

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ABORDAGEM ESTOCÁSTICA PARA ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A
DISPONIBILIDADE E A DEMANDA HÍDRICA NO FUTURO.**

GUILHERME GARCIA DE OLIVEIRA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Porto Alegre, dezembro de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

**ABORDAGEM ESTOCÁSTICA PARA ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A
DISPONIBILIDADE E A DEMANDA HÍDRICA NO FUTURO.**

GUILHERME GARCIA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: OLAVO CORREA PEDROLLO

COORIENTADORA: NILZA MARIA DOS REIS CASTRO

BANCA EXAMINADORA:

PROF. DR. JOSÉ ANTONIO MARENGO ORSINI

PROFA. DRA. RUTINÉIA TASSI

PROF. DR. WALTER COLLISCHONN

Porto Alegre, dezembro de 2014

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo ensino gratuito de qualidade, por todo o aprendizado e apoio recebido nestes quatro anos de estudos.

Aos meus orientadores, o professor Olavo Correa Pedrollo e a professora Nilza Maria dos Reis Castro, pela incansável dedicação para contribuir e nortear minhas pesquisas e por todo o conhecimento adquirido com vocês. Tenho-os como exemplos de bons profissionais, sempre éticos, disponíveis e prestativos. Espero que tenhamos ainda muitos outros trabalhos acadêmicos para realizar juntos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de doutorado com taxa de bancada. Sem este apoio, a elaboração da presente Tese não teria sido possível.

Ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM/UFRGS) pela infraestrutura que contribuiu para que esta pesquisa pudesse ser realizada. Em especial, um agradecimento ao professor Laurindo Antonio Guasselli, que viabilizou um espaço físico para que eu pudesse realizar minhas pesquisas com o grupo do sensoriamento remoto e também atividades relacionadas ao doutorado.

À Banca Examinadora, os professores e pesquisadores Walter Collischonn, José Antonio Marengo Orsini e Rutinéia Tassi, pelas contribuições que possibilitam melhorar a qualidade deste trabalho.

Ao Centro Universitário Univates e, em especial, ao coordenador do Curso de Engenharia Ambiental, Rafael Eckhardt, pela oportunidade de continuidade das minhas atividades relacionadas à docência em ensino superior, contribuindo para minha formação como profissional da área da educação e da pesquisa.

À minha esposa, Larissa, e aos meus pais, Carlos e Eloá, por todo apoio emocional e também pela compreensão nos momentos em que estive ausente. Esta Tese é especialmente dedicada a vocês!

A todos os meus amigos e colegas, em especial, ao pessoal do LAGAM (Fabi, João Paulo, Thiago, Tássia, Cecília e Renata) e ao colega e amigo Adrien. Enfim, a todos os amigos que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica ou pessoal.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi propor uma metodologia para investigar os possíveis efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica e as alterações da demanda hídrica no futuro, através de uma abordagem estocástica, que considera projeções climáticas, hidrológicas, populacionais e agropecuárias. O trabalho foi aplicado à bacia hidrográfica do rio Ijuí, noroeste do Rio Grande do Sul, Brasil. A metodologia foi composta por cinco módulos, envolvendo: i) a modelagem hidrológica para transformação da precipitação e evapotranspiração em vazão, utilizando Redes Neurais Artificiais (RNAs), ii) a correção e análise dos cenários climáticos para o futuro, oriundos do modelo Eta CPTec/HadCM3, iii) a modelagem estocástica das vazões mensais no futuro, iv) a modelagem estocástica das variáveis populacionais e agropecuárias para geração de séries de demanda hídrica no futuro e, v) a simulação do balanço hídrico para geração de curvas de regularização, objetivando uma análise da relação entre a disponibilidade e a demanda hídrica no futuro. Como resultados relacionados ao processo de modelagem hidrológica, destaca-se que o modelo com RNAs mais adequado para a simulação das vazões mensais apresentou apenas três variáveis de entrada, obtendo um coeficiente de Nash-Sutcliffe igual a 0,904. Através da análise de sensibilidade, foi observado que a RNA escolhida relacionou corretamente as variáveis de entrada com a saída da rede, respeitando os princípios físicos envolvidos no sistema hidrológico. Quanto à análise dos cenários climáticos e vazões resultantes do processo de modelagem hidrológica, as diferenças entre os valores simulados com base no modelo Eta e os valores observados, no período de avaliação dos modelos (1976-1990), atingiram erros algumas vezes superiores a 20%. Portanto, deve-se considerar que estas incertezas serão reproduzidas em cenários futuros, quanto à análise dos efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica. Os resultados relacionados à modelagem estocástica das vazões mensais para o futuro (2011-2040), de modo geral, demonstraram uma tendência de aumento nas vazões. A vazão média de longo período, por exemplo, apresentou uma alteração de 141,6 m³/s (1961-1990) para 200,3 m³/s (2011-2040). Também foi observado um incremento na vazão média e no desvio padrão mensal entre os meses de janeiro e outubro. Entre os meses de fevereiro e junho, o percentual de aumento na vazão média mensal foi mais acentuado, superando o índice de 100%. Considerando-se os intervalos de confiança das estimativas de vazão para o futuro, pode-se concluir que existe uma tendência de aumento na variabilidade hidrológica no período entre 2011 e 2040, o que indica a possibilidade de ocorrência de séries temporais com períodos mais acentuados de estiagem e de cheias. Quanto às alterações na

demanda hídrica, foi constatado que a tendência de crescimento das atividades agrícolas irrigadas no período analisado é bem superior à tendência observada em relação à criação animal e ao abastecimento humano. Mantida a tendência e os resíduos modelados entre 2003 e 2010, a média das séries estocásticas geradas para o futuro indica que haverá 1.954 km² de áreas irrigadas em 2040, fazendo com que a demanda aumente de 6,3 m³/s (2011) para 28 m³/s (2040), no mês de maior demanda hídrica (janeiro). Na etapa final, ao calcular a razão entre a demanda para usos consuntivos e a disponibilidade hídrica (demanda/disponibilidade), no período entre 2011 e 2040, foi observada uma tendência de aumento neste percentual ao longo dos anos. Em média, a relação demanda/disponibilidade em 2011 foi de apenas 6,06%, variando entre 0,81% (maio) e 20,15% (dezembro). Já em 2040 esta proporção aumentou para 13,82%, variando entre 1,09% (maio) e 43,3% (dezembro). Quanto às mudanças nas curvas de regularização obtidas através da simulação do balanço hídrico em um reservatório fictício, os resultados atestam que, em caso de confirmação do cenário de mudança climática utilizado, haverá a necessidade de reservatórios com capacidade cada vez maior para atender à demanda para usos consuntivos, em virtude do agravamento das estiagens no início do verão.

Palavras-Chave: Modelagem Hidrológica; Mudanças Climáticas; Redes Neurais Artificiais; Modelo Eta CPTEC/HadCM3; Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí.

ABSTRACT

The purpose of this study was to propose a methodology to investigate the possible effects of climate change on water availability and changes in water requirement in the future, through a stochastic approach that considers climate, hydrological, agricultural and population projections. The method was applied to Ijuí river basin, northwest of Rio Grande do Sul, Brazil. The methodology consisted of five modules, involving: i) hydrological modeling of monthly flows using Artificial Neural Networks (ANNs), ii) correction and analysis of climate scenarios for the future, derived from the Eta model CPTEC / HadCM3, iii) the stochastic modeling of monthly flows in the future, iv) the stochastic modeling of population and agricultural variables to generate water requirement series in the future and, v) the simulation of the water balance for the generation of curves regularization aiming an analysis of the relationship between water availability and water requirement in the future. Regarding the results of the hydrologic modeling, it is highlighted that ANN model more suitable model for the flow simulation presented only three input variables, obtaining a Nash-Sutcliffe coefficient equal to 0.904. It was observed, through sensitivity analysis, that the ANN related correctly chosen input variables with the output of the network, respecting the physical principles involved in the hydrological system. The analysis of climate scenarios and flows resulting from the hydrologic modeling process showed that the differences between the simulated values based on the Eta model and the observed values for the period of assessment models (1976-1990), errors sometimes reached more than 20 %. Therefore, one must consider that these uncertainties will be replicated in future scenarios, as to analysis of the effects of climate change on water availability. Overall, the results related to stochastic modeling of monthly flows for the future (2011-2040) showed a tendency to increase in flows. The average flow of long period, for example, introduced an amendment to 141.6 m³ / s (1961-1990) to 200.3 m³ / s (2011-2040). We observe an increase in the average flow and monthly standard deviation between January and October. The percentage increase in the monthly average flow was more pronounced between the months of February and June, exceeding the rate of 100%. Considering the confidence intervals of the estimates of flow for the future, it can be concluded that there is an increasing trend in hydrological variability in the period between 2011 and 2040, which indicates the possibility of time series with more severe periods of drought and flood. We found an increasing trend of irrigated agricultural activities above the trend towards livestock and human consumption. If the trend and residues modeled between 2003 and 2010 is maintained, irrigated areas in 2040 should reach 1,954 km²,

increasing water demand of $6.3 \text{ m}^3 / \text{s}$ (2011) to $28 \text{ m}^3 / \text{s}$ (2040), in the month of higher water demand (in January). The final step is to calculate the ratio between the demand for consumptive uses and water availability (demand / availability), we observe an increasing trend in the percentage in the period between 2011 and 2040. On average, the demand / availability in 2011 was only 6.06%, with values between 0.81% (May) to 20.15% (December). By 2040, this proportion increased to 13.82%, with values between 1.09% (May) to 43.3% (December). Finally, with regard to changes in the curves obtained for regularization by simulating the water balance in a fictitious reservoir, the results show that there is a need for reservoirs with increasing capacity to meet the demand for consumptive uses, upon confirmation of the scenario climate change used, because of worsening drought in early summer.

Keywords: Hydrologic Modeling; Climate Change; Artificial Neural Networks; Eta Model CPTec/HadCM3; Ijuí River Basin.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	VI
SUMÁRIO	VIII
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE FIGURAS.....	XII
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. HIPÓTESE	19
1.2. OBJETIVO	19
1.3. RECORTE ESPACIAL.....	19
1.4. MÓDULOS E ETAPAS DO TRABALHO	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS, MODELOS E CENÁRIOS FUTUROS	22
2.2. ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE E DA DEMANDA HÍDRICA NO FUTURO	28
2.2.1. <i>CORREÇÃO DAS VARIÁVEIS PROJETADAS POR MODELOS CLIMÁTICOS</i>	31
2.3. MODELOS ESTOCÁSTICOS E A GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS CLIMATOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS	35
2.4. MODELAGEM DA DEMANDA HÍDRICA	43
2.4.1. <i>ABASTECIMENTO HUMANO</i>	43
2.4.2. <i>INDÚSTRIAS</i>	48
2.4.3. <i>IRRIGAÇÃO</i>	49
2.4.4. <i>CRIAÇÃO ANIMAL</i>	50
2.5. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	53
2.6. MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	57
3. MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1. ÁREA DE ESTUDO.....	63
3.2. MATERIAIS	67
3.3. MÉTODOS	70
3.3.1. <i>MÓDULO 1: MODELO HIDROLÓGICO MENSAL</i>	70
3.3.2. <i>MÓDULO 2: ANÁLISE DAS INCERTEZAS ASSOCIADAS ÀS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS SIMULADAS PELO MODELO ETA</i>	78
3.3.3. <i>MÓDULO 3: MODELAGEM ESTOCÁSTICA E DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO FUTURO</i>	83
3.3.4. <i>MÓDULO 4: MODELAGEM ESTOCÁSTICA E DEMANDA HÍDRICA NO FUTURO</i>	88
3.3.5. <i>MÓDULO 5: ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A DISPONIBILIDADE E A DEMANDA HÍDRICA NO FUTURO</i>	103

4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	107
4.1.	MÓDULO 1: O DESEMPENHO DO MODELO HIDROLÓGICO.....	107
4.2.	MÓDULO 2: A ANÁLISE DOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS	114
4.2.1.	<i>ANÁLISE COMPARATIVA DA PRECIPITAÇÃO SIMULADA (1976-1990).....</i>	<i>114</i>
4.2.2.	<i>ANÁLISE COMPARATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (1976-1990).....</i>	<i>118</i>
4.2.3.	<i>ANÁLISE COMPARATIVA DAS VAZÕES MENSAIS (1976-1990).....</i>	<i>120</i>
4.3.	MÓDULO 3: OS CENÁRIOS ESTOCÁSTICOS DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO FUTURO.....	127
4.3.1.	<i>CENÁRIO CLIMÁTICO CORRIGIDO E SÉRIE VAZÃO SIMULADA PARA O PERÍODO FUTURO (2011-2040)</i>	<i>128</i>
4.3.2.	<i>ANÁLISE DA MODELAGEM ESTOCÁSTICA DAS VAZÕES MENSAIS.....</i>	<i>131</i>
4.3.3.	<i>ANÁLISE DAS MUDANÇAS E INCERTEZAS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO FUTURO.....</i>	<i>133</i>
4.4.	MÓDULO 4: OS CENÁRIOS ESTOCÁSTICOS DE DEMANDA HÍDRICA NO FUTURO	150
4.4.1.	<i>PROJEÇÃO POPULACIONAL E DEMANDA HÍDRICA PARA ABASTECIMENTO HUMANO</i>	<i>150</i>
4.4.2.	<i>PROJEÇÃO DE REBANHOS E DEMANDA HÍDRICA PARA CRIAÇÃO ANIMAL</i>	<i>157</i>
4.4.3.	<i>PROJEÇÃO DE ÁREAS IRRIGADAS E DEMANDA HÍDRICA PARA AGRICULTURA IRRIGADA</i>	<i>164</i>
4.5.	MÓDULO 5: A RELAÇÃO ENTRE A DEMANDA E A DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO FUTURO	169
4.5.1.	<i>ANÁLISE GERAL DA RELAÇÃO DEMANDA/DISPONIBILIDADE</i>	<i>169</i>
4.5.2.	<i>SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO EM UM RESERVATÓRIO E GERAÇÃO DE CURVAS DE REGULARIZAÇÃO.....</i>	<i>173</i>
5.	CONCLUSÕES	181
6.	REFERÊNCIAS	187

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Demanda hídrica por tipo de criação animal.....	52
Tabela 3.1. Séries de dados para o treinamento, a validação e a verificação do modelo hidrológico com RNAs.	75
Tabela 3.2. Intervalo de valores observados na série histórica e adotados para a análise de sensibilidade de cada variável.....	77
Tabela 3.3. Componente cíclico (sazonal) nos períodos de base e futuro: vazão média mensal na bacia hidrográfica do rio Ijuí, posto Santo Ângelo.	86
Tabela 3.4. Duração (dias) das etapas de crescimento dos cultivos de soja, milho e cereais de inverno (ALLEN et al., 1998).	101
Tabela 3.5. Coeficiente de cultivo (Kc) para cada fase de crescimento do plantio (ALLEN et al., 1998).	101
Tabela 3.6. Proporção de áreas com uso de irrigação em cada mês (Alp_m) na bacia do rio Ijuí, RS.	102
Tabela 3.7. Coeficiente de cultivo mensal para as áreas agrícolas irrigadas na bacia do rio Ijuí, RS.	103
Tabela 4.1. Índice de Contribuição Relativa (RCI) das três variáveis mais importantes no modelo com RNAs....	108
Tabela 4.2. Erro médio dos cenários quanto às curvas trimestrais de permanência das vazões.	126
Tabela 4.3. Mudanças relacionadas à temperatura, umidade relativa, velocidade dos ventos, radiação solar e pressão atmosférica, no período entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí.	130
Tabela 4.4. Diferença entre a série original (simulada) e as 1.000 séries estocásticas geradas - vazão média e desvio padrão mensal no período entre 2011 e 2040, posto Santo Ângelo.	132
Tabela 4.5. Média do desvio padrão das vazões mensais nos períodos de base e futuro – posto Santo Ângelo.	137
Tabela 4.6. Média das vazões (m^3/s) com permanência de 10% (Q10) e de 90% (Q90), nos períodos de base (1961-1990) e futuro (2011-2040) – posto Santo Ângelo.	144
Tabela 4.7. Limites e amplitudes do intervalo de confiança das vazões (m^3/s) com permanência de 10% (Q10) nos períodos de base (1961-1990) e futuro (2011-2040), posto Santo Ângelo.	145
Tabela 4.8. Limites e amplitudes do intervalo de confiança das vazões (m^3/s) com permanência de 90% (Q90) nos períodos de base (1961-1990) e futuro (2011-2040), posto Santo Ângelo.	145
Tabela 4.9. Estimativa da proporção das áreas urbanas e rurais de cada município abrangido parcial ou totalmente pela bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.....	151
Tabela 4.10. Estimativa da população de cada município na bacia do rio Ijuí, RS.	151
Tabela 4.11. Relação demanda/vazão mensal, considerando uma média das 1.000 combinações de séries estocásticas, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	171
Tabela 4.12. Relação demanda/vazão mensal, considerando o percentil 0,95 das 1.000 combinações de séries estocásticas, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	172

Tabela 4.13. Capacidade dos reservatórios para atendimento da demanda hídrica de 210 Hm ³ para o setor energético, considerando a média das 1.000 combinações de séries estocásticas nos cenários de base e futuro, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	177
Tabela 4.14. Capacidade dos reservatórios para atendimento da demanda hídrica de 210 Hm ³ para o setor energético, considerando percentil de 0,95 das 1.000 combinações de séries estocásticas nos cenários de base e futuro, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	177

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Emissões de gases de efeito estufa em cada cenário de RCPs. Áreas em tons de cinza claro indicam o percentil 98% e em tons escuros o percentil 90%. As linhas tracejadas indicam os cenários SRES. Fonte: ilustração adaptada de van Vuuren, et al. (2011).	24
Figura 2.2. Procedimento de correção das precipitações mensais com base nas curvas de probabilidade acumulada.....	35
Figura 2.3. Arquitetura típica de uma RNA para aplicação hidrológica.	60
Figura 3.1. Fluxograma do trabalho.	62
Figura 3.2. Localização da bacia hidrográfica do rio Ijuí, seção a montante do posto fluviométrico Santo Ângelo (5.414 km ²), RS, Brasil.....	63
Figura 3.3. Municípios localizados parcial ou totalmente na área de estudo.....	66
Figura 3.4. Localização dos postos com dados hidrológicos e climáticos utilizados em uma distância de até 100 km em relação aos limites da bacia do rio Ijuí.....	68
Figura 3.5. Hidrograma na bacia do rio Ijuí, seção do posto Santo Ângelo, no período entre 1961 e 2011.	75
Figura 4.1. Hidrogramas: observado e simulado pela RNA inicial (10 entradas), 1961 a 2011, bacia do rio Ijuí, posto Santo Ângelo.....	108
Figura 4.2. Hidrogramas: observado e simulado pela RNA final (3 entradas), 1961 a 2011, bacia do rio Ijuí, posto Santo Ângelo.	109
Figura 4.3. Gráfico de dispersão entre as vazões calculadas e observadas, considerando o período de verificação (1961-1963; 1998-2007) – bacia do rio Ijuí, posto Santo Ângelo.	109
Figura 4.4. Curvas de permanência das vazões no rio Ijuí, posto Santo Ângelo (1961-2011): observada e simuladas com os modelos de RNAs (com 3 e 10 entradas).	110
Figura 4.5. Sensibilidade da vazão no rio Ijuí às variáveis: balanço de água (S), filtro de precipitação (fP) e filtro de balanço de água (fS) - Modelo de RNAs simplificado, com três entradas.....	111
Figura 4.6. Sensibilidade da vazão no rio Ijuí às variáveis do modelo de RNAs inicial (com 10 entradas).	112
Figura 4.7. Gráfico de dispersão entre as vazões calculadas pelo modelo SMAP e pelo modelo de RNAs, e as vazões observadas no posto Santo Ângelo (fev/2002 – set/2009).....	113
Figura 4.8. Erro proporcional médio e precipitação média mensal simulada e observada no período entre 1976 e 1990. Modelo Eta, membros corrigidos CNTRL, LOW, MID e HIGH.....	115
Figura 4.9. Probabilidade de excedência das precipitações mensais simulada e observada no período entre 1976 e 1990. Modelo Eta, membros corrigidos CNTRL, LOW, MID e HIGH.	117
Figura 4.10. Evapotranspiração de referência mensal calculada a partir de dados climáticos observados e o erro proporcional médio referente à evapotranspiração simulada entre 1976 e 1990. Modelo Eta, membros corrigidos CNTRL, LOW, MID e HIGH.....	119

Figura 4.11. Probabilidade de excedência da evapotranspiração mensal calculada a partir de dados climáticos observados e da evapotranspiração mensal simulada a partir do modelo Eta, membros corrigidos CNTRL, LOW, MID e HIGH, entre 1976 e 1990.....	119
Figura 4.12. Erro proporcional médio e vazão média mensal simulada e observada no período entre 1976 e 1990. Modelo Eta, membros corrigidos CNTRL, LOW, MID e HIGH. Modelagem hidrológica com o uso de RNAs.....	121
Figura 4.13. Curvas de permanência das vazões mensais simulada e observada no período entre 1976 e 1990. Modelo Eta, membros corrigidos CNTRL, LOW, MID e HIGH. Os minigráficos também se referem à vazão em função da permanência, sendo um gráfico cruzado: no eixo horizontal, as vazões observadas; e no eixo vertical, as vazões simuladas; a linha preta simboliza o ajuste ideal.	124
Figura 4.14. Séries Mensais de Evapotranspiração de Referência, Precipitação Acumulada e Vazão Média, simuladas para o período entre janeiro de 2011 e dezembro de 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, posto Santo Ângelo.....	129
Figura 4.15. Curvas de volume escoado no futuro (2011-2040) - diferença entre a série original (simulada) e as 1.000 séries estocásticas geradas – bacia do rio Ijuí, posto Santo Ângelo.....	131
Figura 4.16. Curvas de permanência da vazão média mensal entre 2011 e 2040 - diferença entre a série original (simulada) e as 1.000 séries estocásticas geradas – posto Santo Ângelo.	133
Figura 4.17. Média e intervalo de confiança de 90% para o volume escoado, com base nas séries estocásticas geradas, períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040), posto Santo Ângelo.	134
Figura 4.18. Média e intervalo de confiança de 90% para as vazões médias mensais, com base nas séries estocásticas geradas, nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040), no posto Santo Ângelo. ...	135
Figura 4.19. Valor médio das curvas de permanência da vazão mensal, de acordo com as séries estocásticas geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040), posto Santo Ângelo.....	138
Figura 4.20. Intervalo de confiança de 90% para as curvas de permanência da vazão mensal, de acordo com as séries estocásticas geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040) – posto Santo Ângelo.	138
Figura 4.21. Média e Intervalo de confiança de 90% para as curvas de permanência da vazão mensal, no posto Santo Ângelo, de acordo com as séries estocásticas geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040): Janeiro, Fevereiro, Março e Abril.	141
Figura 4.22. Média e Intervalo de confiança de 90% para as curvas de permanência da vazão mensal, no posto Santo Ângelo, de acordo com as séries estocásticas geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040): Maio, Junho, Julho e Agosto.	142
Figura 4.23. Média e Intervalo de confiança de 90% para as curvas de permanência da vazão mensal, no posto Santo Ângelo, de acordo com as séries estocásticas geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040): Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro.	143
Figura 4.24. Relação entre a média da vazão mensal e a amplitude do intervalo de confiança, para os períodos entre 1961 e 1990 (base) e entre 2011 e 2040 (futuro).....	146

Figura 4.25. Variação do valor de $C3(t)$, em função do valor de $C3(t-1)$, na modelagem do componente de dependência temporal com uso de uma RNA, sendo mantidas as demais variáveis, $C3(t-2)$ e $C3(t-3)$, iguais a 1, para os períodos entre 1961 e 1990 (base) e entre 2011 e 2040 (futuro).	147
Figura 4.26. Ajuste da distribuição Gama para a modelagem do componente aleatório em situação de vazão baixa, $C3(t)$ inferior a 1, para os períodos de base e futuro.	148
Figura 4.27. Ajuste da distribuição Gama para a modelagem do componente aleatório em situação de vazão alta, $C3(t)$ superior a 1, para os períodos de base e futuro.	148
Figura 4.28. Estimativa do saldo migratório e do número de nascimentos e óbitos (1984-2010) na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	152
Figura 4.29. Tendência da taxa de natalidade (1984-2040) na bacia do rio Ijuí, RS.	154
Figura 4.30. Tendência da taxa de mortalidade (1984-2040) na bacia do rio Ijuí, RS.	154
Figura 4.31. Tendência da taxa migratória (1984-2040) na bacia do rio Ijuí, RS.	154
Figura 4.32. Componentes aleatórios das taxas de natalidade, de mortalidade e de migrações, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	155
Figura 4.33. Projeção populacional (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	156
Figura 4.34. Projeção da demanda hídrica média anual para abastecimento humano (2011-2040), na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	157
Figura 4.35. Tendência dos rebanhos (2001-2040) na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	158
Figura 4.36. Projeção do rebanho de caprinos (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	160
Figura 4.37. Projeção do rebanho de codornas (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	160
Figura 4.38. Projeção do rebanho de coelhos (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	160
Figura 4.39. Projeção do rebanho de equinos (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	161
Figura 4.40. Projeção do rebanho de galinhas (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	161
Figura 4.41. Projeção do rebanho de ovinos (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	161
Figura 4.42. Projeção do rebanho de suínos (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	162
Figura 4.43. Projeção do rebanho de gado leiteiro (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	162

Figura 4.44. Projeção do rebanho de gado de corte (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.....	162
Figura 4.45. Projeção da demanda hídrica para criação animal (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	163
Figura 4.46. Tendência das áreas irrigadas (2003-2040) na bacia do rio Ijuí, RS.....	165
Figura 4.47. Projeção das áreas irrigadas (2011-2040), com base em modelagem estocástica, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS. Média e intervalo de confiança de 90%.	165
Figura 4.48. Projeção da demanda hídrica mensal para agricultura irrigada, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.....	166
Figura 4.49. Projeção da demanda hídrica em janeiro para agricultura irrigada (média e intervalo de confiança de 90%), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	167
Figura 4.50. Projeção da demanda hídrica mensal para usos consuntivos, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.....	168
Figura 4.51. Projeção da demanda hídrica em janeiro para usos consuntivos (média e intervalo de confiança de 90%), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.	168
Figura 4.52. Relação demanda/disponibilidade média anual, considerando uma média das 1.000 combinações de séries estocásticas, entre 2011 e 2040, na bacia do rio Ijuí, RS.	169
Figura 4.53. Padrão sazonal da relação demanda/disponibilidade, considerando uma média das 1.000 combinações de séries estocásticas, entre 2011 e 2040, na bacia do rio Ijuí, RS.	170
Figura 4.54. Padrão sazonal da relação demanda/disponibilidade, considerando o percentil de 0,95 das 1.000 combinações de séries estocásticas, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.....	172
Figura 4.55. Curvas de regularização, considerando séries estocásticas de vazão do período futuro (2011-2040) e do período de base (1961-1990), para atendimento à demanda relacionada aos usos consuntivos (média e intervalo de confiança de 90%), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS. Percentual de falhas no atendimento à demanda: 0%.	174
Figura 4.56. Curvas de regularização, considerando séries estocásticas de vazão do período futuro (2011-2040) e do período de base (1961-1990), para atendimento à demanda relacionada à geração de energia (média e intervalo de confiança de 90%), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS. Percentual de falhas no atendimento à demanda: 5%.	176
Figura 4.57. Curvas de regularização, considerando séries estocásticas de vazão do período futuro (2011-2040) e do período de base (1961-1990), para atendimento à demanda relacionada à geração de energia (média e intervalo de confiança de 90%), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS. Percentual de falhas no atendimento à demanda: 1%.	176
Figura 4.58. Curvas de regularização, considerando séries estocásticas de vazão do período futuro (2011-2040) e do período de base (1961-1990), para atendimento à demanda relacionada à geração de energia (média e intervalo de confiança de 90%), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS. Percentual de falhas no atendimento à demanda: 0%.	177

1. INTRODUÇÃO

O recurso natural fundamental para a existência de vida na Terra é a água, e o desenvolvimento da sociedade humana depende da disponibilidade hídrica. A variação da disponibilidade de água em uma região está diretamente relacionada às características físicas da superfície terrestre (hidrológicas, geomorfológicas, pedológicas, geológicas), às características climáticas, e suas alterações ao longo do tempo e do espaço, e ao consumo para diversas finalidades (humano, industrial, irrigação, criação animal etc.).

As discussões referentes à variabilidade e às mudanças climáticas se intensificaram nas últimas décadas. Muitas pesquisas comprovaram significativas alterações na composição da atmosfera e, conseqüentemente, nas variáveis relacionadas ao clima. Nesta temática, deve-se destacar o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), estabelecido em 1988, pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), que tem como objetivo fornecer informações científicas para melhorar o entendimento sobre as mudanças no clima global, de modo a avaliar seus impactos na sociedade e na natureza, e propor alternativas de adaptação e mitigação.

De acordo com o IPCC (2013), já é evidente o aquecimento da Terra, comprovado pelo aumento das temperaturas médias do ar e dos oceanos, pelo aumento do nível médio dos mares e pela aceleração do degelo em regiões de clima montanhoso ou polar. Através de estudos desenvolvidos em escala global, constatou-se que diversos sistemas naturais estão sendo impactados pelas mudanças do clima.

Em virtude das mudanças de temperatura e de precipitação, deverá aumentar a frequência de eventos extremos meteorológicos, como severas enchentes e secas mais prolongadas, o que inevitavelmente afetará a disponibilidade hídrica para consumo humano, irrigação, indústrias, entre outros usos (IPCC, 2001; 2007; 2013). Algumas pesquisas sobre a sensibilidade de culturas agrícolas às alterações no clima mostraram que poderá ocorrer um sensível efeito negativo sobre o crescimento de culturas, aumentando o risco de perdas de safras no mundo (SEMENOV E PORTER, 1995; MEARNNS *et al.*, 1996; RICHTER E SEMENOV, 2005; ZHANG E LIU, 2005; MACHADO, 2009; CRUZ *et al.*, 2009; CAMPOS, 2011).

É justamente em virtude dessas previsões para o futuro, que se torna cada vez mais importante analisar a relação entre a disponibilidade e a demanda de água para as próximas gerações (MU E KHAN, 2007). Para tal, é necessário conhecer a dinâmica climática e

hidrológica (disponibilidade hídrica), e a dinâmica populacional e econômica (demanda hídrica), visando tornar mais eficiente a gestão do uso da água (MELLO *et al.*, 2008). Quanto antes for investigado o efeito das mudanças climáticas nos recursos hídricos, maiores serão as chances de reduzir os impactos na sociedade e na natureza (CAMPOS, 2011).

No entanto, a estimativa da disponibilidade e da demanda hídrica no futuro constitui-se em um problema de alta complexidade, em virtude da expressiva aleatoriedade e variabilidade espacial e temporal dos fenômenos climáticos, hidrológicos, populacionais e econômicos. Diversos estudos analisam a disponibilidade e/ou a demanda de água no futuro, em escala global/continental (VÖRÖSMARTY *et al.*, 2000; NIJSSEN *et al.*, 2001; ALCAMO *et al.*, 2003; ARNELL, 2004; BARNETT *et al.*, 2005; DÖLL E FLÖRKE, 2005; NOHARA *et al.*, 2006) e em escala regional/local (BERGSTRÖM *et al.*, 2001; MENZEL E BÜRGER, 2002; GRAHAM, 2004; KLEINN *et al.*, 2005; BOOIJ, 2005; LENDERINK *et al.*, 2007). No Brasil, ainda são poucos os estudos sobre os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica e sobre a demanda de água no futuro, como, por exemplo, Pereira *et al.* (2004), Helfer (2006), Horikoshi e Fisch (2007), Gondim *et al.* (2008), Mello *et al.* (2008), Garcias e Sanches (2009) e Silva Neto (2011).

De modo geral, esses estudos analisam a disponibilidade e/ou a demanda hídrica no futuro através de metodologias que abrangem parcialmente as principais variáveis envolvidas no sistema. Não consideram, em conjunto, as mudanças climáticas, que afetam as condições hidrológicas e a disponibilidade de água, e as transformações populacionais e econômicas, que afetam a demanda por água.

Ao ignorar as mudanças climáticas na investigação da disponibilidade hídrica no futuro, as projeções estão baseadas em informações hidrológicas (chuva, evaporação e vazão) observadas na série histórica. Tal simplificação pode não ser apropriada, uma vez que o clima não pode ser considerado como uma variável constante, em virtude das conhecidas alterações climáticas observadas na Terra nos últimos séculos, de acordo com o IPCC (2001). A visão de que as vazões no futuro ocorrerão dentro de uma distribuição de probabilidades observada no passado, sem considerar as possíveis mudanças climáticas e hidrológicas, é bastante limitada. Além disso, não é adequado considerar que as demandas por água no futuro apresentarão crescimento semelhante ao observado nas últimas décadas, uma vez que as transformações socioeconômicas devem modificar o uso dos recursos hídricos e as demandas não necessariamente apresentam crescimento na mesma proporção do populacional.

As incertezas relacionadas à modelagem climática e à disponibilidade hídrica no futuro, em virtude da aleatoriedade dos processos hidrometeorológicos, favorecem a

utilização de métodos probabilísticos, baseados em séries temporais estocásticas, como nos estudos de Wilks (1992), Semenov e Barrow (1997) e Booij (2005). A abordagem estocástica amplia a possibilidade de análise da disponibilidade hídrica e das incertezas climáticas no futuro, oferecendo um grande número de cenários para análise, sendo possível identificar os intervalos de confiança na projeção e estimar o componente aleatório da dinâmica climática e/ou hidrológica.

Através de modelos probabilísticos é possível simular, tanto as variáveis relevantes à estimativa de disponibilidade de água no futuro, quanto aquelas associadas à demanda hídrica. Nessa abordagem, entende-se que as séries de chuva e de vazão do passado ocorreram através de processos estocásticos, isto é, foram sorteadas aleatoriamente, e seguem um conjunto de distribuições de probabilidades. Logo, pode-se modelar estocasticamente essas variáveis para gerar inúmeras possíveis séries, com a mesma probabilidade de ocorrência. A maior dificuldade ao tratar sobre o futuro consiste em como serão aplicadas as transformações previstas nas séries observadas.

No entanto, ao gerar centenas ou milhares de séries climáticas estocásticas, é necessário repetir muitas vezes o procedimento de simulação hidrológica, tornando o processo de modelagem extremamente oneroso do ponto de vista computacional. Além disto, nesta abordagem, os cenários hidrológicos produzidos ficam ainda mais sensíveis a qualquer imprecisão na estimativa dos parâmetros do modelo de transformação da chuva em vazão.

Uma alternativa para minimizar o tempo de processamento da modelagem estocástica consiste em contemplar a aleatoriedade dos processos e das dinâmicas climáticas diretamente nas séries de vazões, com uso de um modelo estocástico apropriado para vazões mensais. Assim, a partir de apenas um cenário climático, gera-se uma série de vazões através da simulação hidrológica, para em seguida realizar-se a modelagem estocástica.

1.1. HIPÓTESE

Este trabalho investiga a hipótese de que é possível identificar, através de uma abordagem estocástica, as mudanças na disponibilidade e na demanda hídrica em virtude de mudanças climáticas e transformações socioeconômicas, nas primeiras décadas do Século XXI, entre 2011 e 2040, considerando alterações tanto na distribuição de estiagens ou de períodos chuvosos, quanto nas falhas de atendimento às demandas hídricas.

1.2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para investigar os possíveis efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica e as alterações da demanda hídrica no futuro, através de uma abordagem estocástica, que considera projeções climáticas, hidrológicas, populacionais e agropecuárias.

1.3. RECORTE ESPACIAL

A metodologia será aplicada à bacia hidrográfica do rio Ijuí, na seção relativa ao posto fluviométrico Santo Ângelo, localizada no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Esta região do país é altamente dependente das atividades agrícolas, podendo apresentar sérios impactos econômicos e sociais em virtude das alterações climáticas. Além disso, de acordo com a Coordenadoria Estadual da Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul (CEDEC-RS, 2012), no período entre 1982 e 2011, ocorreram pelo menos seis fortes estiagens na região da bacia, que acarretaram grandes prejuízos para as atividades agropecuárias, principalmente às relacionadas à soja e ao milho.

1.4. MÓDULOS E ETAPAS DO TRABALHO

Para fins de estruturação e organização do presente trabalho, todas as atividades foram agrupadas em cinco módulos principais, compostos por diferentes etapas. Os dois primeiros módulos estão associados à modelagem dos dados hidrológicos e climáticos, com objetivos específicos de definir o modelo hidrológico e os dados climáticos que deverão ser utilizados para a análise de disponibilidade hídrica no futuro. O terceiro e o quarto módulo estão associados à modelagem estocástica para obtenção de séries de disponibilidade e de demanda hídrica, respectivamente. O último módulo se refere à análise da relação entre a disponibilidade e a demanda hídrica no futuro, entre 2011 e 2040.

O Módulo 1, referente à modelagem e à simulação hidrológica mensal, é composto pelas seguintes etapas: i) processamento e análise dos dados hidrológicos e meteorológicos; ii) estimativa da evapotranspiração de referência; iii) obtenção de séries mensais de vazão, precipitação e evapotranspiração; iv) modelagem hidrológica baseada em RNAs; v) avaliação do modelo calibrado e comparação com um modelo hidrológico do tipo conceitual.

O Módulo 2 se refere ao estudo das incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo climático regional Eta CPTEC/HadCM3, objetivando a seleção do cenário climático que melhor representa o clima do período base (1961-1990). Este módulo é composto pelas seguintes etapas: i) interpolação espacial das variáveis meteorológicas; ii) correção das séries simuladas (*Bias Correction*); iii) estimativa da evapotranspiração de referência; iv) simulação hidrológica da vazão mensal, considerando o modelo obtido no Módulo 1; v) avaliação comparativa entre as condições simuladas e as observadas de precipitação, evapotranspiração e vazão.

O Módulo 3 consiste na modelagem estocástica para análise das incertezas e possíveis alterações na disponibilidade hídrica no futuro com base em um cenário de mudança climática, selecionado a partir dos resultados obtidos no Módulo 2. Este módulo é composto pelas seguintes etapas: i) interpolação espacial das variáveis meteorológicas no futuro (2011-2040); ii) correção da série projetada para o futuro (*Bias Correction*); iii) estimativa da evapotranspiração de referência; iv) simulação hidrológica da vazão mensal, considerando o modelo obtido no Módulo 1, para o período entre 2011 e 2040; v) modelagem estocástica para geração de séries sintéticas de vazão mensal no futuro.

O Módulo 4 se refere à modelagem estocástica para análise da demanda hídrica no futuro. Este módulo é composto pelas seguintes etapas: i) coleta, análise e processamento de

dados censitários e agropecuários; ii) modelagem estocástica populacional; iii) modelagem estocástica de rebanhos; iv) modelagem estocástica de áreas irrigadas; v) geração de séries sintéticas de demanda hídrica para usos consuntivos no futuro.

Por fim, o Módulo 5 compreende a análise da relação entre a disponibilidade e a demanda hídrica no futuro, considerando as mudanças climáticas projetadas por um modelo climático e as alterações populacionais e agropecuárias. Este módulo é composto por uma análise quantitativa que considera a simulação do balanço hídrico em um reservatório fictício para geração de curvas de regularização, considerando as séries geradas de vazão, demanda hídrica e de evapotranspiração de referência.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão revisados os métodos, as técnicas e os conceitos que estão relacionados com a análise da disponibilidade e da demanda hídrica no futuro. Tendo em vista os módulos e as etapas propostas no trabalho e, com o intuito de organizar a revisão teórica, este capítulo será estruturado conforme os seguintes assuntos:

- i) mudanças climáticas, modelos e cenários futuros;
- ii) análise da disponibilidade e da demanda hídrica no futuro;
- iii) modelos estocásticos e a geração de séries sintéticas climatológicas e hidrológicas;
- iv) modelagem da demanda hídrica;
- v) estimativa da evapotranspiração de referência;
- vi) modelagem hidrológica.

2.1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS, MODELOS E CENÁRIOS FUTUROS

As discussões referentes à variabilidade e às mudanças climáticas se intensificaram nas últimas décadas, através de inúmeras pesquisas que comprovaram significativas alterações na composição da atmosfera e, conseqüentemente, nas variáveis relacionadas ao clima. De acordo com o IPCC (2007; 2013), já é evidente o aquecimento do sistema climático global, comprovado pelo aumento das temperaturas médias do ar e dos oceanos, pelo aumento do nível médio dos mares e pela aceleração do degelo em regiões de clima montanhoso ou polar. Através de estudos desenvolvidos em escala global, constatou-se que diversos sistemas naturais estão sendo impactados pelas mudanças do clima.

Existem evidências consistentes de que o aumento na concentração de gases de efeito estufa tenha sido acelerado pelas atividades humanas, o que estaria provocando alterações climáticas mais profundas do que as observadas naturalmente. As concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), de metano (CH₄) e de óxido nitroso (N₂O) aumentaram principalmente após 1750, início do processo de industrialização, e são atualmente bem superiores aos valores pré-industriais (IPCC, 2007; 2013). De acordo com o IPCC, em 2013, as concentrações de CO₂ e de CH₄ na atmosfera superaram a marca de 400 e 1,77 ppm,

respectivamente. Esses valores são bem superiores aos observados nos últimos milênios, de acordo com pesquisas em testemunhos de gelo do continente Antártico.

As projeções climáticas para o futuro até o 4º Relatório de Avaliação (AR4) das Mudanças Climáticas (IPCC, 2007), de modo geral, consideravam ao menos duas das quatro grandes famílias de cenários de emissões, descritas no Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (SRES) pelo IPCC (2000). De modo geral, as famílias de cenários podem ser agrupadas e descritas da seguinte forma:

Cenário A1: descreve um mundo futuro de rápido crescimento econômico, com o pico da população global sendo atingido em meados do Século XXI e com uma rápida introdução de novas tecnologias, mais eficientes. Existe a convergência entre as regiões e o aumento das interações culturais e sociais, com redução significativa das desigualdades regionais na renda;

Cenário A2: descreve um mundo muito heterogêneo, onde predomina a autossuficiência e a preservação das identidades e culturas locais. Considera um aumento crescente da população e que o desenvolvimento econômico deverá ser orientado inicialmente para a região, o que o torna mais lento do que nos outros cenários;

Cenário B1: descreve um mundo com a mesma população global, atingindo o pico em meados do Séc. XXI, porém com uma rápida transição nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e informações, com a introdução de tecnologias limpas e eficientes em relação ao uso dos recursos naturais. A ênfase está nas soluções em nível global, visando a sustentabilidade econômica, social e ambiental;

Cenário B2: descreve um mundo em que a ênfase está nas soluções em nível local, visando a sustentabilidade econômica, social e ambiental. A população aumenta continuamente, de modo inferior ao cenário A2, com níveis intermediários de desenvolvimento econômico e mudança tecnológica mais lenta e mais diversa do que nos cenários B1 e A1.

No recente relatório (AR5) das Mudanças Climáticas (IPCC, 2013) foram criadas quatro projeções diferentes para ilustrar as consequências climáticas até o final do Século XXI. Tais cenários foram chamados de RCPs (*Representative Concentration Pathways*) e indicam a forçante radiativa de interesse em 2100, refletindo a capacidade de dissipar calor, estando eles relacionados a uma concentração equivalente de CO₂ na atmosfera. Os cenários são os seguintes:

Cenário RCP 2.6 W/m²: este é o cenário mais otimista, que prevê um pico na concentração de CO₂ de aproximadamente 490 ppm e um declínio deste valor até o final do Século XXI.

Cenário RCP 4.5 W/m²: neste cenário o aumento das concentrações de CO₂ atingiria um pico de aproximadamente 650 ppm, com estabilização e consequente redução das emissões na segunda metade do Século XXI.

Cenário RCP 6 W/m²: neste cenário o aumento das concentrações de CO₂ atingiria um pico de aproximadamente 850 ppm, com estabilização e consequente redução das emissões apenas nas últimas décadas do Século XXI.

Cenário RCP 8,5 W/m²: este é o cenário mais pessimista, que prevê o aumento das emissões de gases de efeito estufa até o final do Século XXI (Figura 2.1), atingindo uma concentração de CO₂ equivalente a 1.370 ppm.

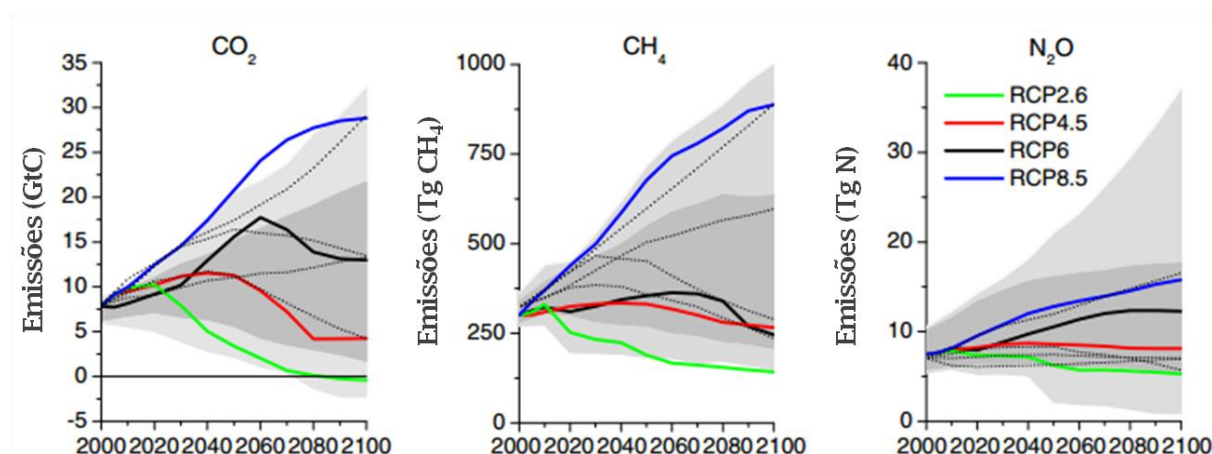


Figura 2.1. Emissões de gases de efeito estufa em cada cenário de RCPs. Áreas em tons de cinza claro indicam o percentil 98% e em tons escuros o percentil 90%. As linhas tracejadas indicam os cenários SRES. Fonte: ilustração adaptada de van Vuuren, et al. (2011).

As projeções de cenários climáticos são realizadas, comumente, através de Modelos Climáticos Globais (GCMs). Tratam-se de modelos numéricos capazes de descrever os principais processos físicos e dinâmicos da atmosfera, do oceano e da superfície terrestre, bem como as interações entre esses componentes e os mecanismos de retroalimentação (*feedbacks*), simulando a resposta do clima global às concentrações de gases de efeito estufa e de aerossóis (GIORGI E MEARN, 1991; MARENGO E VALVERDE, 2007; CAMPOS, 2011; MARENGO *et al.*, 2012).

No 5º Relatório de Avaliação (AR5) das Mudanças Climáticas (IPCC, 2013), por exemplo, foram considerados até 24 GCMs no cenário RCP 4.5, elaborados em diferentes

instituições de vários países, como o BCC-CSM1-1 e FGOALS-g2 (China), CCSM4 e GFDL-CM3 (EUA), CSIRO-MK3-6-0 (Austrália), INMCM4 (Rússia), IPSL-CM5A-LR (França) e o MIROC-ESM (Japão), entre outros. Estes modelos possuem diferentes resoluções e divergem quanto à dinâmica dos oceanos e da circulação atmosférica, não sendo possível identificar qual deles oferece o resultado mais confiável.

Vera *et al.* (2006) utilizaram seis modelos globais, dentre os considerados pelo IPCC, para projetar o clima no futuro na América do Sul (Cenário A1). Como principais resultados, observaram que as variações na intensidade e na posição da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) afetam a quantidade de chuvas sobre as grandes bacias da Amazônia e do Prata, que haverá um aumento nas chuvas de verão no norte da Cordilheira dos Andes e no sul do Chile e da Argentina, e que a chuva anual diminuirá na região mais elevada dos Andes chilenos e argentinos.

Nobre *et al.* (2008) investigaram as possíveis alterações nos biomas da América do Sul em virtude das mudanças climáticas. Neste estudo foram utilizados 16 GCMs (IPCC - AR4) e um modelo de vegetação potencial (CPTEC-INPE) para a construção de projeções de precipitação e de temperatura entre 2070 e 2099, conforme dois cenários de emissões de gases. De acordo com os resultados do trabalho, existe uma elevada probabilidade de mudanças nos biomas, principalmente no leste da floresta amazônica e na região nordeste do Brasil, respectivamente, com substituição da floresta por vegetação de cerrado e com substituição da vegetação de caatinga por vegetação de regiões mais áridas.

Valverde e Marengo (2010) utilizaram cinco GCMs (IPCC – AR4), no cenário A2, para analisar mudanças nos padrões de circulação no clima da América do Sul, em consequência do aumento nas concentrações de gases, entre 2011 e 2100. Os autores realizaram uma avaliação dos modelos, com base na série histórica (1961-1990), constatando que o HadCM3 (do Reino Unido) apresentou os resultados mais consistentes para a região.

De modo geral, as previsões para o Brasil indicam um aumento de temperatura entre 1°C e 6°C, variando de acordo com os modelos climáticos e os cenários de emissões de gases de efeito estufa adotados, bem como o local de previsão. Esse aumento provocaria a intensificação da evaporação, o que alteraria o balanço hídrico da vegetação natural e das culturas agrícolas (NOBRE, 2001). Diferentes estudos (RICHTER E SEMENOV, 2005; ZHANG E LIU, 2005; MACHADO, 2009; CRUZ *et al.*, 2009; CAMPOS, 2011) têm mostrado que as alterações climáticas previstas para o futuro poderão ocasionar sérios impactos em atividades agrícolas.

Além do aumento na temperatura, estão previstas mudanças no regime de precipitação em todo o Brasil, o que inevitavelmente provocaria alterações no ciclo hidrológico das principais bacias brasileiras (HULME E SHEARD, 1999; MELLO *et al.*, 2008). De acordo com Marengo (2007), foram observadas tendências de aumento das chuvas e, conseqüentemente, das vazões dos rios, desde meados do século XX, no sul do Brasil. No estudo de Rosenzweig *et al.* (2004), estimou-se que a disponibilidade hídrica, nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, deverá ser suficiente para atender às demandas da agricultura e, ainda, promover a expansão de áreas irrigadas na região.

Na região sul do Brasil, tanto os cenários produzidos pelo IPCC (IPCC, 2007), quanto os cenários produzidos por Marengo *et al.* (2009a), indicam que haverá aumento das temperaturas médias e das chuvas em todas as estações, até o final do século XXI. Além disso, os autores observaram que poderá haver um aumento na frequência dos dias com chuvas. Entretanto, cabe ressaltar que as previsões de precipitação para o futuro ainda apresentam grandes incertezas, em virtude das divergências observadas entre os resultados obtidos pela aplicação de diferentes modelos climáticos (NOBRE *et al.*, 2007). Ainda assim, tais previsões permitem estudar os possíveis impactos das mudanças no clima em diferentes aspectos da sociedade e da natureza, permitindo assim ao homem antecipar soluções e adotar medidas preventivas.

Para estudos regionais, não é recomendada a utilização isolada dos GCMs, em virtude da capacidade de resolução bastante limitada, geralmente superior a 150 km ou 1,5° (em coordenadas geográficas). A limitação da resolução espacial pode ser contornada pelo *downscaling*, seja pela aplicação de modelos dinâmicos regionais ou por técnicas empíricas, que consistem na transferência das informações meteorológicas em baixa resolução espacial para escalas de maior detalhamento (ZORITA E VON STORCH, 1999; QIAN *et al.*, 2003; MELLO *et al.*, 2008).

Os Modelos Climáticos Regionais (RCMs) possuem resolução entre 10 e 50 km, o que permite a aplicação em cenários de mudanças climáticas em bacias médias e pequenas. A utilização destes modelos, em conjunto com os GCMs, possibilita o detalhamento dos processos climáticos a nível local, detectando as variações e particularidades de uma determinada região, o que melhora a compreensão de impactos em pequenas bacias (MARENGO *et al.*, 2009b; 2012).

Recentemente, a partir de projetos de pesquisa e de desenvolvimento como o CREAS (*Regional Climate Change Scenarios for South America*), foram desenvolvidos vários experimentos com a utilização de RCMs como condições de contorno de diversos GCMs para

estudar as mudanças climáticas na América do Sul, em diferentes cenários de emissões de gases e em diferentes intervalos de tempo, até o final do século XXI (CHOU *et al.*, 2012). No projeto CREAS foram utilizados três RCMs (RegCM3, HadRM3 e Eta-CCS), considerando os cenários de emissão de gases A2 e B2 do IPCC SRES, disponível em IPCC (2000), fornecidos pelo GCM HadAM3P. A resolução horizontal foi de 50 km, tanto para o período de controle (1961-1990), quanto para o período futuro (2070-2100). Pesquisas que utilizaram RCMs para o estudo das mudanças climáticas na América do Sul podem ser observadas em Solman *et al.* (2008), Nuñez *et al.* (2008), Garreaud e Falvey (2008), Soares e Marengo (2008), da Rocha *et al.* (2009), Marengo *et al.* (2009a) e Menéndez *et al.* (2010).

Recentemente, uma nova versão do modelo Eta, o Eta CPTEC, foi desenvolvida de forma independente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) no Brasil. De acordo com Chou *et al.* (2012), o modelo Eta foi desenvolvido inicialmente pela Universidade de Belgrado em parceria com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia. Este modelo se tornou operacional no *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), tendo sido instalado no CPTEC do INPE em 1996.

O modelo Eta CPTEC, adaptado para realizar integrações de escala de décadas para estudos de mudanças climáticas, inclui o aumento dos níveis de concentração de CO₂ conforme o cenário de emissão e a variação diária do estado da vegetação durante o ano. Este modelo reproduz o cenário A1B do IPCC SRES, fornecido pelo modelo global acoplado oceano-atmosfera HadCM3 do Hadley Centre, em 4 membros (versões) de perturbação do modelo global (sem perturbação - CNTRL; baixa sensibilidade - LOW; média sensibilidade - MID; alta sensibilidade - HIGH), que representam as incertezas das condições de contorno. O modelo regional foi integrado na resolução horizontal de 40 km, para o período entre 1961 e 1990 e os cenários futuros foram gerados em três períodos de 30 anos (de 2011 a 2040, de 2041 a 2070, de 2071 a 2100) (CHOU *et al.*, 2012).

Pesquero (2009), Chou *et al.* (2012) e Marengo *et al.* (2012) utilizaram o Modelo Eta. Nos dois primeiros estudos, o modelo foi utilizado para reproduzir o clima presente sobre a América do Sul e atestar a qualidade do modelo. Foi observada uma suave tendência de subestimativa na precipitação sobre a Amazônia na estação chuvosa e na região central do Brasil, no Cerrado Brasileiro. Na terceira pesquisa, o modelo Eta CPTEC foi usado para estudar as mudanças climáticas nas bacias dos rios Amazonas, São Francisco e Paraná, entre 2011 e 2100.

2.2. ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE E DA DEMANDA HÍDRICA NO FUTURO

Existem, atualmente, na literatura científica, diversos estudos que analisam os efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade de água (KLEINN *et al.*, 2005). Em escala continental ou global, normalmente, as saídas dos GCMs são utilizadas em combinação com modelos hidrológicos empíricos de macroescala, que realizam o balanço hídrico (ARNELL, 1999; NIJSSEN *et al.*, 2001; ARNELL, 2004; DÖLL E FLÖRKE, 2005; MILLY *et al.*, 2005; NOHARA *et al.*, 2006). Os estudos sobre a disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas de menores dimensões normalmente utilizam as projeções climáticas dos RCMs, associadas a modelos hidrológicos empíricos ou de base física, em uma abordagem determinística, oferecendo apenas um resultado no âmbito hidrológico para cada cenário climático. São exemplos os estudos de Middelkoop *et al.* (2001), Menzel e Bürger (2002), Kleinn *et al.* (2005), Horikoshi e Fisch (2007), Mello *et al.* (2008), Gondim *et al.* (2008).

Alcamo *et al.* (2003), por exemplo, utilizaram o modelo WaterGAP-2 para a estimativa global de disponibilidade e demanda hídrica. O modelo conta com dois módulos. No primeiro, Módulo de Hidrologia, é simulado o comportamento do ciclo hidrológico em macroescala para estimar a disponibilidade hídrica. Quanto ao segundo, Módulo de Uso da Água, são simuladas as demandas domésticas, industriais e de irrigação. No estudo, são utilizados como dados climáticos de entrada, a série histórica de 1961-1990. Nas projeções, não foram considerados os efeitos das mudanças climáticas, mas somente as transformações na dinâmica populacional, econômica e tecnológica. De acordo com os autores da pesquisa, a situação atual já é de “estresse hídrico”, pois aproximadamente 24% da superfície mundial apresenta uma relação demanda/disponibilidade superior a 0,4. De acordo com o estudo, os impactos deverão ser mais fortes nos países em desenvolvimento. O estudo ressalta outro aspecto interessante: em boa parte dos países, a expectativa é de que a demanda por água se estabilize ou até diminua, tendo em vista a diminuição do ritmo de crescimento populacional e o aumento constante da eficiência do uso da água, com a tendência de redução de desperdícios.

Nos estudos de Pereira *et al.* (2004), Helfer (2006) e, Garcias e Sanches (2009), as alterações no regime hidrológico em virtude das mudanças climáticas também foram desconsideradas na análise sobre os possíveis déficits hídricos que poderão ocorrer no futuro. Os cenários futuros consideram somente as alterações (projeções) na demanda hídrica. O primeiro estudo avalia a relação disponibilidade/demanda na bacia do rio Piracicaba, SP,

Brasil, a partir de séries históricas de vazão, do consumo de água atual e de estimativas de consumo para o futuro. No segundo estudo, Helfer (2006), o objetivo foi analisar a situação hídrica da bacia do rio Pardo, RS, Brasil, sob a perspectiva da orizicultura irrigada, a partir de dois cenários com projeções de demanda para o futuro por parte do cultivo. Os déficits hídricos foram quantificados e os cenários menos impactantes aos usuários foram identificados. No último dos três estudos, Garcias e Sanches (2009) analisaram, de forma criteriosa, as vulnerabilidades socioambientais e os possíveis déficits hídricos em virtude do crescimento urbano da Região Metropolitana de Curitiba, PR, Brasil.

De maneira um pouco diferente, Silva Neto (2011) propôs alguns cenários de abastecimento de água no futuro em Palmas, TO, Brasil. O objetivo foi desenvolver uma metodologia para a avaliação da disponibilidade/demanda hídrica, com cenários adaptados ao clima do cerrado. A estimativa da oferta hídrica levou em consideração os métodos de proporção de área, de regressão e de modelagem chuva-vazão (IPH-II), adotando como referência a Q_{90} e a $Q_{7,10}$. Já a estimativa de demanda consistiu na identificação dos usos consuntivos, na análise da taxa de crescimento populacional, de criação animal e seus consumos. O estudo não considerou as projeções de mudanças climáticas, porém projetou um cenário com retiradas hipotéticas de 25% da vazão outorgada, que poderiam representar a ocorrência de eventos extremos de estiagens.

Os estudos de Arnell (2004), Nohara *et al.* (2006), Döll e Flörke (2005), Barnett *et al.* (2005) e Milly *et al.* (2005) utilizam uma metodologia simplificada para aplicações em escala continental e global. Em todos os cinco estudos, o objetivo foi avaliar o efeito das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica. Nesses casos, a discretização temporal foi mensal ou anual, e os modelos que foram utilizados para simulação de vazão baseavam-se em métodos empíricos para realizar o balanço hídrico em grandes bacias hidrográficas do planeta.

