.

MA, Y. Z. Geostatistical Estimation Methods: Kriging. Quantitative Geosciences: Data Analytics, Geostatistics, Reservoir Characterization and Modeling. **Springer**, p. 373–401, 2019.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 2.ed. Rio de Janeiro: Secretaria da Cultura e do Esporte do Governo do Estado do Paraná, 1981. 438p.

MACHADO, R. L. et al. Spatial variability of maximum annual daily rain under different return periods at the Rio de Janeiro state, Brazil. **Bragantia**, v. 69, p.77-84, 2010.

MARCIANO, A. G.; BARBOSA, A. A.; SILVA, A. P. M. Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada. **Rev. Ambient. Água**, v. 13, n. 1, fev. 2018.

MARENCO, J.A. Água e mudanças climáticas. **Estudo avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p.83-96, 2008.

MARINHO FILHO, G. M. et al. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MARTINS, F. B. et al; Classificação climática de Koppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.l.], nov. 2018.

MELLO, Y. R. de; OLIVEIRA, T. M. N. de. Análise estatística e geoestatística da precipitação média para o município de Joinville (SC). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 229-239, 2016.

MENDES, C. A. B., BELUCO, A.; CANALES, F. A. Some important uncertainties related to climate change in projections for the Brazilian hydropower expansion in the Amazon. **Energy**, v. 141, p. 123-138, 2017.

- MENDONÇA F. A.; DANNI-OLIVEIRA I. M. Dinâmica atmosférica e tipos climáticos predominantes da bacia do rio Tibagi. In: MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA. **A bacia do rio Tibagi**. Londrina, PR: M.E., 2002. Capítulo 4, p 63-68.
- MENDONÇA, F.; Aquecimento global e suas manifestações regionais e locais: Alguns indicadores da Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 2, p. 71–86, dez, 2006.
- MILLIMAN, J. D. et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. **Global and Planetary Change**, v. 62, p. 187–194, 2008.
- MINE, M. R. M.; TUCCI, C. E. M. Previsão em Tempo Real de Vazões Afluentes a Reservatórios de Usinas Hidrelétricas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n. 2, p. 73-95, 1999.
- MOLINA-SANCHIS, I. et al. Rainfall timing and runoff: The influence of the criterion for rain event. **J. Hydrol. Hydromech**, v. 64, n. 3, p. 226–236, 2016.
- MORAIS, R. C. de S.; ARAÚJO, I. R. G. de. Análise espacial da concentração de sólidos totais dissolvidos (STD) em águas subterrâneas da região Norte do Piauí. **Revista Equador (UFPI)**, v. 4, n. 4, p.67-80, 2015.
- MOREIRA, I. A.; MINE, M. R. M.; PEREIRA FILHO, A. J. Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. **Ingeniería del Agua**, v. 14, n. 2, p. 83-96, 2007.
- MORIASI, D.N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v.50, n.30,p.885-900, 2007.
- MULVANEY, T. J. On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rain fall and flood discharges in a given catchment. **Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland**, v. 4, n. 2, p. 18–33, 1850.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.
- NETTO, C. F.; VIRGENS FILHO, J. S.; NEVES, G. L. Análise da erosividade da chuva no estado do Paraná e cenários futuros impactados por mudanças climáticas globais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, n. 19. 2018.
- NEVES, G. L. et al. Evaluation of the impacts of climate change on streamflow through hydrological simulation and under downscaling scenarios: case study in a watershed in southeastern Brazil. **Environ Monit Assess**, v. 192, n. 707, 2020.
- NICKS, A. D.; HARP, J. F. Stochastic generation of temperature and solar radiation data. **Journal of Hidrology**, v.48, p. 1-17, 1980.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**.2ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1989.

NITSCHKE, P. R et al. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 2019.

OLIVEIRA, V. A et al. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005–5023, 2017.

OJIMA, R. As dimensões demográficas das mudanças climáticas: cenários de mudança do clima e as tendências do crescimento populacional. **Revista Brasileira de Estudos de População**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 2, p. 389-403, jul./dez. 2011.

PAIVA, J. B.D.; PAIVA, E. M. C. D.; **Hidrologia aplicada à gestão de Pequena Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

PARANÁ. DECRETO Nº 4.646, DE 31 DE AGOSTO DE 2001. Dispõe sobre o regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos e adota outras providências. **Diário Oficial**, 31 ago. 2001.

PARANÁ. Lei Nº12.726, de 26 de novembro de 1999. Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos e adota outras providências. **Diário Oficial nº 5.628**, 29 nov. 1999.

PARANÁ. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. **Análise da Conjuntura Agropecuária Safra 2009/10**: Agrometeorologia 2009/10. Set, 2009.

PARANÁ. Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Bacias Hidrográficas do Paraná**: Série Histórica. Curitiba, 2010a.

PARANÁ. Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Elaboração Estadual do Plano de recursos Hídricos: Anexo I**. Curitiba, 2010b.