Arnell (2004) descreve os efeitos das mudanças climáticas e do crescimento populacional no futuro sobre a escassez de água, em escala continental/global. As projeções consideraram quatro cenários SRES (A1, A2, B1 e B2) e seis modelos climáticos globais. A simulação da vazão foi realizada em macroescala, com um modelo de balanço hídrico em células com resolução espacial de $0,5^\circ$, isto é, de aproximadamente 55 km na linha do Equador. De acordo com o estudo anterior, de Arnell (2003), o modelo simula razoavelmente bem o escoamento médio anual.

O estudo de Nohara *et al.* (2006) investiga as projeções de vazão de 24 grandes rios do mundo, no século XXI, através da utilização de 19 GCMs. Para reduzir as incertezas associadas aos modelos climáticos, foi utilizada uma média ponderada das condições

climáticas do futuro para cada mês. Trata-se de um estudo em escala global, com a utilização de um modelo hidrológico mensal, empírico, que não considera a aleatoriedade dos fenômenos climáticos. O estudo conclui que, no final do século XXI, a precipitação média anual, a evaporação e o escoamento superficial vão aumentar nas altas latitudes do Hemisfério Norte, no sul e no leste do continente asiático e na África Central.

Barnett *et al.* (2005) estudaram a disponibilidade hídrica em regiões frias, cujo abastecimento de água depende do derretimento da neve ou gelo, a partir de modelos climáticos globais. Também se trata de um estudo em escala global, e não utiliza modelos hidrológicos. Os resultados da pesquisa indicam, para o futuro, que boa parte da população das regiões que dependem de geleiras podem ser afetadas pela redução ou escassez de disponibilidade hídrica.

Os estudos sobre a disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas de menores dimensões normalmente utilizam as projeções climáticas dos RCMs, associadas a modelos hidrológicos mais complexos, geralmente, de base física. São exceções os estudos que utilizam os cenários oriundos de modelos climáticos menos detalhados (GCMs), combinados com modelos hidrológicos simplificados.

Middelkoop *et al.* (2001), por exemplo, estudaram os impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico e no gerenciamento dos recursos hídricos na bacia do rio Reno, na Europa Ocidental. Foram utilizados dois modelos climáticos globais para simular as condições de precipitação e evapotranspiração no futuro, e uma combinação de modelos hidrológicos, em diferentes escalas espaciais e temporais, para calcular o balanço hídrico mensal na bacia do rio Reno. Já, no estudo de Kleinn *et al.* (2005), foram realizadas simulações hidrológicas na mesma bacia, porém, a partir de um modelo climático regional. Foi utilizado um modelo hidrológico distribuído, com espaçamento da grade de 1 km.

Menzel e Bürger (2002) analisaram a resposta no escoamento da bacia do rio Mulde, na Alemanha, frente aos cenários de mudanças climáticas. No estudo, foi utilizado o modelo hidrológico conceitual semi-distribuído, HBV-D, que foi calibrado de acordo com as condições climáticas e hidrológicas observadas. A saída de um modelo climático regionalizado foi utilizada diretamente como entrada do modelo hidrológico para simulação das condições no futuro. Os resultados indicaram que haverá um aumento nas temperaturas acompanhado por uma tendência de redução nas precipitações, reduzindo as vazões médias na bacia do rio Mulde.

Horikoshi e Fisch (2007), Mello *et al.* (2008) e Gondim *et al.* (2008) são exemplos de estudos que abordam os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica no Brasil, em projeções para o século XXI. Com o objetivo de analisar a distribuição hídrica no futuro no município de Taubaté, SP, Brasil, Horikoshi e Fisch (2007) realizaram o balanço hídrico a partir de dados de precipitação e de temperatura do ar. O método utilizado para a transformação temperatura-evaporação foi o de Thornthwaite e Mather (1955). A simulação de temperatura e precipitação no futuro (2010-2099) foi obtida pelo modelo global HadCM3 (cenários A2 e B2).

Mello *et al.* (2008) abordaram os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica no futuro, sem considerar alterações na demanda futura por água, na bacia do rio Paracatu, Brasil. O trabalho considerou dois cenários de emissões de gases: altas emissões (A2) e baixas emissões (B2). As precipitações mensais simuladas pelo GCM HadCM3, do Hadley Center, no período de 2001 a 2099, foram compatibilizadas para a escala da bacia (área: 45.600 km²) por um processo de *downscaling*. Foi utilizado um modelo chuva-vazão empírico e simplificado, sem evapotranspiração, com intervalo de tempo mensal. Foram estimadas as vazões mínimas em 21 postos fluviométricos. Apenas no cenário A2 foi verificada a tendência de aumento na disponibilidade hídrica, entre 31% e 131% até 2099.

Gondim *et al.* (2008) tiveram como objetivo avaliar os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade de água para irrigação de culturas perenes, na bacia do Jaguaribe (área: 6.415 km²), Ceará, Brasil. No estudo, foi utilizado o sistema PRECIS e os cenários adotados foram o A2 e o B2. A evapotranspiração foi estimada pela temperatura média mensal. A disponibilidade hídrica foi avaliada pela diferença entre a precipitação e a evapotranspiração. Os autores concluíram que haverá aumento no déficit hídrico, com redução da precipitação pluvial e aumento da evapotranspiração.

2.2.1. CORREÇÃO DAS VARIÁVEIS PROJETADAS POR MODELOS CLIMÁTICOS

Recentemente, foram desenvolvidas e comparadas diversas técnicas de correção das variáveis climáticas resultantes dos GCMs e RCMs (THEMEβ1 *et al.*, 2012). O uso de perturbações (*Delta Change Approach*) nas variáveis climáticas e na precipitação é uma estratégia comumente utilizada para simular os impactos das mudanças climáticas, obtidos via

modelos climáticos globais ou regionais, sobre os recursos hídricos (GRAHAM, 2000; BERGSTRÖM *et al.*, 2001; GRAHAM, 2004; LENDERINK *et al.*, 2007). A técnica consiste em utilizar apenas a mudança sazonal prevista, entre o cenário atual e o futuro, obtidos pelo modelo climático. Essa mudança é representada pela diferença entre as condições climáticas atuais e as previstas para o futuro, ambas as condições obtidas pelo modelo climático. A mudança prevista é incorporada à série histórica de precipitações e de temperaturas para gerar as séries no futuro (Equação 2.1). Assim, elimina-se o erro associado à modelagem climática das condições atuais, limitando-se às incertezas associadas à previsão de mudanças climáticas para o futuro. São exemplos da aplicação desta metodologia os estudos de Kaczmarek *et al.* (1996), Arnell (1998), Lettenmaier *et al.* (1999), Graham (2000), Bergström *et al.* (2001).

$$Pcor(f)_{k/j} = Pobs(b)_{k/j} * \left[\overline{Psim(f)_k} / \overline{Psim(b)_k} \right] \quad (2.1)$$

Onde: $Pcor(f)_{k/j}$ é a precipitação corrigida no período futuro (f), no mês k e no ano j ; $Pobs(b)_{k/j}$ é a precipitação observada no período base (b), no mês k e no ano j ; $\overline{Psim(f)_k}$ é a média da precipitação simulada no período futuro para o mês k ; $\overline{Psim(b)_k}$ é a média da precipitação simulada no período base para o mês k .

Graham (2000) e Bergström *et al.* (2001) apresentaram uma forma bastante semelhante de abordagem do problema de estimativa de disponibilidade hídrica e de correção das variáveis climáticas no futuro. O primeiro descreve um modelo hidrológico aplicado às mudanças do clima para as principais bacias hidrográficas do Báltico. Já Bergström *et al.* (2001) estudaram os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos na Suécia. Em ambos os estudos, as condições climáticas atuais e futuras foram simuladas a partir de modelos climáticos globais e regionais. Em seguida, foram obtidas as diferenças (mudanças) mensais de precipitação e de temperatura com base no método *Delta Change Approach*. Em virtude da grande variação observada mês a mês, optou-se pela aplicação de um filtro de média móvel (três meses). Por fim, as mudanças previstas para cada mês (filtradas) foram aplicadas diretamente sobre as séries observadas, constituindo-se na principal fonte de dados de entrada para o modelo hidrológico.

Entretanto, conforme mencionado pelos próprios autores (GRAHAM, 2000; BERGSTRÖM *et al.*, 2001), e reforçado por Lenderink *et al.* (2007), a aplicação das mudanças previstas na temperatura ou na precipitação diretamente sobre a série observada

implica em simplificações consideráveis, que podem comprometer a análise das projeções no futuro. Nessa abordagem não são consideradas as prováveis alterações no número de dias chuvosos, na dispersão (variância) das chuvas ou nos valores extremos de temperatura, uma vez que a própria série observada no passado consiste na base da previsão para o futuro, e somente as variações médias sazonais são contabilizadas. Desse modo, assume-se o risco de considerar que as mesmas anomalias registradas no passado serão observadas no futuro, com pequenas alterações na magnitude mensal das variáveis climáticas, de acordo com o mês ou período do ano.

Assim, Lenderink *et al.* (2007) discutem e analisam de que forma a saída de um modelo climático regional deve ser corrigida para a obtenção de vazões mais realistas para o clima atual e, conseqüentemente, para o clima futuro. De acordo com o autor, o desenvolvimento de modelos climáticos regionais permite, através de algumas correções na saída, a sua utilização direta (*Direct Approach*) de projeções de temperatura e de chuva para o futuro. Este método, ao invés de acrescentar as mudanças previstas na série observada, realiza um procedimento diferente: i) detecta as diferenças entre as condições climáticas atuais, isto é, entre as condições observadas através de estações meteorológicas e as condições simuladas pelo modelo climático regional; ii) aplica essas diferenças na série prevista para o futuro (Equação 2.2).

$$P_{cor}(f)_{k/j} = P_{sim}(f)_{k/j} * \left[\overline{P_{obs}(b)_k} / \overline{P_{sim}(b)_k} \right] \quad (2.2)$$

Onde: $P_{sim}(f)_{k/j}$ é a precipitação simulada no período futuro, no mês k e no ano j ; $\overline{P_{obs}(b)_k}$ é a média da precipitação observada no período base para o mês k ; $\overline{P_{sim}(b)_k}$ é a média da precipitação simulada no período base para o mês k .

Esta abordagem tem a vantagem de considerar as diversas alterações previstas para o futuro, não somente àquelas relacionadas às médias mensais, mas também as alterações relacionadas ao número de dias chuvosos, aos eventos extremos, etc. No entanto, fica evidente que, caso a saída do modelo climático regional ainda não apresente boa confiabilidade, as projeções para o futuro podem ser ainda menos realistas do que ao aplicar o método anterior. Além disso, ao aplicar o método apresentado por Lenderink *et al.* (2007), assume-se que as mesmas deficiências observadas na simulação das condições atuais do clima pelos modelos climáticos, serão observadas na simulação das condições futuras.

Outros métodos mais sofisticados de correção das variáveis climáticas resultantes de simulações tem sido testados e comparados, com aplicações em intervalos de tempo diário ou mensal, como pode ser observado em Wood *et al.* (2004), Maurer e Hidalgo (2008), Ines e Hansen (2006), Boé *et al.* (2007), Leander e Buishand (2007), Piani *et al.* (2010) e Bárdossy e Pegram (2011). Em estudo recente, Themeßl *et al.* (2011) compararam alguns métodos de correção e concluíram que a técnica *Quantile-Based Mapping* (PANOFSKY E BRIER, 1968) é a mais eficiente para remover os erros nos dados de precipitação. Este método é aplicado com pequenas adaptações nos estudos listados acima. Basicamente, o método se baseia nas diferenças entre as curvas de probabilidade acumulada (simulada e observada) das precipitações diárias ou mensais.

O método *Quantile-Based* se baseia nas diferenças entre as curvas de probabilidade acumulada das precipitações diárias ou mensais, com ajuste de uma distribuição estatística para cada mês ou intervalos sazonais. Em seguida, através da função ajustada à série simulada no período base, descobre-se a probabilidade associada a cada precipitação simulada no período futuro. Por fim, através da função inversa da distribuição ajustada aos dados observados no período base, obtém-se um novo valor de precipitação corrigido, que está associado à probabilidade obtida no passo anterior. Este procedimento deve ser repetido para cada mês ou intervalo de sazonal.

Na Figura 2.2 o procedimento é ilustrado. Neste exemplo, temos uma precipitação projetada para o período futuro (1976-1990) de 100 mm, com probabilidade de ocorrência de 0,7 (círculo verde). Em seguida, descobre-se a probabilidade associada a mesma precipitação na função ajustada aos dados simulados no período base (1961-1975), caracterizada pelo círculo circunscrito preto. Para esta última probabilidade, descobre-se o valor de precipitação correspondente na função ajustada aos dados observados no mesmo período (1961-1975). Por fim, adota-se este valor de precipitação corrigido para a série do futuro, como ilustrado pelo círculo amarelo.

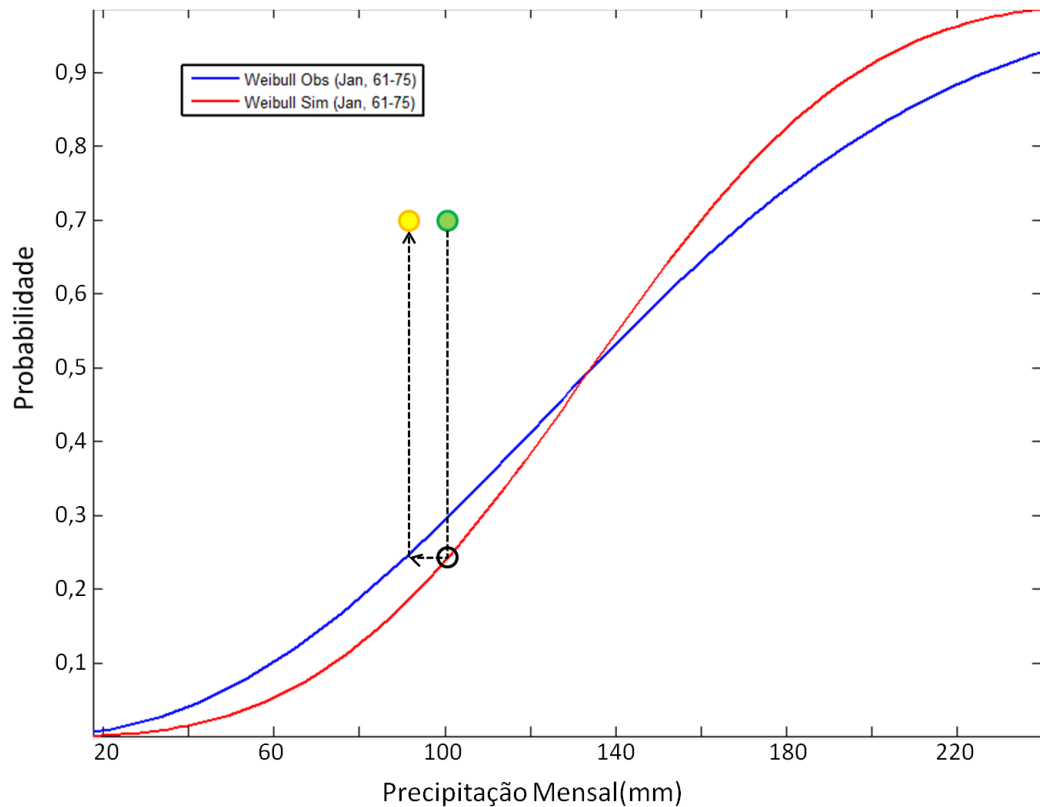


Figura 2.2. Procedimento de correção das precipitações mensais com base nas curvas de probabilidade acumulada. O círculo verde indica uma precipitação prevista para o futuro (período de avaliação) pelo modelo climático. O círculo circunscrito preto caracteriza a probabilidade de não excedência associada a mesma precipitação na função ajustada aos dados simulados no período base. O valor de precipitação, correspondente à probabilidade indicada pelo círculo preto projetada na função ajustada aos dados observados no período base, é adotado no período futuro (círculo amarelo).

2.3. MODELOS ESTOCÁSTICOS E A GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS CLIMATOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS

De acordo com Salas *et al.* (1980), se uma variável não pode ser prevista com certeza, esta pode ser considerada uma variável aleatória, regida pelas leis da probabilidade. Um modelo pode ser definido como estocástico quando ao menos uma das variáveis compreendidas apresentar comportamento aleatório (GONTIJO, 2007). As séries estocásticas constituem-se em sequências de observações de variáveis aleatórias. Logo, a modelagem estocástica requer o conhecimento da distribuição de probabilidade que melhor descreve o comportamento da variável na série temporal.

De modo geral, a modelagem estocástica de séries temporais pode ser organizada em quatro estágios (BOX E JENKINS, 1970): i) seleção do tipo de modelo; ii) identificação da forma do modelo; iii) estimativa dos parâmetros; iv) avaliação dos resultados do modelo.

Existem vários tipos de modelos estocásticos, mas os dois tipos mais comuns para representar a dependência das séries temporais são os modelos autorregressivos e os baseados na cadeia de Markov (SALAS *et al.*, 1980). Nos modelos do tipo autorregressivo (AR) o valor de uma variável no tempo seguinte depende do valor da mesma variável no intervalo de tempo anterior, sendo apropriado para a modelagem de dados contínuos que apresentam forte dependência temporal, como as vazões de um rio. O processo markoviano é indicado para modelar a transição de um estado para outro sempre que esta transição dependa apenas do estado corrente do sistema. Quando o estado se refere a um conjunto numerável ou finito, o processo é chamado de cadeia de Markov (LIMA E NAGHETTINI, 2005). Haan *et al.* (1976) e Viana *et al.* (2000) observam que a cadeia de Markov descreve satisfatoriamente o agrupamento sequencial de dias secos e chuvosos.

A identificação da forma ou da ordem do modelo consiste na segunda etapa da modelagem. Quanto maior a ordem, maior é o número de parâmetros e, conseqüentemente, mais complexo se torna o modelo, aumentando sua capacidade de representação da realidade.

Por fim, as etapas finais consistem na estimativa dos parâmetros, através de métodos de otimização, e na avaliação do modelo, normalmente através de comparações entre as estatísticas das séries observadas e modeladas.

As séries sintéticas estocásticas são o resultado da associação de séries determinísticas com números aleatórios gerados por algoritmos computacionais, em função de modelos probabilísticos. Trata-se de sequências temporais semelhantes às séries observadas (WILKS, 1999). Os números aleatórios consistem naqueles passíveis de serem selecionados, casualmente, a partir de uma população, de maneira que cada número tenha uma chance de ser sorteado, de acordo com uma distribuição de probabilidades (HAAN, 1994). Assim, normalmente, os números aleatórios são obtidos por distribuições de probabilidade, através de funções acumuladas que modelam o comportamento estocástico de uma variável aleatória contínua. Ao considerar a probabilidade de não excedência como uma variável com distribuição uniforme, com valores entre 0 e 1, é possível gerar um conjunto de valores sintéticos da variável aleatória modelada.

Desse modo, para qualquer variável aleatória X , com função densidade de probabilidade $f_X(x)$, a função, apresentada pela Equação 2.3, pode ser considerada uniformemente distribuída no intervalo $[0, 1]$.

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(x) dx \quad (2.3)$$

A função inversa de $F_X(x)$ gera um número aleatório X , distribuído conforme $f_X(x)$. Quando a distribuição de probabilidade não possuir uma forma inversa, ou seja, sem uma solução analítica explícita para x , devem ser aplicados métodos numéricos para a solução de tais equações (GONTIJO, 2007).

Seguramente, a distribuição de probabilidades normal é a mais utilizada das distribuições contínuas. Também conhecida como distribuição gaussiana, sua importância se deve a vários aspectos. Dentre eles, pode-se destacar o teorema do limite central, que é um resultado fundamental em aplicações práticas e teóricas. Este teorema garante que mesmo que os dados não sejam distribuídos segundo uma função gaussiana, à medida que o número de dados aumenta, a média dos dados converge assintoticamente para a distribuição gaussiana.

Considerando uma distribuição normal padrão, isto é, com média (μ) igual a 0 e desvio padrão (σ) igual a 1, a função de densidade de probabilidade é representada pela Equação 2.4.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{x^2}{2}\right)} \quad (2.4)$$

Uma das distribuições de probabilidade mais utilizadas para modelagem de dados hidrológicos é a distribuição Gamma, que, na sua forma mais comum, possui três parâmetros (ϑ , η , β). Esta distribuição é representada pela função dada pela Equação 2.5.

$$f_X(x) = \frac{\zeta^{\eta-1} e^{-\zeta}}{\vartheta \Gamma(\eta)}, \text{ com } \zeta = \frac{x - \beta}{\vartheta}, \text{ para } x, \vartheta \text{ e } \eta > 0 \quad (2.5)$$

Sendo: ϑ é um parâmetro de escala, com dimensão de x ; β é um parâmetro de posição, onde $\beta < x < \infty$, representando assim o menor valor de x ; η é um parâmetro de forma adimensional; $\Gamma(\eta)$ é a função gama, normalmente resolvida por integração numérica.

A distribuição de probabilidades de Weibull foi proposta originalmente por Weibull no ano de 1954. Trata-se de outra distribuição utilizada em problemas relacionados a séries temporais hidrológicas ou climatológicas. Esta distribuição é representada pela função dada pela Equação 2.6.

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e \left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha \right], \text{ para } x, \alpha \text{ e } \beta > 0 \quad (2.6)$$

Sendo: α é um parâmetro de forma; β é um parâmetro de escala.

Além destas três distribuições de probabilidade para modelagem de dados contínuos, muitas outras podem ser aplicadas em séries temporais para a geração de séries sintéticas, tais como a Log-Normal, a Exponencial e a de Gumbel (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Conforme a definição de Salas *et al.* (1980), as variáveis climáticas e hidrológicas podem ser consideradas aleatórias e, portanto, podem ser modeladas estocasticamente. Na literatura científica, existem inúmeras referências envolvendo o desenvolvimento de modelos estocásticos para a geração de séries sintéticas climáticas e hidrológicas (GABRIEL E NEUMANN, 1962; THOMAS E FIERING, 1962; BAILEY, 1964; SEDIYAMA *et al.*, 1978; BRUHN *et al.*, 1980; RICHARDSON, 1981; BARBOSA, 1981; PAIVA, 1996; SEMENOV E BARROW, 1997; OLIVEIRA, 2003; GONTIJO, 2007).

De acordo com Semenov e Barrow (1997), os primeiros modelos estocásticos em climatologia e hidrologia foram desenvolvidos na década de 1960 para simular séries de precipitação diária em aplicações hidrológicas (por exemplo: GABRIEL E NEUMANN, 1962; BAILEY, 1964). A partir do início da década de 1980, surgiram modelos capazes de gerar um conjunto de séries de variáveis climáticas, denominados de geradores climáticos estocásticos (RICHARDSON, 1981).

Inicialmente, existiam apenas duas motivações para a elaboração de modelos estocásticos climáticos ou hidrológicos (SEMENOV E BARROW, 1997). A primeira diz respeito à necessidade de gerar longas séries para simular processos climáticos ou hidrológicos extremos, com pequena probabilidade de ocorrência, para avaliação dos riscos. A segunda está associada à possibilidade de gerar séries em locais sem dados observados, a partir de parâmetros estatísticos obtidos a partir de séries observadas nos postos pluviométricos ou nas estações meteorológicas mais próximas. Atualmente, um novo

interesse na utilização dos modelos estocásticos está relacionado aos estudos dos impactos das mudanças climáticas na disponibilidade de água e, conseqüentemente, na sociedade.

O modelo Weather Generator (WGEN) foi, possivelmente, o gerador de séries de variáveis climáticas mais utilizado ao longo da história, constituindo-se em base para vários outros geradores (CASTELLVI *et al.*, 2001), como o WXGEN, desenvolvido por Nicks e Harp (1980), o Climate Generator (CLIGEN), desenvolvido por Nicks *et al.* (1995), o USCLIMATE (HANSON *et al.*, 1994) e o ClimGen, desenvolvido por Gaylon Campbell, da Washington State University, em 1990.

O WGEN, desenvolvido por Richardson (1981) e Richardson e Wright (1984), foi primeiramente validado em diversos estados americanos e depois em países de todo o mundo, para a geração de precipitação, temperaturas máximas e mínimas, radiação solar e velocidade do vento. O WGEN também utiliza uma cadeia de Markov de ordem variável para modelar a ocorrência ou não de precipitação, levando em consideração somente a condição do intervalo de tempo anterior. A distribuição de probabilidade Gama é utilizada para gerar a precipitação diária nos dias chuvosos. A matriz de transição entre os dias chuvosos e secos é estimada através dos dados observados, para cada mês.

Outro gerador de séries climáticas sintéticas, o LARS-WG, baseado no estudo de Racsco *et al.* (1991) e desenvolvido por Semenov *et al.* (1998), apresenta uma forma diferente para sortear a ocorrência ou não de precipitação, apropriada para locais com longos períodos de seca. O LARS-WG utiliza a distribuição de probabilidade geométrica como aproximação para o tamanho das séries de dias chuvosos. Quanto às séries de dias secos, o ajuste é realizado por uma mistura de duas distribuições geométricas, com probabilidade $1 - p$ para séries curtas e probabilidade p para séries maiores que oito dias. Os parâmetros são ajustados para cada mês. Para os dias considerados chuvosos, o LARS-WG utiliza uma distribuição semiempírica para determinar a quantidade de precipitação, com parâmetros calculados mensalmente.

Quanto à geração de séries de temperatura sintética diária, normalmente os programas geram séries separadas de temperaturas máximas e mínimas. O LARS-WG adota o mesmo procedimento para ambas as séries (temperaturas mínimas e máximas). O modelo considera que a distribuição diária de temperaturas apresenta uma distribuição normal. A média e o desvio padrão da distribuição variam diariamente. Os parâmetros são obtidos pelo ajuste de uma série de Fourier para as médias e desvios padrão dos dados observados ao longo do ano, agrupados a cada mês. A temperatura está condicionada ao estado de precipitação (dia seco ou chuvoso), sendo ajustadas séries de Fourier independentes, para cada estado de precipitação.

O gerador WGEN também utiliza a distribuição normal para as temperaturas mínimas e máximas diárias, com a média e o desvio padrão da distribuição variando diariamente. Os parâmetros são obtidos pelo ajuste de uma função cosseno para as médias e desvios padrão dos dados observados ao longo do ano, agrupados a cada 28 dias. A temperatura mínima não está condicionada ao estado de precipitação (dia seco ou chuvoso). Apenas a série de temperatura máxima diária é gerada com ajustes separados, para dias secos e chuvosos.

Quanto às séries sintéticas hidrológicas, os modelos mais comuns são aqueles que geram séries de vazões anuais ou mensais. Os modelos de vazão diária são mais escassos na literatura científica, tanto em escala nacional, quanto em escala global.

Coser *et al.* (2011) colocam que uma das propriedades desejadas para os modelos estocásticos hidrológicos é a habilidade de preservar as estatísticas de curta dependência (mensais) e de longa dependência (anuais). Porém, de acordo com as características das séries de vazão, tal tarefa pode ser bastante difícil.

Na abordagem estocástica, a escolha do tipo de modelo deve ser realizada considerando aquele que melhor representa as características mais relevantes das séries históricas. Conforme Salas *et al.* (1980), os modelos mais utilizados em hidrologia são os autorregressivos (THOMAS e FIERING, 1962; YEVJEVICH, 1963). Dentre as variações deste tipo de modelo, destacam-se as seguintes: i) modelos autorregressivos (AR), ii) modelos periódicos autorregressivos (PAR); iii) modelos autorregressivos de média móvel (ARMA); iv) modelos autorregressivos integrados de média móvel (ARIMA); v) modelos sazonais autorregressivos integrados de média móvel (SARIMA); vi) modelos autorregressivos integrados de média móvel com entradas exógenas (ARIMAX).

De acordo com Barbosa (1981), o modelo apresentado por Thomas e Fiering (1962) foi uma das principais tentativas de geração de sequências aleatórias sintéticas em hidrologia. Trata-se de um processo markoviano de primeira ordem, apropriado para a geração de séries de vazões mensais, definido pela Equação 2.7.

$$\left[\frac{X_{i+1} - \mu_X}{\sigma_X} \right] = \rho_X(1) \cdot \left[\frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X} \right] + [1 - \rho_X^2(1)]^{1/2} \cdot \varepsilon_{i+1} \quad (2.7)$$

Sendo: X é a variável nos instantes i e $i+1$; μ_X é a média da variável X ; σ_X é o desvio padrão da variável X ; $\rho_X(1)$ é o coeficiente de autocorrelação da série; ε_{i+1} é a componente aleatória que tem média zero, variância igual a um e é independente de X_i .

Os valores de μ_X , σ_X e $\rho_X(1)$, embora desconhecidos, podem ser estimados a partir dos registros históricos. A técnica para a geração da série sintética a partir deste modelo é a seguinte: i) adota-se um valor de inicialização da variável X_i , de modo arbitrário ou de acordo com o histórico; ii) estima-se os valores de μ_X , σ_X e $\rho_X(1)$ conforme a série histórica; iii) gera-se o primeiro valor de ε_{i+1} de modo aleatório; iv) aplica-se a Equação 2.7, resultando em um primeiro evento sintético X_{i+1} ; v) avança-se ao instante posterior, considerando como X_i o evento sintético anterior; vi) retorna-se à etapa iii. O procedimento é repetido N vezes para obter-se uma série sintética de N eventos.

Para obter a semelhança também quanto à assimetria, entre as séries geradas e observadas, é necessário substituir a componente aleatória ε_{i+1} por ξ_{i+1} , a qual é dada pela Equação 2.8.

$$\xi_{i+1} = \frac{2}{\gamma_\xi} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_\xi \cdot \eta_{i+1}}{6} - \frac{\gamma_\xi^2}{36} \right)^3 - \frac{2}{\gamma_\xi} \quad (2.8)$$

Sendo: a assimetria de ξ , simbolizada por γ_ξ , é relacionada à estimativa da assimetria de X , simbolizada por $\hat{\gamma}_X$, conforme a Equação 2.9.

$$\gamma_\xi = \frac{[1 - \hat{\rho}_X^3(1)]}{[1 - \hat{\rho}_X^2(1)]^{3/2}} \cdot \hat{\gamma}_X \quad (2.9)$$

Se η_{i+1} for assumido como normalmente distribuído com média zero e variância igual a um, ξ_{i+1} possui distribuição aproximadamente gama, com média zero, variância um e assimetria γ_ξ .

As incertezas relacionadas à modelagem climática e à disponibilidade hídrica no futuro, em virtude da aleatoriedade dos processos hidrometeorológicos, favorecem a utilização de métodos probabilísticos, baseados em séries temporais estocásticas, como nos estudos de Semenov e Barrow (1997) e Booij (2005). A abordagem estocástica amplia a possibilidade de análise da disponibilidade hídrica e das incertezas climáticas no futuro, oferecendo um grande número de cenários para análise, sendo possível identificar os intervalos de confiança na projeção e estimar o componente aleatório da dinâmica climática e/ou hidrológica.

Semenov e Barrow (1997) desenvolveram um modelo estocástico para a geração de séries sintéticas de variáveis meteorológicas que é apropriado para estudar os efeitos das alterações climáticas. No estudo, as características da série observada no passado foram perturbadas pelas alterações previstas através de modelos climáticos, em escala de tempo diária. Após isso, foram criadas algumas séries estocásticas para avaliar o impacto e as incertezas associadas aos modelos, através do gerador LARS-WG, validado em várias partes do planeta, com resultados consistentes na geração de séries climáticas. Foram utilizados modelos climáticos globais, porém com o procedimento de “downscaling”, por regressão espacial. Os resultados foram apresentados para duas localidades, Rothamsted (Reino Unido) e Sevilha (Espanha).

Outro exemplo da utilização de séries sintéticas obtidas por modelos estocásticos é o trabalho de Booij (2005), que avalia o impacto das mudanças climáticas sobre as inundações do rio Meuse, Holanda, em escala de tempo diária, utilizando um modelo hidrológico em diferentes escalas espaciais e cinco modelos climáticos, globais (3) e regionais (2). Foi utilizado um modelo estocástico para a geração de séries sintéticas de precipitações, sob condições climáticas atuais (série observada) e futuras (modelos climáticos). Entretanto, neste caso, não foram realizadas quaisquer alterações nos dados de precipitação previstos para o futuro através dos modelos climáticos, sendo utilizados os valores simulados para o futuro de modo direto. O modelo utiliza uma Cadeia de Markov de primeira ordem, com quatro estágios de transição, para determinar a ocorrência ou não de precipitação, e ajusta uma distribuição Gamma com dois parâmetros para determinar a magnitude das precipitações. As séries sintéticas de precipitação no futuro foram utilizadas como entrada em um modelo hidrológico de base física (HBV), resultando em diversas séries de vazões com igual probabilidade de ocorrência, o que permite analisar os impactos e as incertezas da previsão. Os resultados ilustraram uma tendência geral de diminuição da vazão média e um pequeno aumento na variabilidade das vazões. As incertezas com relação às inundações nos cenários de mudanças climáticas (40%) foram bem superiores às simuladas no cenário atual (<10%).

2.4. MODELAGEM DA DEMANDA HÍDRICA

O diagnóstico das demandas hídricas, normalmente, é obtido pela análise dos principais usos consuntivos, não consuntivos e para lançamentos de efluentes. Os usos consuntivos são aqueles associados à retirada de água dos corpos hídricos, provocando redução da disponibilidade hídrica a jusante. De acordo com DRH/SEMA (2007), no Relatório Síntese da Fase A - Diagnóstico e Prognóstico Hídrico das Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul (RS), pertencente ao Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul, Brasil, os seguintes usos consuntivos foram considerados significativos para a estimativa de demanda hídrica no RS: abastecimento humano, uso industrial, irrigação e criação animal.

Os usos não consuntivos compreendem as atividades que utilizam os mananciais sem alterar significativamente a disponibilidade de água. No RS, conforme o DRH/SEMA (2007), os usos mais importantes são: geração de energia, transporte hidroviário interior, mineração, turismo, lazer, pesca e preservação ambiental.

Considerando todas essas categorias de usos (consuntivos e não consuntivos), fica evidente a dificuldade de projetar a demanda hídrica para o futuro, tendo em vista a grande quantidade de variáveis socioeconômicas envolvidas. Normalmente, os prognósticos são limitados aos usos consuntivos, os quais possuem variáveis com predição um pouco menos complexa do que aquelas relacionadas aos usos não consuntivos.

Em projeções de demanda hídrica em nível local é necessário utilizar uma metodologia que compreenda o maior número de variáveis relacionadas aos usos consuntivos. A seguir, são descritas algumas das principais abordagens para a projeção destes usos no futuro.

2.4.1. ABASTECIMENTO HUMANO

O abastecimento humano é um dos componentes relacionados aos usos consuntivos, sendo responsável por uma parcela significativa da demanda hídrica em áreas urbanas. Este componente está intrinsecamente associado à população e às suas características socioeconômicas. A demanda de água para abastecimento humano geralmente é expressa em L/hab/dia. No Brasil, ainda são poucos os dados confiáveis, obtidos através de medidas

sistemáticas, sobre a demanda de água por parte da população (MATOS, 2007). Muitas vezes, são utilizados valores de consumo médio obtidos na literatura científica mundial, os quais não condizem com as realidades observadas no Brasil.

No Rio Grande do Sul, os dados mais recentes, divulgados pelo Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA), do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2014), mostram que o consumo *per capita* de água médio em 2012 foi de 149,7 L/hab/dia, considerando mais de 400 municípios com dados disponíveis. Esse valor apresenta grande variação entre municípios. De acordo com SNIS (2012), 62 municípios do Estado do RS apresentam consumo inferior a 100 L/hab/dia e 35 municípios tem consumo superior a 200 L/hab/dia.

É importante destacar que esses valores de consumo não se referem apenas às ligações domésticas. Os dados apresentados pelo SNIS (2014) se referem ao somatório do consumo de água dos domicílios e dos setores comercial, de serviços e industrial.

Inúmeros fatores socioeconômicos e naturais influenciam no consumo de água da população, tais como a situação de domicílio (urbano ou rural), o porte da cidade, as condições de moradia e a renda familiar, os costumes e os hábitos de higiene, e o clima, principalmente (GLEICK, 1996). Conforme Tsutiya (2005), esses fatores podem ser agrupados da seguinte forma: i) características culturais; ii) características físicas (temperatura, umidade, precipitação, etc.); iii) características da habitação (área construída, número de habitantes, etc.); iv) características do abastecimento (pressão na rede, qualidade da água); v) gerenciamento do sistema (tipo de abastecimento, tarifas, etc.); vi) características econômicas da população (renda familiar).

A influência do clima no consumo, por exemplo, é marcante, principalmente em função da temperatura e da sensação térmica, também influenciada pela umidade relativa do ar. Em regiões de clima quente e seco o consumo é maior (MATOS, 2007). De acordo com a CETESB (1976 *apud* MATOS, 2007), o consumo *per capita* de água pode até dobrar de um clima frio e úmido para um clima tropical muito seco.

Nesse contexto, qualquer modelo para a projeção de demanda para o abastecimento humano no futuro deve incorporar, essencialmente, a projeção populacional e, dependendo da complexidade desejada, alterações em virtude de projeções previstas para os fatores que influenciam no consumo de água. Entretanto, na maior parte dos estudos pesquisados, apenas a projeção populacional é considerada.

O DRH/SEMA (2007), na elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul, utilizou um simples modelo matemático para expressar a tendência de crescimento da população no futuro, com base na população registrada nos Censos anteriores do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), desprezando as componentes relacionadas à dinâmica populacional (fecundidade, mortalidade e migrações). Além disso, não é considerada a variação sazonal na demanda hídrica em função das condições climáticas.

A projeção populacional em áreas pequenas, isto é, em escala local ou municipal, constitui-se em um procedimento de alta complexidade, no qual idealmente não se deve considerar somente a tendência de crescimento populacional observada no passado, mas também as tendências das variáveis que compreendem a dinâmica populacional: mortalidade, fecundidade e migrações.

De acordo com Freire (2001), as metodologias de projeção populacional em pequenas áreas podem ser divididas em três categorias: i) métodos matemáticos (extrapolação); ii) métodos que envolvem variáveis sintomáticas; iii) métodos que consideram a dinâmica populacional.

Os métodos matemáticos possuem a limitação de considerar que as tendências observadas no passado não sofrerão alterações no futuro. Estes modelos apresentam, de modo geral, menor confiabilidade e precisão do que os demais, em virtude de não compreender todo o dinamismo que envolve o crescimento populacional. As funções linear, exponencial e logística são as mais utilizadas, sendo esta última, a mais indicada, por limitar o crescimento a um dado valor (FREIRE, 2001).

O IBGE, órgão responsável pelas estimativas oficiais de população no Brasil, utiliza o método de tendência de crescimento demográfico conhecido como $a_i b_i$ para estimar a população nas grandes regiões, Unidades de Federação e municípios (IBGE, 2008). O princípio fundamental deste método é a subdivisão de uma área maior, cuja estimativa é conhecida, em n áreas menores, de modo que a soma da população das n áreas menores resulte na população da área maior (MADEIRA e SIMÕES, 1972). De forma resumida, o modelo pressupõe que a tendência populacional observada na área maior é a mesma das áreas menores, o que não é aplicável em muitos casos. Além disto, diversos estudos salientam que este método não é apropriado para projeções de horizontes distantes (décadas).

Os métodos que envolvem variáveis sintomáticas estabelecem relações funcionais entre a população e variáveis que estão diretamente relacionadas a ela, como, por exemplo, os óbitos, os nascimentos, o número de eleitores, entre outros. No entanto, a aplicação desta

técnica depende da disponibilidade e da qualidade de um banco de dados dessas variáveis suficientemente extenso. Nesta categoria de modelo, dois métodos se destacam: o método das correlações de razões e o método de distribuição pró-rata.

De acordo com Crosetti e Schmitt (1956), o método de correlações de razões pressupõe que a evolução da população de uma área menor em relação à população de uma área maior possui uma relação linear e proporcional com a evolução das variáveis sintomáticas selecionadas. A Equação 2.10 ilustra um modelo de regressão linear que descreve este método. As Equações 2.11 e 2.12 expressam as variáveis dependente e independente.

$$Y_i = A_0 + A_1X_{1,j} + A_2X_{2,j} + \dots + A_nX_{n,j} + \varepsilon_i \quad (2.10)$$

$$Y_i = \frac{P_{i,t}/P_{A,t}}{P_{i,0}/P_{A,0}} \quad (2.11)$$

$$X_{j,i} = \frac{S_{j,i,t}/S_{j,A,t}}{S_{j,i,0}/S_{j,A,0}} \quad (2.12)$$

Sendo: $P_{i,t}$ é a população da área menor i no intervalo de tempo t ; $P_{A,t}$ a população da área maior A no tempo t ; $P_{i,0}$ é a população inicial da área menor i ; $P_{A,0}$ é a população inicial da área maior A ; $S_{j,i,t}$ é a variável sintomática j da área menor no tempo t ; $S_{j,A,t}$ é a variável sintomática j da área maior no tempo t ; $S_{j,i,0}$ é a variável sintomática j da área menor no instante inicial; $S_{j,A,0}$ é a variável sintomática j da área maior no instante inicial; ε_i é o erro aleatório do modelo.

No método de distribuição pró-rata supõe-se que a razão entre as populações das áreas menores e a população da área maior é igual à razão das variáveis sintomáticas (Equação 2.13).

$$P_{i,t} = \left(\frac{S_{i,t}}{S_{A,t}} \right) \cdot P_{A,t} \quad (2.13)$$

Sendo: $P_{i,t}$ é a estimativa da população da área menor i no instante t ; $P_{A,t}$ é a população da área maior A no instante t ; $S_{i,t}$ é a variável sintomática S da área menor i no instante t ; $S_{A,t}$ é a variável sintomática S da área maior A no instante t .

O método das componentes demográficas é o mais utilizado dentre os que consideram a dinâmica populacional ou demográfica. De acordo com o IBGE (2008), esta metodologia incorpora as tendências observadas das três variáveis que definem a dinâmica populacional: a mortalidade, a fecundidade e as migrações. Conceitualmente, o método das componentes demográficas pode ser considerado o mais completo e preciso, pois compreende de modo adequado as variáveis que regem as leis demográficas (FREIRE, 2001).

O método das componentes demográficas projeta a população por sexo e idade a partir da equação compensadora (equação de equilíbrio populacional) descrita abaixo (Equação 2.14):

$$P(t+n) = P(t) + N(t, t+n) - O(t, t+n) + I(t, t+n) - E(t, t+n) \quad (2.14)$$

Sendo: $P(t+n)$ é a população no ano $t+n$; $P(t)$ é a população no ano t ; $N(t, t+n)$ é o número de nascimentos ocorridos no período $t, t+n$; $O(t, t+n)$ é o número de óbitos ocorridos no período $t, t+n$; $I(t, t+n)$ é o número de imigrantes no período $t, t+n$; $E(t, t+n)$ é o número de emigrantes no período $t, t+n$.

A Equação 2.14 mostra claramente como ocorre a evolução populacional, compreendendo componentes de entrada de pessoas (nascimentos e imigrações) e de saída (óbitos e emigrações). No ano t (ano-base da projeção), a população de homens e mulheres na idade x ($x = 1, 2, 3, \dots, 79$) pode ser representada por P_x^t e a proporção de pessoas de uma idade específica que sobrevive neste mesmo ano pode ser representada por S_x^t . Considerando que os sobreviventes em um ano também envelhecem um ano, a população na idade $x+1$ no ano $t+1$ é calculada pela Equação 2.15:

$$P_{x+1}^{t+1} = P_x^t \cdot S_x^t + M_x^t \quad (2.15)$$

Sendo: M_x^t representa as migrações.

Para a faixa etária de 80 anos ou mais (P_{80+}), utiliza-se a Equação 2.16:

$$P_{80+} = P_{79+} \cdot S_{79+} + M_{79+} \quad (2.16)$$

Para calcular a população com menos de um ano de idade é necessário estimar o número de nascimentos ocorridos durante o ano t , considerando as taxas específicas de fecundidade por idade (mulheres em idade fértil, de 15 a 49 anos). O somatório do produto das taxas pela população feminina fornece o número de nascimentos (Equação 2.17).

$$N^t = \sum_{x=15-49} f_x^t \cdot P_x^t(f) \quad (2.17)$$

Sendo: N^t é o número total de nascimentos no ano t ; f_x^t são as taxas específicas de fecundidade por idade em t ; $P_x^t(f)$ é a população feminina por idade em t .

É importante mencionar que, neste método, o procedimento deve ser realizado para cada sexo em separado, utilizando um coeficiente baseado nas estatísticas de Registro Civil. No Brasil, por exemplo, a proporção de nascimentos do sexo feminino é de 0,49, de acordo com os dados do IBGE.

2.4.2. INDÚSTRIAS

A projeção das atividades industriais e da conseqüente demanda hídrica para tais atividades constitui-se em uma modelagem ainda mais complexa do que a relacionada ao abastecimento humano. Primeiro, porque existe um número extenso de variáveis que influenciam na concentração de indústrias e no aumento de produção, dentre as quais podemos mencionar os incentivos fiscais, a especulação imobiliária, as condições de infraestrutura, a capacidade de escoamento da produção, o mercado consumidor, a mão de obra e a disposição dos recursos naturais. Estas variáveis, além de numerosas, são em grande parte impossíveis de serem quantificadas, pois são componentes subjetivos, de origem qualitativa.

Em segundo lugar, de acordo com Pereira *et al.* (2004), a demanda hídrica para as atividades industriais não aumentam necessariamente na medida em que aumenta a produção, em virtude das tecnologias empregadas que alteram a eficiência no consumo da água. Além disso, muitas vezes os dados de consumo de água por estabelecimento não estão disponíveis, principalmente no que se refere às pequenas indústrias.

O DRH/SEMA (2007), por exemplo, para estimar a demanda hídrica do setor industrial em 2007, a partir dos dados disponíveis, considerou o número de indústrias por município e uma demanda hídrica unitária de 3 L/s. Este valor foi definido de acordo com o cadastro de outorgas, através do qual foi possível estabelecer uma média das demandas das indústrias de baixo e médio consumo. De forma complementar, foram consideradas ainda as demandas hídricas das indústrias de grande consumo, as quais estão devidamente identificadas no cadastro. Para projetar a demanda no futuro (até 2026), o DRH/SEMA (2007) utilizou um modelo matemático que considera a tendência de crescimento (evolução) do Valor Adicionado Bruto (VAB) do setor industrial no período entre 1994 e 2004.

Neste tipo de abordagem, algumas considerações precisam ser realizadas: i) deve-se realizar a correção monetária dos valores, para excluir a parcela relativa à valorização da moeda; ii) supõe-se que o aumento do VAB se refere somente ao aumento de produção, desconsiderando-se a valorização do produto gerado; iii) supõe-se que o aumento de produção (do VAB) seguirá a mesma tendência observada no passado; iv) ignora-se a implantação de novas tecnologias que aumentam a eficiência no consumo por parte das indústrias.

2.4.3. IRRIGAÇÃO

A modelagem da demanda hídrica pelas atividades relacionadas à irrigação, visando a projeção no futuro, é bastante complexa. Depende de fatores físicos (clima, solo), do tipo da cultura, da duração do ciclo da cultivar, da época de semeadura, do sistema de irrigação, do manejo agrícola e do manejo da irrigação (SOSBAI, 2005; HELFER, 2006).

Para calcular a demanda hídrica para irrigação de arroz, no presente, o DRH/SEMA (2007) considerou as áreas cultivadas da safra 2004/2005, de acordo com os levantamentos do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), com demanda média de 12.000 m³/ha/safra. Para outras culturas irrigadas foram utilizadas as demandas hídricas informadas nos processos de outorga emitidos pelo próprio DRH/SEMA. O método utilizado para projetar a demanda até 2026 considerou a evolução da área cultivada entre as safras 1997/1998 e 2005/2006. Foi utilizado um modelo matemático que considera a tendência linear de crescimento de área cultivada.

Helfer (2006) também realizou a projeção de áreas irrigadas no futuro, na bacia hidrográfica do rio Pardo, RS, Brasil, utilizando uma equação de tendência ajustada aos dados históricos. Entretanto, foi imposta uma restrição em relação à expansão das áreas irrigadas, em relação à área disponível e apta para a atividade. Esta restrição foi realizada através de análises espaciais em um Sistema de Informações Geográficas (SIG). No estudo, foram considerados dois cenários, ambos obtidos por modelos matemáticos determinísticos: um tendencial e o outro otimista quanto ao racionamento de consumo de água.

De modo mais simplificado, Silva Neto (2011) considerou como cenário futuro de demanda hídrica para irrigação em uma bacia localizada em Palmas, Tocantins, Brasil, um percentual de aumento anual de 1%. Este percentual foi considerado plausível de acordo com critérios empíricos estabelecidos por um instituto local.

Da mesma forma, Pereira *et al.* (2004) estabeleceu sua projeção de crescimento das atividades agropecuárias em bacia do interior de São Paulo, Brasil. Neste estudo, os autores utilizaram um valor indicado pelo Comitê das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (CBH/PCJ) igual a 1,34% de crescimento anual. Entretanto, no próprio estudo é mencionada a discrepância entre os cenários estabelecidos por diferentes institutos locais, o que indica um alto grau de imprecisão na elaboração dos cenários.

2.4.4. CRIAÇÃO ANIMAL

A modelagem da demanda hídrica para atividades relacionadas à criação animal (pecuária), embora complexa, apresenta metodologias mais conhecidas e com maior precisão do que as que envolvem os usos industriais e de irrigação. A projeção da demanda para o futuro para tal finalidade normalmente é realizada através de modelos matemáticos (modelos linear, exponencial, geométrico, etc.) baseados na tendência de crescimento observada nos últimos anos ou décadas, ou através de modelos não lineares adaptados para crescimento populacional de animais, considerando de modo geral as taxas de nascimentos/produção e de mortes/abates (modelos Brody, Richards, Von Bertalanffy, Gompertz, etc.).

No trabalho apresentado por DRH/SEMA (2007) o prognóstico foi realizado através da evolução dos principais rebanhos no Estado do RS, entre os anos de 1996 e 2006, utilizando um modelo matemático de tendência de crescimento linear. Silva Neto (2011)

realiza o prognóstico de rebanhos para o futuro através de um modelo que considera uma tendência geométrica de crescimento de 1% ao ano.

Diversos modelos são utilizados para a projeção do crescimento populacional de animais, sendo o modelo de Richards (RICHARDS, 1959) o mais citado na literatura científica. Este tem sido amplamente utilizado em estudos de crescimento de rebanhos (exemplos: PEROTTO *et al.*, 1992; FREITAS *et al.*, 2005) e para o cálculo das curvas de crescimento em animais (exemplo: FREITAS, 2005).

De acordo com Freitas *et al.* (2005), em função de algumas características do modelo de Richards, como a não linearidade, são necessárias alternativas computacionais para sua utilização, como por exemplo a função de verossimilhança *profile*, a qual permite estimar os parâmetros eliminando-se os problemas numéricos da função de verossimilhança clássica.

Para a aplicação do modelo de Richards, bastam duas informações: o número efetivo de animais e a taxa anual de abate do rebanho em um período de tempo suficientemente longo.

A Equação 2.18 apresenta a forma geral dos modelos estocásticos, com intervenção e taxa de crescimento dependente da densidade:

$$N_{t+1} = N_t \exp[r(N_t) + \varepsilon_t] - N_t h_t \quad (2.18)$$

Sendo: N é o tamanho da população em um determinado instante; $r(N_t)$ é a taxa de crescimento da população; h_t é a taxa de abate; ε_t é a variável aleatória que representa a variabilidade decorrente de fatores ambientais, normalmente modelada por uma distribuição Gaussiana.

O modelo de Richards com intervenção (LOIBEL, 2004) é um modelo estocástico resultante da generalização dos modelos logístico e de Gompertz (FITZHUGH, 1976). A partir da Equação 2.18, considerando a taxa de crescimento de Richards, obtém-se o modelo de Richards com intervenção, expresso pela Equação 2.19 (FREITAS *et al.*, 2005):

$$N_{t+1} = N_t \exp \left\{ \frac{\rho}{q} \left[1 - \left(\frac{N_t}{K} \right)^q \right] + \varepsilon_t \right\} - h_t N_t \quad (2.19)$$

Sendo: ρ é um parâmetro que representa a taxa de crescimento que não depende do tamanho da população, isto é, trata-se da diferença entre as taxas de natalidade e de mortalidade; q representa um fator intrínseco à população e está relacionado ao metabolismo dos animais, descrevendo a forma como a taxa diminui à medida que o N aumenta; K é um parâmetro que representa a capacidade de suporte da população, ou seja, o tamanho limite a partir do qual a taxa de crescimento sofre uma inflexão.

Quanto ao consumo médio de água para cada atividade relacionada à criação animal, existem várias bibliografias disponíveis, as quais apresentam, de modo geral, semelhanças entre si. O consumo de água para cada animal varia de acordo com as espécies, com o porte do animal, com o tipo de manejo, com o clima, entre outros. Desse modo, não existe um valor padrão nas referências bibliográficas, e sim um gradiente de valores aceitos pela literatura científica. A Tabela 2.1 ilustra o consumo de água para criação animal, em L/cabeça/dia, conforme algumas fontes bibliográficas.

Tabela 2.1. Demanda hídrica por tipo de criação animal.

Criação Animal	Demanda (L/cabeça/dia)	Fonte
Gado leiteiro	70,00	Sugai (2003)
Gado de corte	50,00	Sugai (2003)
Suínos	26,00	Oliveira (2009)
Ovinos	7,00	Sugai (2003)
Galinhas	0,36	Sugai (2003)
Equinos	40,00	Sugai (2003)
Caprinos	7,00	Sugai (2003)
Codornas	0,25	DRH/SEMA (2007)
Coelhos	0,50	Couto (2002)

2.5. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

A evapotranspiração - taxa de água transferida da superfície terrestre para a atmosfera, por evaporação (E) e por transpiração (T) - é de extrema importância para estudos nas áreas de recursos hídricos, hidrologia, agronomia e climatologia. A evapotranspiração constitui-se em um dos principais componentes do ciclo hidrológico, fenômeno global de circulação da água entre a superfície e a atmosfera terrestre, cuja força impulsora é a energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (SILVEIRA, 2007). A evaporação e a evapotranspiração ocorrem quando a água em estado líquido passa para o estado gasoso (vapor d'água), sendo então transferida para a atmosfera. Tal processo somente ocorre naturalmente quando há ingresso de energia no sistema, proveniente do sol e/ou da atmosfera, sendo controlado pela taxa de energia, na forma de vapor d'água que se propaga da superfície terrestre.

Entretanto, informações quantitativas de evaporação obtidas por medições diretas ainda não estão disponíveis em quantidade suficiente para diversos locais do Brasil. Além disso, se considerarmos projeções futuras de disponibilidade e de demanda hídrica, não é possível utilizar dados medidos, sendo necessária a aplicação de algum método para estimar tais processos a partir de variáveis que podem ser modeladas/simuladas para o futuro, como, por exemplo, a temperatura média do ar. Desse modo, estimativas baseadas em princípios físicos ou em equações empíricas são extensivamente utilizadas como alternativa para o problema (TUCCI e BELTRAME, 2007).

A evapotranspiração (ET) é importante para o balanço hídrico de bacias hidrográficas, principalmente para o balanço hídrico agrícola. O solo, as plantas e a atmosfera podem ser considerados como componentes de um sistema dinâmico inter-relacionado fisicamente, onde os vários processos de fluxo estão interligados. Neste sistema, é aplicável o conceito de potencial hídrico, em que o fluxo de água ocorre dos pontos de maior para os de menor potencial (TUCCI e BELTRAME, 2007).

A evapotranspiração de referência (ET_o) é a quantidade de água transferida da superfície para a atmosfera por evaporação e transpiração, por unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e com bom suprimento de água (PENMAN, 1956). A evapotranspiração real (ET_r) é a quantidade de água transferida da superfície para a atmosfera por evaporação e transpiração, em condições existentes de fatores atmosféricos e umidade do solo. De acordo com Gangopadhyaya *et al.* (1966), a ET_r é sempre igual ou menor que a ET_o .

Muitos são os métodos utilizados para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o). Dentre eles, o método desenvolvido por Penman (1948), foi durante muito tempo considerado padrão, em virtude de combinar os termos energéticos onde se considera o balanço vertical de energia, com o termo aerodinâmico que revela o poder evaporante do ar. Posteriormente, Monteith (1965) incorporou ao termo aerodinâmico da equação de Penman duas modificações: i) resistência do dossel da cultura (r_c) que depende das características fisiológicas da planta; ii) resistência aerodinâmica (r_a) que envolve a velocidade dos ventos na difusão turbulenta do calor sensível e do vapor d'água.

O método de Penman-Monteith tem sido considerado por diversos autores (SEDIYAMA, 1996; ALLEN *et al.*, 1998) como o mais confiável, sendo inclusive adotado como o método padrão pela Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO). Este método está parametrizado para uma área totalmente coberta com grama de 12 cm de altura, considerando a resistência aerodinâmica da superfície de 70 s.m^{-1} e albedo de 0,23, em solo sem déficit hídrico.

A metodologia para estimativa da evapotranspiração de referência, de acordo com o método de Penman-Monteith, utiliza como variáveis meteorológicas de entrada a temperatura, a umidade relativa do ar, a pressão atmosférica, a velocidade dos ventos e a radiação global. A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) por este método pode ser obtida pela Equação 2.20.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34\mu_2)} \quad (2.20)$$

Sendo: ET_o é a evapotranspiração de referência em mm/dia; R_n é o saldo de radiação em $\text{MJ/m}^2\text{dia}^{-1}$; G é o fluxo de calor no solo em $\text{MJ/m}^2\text{dia}^{-1}$, podendo ser considerado igual a 0, em virtude da pequena magnitude do fluxo em relação ao saldo de radiação em um dia, conforme recomenda Allen *et al.* (1998); T é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); μ_2 é a velocidade dos ventos média diária, medida a dois metros de altura (m/s^{-1}); e_s é a pressão média de saturação do vapor em kPa; e_a é a pressão média atual do vapor em kPa; Δ é a declividade da curva de pressão de saturação do vapor no ponto correspondente à temperatura; γ é a constante psicrométrica.

O valor de inclinação da curva de pressão de saturação (Δ) é obtido em função da temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), conforme mostra a Equação 2.21.

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 e^{\left(\frac{17,27T}{T+237,3} \right)} \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (2.21)$$

O saldo de radiação (R_n) é o resultado das trocas de energia radiativa sobre a superfície vegetada, sendo considerado como a diferença entre o balanço de radiação de ondas curtas e de ondas longas (Equação 2.22). A Equação 2.23 permite o cálculo do balanço de ondas curtas (R_{ns}).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2.22)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (2.23)$$

Sendo: R_{ns} e R_{nl} são o balanço de radiação de ondas curtas e longas, respectivamente, ambas na unidade de medida de $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; α é o albedo, igual a 0,23; R_s é a radiação solar global. O balanço de ondas longas pode ser calculado através da Equação 2.24.

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(T_{max})^4 + (T_{min})^4}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (2.24)$$

Sendo: σ é a constante de Stefan Boltzmann, com valor igual a $4,9 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ dia}^{-1}$; T_{max} e T_{min} são as temperaturas máximas e mínimas absolutas do ar durante o dia (K); R_{so} é a radiação solar para dias sem nuvens em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Para converter as temperaturas de $^{\circ}\text{C}$ para K deve-se somar à temperatura medida na estação meteorológica o valor de 273,16.

A Equação 2.25 permite calcular o valor da pressão atual do vapor d'água (e_a), que é uma função da pressão de saturação do vapor (e^o) nas temperaturas máxima (Equação 2.26) e mínima (Equação 2.27), e da umidade relativa do ar (UR) máxima e mínima. A partir da média aritmética da pressão de saturação do vapor nas temperaturas máxima e mínima obtém-se a pressão média de saturação (e_s).

$$e_a = \frac{e^o(T_{min}) \frac{UR_{max}}{100} + e^o(T_{max}) \frac{UR_{min}}{100}}{2} \quad (2.25)$$

$$e^o(T_{max}) = 0,6108 e^{\left[\frac{17,27T_{max}}{T_{max}+237,3} \right]} \quad (2.26)$$

$$e^o(T_{min}) = 0,6108e^{\left[\frac{17,27T_{min}}{T_{min}+237,3}\right]} \quad (2.27)$$

A radiação solar para dias sem nuvens (R_{so}) representa o fotoperíodo e depende da altitude do local (z) e da radiação solar extraterrestre (R_a), podendo ser calculada pela Equação 2.28. A radiação solar extraterrestre, por sua vez, depende de alguns fatores, tais como a distância relativa Terra-Sol e a latitude local, entre outros, sendo obtida pela Equação 2.29.

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5}z)R_a \quad (2.28)$$

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_\gamma [\omega_s \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \text{cos}(\varphi) \text{cos}(\delta) \text{sen}(\omega_s)] \quad (2.29)$$

Sendo: G_{sc} é a constante solar, igual a $0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$; d_γ é o inverso da distância relativa Terra-Sol, em radianos; ω_s é o ângulo horário de pôr-do-sol, em radianos; φ é a latitude, em radianos; δ é a declinação solar, em radianos. A transformação dos valores de ângulos em graus decimais para radianos é realizada com a utilização da Equação 2.30. O inverso da distância relativa Terra-Sol (Equação 2.31) e a declinação solar (Equação 2.32) dependem exclusivamente do dia do ano (Calendário Juliano), que corresponde a uma ordem numérica do dia (J) em relação ao ano, com os dias variando de 1 (1° de janeiro) a 365 (31 de dezembro). Já o ângulo horário de pôr do sol pode ser obtido pela Equação 2.33.

$$[\text{Radianos}] = \frac{\pi}{180} [\text{Graus decimais}] \quad (2.30)$$

$$d_\gamma = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (2.31)$$

$$\delta = 0,409 \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right) \quad (2.32)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (2.33)$$

Por fim, o último parâmetro a ser estimado é a constante psicrométrica, que é uma função da pressão atmosférica, conforme mostra a Equação 2.34.

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P_o \quad (2.34)$$

2.6. MODELAGEM HIDROLÓGICA

A hidrologia aborda todos os complexos fenômenos observados no ciclo hidrológico. Processos como a precipitação, a evaporação, a infiltração e o escoamento em rios dependem de muitos fatores, os quais dificultam a análise quantitativa e qualitativa dos mesmos. Os modelos hidrológicos constituem-se em uma das principais ferramentas para representar o comportamento dos fenômenos e dos processos em bacias hidrográficas, podendo ser classificados de acordo com alguns critérios, dentre os quais se destacam (TUCCI, 1998):

i) conceitual ou empírico: os modelos conceituais são aqueles que possuem funções embasadas nos processos físicos relacionados com o ciclo hidrológico. Por sua vez, os modelos empíricos, também conhecidos como "caixa-preta", são aqueles que ajustam suas funções internas de modo a obter resultados semelhantes aos observados, sem considerar os processos físicos envolvidos no sistema;

ii) concentrado ou distribuído: os modelos concentrados não consideram a variabilidade espacial. Geralmente, nestes modelos, a única variável independente é o tempo, utilizando-se de medidas centrais para toda a bacia. Os modelos distribuídos possuem variáveis e parâmetros que dependem do espaço e do tempo, oferecendo maior realismo, porém necessitando de um volume de informações cada vez maior conforme aumenta o detalhamento espacial;

iii) estocástico ou determinístico: os modelos estocásticos são aqueles que consideram a lei das probabilidades (CHOW, 1964). Nos modelos estocásticos, para uma mesma entrada podem ser obtidos resultados diferentes, em virtude de condições aleatórias envolvidas na modelagem (DOOGE, 1973). Os modelos determinísticos ignoram a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo. Neste tipo de modelo, uma vez realizada a calibração dos parâmetros para um conjunto de entradas, sempre será obtida a mesma resposta (saída).

Os modelos do tipo precipitação-vazão estão entre os mais utilizados em hidrologia. Estes modelos representam a parte do ciclo hidrológico compreendida entre a precipitação e a vazão, os quais descrevem as perdas por interceptação, evaporação e depressões do solo, o fluxo de água no solo pela infiltração, percolação e água subterrânea, o escoamento superficial, subsuperficial e no rio (TUCCI, 1998).

O modelo conceitual SSARR (*Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*) desenvolvido no *US Army Corps of Engineers* (ROCKWOOD, 1958) foi um dos primeiros modelos com um módulo específico para a transformação da precipitação em vazão. O

modelo compreende, também, um módulo para propagação do escoamento em rios e reservatórios e outro para a regularização de reservatórios. De forma sintética, o modelo define a precipitação, estabelece as perdas iniciais e modela os escoamentos resultantes: superficial, subsuperficial e subterrâneo.

Outro modelo que pode ser considerado um dos pioneiros em hidrologia é o Stanford IV (CRAWFORD e LINSLEY, 1966). É considerado um modelo completo em virtude do grande número de algoritmos e processos representados. O modelo possui dois módulos - simulação na bacia e simulação em rios ou canais - e foi estruturado para representar vários processos que compõem o ciclo hidrológico, como a interceptação, a infiltração, a evapotranspiração e os escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo.

Outros dois modelos hidrológicos se destacaram na categoria de modelos físicos distribuídos: SHE (*System Hydrologic European*) e o TOPMODEL. O primeiro foi desenvolvido em conjunto por três instituições da Europa (ABBOTT *et al.*, 1986) e o segundo foi apresentado por Beven *et al.* (1994).

O modelo TOPMODEL incorporou as relações físicas através de um número reduzido de parâmetros, isto é, com menor detalhamento dos processos. O modelo possui três componentes principais: i) armazenamentos e fluxos na zona não saturada; ii) armazenamentos e fluxos na zona saturada; iii) propagação do fluxo nas sub-bacias.

Dentre tantos modelos hidrológicos, o modelo IPH II deve ser destacado por ter sido amplamente aplicado em estudos hidrológicos no Brasil. Esse modelo foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

O modelo IPH II é do tipo concentrado, constituído por poucos parâmetros, e possui como base principal um algoritmo de separação do escoamento desenvolvido por Berthelot (1970), no qual são utilizadas em conjunto a equação da continuidade, a equação de Horton para infiltração e uma função empírica de percolação. Tucci *et al.* (1981) utilizaram o algoritmo de separação do escoamento em conjunto com outros - de perdas, de escoamento superficial e subterrâneo -, desta forma, implementando o modelo, que é composto por quatro algoritmos: i) perdas por evaporação e interceptação; ii) separação dos escoamentos; iii) propagação do escoamento superficial; iv) propagação do escoamento subterrâneo.

Dentre os modelos hidrológicos voltados para a simulação da vazão média mensal, o modelo SMAP, apresentado por Lopes *et al.* (1982), tem apresentado bons resultados em estudos recentes, como em Block *et al.* (2009) e Kwon *et al.* (2012). Trata-se de um modelo

semiconceitual concentrado, do tipo chuva-vazão, que utiliza os parâmetros do modelo proposto pelo *Soil Conservation Service* - modelo SCS (SCS, 1975) - para a separação do escoamento. A principal diferença entre o SMAP e o modelo SCS é que, no primeiro, é possível a simulação de séries contínuas de vazões, não apenas cheias de projeto. O modelo SMAP, na versão mensal, utiliza apenas dois reservatórios (subsuperficial e subterrâneo), contando com apenas quatro parâmetros: capacidade de saturação do solo, coeficiente de escoamento, coeficiente de recarga e coeficiente de recessão do escoamento de base.

Quanto aos modelos do tipo "caixa-preta" ou empírico, o mais conhecido é o modelo SCS, bastante utilizado para geração de hidrogramas de projeto em bacias sem dados observados. O modelo foi desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS, 1975). De acordo com Tucci (1998), embora apresente algumas vezes resultados inconsistentes, este método é muito utilizado em virtude da exigência de um número bastante reduzido de parâmetros.

O surgimento das Redes Neurais Artificiais (RNAs) e o crescente desenvolvimento tecnológico em computação também têm proporcionado resultados promissores em simulações hidrológicas (JAIN *et al.*, 2004). As RNAs são modelos matemáticos empíricos, com capacidade para reproduzir o funcionamento dos sistemas nervosos biológicos. Esta habilidade é desenvolvida através do treinamento, para que a rede proporcione uma resposta (variável de saída) aos estímulos (variáveis de entrada).

A criação das RNAs está ligada à publicação de McCulloch e Pitts (1943), em que o neurônio artificial foi formulado a partir de observações puramente biológicas. A rede possuía, inicialmente, apenas capacidade de representar, embora de forma semelhante aos neurônios biológicos, funções lógicas bastante simplificadas. Embora tenha havido um desenvolvimento progressivo, somente com o algoritmo retropropagativo, apresentado por Rumelhart *et al.* (1986), é que as RNAs passaram a ser difundidas e receber investimentos em pesquisa de forma contínua e crescente. O algoritmo retropropagativo é uma generalização, aplicada às redes multicamadas, da Regra Delta, criada por Widrow e Hoff (1960). A atualização dos pesos de um neurônio, os quais são inicialmente gerados aleatoriamente, depende apenas dos erros, das entradas e da derivada do próprio neurônio. Os erros da camada interna de neurônios são calculados a partir dos erros da camada de neurônios de saída.

As entradas de uma RNA funcionam como estímulos e a composição básica de um neurônio artificial é uma função de soma ponderada destas entradas e uma função de ativação, normalmente não linear, que modifica o resultado da soma ponderada. Isto resulta em um sinal correspondente à resposta desejada, à medida que os parâmetros (pesos sinápticos) sejam

ajustados adequadamente por meio do treinamento da rede. Uma arquitetura típica de uma RNA para fins hidrológicos pode ser observada na Figura 2.3.

Recentemente, diversas pesquisas obtiveram excelentes resultados com a aplicação de RNAs na área de recursos hídricos e hidrologia, principalmente no desenvolvimento de modelos para simulação, previsão e classificação (JAIN *et al.*, 2004; BOWDEN *et al.*, 2005; JAIN e KUMAR, 2007; LEAHY *et al.*, 2008; MATOS, 2012; PEDROLLO e PEDROLLO (2013); OLIVEIRA *et al.*, 2014).

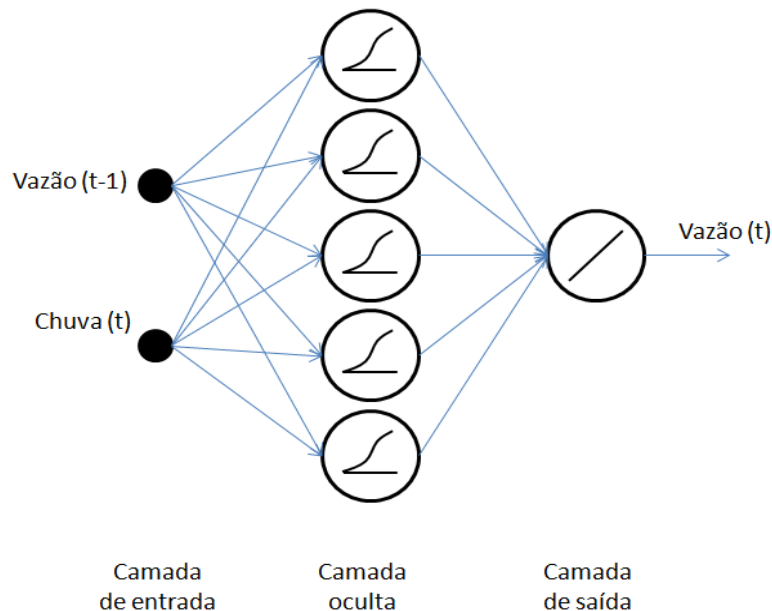


Figura 2.3. Arquitetura típica de uma RNA para aplicação hidrológica.

Shamseldin (1997) utilizou RNAs em simulações hidrológicas do tipo chuva-vazão em seis bacias, com áreas de drenagem entre 1.207 e 18.000 km². Em cinco destas, obteve coeficiente Nash-Sutcliffe (NS) superior a 0,7. No estudo de Sajikumar e Thandaveswara (1999), as RNAs foram aplicadas para a simulação hidrológica em duas bacias, rio Lee (Reino Unido) e rio Thuthapuzha (Índia), com 1.419 e 1.030 km², respectivamente, resultando coeficientes NS superiores a 0,8. Anmala *et al.* (2000) aplicaram as RNAs em simulações hidrológicas mensais em três bacias hidrográficas no Kansas, EUA, com áreas de drenagem entre 518 e 640 km², obtendo desempenho superior a dois outros modelos empíricos, com coeficiente R² superior a 0,9. Hsu *et al.* (1995) utilizaram a técnica das RNAs para a simulação da vazão diária no rio Leaf, Mississippi, Estados Unidos (EUA), com área de 1.949 km². A técnica apresentou desempenho superior à simulação com o modelo conceitual

Sacramento Soil Moisture Accounting e o modelo autorregressivo ARMAX. Em outro estudo, Oliveira *et al.* (2014) apresenta uma comparação entre as RNAs e do modelo conceitual IPH II na simulação de vazões diárias em quatro sub-bacias do rio Ijuí, no Rio Grande do Sul, Brasil, com áreas entre 19 e 9.426 km². As RNAs superaram o modelo conceitual, com NS variando entre 0,72 e 0,94, enquanto que no modelo IPH II o mesmo índice ficou entre 0,3 e 0,88.

A pesquisa de Campolo *et al.* (2003) aborda a previsão de níveis em tempo real com RNAs para a bacia do rio Arno (4.000 km²). Foram obtidos baixos erros percentuais (7% a 15%), evidenciando que o modelo de previsão com RNAs é adequado para tal aplicação. No estudo de Rajurkar *et al.* (2004) as RNAs foram aplicadas na modelagem chuva-vazão com dados diários em períodos de cheia, na Índia, em sete bacias hidrográficas, 1.207 a 26.200 km², obtendo resultados satisfatórios, com coeficiente de NS superior a 0,8 na maioria das previsões. Na mesma temática, Jain e Kumar (2007) aplicaram modelos com RNAs e modelos autorregressivos para a previsão hidrológica mensal em uma bacia do rio Colorado, Estados Unidos, com área de 290.000 km². Foram testadas diferentes configurações de modelos, e em todos os casos, os modelos baseados em RNAs obtiveram resultados melhores que os autorregressivos. Por exemplo, em um modelo de quarta ordem, enquanto a RNA apresentou um coeficiente de correlação linear (r) de 0,89, o modelo autorregressivo obteve r de 0,81.

Entretanto, apesar dos resultados promissores, as RNAs são rotuladas como modelos "caixa preta", pois não explicam os processos físicos inerentes à dinâmica das bacias que originam o escoamento (HSU *et al.*, 1995; JAIN *et al.*, 2004). Ainda assim, deve-se considerar a possibilidade de analisar a sensibilidade do modelo aos dados de entrada, de modo a investigar se os impulsos nas entradas estão provocando o efeito esperado na resposta hidrológica da bacia, utilizando, por exemplo, o método de análise de sensibilidade proposto por Lek *et al.* (1996). A partir desta técnica, pode-se, portanto, verificar se o modelo hidrológico baseado em RNAs representa de modo adequado os processos físicos hidrológicos. Além disto, recentemente, várias técnicas de análise de RNAs treinadas para a modelagem hidrológica têm sido utilizadas para a extração de informações dos processos físicos relacionados à hidrologia (JAIN e KUMAR, 2009) e para a pesquisa da importância das variáveis explicativas (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme mencionado no capítulo introdutório, a metodologia para analisar a relação entre a disponibilidade e a demanda hídrica no futuro será embasada em modelos estocásticos, considerando as previsões de mudanças climáticas e as projeções futuras de demanda hídrica. A presente metodologia irá contemplar a aleatoriedade dos processos e das dinâmicas climáticas diretamente nas séries de vazões, através de um modelo estocástico apropriado para vazões mensais. Assim, a partir de apenas um cenário climático, gera-se uma série de vazões através da simulação hidrológica, para em seguida realizar-se a modelagem estocástica.

Para fins de estruturação e organização do presente trabalho, todas as atividades foram agrupadas em cinco módulos principais (Figura 3.1). Os dois primeiros módulos estão associados à modelagem dos dados hidrológicos e climáticos, com objetivos específicos de definir o modelo hidrológico e os dados climáticos que deverão ser utilizados para a análise de disponibilidade hídrica no futuro. O terceiro e o quarto módulo estão associados à modelagem estocástica para obtenção de séries de disponibilidade e de demanda hídrica, respectivamente. O último módulo se refere à análise da relação entre a disponibilidade e a demanda hídrica no futuro, entre 2011 e 2040.

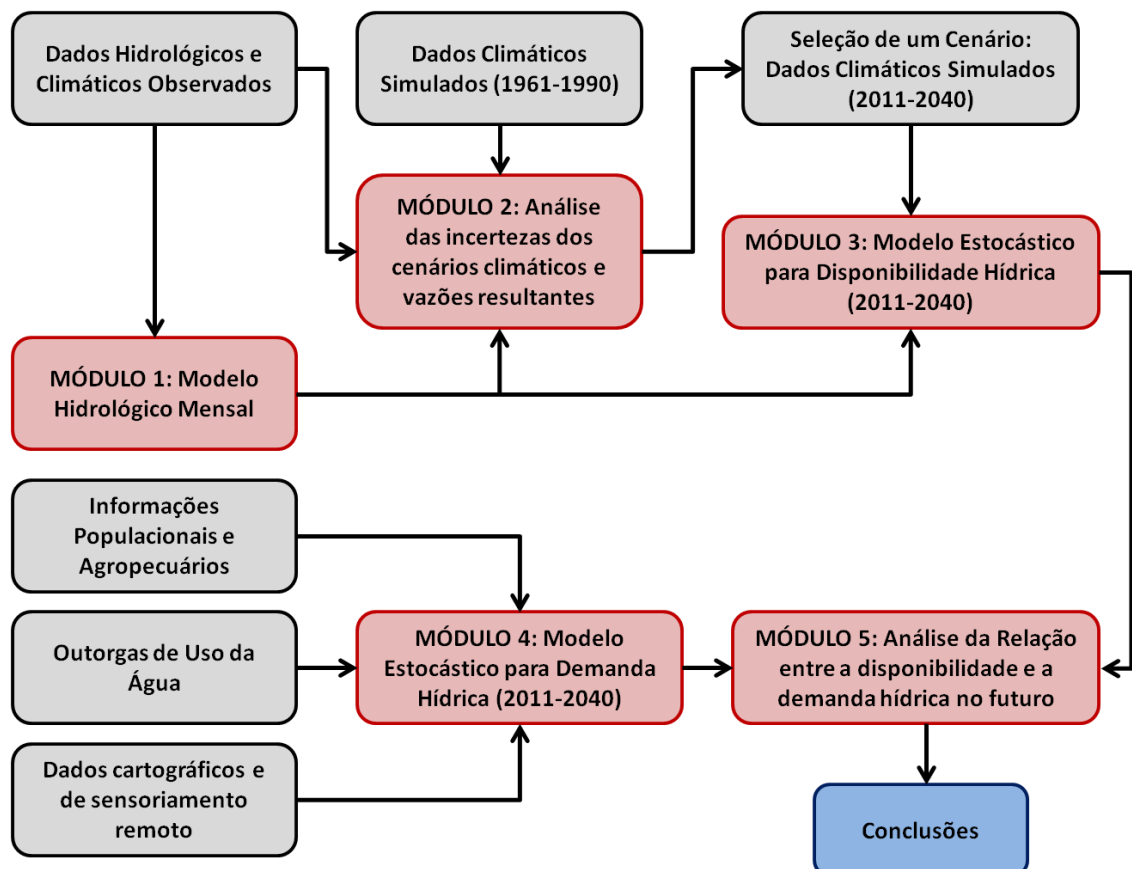


Figura 3.1. Fluxograma do trabalho.

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A metodologia foi aplicada à bacia hidrográfica do rio Ijuí, na seção relativa ao posto fluviométrico Santo Ângelo, situada no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A bacia hidrográfica possui área de 5.414 km² e está localizada entre as seguintes coordenadas geográficas: latitudes de 27,98°S a 28,74°S e longitudes de 53,21°O a 54,28°O (Figura 3.2).

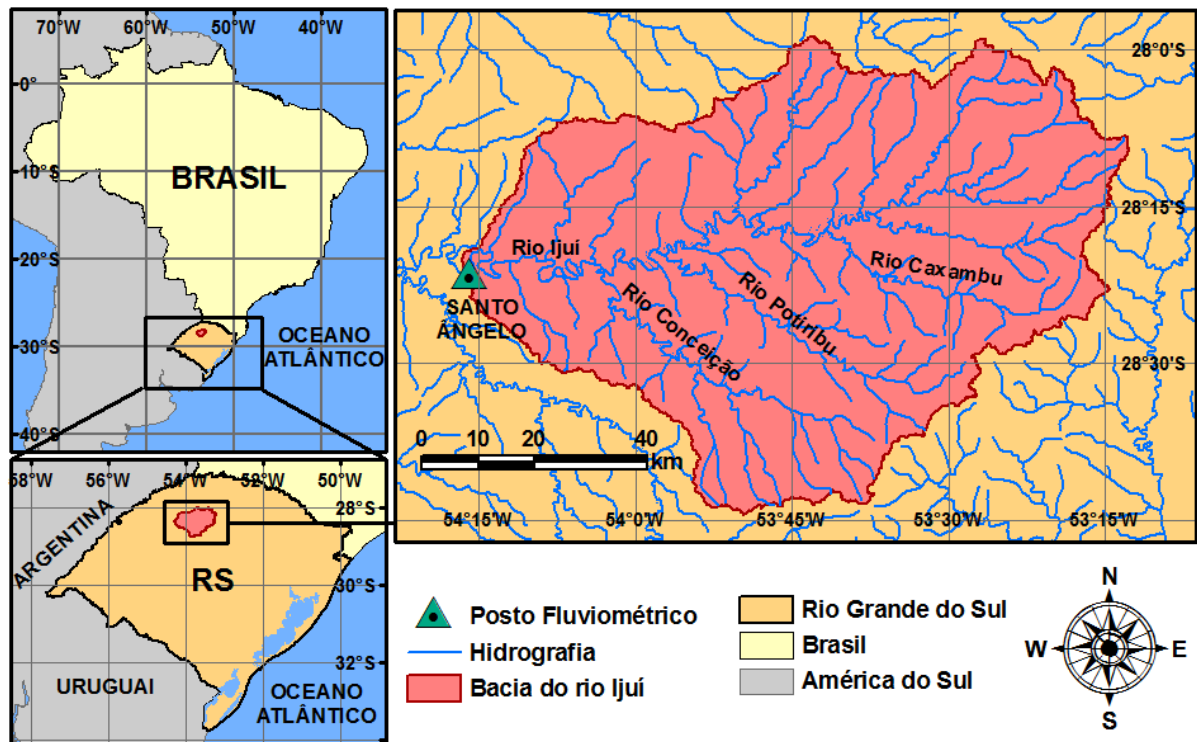


Figura 3.2. Localização da bacia hidrográfica do rio Ijuí, seção a montante do posto fluviométrico Santo Ângelo (5.414 km²), RS, Brasil.

A escolha da área de estudo se deve, primeiramente, ao fato de estar sendo realizado um monitoramento pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), desde 1989 em sub-bacias da região, com disponibilidade de um banco de dados hidrológicos superior a 20 anos (CASTRO *et al.*, 1999; 2000; 2010). A série histórica pertencente ao posto fluviométrico Santo Ângelo, operado pela Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais (CPRM) e de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), é a mais extensa da região, com dados desde novembro de 1941. Além disso, outro aspecto que interferiu na determinação da área de estudo corresponde ao fato desta região ser altamente dependente das atividades agrícolas, podendo apresentar sérios impactos

socioeconômicos em virtude das alterações climáticas. De acordo com a Coordenadoria Estadual da Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul (CEDEC-RS, 2012), no período entre 1982 e 2011, ocorreram pelo menos seis fortes estiagens na região da bacia, que acarretaram grandes prejuízos às atividades agropecuárias, principalmente para as relacionadas à soja e ao milho.

O rio Ijuí, na seção do posto Santo Ângelo, no período entre 1941 e 2013, possui vazão média de 139 m³/s. Historicamente, o mês de março apresenta as menores vazões, 70 m³/s, enquanto que o mês de outubro apresenta as maiores, 212 m³/s. Os principais tributários do rio Ijuí, a montante da seção estudada, são os rios Conceição, Potiribu, Caxambu, Fiúza e Faxinal, e os arroios Divisa e Barbosa.

De acordo com o mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul, produzido pela CPRM (CPRM, 2006), a bacia de estudo está localizada na Província Geológica da bacia do Paraná, constituída por sucessivas camadas de rochas basálticas, sobrepostas às camadas de rochas areníticas da Formação Botucatu. A porção centro-sul da bacia está localizada sobre as Fácies Gramado, com gênese na Era Mesozoica (Cretáceo), aproximadamente 132 milhões de anos atrás. Esta região se caracteriza por derrames basálticos granulares finos a médio, com intercalações com o Arenito Botucatu. A parcela mais ao norte da bacia está localizada sobre as Fácies do Paranapanema, caracterizadas por derrames basálticos granulares finos. A gênese se deu também no período Cretáceo, aproximadamente 136 milhões de anos atrás.

Quanto à geomorfologia, conforme a classificação apresentada pelo IBGE (1986), a bacia está localizada no domínio morfoestrutural das Bacias e Coberturas Sedimentares da Bacia do Paraná, na região geomorfológica do Planalto das Missões. De acordo com a classificação do IBGE, a unidade geomorfológica é denominada de Planalto de Santo Ângelo. Apresenta um relevo com dissecação homogênea, com densidade de drenagem grosseira e aprofundamento dos vales fluviais entre 22 e 28 metros. A forma de relevo predominante é composta por coxilhas - colinas alongadas com pouco desnível entre o topo e os vales. O desenvolvimento destas formas se deu especialmente em rochas efusivas básicas.

A bacia possui 414 m de desnível altimétrico, com elevações que variam de 191 a 605 metros acima do nível do mar. O relevo apresenta suaves ondulações, com declividade média de 6,5%, variando de 0%, nas áreas mais planas, a 34,2%, nas áreas mais escarpadas.

Quanto à classificação de solos, de acordo com o IBGE (2002), a bacia possui predominantemente os seguintes tipos de solos: i) latossolo roxo distrófico; ii) latossolo vermelho-escuro húmico álico; iii) terras roxas estruturadas eutróficas (nitossolos vermelhos);

iv) solos litólicos eutróficos (neossolos litólicos). A região é caracterizada por solos bastante argilosos e úmidos, bem drenados, desenvolvidos e profundos, atingindo mais de 15 metros de profundidade.

O clima na área de estudo é o subtropical úmido (Cfa), considerando a classificação de Köppen, caracterizado por estações de verão e inverno bem definidas, com temperatura média do ar dos três meses mais frios compreendidas entre -3°C e 18°C , temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e precipitações bem distribuídas durante todo o ano (> 90 mm em qualquer mês). Considerando os dados diários climáticos do posto Cruz Alta, operado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os meses do inverno e primavera são os mais chuvosos. De acordo com Rossato (2011), a precipitação média anual oscila entre 1.700 e 1.800 mm, entre 100 e 120 dias de chuva por ano, em média. A temperatura média anual oscila entre 17 e 20°C . Os meses mais frios são junho e julho, com média em torno dos 14°C , e os meses mais quentes são janeiro e fevereiro, com média em torno dos 24°C .

De acordo com o mapa de vegetação do IBGE (2003), a bacia possui basicamente dois tipos de vegetação, fortemente alterados por atividades agropecuárias: i) Floresta Estacional Decidual (Floresta Tropical Caducifólia), subdividida nos tipos Montana e Submontana; ii) Estepes Gramíneo-Lenhosa com Florestas de Galeria (Campos Sulinos). De acordo com os dados do IBGE, referentes à produção agrícola municipal, as culturas predominantes são a soja, o trigo, o milho e a aveia. Estas são produzidas em dois ciclos: i) soja e milho no verão; ii) aveia e trigo no inverno. Outros cultivos agrícolas que se destacam são: o feijão, a mandioca, o linho, o girassol e a cevada.

As principais alterações no uso do solo e práticas agrícolas ocorreram entre as décadas de 1980 e 1990, com a mudança de plantio convencional com terraços e plantio em curvas de nível, ambos realizados em solo lavrado e arado (20 cm de profundidade), para o plantio direto, realizado diretamente sobre os resíduos do plantio anterior, sem revolvimento do solo. Em 1994 esta transição foi consumada, sendo o plantio direto utilizado atualmente em praticamente toda a bacia (CASTRO *et al.*, 2000).

Com base em dados da Fundação de Economia e Estatística do Estado do Rio Grande do Sul (FEE), o Valor Adicionado Bruto (VAB) Total, a preço básico, estimado para a bacia hidrográfica do rio Ijuí, na porção a montante do posto Santo Ângelo, para o ano de 2009, é de R\$ 3,794 bilhões, sendo R\$ 2,568 bilhões relativo ao setor de serviços, R\$ 620 milhões relativo ao setor industrial e R\$ 606 milhões relativo à agropecuária.

Quanto às atividades agropecuárias, considerando somente a área de estudo, se destacam os municípios de Ijuí (R\$ 91,5 milhões), Panambi (R\$ 59,6 milhões) e Pejuçara (R\$ 57,4 milhões). No setor secundário da economia, relativo às indústrias, se destacam os municípios de Panambi (R\$ 236,2 milhões), Ijuí (R\$ 202,3 milhões) e Cruz Alta (R\$ 89,9 milhões). No setor terciário, de serviços, os municípios com maior participação são Ijuí (R\$ 1,06 bilhões), Cruz Alta (R\$ 687,2 milhões) e Panambi (R\$ 401,4 milhões).

Na Figura 3.3 são ilustrados os municípios localizados parcial ou totalmente na área de estudo. A população estimada para a bacia, na porção a montante do posto Santo Ângelo, de acordo com os resultados do Censo Demográfico divulgado pelo IBGE em 2010, é de 203.129 habitantes, sendo 83,9% residentes em áreas urbanas e 16,1% em área rurais. Da população total, 78.915 residem em Ijuí, 40.621 residem em Cruz Alta, 38.058 em Panambi e 45.535 residem nos demais municípios da região.



Figura 3.3. Municípios localizados parcial ou totalmente na área de estudo.

3.2. MATERIAIS

Os materiais utilizados no presente trabalho podem ser divididos nas seguintes categorias: i) dados hidrológicos e climáticos (séries históricas); ii) dados socioeconômicos; iii) dados de consumo e demanda hídrica; iv) dados cartográficos ou obtidos por sensores remotos; v) aplicativos/softwarewares.

Dados diários hidrológicos e climáticos:

- séries históricas de precipitações disponibilizadas através do portal HidroWeb, da Agência Nacional de Águas (ANA), no período entre 1961 e 2011, em 77 postos pluviométricos inseridos a uma distância de até 100 km dos limites (contorno) da bacia (Figura 3.4);
- séries históricas de precipitações disponibilizadas pelo IPH (Castro et al., 2000), no período entre 1989 e 2011, em 22 postos pluviométricos (Figura 3.4);
- séries históricas de precipitação, temperatura, velocidade do vento, radiação solar, pressão atmosférica e umidade relativa do ar, disponibilizadas através do portal BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) do INMET, no período entre 1961 e 2011, em cinco postos meteorológicos (Figura 3.4);
- série histórica de vazões do posto Santo Ângelo (Cód.: 75230000), localizado nas coordenadas 28,36°S e 54,27°O, disponibilizada no portal HidroWeb, no período entre 1961 e 2011;
- dados diários de precipitação, temperatura, velocidade do vento, radiação solar, pressão atmosférica e umidade relativa do ar simulados pelo modelo climático regional Eta CPTEC, conduzidos por quatro membros do modelo climático global HadCM3, com diferentes níveis de sensibilidade (CNTRL, LOW, MID e HIGH), no período entre 1961 e 1990, na área de bacia do rio Ijuí. As variáveis simuladas foram: precipitação, temperatura, velocidade dos ventos, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e radiação solar.

Dados socioeconômicos:

- dados referentes à contagem da população relativos aos Censos Demográficos de 1980, 1991, 2000 e 2010, disponíveis em um banco de dados do IBGE, no Sistema de

Recuperação Automática (SIDRA), consultando a tabela de população por situação de domicílio (rural e urbano);

- dados municipais de registro civil (nascimentos e óbitos) no período entre 1999 e 2010. Este período foi escolhido em função da disponibilidade de informações no banco de dados SIDRA do IBGE, consultando as tabelas de Nascidos Vivos (1999-2010) e de Óbitos (1999-2010);
- dados disponíveis no banco de dados SIDRA do IBGE, referentes à população do Estado do RS nos Censos Demográficos de 1980, 1991 e 2000, e ao número de nascimentos e óbitos no RS entre os anos de 1984 e 1998;
- dados referentes ao Censo Agropecuário realizado pelo IBGE em 2006, tais como áreas irrigadas e cultivos irrigados por município;
- informações referentes aos rebanhos disponíveis no banco de dados do IBGE, relacionado à Pesquisa Pecuária Municipal, no Sistema de Recuperação Automática (SIDRA), consultando a tabela “Efetivo dos rebanhos”, no período entre 2001 a 2010. Os seguintes rebanhos foram considerados representativos: i) gado leiteiro; ii) gado de corte; iii) suínos; iv) ovinos; v) galinhas; vi) equinos; vii) caprinos; viii) codornas; ix) coelhos.

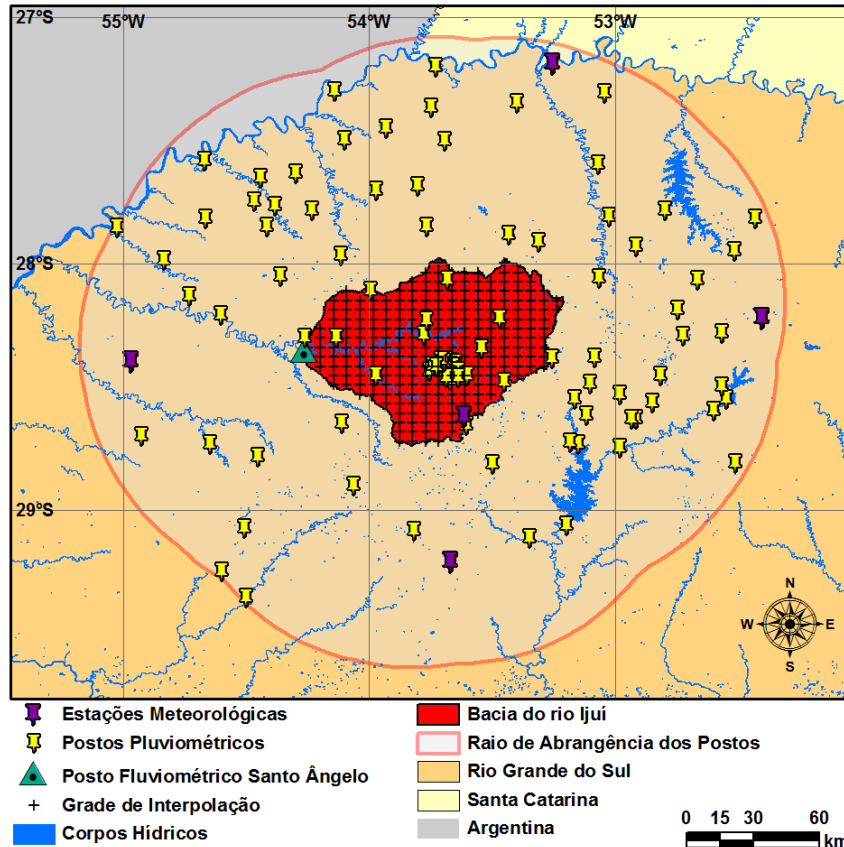


Figura 3.4. Localização dos postos com dados hidrológicos e climáticos utilizados em uma distância de até 100 km em relação aos limites da bacia do rio Ijuí.

Dados de Consumo e Demanda Hídrica:

- registros de consumo médio de água per capita nos municípios da área de estudo, disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, no *website* do Ministério das Cidades, <http://www.cidades.gov.br/serieHistorica/>. Foi consultado o consumo de água *per capita* em cada município, referente ao ano de 2012;
- registros de outorgas de uso da água por atividades agrícolas que necessitam de irrigação, disponibilizados pelo Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria Estadual de Meio Ambiente do RS (DRH/SEMA).

Dados Cartográficos ou de Sensoriamento Remoto:

- imagens obtidas por sensoriamento remoto, do satélite Landsat 5, sensor *Thematic Mapper* (TM), órbita 223, pontos 79 e 80, ambas adquiridas no dia 16 de março de 2011. A coleta destas imagens foi realizada através do *website* <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>, organizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE);
- cartas topográficas da DSG (Exército Brasileiro), digitalizadas e vetorizadas por Hasenack e Weber (2010).
- limites municipais, definidos pelo IBGE, em formato vetorial.

Aplicativos/Softwares:

- MatLab R2010a;
- Microsoft Office 2010: Word, Excel e Access;
- ArcGIS 10.2;
- ENVI 5.1;
- Hidro 1.2.1.

3.3. MÉTODOS

3.3.1. MÓDULO 1: MODELO HIDROLÓGICO MENSAL

No primeiro módulo do trabalho, a proposta foi calibrar e avaliar um modelo hidrológico mensal, baseado em RNAs, composto por variáveis meteorológicas e pluviométricas transformadas. O treinamento da rede foi realizado através do algoritmo retropropagativo com validação cruzada. A simplificação da RNA, com redução de variáveis de entrada e de neurônios na camada interna, foi realizada através de um algoritmo que verifica o desempenho do modelo após a imposição de pequenas perturbações nos dados de entrada da RNA. A avaliação dos modelos testados foi efetuada através de análises visuais comparativas dos hidrogramas e das curvas de permanência, de indicadores quantitativos de desempenho e de uma análise de sensibilidade para compreender e interpretar o funcionamento da RNA. Além disto, foi realizada uma comparação com o modelo hidrológico SMAP, modelo conceitual adaptado para simulações mensais, proposto por Lopes *et al.* (1982).

A primeira etapa deste módulo compreendeu a compatibilização das informações das três fontes de séries históricas (HidroWeb, INMET, IPH), de modo que todos os dados pudessem ser lidos e analisados por um programa padrão. Todas as séries brutas foram consistidas para eliminação ou correção de valores incertos ou duvidosos.

Na segunda etapa, os dados diários de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, radiação solar e velocidade do vento foram interpolados pelo método do vizinho natural para toda a área da bacia, em uma grade regular com espaçamento de 5 x 5 km (Figura 3.4). Este método de interpolação foi o que apresentou os melhores resultados no estudo apresentado por Silva (2011), com séries semelhantes às que foram utilizadas no presente trabalho, também na bacia do rio Ijuí. No estudo citado foram testados também os seguintes métodos: vizinho mais próximo, triangulação linear e o inverso ponderado das distâncias.

O método do vizinho natural (SIBSON, 1981) baseia-se no conceito de área de influência dos pontos amostrais, determinada pelos polígonos de Voronoi. Estes polígonos são obtidos a partir da triangulação de Delaunay. Para cada ponto da grade de interpolação, é calculado o peso de cada ponto amostral em virtude da área de influência. Por fim, o valor

diário de cada variável na bacia foi obtido pela média dos valores interpolados em todos os nós da grade regular.

Na terceira etapa, a estimativa da evapotranspiração de referência foi realizada pelo método de Penman-Monteith (PENMAN, 1948; MONTEITH, 1965), cujo procedimento de cálculo foi descrito no item 2.5 deste manuscrito. O cálculo foi realizado em uma planilha desenvolvida no aplicativo Microsoft Excel.

A quarta etapa envolveu o cálculo dos valores médios mensais de vazão e dos valores acumulados mensais de precipitação e evapotranspiração, no período entre 1961 e 2011. Deste modo, foi obtida uma série de dados mensais para cada uma destas variáveis, consistindo na base de dados para a simulação hidrológica com uso de RNAs.

Na quinta etapa foi realizada a modelagem hidrológica baseada em RNAs. A programação do modelo de RNA foi realizada com o editor de scripts do aplicativo MATLAB R2010a, utilizando, no treinamento, o algoritmo retropropagativo (RUMELHART *et al.*, 1986) com validação cruzada, com uma camada de nós de entrada (variáveis brutas ou transformadas da precipitação e da evapotranspiração), uma camada de neurônios intermediários e outra camada de saída com um único neurônio (vazão simulada).

Conforme o teorema apresentado por Hecht-Nielsen (1987), dada uma relação contínua $r:[0,1]^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, existe uma rede neural progressiva, com apenas uma camada interna e com $2n+1$ neurônios artificiais nesta camada, capaz de aproximá-la exatamente. Ainda sobre a arquitetura das RNAs, Hornik *et al.* (1989) enunciou que dada uma relação mensurável $r:\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, existe uma RN progressiva capaz de aproximá-la, com qualquer precisão desejada, dispondo apenas de uma camada interna e de um número compatível de neurônios artificiais nesta camada, desde que o treinamento seja adequado.

No presente trabalho, após diversos testes, o número de neurônios na camada intermediária da RNA foi definido como sendo igual ao número de variáveis de entrada. Esta característica foi adotada também com base nos resultados obtidos pela pesquisa de Oliveira *et al.* (2013), na qual foram realizadas 83 simulações em diversas bacias do rio Jacuí, RS, Brasil. No estudo, foram testadas quantidades de neurônios na camada interna (entre 1 e $2n+1$, onde n é o número de variáveis de entrada), sendo comparadas através do critério de parcimônia *Akaike's Information Criterion* (AIC), proposto por Akaike (1974). Cerca de 90% das RNAs selecionadas por este critério apresentaram um número de neurônios na camada intermediária igual ou inferior ao número de variáveis de entrada.

Tendo em vista a utilização do algoritmo retropropagativo para o treinamento da rede, a função de ativação utilizada foi a sigmoide unipolar, sendo esta, não linear, contínua e derivável em todo o seu domínio. A função sigmoide unipolar apresenta saídas no intervalo entre 0 e 1. A derivada é calculada em função da saída, conforme ilustram as Equações 3.1 e 3.2. O funcionamento da RNA, considerando apenas uma camada intermediária, é expresso pela Equação 3.3.

$$a = f(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (3.1)$$

$$f'(n) = a(1 - a) \quad (3.2)$$

$$y = f_s \left(\sum_h w_s f_h \left(\sum_e w_h x + b_h \right) + b_s \right) + e_s \quad (3.3)$$

Onde: a é a saída da função de ativação; n é a entrada líquida; x e y são as matrizes com as entradas (e) e as saídas (s), respectivamente; w_h , b_h , w_s , b_s são os pesos sinápticos (w) e tendências (b) das camadas interna (h) e de saída (s); f_h e f_s são as funções de ativação da camada interna e de saída, respectivamente; e_s é o erro esperado na camada de saída.

Quanto ao treinamento da rede, o algoritmo retropropagativo (RUMELHART *et al.*, 1986) é um método de procura dos pesos sinápticos para a minimização dos erros (Equação 3.4), com o uso da Regra Delta (WIDROW e HOFF, 1960). O uso desta regra para o treinamento da camada intermediária do modelo requer o conhecimento dos erros nesta camada, calculados pela Equação 3.5, em que os erros da camada anterior (h) dependem somente dos erros e das propriedades da camada posterior (s).

$$w_{k+1} = w_k + (\tau e_k \delta_k P_k) \quad (3.4)$$

$$e_h = \Sigma(w_s e_s \delta_s) \quad (3.5)$$

Onde: w_k são os valores dos pesos sinápticos no ciclo k; τ é a taxa de aprendizado; e_k são os erros das saídas da camada; δ_k é a derivada das funções de ativação; P_k são as entradas na própria camada, no ciclo k; e_h é o erro na camada interna; w_s são os pesos da camada posterior; δ_s são as derivadas da função de ativação na camada posterior.

Em cada iteração, o algoritmo é composto de aplicações sucessivas, com cálculo dos erros nas camadas e da atualização dos pesos sinápticos. Cada aplicação é um ciclo de treinamento, sendo necessários, muitas vezes, milhares de ciclos, dependendo da complexidade do problema.

Neste estudo, foram definidos dois critérios de parada:

i) por precisão desejada, definida como um erro máximo de 0,001 nas amostras;

ii) por falta de convergência: quando o primeiro critério de parada não é atingido, definiu-se o número de 8.000 ciclos na primeira iteração. Nas iterações seguintes, utilizou-se o número de ciclos necessários para a estabilização dos erros no procedimento anterior, acrescido de 20% (margem de segurança).

Na inicialização de cada iteração do processo, os pesos sinápticos são gerados aleatoriamente e a taxa de aprendizagem é redefinida para 0,01. A aceleração da convergência se dá pela variação da taxa de aprendizado durante os ciclos de treinamento, de acordo com as soluções apresentadas em Vogl *et al.* (1988). A técnica consiste na aceitação ou não dos novos pesos sinápticos, de acordo com o desempenho (normalmente, representado pelo erro quadrático), em um ciclo, em função dos erros no ciclo anterior, com aumento da taxa de aprendizado no primeiro caso (a taxa é multiplicada por 1,1), e redução desta no segundo (a taxa é multiplicada por 0,5).

Como o método de treinamento é dependente das condições iniciais, o treinamento pode estacionar em mínimos locais. Tal fenômeno é muito frequente em redes complexas. Para contornar a incerteza associada à aleatoriedade dos valores iniciais dos parâmetros da RNA para o treinamento, o procedimento foi repetido 30 vezes, de forma iterativa, adotando-se o modelo de melhor desempenho. Este número de iterações foi definido com base no estudo de Dornelles *et al.* (2013), no qual se pode constatar que, de modo geral, após 30 iterações, o desempenho dos modelos hidrológicos com RNAs manteve-se estável, com melhoramentos pouco significativos.

Para evitar o superajustamento, adotou-se um método de interrupção antecipada: a técnica de validação cruzada. O superajustamento ocorre quando o treinamento reproduz até mesmo o comportamento individual, incluindo os erros e a aleatoriedade das amostras de treinamento. Tal fenômeno prejudica a capacidade de generalização do modelo.

A técnica de validação cruzada utiliza, para o treinamento, além da série na qual será aplicado o algoritmo retropropagativo, uma série adicional (série de validação) para determinar o ponto ideal de parada durante o treinamento, para que este não perca a sua

capacidade de generalização, evitando, desta forma, o superajustamento. Neste processo, os erros do treinamento seguem diminuindo, enquanto os erros da série de validação, a partir de um determinado ciclo, tornam a crescer. Este é o instante em que o limiar é atingido, a partir do qual a capacidade de generalização fica comprometida, havendo, portanto, a interrupção do treinamento (HECHT-NIELSEN, 1990).

O conjunto inicial de variáveis de entrada para a simulação da vazão média mensal no tempo t , $Q(t)$, foi composto por: a) precipitação nos meses t e $t-1$, $P(t)$ e $P(t-1)$, respectivamente; b) evapotranspiração de referência nos meses t e $t-1$, $E(t)$ e $E(t-1)$, respectivamente; c) precipitação e evapotranspiração de referência média nos meses t e $t-1$, \bar{P} e \bar{E} , respectivamente; c) balanço de água (saldo), isto é, a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração de referência, considerando o apenas o mês t , $S(t)$; d) saldo médio de água nos meses t e $t-1$, \bar{S} ; e) valores transformados da precipitação e do saldo de água, respectivamente, fP e fS , pela aplicação de filtros de decaimento exponencial (Equações 3.6 e 3.7).

$$fP_t = (1 - \alpha).fP_{t-1} + \alpha.P_t \quad (3.6)$$

$$fS_t = (1 - \beta).fS_{t-1} + \beta.S_t \quad (3.7)$$

Onde: fP e fS são valores transformados pela aplicação dos filtros de decaimento exponencial às precipitações e ao saldo de água, respectivamente; P é a precipitação; S é o saldo de água - diferença entre precipitação e evapotranspiração; α e β são coeficientes que variam entre 0 e 1, que dependem de calibração.

A calibração destes coeficientes foi realizada com base na correlação linear (r) obtida entre as variáveis filtradas e a vazão observada, sendo selecionados os valores que resultaram no maior coeficiente r para o conjunto de dados. Assim, os valores obtidos para α e β foram, respectivamente, 0,52 e 0,41.

As duas entradas resultantes da aplicação do filtro com decaimento exponencial (fP e fS) apresentam um comportamento muito similar às vazões observadas na bacia, com elevado coeficiente r (superior a 0,87). Tal constatação já havia sido apresentada em um estudo anterior, na mesma área de estudo (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Na Figura 3.5 é ilustrado o conjunto total de dados utilizados. Já na Tabela 3.1 é apresentada a divisão das amostras em três séries de dados (treinamento, validação e

verificação). Como os dados de entrada foram normalizados no processo de escalonamento que antecede as simulações, a divisão das amostras nas três séries foi realizada de modo a preservar os valores médios, os extremos e os valores de dispersão dos dados, garantindo que os três conjuntos de amostras possuam características semelhantes.

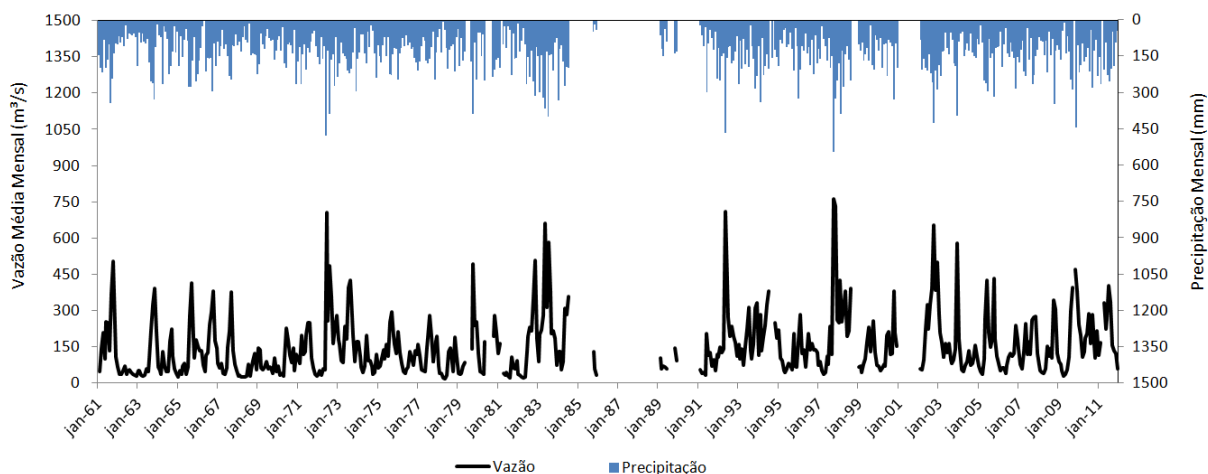


Figura 3.5. Hidrograma na bacia do rio Ijuí, seção do posto Santo Ângelo, no período entre 1961 e 2011.

Tabela 3.1. Séries de dados para o treinamento, a validação e a verificação do modelo hidrológico com RNAs.

Série	Nº de Amostras	% de Amostras	Períodos (mês/ano)
Treinamento	264	51,4%	02/1966 - 06/1974
			02/1978 - 02/1998
Validação	122	23,7%	09/1963 - 01/1966
			07/1974 - 01/1978
			09/2007 - 12/2011
Verificação	128	24,9%	02/1961 - 08/1963
			03/1998 - 08/2007
Total	514	100,0%	01/1961 - 12/2011

Ainda na quinta etapa, referente à modelagem hidrológica, foi executado um algoritmo para a simplificação da RNA, seguindo a metodologia detalhada em Oliveira *et al.* (2014). Com este método é possível estimar-se a importância da contribuição das variáveis de entrada no modelo e realiza a redução da dimensionalidade da RNA através da exclusão das variáveis menos importantes. O método pode ser subdividido nos seguintes passos:

i) realização de uma simulação com a rede inicial, composta por todas as variáveis de entrada inicialmente selecionadas (10 entradas), com verificação do desempenho através de

algum indicador. Nesta etapa, o indicador utilizado para a verificação do desempenho foi o RMSE (*Root Mean Square Deviation*);

ii) imposição de pequenas perturbações (20 séries) nos valores de cada uma das variáveis de entrada, seguida de uma nova simulação e medida de desempenho. A utilização de 20 séries de perturbações, com diferentes magnitudes, em cada variável de entrada, mostrou-se necessária para estabilizar os resultados e não comprometer a análise;

iii) cálculo do Índice de Contribuição (CI), de acordo com a Equação 3.8, para cada variável de entrada. Este índice consiste na média das diferenças de RMSE, obtidas entre a simulação com dados observados e cada uma das 20 séries de dados perturbados;

$$CI_x = \frac{\sum |RMSE_o - RMSE_i|}{p} \quad (3.8)$$

Onde: CI_x é o Índice de Contribuição da variável de entrada x ; $RMSE_o$ é o valor do RMSE do modelo inicial, com dados originais; $RMSE_i$ é o valor de RMSE do modelo alterado, com perturbação dos registros da variável x , com valores de i variando de 1 a p ; p é o número de séries de perturbações.

iv) cálculo do Índice de Contribuição Relativa (RCI) de cada variável, que consiste na proporção (%) do CI de cada variável no somatório dos CIs das 10 variáveis;

v) ordenamento das variáveis de entrada pelo RCI e exclusão das variáveis menos importantes, cujo RCI foi inferior a 5%;

vi) repetição das cinco atividades anteriores até que nenhuma variável de entrada possua RCI inferior a 5%, quando atinge-se um modelo simplificado, somente com as variáveis que realmente influenciam na saída da RNA.

Após a simplificação do modelo, com a obtenção de uma arquitetura de RNA mais eficiente, a sexta etapa consistiu na avaliação do modelo obtido, considerando os seguintes itens:

i) análise visual comparativa dos hidrogramas (observado e simulado);

ii) análise visual comparativa das curvas de permanência das vazões mensais, observadas e simuladas;

iii) análise quantitativa através de indicadores de desempenho, como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), o RMSE e o erro relativo absoluto (ER);

iv) análise de sensibilidade do modelo, através de uma adaptação da metodologia apresentada por Lek *et al.* (1996): nesta adaptação verificou-se se o efeito causado na vazão de saída, ao alterar os valores de cada variável de entrada (fixando as demais variáveis em seus valores médios), é condizente com os processos físicos conhecidos. Neste estudo, os valores adotados para a análise de sensibilidade de cada variável de entrada variaram de acordo com os dados apresentados na Tabela 3.2. Os valores adotados extrapolam os limites dos valores observados de cada variável, permitindo assim obter uma avaliação do comportamento da RNA em situações mais extremas do que as registradas na série histórica. Para a extrapolação dos limites foram observadas as condições climáticas previstas para o futuro, com base no modelo Eta, no período entre 2011 e 2041.

Tabela 3.2. Intervalo de valores observados na série histórica e adotados para a análise de sensibilidade de cada variável.

Variáveis de Entrada	Valores Observados (mm)			Limites Adotados (mm)	
	Média	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Precipitação: $P(t)$ e $P(t-1)$	143,8	6,7	546,9	0,0	630,0
Precipitação média (2 meses): \bar{P}	143,8	17,6	436,7	0,0	510,0
Evapotranspiração: $E(t)$ e $E(t-1)$	109,0	35,1	208,4	6,0	240,0
Evapotranspiração média (2 meses): \bar{E}	109,0	39,6	208,3	9,0	240,0
Balanço de água: $S(t)$	35,3	-189,4	456,5	-300,0	570,0
Balanço médio de água (2 meses): \bar{S}	69,7	-356,0	663,5	-540,0	840,0
filtro da precipitação: fP	144,2	45,8	357,4	0,0	390,0
filtro do balanço de água: fS	35,2	-109,5	246,8	-180,0	300,0

Na sétima e última etapa foi realizada uma comparação do desempenho da RNA com relação ao desempenho do modelo SMAP. Trata-se de um modelo semiconceitual concentrado, do tipo chuva-vazão, que utiliza os parâmetros do modelo SCS para a separação do escoamento. A principal diferença entre o SMAP e o modelo SCS é que, no primeiro, é possível a simulação de séries contínuas de vazões, não apenas cheias de projeto. O modelo SMAP, na versão mensal, utiliza apenas dois reservatórios (subsuperficial e subterrâneo).

A escolha do modelo SMAP para a comparação se deve também aos bons resultados obtidos com a sua aplicação em estudos recentes como em Block *et al.* (2009) e Kwon *et al.* (2012). Além disso, outro fator que influenciou na escolha do modelo hidrológico está

relacionado à sua simplicidade, com apenas quatro parâmetros: capacidade de saturação do solo, coeficiente de escoamento, coeficiente de recarga e coeficiente de recessão do escoamento de base. Estes parâmetros devem ser calibrados com o uso de alguma função objetivo, como por exemplo, o RMSE.

3.3.2. MÓDULO 2: ANÁLISE DAS INCERTEZAS ASSOCIADAS ÀS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS SIMULADAS PELO MODELO ETA

O conjunto de métodos adotados neste módulo compreendeu a utilização de dados pluviométricos, climáticos e hidrológicos, observados e simulados, para verificar a consistência dos cenários climáticos fornecidos pelo modelo climático regional Eta CPTEC/HadCM3, nos quatro membros com diferentes sensibilidades climáticas: CNTRL, LOW, MID e HIGH.

Como não é possível avaliar os cenários propostos para o século XXI, uma vez que não dispomos de dados observados, o período de controle, no qual aplicam-se as correções nos dados climáticos e calibra-se o modelo hidrológico, foi definido entre 1961 a 1975, e o período de avaliação, no qual verifica-se os resultados referentes aos cenários climáticos e à disponibilidade hídrica, foi de 1976 a 1990.

A definição dos períodos de controle e de avaliação apresentam uma limitação quanto à representatividade das séries, tendo em vista que 15 anos é considerado um período curto para avaliação climática. Ainda assim, esta abordagem foi implementada na presente Tese, por representar a única alternativa para avaliar as incertezas associadas aos cenários climáticos e aos métodos de correção.

Este módulo foi estruturado em cinco etapas: i) interpolação espacial dos dados de temperatura, velocidade dos ventos, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e radiação solar; ii) correção (*Bias Correction*) das séries simuladas de precipitação, temperatura, velocidade dos ventos, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e radiação solar; iii) cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith; iv) simulação hidrológica da vazão mensal, com o uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs); v) avaliação

comparativa entre as condições simuladas e as observadas de precipitação, evapotranspiração e vazão.

A primeira etapa consistiu na interpolação espacial das séries simuladas através do modelo Eta CPTEC/HadCM3 em quatro cenários de sensibilidade climática (CNTRL, LOW, MID e HIGH), englobando seis variáveis diárias (precipitação, temperatura, velocidade dos ventos, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e radiação solar), no período entre 1961 e 1990. A grade de interpolação utilizada, com resolução de 5 km, foi a mesma do Módulo 1, quando foi realizada a interpolação das variáveis observadas no mesmo período. O método de interpolação utilizado foi o do vizinho natural, assim como no módulo anterior.

Por fim, ainda na primeira etapa, foi calculado o valor médio diário das cinco variáveis climáticas e da precipitação na bacia hidrográfica do rio Ijuí, considerando os dados simulados pelo modelo Eta, em cada um dos quatro membros.