PBMC. **Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo do GT2. 28 p. PBMC: Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

PBMC. **Base científica das mudanças climáticas: Volume 1 - Primeiro relatório de avaliação nacional**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 464 f., 2014.

PBMC. **Quinto relatório do IPCC mostra intensificação das mudanças climáticas**. 2017.

PEREIRA, V. A. S. et al.; Krigagem ordinária e visualização de incertezas aplicadas no monitoramento de irregularidades ionosféricas no Brasil. **Rev. Bras. de Cartografia**, v. 70, n. 3, p. 967-996, jul./set., 2018.

PRIMAVESI, O.; ARZABE, C.; PEDREIRA, M. S. **Mudanças climáticas: visão tropical integrada das causas, dos impactos e de possíveis soluções para ambientes rurais ou urbanos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007.

PIRES, C. A. da F. et al. Krigagem ordinária aplicada à precipitação pluviométrica nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v.38 n.3, p. 1303-1311, 2016.

PYKE, C. R. Interactions between habitat loss and climate change: implications for fairy shrimp in the Central Valley Ecoregion of California, USA. **Climate Change**, v. 68, p. 199-218, 2005.

QIU, L. H. et al. Identification of the impacts of climate changes and human activities on runoff in the upper and middle reaches of the Heihe River basin, China. **Journal of Water and Climate Change**. v. 7, n. 1, p. 251–262, 2016.

R DEVELOPMENT CORE TEAM; **Introdução ao R**. jul. 2000.

RAUEN, M. de J. **Levantamento de reconhecimento dos solos no litoral do estado do Paraná (Área 11)**. Curitiba: Empraba Solos, 1977.

REBOITA, M. S.; GAN, M.A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v, 25, n. 2,p. 185-204, 2010.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terra e Didática**. v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

ROCHA, P. C.; TOMMASELLI, J. T. G. Variabilidade Hidrológica nas Bacias dos Rios Aguapeí e Peixe, Região Oeste Paulista. **Revista Brasileira de Climatologia**. Curitiba, v. 10, p. 69-84, jan./jun. 2012.

RIGHI, E.; BASSO, L. A. Aplicação e análise de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas. **Ambiência Guarapuava (PR)**, v.12, n.1, p. 101-117, jan./abr. 2016.

ROLAND, F. et al. Climate change in Brazil: perspective on the biogeochemistry of inland waters. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3, suppl., p. 709-722, 2012.

SGARBOSSA, C. K., VIRGENS FILHO, J. S. D. Solar fraction used in water heating systems for south Brazilian climate changes scenarios. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 42, e48583. 2020.

SALMORAL, G. et al. Drivers influencing streamflow changes in the Upper Turia basin, Spain. **Science of the Total Environment**, v.503–504, p. 258–268, 2015.

SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. da S. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, n. 103, Dossiê Clima, 2014.

SANTOS, V. C dos; STEVAUX, J. C. Estimativa e regionalização hidrológica de vazões médias e produção de sólidos suspensos para a bacia hidrográfica do rio Ivaí – estado do Paraná. **Geographia Meridionalis**, v. 1, n. 2, p. 384-404, 2015.

SANTOS, E. H. M.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Variabilidade Espacial e Temporal da Precipitação Pluvial na Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite-GO. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 78-89, jan./fev. 2011.

SANTOS, W. A.; ARAÚJO, H. M. Clima e Condições Meteorológicas da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Cotinguiba-SE. **Boletim de Geografia**. Maringá, v. 31, n. 1, p. 41- 52, jan./abr. 2013.

SCHEIDT, F. A.; BRUNETTO, M. A. de C. Modelagem chuva-vazão utilizando Redes Neurais Artificiais e Algoritmos Genéticos. **XXXI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação**, p. 1399-1408, 2011.

SEARCY, J.K.; HARTDISON, C. H. Double Mass Curves. Manual of hydrology: Part 1. General Surface Water Techniques. **US Geological Survey**, Water-Supply Paper 1541-B., 1960.

SEMARH. Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Bacias Hidrográficas do Paraná: Série Histórica**. Curitiba, 2010.140p.

SILVA, M. V. M. da. et al. Projections of climate change in streamflow and affluent natural energy in the Brazilian hydroelectric sector of CORDEX models. **Rev. Bras. de Rec. Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, n. 34, 2020.

SILVA, T. P. da et al. Métodos de interpolação espacial do regime pluviométrico no espaço urbano de Catalão, Goiás. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.11, n. 03, p. 745-757, 2018.

SILVA, W. L. et al. Tendências observadas em indicadores de extremos climáticos de temperatura e precipitação no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.30, n.2, p. 181-194, 2015.

SILVEIRA, C. S. et al. Performance evaluation of AR5-CMIP5 models for the representation of seasonal and multi-annual variability of precipitation in Brazilian hydropower sector basins under RCP 8.5 scenario. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 11, p. 1279-1296, 2019.