Na segunda etapa foi realizada a correção das variáveis climáticas simuladas pelo modelo Eta, uma vez que as saídas dos modelos climáticos não devem ser utilizadas de forma direta para a estimativa de disponibilidade hídrica no futuro (GRAHAM, 2000). Nesta etapa, inicialmente, foi realizado o cálculo da precipitação acumulada mensal para os quatro cenários simulados pelo modelo Eta. Em seguida, as séries foram divididas em dois períodos: i) período de controle (1961-1975); ii) período de avaliação (1976-1990).

Para o tratamento dos dados de precipitação, foram testados quatro métodos de correção revisados no Capítulo 2 deste manuscrito: i) *Delta Change Approach*; ii) *Direct Approach*; iii) *Quantile-Based* mensal; iv) *Quantile-Based* trimensal. Este procedimento resultou em 16 cenários corrigidos de precipitação mensal, sendo quatro cenários corrigidos para cada membro original (CNTRL, LOW, MID e HIGH), no período de avaliação, entre 1976 e 1990.

Método de Correção nº 1: chamado de *Delta Change Approach*, foi utilizado por Graham (2000) e Bergström *et al.* (2001). A precipitação corrigida no período de avaliação (1976-1990), no mês k , no ano j , sendo que j varia de 1 a 15 (ambos os períodos possuem 15 anos), é igual à precipitação observada no período de controle (1961-1975), no mês k , no ano j , multiplicada por um fator de correção. O fator de correção neste método corresponde à razão entre as médias da precipitação simulada no período de avaliação e no período de controle, no mês k (Equação 3.9). Assim, neste método, os mesmos padrões de precipitação

observados no passado são transferidos para o futuro, promovendo apenas alterações na magnitude das precipitações de acordo com a tendência estabelecida pelo modelo Eta.

$$Pcor(76 - 90)_{k/j} = Pobs(61 - 75)_{k/j} * \left[\frac{\overline{Psim(76 - 90)_k}}{\overline{Psim(61 - 75)_k}} \right] \quad (3.9)$$

Onde: $Pcor(76 - 90)_{k/j}$ é a precipitação corrigida no período de avaliação (1976-1990), no mês k e no ano j ; $Pobs(61 - 75)_{k/j}$ é a precipitação observada no período de controle (1961-1975), no mês k e no ano j ; $\overline{Psim(76 - 90)_k}$ é a média da precipitação simulada no período de avaliação para o mês k ; $\overline{Psim(61 - 75)_k}$ é a média da precipitação simulada no período de controle para o mês k .

Método de Correção n° 2: método de aplicação direta (*Direct Approach*) utilizado por Lenderink *et al.* (2007). A precipitação corrigida no período de avaliação (1976-1990), no mês k , no ano j , é igual à precipitação simulada no mesmo período, mês e ano, multiplicada por um fator de correção. O fator de correção neste método corresponde à razão entre a média da precipitação observada no período de controle (1961-1975), no mês k , e a média da precipitação simulada no mesmo período e mês (Equação 3.10). Assim, neste método, o cenário futuro obtido diretamente da aplicação do modelo climático Eta é mantido, promovendo apenas alterações na magnitude das precipitações de acordo com as diferenças verificadas no passado entre o modelo Eta e a precipitação observada.

$$Pcor(76 - 90)_{k/j} = Psim(76 - 90)_{k/j} * \left[\frac{\overline{Pobs(61 - 75)_k}}{\overline{Psim(61 - 75)_k}} \right] \quad (3.10)$$

Onde: $Psim(76 - 90)_{k/j}$ é a precipitação simulada no período de avaliação, no mês k e no ano j ; $\overline{Pobs(61 - 75)_k}$ é a média da precipitação observada no período de controle para o mês k ; $\overline{Psim(61 - 75)_k}$ é a média da precipitação simulada no período de controle para o mês k .

Método de Correção n° 3: método *Quantile-Based* mensal, semelhante ao aplicado em Bárdossy e Pegram (2011), baseado nas diferenças entre as curvas de probabilidade acumulada das precipitações diárias. Porém, neste caso, o método foi adaptado para as precipitações mensais, com ajuste de uma distribuição estatística para cada mês, considerando somente a precipitação média na bacia. Neste método de correção, foram ajustadas algumas

distribuições estatísticas (Birnbaum-Saunders, Gamma, Log-Normal, Nakagami, Normal e Weibull) aos valores de precipitação acumulada, considerando apenas o período de controle, para a série observada e a série simulada. Após a realização do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, constatou-se que a distribuição de probabilidades de Weibull foi a que apresentou o melhor ajuste, a um nível de significância de 0,05, na maioria dos meses do ano, em relação aos dados observados.

Em seguida, através da função ajustada à série simulada no período de controle, descobre-se a probabilidade associada a cada precipitação simulada no período de avaliação. Por fim, através da função inversa da distribuição ajustada aos dados observados no período de controle, obtém-se um novo valor de precipitação corrigido, que está associado à probabilidade obtida no passo anterior. Este procedimento foi repetido para cada mês.

Método de Correção nº 4: método *Quantile-Based* trimestral, semelhante ao método anterior, porém com ajuste de uma distribuição estatística para as precipitações mensais a cada trimestre: Janeiro-Fevereiro-Março, JFM (1º trimestre); Abril-Maio-Junho, AMJ (2º trimestre); Julho-Agosto-Setembro, JAS (3º trimestre); Outubro-Novembro-Dezembro, OND (4º trimestre).

Para o tratamento dos demais dados climáticos simulados pelo modelo Eta, no período de avaliação, entre 1976 e 1990, foi utilizado o método de correção *Direct Approach*. Este procedimento resultou em 4 cenários corrigidos do clima mensal, um para cada membro original (CNTRL, LOW, MID e HIGH).

O valor da variável climática corrigida z , sendo z uma das cinco variáveis climáticas utilizadas neste estudo, no período de avaliação (1976-1990), no dia i , mês k , no ano j , é igual ao valor da mesma variável, simulada no período de avaliação (1976-1990), no dia/mês/ano correspondente, somada à diferença entre a média da variável climática observada no período de controle (1961-1975), no mês k , e a média da mesma variável simulada no mesmo período e mês (Equação 3.11). Assim, neste método, o cenário futuro obtido diretamente da aplicação do modelo climático Eta é mantido, promovendo apenas alterações na magnitude das variáveis climáticas de acordo com as diferenças verificadas no passado entre o modelo Eta e o observado.

$$C_{zcor}(76 - 90)_{i/k/j} = C_{zsim}(76 - 90)_{i/k/j} + [\overline{C_{zobs}(61 - 75)_k} - \overline{C_{zsim}(61 - 75)_k}] \quad (3.11)$$

Onde: $C_{zcor}(76 - 90)_{i/k/j}$ é o valor da variável climática z corrigida para o período de avaliação, no dia i , no mês k , no ano j ; $C_{zsim}(76 - 90)_{i/k/j}$ é o valor da mesma variável climática simulada no mesmo período, dia, mês e ano; $\overline{C_{zobs}(61 - 75)_k}$ é a média observada da variável climática z , no período de controle, no mês k ; $\overline{C_{zsim}(61 - 75)_k}$ é a média simulada da variável climática z , no período de controle, no mês k .

Na terceira etapa, foi realizado o cálculo da evapotranspiração de referência (diária) pelo método de Penman-Monteith para os quatro cenários climáticos simulados e corrigidos, no período entre 1976 e 1990. Após o cálculo da evapotranspiração diária, estes valores foram convertidos para o intervalo de tempo mensal, compatibilizando com as séries de precipitação acumulada mensal para a modelagem hidrológica. Deste modo, ao final da terceira etapa, se dispõe de 16 cenários de precipitação acumulada mensal (quatro para cada membro) e quatro cenários de evapotranspiração acumulada mensal (um para cada membro).

Em seguida, a quarta etapa compreende a simulação hidrológica com uso do modelo baseado em RNAs que foi estruturado, calibrado e avaliado no Módulo 1 deste trabalho. A simulação gerou 16 cenários de vazão mensal para o período de avaliação, entre 1976 e 1990.

Por fim, na quinta e última etapa do Módulo 2, foram realizadas análises comparativas entre as condições observadas e simuladas. Quanto à precipitação e à evapotranspiração, foram avaliados apenas três indicadores para cada cenário:

- i) precipitação e evapotranspiração média anual;
- ii) precipitação e evapotranspiração média mensal;
- iii) curva anual de probabilidade de excedência das precipitações mensais e da evapotranspiração mensal.

Em relação à vazão, foram avaliados os seguintes itens:

- i) vazão média de longo período (QMLP);
- ii) vazão média mensal;
- iii) desvio padrão das vazões mensais;
- iv) curva anual de permanência das vazões médias mensais;
- v) curvas trimestrais de permanência das vazões médias mensais;
- vi) vazões baixas, com permanência superior a 90% ($Q > 90$);
- vii) vazões altas, com permanência inferior a 10% ($Q < 10$).

3.3.3. MÓDULO 3: MODELAGEM ESTOCÁSTICA E DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO FUTURO

O Módulo 3 consiste na modelagem estocástica para análise das incertezas e possíveis alterações na disponibilidade hídrica no futuro com base em um cenário de mudança climática, selecionado a partir dos resultados obtidos no Módulo 2. Este módulo é composto pelas seguintes etapas: i) seleção de um cenário climático para o futuro (2011-2040); ii) interpolação espacial das variáveis climáticas no futuro (2011-2040); iii) correção da série projetada para o futuro (*Bias Correction*) pelo modelo Eta; iv) estimativa da evapotranspiração de referência; v) simulação hidrológica da vazão mensal no período entre 2011 e 2040; vi) modelagem estocástica para geração de séries sintéticas de vazão mensal no futuro.

Uma vez que o presente estudo apresenta como enfoque uma abordagem estocástica que considera as incertezas associadas às diversas etapas que compõem a modelagem da disponibilidade hídrica no futuro, foi necessário adotar um cenário climático para testar a metodologia. Esta escolha foi realizada tendo-se em consideração os resultados obtidos no Módulo 2, quando testou-se quatro membros do modelo Eta e quatro métodos de correção dos dados climáticos em um período do passado (1975-1990).

Após a seleção do cenário climático para o futuro, a segunda etapa consistiu na interpolação espacial das seis variáveis (precipitação, temperatura, velocidade dos ventos, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e radiação solar) simuladas no intervalo de tempo diário pelo modelo Eta CPTEC/HadCM3, no período entre 2011 e 2040. A grade de interpolação utilizada foi a mesma dos módulos anteriores, quando foram realizadas a interpolação das variáveis observadas no passado (1961-1990). O método de interpolação utilizado foi o do vizinho natural, assim como no módulo anterior.

A terceira etapa compreendeu a correção das séries projetadas pelo modelo Eta, referentes à precipitação, temperatura, velocidade dos ventos, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e radiação solar no futuro, tendo como referência o método de correção que apresentou os melhores resultados no Módulo 2.

Na quarta etapa, foi realizado o cálculo da evapotranspiração de referência (diária) para o cenário climático simulado e corrigido no período futuro (2011-2040), utilizando o método de Penman-Monteith. Os valores diários de evapotranspiração foram convertidos para

o intervalo de tempo mensal, compatibilizando com a série de precipitação acumulada mensal para a modelagem hidrológica.

Em seguida, a quinta etapa compreendeu a simulação hidrológica com uso do modelo baseado em RNAs que foi estruturado, calibrado e avaliado no Módulo 1 deste trabalho. A simulação gerou 1 cenário de vazão mensal para o período futuro, entre 2011 e 2040.

Na última etapa, foi realizada a modelagem estocástica para geração de séries sintéticas de vazão mensal no futuro. No presente estudo, foi desenvolvido um modelo estocástico do tipo multiplicativo para a geração de séries de vazões mensais, baseado na estrutura de um modelo periódico autorregressivo (PAR). Neste modelo, é realizada a suposição de que a vazão é o resultado do produto de quatro componentes, que devem ser estimados na seguinte sequência:

i) componente de tendência de longo período (C1), que depende da posição no tempo, mês (m) e ano (a);

ii) componente cíclico ou sazonal (C2), que depende apenas do mês (m);

iii) componente de dependência temporal (C3);

iv) componente aleatório (C4).

Neste modelo, os três primeiros componentes são modelados de modo determinístico, enquanto que o componente aleatório é regido por leis de probabilidade. O produto dos quatro componentes (Equação 3.12), durante todos os intervalos de tempo da modelagem, resulta em uma sequência estocástica de vazões mensais ($Q_{m/a}$).

$$Q_{m/a} = C1_{m/a} * C2_m * C3 * C4 \quad (3.12)$$

Deste modo, inicialmente, o processo de modelagem estocástica para a geração de séries de vazões mensais compreendeu uma análise para verificar a estacionariedade da série observada ou simulada e remover/isolar as tendências de longo período (C1). Este processo é necessário para que se possa isolar os demais componentes (C2 a C4), tanto no período de base (1961-1990) quanto no período futuro (2011-2040).

Para isolar e remover a tendência observada na série de vazões médias mensais no período de base (1961-1990) foi ajustada uma função de tendência linear, representada pela Equação 3.13, que calcula a vazão apenas em função do intervalo de tempo (eixo x, em

meses, variando de 1 a 360). Em seguida, a vazão calculada pela função linear ($Qtend$) é dividida pela vazão média de longo período observada ($QMLP$), para se obter um fator de correção que representa o primeiro componente do modelo, de tendência de longo período ($C1$), conforme a Equação 3.14. Por fim, para se obter uma vazão estacionária ($Qest$), aplicou-se a Equação 3.15, na qual a vazão observada ($Qobs$) é dividida pelo componente $C1$.

$$Qtend = 0,2459x + 98,633 \quad (3.13)$$

$$C1 = \frac{Qtend}{QMLP} \quad (3.14)$$

$$Qest = \frac{Qobs}{C1} \quad (3.15)$$

Na série de vazões médias mensais simuladas no período futuro (2011-2040) também foi ajustada uma função de tendência linear, representada pela Equação 3.16, que calcula a vazão apenas em função do intervalo de tempo (eixo x , em meses, variando de 1 a 360) para a remoção da tendência verificada. Em seguida, foram aplicadas as Equações 3.14 e 3.15 para a obtenção da série estacionária de vazões mensais no período futuro (2011-2040).

$$Qtend = 0,3105x + 143,38 \quad (3.16)$$

Após a definição da tendência de longo período ($C1$) para ambas as séries (base e futuro), os demais componentes do modelo foram estimados com base na série estacionária. O componente cíclico ou sazonal ($C2_m$) foi calculado como a média das vazões em cada mês (Tabela 3.3), nos períodos de base (1961-1990) e futuro (2011-2040).

Em seguida, foi realizada a modelagem do componente de dependência temporal ($C3$), que representa a influência dos valores de vazão dos p meses anteriores na vazão do tempo atual. Nesta etapa, fez-se uma análise da correlação da vazão no tempo atual (t) em relação aos tempos anteriores ($t-1, t-2, \dots, t-12$), para cada mês, nas duas séries estacionárias (base e futuro), na qual se pôde constatar, de modo geral, uma dependência temporal significativa até o tempo $t-3$, caracterizando um modelo de ordem 3.

No modelo multiplicativo, o componente $C3$ é um fator adimensional, com média igual a 1 ao longo da série hidrológica, obtido pela razão entre a vazão observada

(estacionária), no mês m , ano a , e a vazão média no mês m ($C2_m$), conforme mostra a Equação 3.17. Tal equação só pode ser utilizada quando se têm dados observados. No caso da modelagem estocástica, assume-se que este fator adimensional depende apenas do valor de $C3$ nos p meses anteriores, permitindo assim modelar o componente $C3$ em um intervalo de tempo qualquer. O comportamento deste componente pode ser modelado (calibrado) por uma regressão múltipla (Equação 3.18) ou até mesmo por uma estrutura mais complexa, como uma RNA com três variáveis de entrada (Equação 3.19).

Tabela 3.3. Componente cíclico (sazonal) nos períodos de base e futuro: vazão média mensal na bacia hidrográfica do rio Ijuí, posto Santo Ângelo.

Mês	Vazão Média Mensal (m ³ /s)	
	Base (1961-1990)	Futuro (2011-2040)
Janeiro	99,7	126,4
Fevereiro	85,8	181,1
Março	74,7	159,7
Abril	95,8	200,5
Mai	114,9	249,1
Junho	160,0	280,3
Julho	180,8	263,6
Agosto	199,0	212,8
Setembro	228,5	264,1
Outubro	187,2	228,4
Novembro	166,7	128,2
Dezembro	126,3	95,8

$$C3 = \frac{Q_{est_{m/a}}}{C2_m} \quad (3.17)$$

$$C3_t = f(C3_{t-1}, C3_{t-2}, C3_{t-3}) \quad (3.18)$$

$$C3_t = RNA(C3_{t-1}, C3_{t-2}, C3_{t-3}) \quad (3.19)$$

Neste estudo, optou-se pela utilização de um modelo baseado em RNAs, com a aplicação do mesmo algoritmo detalhado na etapa da modelagem hidrológica, porém utilizando como variáveis de entrada os valores de $C3$ nos tempos $t-1$, $t-2$ e $t-3$, e como saída esperada o valor de $C3$ no tempo t . Após alguns testes e análises dos resultados, optou-se por uma rede neural com três neurônios na camada oculta, totalizando 16 pesos sinápticos.

O componente aleatório (C4) é definido como a parte não explicada pelos outros três componentes determinísticos, isto é, que representa as mudanças no comportamento hidrológico provocadas por eventos extremos ocorridos no mês. Esta parcela da vazão mensal é representada pela razão entre a vazão estacionária (mês m , ano a) e o produto dos componentes C2 (mês m) e C3, conforme mostra a Equação 3.20. Assim como no componente C3, os valores de C4 tendem a um valor médio próximo a 1.

$$C4 = \frac{Q_{est_{m/a}}}{C2_m * C3} \quad (3.20)$$

Em seguida, visando a geração de séries sintéticas, verificou-se, primeiramente, se o componente C4 apresentava algum padrão relacionado à parcela determinística do modelo. Considerando a série estacionária do período de base (1961-1990), verificou-se que o valor de C4 apresentava dois padrões levemente distintos: i) quando o valor de C3 é superior a 1, resultando em valores de vazão superiores à média mensal na parcela determinística do modelo (períodos de cheias), a tendência do componente aleatório C4 é apresentar valores menos dispersos, variando de 0,33 a 2,83, com média levemente inferior (0,97); ii) quando o valor de C3 é inferior a 1, resultando em vazões inferiores à média mensal na parcela determinística do modelo (períodos de estiagens), a tendência de C4 é apresentar maior dispersão, variando de 0,21 a 7,24, com média suavemente superior (1,03).

As oscilações mais marcantes (inflexões ou impulsos) no hidrograma mensal, que dependem do componente aleatório C4, ocorrem predominantemente em períodos de estiagem, quando a vazão está abaixo da média observada para o mês. Este padrão observado na série histórica explica a suave tendência verificada nos valores deste componente.

Também considerando a série estacionária do período futuro (2011-2040), quando o valor de C3 foi superior a 1 (períodos de cheias), o componente aleatório C4 apresentou valores menos dispersos, variando de 0,24 a 2,46, com média levemente inferior (0,99). Já quando o valor de C3 foi inferior a 1 (períodos de estiagens), o componente C4 oscilou entre 0,13 e 4,98, com média de 1,06.

Uma vez identificadas as curvas de probabilidade observadas em ambos os períodos (base e futuro), foram ajustadas algumas distribuições estatísticas (Gama, Log-Normal e Weibull) aos valores do componente aleatório C4. Após a realização do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, constatou-se que a distribuição de probabilidades Gama com três

parâmetros apresentou o melhor ajuste ao componente modelado a um nível de significância de 0,05.

Após o ajuste dos quatro componentes, as séries estocásticas para ambos os períodos foram geradas tendo como referência os parâmetros calculados em função das duas séries de vazão mensal (observada entre 1961 e 1990 e simulada entre 2011-2040). Foram geradas 1.000 séries de igual probabilidade de ocorrência para cada período.

O processo de modelagem estocástica foi avaliado através de uma comparação entre as séries geradas e a série simulada no período futuro, através dos seguintes aspectos: i) vazões médias mensais; ii) vazão média de longo período e volume escoado; iii) desvio padrão mensal; iv) curvas de permanência.

As mudanças e incertezas no comportamento hídrico foram avaliadas através da comparação entre as séries estocásticas geradas para o período futuro (2011-2040) e as séries geradas para o período de base (1961-1990), considerando valores centrais e limites de confiança, através dos seguintes aspectos: i) vazões médias mensais; ii) desvio padrão das vazões mensais; iii) vazão média de longo período e volume escoado; iv) curvas de permanência.

3.3.4. MÓDULO 4: MODELAGEM ESTOCÁSTICA E DEMANDA HÍDRICA NO FUTURO

O Módulo 4 trata da modelagem estocástica para análise da demanda hídrica no futuro, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí. Este módulo é composto pelas seguintes etapas: i) modelagem estocástica populacional; ii) modelagem estocástica da criação animal; iii) modelagem estocástica de áreas irrigadas.

As atividades industriais, comerciais e de serviços não foram consideradas em virtude das informações de consumo médio de água por pessoa (SNIS) já contabilizarem estes usos, dividindo a distribuição total de água entre os habitantes de cada município.

3.3.4.1. MODELO ESTOCÁSTICO POPULACIONAL

O primeiro modelo estocástico se refere à dinâmica populacional, a partir do qual foram geradas 1.000 séries de evolução populacional e, conseqüentemente, de demanda hídrica para o abastecimento humano no período entre 2011 e 2040. Os seguintes procedimentos compõem o modelo estocástico populacional:

- Estimativa da proporção das áreas urbanas e rurais de cada município abrangido parcial ou totalmente pela bacia hidrográfica.

Para realizar essa estimativa, foram utilizadas imagens obtidas por sensoriamento remoto, do satélite Landsat 5, sensor TM, órbita 223, pontos 79 e 80, ambas adquiridas no dia 16/03/2011. O processamento digital das imagens foi realizado no software Envi 5.1. Primeiramente, as bandas multiespectrais do visível (bandas 1, 2 e 3), do infravermelho próximo (banda 4) e do infravermelho médio (bandas 5 e 7) foram combinadas em cada cena (ponto da órbita), resultando em dois arquivos multiespectrais. Em seguida, foi realizado o processo de mosaicagem, que consiste na união espacial das duas cenas com ajuste de histograma para suavizar as diferenças de brilho entre as duas imagens. Após isso, foi realizado o georreferenciamento do mosaico, através de pontos de controle identificados nas cartas topográficas da DSG (Exército Brasileiro). O mosaico georreferenciado foi recortado com base nos limites da bacia hidrográfica do rio Ijuí, com exutório do posto fluviométrico Santo Ângelo. Por fim, o último processamento consistiu na composição de bandas espectrais e no ajuste do histograma para facilitar a interpretação visual das áreas construídas. A composição de bandas adotada foi a R4G5B3.

As áreas construídas foram vetorizadas no software ArcGIS 10.2 tendo como referência a interpretação visual do mosaico de imagens Landsat 5. Para fins deste estudo, as áreas urbanas foram consideradas iguais às áreas construídas. Esta simplificação é necessária, pois não é possível identificar o perímetro urbano a partir da interpretação de imagens orbitais e nem todas as Prefeituras Municipais dispõem de limites precisos (na forma digital) da área urbana.

As áreas urbanas (construídas) vetorizadas foram intersectadas com os limites municipais definidos pelo IBGE. Tal procedimento permite a estimativa da proporção de área urbana e rural de cada município na bacia hidrográfica.

- Estimativa da população de cada município na bacia hidrográfica.

Para estimar a população residente na bacia, por município, foram utilizados os valores obtidos de proporção das áreas urbanas e rurais de cada município na bacia, e os dados referentes à contagem da população relativos aos Censos Demográficos de 1980, 1991, 2000 e 2010. A estimativa da população total do município que pertence à bacia foi obtida através da Equação 3.21.

$$PopT_{iB} = PopU_i \cdot \left(\frac{AU_{iB}}{AU_i}\right) + PopR_i \cdot \left(\frac{AR_{iB}}{AR_i}\right) \quad (3.21)$$

Onde: $PopT_{iB}$ é a população total do município que pertence à bacia; $PopU_i$ é a população urbana do município; AU_{iB} é a área urbana do município abrangida pela bacia; AU_i é a área urbana do município; $PopR_i$ é a população rural do município; AR_{iB} é a área rural do município no interior da bacia; AR_i é a área rural do município.

O somatório da população dos municípios, que reside na área da bacia ($PopT_{iB}$), pode ser considerado uma razoável estimativa da população total da bacia hidrográfica ($PopT_B$), em cada um dos quatro anos analisados (1980, 1991, 2000 e 2010). Em seguida, foi obtida, para cada município, uma estimativa da proporção da população municipal que reside na bacia ($PPopT_{iB}$), conforme a Equação 3.22:

$$PPopT_{iB} = \frac{PopT_{iB}}{PopT_i} \quad (3.22)$$

Onde: $PopT_i$ é a população total do município.

É importante ressaltar que alguns municípios (com população contada apenas no ano de 2010) foram desmembrados nas décadas anteriores, principalmente entre os Censos de 1980, 1991 e 2000. Foi realizada uma consulta no IBGE para verificar a qual município pertencia o distrito que formou o novo município, sendo possível, utilizando como princípio a proporcionalidade populacional (Equação 3.23), estimar a população urbana e a população rural do distrito em anos anteriores, a partir da população do município principal, do qual se desmembrou o novo município.

$$PopU_{d(t-1)} = PopU_{m(t-1)} \cdot \left(\frac{PopU_{d(t)}}{PopU_{d(t)} + PopU_{m(t)}} \right) \quad (3.23)$$

Onde: $PopU_{d(t-1)}$ é a população urbana do distrito, no Censo anterior ($t-1$); $PopU_{m(t-1)}$ é a população urbana do município principal no Censo anterior; $PopU_{d(t)}$ é a população urbana do novo município que abrange o distrito pré-existente no Censo atual (t); $PopU_{m(t)}$ é a população urbana do município principal no Censo atual.

- Estimativa do número de nascimentos e de óbitos, para cada município, entre 1999 e 2010, considerando somente a área da bacia.

Essa estimativa foi realizada com base na proporção da população municipal que reside na bacia ($PPopT_{iB}$) e nos dados municipais de registro civil (nascimentos e óbitos) no período entre 1999 e 2010. Este período foi escolhido em função da disponibilidade de informações no banco de dados SIDRA do IBGE, pela consulta das tabelas de Nascidos Vivos (1999-2010) e de Óbitos (1999-2010).

Como os valores de $PPopT_{iB}$ só estão disponíveis para os anos censitários, estes foram interpolados por uma função linear. Em seguida, foi realizada a multiplicação do número de nascimentos e de óbitos pela proporção dada por $PPopT_{iB}$ para cada ano do intervalo de interesse. O somatório do número de nascimentos e de óbitos de cada município, na área da bacia, resultou no número total de nascimentos e de óbitos na bacia hidrográfica do rio Ijuí no período entre 1999 e 2010.

- Estimativa do número de nascimentos e de óbitos na bacia hidrográfica, entre 1984 e 1998, com base nos dados de registro civil estadual (RS).

Para esta estimativa, foram utilizados dados disponíveis no banco de dados SIDRA do IBGE, referentes à população do Estado do RS nos Censos Demográficos de 1980, 1991 e 2000, e ao número de nascimentos e óbitos no RS entre os anos de 1984 e 1998.

Foi considerada a hipótese de que a tendência observada no Estado do RS, em relação aos nascimentos e óbitos, foi a mesma apresentada pelos municípios da bacia. Partindo deste princípio, foi ajustada uma função polinomial de segunda ordem para estimar a população no RS e na bacia em cada ano do período entre 1984 e 1998, tendo como base a população dos anos censitários (1980, 1991 e 2000).

Uma vez estimada a população em cada ano do período entre 1984 e 1998, foram calculadas as taxas anuais de natalidade e de mortalidade no Estado do RS. Por fim, ao multiplicar as taxas anuais obtidas para o RS pela população da bacia, obteve-se uma estimativa do número de nascimentos e de óbitos na bacia hidrográfica do rio Ijuí.

- Estimativa do saldo migratório e da taxa migratória na bacia hidrográfica, entre 1984 e 2010.

Essa estimativa foi realizada através da Equação 3.24, que considera todos os componentes demográficos para o cálculo das migrações. Já a taxa anual migratória na bacia é obtida ao dividir o saldo migratório pela população total.

$$SM_B(t) = \Delta PopT_B - N_B(t) + O_B(t) \quad (3.24)$$

Onde: $SM_B(t)$ é o saldo migratório na bacia no tempo t ; $\Delta PopT_B$ é a diferença populacional na bacia entre os tempos t e $t-1$; $N_B(t)$ é o número de nascimentos na bacia no tempo t ; $O_B(t)$ é o número de óbitos na bacia no tempo t .

- Modelagem das taxas de natalidade, de mortalidade e migratória no período futuro, entre os anos de 2011 e 2040.

Tendo em vista o comportamento apresentado nas últimas décadas, é evidente a tendência de redução na taxa de natalidade e de aumento na taxa de mortalidade em todo o Estado do RS para as próximas décadas. Entretanto, é importante mencionar que tal tendência deve estabilizar, atingindo patamares semelhantes ao de alguns países desenvolvidos dos continentes europeu e asiático. Desse modo, os modelos estocásticos das taxas de natalidade e de mortalidade serão compostos por dois componentes - tendencial e aleatório -, com limite inferior de 8‰ para o componente tendencial de taxa de natalidade (patamar atual de países desenvolvidos com baixos índices de fecundidade) e limite superior de 11,5‰ para o componente tendencial de taxa de mortalidade (patamar atual de países europeus com altas taxas de mortalidade).

Quanto à taxa migratória na bacia, foi observada, nas décadas anteriores, uma tendência de redução nas emigrações, embora o valor ainda supere o de imigrações, o que indica um saldo migratório negativo em todos os anos do período entre 1984 e 2010. Neste caso, o modelo estocástico também será composto por dois componentes - tendencial e

aleatório. Porém, como as projeções do IBGE não indicam que o saldo migratório venha a ser positivo na maior parte do RS, nas próximas décadas, foi estabelecido um limiar superior de 0% para o componente tendencial da taxa migratória, isto é, ocorrendo na melhor das hipóteses um equilíbrio entre emigrações e imigrações.

O componente tendencial, nos três casos, foi modelado da seguinte maneira: foi ajustada uma curva às taxas de natalidade, de mortalidade e de migrações em função do tempo, respeitando os limites pré-estabelecidos anteriormente. No caso da taxa de natalidade, a função exponencial foi a que apresentou o melhor ajuste para a modelagem do componente tendencial. Já no caso da mortalidade e das migrações, a função linear apresentou os melhores resultados.

Os resíduos do ajuste destas funções foram utilizados para compor a variável aleatória, aos quais foram ajustadas distribuições de probabilidade. Nos três casos, os resíduos apresentaram uma significativa aderência à distribuição normal, $N(\mu, \sigma)$, com μ igual à média dos resíduos do ajuste tendencial (entre 1984 e 2010) e σ igual ao desvio padrão dos resíduos. A Equação 3.25 ilustra a modelagem da taxa de natalidade. Os modelos da taxa de mortalidade e da taxa migratória apresentam um idêntico funcionamento.

$$Tx_{nat}(t) = Tx_{E_{nat}}(t) + N(p, \mu, \sigma) \quad (3.25)$$

Onde: $Tx_{nat}(t)$ é a taxa de natalidade no tempo t ; $Tx_{E_{nat}}(t)$ é a expectativa da taxa de natalidade no tempo t , considerando somente o componente tendencial; $N(p, \mu, \sigma)$ é o componente aleatório, que consiste na aplicação da fórmula inversa da distribuição normal, considerando o sorteio de um número aleatório entre 0 e 1 para o valor de probabilidade p , a média μ e o desvio padrão σ dos resíduos da função tendencial.

Por fim, foi desenvolvido um programa no MatLab que realiza uma sequência de sorteios para a modelagem dos componentes aleatórios e calcula as taxas de natalidade, de mortalidade e de migrações. Foram geradas 1.000 séries de natalidade, mortalidade e de migrações, cada série indicando um cenário possível de população na bacia hidrográfica para cada ano, no período entre 2011 e 2040.

- Demanda hídrica mensal para o abastecimento humano em função da população e da sazonalidade, no período futuro, entre os anos de 2011 e 2040.

As informações de consumo médio de água por habitante foram obtidas através do Sistema Nacional de Informações Sanitárias (SNIS), no *website* do Ministério das Cidades, <http://www.cidades.gov.br/serieHistorica/>. Foi consultado o consumo de água *per capita* em cada município, referente ao ano de 2012. Em seguida, foi calculado o valor médio ponderado pelo número de habitantes de cada município, obtendo-se assim a demanda hídrica média para abastecimento humano.

Inicialmente, a proposta metodológica previa a correção da demanda hídrica em virtude da temperatura, já que o consumo de água é superior em períodos mais quentes e secos (verão). No entanto, o consumo não apresenta grandes flutuações ao longo do ano na bacia, considerando os dados medidos pela Companhia Riograndense de Saneamento (Corsan). A justificativa mais plausível é que o período mais quente e seco coincide com o período mais utilizado para férias, fazendo com que diminua a população situada na bacia no verão.

Assim, optou-se por não realizar ajuste na demanda hídrica mensal, sendo esta afetada apenas pelo número de habitantes, que varia anualmente. Uma vez conhecidos 1.000 cenários possíveis de população, em intervalo de tempo anual, e o consumo médio de água, *per capita*, a cada mês, foram obtidas 1.000 séries de demanda hídrica mensal para o abastecimento humano na bacia hidrográfica do rio Ijuí, no período entre janeiro de 2011 e dezembro de 2040.

3.3.4.2. MODELO ESTOCÁSTICO DE CRIAÇÃO ANIMAL

O segundo modelo estocástico se refere à modelagem da criação animal, a partir do qual foram geradas 1.000 séries de demanda hídrica para a pecuária no período entre 2011 e 2040. Os seguintes procedimentos compõem o modelo:

- Estimativa dos rebanhos na bacia hidrográfica.

Neste procedimento, foram utilizados os valores obtidos de proporção das áreas rurais de cada município na bacia, e informações referentes aos rebanhos disponíveis no banco de

dados do IBGE, relacionado à Pesquisa Pecuária Municipal, no Sistema de Recuperação Automática (SIDRA), consultando a tabela “Efetivo dos rebanhos”, no período entre 2001 e 2010.

Os seguintes rebanhos foram considerados representativos: i) gado leiteiro; ii) gado de corte; iii) suínos; iv) ovinos; v) galinhas; vi) equinos; vii) caprinos; viii) codornas; ix) coelhos. A estimativa anual de cada um desses rebanhos na área da bacia, por município, no período entre 2001 e 2010, foi obtida através da Equação 3.26.

$$Reb_{iB} = Reb_i \cdot \left(\frac{AR_{iB}}{AR_i} \right) \quad (3.26)$$

Onde: Reb_{iB} é o efetivo de um rebanho no município i , na bacia B ; Reb_i é o efetivo de um rebanho no município i ; AR_{iB} é a área rural do município no interior da bacia; AR_i é a área rural do município.

O somatório dos rebanhos pertencentes à bacia, de cada município, pode ser considerado uma razoável estimativa do efetivo total do rebanho na bacia hidrográfica, em cada ano do período entre 2001 e 2010.

▪ Modelagem das atividades pecuárias no período futuro, entre 2011 e 2040.

O modelo estocástico da criação animal foi composto, assim como no caso da população, por dois componentes - tendencial e aleatório -, para cada um dos nove rebanhos analisados. Em virtude do grande efetivo dos rebanhos de gado, tanto o leiteiro como o de corte, e também da elevada demanda por área de pastagem para estes dois tipos de criação animal, foi imposto um limite superior apenas para a área de pastagens para a criação do gado na bacia hidrográfica. O limite adotado foi equivalente a 25% da área total da bacia, ou seja, de 1.353,5 km². Levando-se em consideração a relação entre o número de cabeças e a áreas das pastagens no Censo Agropecuário de 2006, adotou-se um limiar de 1,75 cabeças de gado por hectare de pastagem. Assim, o efetivo dos rebanhos de gado (leiteiro ou de corte) não pode exceder 237 mil cabeças na área da bacia hidrográfica do rio Ijuí.

O componente tendencial, de cada rebanho, foi modelado da seguinte maneira: foi ajustada uma curva aos valores de efetivo de rebanhos em função do tempo. As seguintes funções foram testadas para cada rebanho: i) linear; ii) logarítmica; iii) exponencial; iv)

polinomial de segunda ordem. Após uma análise qualitativa (visual) e quantitativa (através do coeficiente de determinação, R^2), a função linear foi adotada para modelar a tendência observada nos rebanhos de caprinos, ovinos, suínos e de gado leiteiro. A função exponencial foi utilizada para modelar o componente tendencial dos demais rebanhos.

Os resíduos proporcionais (Equação 3.27) do ajuste destas funções foram utilizados para compor a variável aleatória, de cada tipo de rebanho, aos quais foram ajustadas distribuições de probabilidade. Em todos os casos, os resíduos apresentaram uma significativa aderência à distribuição normal, $N(\mu, \sigma)$, com μ igual à média dos resíduos do ajuste tendencial (entre 2001 e 2010) e σ igual ao desvio padrão dos resíduos. A Equação 3.28 ilustra a modelagem do efetivo de rebanhos.

$$rp = \frac{\{RebO_k(t) - RebE_k(t)\}}{RebE_k(t)} \quad (3.27)$$

$$Reb_k(t) = RebE_k(t) + rp\{N(p, \mu, \sigma)\} \cdot RebE_k(t) \quad (3.28)$$

Onde: rp é o resíduo proporcional; $RebO_k(t)$ é o efetivo do rebanho k , observado no tempo t ; $RebE_k(t)$ é a expectativa do efetivo do rebanho k , no tempo t , considerando a tendência modelada; $Reb_k(t)$ é o efetivo do rebanho k , no tempo t , com base na modelagem estocástica; $N(p, \mu, \sigma)$ é o componente aleatório, que consiste na aplicação da fórmula inversa da distribuição normal, considerando o sorteio de um número aleatório entre 0 e 1 para o valor de probabilidade p , a média μ e o desvio padrão σ dos resíduos proporcionais (rp) da função tendencial.

Por fim, foi desenvolvido um programa no MatLab que realiza uma sequência de sorteios para a modelagem dos componentes aleatórios e calcula os rebanhos. Com base nesse programa, foram geradas 1.000 séries para cada rebanho analisado, que combinadas, indicam 1.000 cenários possíveis de criação animal na bacia hidrográfica, em intervalo de tempo anual, no período entre 2011 e 2040.

- Demanda hídrica mensal para a criação animal em função dos efetivos dos rebanhos, no período futuro, entre os anos de 2011 e 2040.

A demanda média de água por cabeça para cada tipo de rebanho foi estimada tendo como referência os estudos de Couto (2002), Sugai (2003), DRH/SEMA (2007) e Oliveira

(2009), conforme mostra a Tabela 2.1, no Capítulo 2 deste manuscrito: i) gado leiteiro (70 litros/cabeça/dia); ii) gado de corte (50 litros/cabeça/dia); iii) suínos (26 litros/cabeça/dia); iv) ovinos (7 litros/cabeça/dia); v) galinhas (0,36 litros/cabeça/dia); vi) equinos (40 litros/cabeça/dia); vii) caprinos (7 litros/cabeça/dia); viii) codornas (0,25 litros/cabeça/dia); ix) coelhos (0,5 litros/cabeça/dia).

Uma vez conhecidos 1.000 cenários possíveis de rebanhos, em intervalo de tempo anual, e o consumo médio de água, *per capita*, foram obtidas 1.000 séries de demanda hídrica mensal para a criação animal na bacia hidrográfica do rio Ijuí, no período entre janeiro de 2011 e dezembro de 2040.

3.3.4.3. MODELO ESTOCÁSTICO DE IRRIGAÇÃO

O terceiro modelo estocástico se refere à modelagem da área de agricultura irrigada, a partir do qual foram geradas 1.000 séries de demanda hídrica para a irrigação no período entre 2011 e 2040. Os seguintes procedimentos compõem o modelo:

- Evolução dos volumes outorgados e das áreas irrigadas.

O primeiro procedimento na etapa de modelagem das áreas irrigadas para o futuro se refere ao crescimento de volumes outorgados e, conseqüentemente, das áreas irrigadas. Os dados de outorga de uso da água para irrigação foram obtidos junto ao DRH/SEMA, com valores atualizados até meados do ano de 2014. A informação de áreas irrigadas está disponível, a nível municipal, apenas para o ano de 2006, em que foi realizado o Censo Agropecuário pelo IBGE.

Uma vez disponíveis os volumes outorgados para irrigação até 2006, na área da bacia, foi possível relacioná-los com a área irrigada de 2006, segundo o IBGE. Com esse procedimento, obteve-se o volume outorgado para cada hectare irrigado em 2006. Tal proporção foi mantida para os demais anos com disponibilidade de dados de outorga (entre 2000 e 2010), constituindo-se assim uma série com a evolução das áreas irrigadas neste período.

- Modelagem das áreas irrigadas no período futuro, entre 2011 e 2040.

No cálculo de áreas irrigadas pelo método estocástico proposto foi considerado um limite de áreas para irrigação, para restringir o crescimento destas áreas em função de alguns condicionantes. Foram considerados três aspectos restritivos: i) as áreas de APPs de nascentes e recursos hídricos; ii) as áreas associadas às cidades, pastagens e pequenas propriedades agrícolas, às quais não contam atualmente com sistema de irrigação; iii) as áreas com declividades superiores a 10%. O critério da declividade limite de 10% foi definido com base no estudo de Schuster *et al.* (2013), que ilustra uma predominância absoluta de irrigação em áreas planas ou suavemente inclinadas.

As delimitações referentes aos critérios restritivos para a irrigação foram obtidas através da interpretação e classificação de dados cartográficos (hidrografia vetorizada a partir das cartas da DSG) e do mosaico de imagens do satélite Landsat. Deste modo, considerando apenas estas restrições, constatou-se que existe a possibilidade de irrigação de 2.986 km².

O modelo estocástico da irrigação foi composto de componentes referentes à tendência de longo período, à dependência temporal de curto prazo e à aleatoriedade. O componente tendencial foi modelado da seguinte forma: foi ajustada uma função aos valores de áreas irrigadas (*TAI*) em função do tempo (*t*). As seguintes funções foram testadas: i) linear; ii) logarítmica; iii) exponencial; iv) polinomial de segunda ordem. Após uma análise qualitativa (visual) e quantitativa (através do coeficiente de determinação, $R^2 = 0,964$), a função linear foi a adotada, conforme a Equação 3.29.

$$TAI_t = 54,2 t - 108538,63 \quad (3.29)$$

Onde: *TAI* é a tendência de área irrigada em função do tempo, sendo o primeiro componente do modelo estocástico de áreas irrigadas; *t* é o tempo, em ano, variando de 2000 a 2010, no período com dados estimados, e de 2011 a 2040, no período futuro através de extrapolação.

Em seguida, foi calculado o erro proporcional (%) da função ajustada à tendência de crescimento das áreas irrigadas, no período entre 2000 e 2010. Aos erros proporcionais foi ajustada a distribuição normal (N), a qual apresentou boa aderência aos desvios apresentados. Assim, através da Equação 3.30, é possível calcular para o período futuro, a partir do sorteio

de um número aleatório, um valor para o desvio em relação à tendência esperada de áreas irrigadas.

$$\varepsilon_t = TAI_t \cdot N(\mu, \sigma) \quad (3.30)$$

Onde: ε_t é o componente aleatório; μ é o erro proporcional médio da função ajustada para modelagem da tendência de longo período; σ é o desvio padrão dos erros proporcionais da função ajustada.

Para reduzir a ocorrência de desvios com sinais opostos em sequência, foi introduzida uma dependência do intervalo de tempo anterior ($t-1$). Este componente (δ_t) foi modelado na forma de um filtro com decaimento exponencial (Equação 3.31), no qual é levado em consideração o desvio registrado no intervalo de tempo anterior, multiplicado por um coeficiente calibrado em função do observado no período entre 2000 e 2010.

$$\delta_t = (1 - \alpha) \cdot \delta_{t-1} + \alpha \cdot \varepsilon_t \quad (3.31)$$

Onde: δ_t é o desvio calculado para o tempo t ; δ_{t-1} é o desvio calculado para o tempo anterior; α é um coeficiente calibrado com base no período com estimativa de áreas irrigadas.

A área irrigada (AI) em um ano qualquer na série sintética é calculada, portanto, através da Equação 3.32.

$$AI_t = TAI_t + \delta_t \quad (3.32)$$

Por fim, foi desenvolvido um programa no MatLab que realiza uma sequência de sorteios para a modelagem dos componentes aleatórios e calcula a área irrigada anualmente. Foram geradas 1.000 séries de áreas irrigadas, indicando 1.000 cenários possíveis de irrigação na bacia hidrográfica, em intervalo de tempo anual, no período entre 2011 e 2040.

- Demanda hídrica mensal para a irrigação em função da área irrigada, com efeito da sazonalidade, no período futuro, entre os anos de 2011 e 2040.

A demanda hídrica mensal para a irrigação na bacia hidrográfica do rio Ijuí foi estimada com base nas informações referentes à outorga. O valor outorgado foi de 1 m³/s para cada 60,018 km², ou seja de 16,66 L/s por km² de área irrigada, equivalente a uma lâmina de 1,44 mm por dia.

É importante mencionar que este valor é compatível com o déficit hídrico nos meses de verão na região estudada. Porém, sabe-se que, em algumas ocasiões ou anos críticos, a lâmina de água irrigada pode ser bem superior, chegando a valores entre 6 e 8 mm por dia.

No entanto, a única informação de referência corresponde ao valor outorgado, sendo este utilizado no presente estudo. Além disso, tendo em vista que a análise da demanda hídrica foi realizada em intervalo de tempo mensal, e que, neste caso, deve-se considerar que em muitos dias não ocorre irrigação em virtude de chuvas, o valor utilizado como referência é uma aproximação razoável do valor demandado para a irrigação dos cultivos de verão.

Tendo em vista que o valor outorgado se refere à demanda máxima, que ocorre no verão, o valor de demanda mensal teve que ser ajustado, considerando-se a evapotranspiração de referência média para o mês e o coeficiente dos cultivos (K_c) da soja e do milho (cultivos de verão), do trigo e outros cereais de inverno, considerando o estágio de crescimento do plantio, conforme o Boletim FAO 56 (ALLEN *et al.*, 1998).

Seguindo esta metodologia, na Tabela 3.4 são apresentadas as durações das etapas de crescimento de cultivos que foram adotadas neste estudo. Na Tabela 3.5 são ilustrados os valores de K_c para as culturas analisadas.

A demanda hídrica mensal para as atividades agrícolas irrigadas (DHi) é igual a área irrigada no mês (AI_m) multiplicada pela demanda específica mensal (De_m), conforme mostra a Equação 3.33.

$$DHi_m = AI_m \cdot De_m \quad (3.33)$$

A estimativa da área irrigada em cada mês (AI_m) do ano foi realizada de forma subjetiva, tendo como base informações referentes ao calendário agrícola da região e a observação de imagens de satélite.

Primeiramente, foi necessário definir um mês de referência para o qual o valor de área irrigada é igual ao máximo possível, isto é, igual ao valor anual de áreas irrigadas, estimado pelo modelo estocástico. O mês de janeiro foi adotado como referência, uma vez que a maior parte da área irrigada corresponde aos cultivares de soja e milho, ambos se desenvolvendo neste período do ano.

Tabela 3.4. Duração (dias) das etapas de crescimento dos cultivos de soja, milho e cereais de inverno (ALLEN et al., 1998).

Cultivar	Fase 1 (inicial)	Fase 2 (desenvolvimento)	Fase 3 (reprodutiva)	Fase 4 (final)	Total
Soja	15	15	40	15	85
Milho	20	35	40	30	125
Cereais de Inverno	40	30	40	20	130

Tabela 3.5. Coeficiente de cultivo (Kc) para cada fase de crescimento do plantio (ALLEN et al., 1998).

Cultivar	Fase 1 (inicial)	Fase 2 (desenvolvimento)	Fase 3 (reprodutiva)	Fase 4 (final)
Soja	0,4	0,775	1,15	0,825
Milho	0,3	0,75	1,2	0,825
Cereais de Inverno	0,3	0,725	1,15	0,775

Em seguida, com base na observação de imagens de satélite em diferentes períodos do ano e no calendário agrícola da região de estudo, foram identificados padrões quanto ao período dos cultivos da soja, do milho e dos cereais de inverno: i) no caso da soja, cuja área corresponde a 83% dos cultivos irrigados na bacia, conforme o Censo Agropecuário de 2006, a semeadura é realizada preferencialmente entre os meses de outubro e dezembro, com colheita entre fevereiro e abril; ii) no caso do milho, de acordo com a Embrapa (2010), cerca de 90% da área deste cultivar é semeado entre os meses de agosto e outubro, com colheita entre janeiro e março; iii) por fim, os cereais de inverno e, especialmente, o trigo, são semeados, na sua maior parte, entre maio e julho de acordo com a Embrapa. A colheita é realizada, preferencialmente, entre os meses de setembro e novembro. De acordo com o Censo Agropecuário estes cultivos representam 13% das áreas irrigadas na bacia, porém ocorrem em áreas também irrigadas no verão.

Tendo como base os critérios acima, foram definidas as proporções de áreas com uso de irrigação em cada mês (Tabela 3.6), em comparação ao mês de janeiro, que corresponde à área total irrigada. Multiplicando-se a proporção de área com uso de irrigação em cada mês (AIp_m) pela área total irrigada no ano (AI) é obtida a área irrigada mensal (AI_m), como mostra a Equação 3.34.

$$AI_m = AIp_m \cdot AI \quad (3.34)$$

Para a estimativa da demanda específica mensal (De_m) foi considerado o seguinte critério: o valor outorgado para uso da água se refere a uma demanda máxima, que pode ser considerada proporcional ao mês com maior valor de evapotranspiração potencial da cultura (ETc). Os valores mensais de ETc podem ser obtidos pela multiplicação do coeficiente de cultivo (Kc) mensal pela evapotranspiração de referência (ETo). Os valores de coeficiente de cultivo (Kc) para cada mês (Tabela 3.7) foram atribuídos tendo como base a duração, o tipo dos cultivos e suas respectivas áreas na bacia, as fases de desenvolvimento e os períodos de semeadura já mencionados no trabalho.

Tabela 3.6. Proporção de áreas com uso de irrigação em cada mês (AIp_m) na bacia do rio Ijuí, RS.

Mês	Descrição das atividades irrigadas	AIp_m
Janeiro	soja e milho em pleno desenvolvimento	100%
Fevereiro	início da colheita da soja e do milho	90%
Março	fim da colheita do milho	60%
Abril	fim da colheita da soja	30%
Mai	semeadura dos cultivos de inverno	5%
Junho	semeadura dos cultivos de inverno	10%
Julho	semeadura dos cultivos de inverno	15%
Agosto	cultivos de inverno em pleno desenvolvimento; semeadura do milho	20%
Setembro	início da colheita dos cultivos de inverno; semeadura do milho	15%
Outubro	colheita de cultivos de inverno; semeadura da soja	40%
Novembro	colheita de cultivos de inverno; semeadura da soja	70%
Dezembro	semeadura da soja	90%

Assim, para o mês de maior valor de ETc , considera-se que a demanda específica mensal (De_m) é máxima, isto é, equivalente ao valor outorgado pelo DRH/SEMA até 2010,

igual a 16,66 L/s/km². Partindo deste princípio, a Equação 3.35 permite o cálculo da demanda específica (L/s/km²) para cada mês do ano.

Uma vez conhecidas 1.000 séries possíveis de áreas irrigadas e a demanda hídrica específica, em intervalo de tempo mensal, foram obtidas 1.000 séries de demanda hídrica mensal para as atividades agrícolas irrigadas na bacia hidrográfica do rio Ijuí, no período entre janeiro de 2011 e dezembro de 2040.

Por fim, ao realizar o somatório das demandas hídricas dos três usos abordados, série a série, foram obtidos 1.000 cenários possíveis de demanda por água entre 2011 e 2040.

$$De_m = \frac{ETc_m}{ETc_{max}} \times 16,66 \quad (3.35)$$

Tabela 3.7. Coeficiente de cultivo mensal para as áreas agrícolas irrigadas na bacia do rio Ijuí, RS.

Mês	Kc
Janeiro	0,95
Fevereiro	0,70
Março	0,45
Abril	0,20
Mai	0,30
Junho	0,50
Julho	0,75
Agosto	0,95
Setembro	0,90
Outubro	0,45
Novembro	0,60
Dezembro	0,80

3.3.5. MÓDULO 5: ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A DISPONIBILIDADE E A DEMANDA HÍDRICA NO FUTURO

O Módulo 5 compreende a análise da relação entre a disponibilidade hídrica, representada pelas séries de vazões mensais geradas no Módulo 3, e as séries de demanda hídrica geradas no Módulo 4, no período entre 2011 e 2040, considerando as mudanças

climáticas projetadas por um modelo climático e as alterações populacionais e agropecuárias. Neste módulo foi realizada a simulação do balanço hídrico em um reservatório fictício para geração de curvas de regularização, considerando as séries estocásticas geradas de vazão e de demanda para usos consuntivos. Além disso, foram geradas também curvas de regularização, considerando as séries estocásticas de vazão e a demanda hídrica para o uso não consuntivo mais expressivo na bacia - a geração de energia.

A simulação do balanço hídrico em um reservatório fictício para a geração de curvas de regularização é um instrumento que permite uma análise mais precisa da relação entre a disponibilidade e a demanda hídrica. Neste tipo de abordagem, pode-se investigar não só a ocorrência de falhas no atendimento à demanda no futuro, mas também a necessidade de aumento nas dimensões e capacidade dos reservatórios.

Para obter uma curva de regularização para cada série de demanda hídrica, foi necessário definir um conjunto de demandas de referência (Dm_0), com valores próximos à demanda média das 1.000 séries projetadas para o futuro. Cada valor de demanda de referência (Dm_0) constitui-se em um ponto da curva de regularização a ser gerada.

As demandas mensais de cada uma das 1.000 séries projetadas para o futuro foram transformadas em uma escala de valores variáveis relacionados à demanda de referência, conforme mostra a Equação 3.36.

$$Dmv_t = Dm_0 \cdot Dm_t / \overline{Dm} \quad (3.36)$$

Onde: Dmv_t é a demanda hídrica variável, no tempo t ; Dm_0 é a demanda de referência; Dm_t é a demanda hídrica no tempo t , considerando a série projetada para o futuro; \overline{Dm} é a demanda hídrica média considerando a série projetada para o futuro.

O modelo para geração das curvas de regularização se baseia na simulação do balanço hídrico em reservatórios, o qual depende das seguintes variáveis: i) vazões afluentes (Q_{af}); ii) evaporação (E_v); iii) demanda hídrica variável (Dmv); iv) capacidade do reservatório (C_p); v) volume morto (V_m); vi) relação área-volume do reservatório. A modelagem foi realizada utilizando um recurso iterativo para atualização da área "inundada" no reservatório, tendo como base a média entre os valores armazenados no mês anterior e atual, permitindo assim um cálculo mais preciso da evaporação no reservatório.

A simulação inicia-se pelo cálculo da área inundada no tempo t , que depende do volume armazenado no mês anterior ($t-1$), através de uma equação que representa a relação área-volume do reservatório, conforme a Equação 3.37. Com base na área inundada, calcula-se a evaporação (tempo t) no reservatório (Equação 3.38) e realiza-se o balanço hídrico através da Equação 3.39.

$$Area_t = A + B.S_{t-1} \quad (3.37)$$

$$Ev_t = ETO_t \cdot Area_t \quad (3.38)$$

$$S_t = S_{t-1} + Qafl_t - Ev_t - Dmv_t \quad (3.39)$$

Onde: $Area_t$ é a área coberta por água no reservatório, em m^2 , no tempo t ; S_{t-1} é o armazenamento, em Hm^3 , no tempo $t-1$; A e B são parâmetros da relação área-volume do reservatório que, no caso deste estudo, foram definidos como 30.000 e 80, respectivamente.

O armazenamento de água, no entanto, não pode ser superior à capacidade do reservatório (Cp), bem como não pode ser inferior à zero. Deste modo, o valor armazenado no tempo t deve atender à restrição imposta na Equação 3.40. Caso o volume armazenado seja superior à capacidade, o volume excedente é vertido. Caso o volume armazenado seja negativo, atualiza-se este valor para ser igual a zero.

$$0 \leq S_t \leq Cp \quad (3.40)$$

Uma vez atendida a restrição, o recurso iterativo consiste em recalcular a área inundada no tempo t , considerando uma média entre os volumes armazenados no reservatório, nos tempos t e $t-1$, conforme mostra a Equação 3.41.

$$Area_t = A + B \cdot \left(\frac{S_{t-1} + S_t}{2} \right) \quad (3.41)$$

Em seguida, foram recalculados a evaporação e o armazenamento através das Equações 3.38 e 3.39, respectivamente, e verificado o atendimento à restrição imposta pela Equação 3.40. Este procedimento recursivo foi repetido três vezes, sendo este número de

repetições suficiente para estabilização da área inundada e conseqüentemente dos valores de evaporação.

Deste modo, o cálculo do balanço hídrico é realizado para todos os 360 meses, do período entre 2011 e 2040, considerando as séries de vazões e de demanda hídrica.

Em seguida, para verificar o número de meses com falha no atendimento à demanda hídrica variável, foram contabilizados todos os meses em que o volume armazenado foi inferior ao volume morto (V_m). Caso a proporção de falhas não atenda à porcentagem mínima de atendimento pretendida, inicia-se um novo ciclo de simulação, visando ampliar o reservatório, com atualização da capacidade conforme a Equação 3.42. Por outro lado, caso a proporção de falhas atenda à porcentagem mínima de atendimento à demanda, inicia-se um novo ciclo de simulação, visando reduzir o reservatório, com atualização da capacidade conforme a Equação 3.43. Após algumas dezenas de ciclos (i), ocorre a convergência a um valor ótimo, isto é, ao menor valor de capacidade capaz de atender à porcentagem mínima de atendimento à demanda.

$$Cp(i) = Cp(i - 1) . 1,1 \quad (3.42)$$

$$Cp(i) = Cp(i - 1) . 0,5 \quad (3.43)$$

Quanto ao nível de atendimento à demanda, foram simuladas as curvas de regularização referentes aos percentuais mínimos de atendimento de 95%, 99% e 100%. Deste modo, para cada par de séries (vazão x demanda), foram obtidas três curvas de regularização, cada ponto da curva representando uma demanda de referência. Tendo como base as 1.000 projeções de vazão e de demanda mensal entre 2011 e 2040, foram obtidas ao todo 3.000 curvas de regularização considerando os usos consuntivos analisados no módulo anterior.

Além disso, tendo em vista a expressiva demanda hídrica para a geração de energia elétrica na bacia hidrográfica do rio Ijuí, foi realizada a simulação das curvas de regularização nos mesmos percentuais de atendimento (95%, 99% e 100%), utilizando a demanda atual para o setor energético, igual a 80,82 m³/s ou 209,5 Hm³ por mês. Este valor representa a vazão máxima turbinada da Usina RS-155, a quarta Pequena Central Hidrelétrica (PCH) da Ceriluz, ainda em construção (CERILUZ, 2014).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados e as discussões referentes aos cinco módulos do trabalho, culminando na análise da relação entre a disponibilidade e a demanda hídrica no futuro, entre 2011 e 2040. Os resultados e discussões estão organizados por módulo, desde a avaliação do desempenho das simulações hidrológicas (Módulo 1) até a análise das curvas de regularização geradas a partir da simulação do balanço hídrico em um reservatório fictício (Módulo 5).