SOUSA, V. B. et al. Considerações acerca do regime hidrológico do rio Tibagi-PR e suas relações com o regime pluviométrico. **Revista Geonorte**, Edição Especial 4, v. 10, n.1, p.233-239, 2014.

SORRIBAS, M. V. et al. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. **Climatic Change**, v. 136, n. (3-4), p. 555-570, 2016.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of basin-scale water quality model with GIS. **Water Resources Bulletin**, v. 30, p. 453-462, 1994.

STEIN, A.; L. C. A. CORTEN, L. C. A. Universal Kriging and Cokriging as a Regression Procedure. **Biometrics**, v. 47, n. 2, p. 575-87, 1991.

SUGAWARA, M. Automatic calibration of the Tank Model. **Hydrological Science Bulletin**, v. 24, n. 3, p. 375-388, 1979.

TERASSI, P. M. de B. et al. Estimativas de erosividade e as precipitações diárias extremas na bacia hidrográfica do rio Iguaçu - Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

TERASSI, P.M.B.; GALVANI, E. Identification of homogeneous rainfall regions in the eastern watersheds of the State of Paraná, Brazil. **Climate**, v.5, n.3, p.53-65, 2017.

TERASSI, P. M. B. et al.; Variabilidade do Índice de Precipitação Padronizada na Região Norte do Estado do Paraná Associada aos Eventos de El Niño-Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, 11-25, 2018.

TERASSI, P. M. de B; SILVEIRA, H.,;OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. Variabilidade pluviométrica e a erosividade das chuvas na unidade hidrográfica Pirapó, Paranapanema III e IV - Paraná. **Raega**, Curitiba, v.39, p. 76 -91, 2017.

THOMÉ, V. M. R. et al. **Zoneamento agroecológico e socioeconômico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri. (CD-Rom).1999.

TSUNETO, L.; VIRGENS FILHO, J. Rainwater harvesting system using alternative energy sources in climate change scenarios in the State of Parana – Brazil. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 503, 2020.

TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. (Org.) **Clima e recursos hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. ABRH Editora da U-FRGS. Porto Alegre. 669 p., 1998.

TUCCI, C. E. M; **Hidrologia: ciência e aplicação** – 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFGRS: ABRH, 2001.

ULIANA, E. M. et al. Aplicação dos modelos hidrológicos SAC-SMA e IPH II na bacia do rio Teles Pires, Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, n. 15, 2019.

VAGHEFI, P.; YU, B. Validation of CLIGEN Parameter Adjustment Methods for Southeastern Australia and Southwestern Western Australia. **J. Hydrometeor**, v. 18, n. 7, p. 2011-2028, 2017.

VALÉRIO, E. L. S.; FRAGOSO JR, C. R. Avaliação dos efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguçu, BA. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, p. 872-887, 2015.

VIANA, J. F. de S. et al. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Pirapama-PE utilizando o modelo SWAT. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.3, n. 01, p.155-172, 2018.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Mcgraw-hill, 1975. 245 p.

VIRGENS FILHO, J.S. et al.; Desempenho dos modelos CLIGEN, LARS-WG e PGECLIMA_R na simulação de séries diárias de temperatura máxima do ar para localidades do estado do Paraná. **Engenharia Agrícola**, v. 33, p. 538-547, 2013.

WANG, G. Q.; ZHANG, J. Y. Variation of water resources in the Huang-huai-hai areas and adaptive strategies to climate change. **Quaternary International**, p. 1-7, 2016.

WHIPPLE, W. JR. **Regional drought frequency analysis**. Proceedings of the American Society of Civil Engineers 92. 1966.

WILLMOTT, C. J.; CKESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

WREGGE, M. S. et al. Plantios florestais com pinus no estado do Paraná e os novos cenários definidos pelas mudanças climáticas globais. **Revista do Instituto Florestal**, v. 28, n. 2, p. 159–175, 2016.

YAMAMOTO, J. K., LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215p.

YANG, T, et al. Assessing the impacts of climate change on flow regime alteration in an African river using a new IHA method. **Global and Planetary Change**, 2017.

YIGZAW, W.; HOSSAIN, F. Water sustainability of large cities in the United States from the perspectives of population increase, anthropogenic activities, and climate change. **Futurewater Sustainability of U.S. Cities**, p. 603-618, 2016.

ZANDONADI, L. **As Chuvas na Bacia do Paraná: Aspectos Temporais, Espaciais e Rítmicos**. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2009.

ZANONI, D. A. et al. Calculating the rainfall erosivity. In: ZANONI, D. A. et al. **Rainfall Erosivity: Gap-Filling Method Differences in the Brazilian Pantanal and Cerrado Biomes**. 2018. p. 83- 99.

ZHAO, T. et al. How Suitable is Quantile Mapping for Postprocessing GCM Precipitation Forecasts? **Journal of Climate**, v. 30, n. 9, p. 3185–3196, 2017.