4.1. MÓDULO 1: O DESEMPENHO DO MODELO HIDROLÓGICO

De acordo com o que foi descrito na metodologia do trabalho, o modelo hidrológico mensal inicial apresentou 10 variáveis de entrada, combinadas com o mesmo número de neurônios na camada intermediária, o que resultou em 121 pesos sinápticos no modelo (ligações entre as variáveis e os neurônios da camada intermediária e de saída). Através do algoritmo de simplificação da RNA foram excluídas sete variáveis de entrada, resultando em um modelo hidrológico menos complexo, com 16 pesos sinápticos e apenas três entradas:

- i) saldo médio de água nos meses t e $t-1$, (\bar{S});
- ii) valores transformados da precipitação mensal pela aplicação de um filtro de decaimento exponencial (fP);
- iii) valores transformados do saldo de água mensal pela aplicação de um filtro de decaimento exponencial (fS).

Estas variáveis remanescentes caracterizam-se principalmente por cada uma representar mais do que apenas um processo hidrológico que ocorre na bacia, enquanto que as entradas brutas de precipitação e de evapotranspiração de referência (P e E) explicam apenas uma parcela reduzida do ciclo hidrológico. Variáveis como o saldo médio de água (\bar{S}), o filtro de precipitação (fP) e o filtro do saldo de água (fS) constituem-se em uma conjugação de processos hidrológicos, representando a disponibilidade e o armazenamento de água no solo e nos rios da bacia. Estas variáveis, por já conterem as informações das entradas brutas, além

dos outros processos representados, reduzem as possíveis contribuições adicionais destas entradas, as quais tornam-se irrelevantes para a reprodução das vazões resultantes.

Na Tabela 4.1 é apresentado o Índice de Contribuição Relativa destas três variáveis (\bar{S} , fP e fS) no modelo inicial (10 entradas) e no modelo final. A variável mais importante durante a simulação foi a fS, com contribuição variando de 33% no modelo inicial (10 entradas) a 40% no modelo mais simplificado (três entradas). É importante destacar a elevada importância destas três variáveis desde o primeiro modelo, quando as três somavam mais de 70% da contribuição (RCI) de todas as variáveis juntas.

Tabela 4.1. Índice de Contribuição Relativa (RCI) das três variáveis mais importantes no modelo com RNAs.

Variável	RCI no modelo	RCI no modelo
	inicial	final
\bar{S} (balanço médio de água nos tempos t e t-1)	23%	31%
fP (filtro com decaimento exponencial - precipitação)	15%	29%
fS (filtro com decaimento exponencial - balanço de água)	33%	40%
Somatório destas variáveis	71%	100%

Ao comparar o desempenho das duas RNAs, com 10 entradas e com três entradas, através dos hidrogramas obtidos (Figuras 4.1 e 4.2), considerando a série total (1961-2011), pode-se observar que o desempenho dos dois modelos foi muito satisfatório, com pequena vantagem para o modelo inicial, com 10 variáveis de entrada. Ambos os modelos representaram de modo adequado os períodos de estiagem e de cheia, com suave tendência de subestimação das vazões mais altas.

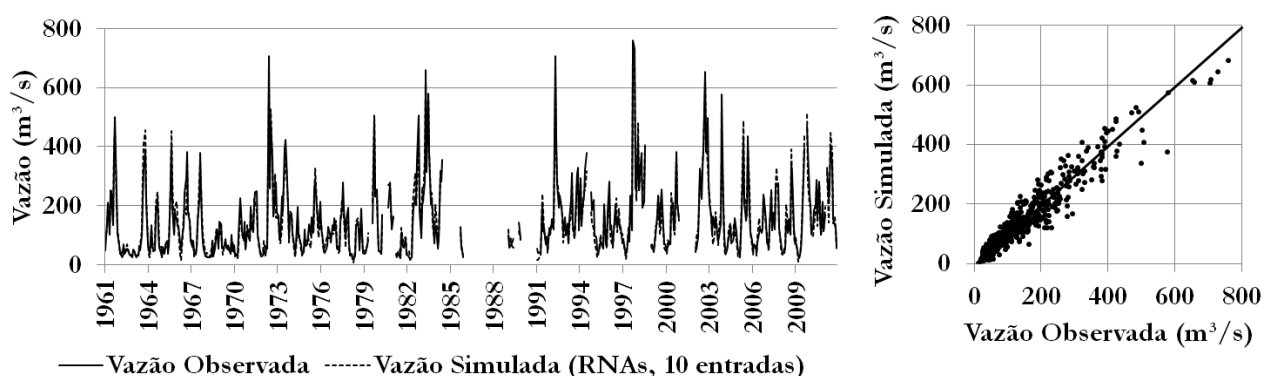


Figura 4.1. Hidrogramas: observado e simulado pela RNA inicial (10 entradas), 1961 a 2011, bacia do rio Ijuí, posto Santo Ângelo.

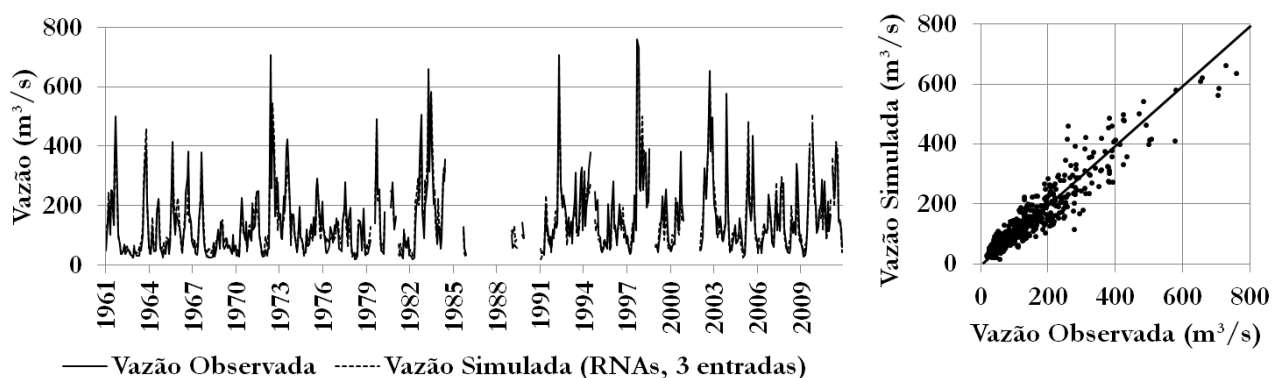


Figura 4.2. Hidrogramas: observado e simulado pela RNA final (3 entradas), 1961 a 2011, bacia do rio Ijuí, posto Santo Ângelo.

A diferença de desempenho entre os modelos se torna ainda menor, praticamente imperceptível, quando considerada somente a série de verificação (Figura 4.3). Pode-se verificar que a dispersão dos pontos nos dois gráficos da Figura 4.3 é muito pequena, indicando que os valores simulados são semelhantes aos observados. O coeficiente NS do modelo simplificado (RNA final: três entradas) foi de 0,904, enquanto que no modelo inicial (RNA: 10 entradas) foi de 0,907. Quanto ao RMSE, a RNA final apresentou um valor de 37,1 m^3/s , enquanto que a RNA inicial obteve RMSE igual a 36,4 m^3/s . O erro relativo absoluto (ER) dos modelos foi de 21,7% (RNA com três entradas) e 19,1% (RNA com 10 entradas).

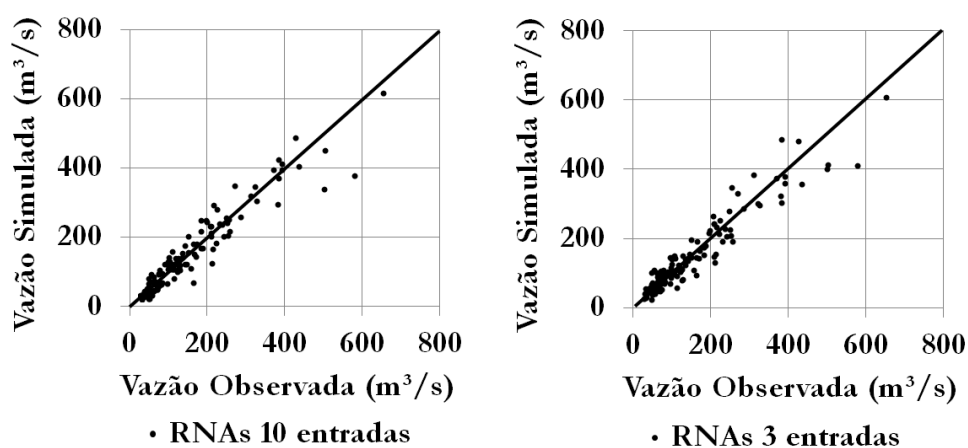


Figura 4.3. Gráfico de dispersão entre as vazões calculadas e observadas, considerando o período de verificação (1961-1963; 1998-2007) – bacia do rio Ijuí, posto Santo Ângelo.

As curvas de permanência obtidas através da simulação (Figura 4.4) ilustram também os bons resultados da modelagem com as RNAs. Pode-se observar que o ajuste da curva de permanência entre a Q5 e a Q60 é excelente nos dois modelos. No intervalo de vazões mais baixas (por exemplo, Q80 ou Q90), o modelo inicial apresentou resultados levemente mais

consistentes, tendendo à subestimativa destas, enquanto que no modelo final, a tendência é de superestimativa das vazões neste intervalo.

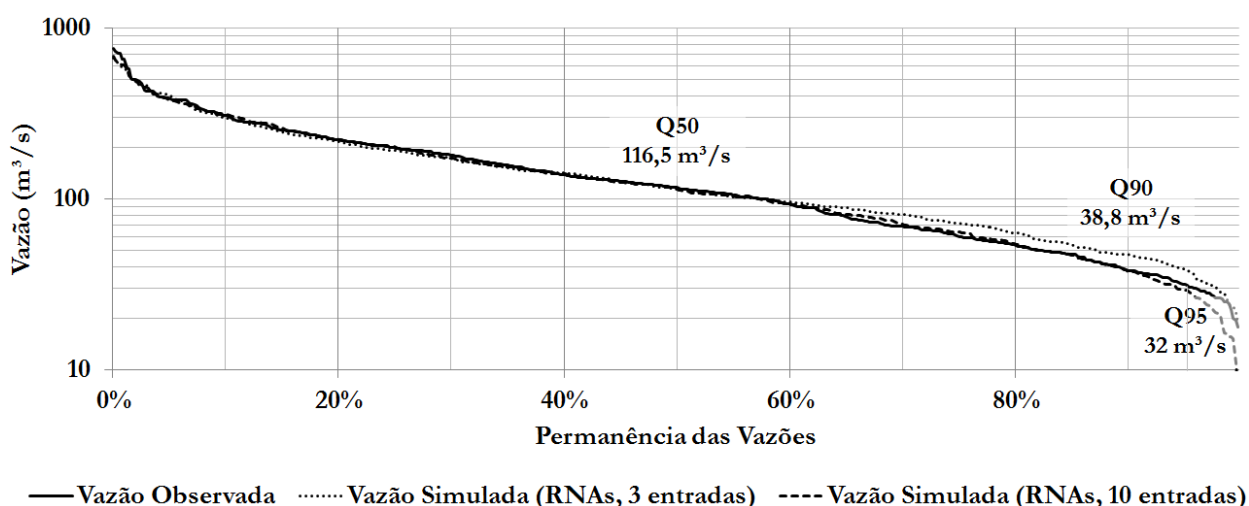


Figura 4.4. Curvas de permanência das vazões no rio Ijuí, posto Santo Ângelo (1961-2011): observada e simuladas com os modelos de RNAs (com 3 e 10 entradas).

Na estimativa da Q50, cujo valor observado foi de 116,5 m³/s, os modelos atingiram ótimo desempenho, com valores de 114,6 m³/s e de 114,4 m³/s, nas RNAs com 3 e 10 variáveis de entrada, respectivamente. Já na estimativa da Q90 (valor observado igual a 38,8 m³/s, o modelo com 10 entradas se aproximou mais, com valor de 38,4 m³/s, enquanto que o modelo mais simplificado obteve a vazão de 47,3 m³/s. Na estimativa da Q95, cujo valor observado foi de 32 m³/s, os modelos apresentaram valores de 29,5 m³/s e de 38,9 m³/s, nas RNAs com 10 e 3 variáveis de entrada, respectivamente.

Ainda que, de modo geral, o desempenho do modelo inicial tenha sido levemente superior ao do modelo simplificado, é importante destacar que o modelo final possui aproximadamente 10% da dimensionalidade da RNA inicial, indicando que o mesmo é mais parcimonioso. A simplicidade do modelo resultante facilita a interpretação do funcionamento da rede, o que deve ser considerada como uma grande vantagem da aplicação do modelo com menos variáveis de entrada.

Além disso, ao realizar a análise de sensibilidade, pode-se verificar que os processos físicos inerentes às variáveis de entrada foram representados mais adequadamente a partir da RNA com apenas três entradas, o que concede, *a posteriori*, uma certa base conceitual ao modelo resultante. No modelo final, a vazão apresentou um aumento contínuo, à medida que os valores de \bar{S} , f_P e f_S aumentaram, inclusive nos intervalos extremos, para os quais a RNA não foi treinada (Figura 4.5). Este comportamento condiz com o esperado, pois, tanto as

variáveis resultantes da aplicação dos filtros às precipitações quanto o saldo de água representam a quantidade de água disponível na bacia. Fisicamente, quanto maior a disponibilidade de água, maior é a vazão.

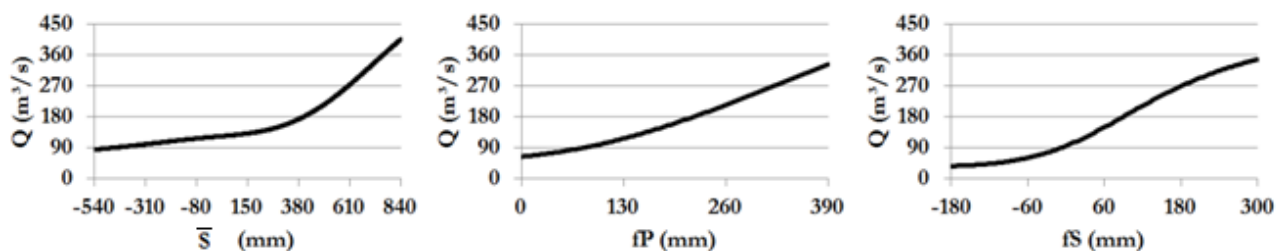


Figura 4.5. Sensibilidade da vazão no rio Ijuí às variáveis: balanço de água (\bar{S}), filtro de precipitação (fP) e filtro de balanço de água (fS) - Modelo de RNAs simplificado, com três entradas.

A Figura 4.5 ilustra a tendência de aumento da vazão simulada em função do aumento dos valores de \bar{S} , fP e fS . Considerando os limites de -540 e 840 mm para a variável de balanço de água (\bar{S}), fixando-se as demais variáveis com o valor médio observado, as vazões variam de 84 a 407 m^3/s . Já para a variável fP (filtro de precipitação), para valores de 0 a 390 mm, as vazões oscilam entre 64 e 332 m^3/s . Por fim, para a variável fS (filtro do balanço de água), as vazões também apresentaram valores crescentes, de 37 a 348 m^3/s .

O mesmo não ocorre com o modelo inicial, quando pode-se observar que algumas variáveis não foram bem interpretadas na RNA (Figura 4.6). Um bom exemplo é a variável $P(t-1)$, a qual deveria influenciar, de forma contínua e positivamente, no aumento das vazões, tendência esta que não é observada no gráfico.

Podem-se mencionar também as variáveis de evapotranspiração no tempo t , $E(t)$, e de evapotranspiração média nos tempos t e $t-1$, \bar{E} , que deveriam provocar a redução da vazão à medida que seus valores aumentam, uma vez que representam a perda de água para a atmosfera. Entretanto, este processo físico foi interpretado de forma muito equivocada pelo modelo de RNAs inicial, como pode ser observado claramente na Figura 4.6.

Isto indica que, embora os resultados tenham sido um pouco mais precisos, a capacidade de generalização da RNA inicial não é tão satisfatória quanto a da RNA simplificada, sendo praticamente impossível interpretar/compreender o funcionamento do modelo com 10 entradas.

Esta constatação deve ser considerada na escolha do modelo hidrológico, ainda mais quando pretende-se simular a vazão em cenários de mudanças climáticas. Neste caso, é

imperativa a necessidade de se obter um modelo capaz de proporcionar a adequada interpretação do processo físico que envolve cada variável de entrada.

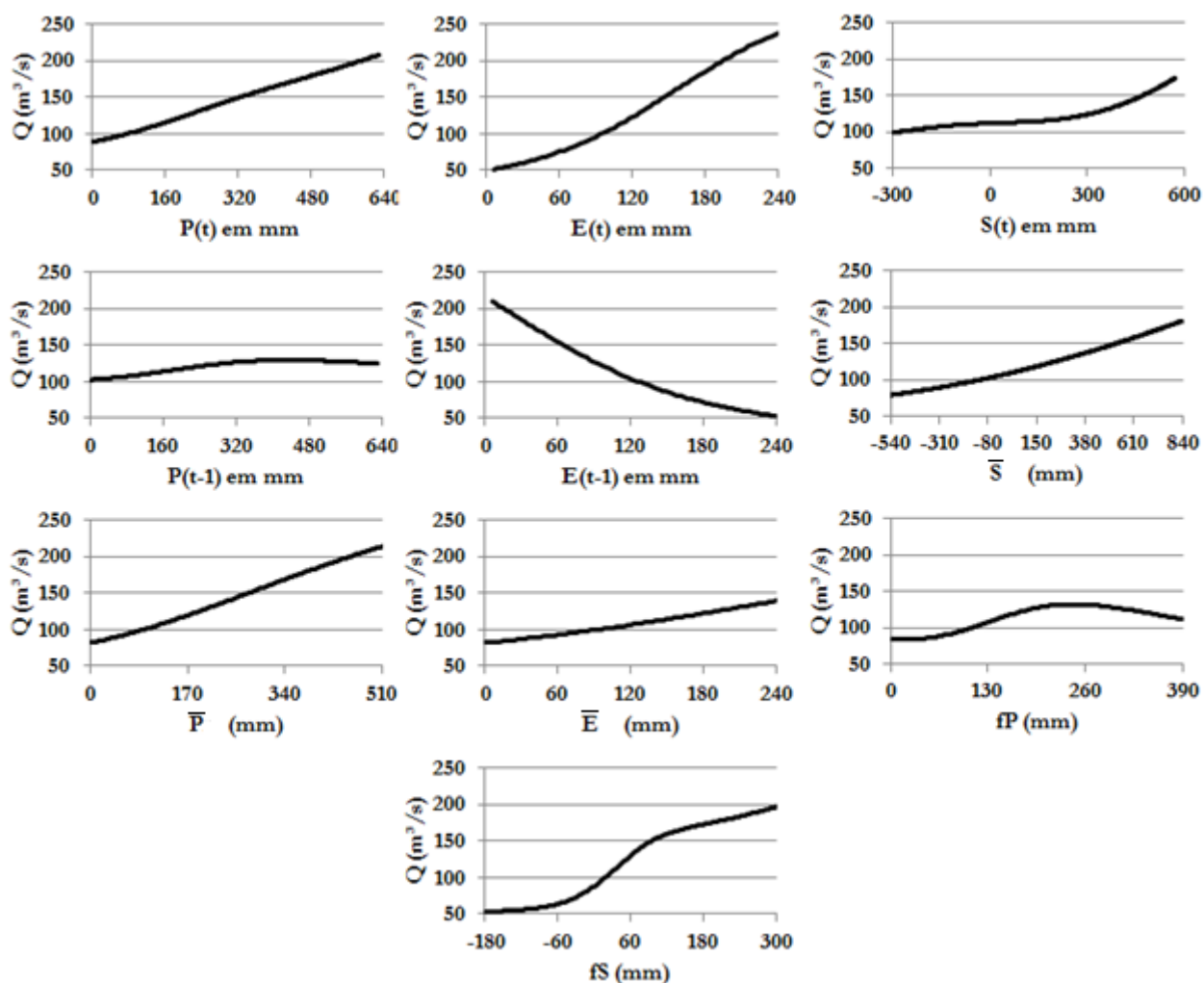
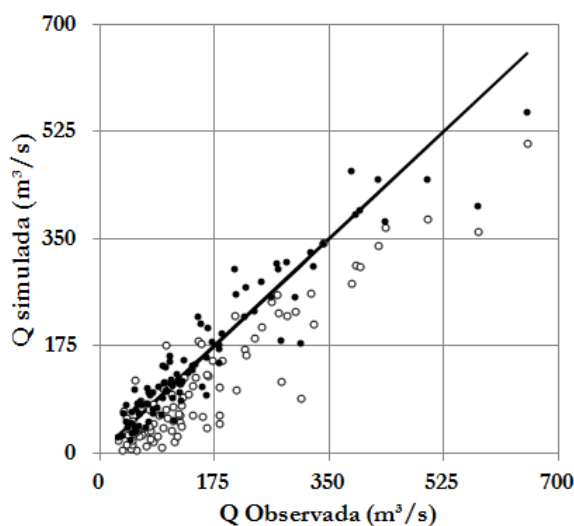


Figura 4.6. Sensibilidade da vazão no rio Ijuí às variáveis do modelo de RNAs inicial (com 10 entradas).

Assim, com base nos resultados e discussões apresentados, aceita-se que o modelo simplificado de RNAs, com apenas três variáveis, é o mais adequado para a simulação hidrológica na bacia do rio Ijuí, para aplicações que envolvam apenas dados relacionados à precipitação e à evapotranspiração.

Uma vez escolhida a melhor configuração de rede, foi realizada uma comparação dos resultados obtidos pela RNA com o modelo hidrológico SMAP. Na Figura 4.7 é apresentada uma comparação entre os dois modelos através de um gráfico de dispersão (Q observada x Q simulada), considerando apenas o período de verificação, de fevereiro de 2002 a setembro de 2009.



— Linha de ajuste ótimo ◦ SMAP • RNA (3x3)

Figura 4.7. Gráfico de dispersão entre as vazões calculadas pelo modelo SMAP e pelo modelo de RNAs, e as vazões observadas no posto Santo Ângelo (fev/2002 – set/2009).

Fica evidente que a simulação utilizando o modelo com RNAs apresenta resultados mais consistentes em relação ao SMAP, para todos os níveis de vazão (períodos de estiagem e de cheia). O SMAP, de modo geral, apresentou uma significativa tendência de subestimação das vazões.

Ao comparar dois indicadores de desempenho dos modelos, considerando o período de verificação (2002-2009), a diferença fica ainda mais evidente: a) o coeficiente NS da simulação com o modelo SMAP foi de 0,672, enquanto que com as RNAs o NS foi de 0,898; b) o RMSE foi significativamente superior com a aplicação do modelo SMAP, com valor de 55,7 m³/s, enquanto que com as RNAs o valor foi de 38,2 m³/s.

Diante dos resultados observados na avaliação dos modelos hidrológicos com RNAs, e considerando a comparação com o modelo SMAP, pode-se afirmar que a rede neural com apenas três variáveis de entrada representou satisfatoriamente o comportamento hidrológico do rio Ijuí, e constitui-se em uma excelente alternativa para a modelagem das vazões médias mensais. Mesmo tratando-se de um modelo hidrológico de origem empírica, sem embasamento físico preconcebido, as RNAs interpretaram adequadamente os processos hidrológicos associados às precipitações e à evapotranspiração na bacia.

Isto ocorreu porque o modelo resultante tornou-se bastante sofisticado, compreendendo também transformações das variáveis de entrada e transformações de escala. Como exemplo, pode-se mencionar a inclusão de variáveis com o filtro de decaimento exponencial, aplicado às precipitações e ao saldo de água, que gera um significativo incremento no desempenho do modelo hidrológico. Tais variáveis representam a condição

anterior de umidade do solo na bacia hidrográfica, integrando satisfatoriamente mais processos hidrológicos do que as entradas de precipitação e de evapotranspiração nos tempos anteriores. Deste modo, a RNA tornou-se o núcleo deste modelo mais amplo, que acabou incorporando alguma base conceitual, como resultado da pesquisa para a sua definição final.

Além disto, outra contribuição relevante deste tipo de modelo hidrológico se refere à possibilidade da aplicação em estudos referentes à disponibilidade hídrica no futuro, tendo em vista a razoável capacidade de extrapolação em relação aos dados observados no passado, conforme observado na análise de sensibilidade. Tal modelo pode ser aplicado em estudos hidrológicos relacionados à variabilidade e mudança climática, temáticas intensamente discutidas na atualidade por cientistas da área ambiental e de recursos hídricos.

4.2. MÓDULO 2: A ANÁLISE DOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS

Neste módulo, a análise e avaliação comparativa dos cenários climáticos oriundos do modelo climático regional Eta CPTec/HadCM3, nos quatro membros (CNTRL, LOW, MID e HIGH), foi realizada no período com dados observados disponíveis, entre 1961 e 1990. Conforme a metodologia apresentada no capítulo anterior, o período de controle, no qual aplicam-se as correções nos dados climáticos e calibra-se o modelo hidrológico, foi definido entre 1961 a 1975, e o período de avaliação, no qual verifica-se os resultados referentes aos cenários climáticos e à disponibilidade hídrica, foi de 1976 a 1990.

4.2.1. ANÁLISE COMPARATIVA DA PRECIPITAÇÃO SIMULADA (1976-1990)

Neste subitem, foram avaliados os 16 cenários de precipitação, no período entre 1976 e 1990, simuladas pelo modelo Eta, nos quatro membros (CNTRL, LOW, MID e HIGH), considerando os quatro métodos de correção. Os cenários foram comparados à série observada de precipitações na bacia do rio Ijuí, sendo analisada a precipitação média anual, a precipitação média mensal e a curva anual de probabilidade de excedência das precipitações mensais.

A precipitação média anual observada no período entre 1976 e 1990 foi de 1.838,3 mm. Em todos os 16 cenários a precipitação média anual foi subestimada (média de 1.638,8 mm, ou seja, 200 mm a menos que o observado). De modo geral, os cenários com o método de correção n° 3 (*Quantile-Based*, em nível mensal) foram os que apresentaram os resultados mais consistentes, com erro médio de -184,3 mm por ano. Ao comparar os quatro membros do modelo Eta, os cenários referentes ao Eta MID apresentaram os melhores resultados, com erro médio de -134,5 mm por ano. Considerando todos os cenários, os melhores resultados foram verificados utilizando o modelo Eta MID, com correções n° 1 (*Delta Change Approach*) e n° 2 (*Direct Approach*), com subestimativa média de 115,5 mm ao ano.

A precipitação média mensal, no período entre 1976 e 1990, apresentou resultados mais consistentes ao utilizar o método de correção n° 4 (*Quantile-Based*, em nível trimestral), com erro percentual médio de 16,9% considerando os quatro membros do modelo Eta (CNTRL, LOW, MID, HIGH). Utilizando os métodos de correção n° 1 e n° 2, os quais oferecem resultados iguais quanto à média mensal, o erro médio foi de 24,5%, enquanto que ao utilizar o método de correção n° 3 obteve-se o maior erro percentual médio, de 24,9% (Figura 4.8).

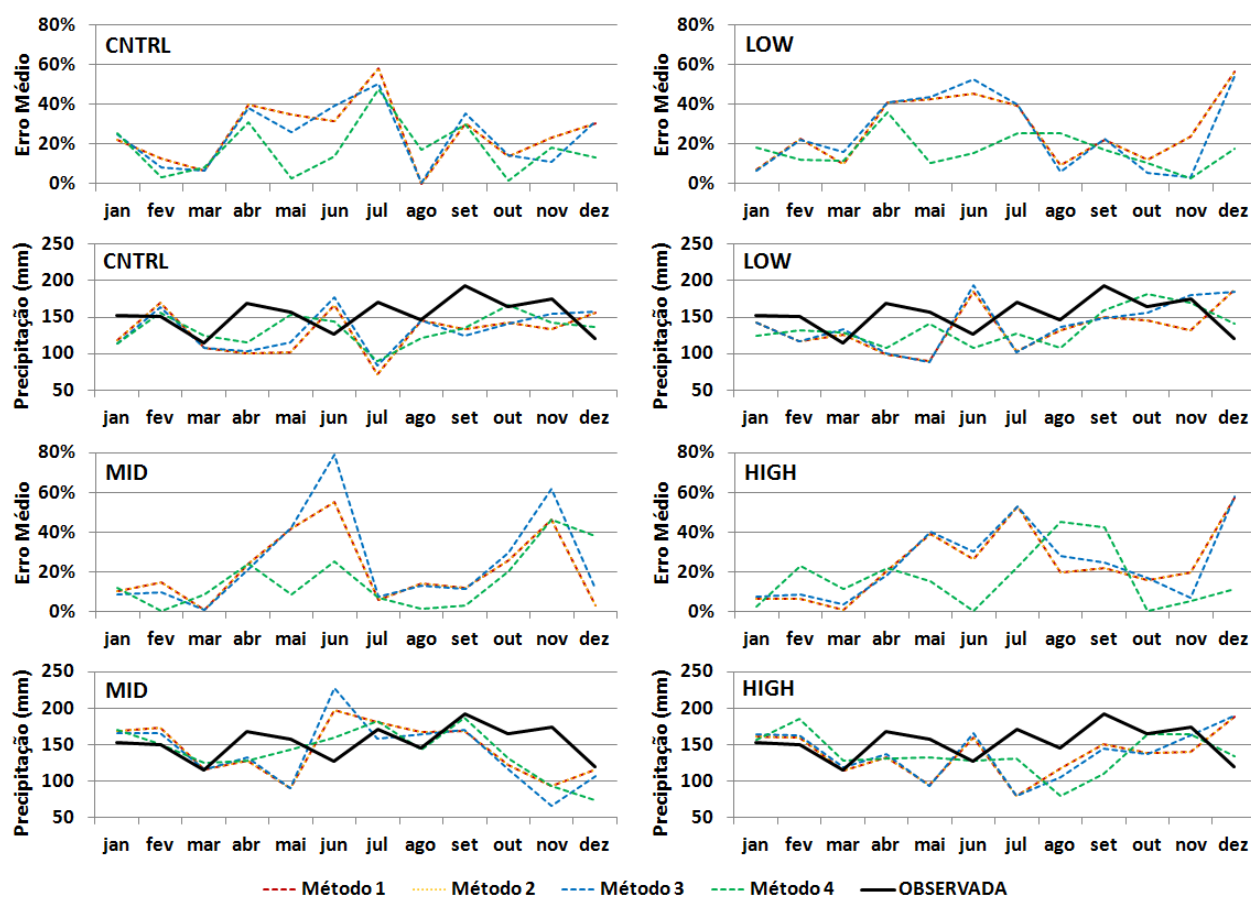


Figura 4.8. Erro proporcional médio e precipitação média mensal simulada e observada no período entre 1976 e 1990. Modelo Eta, membros corrigidos CNTRL, LOW, MID e HIGH.

Ao comparar os quatro membros, pode-se perceber uma pequena vantagem no desempenho do Eta MID, com erro percentual médio de 20,8%, considerando os quatro métodos de correção. O erro médio na estimativa da precipitação mensal na simulação com o Eta HIGH foi de 22,3%. Os piores desempenhos foram observados com o Eta CNTRL e o Eta LOW, com erros percentuais de 23,1% e 24,6%, respectivamente.

Considerando todos os 16 cenários de precipitação no período entre 1976 e 1990, os erros percentuais foram inferiores no primeiro trimestre do ano (janeiro, fevereiro e março), com erro médio de 10,4% na estimativa das médias mensais. O mês de março apresentou o menor erro médio (6,5%). Entre os meses de abril e julho tem-se o período do ano em que o modelo Eta apresenta os piores índices de desempenho, com erro médio de 33,3%. No mês de junho o erro médio na estimativa da precipitação foi de 35,9% considerando todos os 16 cenários. Os meses de abril, maio, julho, setembro, outubro e novembro apresentaram, de modo geral, uma significativa tendência de subestimativa nas precipitações médias mensais. Por outro lado, no mês de julho verificou-se uma tendência de superestimativa nas precipitações.

O cenário de precipitação proveniente da simulação com o membro Eta MID, método de correção n° 4 (MID4), foi o que apresentou o menor erro percentual médio (16,2%) na estimativa da precipitação média mensal, considerando todos os 16 cenários. Em seis meses o erro foi inferior a 10% (fevereiro, março, maio, julho, agosto e setembro). Neste cenário, o maior erro foi verificado no mês de novembro, com percentual de 46,1%.

Quanto à probabilidade de excedência das precipitações mensais (Figura 4.9), entre 1976 e 1990, os resultados mais consistentes foram observados ao utilizar os métodos de correção n° 1 e n° 2, com erro percentual médio de 12,2% e 13%, respectivamente, considerando os quatro membros do modelo Eta (CNTRL, LOW, MID, HIGH).

Já ao comparar os quatro membros, foi verificada uma pequena vantagem no desempenho do Eta MID, com erro percentual médio de 10,1%. O pior desempenho foi observado com o Eta CNTRL, com erro percentual de 19%. A Figura 4.9 ilustra também que, embora de modo geral as curvas de probabilidade de excedência das precipitações mensais provenientes do Eta MID apresentem maior concordância com o observado, as curvas referentes ao Eta LOW possuem um ajuste mais consistente às precipitações altas, isto é, com baixa probabilidade de excedência.

Os cenários de precipitação provenientes da simulação com o membro Eta MID, métodos de correção n° 1 e n° 2 (MID1 e MID2, respectivamente), foram os que

apresentaram o menor erro percentual médio na estimativa da precipitação média mensal, com valores de 8,2% e 9,2%, respectivamente.

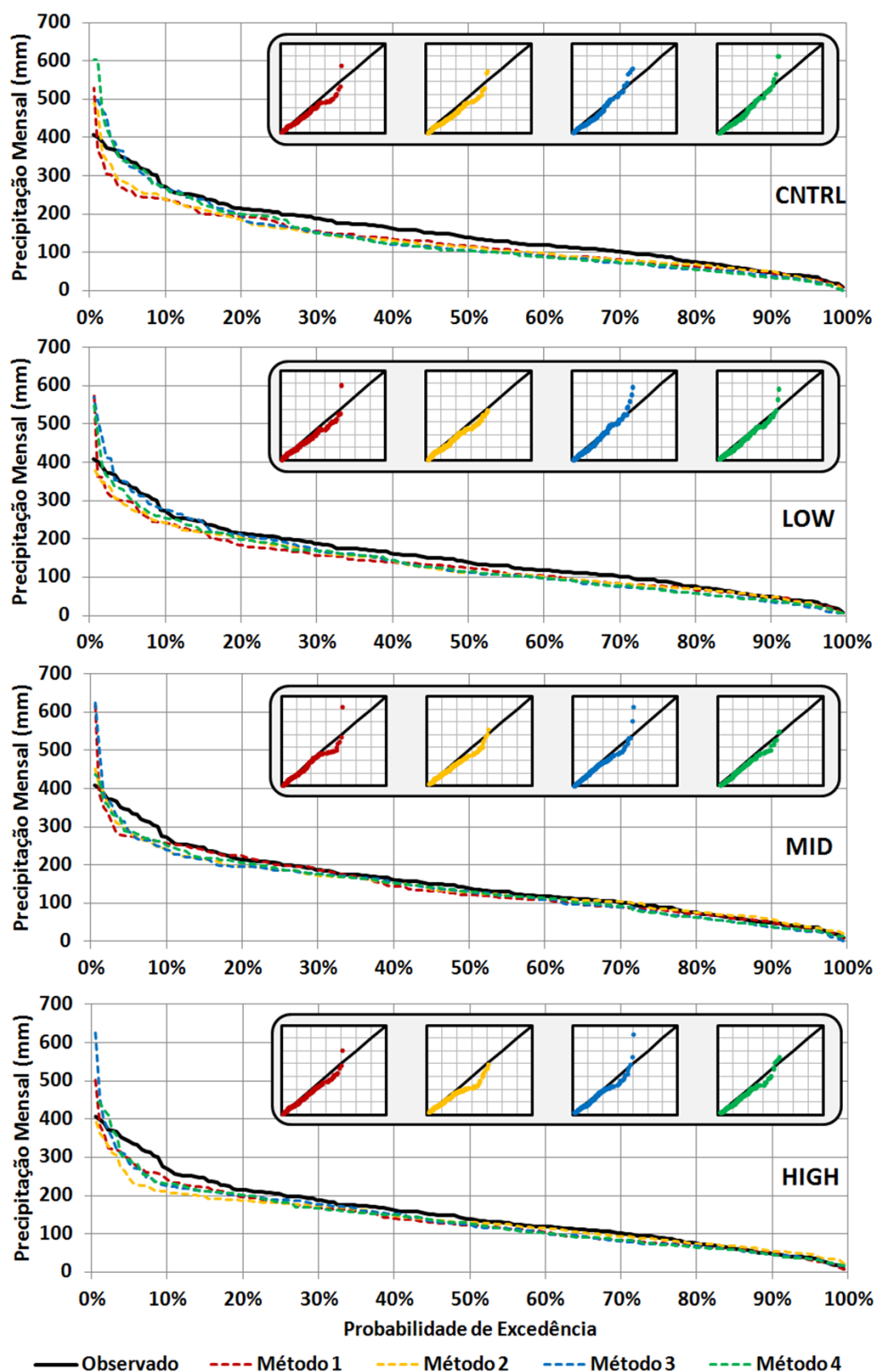


Figura 4.9. Probabilidade de excedência das precipitações mensais simulada e observada no período entre 1976 e 1990. Modelo Eta, membros corrigidos CNTRL, LOW, MID e HIGH. Os minigráficos também se referem à precipitação em função da probabilidade, sendo um gráfico cruzado: no eixo horizontal, as precipitações observadas; e no eixo vertical, as precipitações simuladas; a linha preta simboliza o ajuste ideal.

4.2.2. ANÁLISE COMPARATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (1976-1990)

Neste subitem, foram avaliados os quatro cenários de evapotranspiração de referência, calculados pelo método de Penman-Monteith com base nas variáveis climáticas simuladas pelo modelo Eta, nos membros CNTRL, LOW, MID e HIGH, no período entre 1976 e 1990. Os cenários foram comparados à série de evapotranspiração de referência calculada com base no clima observado na bacia do rio Ijuí, no mesmo período. Foram analisadas a evapotranspiração média anual, a evapotranspiração média mensal e a curva anual de probabilidade de excedência da evapotranspiração mensal.

A evapotranspiração média anual calculada com base no clima observado no período entre 1976 e 1990 foi de 1334 mm. Nos quatro cenários a evapotranspiração média anual foi subestimada (média de 1.268 mm, isto é, 66 mm a menos que o observado). Ainda assim, este valor é bem inferior ao observado com relação à precipitação, que, de modo geral, apresentou maior subestimativa (média de 200 mm a menos que o observado). Este resultado condiz com o observado em outros estudos, como em Graham (2000) ou Lenderink *et al.* (2007), em que fica evidente a dificuldade de se modelar a dinâmica das precipitações, que apresentam ocorrência e magnitudes mais aleatórias.

Dentre os quatro membros do modelo Eta, o cenário referente ao Eta CNTRL apresentou o melhor resultado quanto à evapotranspiração anual, com erro médio de -24 mm. Os outros três cenários (Eta LOW, MID e HIGH) obtiveram valores semelhantes, com erro de aproximadamente 80 mm.

Também em relação à evapotranspiração média mensal, o melhor desempenho foi obtido com o uso do Eta CNTRL, com erro percentual médio de 3,9% (Figura 4.10). Porém, diferentemente da precipitação, os outros cenários também apresentaram índices satisfatórios de desempenho, com erro médio variando entre 5,8% (Eta LOW) e 7,1% (Eta MID). Logo, fica claro que em relação à evapotranspiração existe maior semelhança entre os membros do modelo Eta e suas variáveis climáticas.

De modo geral, considerando todos os quatro cenários de evapotranspiração, no período entre 1976 e 1990, os erros percentuais foram inferiores nos meses mais quentes do ano, mais especificamente entre novembro e fevereiro, com erro médio de apenas 3,2%. Nos demais meses, o erro médio foi de 7,2%, com destaque negativo para o mês de julho e outubro, com erro de 13,4% e 10,6%, respectivamente (Figura 4.10).

Quanto à probabilidade de excedência da evapotranspiração mensal, os resultados mais consistentes também foram observados ao utilizar o membro Eta CNTRL, com erro percentual médio de 3,2%. Este resultado pode ser observado também na Figura 4.11, onde se observa que as curvas de probabilidade resultantes dos outros membros também apresentam uma boa concordância com a observada, com erros variando entre 6,2% (Eta LOW) e 6,9% (Eta MID).

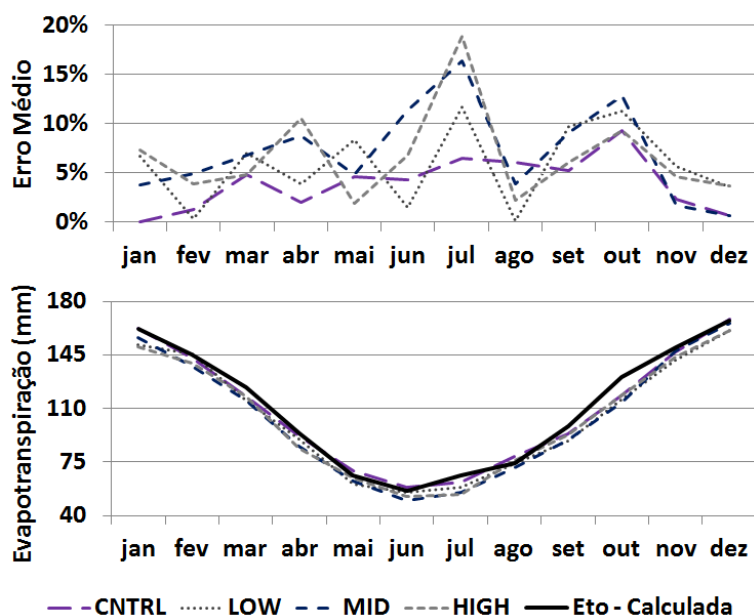


Figura 4.10. Evapotranspiração de referência mensal calculada a partir de dados climáticos observados e o erro proporcional médio referente à evapotranspiração simulada entre 1976 e 1990. Modelo Eta, membros corrigidos CNTRL, LOW, MID e HIGH.

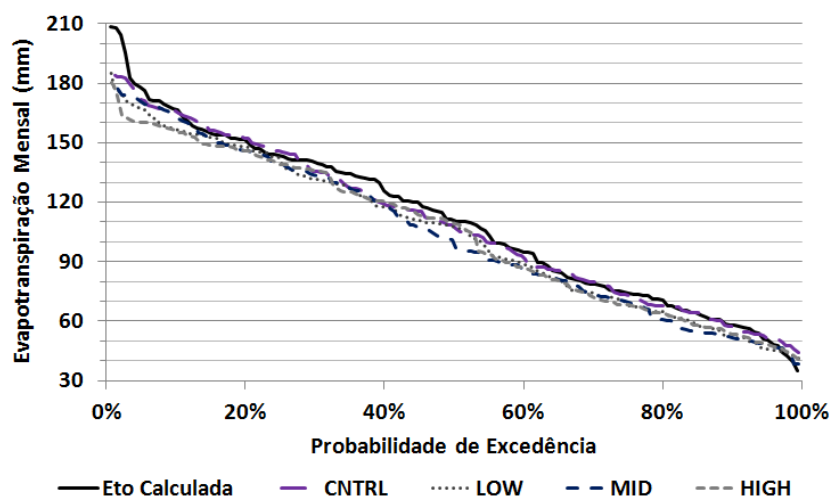


Figura 4.11. Probabilidade de excedência da evapotranspiração mensal calculada a partir de dados climáticos observados e da evapotranspiração mensal simulada a partir do modelo Eta, membros corrigidos CNTRL, LOW, MID e HIGH, entre 1976 e 1990.

4.2.3. ANÁLISE COMPARATIVA DAS VAZÕES MENSAIS (1976-1990)

Neste subitem, foram avaliadas as 16 combinações de cenários de vazão, obtidas através da modelagem hidrológica com o uso de RNAs, tendo como base a precipitação e a evapotranspiração resultantes da simulação com o modelo Eta (membros CNTRL, LOW, MID e HIGH), no período entre 1976 e 1990. Tratam-se de quatro versões (uma para cada método de correção dos dados de precipitação) para cada membro. Os cenários foram comparados à série de vazão observada na bacia do rio Ijuí, no mesmo período.

Conforme descrito no capítulo de materiais e métodos, foram comparados e analisados os seguintes aspectos: i) vazão média de longo período (QMLP); ii) vazão média mensal; iii) desvio padrão das vazões mensais; iv) curva anual de permanência das vazões médias mensais; v) curvas trimestrais de permanência das vazões médias mensais; vi) vazões baixas, com permanência superior a 90% ($Q > 90$); vii) vazões altas, com permanência inferior a 10% ($Q < 10$).

A QMLP observada no período de avaliação, entre janeiro de 1976 e dezembro de 1990, foi de 159 m³/s. De modo geral, neste aspecto, os cenários de vazão oriundos do membro MID apresentaram os melhores resultados, com vazão média de 152 m³/s, sendo o erro médio igual a 4,2%. Os piores resultados foram observados nos cenários com o uso do membro CNTRL, com vazão média de 130 m³/s, subestimando em 18,1% a QMLP.

Considerando os quatro métodos de correção dos dados de precipitação, os que originaram os melhores cenários de vazão, em relação à QMLP, foram os métodos n° 3 e n° 4 (*Quantile-Based*, em nível mensal e trimestral, respectivamente), com erro médio de 8,4% e 9,5%. Nos cenários obtidos com o uso das precipitações corrigidas pelos métodos n° 1 e n° 2 (*Delta Change Approach* e *Direct Approach*) o erro foi superior, com índices em torno dos 15%.

Ainda quanto à QMLP, como consequência direta da considerável subestimativa de precipitação, todos os cenários subestimaram as vazões. O cenário obtido através do membro LOW, método de correção n° 3 (LOW3), aquele que apresentou o melhor desempenho, com vazão média de 156 m³/s, erro de apenas 1,6%. Outros cenários que merecem ser destacados são o MID1 e o MID2, com erros de 1,7% e 4,1%, respectivamente. Estes três cenários apresentaram o melhor desempenho neste critério, que envolve o volume médio de água

escoada na bacia, principalmente, por também terem apresentado um volume de precipitação mais próximo do observado no período.

Com relação às vazões médias mensais, de modo geral, os cenários de vazão oriundos do membro LOW apresentaram os melhores resultados, com erro médio igual a 22,6% considerando todos os métodos de correção e meses do ano. Além disso, o padrão observado de vazões mais elevadas entre maio e novembro é melhor representado ao utilizar o membro LOW, como mostra a Figura 4.12. Os cenários referentes ao Eta CNTRL e Eta MID também obtiveram resultados satisfatórios, com erro médio igual a 24,1% e 26,3%, respectivamente. As incertezas associadas aos cenários do Eta HIGH, no aspecto das vazões médias mensais, foram bem superiores, atingindo um erro percentual médio de 32,9%.

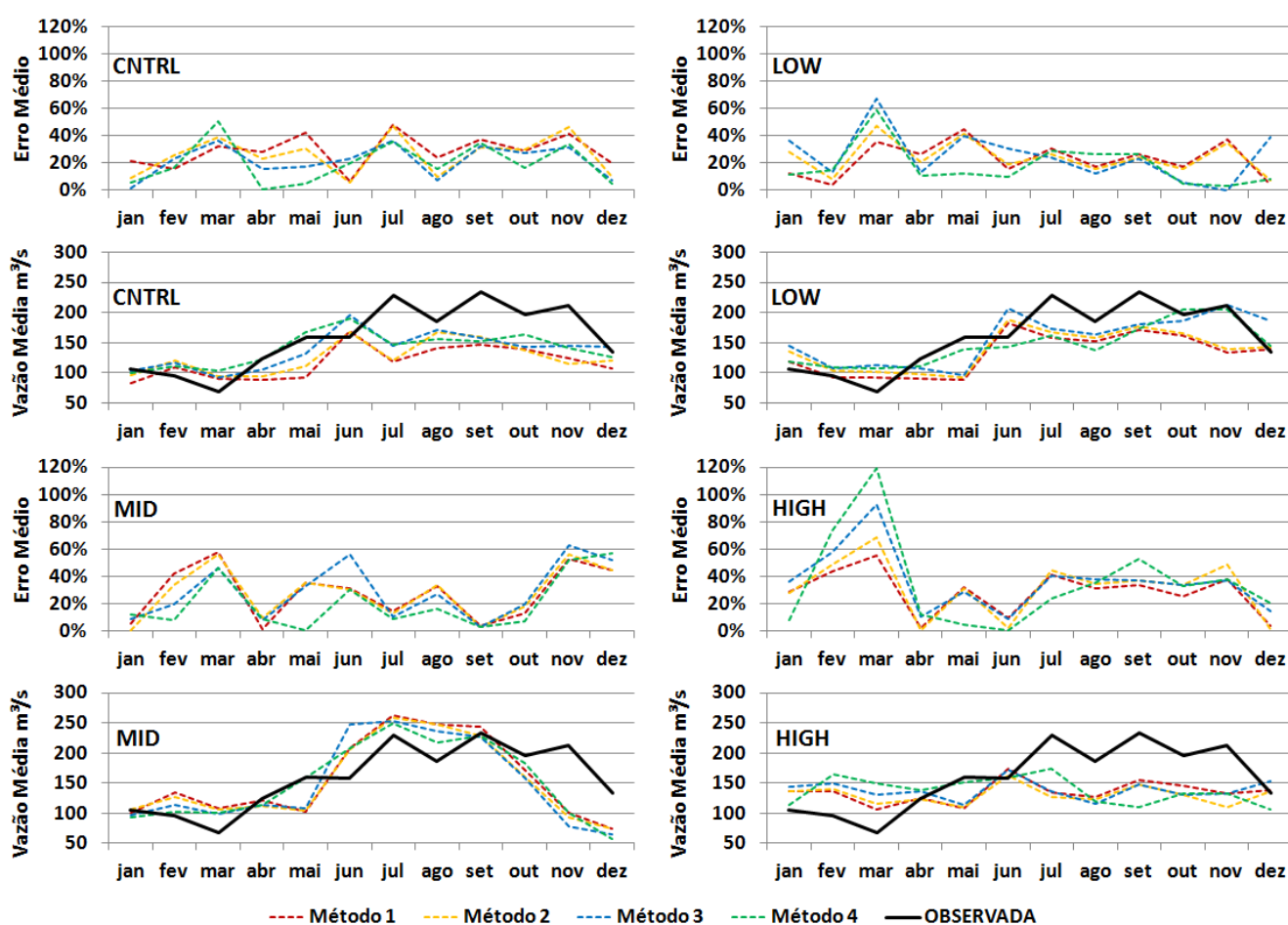


Figura 4.12. Erro proporcional médio e vazão média mensal simulada e observada no período entre 1976 e 1990. Modelo Eta, membros corrigidos CNTRL, LOW, MID e HIGH. Modelagem hidrológica com o uso de RNAs.

Comparando os quatro métodos de correção dos dados de precipitação, o que originou o melhor cenário de vazão foi o método n° 4, com erro médio de 23,5% nos quatro membros. Os cenários de vazão obtidos com base nos dados de precipitação corrigidos pelos outros três métodos apresentaram erro médio entre 27% e 28,1%.

Ao analisar os cenários individualmente, quanto à vazão média em cada mês, o melhor cenário foi o LOW4, com erro médio de 18%. Em seguida, pode-se destacar os cenários CNTRL4 e MID4, com erro médio de 20,1% e 20,8%, respectivamente. Estes resultados são ilustrados pela Figura 4.12, onde é possível observar que, de modo geral, os valores de vazão média mensal obtidos com o uso do método de correção *Quantile-Based*, em nível trimestral (método n° 4), apresentam maior consistência, ajustando-se de forma mais eficiente à curva observada. A maior precisão destes cenários, quanto à estimativa da vazão média mensal, se deve principalmente ao fato destes terem apresentado valores de chuva média mensal mais próximos dos observados no período de análise.

A incerteza média dos cenários em relação às vazões médias mensais pode ser representada pelo erro proporcional médio de 26,5%, com desvio padrão de 5,2%. O pior cenário foi o HIGH3, com erro médio de 36,3%.

Considerando os erros mensais, no mês de abril, os cenários simulados apresentaram maior consistência, com erro médio de 12%. Já no mês de março, os cenários apresentaram o menor desempenho, com erro médio de 56,8% (Figura 4.12).

De modo geral, quanto à dispersão das vazões médias mensais no período de avaliação, os cenários de vazão oriundos do membro MID apresentaram os melhores resultados, com erro médio igual a 34,9%. Comparando os quatro métodos de correção dos dados precipitação, o método n° 1 é o que se destaca entre os cenários de vazão, na avaliação da dispersão dos valores mensais de vazão, com erro médio de 28,7%.

Analisando individualmente os cenários de vazão, quanto ao desvio padrão das vazões mensais, o melhor cenário foi o que resultou da aplicação do método de correção n° 1 aos dados de precipitação, com o membro Eta LOW (LOW1), com erro médio de 24,5%. Em seguida, pode-se destacar os cenários MID4 e CNTRL1, com erro médio de 28,3% e 29%, respectivamente.

No mês de junho os cenários simulados apresentaram maior consistência em relação à dispersão dos valores de vazão, com erro médio de 16,9%. Já no mês de fevereiro, de modo geral, os cenários apresentaram menor desempenho, com erro médio de 70,5%, com dispersão das vazões mensais muito superior ao observado no mesmo mês durante o período entre 1976 e 1990.

Ao realizar testes de hipóteses quanto à semelhança da variância (teste F) e da média das vazões mensais (teste t), confrontando cada cenário com as vazões observadas, verificou-se que: i) no teste F, ao nível de significância de 5%, a hipótese nula de que as variâncias são

iguais (simulado x observado) deve ser rejeitada em todos os cenários referentes aos membros CNTRL e HIGH, não podendo ser rejeitada nos demais cenários (Eta LOW e Eta MID); ii) já no teste t, ao nível de significância de 5%, a hipótese nula de que médias são iguais (simulado x observado) deve ser rejeitada apenas no cenário CNTRL1.

O resultado dos testes de hipóteses indica que, em relação às vazões médias mensais, com a utilização dos cenários provenientes dos membros Eta LOW e Eta MID, independente do método de correção aplicado, a hipótese de que os valores de vazão (média e variância) simulados são semelhantes aos observados não deve ser rejeitada. Isto indica, pelo menos nos aspectos analisados, que não se pode invalidar a utilização destes cenários climáticos para a obtenção de vazões médias mensais por meio de simulação hidrológica.

Quanto às curvas de permanência das vazões mensais, considerando o período entre 1976 e 1990, a Figura 4.13 ilustra os resultados obtidos. De modo geral, os cenários de vazão oriundos dos membros LOW e MID novamente apresentaram os melhores resultados, com erro médio igual a 12,6% e 15,4%, respectivamente. Os cenários referentes ao Eta CNTRL e Eta HIGH obtiveram resultados bem menos consistentes, com erro médio igual a 22,3% e 23,8%, respectivamente.

Comparando os quatro métodos de correção dos dados precipitação, os que originaram os melhores cenários de vazão quanto à permanência foram os métodos n° 3 e n° 4, com erro médio de 17% e 16,8%, respectivamente. Individualmente, o melhor cenário foi o LOW3, utilizando o membro Eta LOW, com correção das precipitações a partir do método de correção n° 3, com erro médio de apenas 8,7%. Em seguida, pode-se destacar os cenários LOW4 e LOW2, com erro médio de 10,2% e 11%, respectivamente (Figura 4.13). Já o pior cenário foi o HIGH2, com erro médio de 30,8% na estimativa da curva de permanência. Neste critério, a incerteza média dos cenários pode ser representada pelo erro proporcional médio de 18,5%, com desvio padrão de 6,1%.

De modo geral, considerando somente a parcela das vazões mais baixas ($Q > 90\%$), os cenários de vazão oriundos dos membros CNTRL e LOW apresentaram os melhores resultados, com erro médio igual a 17,8% e 19,4%, respectivamente. Estes valores foram bem superiores com o Eta MID e o Eta HIGH, com erro médio nas vazões baixas de 40,5% e 57,9%, na ordem.

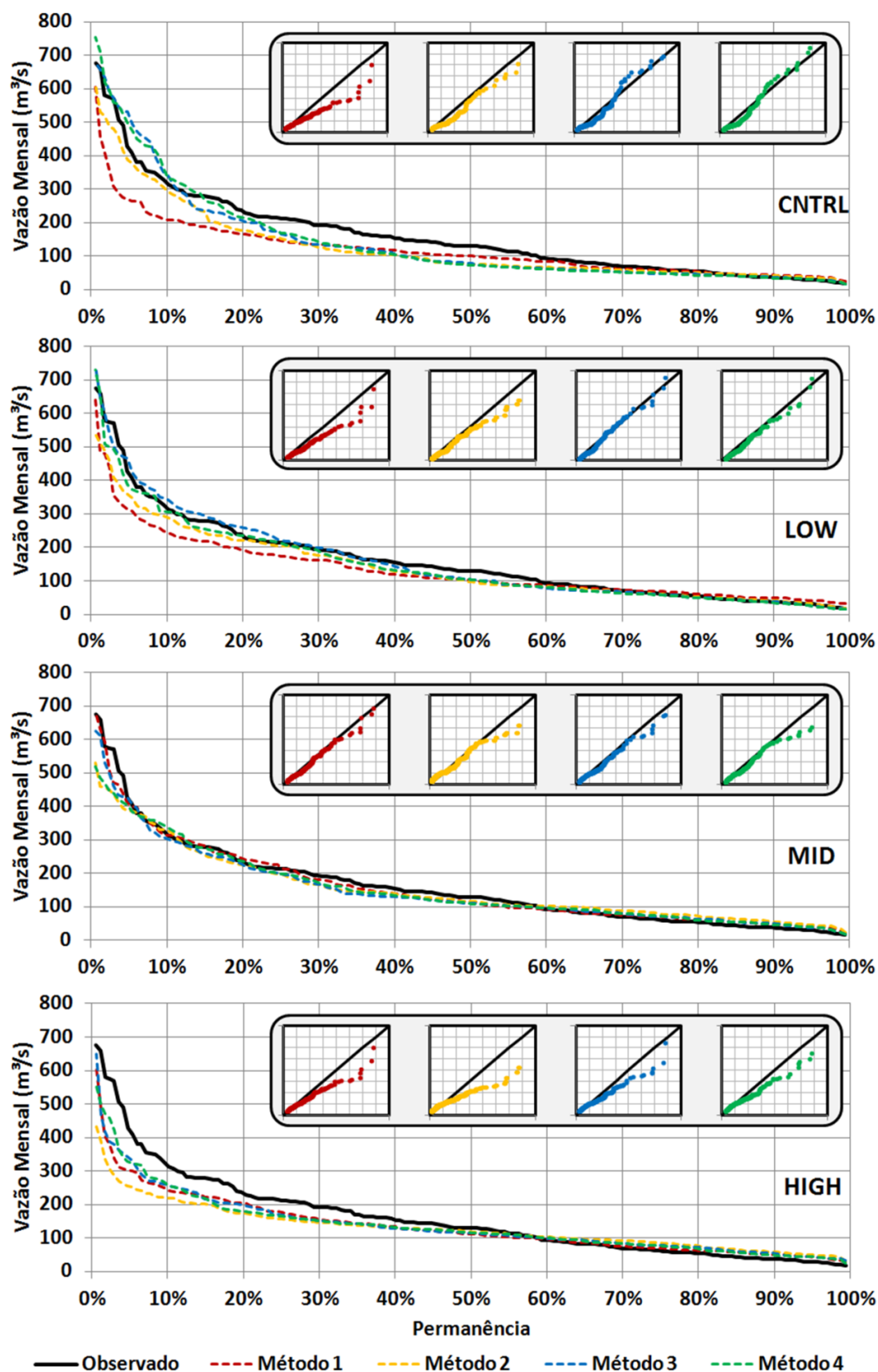


Figura 4.13. Curvas de permanência das vazões mensais simulada e observada no período entre 1976 e 1990. Modelo Eta, membros corrigidos CNTRL, LOW, MID e HIGH. Os minigráficos também se referem à vazão em função da permanência, sendo um gráfico cruzado: no eixo horizontal, as vazões observadas; e no eixo vertical, as vazões simuladas; a linha preta simboliza o ajuste ideal.

Comparando os quatro métodos de correção dos dados precipitação, os que originaram os melhores cenários de vazões baixas foram, novamente, os resultantes da aplicação dos métodos n° 3 e n° 4, ambos com erro médio de 25,1%. Utilizando os outros métodos, o erro médio foi bem superior, na faixa entre 40% e 45%. Individualmente, o melhor cenário quanto às vazões de elevada permanência (vazões baixas) foi o LOW2, com erro médio de apenas 5,3%. Em seguida, pode-se destacar os cenários CNTRL4 e CNTRL3, com erro médio de 5,5% e 6,7%, respectivamente.

Ao considerar somente a parcela das vazões mais altas, com baixo percentual de permanência ($Q < 10\%$), os cenários de vazão oriundos dos membros MID e LOW apresentaram os melhores resultados, com erro médio igual a 8,7% e 13,8%, respectivamente. Comparando os quatro métodos de correção dos dados precipitação, os que originaram os melhores cenários de vazões altas também foram os métodos n° 3 e n° 4, com erro médio de 12,4% e 13,1%, respectivamente.

Individualmente, o melhor cenário, quanto às vazões altas, foi o MID1, com erro médio de apenas 5%. Em seguida, pode-se destacar os cenários LOW3, LOW4 e MID3, com erro médio de 5,9%, 7,1% e 7,4%, respectivamente. Novamente, o pior cenário foi o HIGH2, com erro médio de 39,4% na estimativa da parcela das vazões altas da curva de permanência.

O principal aspecto físico que justifica as diferenças obtidas entre o cenário de melhor desempenho (MID1) e aquele que apresentou o pior resultado (HIGH2) é a sequência de meses com balanço positivo de água (diferença entre a precipitação e a evapotranspiração), que é uma das variáveis de entrada do modelo hidrológico. No cenário HIGH2, não foi obtido nenhum valor de saldo de água próximo ao observado, fazendo com que a maior vazão mensal, no período entre 1976 e 1990, não ultrapassasse 434 m³/s. Este valor é bem inferior a maior vazão observada no mesmo período, de 676 m³/s.

Na fase de comparação entre as curvas trimestrais de permanência das vazões mensais, simuladas e observadas, os cenários de vazão oriundos dos membros LOW e CNTRL apresentaram os melhores resultados, de modo geral, com erro médio igual a 27,3% e 28,1%, respectivamente (Tabela 4.2). Os cenários referentes ao Eta MID e Eta HIGH obtiveram resultados menos consistentes, com erro médio igual a 35,4% e 40,7%, respectivamente.

Individualmente, o melhor cenário foi obtido com o produto LOW2, com erro médio de 24,6% nas curvas trimestrais de permanência das vazões mensais. Em seguida, pode-se destacar os cenários CNTRL3 e CNTRL4, com erro médio de 26,9% e 27,5%, respectivamente.

Tabela 4.2. Erro médio dos cenários quanto às curvas trimestrais de permanência das vazões.

Cenário / Trimestre	1° Trimestre JFM	2° Trimestre AMJ	3° Trimestre JAS	4° Trimestre OND	Média
CNTRL1	12,1%	34,6%	38,2%	32,6%	29,4%
CNTRL2	24,2%	19,3%	38,2%	33,1%	28,7%
CNTRL3	23,5%	14,4%	35,3%	34,6%	26,9%
CNTRL4	26,3%	13,1%	37,2%	33,6%	27,5%
LOW1	21,5%	39,4%	28,9%	22,5%	28,1%
LOW2	23,8%	25,3%	26,4%	22,8%	24,6%
LOW3	33,0%	22,5%	24,3%	35,1%	28,7%
LOW4	24,0%	27,5%	29,6%	30,7%	27,9%
MID1	28,6%	44,1%	23,9%	38,0%	33,6%
MID2	30,4%	59,3%	31,1%	35,5%	39,1%
MID3	21,5%	47,8%	28,4%	44,3%	35,5%
MID4	19,1%	48,6%	25,9%	39,7%	33,3%
HIGH1	44,6%	49,7%	36,8%	25,4%	39,1%
HIGH2	45,6%	61,9%	38,1%	24,9%	42,6%
HIGH3	51,7%	54,5%	38,5%	20,0%	41,2%
HIGH4	44,5%	53,3%	37,4%	24,3%	39,9%

Conforme mostra a Tabela 4.2, no primeiro trimestre (JFM), os cenários referentes aos membros CNTRL, MID e LOW obtiveram os melhores desempenhos, com erro médio de 21,5%, 24,9% e 25,5%, respectivamente. Utilizando o Eta HIGH o erro médio foi bem superior (46,6%). Individualmente, o melhor cenário foi o CNTRL1, com erro de 12,1%. Já no segundo trimestre (AMJ), os cenários referentes ao membro CNTRL obtiveram os melhores desempenhos, com erro médio de 20,3%. Utilizando os modelos Eta LOW, MID e HIGH o erro médio foi superior, com erro médio de 28,7%, 49,9% e 54,8%, respectivamente. Individualmente, o melhor cenário foi o CNTRL4, com erro de 13,1%. No terceiro trimestre (JAS), os cenários referentes aos membros LOW e MID obtiveram os melhores desempenhos, ambos com erro médio de 27,3%. Individualmente, os melhores cenários foram o MID1 e o LOW3, com erro de 23,9% e 24,3%, respectivamente. Por fim, no último trimestre (OND), os cenários referentes aos membros HIGH e LOW obtiveram os melhores desempenhos, com erro médio de 23,7% e 27,8%, respectivamente. Individualmente, o melhor cenário foi o HIGH3, com erro de 20%.

Ainda levando em consideração a análise das curvas trimestrais de permanência oriundos dos 16 cenários, porém com enfoque na parcela das vazões mais baixas ($Q > 90\%$), os cenários de vazão provenientes do membro CNTRL apresentaram os melhores resultados, com erro médio igual a 30,1%. Neste aspecto, o pior desempenho foi obtido com o Eta MID,

com erro médio de 72,5%. Individualmente, os melhores cenários foram o CNTRL4, o CNTRL3 e o CNTRL2, com erro médio de 22,2%, 24,9% e 27,6%, respectivamente.

Por outro lado, considerando somente a parcela das vazões mais altas ($Q < 10\%$), os cenários de vazão oriundos do membro MID apresentaram os melhores resultados, com erro médio igual a 22,5%. Neste aspecto, o pior desempenho foi obtido com o Eta HIGH, com erro médio de 41,8%. Individualmente, os melhores cenários foram o MID4 e MID1, com erro médio de 18,2% e 19,7%, respectivamente.

Ao realizar o teste Kolmogorov-Smirnov para avaliar as curvas de permanência, quanto à semelhança entre as distribuições de frequência das vazões simuladas e a distribuição de frequência das vazões observadas, verificou-se que, ao nível de significância de 5%, a hipótese nula de que as distribuições de frequência das vazões mensais (simuladas x observadas) são iguais deve ser rejeitada nos seguintes cenários: CNTRL1, CNTRL2, CNTRL3, CNTRL4, LOW1, HIGH2 e HIGH4. O resultado dos testes de hipóteses indica que, em relação à permanência das vazões, com a utilização dos cenários provenientes dos membros Eta MID, Eta LOW (métodos 2, 3 e 4) e Eta HIGH (métodos 1 e 3), a hipótese de que os valores de vazão (permanência) simulados são semelhantes aos observados não deve ser rejeitada.

Assim, não se pode invalidar a utilização de alguns cenários climáticos (corrigidos), provenientes do modelo Eta, para a obtenção de curvas de permanência de vazões mensais. Em outros termos, pode-se afirmar que os resultados indicam a viabilidade do estudo da disponibilidade hídrica no futuro com base na metodologia adotada neste módulo do trabalho.

4.3. MÓDULO 3: OS CENÁRIOS ESTOCÁSTICOS DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO FUTURO

Neste item serão apresentados os resultados e realizadas as discussões referentes à análise da modelagem estocástica das vazões mensais e das mudanças e incertezas na disponibilidade hídrica no período futuro, entre 2011 e 2040.

No Módulo 2 foram avaliadas as condições climáticas simuladas através do modelo Eta CPTEC/HadCM3. Os principais resultados obtidos foram: i) apenas o Eta HIGH não se mostrou satisfatório na maioria dos aspectos analisados quanto à precipitação,

evapotranspiração e vazão; ii) na avaliação das vazões resultantes do processo de modelagem hidrológica, se destacou o membro Eta LOW, principalmente no que se refere às vazões médias mensais (erro médio de 22,6%), às curvas anuais de permanência das vazões (erro médio de 12,6%) e às curvas trimestrais de permanência das vazões (erro médio de 27,3%); iii) com o Eta LOW pode-se observar também um bom ajuste tanto às vazões baixas (permanência superior a 90%) quanto às vazões altas (permanência inferior a 10%); iv) o cenário climático que se destacou foi o Eta LOW, com aplicação do método de correção *Direct Approach*, principalmente quanto à curva de permanência das vazões.

Uma vez que o enfoque desta Tese está direcionado para uma abordagem estocástica que considera as incertezas associadas às diversas etapas que compõem a modelagem da disponibilidade hídrica no futuro, foi necessário adotar um cenário climático para testar a metodologia. Assim, tendo-se em consideração os resultados obtidos no Módulo 2, foi definida a utilização do membro Eta LOW, com a aplicação do método de correção *Direct Approach*, para o período entre 2011 e 2040.

4.3.1. CENÁRIO CLIMÁTICO CORRIGIDO E SÉRIE VAZÃO SIMULADA PARA O PERÍODO FUTURO (2011-2040)

O cenário climático para o período entre 2011 e 2040 foi obtido através dos dados do modelo Eta, membro LOW, com a aplicação do método de correção *Direct Approach*. As informações diárias corrigidas de temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade dos ventos e radiação solar foram utilizadas para a estimativa da evapotranspiração de referência.

Na Figura 4.14 são apresentadas as séries mensais de precipitação acumulada, evapotranspiração de referência e vazão média, entre 2011 e 2040, na bacia do rio Ijuí. As vazões mensais foram obtidas tendo como base as séries obtidas de precipitação e de evapotranspiração, a partir da simulação hidrológica com uso de transformações nas variáveis de entrada e de uma RNA, conforme o modelo calibrado no Módulo 1 desta Tese.

De acordo com os resultados obtidos, na bacia do rio Ijuí, a precipitação acumulada média anual deverá aumentar 12,3%, passando de 1.746 mm (dados observados, período base, de 1961 a 1990) para 1.961 mm entre 2011 e 2040. Este crescimento no volume de

precipitações se deve a uma tendência de aumento nas precipitações dos meses de janeiro a junho, principalmente. No mês de junho, por exemplo, a precipitação média, entre 1961 e 1990, de acordo com dados observados, era de 138,8 mm. No futuro, entre 2011 e 2040, de acordo com a série de precipitação corrigida (modelo Eta), a média de precipitação em junho foi estimada em 191,2, representando um aumento médio no regime de chuvas de 37,8%.

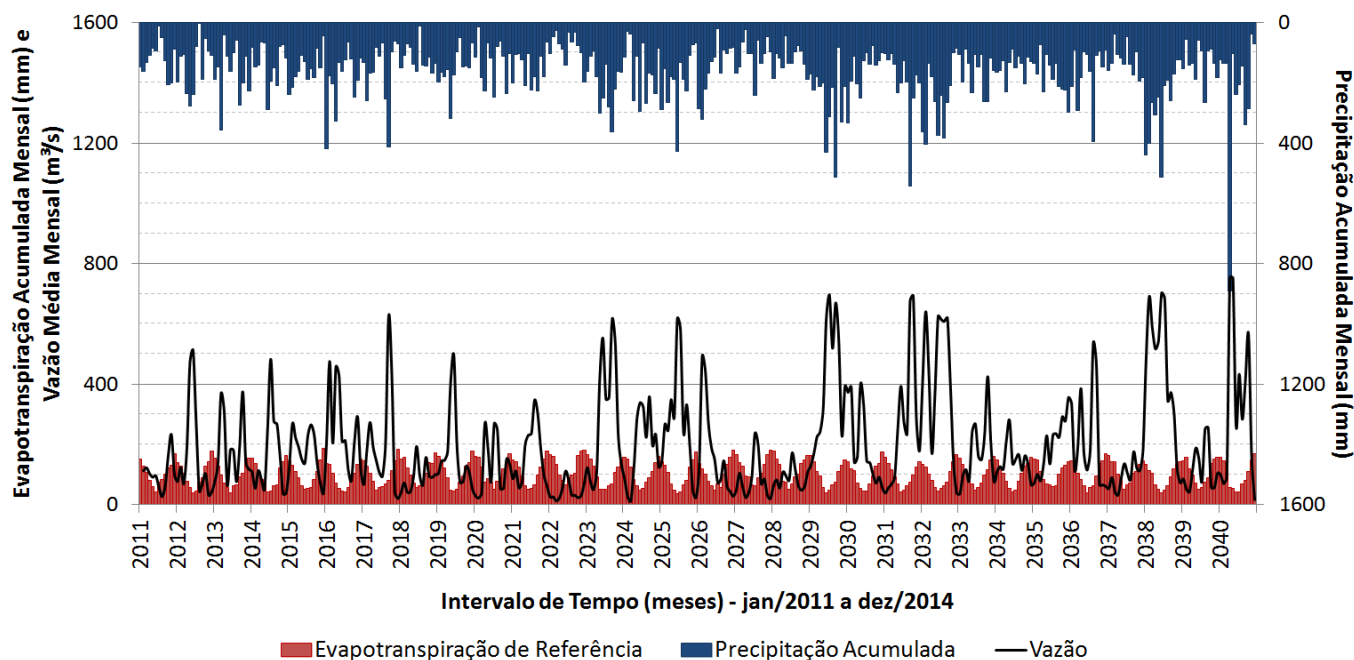


Figura 4.14. Séries Mensais de Evapotranspiração de Referência, Precipitação Acumulada e Vazão Média, simuladas para o período entre janeiro de 2011 e dezembro de 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, posto Santo Ângelo.

Quanto à evapotranspiração de referência acumulada foi observada uma pequena redução nos valores médios anuais, reduzindo de 1.316 mm (dados observados, período base, de 1961 a 1990) para 1.245 mm entre 2011 e 2040. Esta redução na lâmina de água evapotranspirada foi observada em praticamente todos os meses. A maior diferença foi observada no mês de janeiro: na série observada, entre 1961 e 1990, a evapotranspiração média era de 163,2 mm, enquanto que na série estimada para o futuro reduziu para 151,8 mm, representando um decréscimo de 7% na lâmina de água que sofre evapotranspiração neste mês.

A projeção de redução da evapotranspiração para o período futuro, entre 2011 e 2040, está associada ao aumento da umidade relativa do ar e à diminuição de radiação solar incidente na superfície terrestre, provavelmente, associada ao aumento da nebulosidade. Esta

afirmação pode ser confirmada ao analisar as mudanças relacionadas às cinco variáveis climáticas utilizadas para o cálculo da evapotranspiração (Tabela 4.3).

Tabela 4.3. Mudanças relacionadas à temperatura, umidade relativa, velocidade dos ventos, radiação solar e pressão atmosférica, no período entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí.

MUDANÇA PROJETADA PARA 2011-2040 (Base: 1961-1990)					
Mês	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Ventos (m/s)	Radiação (MJ)	Pressão Atmosférica (kPa)
Janeiro	1,110	2,143	-0,110	-0,711	0,018
Fevereiro	0,697	2,108	-0,046	-0,137	0,041
Março	0,673	1,788	0,032	-0,321	0,014
Abril	0,518	3,322	-0,023	-0,248	0,054
Maiο	1,207	2,798	0,011	-0,165	-0,125
Junho	0,119	3,232	-0,010	-0,309	-0,012
Julho	0,610	3,069	0,092	0,150	0,050
Agosto	1,033	2,482	0,269	-0,108	0,023
Setembro	1,504	1,924	0,154	-0,260	-0,178
Outubro	0,776	0,485	0,057	0,023	0,038
Novembro	0,487	0,525	-0,033	0,265	0,034
Dezembro	1,380	-0,224	-0,056	-0,020	0,041

Pode-se observar, por exemplo, que a temperatura média deverá ser superior em todos os meses do ano, em comparação ao período base (1961-1990). Os valores referentes à elevação da temperatura podem conduzir a um erro na interpretação da evapotranspiração, dependendo da metodologia utilizada para a estimativa. Deve-se destacar, portanto, a importância de se utilizar um método consistente para o cálculo da evapotranspiração, não apenas considerando a temperatura do ar.

Quanto às mudanças observadas nas vazões médias mensais, comparando a série de vazões observadas (1961-1990) e a série simulada para o futuro (2011-2040), foi observado um aumento da vazão média entre os meses de janeiro e outubro. Além disso, a frequência de eventos extremos de vazões mínimas (estiagens) e máximas (cheias) foi suavemente superior, indicando variações hidrológicas mais abruptas para o período futuro.

4.3.2. ANÁLISE DA MODELAGEM ESTOCÁSTICA DAS VAZÕES MENSAIS

As séries estocásticas geradas, utilizando o modelo estocástico multiplicativo proposto no Módulo 3, preservaram diversas características da série original, simulada para o período entre 2011 e 2040. Considerando a média das 1.000 séries geradas para o período futuro, a QMLP foi de 200,3 m³/s, apenas 1,1 m³/s (0,5%) a mais que a QMLP simulada (série original). Este resultado se refletiu também na curva acumulada de volume escoado (Figura 4.15), em que a diferença média entre a curva simulada (série original) e a tendência central das 1.000 curvas geradas (séries estocásticas) foi de apenas 4,8%. Além disto, é possível observar que a suave tendência de longo período também foi preservada, acentuando-se o crescimento dos valores na metade final do período.

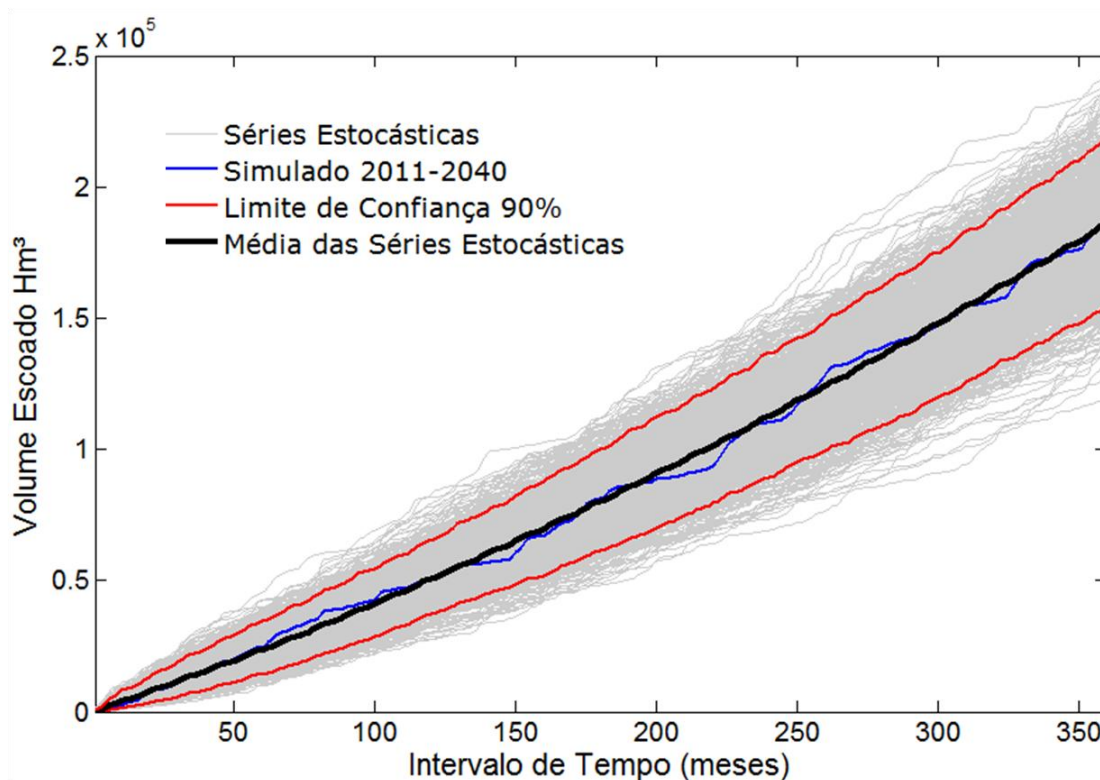


Figura 4.15. Curvas de volume escoado no futuro (2011-2040) - diferença entre a série original (simulada) e as 1.000 séries estocásticas geradas – bacia do rio Ijuí, posto Santo Ângelo.

Outra característica mantida da série original foi a vazão média mensal. Considerando a média das 1.000 séries geradas para o período entre 2011 e 2040 a diferença absoluta média

foi de apenas 0,52% (Tabela 4.4). A maior diferença absoluta entre as vazões médias ocorreu no mês de outubro, com superestimativa de 1,65 m³/s.

Tabela 4.4. Diferença entre a série original (simulada) e as 1.000 séries estocásticas geradas - vazão média e desvio padrão mensal no período entre 2011 e 2040, posto Santo Ângelo.

Mês	Vazão Média Mensal (m ³ /s)			Desvio Padrão Mensal (m ³ /s)		
	Série Original	Média das Séries Geradas	Diferença Percentual	Série Original	Média das Séries Geradas	Diferença Percentual
Janeiro	128,7	127,6	-0,83%	118,0	102,5	-13,13%
Fevereiro	178,5	177,2	-0,74%	179,3	142,2	-20,67%
Março	155,4	154,5	-0,62%	143,7	124,0	-13,73%
Abril	199,2	198,2	-0,48%	163,2	158,8	-2,66%
Mai	249,6	249,2	-0,16%	168,0	211,2	25,70%
Junho	276,5	276,5	0,01%	195,0	224,0	14,87%
Julho	262,5	262,9	0,16%	183,5	213,4	16,29%
Agosto	217,7	218,3	0,27%	149,4	175,5	17,44%
Setembro	268,1	269,5	0,52%	205,2	216,6	5,54%
Outubro	228,9	230,6	0,72%	183,9	188,0	2,24%
Novembro	126,9	128,0	0,86%	83,8	104,2	24,43%
Dezembro	97,0	97,9	0,93%	87,8	78,9	-10,11%

O desvio padrão mensal foi razoavelmente preservado, com diferença absoluta percentual média de 13,9% entre a série original e a tendência central das 1.000 séries geradas. No mês de outubro observou-se a menor diferença, de apenas 4,12 m³/s (2,2%). A maior diferença quanto ao desvio padrão mensal foi verificada no mês de maio (43,2 m³/s), equivalente a 25,7%.

Na Figura 4.16 são ilustradas as curvas de permanência da vazão média mensal no período futuro (2011-2040), na qual fica clara a semelhança entre a série original e a tendência central observada nas séries estocásticas geradas. As maiores diferenças foram observadas nas vazões extremamente elevadas, com permanência inferior a 2%. No restante dos intervalos de permanência a curva original esteve sempre localizada no intervalo de confiança de 90% definido pelas linhas vermelhas no gráfico.

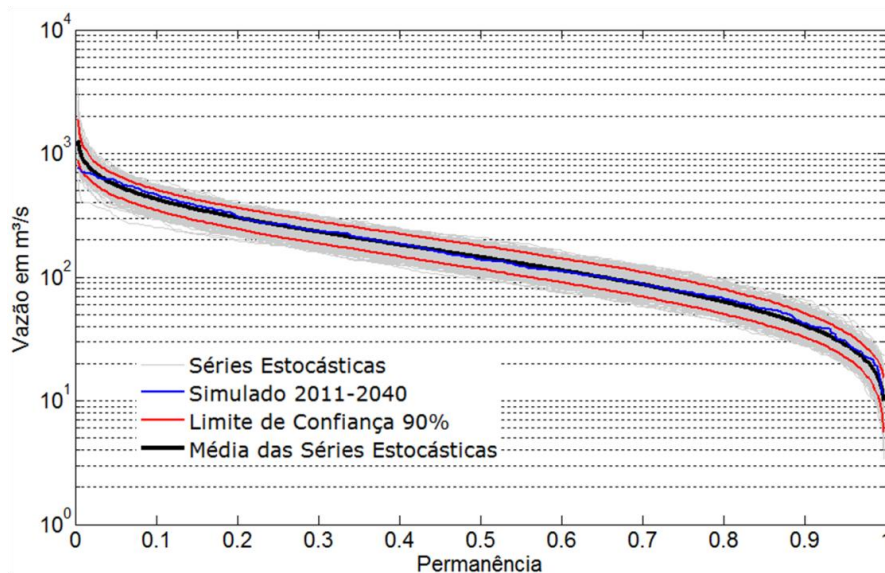


Figura 4.16. Curvas de permanência da vazão média mensal entre 2011 e 2040 - diferença entre a série original (simulada) e as 1.000 séries estocásticas geradas – posto Santo Ângelo.

4.3.3. ANÁLISE DAS MUDANÇAS E INCERTEZAS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO FUTURO

O primeiro aspecto analisado quanto às mudanças e incertezas na disponibilidade hídrica no futuro se refere à vazão média de longo período (QMLP) e ao volume escoado no período de 30 anos. Em média, considerando as séries estocásticas no período base (1961-1990) a QMLP foi de 141,6 m³/s. O intervalo de confiança da QMLP no período, com nível de significância de 0,1, ficou entre 123,7 e 162,3 m³/s (amplitude de 38,6 m³/s). Já no período futuro (2011-2040), a QMLP projetada foi de 200,3 m³/s, considerando o valor médio verificado nas séries. Este valor representa um aumento médio de 41,4% na QMLP. O intervalo de confiança da QMLP no futuro, considerando o mesmo nível de significância, ficará entre 165,1 e 233,6 m³/s. Assim, a amplitude do intervalo aumentará de 38,6 m³/s para 68,6 m³/s.

A alteração da QMLP conforme a projeção para o futuro se reflete também na média do volume total escoado em um período de 30 anos. Entre os anos de 1961 e 1990, a média do volume total escoado foi de 132.566 Hm³. Já no período futuro (2011-2040) este mesmo volume foi superado, em média, em 22 anos e 10 meses. A média do volume total escoado entre 2011 e 2040 foi de 185.869 Hm³ (Figura 4.17).

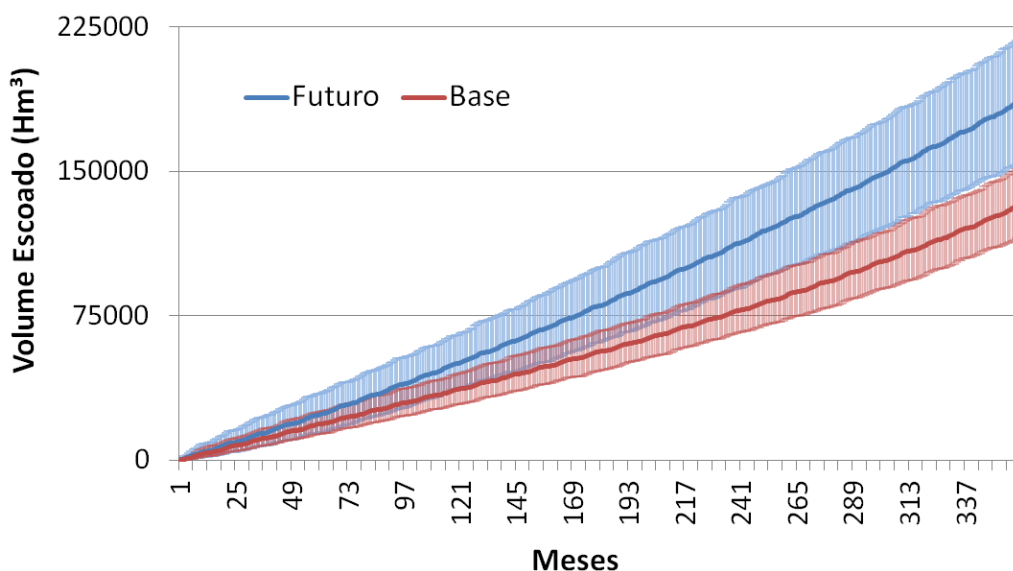


Figura 4.17. Média e intervalo de confiança de 90% para o volume escoado, com base nas séries estocásticas geradas, períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040), posto Santo Ângelo.

Considerando as séries estocásticas no período futuro, a um nível de significância de 0,1, o volume total escoado ao final de 30 anos fica no intervalo entre 154.014 Hm^3 e 218.002 Hm^3 . Este intervalo é mais amplo e apresenta valores bem superiores aos observados no período base, cujo volume total variou entre 115.462 Hm^3 e 151.454 Hm^3 para o mesmo limite de confiança (Figura 4.17).

O segundo aspecto analisado se refere às vazões médias mensais. Na Figura 4.18 são apresentados a média e o intervalo de confiança de 90% para as vazões médias mensais, considerando as 1.000 séries estocásticas geradas, nos períodos de base e futuro.

A vazão média mensal aumentará entre os meses de janeiro e outubro, no período entre 2011 e 2040, em comparação ao período base (1961-1990), em percentuais que variam entre 14,7% (agosto) e 118,2% (março). Além do mês de março, pelo menos outros quatro meses apresentarão um aumento significativo na vazão média: i) fevereiro (113,3%); ii) maio (110%); iii) abril (100,7%); iv) junho (74,1%). Considerando uma diferença simples entre os valores obtidos nos dois períodos, os meses de maio e junho apresentaram as maiores mudanças, com aumento na vazão média mensal de 130,5 m^3/s e 117,7 m^3/s , respectivamente. Apenas nos meses de novembro e dezembro haverá redução na vazão média mensal, com percentuais de 24,3% e 21%, respectivamente.

Considerando uma análise estatística das 1.000 séries estocásticas geradas, para os dois períodos analisados (base e futuro), a um nível de significância de 0,1, pode-se estimar o intervalo de confiança que compreende a vazão média de cada mês (Figura 4.18). Quanto maior a amplitude deste intervalo, maior também é a incerteza relacionada à vazão média mensal.

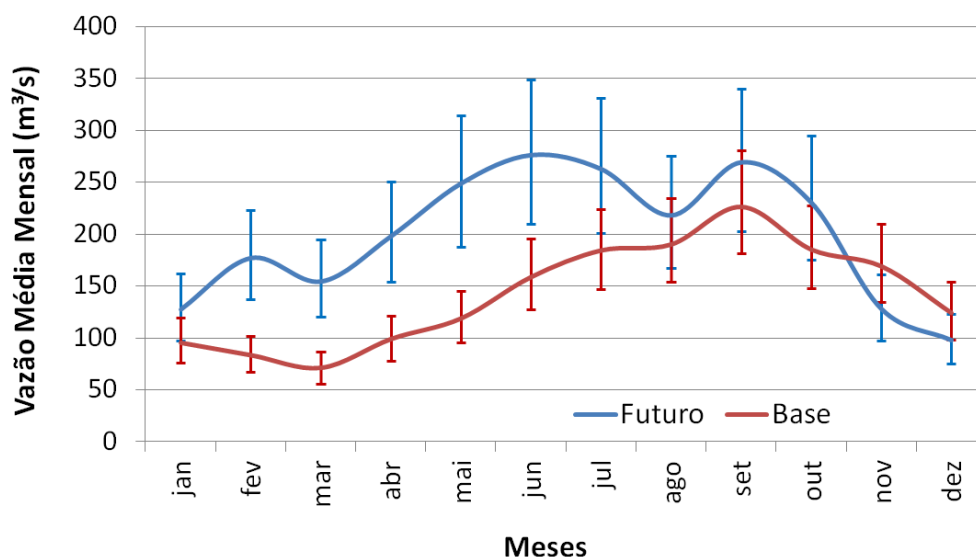


Figura 4.18. Média e intervalo de confiança de 90% para as vazões médias mensais, com base nas séries estocásticas geradas, nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040), no posto Santo Ângelo.

A amplitude do intervalo de confiança de 90% para as vazões médias mensais só reduzirá nos meses de novembro e dezembro, seguindo portanto a tendência observada nos valores médios mensais. No mês de novembro, por exemplo, a vazão média no período base, considerando as séries geradas, ficou entre 134,2 e 209,7 m³/s (amplitude de 75,5 m³/s). Já no período futuro, a vazão média do mês de novembro está inserida no intervalo entre 97,2 e 160,7 m³/s (amplitude de 63,6 m³/s), representando uma redução de 11,9 m³/s no intervalo (15,8%). No mês de dezembro, a amplitude do intervalo de confiança de 90% para a vazão média reduziu em 13,5%, considerando os dois períodos.

Em todos os outros meses, a amplitude do intervalo de confiança aumentou no futuro, principalmente entre os meses de fevereiro e junho, com percentuais superiores a 100%, indicando maior variabilidade entre as séries estocásticas geradas e, conseqüentemente, maiores incertezas na estimativa da vazão média. O mês de maio foi o que apresentou a maior

mudança neste sentido. A vazão média no período de base, considerando um intervalo de confiança de 90%, ficou entre 95,3 e 144,9 m³/s (amplitude de 49,6 m³/s). Já no período futuro, a vazão média do mês de maio está inserida no intervalo entre 187,4 e 314 m³/s (amplitude de 126,6 m³/s), representando um aumento de 76,9 m³/s no intervalo (+155%).

Somente nos meses de agosto e setembro a vazão média mensal projetada para o período entre 2011 e 2040, considerando a média das 1.000 séries geradas, se encontra no intervalo de confiança observado no período base (1961-1990). Além disto, entre os meses de fevereiro e junho, os intervalos de confiança não apresentam nenhuma sobreposição, isto é, o limite superior do intervalo verificado no período base é menor que o limite inferior do intervalo verificado no futuro.

Todos os resultados apresentados, quanto ao padrão das vazões médias mensais, indicam uma significativa alteração no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Ijuí, considerando a projeção climática do modelo Eta, principalmente, entre os meses de fevereiro e junho.

O terceiro aspecto analisado na comparação hidrológica entre os períodos de base (1961-1990) e futuro (2011-2040) foi o desvio padrão das vazões mensais (Tabela 4.5). Assim como no caso da média das vazões em cada mês, considerando a tendência central das 1.000 séries geradas, nos dois períodos, o desvio padrão deverá aumentar entre os meses de janeiro e outubro, indicando um significativo aumento da dispersão dos valores de vazão nestes meses.

O período do ano entre os meses de fevereiro e julho é o de maior mudança quanto à dispersão dos valores de vazão. No mês de maio, por exemplo, o desvio padrão se altera de 82,9 m³/s (1961-1990) para 211,2 m³/s (2011-2040), representando um aumento de 154,8% para o futuro (Tabela 4.5). Por outro lado, o mês de novembro apresenta uma suave tendência de redução na dispersão das vazões, com redução de 121 m³/s para 104,2 m³/s (-13,9%).

Ao dividir o desvio padrão mensal pela vazão média mensal foram obtidos os coeficientes de variação (CV) para ambas as séries, para cada mês. Pode-se constatar que, no período de base (1961-1990), o CV oscilou entre 0,698 (fevereiro) e 0,716 (novembro), enquanto que, no período futuro (2011-2040), este mesmo índice variou entre 0,801 (abril) e 0,848 (maio). Estes resultados indicam um real aumento da variabilidade mensal das vazões, com maiores flutuações das vazões mensais no futuro.

Tabela 4.5. Média do desvio padrão das vazões mensais nos períodos de base e futuro – posto Santo Ângelo.

Mês	Média do Desvio Padrão Mensal (m ³ /s)	
	Base (1961-1990)	Futuro (2011-2040)
Janeiro	67,7	102,5
Fevereiro	58,0	142,2
Março	49,9	124,0
Abril	69,2	158,8
Mai	82,9	211,2
Junho	112,1	224,0
Julho	131,9	213,4
Agosto	134,9	175,5
Setembro	161,0	216,6
Outubro	131,0	188,0
Novembro	121,0	104,2
Dezembro	88,6	78,9

Outro aspecto analisado quanto às mudanças no comportamento hidrológico no futuro se refere às curvas de permanência das vazões médias mensais. As Figuras 4.19 e 4.20 ilustram, respectivamente, o valor médio e o intervalo de confiança de 90% para as curvas de permanência da vazão mensal, considerando as 1.000 séries estocásticas geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040).

A vazão reduzirá no período futuro apenas nos intervalos de permanência superiores à 91%, isto é, na parcela das vazões mais baixas, que caracterizam períodos de estiagem. Para vazões com permanência igual ou inferior a Q90 (vazão intermediária e alta), a tendência é de aumento nos valores de vazão (Figura 4.19). Quanto à amplitude do intervalo de confiança de 90% para a curva de permanência das vazões mensais (Figura 4.20), a tendência é de aumento no período futuro, inclusive na parcela de vazões mais baixas. Este resultado ilustra um aumento nas incertezas associadas à estimativa da curva de permanência no futuro.

Em média, considerando todas as séries geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040), a vazão com permanência igual ou inferior a 99% dos meses (Q99) foi de

17,8 m³/s e 15 m³/s, respectivamente. Isto indica uma redução média de 15,8% na Q99 para o período futuro. Considerando uma análise estatística das séries estocásticas, a um nível de significância de 0,1, podemos afirmar que a Q99, no período entre 1961 e 1990, está localizada no intervalo entre 13,7 e 22,3 m³/s, com amplitude de 8,6 m³/s. Já no período futuro (2011-2040), este intervalo se altera para valores entre 10,4 e 20,4 m³/s, com amplitude de 9,9 m³/s.

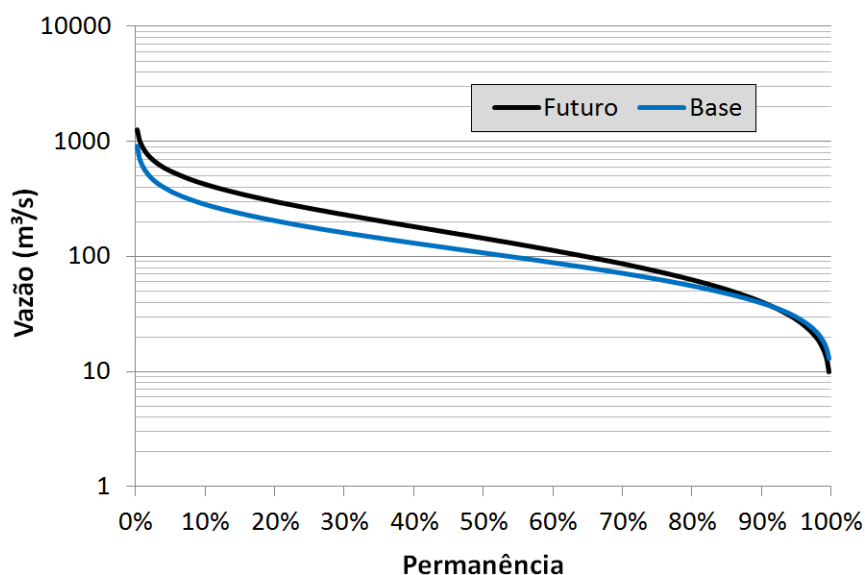


Figura 4.19. Valor médio das curvas de permanência da vazão mensal, de acordo com as séries estocásticas geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040), posto Santo Ângelo.

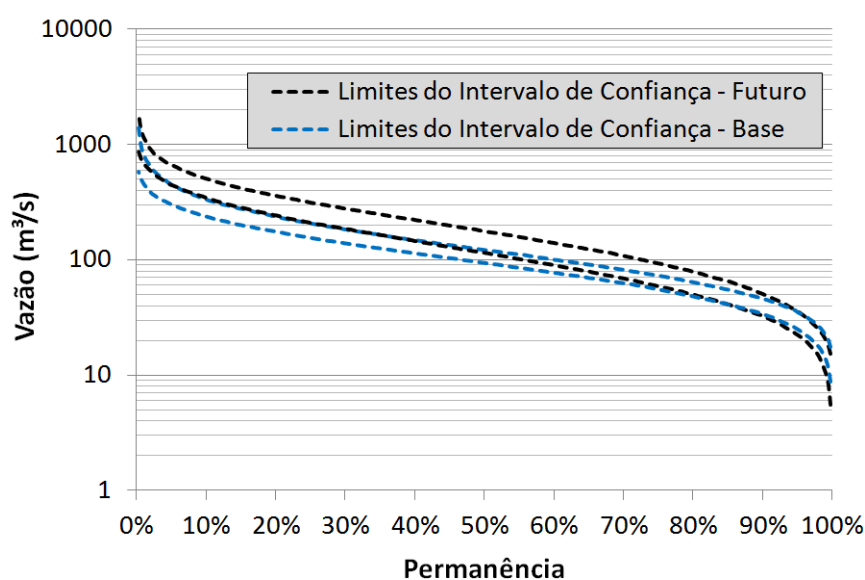


Figura 4.20. Intervalo de confiança de 90% para as curvas de permanência da vazão mensal, de acordo com as séries estocásticas geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040) – posto Santo Ângelo.

Em média, considerando todas as séries geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040), a vazão com permanência igual ou inferior a 95% dos meses (Q95) foi de 30 e 28,5 m³/s, respectivamente. Isto indica uma redução média de 1,5 m³/s (-5,1%) na Q95 para o período futuro. Este percentual é inferior ao observado na Q99, ilustrando a tendência de inversão nas curvas de permanência para vazões maiores. Quanto ao intervalo de confiança de 90% da Q95, no período entre 1961 e 1990, a amplitude foi de 10,4 m³/s, com vazões entre 25 e 35,4 m³/s. Já no período futuro (2011-2040), este intervalo fica entre 22,4 e 35,8 m³/s, com amplitude de 13,4 m³/s.

Nos períodos base e futuro, a média da vazão com permanência igual ou inferior a 90% dos meses (Q90) foi de 39,6 e 40,5 m³/s, respectivamente. Isto indica um aumento médio de 0,9 m³/s (2,2%) na Q90 para o período futuro. Quanto ao intervalo de confiança de 90% da Q90, no período entre 1961 e 1990, a amplitude foi de 12,4 m³/s, com vazões entre 33,8 e 46,2 m³/s. Já no período futuro (2011-2040), este intervalo fica entre 32,4 e 50,8 m³/s, com amplitude de 18,4 m³/s.

No período base (1961-1990), em média, a vazão com permanência igual ou inferior a 50% dos meses (Q50) foi de 108,2 m³/s. A um nível de significância de 0,1, pode-se afirmar que a Q50, neste período, está inserida no intervalo entre 94,6 e 122,9 m³/s, com amplitude de 28,2 m³/s. Já no período futuro, em média, a Q50 foi bem superior, com valor de 145,1 m³/s, indicando um aumento médio de 34,2% para o futuro. Quanto ao intervalo de confiança, pode-se afirmar que a Q50, entre 2011 e 2040, ficará entre 115,8 e 178,1 m³/s (amplitude de 62,3 m³/s). Logo, as diferenças entre os intervalos de confiança da Q50 nos dois períodos indicam um aumento significativo nas incertezas associadas à permanência das vazões no futuro. Estes resultados ilustram também uma tendência de aumento nas diferenças entre as vazões do período base e futuro inversamente proporcional à permanência.

Na parcela de vazões com permanência entre 5% (Q5) e 30% (Q30), os intervalos de confiança (significância de 0,1) dos dois períodos não apresentam sobreposição, isto é, o limite superior do intervalo no período base é menor que o limite inferior do intervalo no período futuro. Nas demais parcelas de vazões, mesmo que tenham sido verificadas significativas diferenças entre os intervalos de confiança estimados nos períodos base e futuro, estes apresentam uma faixa de sobreposição.

Por último, também foram analisadas as mudanças nas curvas de permanência das vazões médias mensais no período futuro, individualmente, em cada mês. Ao comparar as curvas de permanência nos dois períodos - base (1961-1990) e futuro (2011-2040) -, pode-se observar que as menores mudanças observadas ocorreram entre os meses de agosto e janeiro.

Em dezembro, a diferença média absoluta entre as curvas de permanência foi de 26,1 m³/s, sendo este o valor mais baixo observado. Por outro lado, no mês de maio foram observadas as mudanças mais drásticas, com diferença média absoluta de 130,5 m³/s entre as curvas de permanência. Outros meses que se destacam pela grande mudança nas curvas de permanência para o futuro são junho (117,7 m³/s), abril (99,5 m³/s), fevereiro (94,1 m³/s), março (83,7 m³/s) e julho (79,1 m³/s).

Nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 são ilustrados o comportamento médio e o intervalo de confiança de 90% para as curvas de permanência das vazões mensais, de janeiro a dezembro, para ambos os períodos (base e futuro). De modo geral, pode-se afirmar com base nos resultados obtidos que, entre os meses de janeiro e outubro, há uma tendência de aumento no valor das vazões com baixa permanência - parcela das vazões altas. Neste aspecto, pode-se destacar principalmente o mês de maio, em que a média da vazão com permanência igual ou inferior a 10% (Q10) foi de 240,4 m³/s, entre 1961 e 1990, para 573 m³/s, no período entre 2011 e 2040, representando um aumento de 332,6 m³/s (138%) na Q10 para o futuro. Em seguida, destacam-se também os outros meses entre fevereiro e julho, com aumento no valor da Q10 próximo ou superior a 200 m³/s, conforme mostra a Tabela 4.6.

Entre os meses de fevereiro e junho, também as vazões com elevada permanência (parcela das vazões mais baixas) apresentaram valores mais altos no futuro em relação ao período base, indicando nestes meses uma tendência de aumento nas vazões de modo mais generalizado. Neste caso, em termos percentuais, pode-se destacar o mês de março, em que a média da vazão com permanência igual ou inferior a 90% (Q90) foi de 22,8 m³/s, entre 1961 e 1990, para 34,5 m³/s, no período entre 2011 e 2040, representando um aumento de 11,7 m³/s (52%) na Q90 para o futuro (Tabela 4.6).

Já nos meses de janeiro, julho, agosto, setembro e outubro, foram observados valores ainda menores de vazões com permanências elevadas (vazões baixas), indicando, nestes meses, uma tendência de amplificação dos valores extremos: períodos de estiagem e de cheias mais intensos no período futuro (2011-2040) que os observados no período base (1961-1990). Em janeiro, por exemplo, os resultados indicam um aumento médio de 47% na Q10 e uma redução de 8% na Q90 (Tabela 4.6).

Nos meses de novembro e dezembro, a tendência observada é de redução nos valores de vazão de modo generalizado, tanto na parcela das vazões altas quanto na parcela das baixas vazões. Em novembro, os resultados indicam uma redução média de 18% (-61,1 m³/s) na Q10 e de 48% (-26 m³/s) na Q90. Já em dezembro, para o período futuro, a redução média na Q10 e Q90 foi de 14% (-35,1 m³/s) e 46% (-18,2 m³/s), respectivamente.

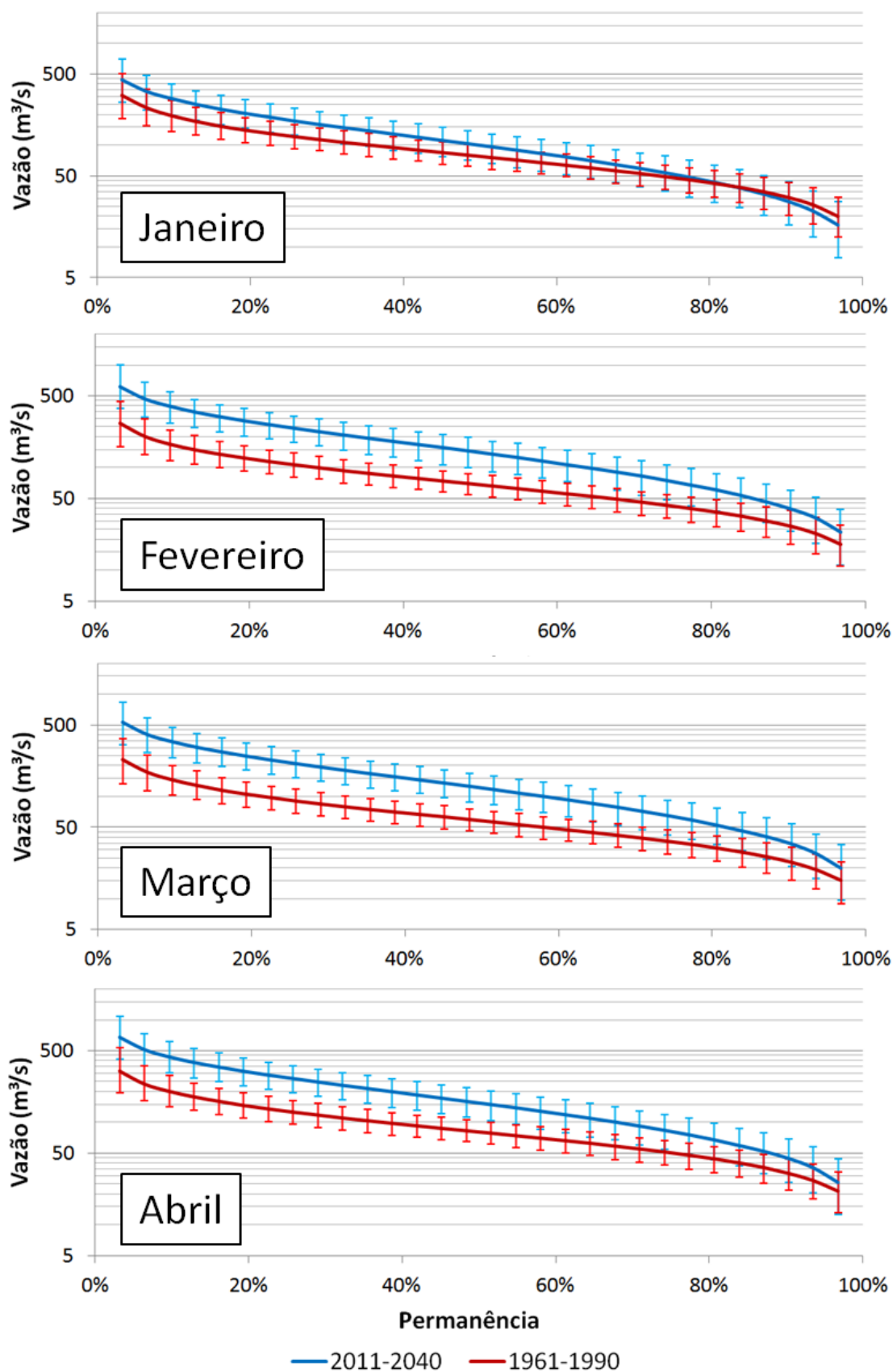


Figura 4.21. Média e Intervalo de confiança de 90% para as curvas de permanência da vazão mensal, no posto Santo Ângelo, de acordo com as séries estocásticas geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040): Janeiro, Fevereiro, Março e Abril.

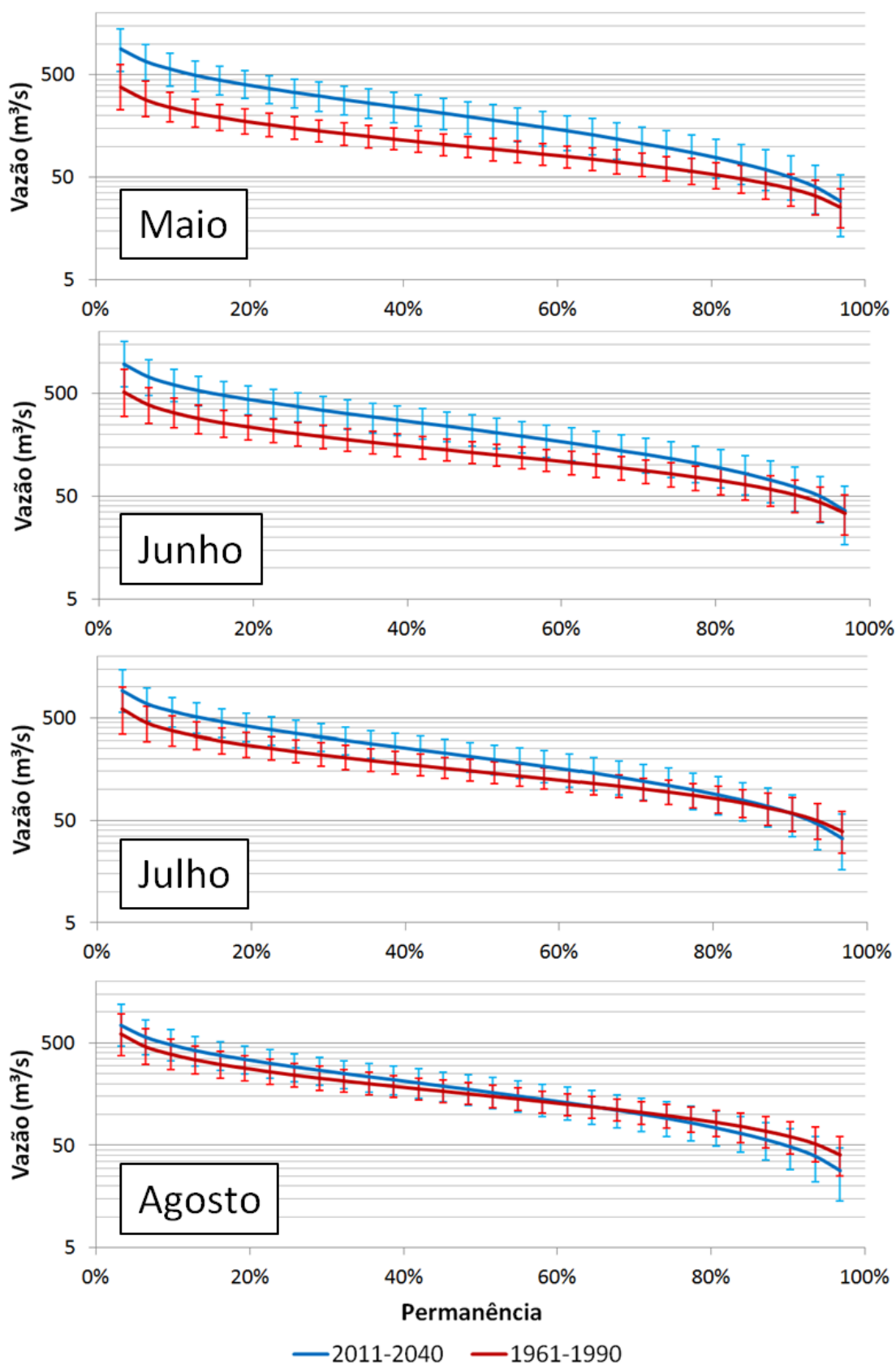


Figura 4.22. Média e Intervalo de confiança de 90% para as curvas de permanência da vazão mensal, no posto Santo Ângelo, de acordo com as séries estocásticas geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040): Maio, Junho, Julho e Agosto.

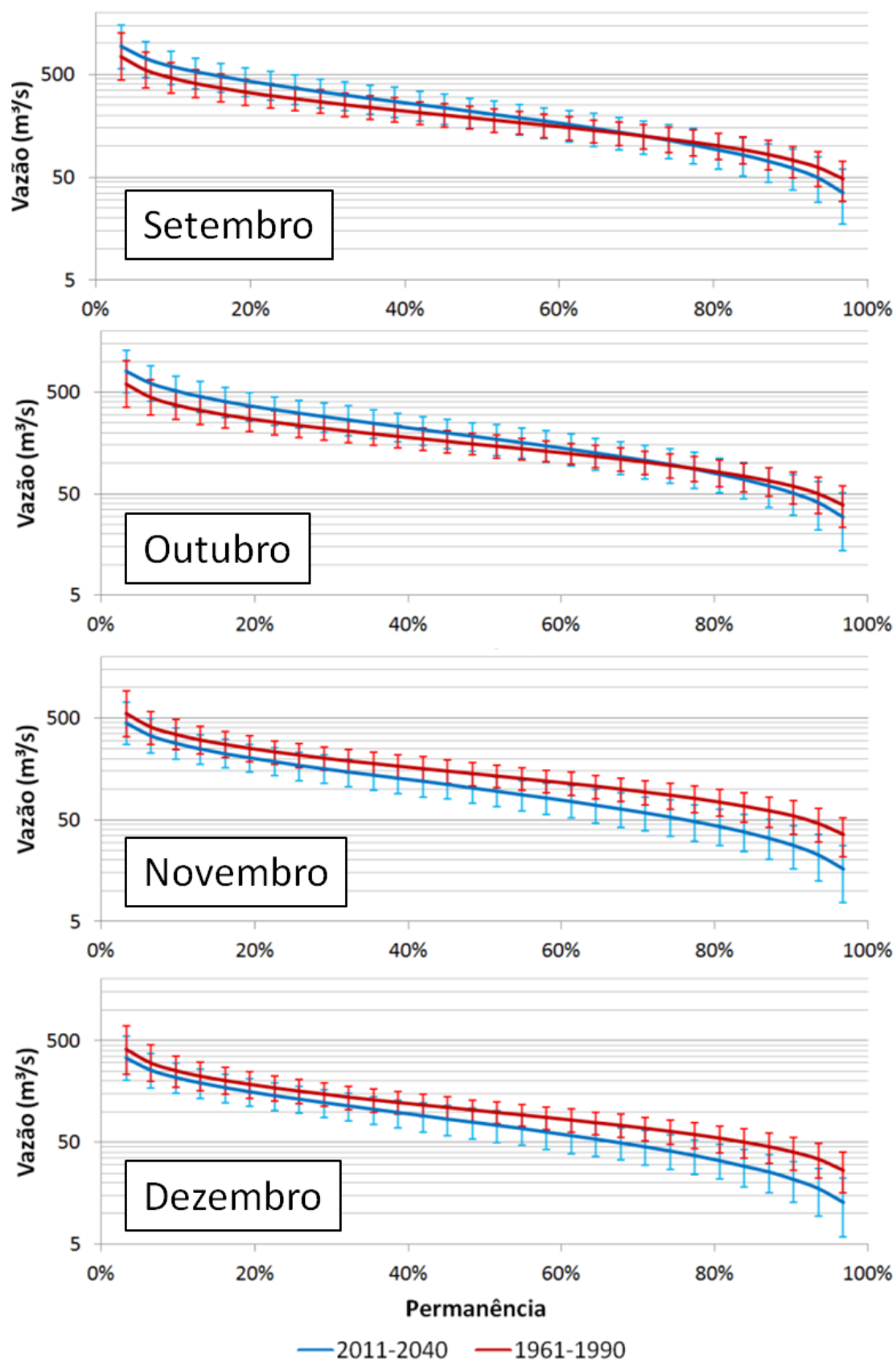


Figura 4.23. Média e Intervalo de confiança de 90% para as curvas de permanência da vazão mensal, no posto Santo Ângelo, de acordo com as séries estocásticas geradas nos períodos base (1961-1990) e futuro (2011-2040): Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro.

Tabela 4.6. Média das vazões (m^3/s) com permanência de 10% (Q10) e de 90% (Q90), nos períodos de base (1961-1990) e futuro (2011-2040) – posto Santo Ângelo.

Mês	Base (1961-1990)		Futuro (2011-2040)		Mudanças	
	Q10	Q90	Q10	Q90	Q10	Q90
Janeiro	195,2	30,5	286,0	28,1	90,8	-2,4
Fevereiro	168,6	26,8	393,5	39,2	224,9	12,4
Março	145,3	22,8	343,0	34,5	197,7	11,7
Abril	201,4	31,7	438,1	44,4	236,7	12,7
Maiο	240,4	38,7	573,0	50,2	332,6	11,5
Junho	324,0	51,5	610,5	61,6	286,5	10,1
Julho	376,5	58,9	582,9	58,2	206,4	-0,7
Agosto	390,2	61,0	486,4	48,5	96,3	-12,5
Setembro	463,6	72,6	594,5	60,9	130,9	-11,7
Outubro	376,4	59,4	517,2	50,6	140,8	-8,8
Novembro	345,7	54,1	284,6	28,1	-61,1	-26,0
Dezembro	252,2	39,8	217,1	21,6	-35,1	-18,2

Nas Tabelas 4.7 e 4.8 são apresentados os limites e amplitudes do intervalo de confiança das vazões, nos períodos de base e futuro, com permanência de 10% (Q10) e de 90% (Q90), respectivamente. No caso das amplitudes do intervalo de confiança, em cada mês, considerando as 1.000 séries estocásticas geradas em ambos os períodos, fica evidente um significativo aumento das incertezas relacionadas à estimativa da Q10 e da Q90 entre os meses de janeiro e outubro. Apenas nos meses de novembro e dezembro haverá redução do intervalo.

No mês de maio, por exemplo, considerando um nível de significância de 0,1, a Q10 no período entre 2011 e 2040 fica entre 388,9 e 804 m^3/s , enquanto que no período entre 1961 e 1990 os limites foram de 172,2 m^3/s e 335,8 m^3/s . Esta considerável mudança no comportamento hidrológico pode ser observada também nos demais meses, principalmente entre fevereiro e julho, com taxas de crescimento superiores a 100% na amplitude do intervalo de confiança de 90% para a Q10.

Tabela 4.7. Limites e amplitudes do intervalo de confiança das vazões (m^3/s) com permanência de 10% (Q_{10}) nos períodos de base (1961-1990) e futuro (2011-2040), posto Santo Ângelo.

Mês	Base (1961-1990)			Futuro (2011-2040)		
	Limite Inferior	Limite Superior	Amplitude	Limite Inferior	Limite Superior	Amplitude
Janeiro	136,3	275,3	139,0	196,3	395,4	199,0
Fevereiro	117,6	232,6	115,0	272,3	548,0	275,7
Março	102,5	201,3	98,9	236,7	474,6	238,0
Abril	141,3	285,0	143,8	305,4	620,1	314,7
Mai	172,2	335,8	163,6	388,9	804,0	415,1
Junho	229,6	451,4	221,8	420,1	855,8	435,7
Julho	261,9	526,2	264,3	403,8	790,2	386,4
Agosto	274,1	541,5	267,4	333,8	679,1	345,3
Setembro	325,1	648,0	323,0	400,7	828,7	428,0
Outubro	269,3	515,8	246,5	352,6	723,1	370,5
Novembro	245,4	485,3	239,9	197,1	400,5	203,3
Dezembro	174,3	352,6	178,3	151,6	297,3	145,7

Tabela 4.8. Limites e amplitudes do intervalo de confiança das vazões (m^3/s) com permanência de 90% (Q_{90}) nos períodos de base (1961-1990) e futuro (2011-2040), posto Santo Ângelo.

Mês	Base (1961-1990)			Futuro (2011-2040)		
	Limite Inferior	Limite Superior	Amplitude	Limite Inferior	Limite Superior	Amplitude
Janeiro	20,4	42,9	22,5	16,6	43,3	26,7
Fevereiro	17,9	38,0	20,1	23,8	60,0	36,2
Março	15,2	32,0	16,8	20,5	53,6	33,0
Abril	21,5	43,7	22,2	26,1	68,9	42,8
Mai	25,9	53,3	27,4	29,8	80,1	50,3
Junho	34,6	71,3	36,7	35,7	95,3	59,6
Julho	38,9	83,4	44,4	34,4	87,7	53,3
Agosto	41,4	85,3	43,9	28,7	72,9	44,2
Setembro	48,9	100,1	51,2	37,0	93,9	56,9
Outubro	39,6	82,5	42,8	30,9	77,4	46,6
Novembro	35,8	76,3	40,4	16,6	43,6	27,1
Dezembro	26,5	55,9	29,4	12,9	32,5	19,6

De modo geral, as incertezas quanto ao comportamento hidrológico no futuro (2011-2040), tendo como referência um único cenário climático, foram maiores do que no período base (1961-1990). Este aumento se refletiu principalmente entre os meses de janeiro e outubro, como mostraram os resultados da análise comparativa entre as curvas de permanência e vazões médias mensais e seus intervalos de confiança.

A fonte primária da incerteza está na própria série hidrológica original utilizada no processo de modelagem estocástica. Espera-se, pela formulação do modelo estocástico, que quanto maior for o valor de vazão média mensal (componente sazonal, C2), maior também seja a possibilidade de se obter vazões extremamente elevadas, uma vez que este componente é multiplicado pelos componentes aleatório (C4) e de dependência temporal (C3), que embora possuam valores médios próximos a 1, podem eventualmente apresentar valores extremos.

Isto fica evidente quando comparada a vazão média mensal de cada mês (na série de entrada no modelo estocástico) com a amplitude do intervalo de confiança para a vazão média mensal obtida após a modelagem, considerando as 1.000 séries estocásticas, tanto para o período de base (1961-1990) como para o futuro (2011-2040), conforme mostra a Figura 4.24. É visível uma tendência linear de crescimento na incerteza à medida que aumenta a vazão média mensal. Entretanto, também fica evidente a diferença observada entre as duas retas, que caracterizam os períodos de base e futuro. Para uma mesma vazão média mensal, a amplitude do intervalo de confiança é superior na série do período futuro.

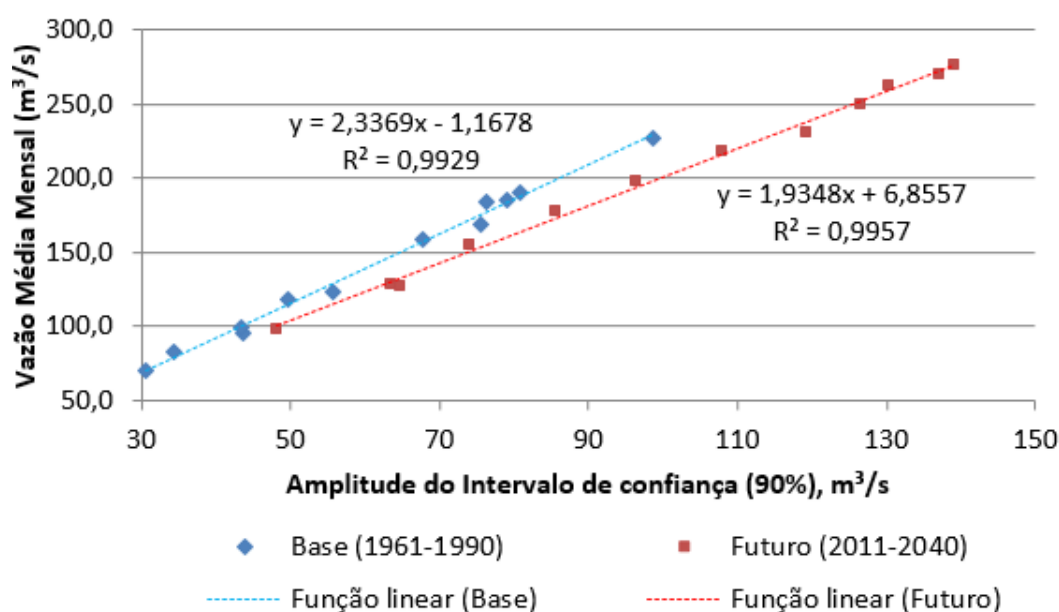


Figura 4.24. Relação entre a média da vazão mensal e a amplitude do intervalo de confiança, para os períodos entre 1961 e 1990 (base) e entre 2011 e 2040 (futuro).

Após uma análise de sensibilidade nos modelos baseados em RNAs, para determinação do componente C3 (dependência temporal), em ambos os períodos, constatou-se que no futuro (2011-2040) é maior a sensibilidade da vazão no tempo t em função das vazões antecedentes ($t-1$, $t-2$ e $t-3$). Para ilustrar este resultado, a Figura 4.25 mostra a variação do valor de $C3(t)$ em função do valor de $C3(t-1)$, sendo mantidas as variáveis $C3(t-2)$ e $C3(t-3)$ iguais a 1, para ambos os períodos.

No período de base, entre 1961 e 1990, mesmo na ocorrência de uma vazão extremamente baixa no mês anterior, resultando em um valor próximo de 0 para a variável $C3(t-1)$, o valor calculado de $C3(t)$ dificilmente é inferior a 0,5, isto é, a metade da vazão média mensal. Já no período entre 2011 e 2040, devido à sequência temporal da série e suas características, o valor de $C3(t)$ pode ser inferior a 0,3, originando um valor bem abaixo da média do mês (Figura 4.25).

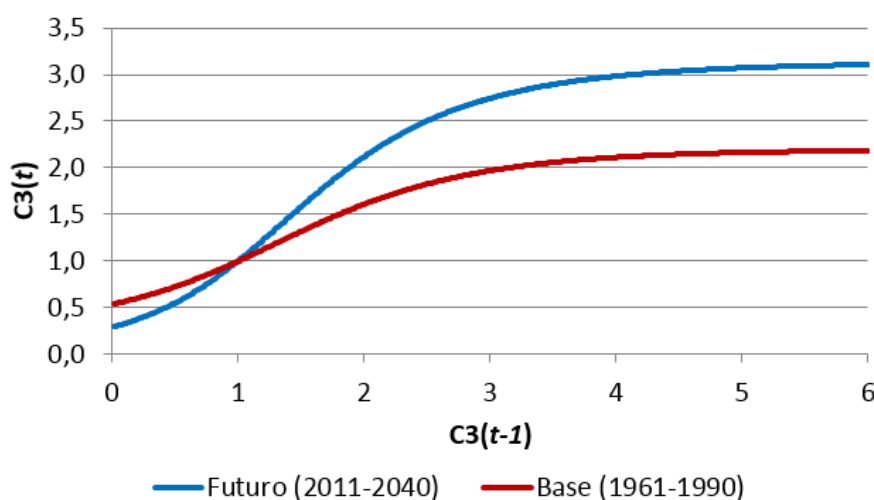


Figura 4.25. Variação do valor de $C3(t)$, em função do valor de $C3(t-1)$, na modelagem do componente de dependência temporal com uso de uma RNA, sendo mantidas as demais variáveis, $C3(t-2)$ e $C3(t-3)$, iguais a 1, para os períodos entre 1961 e 1990 (base) e entre 2011 e 2040 (futuro).

O mesmo padrão foi observado para a parcela das vazões extremamente elevadas. No período entre 1961 e 1990, na ocorrência de uma vazão alta no mês anterior, resultando em um valor de $C3(t-1)$, por exemplo, cinco vezes superior à média mensal, o valor calculado de $C3(t)$ não atinge 2,2. Por sua vez, no período futuro, o valor de $C3(t)$ pode ser superior a 3,1, originando uma vazão bem superior à média mensal (Figura 4.25).

Deste modo, o componente C3 apresenta maiores flutuações nas séries entre 2011 e 2040. Este resultado ajuda a explicar a maior variabilidade verificada entre as séries estocásticas do período futuro em relação ao período de base.

As Figuras 4.26 e 4.27 ilustram o ajuste da distribuição de probabilidades Gama para a modelagem do componente aleatório (C4) em situações de vazão baixa (C3, no tempo t , inferior a 1) e de vazão alta (C3, no tempo t , superior a 1), respectivamente.

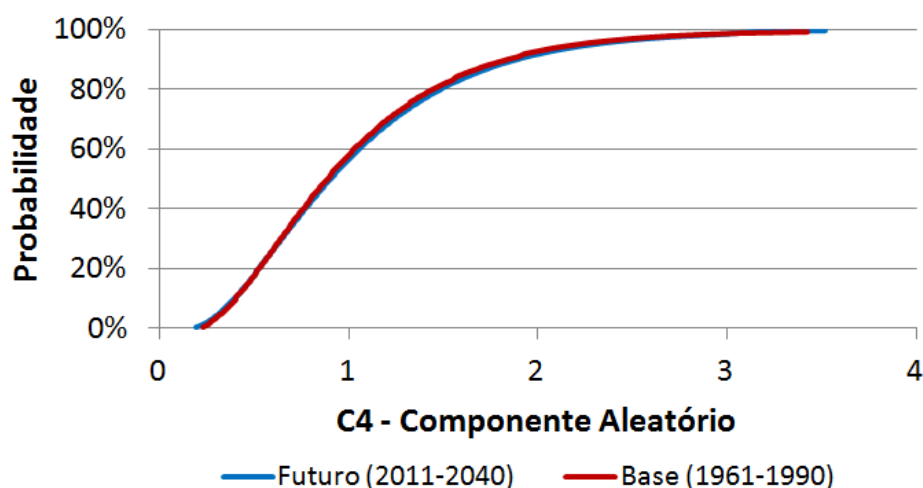


Figura 4.26. Ajuste da distribuição Gama para a modelagem do componente aleatório em situação de vazão baixa, $C3(t)$ inferior a 1, para os períodos de base e futuro.

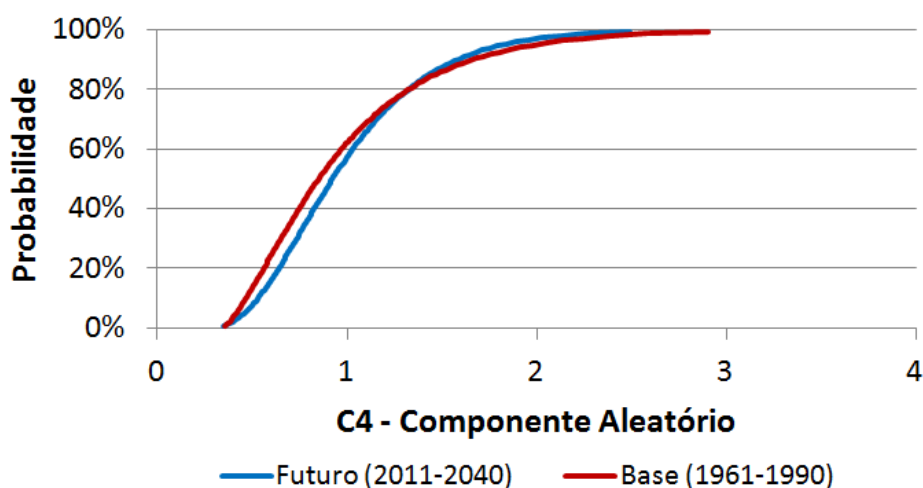


Figura 4.27. Ajuste da distribuição Gama para a modelagem do componente aleatório em situação de vazão alta, $C3(t)$ superior a 1, para os períodos de base e futuro.

De modo geral, é possível observar que o comportamento verificado na série de base (1961-1990) do componente aleatório C4 foi mantido na série do período futuro (2011-2040), principalmente no que se refere aos meses em que o valor de C3 foi inferior a 1 (Figura 4.26), resultando em uma vazão inferior à média mensal. Neste caso, considerando os períodos de base e futuro, a chance do valor sorteado para C4 ser superior a 1 foi de 42% e 43,5%, respectivamente.

Já nos meses em que o componente de dependência temporal (C3) superou o valor 1, a diferença entre as séries foi um pouco maior (Figura 4.27). A probabilidade de ser sorteado um valor superior a 1 para o componente C4 foi de 38% e 43%, respectivamente, para as séries de base e futuro.

Estes resultados indicam que a sensibilidade do modelo à variável de dependência temporal também contribuiu para o aumento das incertezas no período futuro, entre 2011 e 2040. Na série original simulada para o período futuro, além da média e da dispersão dos dados serem maiores do que no período de base, provocando flutuações mais abruptas nos valores de vazão, o coeficiente de correlação entre as vazões nos tempos t e $t-1$ foi bastante elevado (média de 0,66), com valores entre 0,5 (novembro) e 0,78 (março). Já no período entre 1961 e 1990, os valores do coeficiente de correlação ficaram entre 0,26 (junho) e 0,75 (fevereiro), com média igual a 0,54.

Deste modo, considerando a metodologia adotada para a modelagem das vazões no futuro e para a geração das séries estocásticas, pode-se afirmar que existe certa tendência de aumento na variabilidade hidrológica no período entre 2011-2040, com valores mais dispersos em relação à média mensal. Tal constatação implica em uma maior incerteza quanto à disponibilidade de água no futuro, com a possibilidade de ocorrência de séries temporais bastante distintas entre si.

4.4. MÓDULO 4: OS CENÁRIOS ESTOCÁSTICOS DE DEMANDA HÍDRICA NO FUTURO

Neste item serão apresentados os resultados e discussões referentes aos cenários de população, rebanhos e áreas irrigadas para o futuro, entre 2011 e 2040. Além disto, serão apresentados os valores relativos à demanda hídrica para três usos consuntivos: abastecimento humano, criação animal e irrigação.

4.4.1. PROJEÇÃO POPULACIONAL E DEMANDA HÍDRICA PARA ABASTECIMENTO HUMANO

Conforme a metodologia apresentada no Capítulo 3 deste estudo, para realizar a projeção populacional entre 2011 e 2040, foi necessário inicialmente estimar a proporção de áreas urbanas e rurais de cada município abrangido total ou parcialmente pela bacia hidrográfica do rio Ijuí (Tabela 4.9) e a população de cada município nos anos censitários de 1980, 1991, 2000 e 2010 (Tabela 4.10).

De acordo com os resultados obtidos, o município mais populoso na área da bacia é Ijuí, com 78.915 habitantes, o qual apresentou um crescimento populacional de 16.429 pessoas (26%) no período entre 1980 e 2010. Os municípios de Cruz Alta e Panambi também se destacam quanto à população na área da bacia, com 40.160 e 38.058 habitantes, respectivamente. Panambi apresentou um crescimento populacional constante no período analisado (Tabela 4.10), com aumento de 59% dos residentes entre 1980 e 2010. Já Cruz Alta apresentou uma redução no contingente populacional no último período (2000-2010), com diminuição de 7% da população.

Em termos gerais e absolutos, a população da bacia hidrográfica do rio Ijuí apresentou um baixo crescimento populacional nas últimas três décadas, passando de 201.084 para 214.904 habitantes, de 1980 a 2010, representando um aumento de apenas 6,9% em 30 anos. Esta tendência de baixo crescimento populacional tem sido observada em todo o estado do Rio Grande do Sul, conforme resultados divulgados recentemente pelo IBGE (2010).

Tabela 4.9. Estimativa da proporção das áreas urbanas e rurais de cada município abrangido parcial ou totalmente pela bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

Município	Proporção de área na bacia hidrográfica do rio Ijuí	
	Urbano	Rural
Ajuricaba	100,0%	100,0%
Augusto Pestana	100,0%	59,4%
Boa Vista do Cadeado	100,0%	62,9%
Bozano	100,0%	100,0%
Catuípe	100,0%	71,0%
Chapada	0,0%	1,0%
Condor	100,0%	100,0%
Coronel Barros	100,0%	100,0%
Cruz Alta	63,8%	25,8%
Entre-Ijuís	1,8%	28,7%
Eugênio de Castro	0,0%	3,6%
Ijuí	100,0%	100,0%
Nova Ramada	100,0%	100,0%
Palmeira das Missões	0,0%	20,4%
Panambi	100,0%	100,0%
Pejuçara	100,0%	100,0%
Santa Bárbara do Sul	27,6%	37,1%
Santo Ângelo	15,4%	27,0%

Tabela 4.10. Estimativa da população de cada município na bacia do rio Ijuí, RS.

Município	População estimada na bacia hidrográfica do rio Ijuí			
	1980	1991	2000	2010
Ajuricaba	8.130	7.947	7.709	7.255
Augusto Pestana	6.155	6.218	6.207	5.700
Boa Vista do Cadeado	2.031	1.809	1.694	1.710
Bozano	2.598	2.320	2.177	2.200
Catuípe	11.949	9.513	9.034	8.360
Chapada	79	66	52	40
Condor	6.401	6.421	6.491	6.552
Coronel Barros	2.820	2.568	2.454	2.459
Cruz Alta	37.967	41.520	43.250	40.160
Entre-Ijuís	2.914	1.861	1.589	1.248
Eugênio de Castro	150	94	80	48
Ijuí	62.486	67.623	73.848	78.915
Nova Ramada	3.599	3.112	2.723	2.437
Palmeira das Missões	7.871	4.635	1.504	918
Panambi	23.870	29.379	32.610	38.058
Pejuçara	3.573	4.039	4.189	3.973
Santa Bárbara do Sul	3.986	3.103	2.993	2.609
Santo Ângelo	14.505	13.584	13.191	12.262
Total	201.084	205.812	211.795	214.904

Em seguida, foram estimados os três componentes do modelo de projeção populacional (nascimentos, óbitos e migrações), conforme a metodologia apresentada. Os

resultados obtidos podem ser observados na Figura 4.28, que apresenta a estimativa do saldo migratório e do número de nascimentos e óbitos, no período entre 1984 e 2010, na bacia hidrográfica do rio Ijuí.

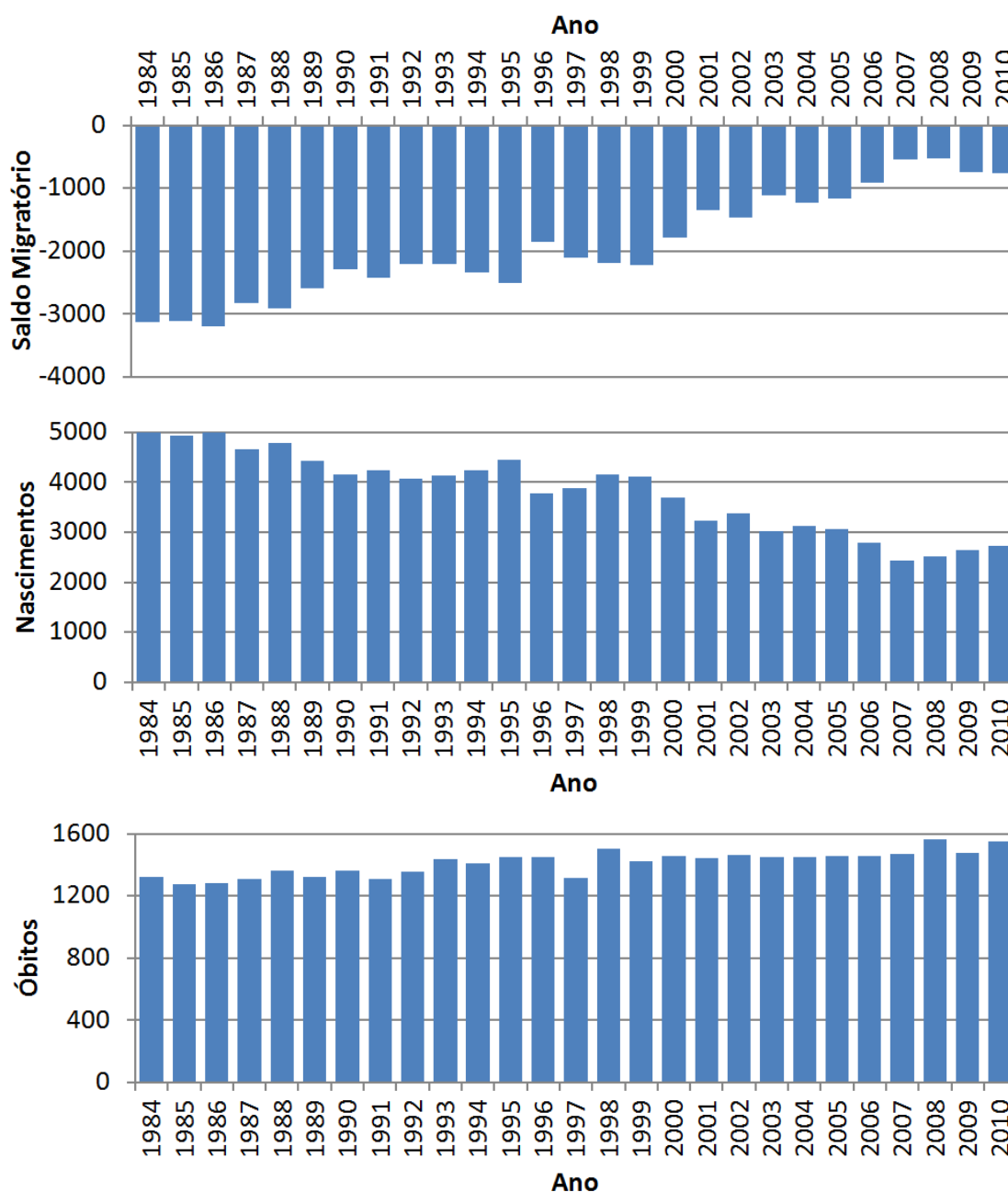


Figura 4.28. Estimativa do saldo migratório e do número de nascimentos e óbitos (1984-2010) na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

Quanto às migrações, foi observado um déficit populacional em todos os anos do período entre 1984 e 2010, com emigrações superando as imigrações. Ainda assim, pode-se

observar na Figura 4.28 que o saldo migratório está se estabilizando em uma situação de equilíbrio entre emigrações e imigrações, com valor aumentando de -3.132 (em 1984) para -764 (em 2010).

O número de nascimentos reduziu drasticamente nas últimas três décadas, passando de 4.989 (em 1984) para 2.716 (em 2010), equivalente a uma diminuição de 45,6% nos nascimentos. Este resultado condiz com o observado em termos regionais, de acordo com as estimativas do IBGE (2010). Tal tendência está relacionada, entre outros fatores, à crescente inserção da mulher no mercado de trabalho e à ampla divulgação e acesso a métodos contraceptivos.

Quanto ao número de óbitos, os resultados obtidos (Figura 4.28) demonstraram um suave crescimento no período analisado. Em 1984, o número de óbitos foi de 1.319, equivalente a 26,4% dos nascimentos no mesmo ano. Já em 2010, este número aumentou para 1.549, cerca de 57% dos nascimentos. Esta tendência também é observada no Rio Grande do Sul, de acordo com IBGE (2010), e está relacionada, principalmente, ao envelhecimento da população resultante do aumento da expectativa de vida do brasileiro, o que naturalmente conduz a um suave aumento na taxa de mortalidade, como pode ser observado também em países desenvolvidos, como, por exemplo, da Europa Ocidental.

Tendo em vista o comportamento apresentado nas últimas décadas, fica evidente a tendência de redução na taxa de natalidade e de aumento na taxa de mortalidade na bacia hidrográfica do rio Ijuí para as próximas décadas. Entretanto, é importante mencionar que tal tendência deve estabilizar, de acordo com o IBGE (2014), atingindo patamares semelhantes ao de alguns países desenvolvidos dos continentes europeu e asiático.

Desse modo, os modelos estocásticos das taxas de natalidade, de mortalidade e de saldo migratório foram compostos por dois componentes (tendencial e aleatório), com limite inferior de 8‰ para o componente tendencial de taxa de natalidade e limite superior de 11,5‰ para o componente tendencial de taxa de mortalidade, conforme descrito na metodologia. Quanto à taxa migratória na bacia, foi estabelecido um limiar superior de 0% para o componente tendencial da taxa migratória, isto é, projetando um equilíbrio entre emigrações e imigrações.

Nas Figuras 4.29, 4.30 e 4.31 são ilustradas as curvas ajustadas e extrapoladas para o período entre 1984 e 2040, referentes ao componente tendencial para as taxas de natalidade, mortalidade e saldo migratório.

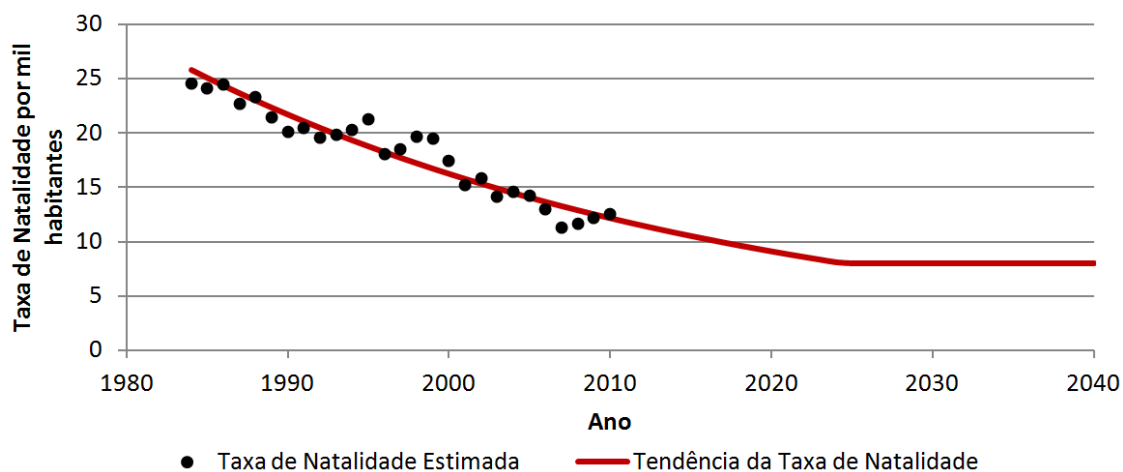


Figura 4.29. Tendência da taxa de natalidade (1984-2040) na bacia do rio Ijuí, RS.

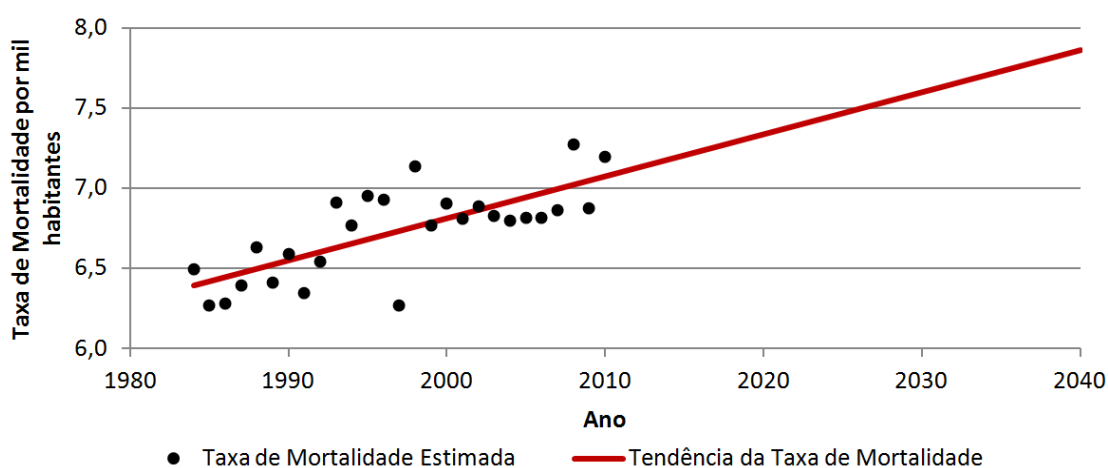


Figura 4.30. Tendência da taxa de mortalidade (1984-2040) na bacia do rio Ijuí, RS.

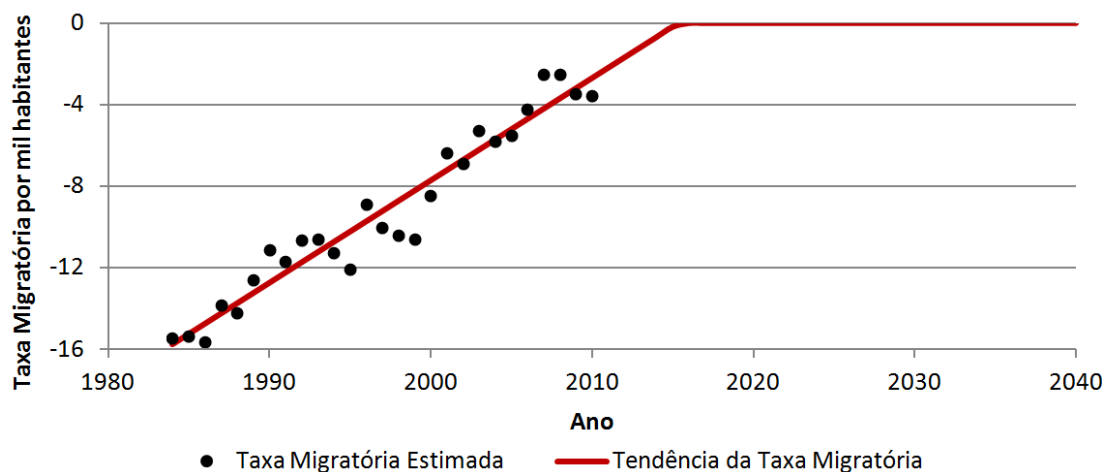


Figura 4.31. Tendência da taxa migratória (1984-2040) na bacia do rio Ijuí, RS.

Considerando os resultados obtidos quanto à taxa de natalidade, foi observado um decréscimo na taxa até o ano de 2025, estabilizando em um índice de 8 nascimentos por 1.000 habitantes. Já a taxa de mortalidade não atingiu o limite estabelecido de 11,5 óbitos por 1.000 habitantes, tendo um comportamento crescente durante o período analisado, de 2011 a 2040. A tendência observada indica uma taxa de mortalidade de 7,86 mortes a cada 1.000 habitantes em 2040. Quanto à taxa migratória, a estabilização entre as imigrações e emigrações, seguindo a tendência estabelecida, deverá ocorrer no ano de 2016.

Os resíduos do ajuste destas funções tendenciais foram utilizados para compor a variável aleatória, aos quais foram ajustadas distribuições de probabilidade. Nos três casos, os resíduos apresentaram uma significativa aderência à distribuição normal, $N(\mu, \sigma)$, com μ igual à média dos resíduos do ajuste tendencial (entre 1984 e 2010) e σ igual ao desvio padrão dos resíduos.

Na Figura 4.32 é apresentado o comportamento dos componentes aleatórios das taxas de natalidade, mortalidade e saldo migratório, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí. Os resultados indicam que a taxa de mortalidade apresenta um componente aleatório menos expressivo, variando de -0,31‰ a 0,31‰, considerando os percentuais de probabilidade acumulada de 5% e 95%, respectivamente. Já a taxa de natalidade apresentou um componente aleatório mais representativo, no intervalo entre -1,98‰ e 2,03‰, para as mesmas probabilidades acumuladas.

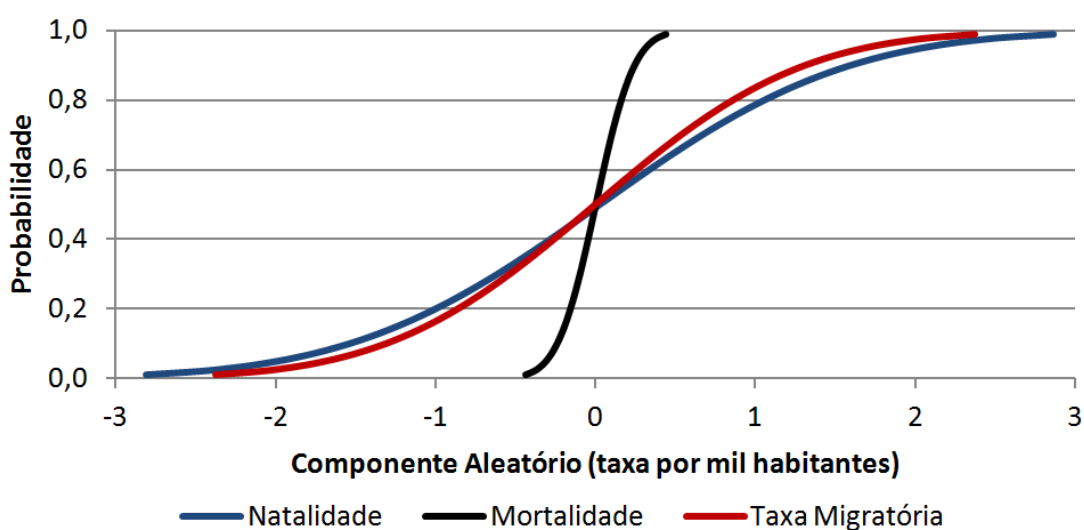


Figura 4.32. Componentes aleatórios das taxas de natalidade, de mortalidade e de migrações, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

A partir de um algoritmo desenvolvido para realizar o sorteio da variável aleatória, foram geradas 1.000 séries de natalidade, mortalidade e de migrações, cada série indicando um cenário possível de população na bacia hidrográfica para cada ano, no período entre 2011 e 2040, como mostra a Figura 4.33.

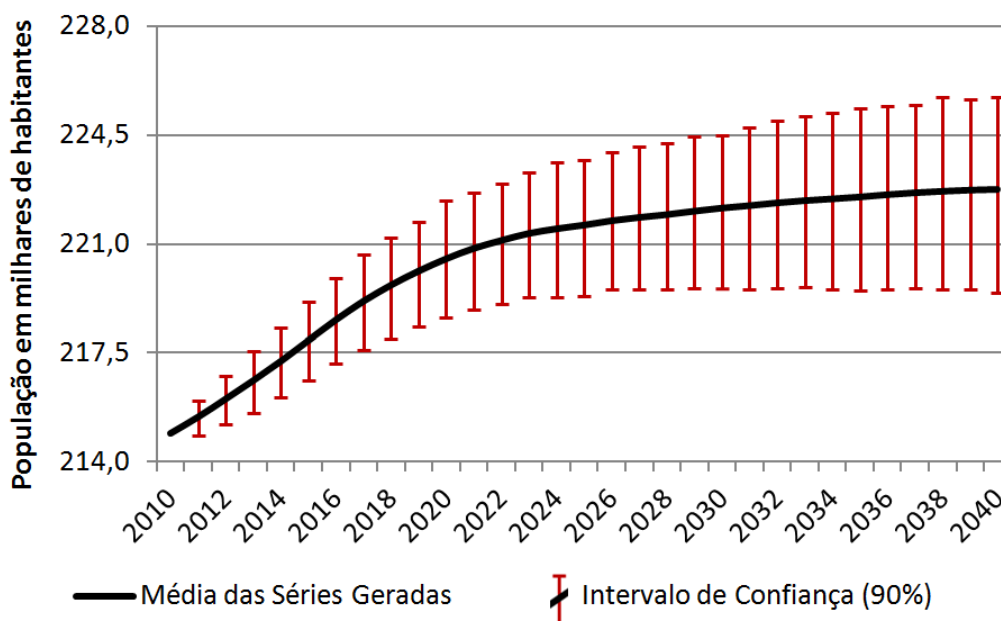


Figura 4.33. Projeção populacional (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

A tendência de crescimento populacional observada na Figura 4.33 é muito semelhante à tendência projetada para o Rio Grande do Sul pelo IBGE (2014), indicando que a metodologia adotada apresenta consistência. De acordo com os resultados obtidos, considerando uma média dos 1.000 cenários projetados, a população deve atingir 222.740 habitantes em 2040, representando um crescimento médio de 7.836 habitantes (3,65%) no período analisado. O intervalo de confiança (nível de significância de 0,1) da população na bacia hidrográfica do rio Ijuí, em 2040, ficou entre 219.771 e 226.052 habitantes.

Por fim, após a análise das informações de consumo médio de água por habitante, em 2012, conforme banco de dados do SNIS, foi calculado um valor médio de consumo ponderado pelo número de habitantes de cada município, obtendo-se assim o valor de 138 litros/habitante/dia como a demanda hídrica média para abastecimento humano. Ao multiplicar este valor pela população simulada em cada série, foram obtidos 1.000 cenários de demanda para abastecimento da população (Figura 4.34).

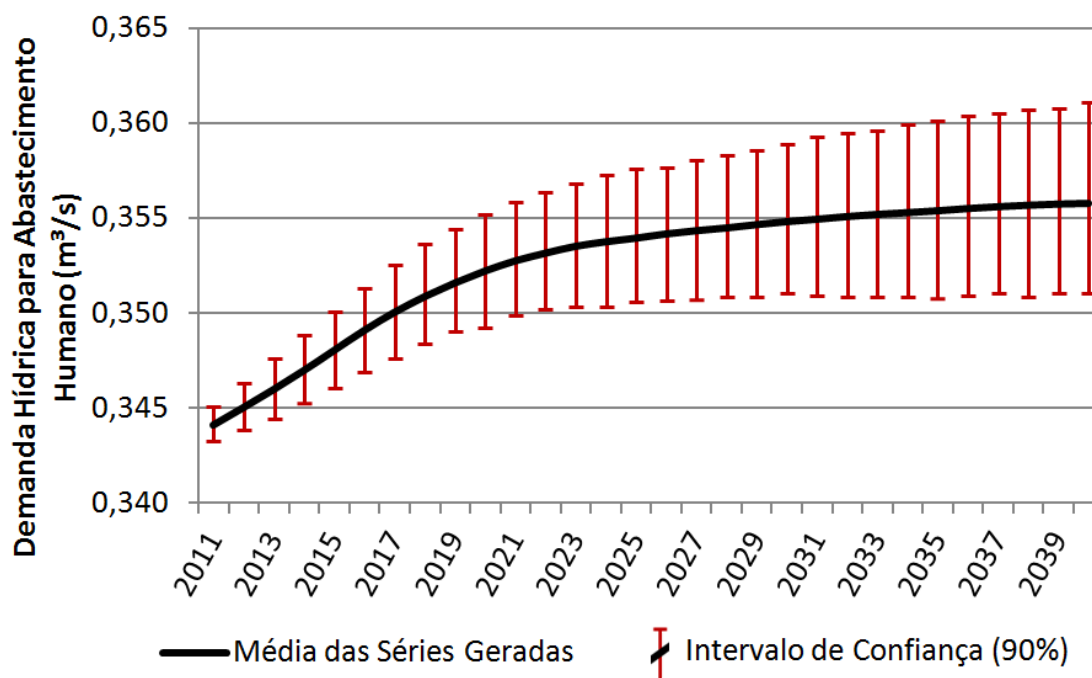


Figura 4.34. Projeção da demanda hídrica média anual para abastecimento humano (2011-2040), na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

4.4.2. PROJEÇÃO DE REBANHOS E DEMANDA HÍDRICA PARA CRIAÇÃO ANIMAL

Conforme descrito na metodologia, a estimativa dos rebanhos foi realizada a partir da proporção das áreas rurais de cada município na bacia e das informações coletadas de efetivo de rebanhos na Pesquisa Pecuária Municipal, no período entre 2001 e 2010. Com estes dados, foi estabelecida uma tendência para cada tipo de rebanho, no período entre 2011 e 2040. A parcela não explicada pela tendência ajustada (os resíduos obtidos no período observado, de 2001 a 2010) foi considerada como uma variável aleatória.

É importante destacar que o período de dados disponíveis, de 10 anos, é relativamente curto para o horizonte de extrapolação, de 30 anos. Uma vez que não existem outras fontes confiáveis de dados referentes às atividades pecuárias, aceitou-se, no presente trabalho, a simplificação na estimativa dos rebanhos para o futuro com base na tendência extrapolada, mesmo que isso represente um certo grau de incertezas.

Na Figura 4.35 são ilustrados os valores estimados de efetivo de rebanhos na bacia hidrográfica do rio Ijuí no período de observação, entre 2001 e 2010, e a tendência ajustada para cada um dos nove rebanhos analisados. Percebe-se que o ajuste das tendências não considera todas as flutuações nos efetivos de rebanhos, principalmente as referentes aos rebanhos de caprinos, suínos, ovinos, gado de corte e gado leiteiro. Ainda assim, apesar da redução dos rebanhos até 2005, em valores absolutos, foi observada uma tendência de crescimento nos rebanhos de caprinos, suínos, ovinos e gado leiteiro. No caso do gado de corte, o melhor ajuste foi de uma tendência de redução linear no período analisado. Nos demais rebanhos (galinhas, equinos, codornas e coelhos) a tendência observada foi de uma redução exponencial.

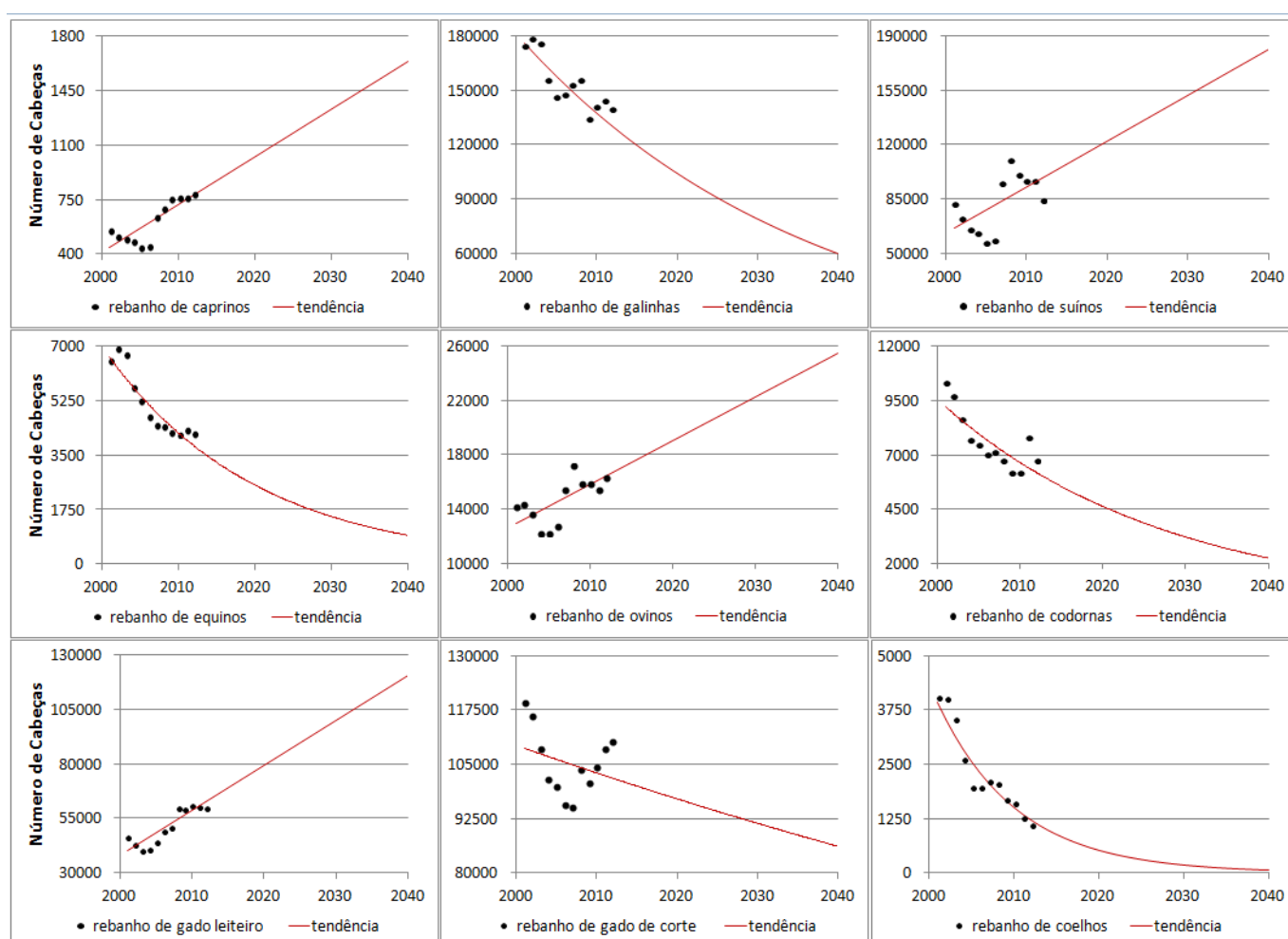


Figura 4.35. Tendência dos rebanhos (2001-2040) na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

A variável aleatória (resíduos proporcionais) é mais expressiva no rebanho de suínos, com desvio padrão de 16,87%. Em seguida, destaca-se a variável aleatória para projeção dos caprinos, com desvio padrão de 13,67%, e dos equinos, com 13,17%. A menor dispersão de

resíduos da tendência ajustada foi observada na modelagem do rebanho de galinhas, com desvio padrão de 5,3%.

Tendo-se como base as tendências ajustadas e os resíduos proporcionais para cada rebanho, foram projetadas 1.000 séries estocásticas referentes ao efetivo de cada rebanho para a bacia hidrográfica do rio Ijuí, no período de 2011 a 2040 (Figura 4.36 a Figura 4.44).

Considerando-se a média das séries geradas para a criação de caprinos, o número de cabeças deverá apresentar um aumento de 117,4% no período entre 2011 e 2040, passando de 756 para 1.643 cabeças (Figura 4.36). Considerando-se o intervalo de confiança de 90%, o efetivo de caprinos deverá ficar entre 1.271 e 2.006 cabeças no ano de 2040.

De acordo com os resultados da modelagem, a criação de codornas deverá apresentar, na bacia, uma queda nas próximas décadas, em média, com redução de 67,8%, passando de 6.373 cabeças em 2011 para 2.051 cabeças em 2040 (Figura 4.37). Considerando-se o intervalo de confiança de 90%, o efetivo de codornas deverá ficar entre 1.738 e 2.405 cabeças no ano de 2040.

De modo ainda mais acentuado, o efetivo de coelhos também deverá sofrer redução na área da bacia hidrográfica, de 1.350 no ano de 2011 para apenas 61 cabeças no ano de 2040 (-95,5%), como é apresentado na Figura 4.38. Considerando-se o nível de significância estabelecido, pode-se afirmar que o efetivo deverá ficar entre 50 e 72 cabeças em 2040.

Outros rebanhos que deverão sofrer redução na bacia nas próximas décadas são os de equinos (Figura 4.39) e de galinhas (Figura 4.40), respectivamente, em 53,7% e 55,2%, entre 2011 e 2040. Considerando a média das séries geradas, o efetivo de equinos deve reduzir, neste período, de 4.486 para 2.079 cabeças, enquanto que o efetivo de galinhas, de 135.868 para 60.841 cabeças.

Em contrapartida, os rebanhos de ovinos, de suínos e de gado leiteiro deverão apresentar um significativo crescimento nas próximas décadas na bacia hidrográfica, como mostram as Figuras 4.41, 4.42 e 4.43, respectivamente.

Em média, o efetivo de ovinos deve subir de 16.025 para 25.417 cabeças, representando um crescimento de 58,6% entre 2011 e 2040. Considerando-se o nível de significância estabelecido, pode-se afirmar que o efetivo deverá ficar entre 21.450 e 29.230 cabeças em 2040.

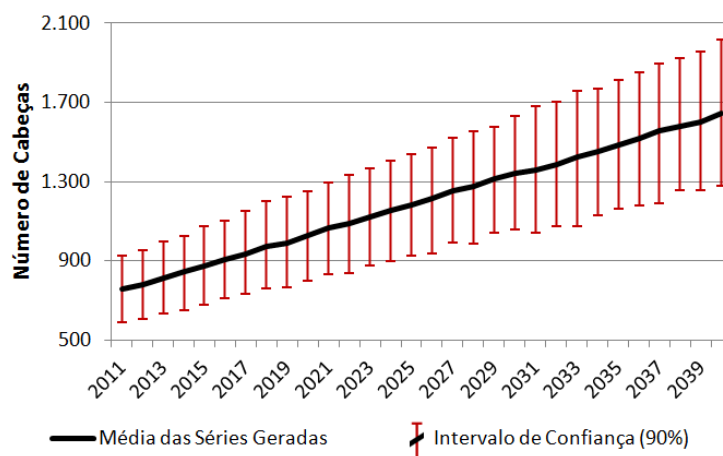


Figura 4.36. Projeção do rebanho de caprinos (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

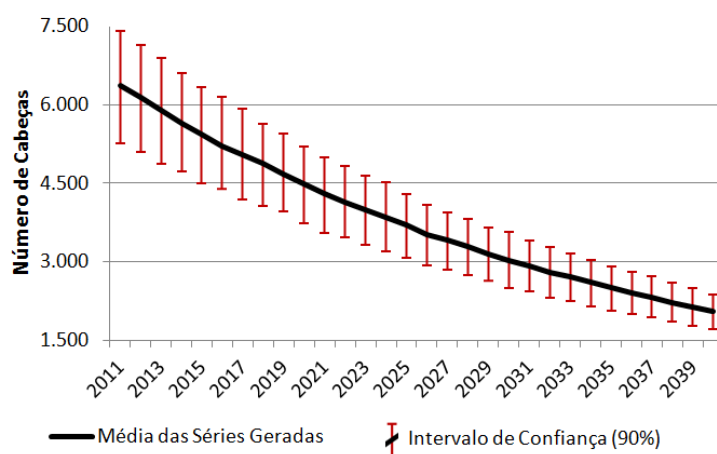


Figura 4.37. Projeção do rebanho de codornas (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

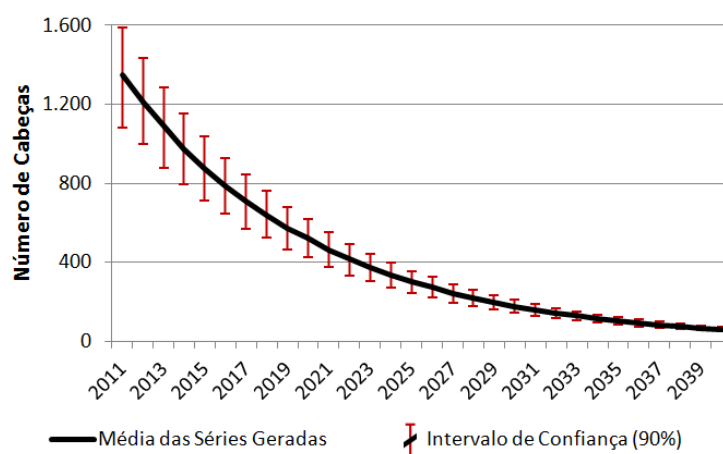


Figura 4.38. Projeção do rebanho de coelhos (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

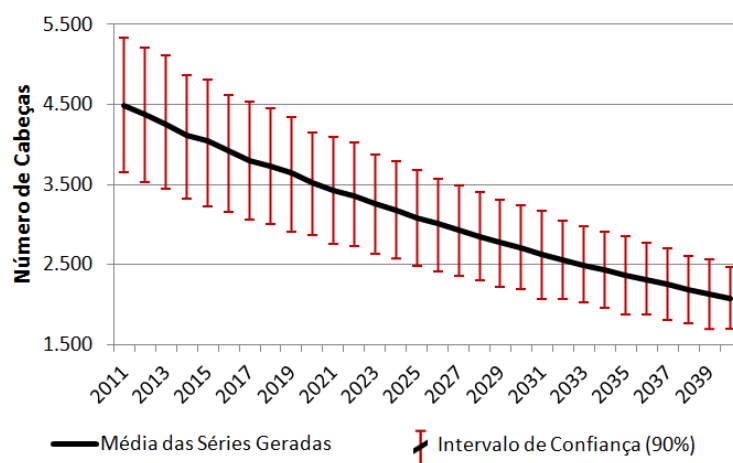


Figura 4.39. Projeção do rebanho de equinos (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

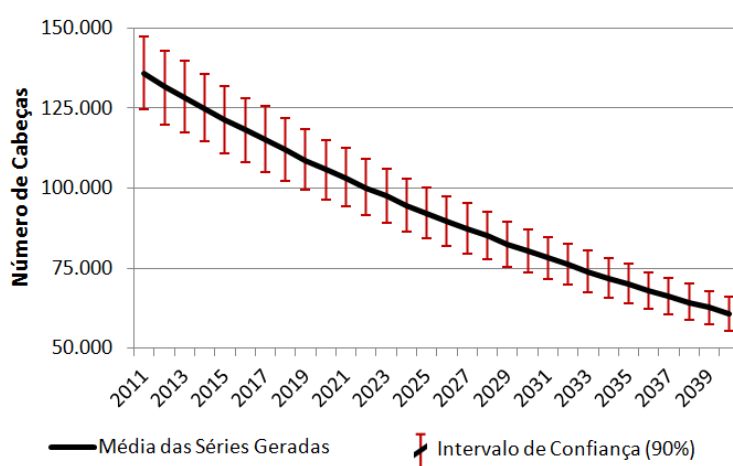


Figura 4.40. Projeção do rebanho de galinhas (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

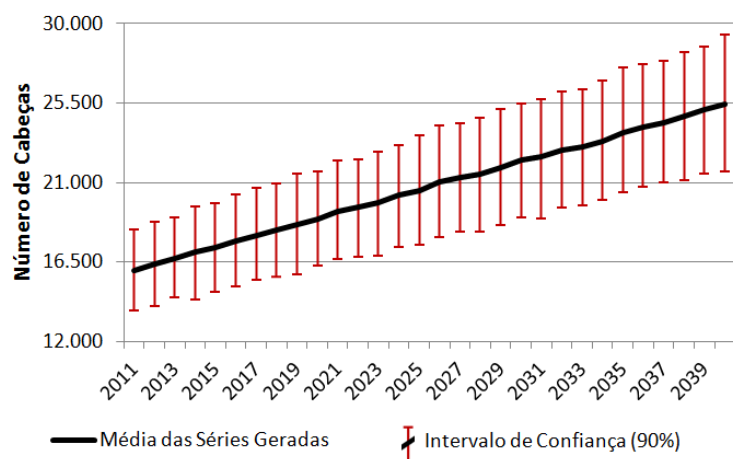


Figura 4.41. Projeção do rebanho de ovinos (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

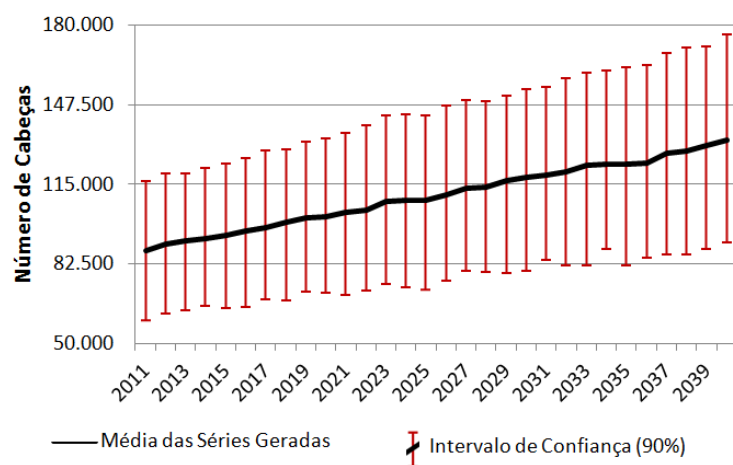


Figura 4.42. Projeção do rebanho de suínos (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

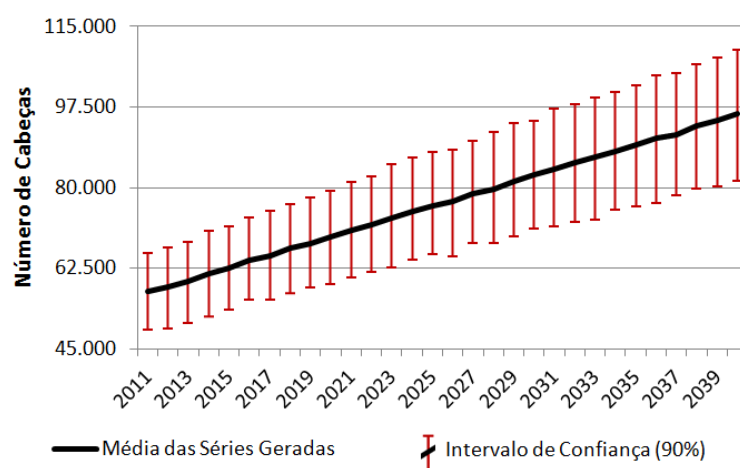


Figura 4.43. Projeção do rebanho de gado leiteiro (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

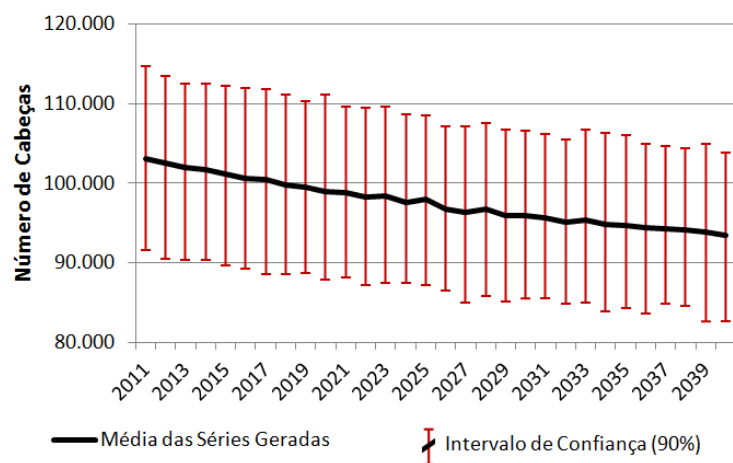


Figura 4.44. Projeção do rebanho de gado de corte (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

Quanto aos suínos, o número de cabeças deverá crescer de 87.964 para 132.941 (+51,1%) no mesmo período. Porém, em virtude da expressiva magnitude da variável aleatória, considerando-se o intervalo de confiança de 90%, o efetivo de suínos deverá ficar entre 89.856 e 174.556 cabeças no ano de 2040. Este resultado revela um índice muito significativo de incertezas relacionadas a este tipo de criação animal para as próximas décadas na bacia do rio Ijuí.

Considerando-se a média das séries geradas, também o rebanho de gado leiteiro deverá crescer nas próximas décadas, passando de 57.507 para 95.964 (+66,9%) no período analisado. Considerando o nível de significância de 0,1, pode-se afirmar que o efetivo de gado leiteiro em 2040 deverá ficar entre 82.014 e 110.361 cabeças.

Por fim, quanto ao rebanho de gado de corte, a tendência observada é de uma leve redução considerando os valores médios (Figura 4.44). O efetivo deve reduzir de 103.068 (2011) para 93.493 (2040), o que representa o decréscimo de 9,3% no período em questão. Entretanto, considerando-se o limite de confiança de 90%, em 2040, este rebanho deverá ficar no intervalo de valores entre 83.146 e 104.299. Isto indica, portanto, a possibilidade deste rebanho não apresentar grande variação nas próximas décadas.

A partir da projeção dos nove rebanhos mais representativos da bacia e do consumo de água de cada tipo de criação animal, obtido em literaturas científicas (Tabela 2.1), foram gerados 1.000 cenários referentes à demanda hídrica para atividades relacionadas à pecuária na bacia hidrográfica do rio Ijuí, no período de 2011 a 2040 (Figura 4.45).

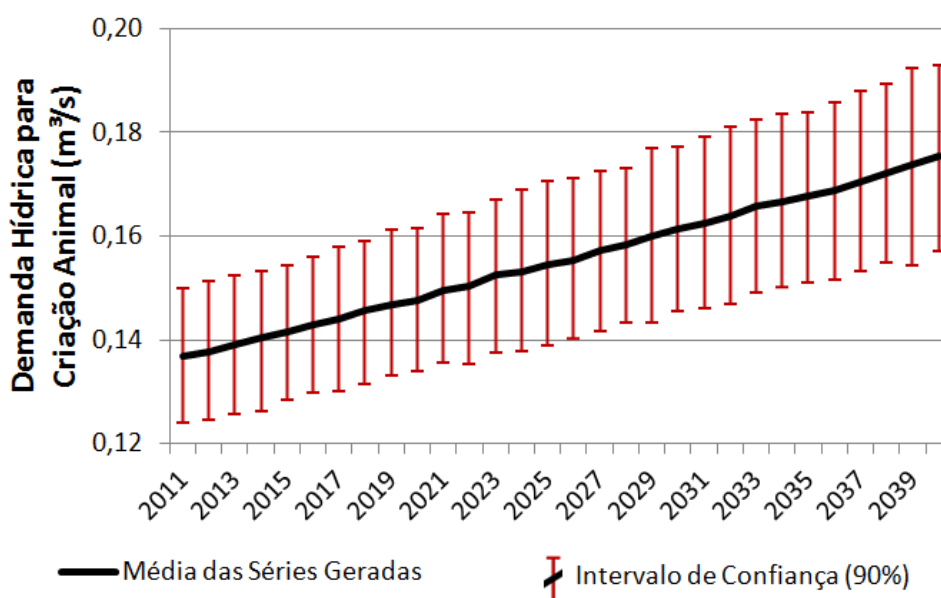


Figura 4.45. Projeção da demanda hídrica para criação animal (média e intervalo de confiança), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

Considerando-se a média das séries geradas, a demanda hídrica para a criação animal deverá crescer no período entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica, aumentando de 0,137 m³/s para 0,175 m³/s. Estes valores indicam um crescimento médio de 28,2% na demanda hídrica para a pecuária em três décadas. É possível afirmar, com um nível de significância de 0,1, que a demanda hídrica para a pecuária em 2040 deverá ficar entre 0,158 m³/s e 0,194 m³/s.

Deste modo, pode-se concluir que a tendência de incremento na demanda para as atividades pecuárias é superior à tendência observada para o abastecimento humano (aumento de 3,4%), indicando que a criação animal deverá crescer em ritmo mais acelerado do que o crescimento populacional. Ainda assim, considerando os valores médios, em 2040, a demanda para os rebanhos (0,175 m³/s) deverá representar aproximadamente a metade da demanda para o abastecimento humano, estimada em 0,356 m³/s.

4.4.3. PROJEÇÃO DE ÁREAS IRRIGADAS E DEMANDA HÍDRICA PARA AGRICULTURA IRRIGADA

A projeção das áreas irrigadas e, conseqüentemente, da demanda hídrica na bacia hidrográfica do rio Ijuí, entre 2011 e 2040, foi realizada a partir de uma abordagem estocástica, considerando os valores outorgados de uso da água para a atividade e a tendência observada de áreas irrigadas até o ano de 2010.

A Figura 4.46 apresenta a área irrigada na bacia do rio Ijuí entre 2003 e 2013, estimada a partir dos valores outorgados para a atividade, e a tendência ajustada aos dados observados, extrapolada até o ano de 2040.

Considerando-se o período entre 2003 e 2010, o aumento do volume outorgado foi muito expressivo, passando de 1,01 m³/s para 7,7 m³/s (+661%). Convertendo-se para áreas irrigadas, isto representa um aumento de 60,76 km² em 2003 para 462,2 km² em 2010. A linha de tendência ajustada aos dados observados indica que as áreas irrigadas devem atingir aproximadamente 1.000 km² em 2020 e 1.950 km² em 2040.

A Figura 4.47 ilustra a projeção das áreas irrigadas entre 2011 e 2040, tendo como base a modelagem estocástica, com a tendência central e o intervalo de confiança de 90%. Conforme pode ser observado, mantida a tendência e os resíduos modelados na última década, a média das séries geradas indica que haverá 1.954 km² de áreas irrigadas em 2040. Este valor

representa um aumento de 344% nas áreas irrigadas na bacia. Já quanto às incertezas relacionadas à modelagem, em 90% dos cenários gerados para o futuro a área irrigada ficou entre 1.796 km² e 2.105 km² no ano de 2040.

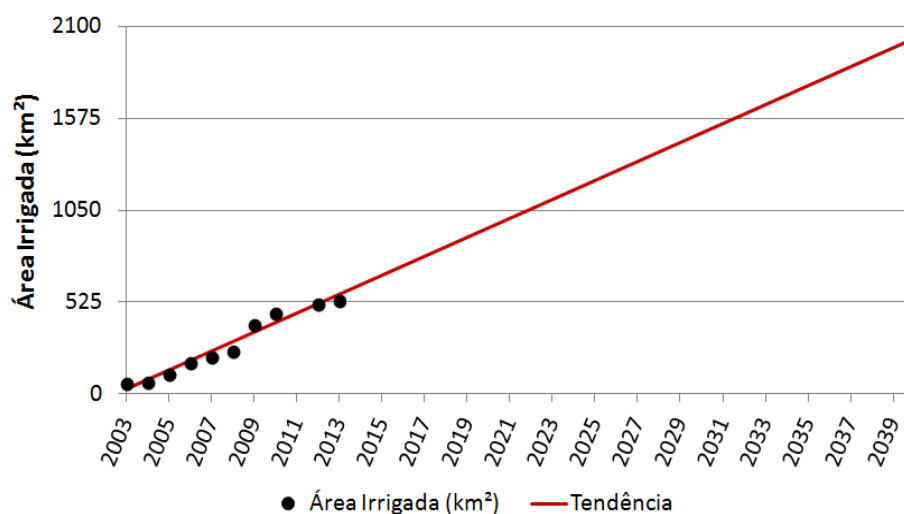


Figura 4.46. Tendência das áreas irrigadas (2003-2040) na bacia do rio Ijuí, RS.

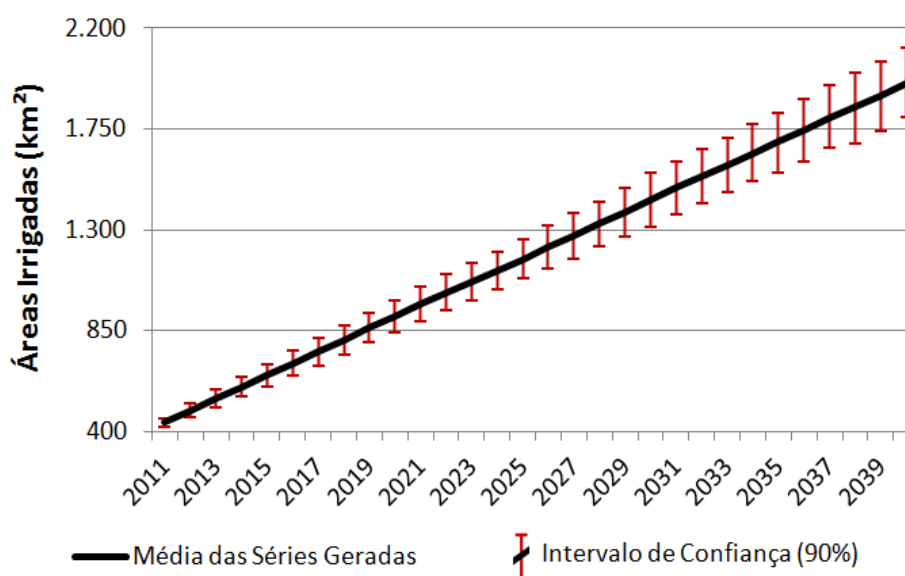


Figura 4.47. Projeção das áreas irrigadas (2011-2040), com base em modelagem estocástica, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS. Média e intervalo de confiança de 90%.

É importante destacar que a área média projetada para a irrigação em 2040 supera 36,1% da área total da bacia. Embora este percentual possa ser considerado bastante elevado, levando em conta as áreas de irrigação no início do Século XXI, o valor não é superior às áreas aptas à irrigação considerando os critérios estabelecidos (áreas plantadas em declividades inferiores a 10%, no ano de 2011).

No caso da demanda hídrica para atividades agrícolas irrigadas, os valores foram obtidos em intervalo de tempo mensal, tendo em vista que o uso da irrigação é muito mais expressivo nos meses de verão, principalmente em virtude do cultivo de soja. A estimativa mensal da demanda hídrica para a irrigação foi obtida, conforme a metodologia apresentada, a partir das proporções de áreas com uso de irrigação em cada mês e da demanda específica mensal (De_m), considerando que o valor outorgado para uso da água se refere a uma demanda máxima, que pode ser considerada proporcional ao mês com maior valor de evapotranspiração potencial da cultura (ETc). Assim, para o mês de maior valor de ETc (janeiro), considera-se que a demanda específica mensal é máxima, isto é, equivalente ao valor outorgado pelo DRH/SEMA, igual a 16,66 L/s por km² de área irrigada.

As Figuras 4.48 e 4.49 apresentam, respectivamente, a projeção da demanda hídrica mensal e da demanda no mês de janeiro, para agricultura irrigada, entre 2011 e 2040, na bacia do rio Ijuí. Em 2011, por exemplo, considerando a média das séries geradas, a demanda oscilou entre 6,3 m³/s (janeiro) e 0,23 m³/s (maio). Já em 2040, também considerando uma tendência central, a demanda deverá ficar entre 28 m³/s (janeiro) e 1,04 m³/s (maio). Considerando-se o intervalo de confiança de 90%, em janeiro de 2040, a demanda hídrica para a irrigação ficará entre 25,5 m³/s e 29,9 m³/s.

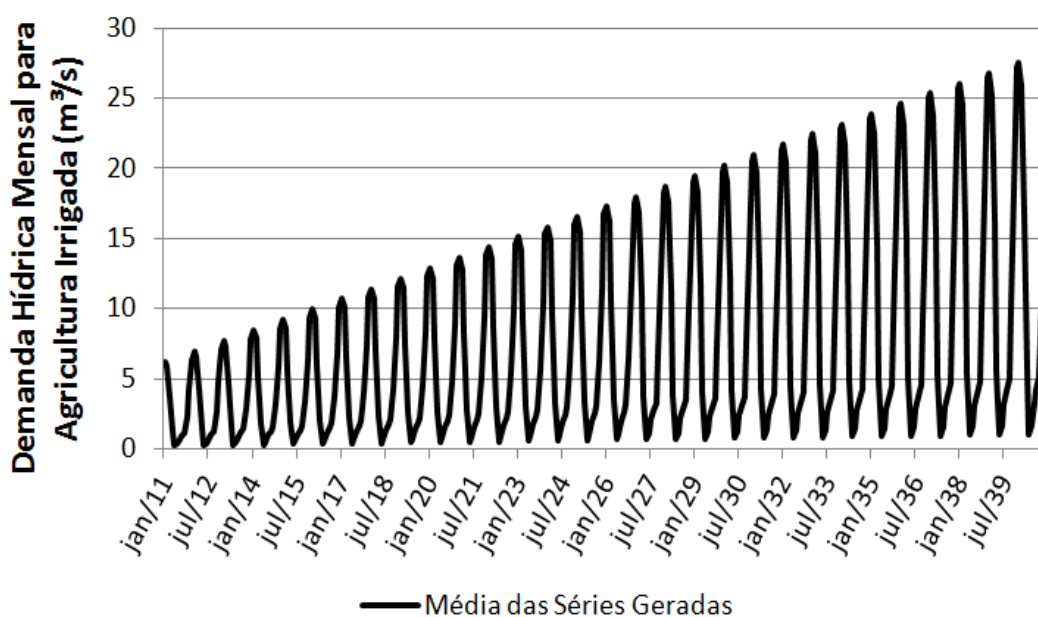


Figura 4.48. Projeção da demanda hídrica mensal para agricultura irrigada, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

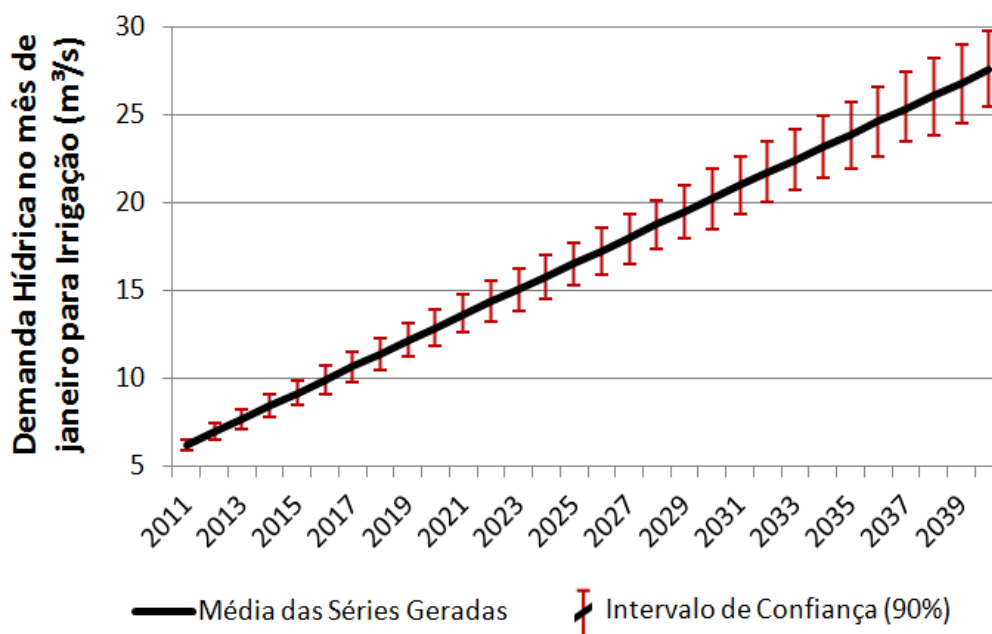


Figura 4.49. Projeção da demanda hídrica em janeiro para agricultura irrigada (média e intervalo de confiança de 90%), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

Com base nos resultados apresentados podem-se realizar duas importantes afirmações: i) a tendência de crescimento das atividades agrícolas irrigadas no período analisado é bem superior à tendência observada em relação à criação animal e ao abastecimento humano; ii) o volume demandado para as atividades agrícolas, considerando o mês de maior consumo de água (janeiro), é o mais representativo dos usos consuntivos da água.

Sendo assim, a projeção da demanda hídrica mensal (Figura 4.50) e, especificamente, da demanda hídrica em janeiro (Figura 4.51) para os usos consuntivos de irrigação, criação animal e consumo humano na bacia, entre 2011 e 2040, segue a mesma tendência observada de demanda para as atividades agrícolas irrigadas.

No início do período analisado, em 2011, a demanda hídrica média anual para usos consuntivos foi de 3,27 m³/s, variando de 0,72 m³/s em maio para 6,79 m³/s em janeiro. Já no final do período, no ano de 2040, a demanda hídrica média anual foi de 12,91 m³/s, com valores mensais entre 1,57 m³/s (maio) e 28,53 m³/s (janeiro). Isto representa, em termos gerais, um aumento de 295% na demanda hídrica para usos consuntivos entre 2011 e 2040, considerando apenas a área da bacia hidrográfica do rio Ijuí.

Quanto ao intervalo de confiança das demandas, considerando-se um nível de significância de 0,1, a vazão necessária para atender aos usos consuntivos no mês mais crítico das séries geradas (janeiro de 2040), ficará entre 26,28 m³/s e 30,71 m³/s. A amplitude deste

intervalo representa 15,5% do valor médio obtido através das 1.000 séries, sendo este um grau de incerteza razoável para a estimativa da demanda hídrica no futuro.

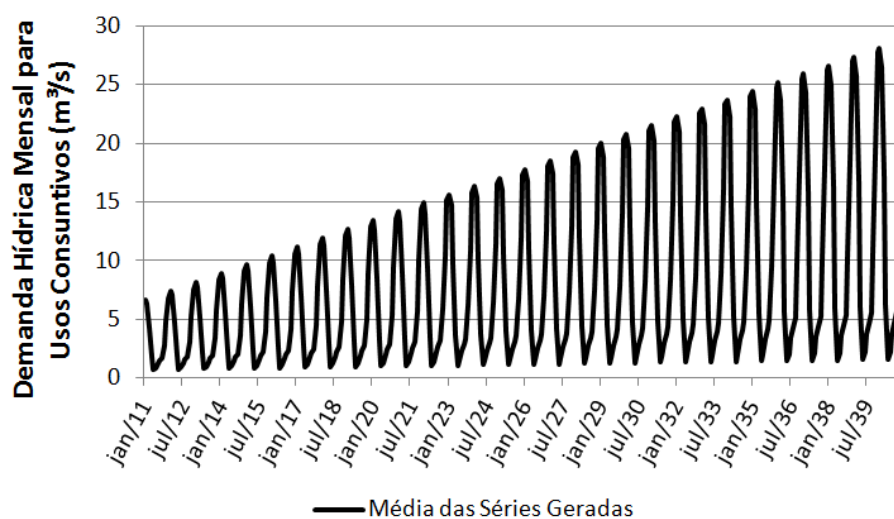


Figura 4.50. Projeção da demanda hídrica mensal para usos consuntivos, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

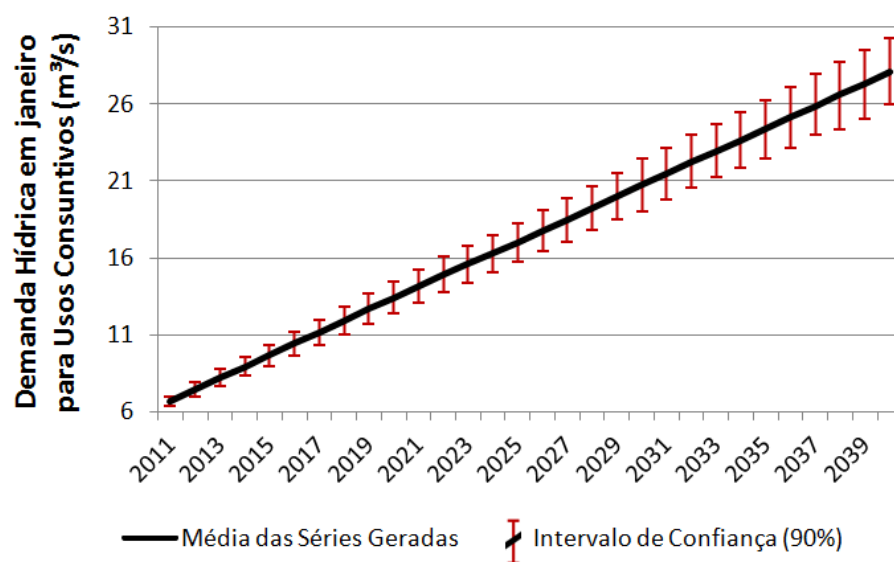


Figura 4.51. Projeção da demanda hídrica em janeiro para usos consuntivos (média e intervalo de confiança de 90%), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

4.5. MÓDULO 5: A RELAÇÃO ENTRE A DEMANDA E A DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO FUTURO

Neste item, serão apresentados os resultados e as discussões referentes à análise da relação entre a disponibilidade hídrica, representada pelas séries estocásticas de vazão geradas no Módulo 3, e a demanda hídrica, representada pelas séries estocásticas geradas no Módulo 4, no futuro (2011-2040), na bacia hidrográfica do rio Ijuí.

4.5.1. ANÁLISE GERAL DA RELAÇÃO DEMANDA/DISPONIBILIDADE

Inicialmente, ao calcular a razão entre a demanda para usos consuntivos e a disponibilidade hídrica (demanda/disponibilidade), no período entre 2011 e 2040, considerando a combinação das 1.000 séries de demanda hídrica mensal e de vazão média mensal, foi observada uma tendência de aumento neste percentual em cada mês. Conforme é ilustrado na Figura 4.52, em média, a relação demanda/disponibilidade em 2011 foi de apenas 6,06%, variando entre 0,81% (maio) e 20,15% (dezembro). Já em 2040 esta proporção aumentou para 13,82%, variando entre 1,09% (maio) e 43,3% (dezembro). Essa tendência de aumento na relação demanda/disponibilidade foi observada em todos os meses do ano, devido principalmente ao contínuo aumento da demanda hídrica durante o período entre 2011 e 2040.

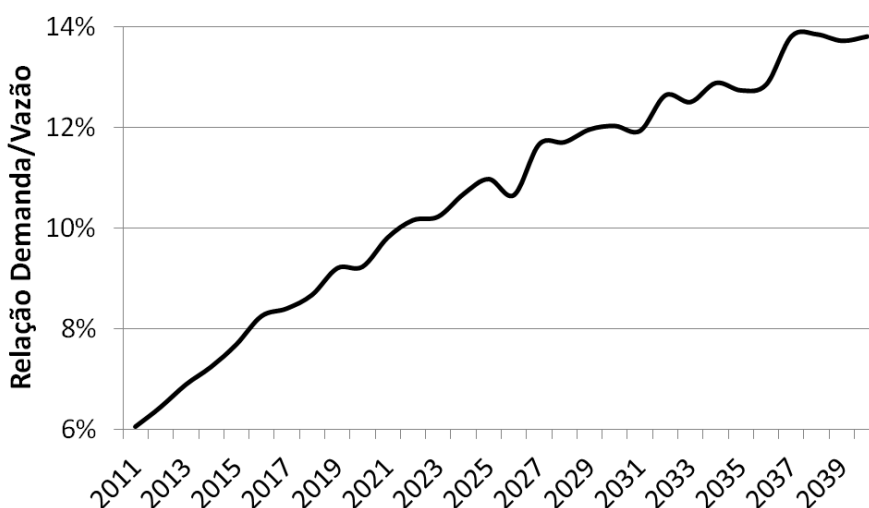


Figura 4.52. Relação demanda/disponibilidade média anual, considerando uma média das 1.000 combinações de séries estocásticas, entre 2011 e 2040, na bacia do rio Ijuí, RS.

É importante também caracterizar o padrão sazonal da relação demanda/disponibilidade (Figura 4.53), de modo a entender em quais períodos do ano o risco de desabastecimento é maior. Neste caso, fica evidente que a relação demanda/disponibilidade aumenta significativamente no período do verão, principalmente entre os meses de novembro e março, em virtude das atividades relacionadas à irrigação dos cultivos da soja e do milho. Além disso, pode-se perceber que a tendência de crescimento nos percentuais durante o período entre 2011 e 2040 é mais marcante nos meses de verão, já que no inverno os percentuais ficam abaixo de 5% em todos os meses das próximas décadas.

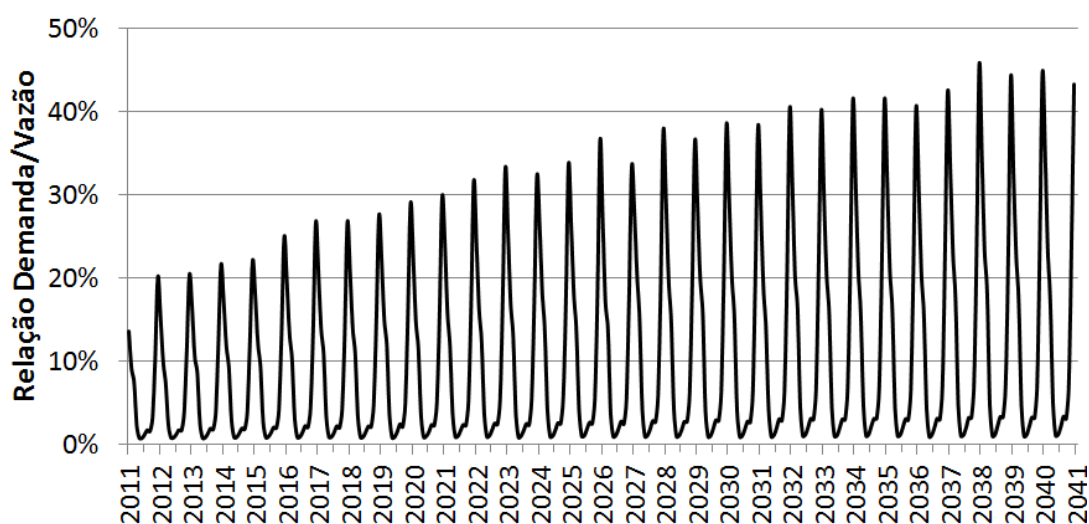


Figura 4.53. Padrão sazonal da relação demanda/disponibilidade, considerando uma média das 1.000 combinações de séries estocásticas, entre 2011 e 2040, na bacia do rio Ijuí, RS.

Considerando-se uma média das 1.000 combinações de séries estocásticas, o mês de dezembro foi o que apresentou os maiores valores no que diz respeito à razão entre a demanda e a vazão, com percentual médio de 34,16% (Tabela 4.11), variando entre 20,15% e 45,66% entre 2011 e 2040. Por outro lado, o mês de maio apresentou o menor percentual médio, com valor de 0,96%, oscilando entre 0,81% e 1,09%.

Embora o mês de janeiro apresente, de modo geral, a maior demanda hídrica em virtude do estágio avançado de desenvolvimento do cultivo da soja, as vazões aumentam consideravelmente neste mês, em comparação com o mês de dezembro. Em janeiro, entre 2011 e 2040, a demanda média projetada é de 17,69 m³/s, considerando as 1.000 séries geradas, enquanto que no mês de dezembro é de 17,42 m³/s. Por outro lado, a vazão média projetada para o futuro, em janeiro, é de 127,6 m³/s, enquanto que em dezembro este valor é reduzido para 97,9 m³/s. Estes resultados justificam a constatação de que o mês de dezembro

é o que deverá apresentar o maior risco de desabastecimento no futuro, se confirmado o cenário de mudança climática simulado.

Já para o período entre os meses de abril a outubro, em geral, o risco de desabastecimento de água é baixo na bacia do rio Ijuí, pois o percentual médio da razão entre a demanda e a disponibilidade de água é inferior a 6%. Neste período do ano, a relação demanda/vazão apresenta os menores valores em virtude da conjugação de dois fatores: i) é neste período que são observadas vazões mensais superiores à média anual; ii) de modo inverso, também é neste período do ano em que a demanda por água é inferior à média anual.

Tabela 4.11. Relação demanda/vazão mensal, considerando uma média das 1.000 combinações de séries estocásticas, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

Meses	Relação Demanda/Vazão Disponível
Janeiro	25,94%
Fevereiro	17,52%
Março	13,21%
Abril	3,82%
Maio	0,96%
Junho	1,09%
Julho	1,84%
Agosto	2,70%
Setembro	2,56%
Outubro	5,68%
Novembro	18,12%
Dezembro	34,16%

Com relação a valores mais extremos, considerando o percentil de 0,95 das 1.000 combinações de séries estocásticas, foram obtidos valores superiores a 100% quanto à razão demanda/disponibilidade. Estes valores foram observados nos meses de janeiro e dezembro, em alguns anos, entre 2025 e 2040. O mês mais crítico, do ponto de vista do abastecimento de água, é o mês de dezembro, com média de 100,43% (Tabela 4.12) para a razão demanda/vazão disponível (percentil 0,95, no período entre 2011 e 2040), atingindo o pico de 140% em um ano do período, como pode ser observado na Figura 4.54.

A Figura 4.54 indica que, em algumas das possíveis combinações de séries estocásticas para o futuro, não será possível atender à demanda hídrica para usos consuntivos durante todos os meses do período entre 2011 e 2040, sem a construção de pequenos reservatórios para regularizar as vazões. Por exemplo, no mês mais crítico do período analisado (dezembro/2037), 109 combinações de séries estocásticas (10,9%) apresentaram

uma razão demanda/disponibilidade superior a 100%, caracterizando a falha no atendimento à demanda.

Tabela 4.12. Relação demanda/vazão mensal, considerando o percentil 0,95 das 1.000 combinações de séries estocásticas, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

Meses	Relação Demanda/Vazão (percentil 0,95)
Janeiro	76,45%
Fevereiro	51,61%
Março	39,32%
Abril	11,41%
Mai	2,95%
Junho	3,20%
Julho	5,51%
Agosto	7,97%
Setembro	7,64%
Outubro	16,82%
Novembro	53,85%
Dezembro	100,43%

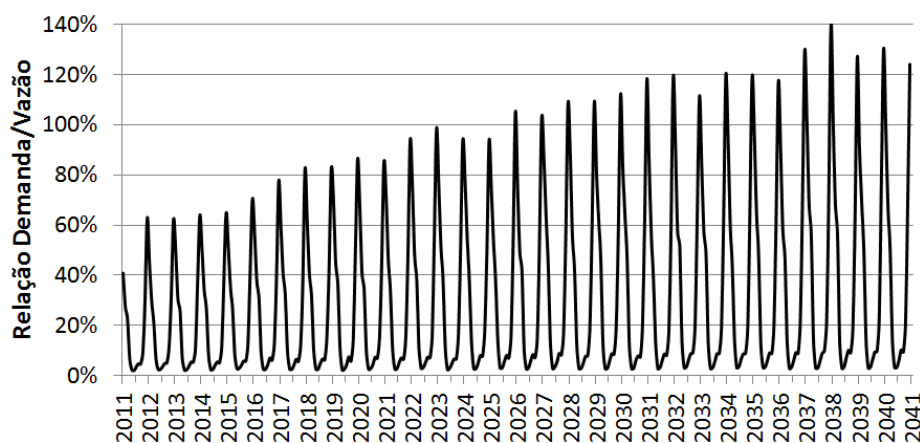


Figura 4.54. Padrão sazonal da relação demanda/disponibilidade, considerando o percentil de 0,95 das 1.000 combinações de séries estocásticas, entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

Deste modo, em virtude do indicativo de necessidade de mais reservatórios para o armazenamento de água para atividades como a irrigação da soja, devido ao aumento da frequência de estiagens no futuro, principalmente nos meses de dezembro e janeiro, é importante analisar também o padrão das curvas de regularização e as incertezas relacionadas a estas no período futuro. A simulação do balanço hídrico em um reservatório fictício para

representar a capacidade total de reservas necessárias de água, com a geração de curvas de regularização, oferece maior detalhamento sobre a capacidade necessária para o atendimento de todas as demandas hídricas nas próximas décadas, do que a simples análise da razão entre a demanda e a vazão. Através da simulação mensal do balanço hídrico, podem ser consideradas, por exemplo, as perdas por evaporação no reservatório em caso de armazenamento de água para os meses seguintes.

4.5.2. SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO EM UM RESERVATÓRIO E GERAÇÃO DE CURVAS DE REGULARIZAÇÃO

A simulação foi realizada considerando três percentuais de atendimento à demanda: em 95%, 99% e 100% dos meses. Porém, nos dois primeiros casos, constatou-se que em praticamente todos os cenários combinados de vazão e demanda não haveria a necessidade de armazenamento, inviabilizando qualquer análise de mudanças no abastecimento. Deste modo, serão discutidos apenas os resultados referentes à simulação que pressupõe 0% de falha no atendimento à demanda hídrica.

Na Figura 4.55 são ilustradas as curvas de regularização obtidas para o atendimento integral da demanda hídrica para usos consuntivos no futuro, entre 2011 e 2040. Para avaliar as mudanças projetadas para o futuro, foram comparados dois cenários: utilizando as séries estocásticas de vazões do período de base (1961-1990) e do período futuro (2011-2040).

A primeira constatação é de que, considerando as séries projetadas de disponibilidade hídrica para o futuro, a tendência é de aumento na capacidade de reservatórios para atender à totalidade da demanda para usos consuntivos. De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.55, ao utilizar as projeções provenientes de um cenário de mudança climática, a capacidade média do reservatório para atender a uma demanda mensal de 21 Hm³ - equivalente à demanda média no período entre 2011 e 2040 - seria de 24,1 Hm³, ou seja, 114% da demanda. Isto indica que, de modo geral, os reservatórios teriam que ser capazes de armazenar uma quantidade de água levemente superior à demanda média mensal.

Ainda, considerando-se o limite superior do intervalo de confiança de 90%, a capacidade máxima teria que ser de 56,5 Hm³. Isto significa que, no futuro, em 95% das

combinações possíveis de séries estocásticas, a capacidade do reservatório para atender a totalidade da demanda para usos consuntivos (0% de falhas) é de aproximadamente 269% da demanda média.

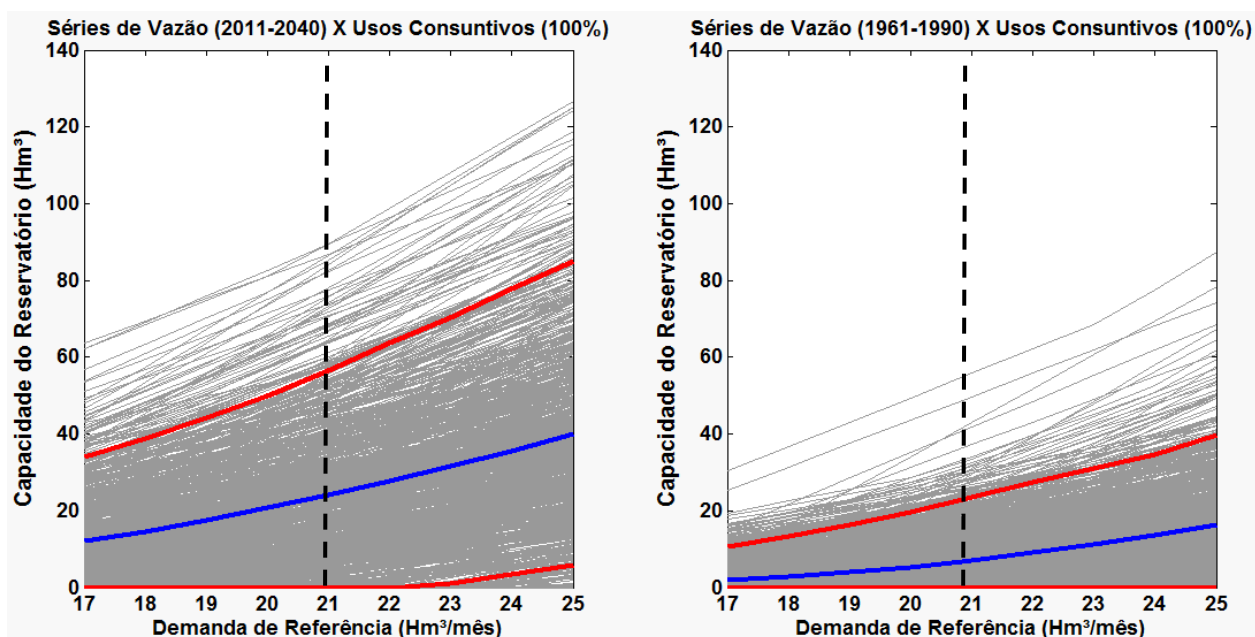


Figura 4.55. Curvas de regularização, considerando séries estocásticas de vazão do período futuro (2011-2040) e do período de base (1961-1990), para atendimento à demanda relacionada aos usos consuntivos (média e intervalo de confiança de 90%), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS. Percentual de falhas no atendimento à demanda: 0%. Linhas cinzas indicam cada um dos cruzamentos entre os cenários de vazão e de demanda. Linhas azuis indicam a tendência média, considerando os 1.000 cruzamentos realizados. Linhas vermelhas indicam o intervalo de confiança de 90%. Linha preta tracejada indica a demanda de referência média das séries estocásticas para o futuro.

Considerando as mesmas demandas projetadas para o futuro, porém utilizando as séries estocásticas de vazão referentes ao período de base (1961-1990), a capacidade média do reservatório fictício para atender à demanda de referência de 21 Hm³ seria de apenas 7,1 Hm³ (34% da demanda média), conforme mostra a Figura 4.55. Além disso, considerando o limite superior do intervalo de confiança de 90%, nestes cenários, a capacidade máxima teria que ser de 23,4 Hm³. Isto significa que, caso as vazões no futuro apresentem características semelhantes às observadas no período de base (sem efeito de mudanças climáticas), em 95% das combinações possíveis de séries estocásticas, a capacidade do reservatório para atender a totalidade da demanda (0% de falhas) para usos consuntivos é equivalente a 111% da demanda média.

Assim, pode-se afirmar que, caso se confirme o cenário de mudança climática projetado pelo modelo Eta, haverá a necessidade de reservatórios com maior capacidade para atender à demanda prevista para o futuro. Além disso, em virtude da maior variabilidade das vazões no cenário projetado de mudança climática, a amplitude do intervalo de confiança é maior, indicando aumento das incertezas quanto ao armazenamento de água necessário.

É importante reforçar que isso não se deve à redução da vazão média de longo período, que inclusive aumentaria no futuro em virtude das mudanças climáticas. O motivo para tal mudança no dimensionamento dos reservatórios seria o aumento da frequência das estiagens com a subsequente redução das vazões com permanência superior a 90%, principalmente entre os meses de outubro e janeiro, meses em que o consumo de água para irrigação é maior.

Vale ressaltar também que a simulação realizada neste estudo consiste em uma aproximação da realidade, no sentido que pressupõe a construção de um único reservatório para atender a toda a demanda hídrica da bacia. Em outras palavras, significa que, se todos os moradores, criadores e agricultores captassem água no rio Ijuí, no local referente ao posto fluviométrico Santo Ângelo, esta seria a capacidade do reservatório necessária para atender à demanda no futuro, entre 2011 e 2040. Assim, deve-se considerar que na realidade a necessidade de armazenamento pode ser superior ao simulado, tendo em vista o fato de haver extensas áreas de irrigação próximas das áreas de cabeceira de drenagem (divisores d'água), onde a disponibilidade hídrica é proporcionalmente menor.

Por fim, tendo em vista a expressiva demanda hídrica para geração de energia elétrica na bacia hidrográfica do rio Ijuí, foi realizada também a simulação do balanço hídrico para geração das curvas de regularização para percentuais de atendimento de 95%, 99% e 100%, utilizando a demanda atual para o setor energético, igual a 80,82 m³/s ou 209,5 Hm³ por mês. Este valor representa a vazão máxima turbinada da Usina RS-155, a quarta Pequena Central Hidrelétrica (PCH) da Ceriluz, ainda em construção (CERILUZ, 2014).

As Figuras 4.56, 4.57 e 4.58 ilustram as curvas de regularização obtidas para o atendimento da demanda hídrica para geração de energia hidrelétrica, entre 2011 e 2040, considerando 5%, 1% e 0% de falhas. Para avaliar as mudanças projetadas para o futuro, novamente foram comparados dois cenários: utilizando as séries estocásticas de vazões do período de base (1961-1990) e do período futuro (2011-2040). Nas Tabelas 4.13 e 4.14 são sintetizados os resultados referentes à comparação dos cenários.

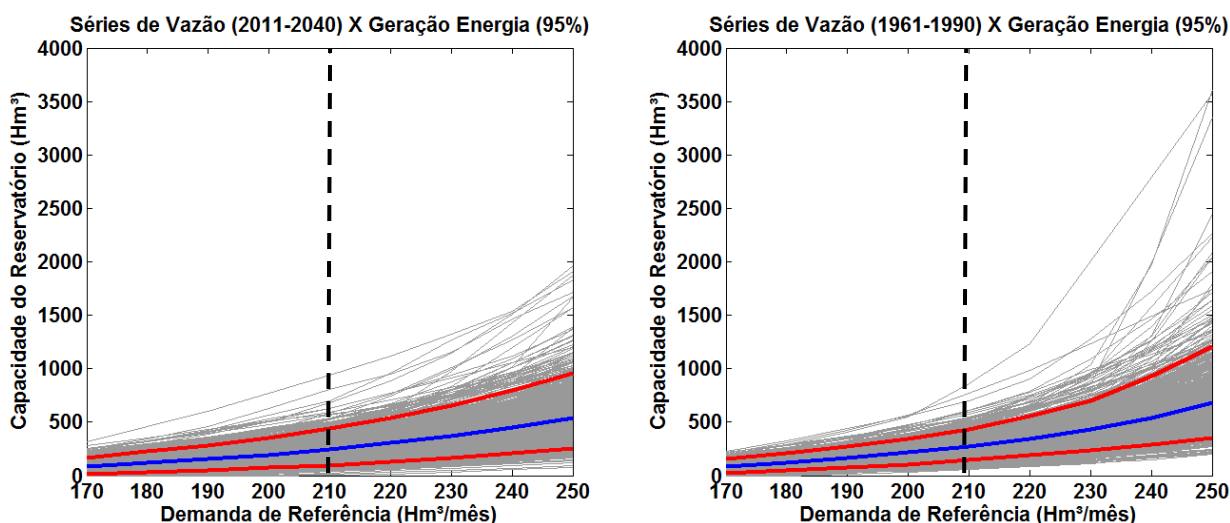


Figura 4.56. Curvas de regularização, considerando séries estocásticas de vazão do período futuro (2011-2040) e do período de base (1961-1990), para atendimento à demanda relacionada à geração de energia (média e intervalo de confiança de 90%), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS. Percentual de falhas no atendimento à demanda: 5%. Linhas cinzas indicam cada um dos cruzamentos entre os cenários de vazão e de demanda. Linhas azuis indicam a tendência média, considerando os 1.000 cruzamentos realizados. Linhas vermelhas indicam o intervalo de confiança de 90%. Linha preta tracejada indica a demanda de referência média das séries estocásticas para o futuro.

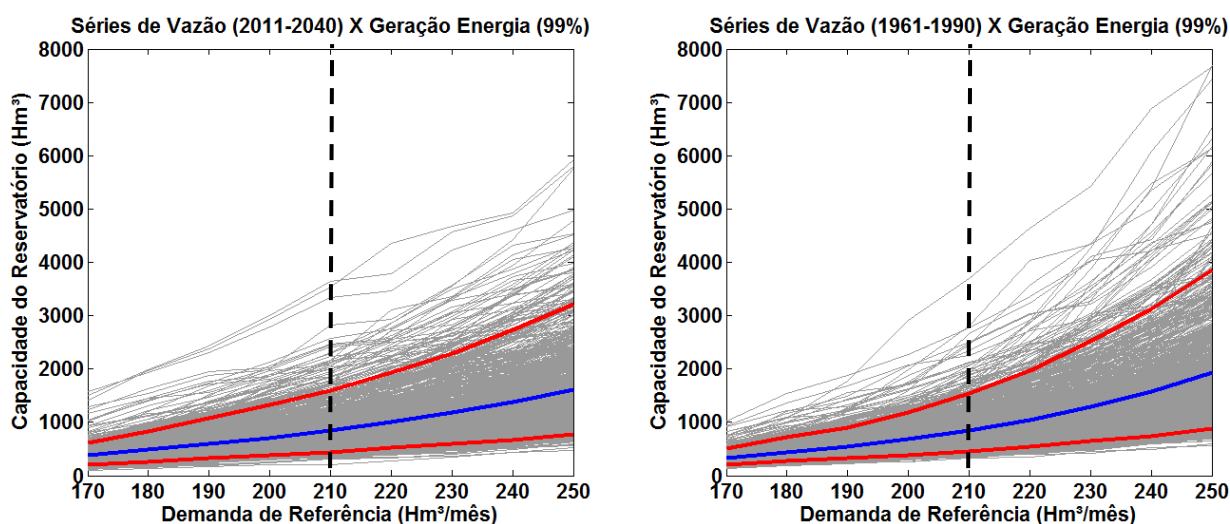


Figura 4.57. Curvas de regularização, considerando séries estocásticas de vazão do período futuro (2011-2040) e do período de base (1961-1990), para atendimento à demanda relacionada à geração de energia (média e intervalo de confiança de 90%), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS. Percentual de falhas no atendimento à demanda: 1%. Linhas cinzas indicam cada um dos cruzamentos entre os cenários de vazão e de demanda. Linhas azuis indicam a tendência média, considerando os 1.000 cruzamentos realizados. Linhas vermelhas indicam o intervalo de confiança de 90%. Linha preta tracejada indica a demanda de referência média das séries estocásticas para o futuro.

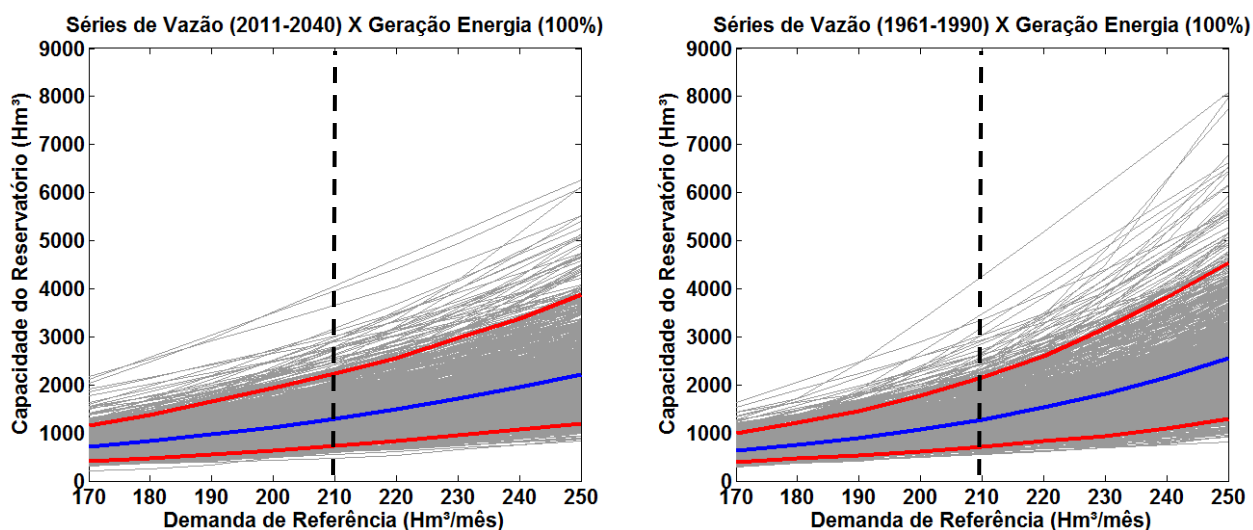


Figura 4.58. Curvas de regularização, considerando séries estocásticas de vazão do período futuro (2011-2040) e do período de base (1961-1990), para atendimento à demanda relacionada à geração de energia (média e intervalo de confiança de 90%), entre 2011 e 2040, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS. Percentual de falhas no atendimento à demanda: 0%. Linhas cinzas indicam cada um dos cruzamentos entre os cenários de vazão e de demanda. Linhas azuis indicam a tendência média, considerando os 1.000 cruzamentos realizados. Linhas vermelhas indicam o intervalo de confiança de 90%. Linha preta tracejada indica a demanda de referência média das séries estocásticas para o futuro.

Tabela 4.13. Capacidade dos reservatórios para atendimento da demanda hídrica de 210 Hm³ para o setor energético, considerando a média das 1.000 combinações de séries estocásticas nos cenários de base e futuro, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

Falhas no Atendimento	Capacidade Média dos Reservatórios (Hm ³)	
	Séries Estocásticas de Vazão do Cenário Base (1961-1990)	Séries Estocásticas de Vazão do Cenário Futuro (2011-2040)
5%	273,6	245,8
1%	844,0	850,4
0%	1.281,5	1.297,2

Tabela 4.14. Capacidade dos reservatórios para atendimento da demanda hídrica de 210 Hm³ para o setor energético, considerando percentil de 0,95 das 1.000 combinações de séries estocásticas nos cenários de base e futuro, na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.

Falhas no Atendimento	Capacidade dos Reservatórios (Hm ³): Percentil de 95%	
	Séries Estocásticas de Vazão do Cenário Base (1961-1990)	Séries Estocásticas de Vazão do Cenário Futuro (2011-2040)
5%	435,9	438,9
1%	1.535,1	1.588,1
0%	2.164,5	2.231,2

No caso da demanda de água para a geração de energia foi considerada uma demanda constante ao longo do ano. Como a projeção em caso de mudança climática indica que as vazões médias aumentarão em praticamente todos os meses do ano, neste caso, a tendência é de redução na capacidade necessária de armazenamento para atender em 95% dos meses a demanda para geração de energia hidrelétrica.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.56, ao utilizar as projeções provenientes de um cenário de mudança climática, a capacidade média do reservatório para atender a uma demanda mensal de 210 Hm³ - valor aproximado da demanda média no período entre 2011 e 2040 -, seria de 245,8 Hm³, ou seja, 117% da demanda. Ainda, considerando o limite superior do intervalo de confiança de 90%, a capacidade máxima teria que ser de 438,9 Hm³. Isto significa que, no futuro, em 95% das combinações possíveis de séries estocásticas, a capacidade do reservatório para atender à demanda hídrica do setor energético, com 5% de falhas, é de 209% da demanda média.

Considerando as mesmas demandas energéticas, porém utilizando as séries estocásticas de vazão referentes ao período de base (1961-1990), conforme mostra a Figura 4.56, a capacidade média do reservatório fictício para atender à demanda de referência de 210 Hm³ seria de 273,6 Hm³ (130% da demanda média). Porém, levando em conta o limite superior do intervalo de confiança de 90%, nestes cenários, a capacidade máxima teria que ser de 435,9 Hm³. Isto significa que, caso as vazões no futuro apresentem características semelhantes às observadas no período de base (sem efeito de mudanças climáticas) e a demanda hídrica para o setor energético seja a mesma que a atual, em 95% das combinações possíveis de séries estocásticas, a capacidade do reservatório para atender a demanda, com 5% de falhas, é de 208% da demanda de referência. Isso indica uma baixa influência das mudanças climáticas para o atendimento ao setor energético na bacia do rio Ijuí (Tabelas 4.13 e 4.14).

Resultados semelhantes foram observados tanto nas simulações que aceitaram falhas no atendimento em apenas 1% dos meses (Figura 4.57) quanto nas simulações com atendimento integral, 0% de falhas (Figura 4.58).

No caso de 99% de atendimento, ao utilizar as projeções provenientes de um cenário de mudança climática, a capacidade média do reservatório seria de 850,4 Hm³ para atender à demanda de referência de 210 Hm³, ou seja, de 405% da demanda. Tendo em vista o limite superior do intervalo de confiança de 90%, a capacidade máxima teria que ser de 1.588,1 Hm³. Isto significa que, no futuro, em 95% das combinações possíveis de séries estocásticas, a

capacidade do reservatório para atender à demanda hídrica do setor energético, com 1% de falhas, é de 756% da demanda média (Figura 4.57).

Considerando as mesmas demandas energéticas, porém utilizando as séries estocásticas de vazão referentes ao período de base (1961-1990), a capacidade média do reservatório fictício para atender à demanda de referência de 210 Hm³ seria pouco menor, de 844 Hm³ (402% da demanda média). Levando em conta o limite superior do intervalo de confiança de 90%, neste cenário, a capacidade máxima teria que ser de 1.535,1 Hm³. Isto significa que, caso as vazões no futuro apresentem características semelhantes às observadas no período de base (sem efeito de mudanças climáticas) e a demanda hídrica para o setor energético seja a mesma que a atual, em 95% das combinações possíveis de séries estocásticas, a capacidade do reservatório para atender à demanda, com 1% de falhas, é de 731% da demanda de referência (Figura 4.57).

Já no caso de atendimento integral das demandas para o setor energético (Figura 4.58), os valores referentes à capacidade do reservatório aumentam em virtude do critério mais restritivo, porém não alteram o padrão observado para os outros dois percentuais de atendimento. Ao utilizar as projeções provenientes de um cenário de mudança climática, a capacidade média do reservatório seria de 1.297,2 Hm³ para atender à demanda de referência de 210 Hm³ (618% da demanda). Tendo em vista o limite superior do intervalo de confiança de 90%, a capacidade máxima teria que ser de 2.231,2 Hm³. Isto significa que, no futuro, em 95% das combinações possíveis de séries estocásticas, a capacidade do reservatório para atender à demanda hídrica do setor energético, sem falhas no atendimento durante 30 anos, seria equivalente a 1.062% da demanda média (Figura 4.58).

Considerando as mesmas demandas energéticas, porém utilizando as séries estocásticas de vazão referentes ao período de base (1961-1990), a capacidade média do reservatório fictício para atender à demanda de referência de 210 Hm³ seria um pouco menor, de 1.281,5 Hm³ (610% da demanda). Levando em conta o limite superior do intervalo de confiança de 90%, neste cenário, a capacidade máxima teria que ser de 2.164,5 Hm³. Isto significa que, caso as vazões no futuro apresentem características semelhantes às observadas no período de base e a demanda hídrica para o setor energético seja a mesma que a atual, em 95% das combinações possíveis de séries estocásticas, a capacidade do reservatório para atender à demanda, sem falhas, é de 1.031% da demanda de referência (Figura 4.58).

Esses resultados reforçam que há uma baixa influência das mudanças climáticas provenientes do modelo Eta para o atendimento à demanda hídrica do setor energético na bacia do rio Ijuí, entre 2011 e 2040, mantida a necessidade atual de água para geração de

energia. Assim, pode-se afirmar que, caso se confirme o cenário de mudança climática projetado pelo modelo Eta, não deverá haver desabastecimento para atender às demandas do setor energético, principalmente em virtude do aumento da disponibilidade de água na maior parte do ano.

Inclusive, deve-se ressaltar que, caso a demanda hídrica para o setor energético aumente (superando o nível atual de 210 Hm³), existe uma clara tendência de superdimensionamento dos reservatórios ao considerar as séries estocásticas de vazão do período de base (1961-1990). Isso pode ser observado nos três conjuntos de curvas de regularização (Figuras 4.56, 4.57 e 4.58).

Para exemplificar esta afirmação basta analisar os cenários com atendimento em 95% dos meses (Figura 4.56). De acordo com os resultados apresentados, ao utilizar as projeções provenientes de um cenário de mudança climática, a capacidade média do reservatório para atender a uma demanda mensal de 250 Hm³ teria que ser de 538,2 Hm³ (215% da demanda). Ainda, considerando o limite superior do intervalo de confiança de 90%, a capacidade máxima teria que ser de 958,9 Hm³ (384%). Por outro lado, utilizando as séries estocásticas de vazão referentes ao período de base (1961-1990), a capacidade média do reservatório fictício para atender à mesma demanda de referência seria de 677,7 Hm³ (271% da demanda). Levando em conta o limite superior do intervalo de confiança de 90%, a capacidade máxima teria que ser de 1.208,5 Hm³ (483%).

Tais resultados atestam, portanto, que em caso de confirmação do cenário de mudança climática utilizado, deverá ocorrer três fenômenos distintos no período entre 2011 e 2040, na bacia do rio Ijuí:

i) haverá a necessidade de reservatórios com maior capacidade, para atender à demanda hídrica futura para usos consuntivos, em virtude do agravamento das estiagens no início do verão, justamente na época do ano com maior consumo de água para a agricultura irrigada;

ii) mantida a demanda hídrica atual para geração de energia, não foi verificada grande influência das mudanças climáticas para o atendimento à demanda hídrica do setor energético;

iii) caso aumente a demanda hídrica para geração de energia, existe uma clara tendência de que venha a ocorrer superdimensionamento dos reservatórios a serem projetados, ao ignorar as mudanças climáticas na geração de séries estocásticas de vazão.

5. CONCLUSÕES

Considerando o conjunto dos resultados e das discussões apresentadas neste trabalho, conclui-se que a metodologia proposta para investigar os possíveis efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica e as alterações da demanda hídrica no futuro apresentou resultados consistentes, ampliando a possibilidade de análise dos cenários hidrológicos futuros, principalmente se comparada com outras metodologias mais simplificadas que normalmente utilizam modelos determinísticos ou equações de balanço hídrico para verificar déficits hídricos, relacionando apenas a evaporação e a precipitação.

Na presente Tese, pode-se testar e comprovar a hipótese de pesquisa enunciada no Capítulo 1, de que a disponibilidade e a demanda hídrica na bacia do rio Ijuí seriam afetadas por mudanças climáticas e/ou transformações socioeconômicas. Através da abordagem estocástica para modelagem da vazão mensal e da demanda hídrica foi possível identificar não apenas mudanças no regime hidrológico em termos médios, mas também os intervalos de confiança das estimativas e a respectiva incerteza associada à parcela aleatória dos cenários de vazão e de demanda. Além disso, foram identificadas alterações na forma das curvas de permanência e de regularização, indicando algumas mudanças tanto na distribuição e magnitude de estiagens quanto nas falhas de atendimento às demandas hídricas para usos consuntivos e geração de energia.

Quanto ao **Módulo 1**, relacionado à modelagem hidrológica para transformação dos dados climáticos em vazão, a consistência dos resultados foi demonstrada não apenas pelos indicadores quantitativos de desempenho, mas também pela análise do hidrograma, da curva de permanência e de sensibilidade dos modelos, que proporcionaram uma interpretação do funcionamento das RNAs.

O modelo hidrológico identificado como o mais adequado para a simulação das vazões mensais na bacia do rio Ijuí, considerando os indicadores de eficiência, a parcimônia e a representação dos processos hidrológicos, foi o obtido no final do procedimento de simplificação da RNA, com apenas três variáveis de entrada: o balanço médio de água nos tempos t e $t-1$ (\bar{S}); o filtro da precipitação (fP); o filtro do balanço de água (fS). Neste modelo, o número de pesos sinápticos foi reduzido a apenas 16.

Utilizando este modelo, foi obtido um coeficiente NS igual a 0,904, com RMSE de 37,1 m³/s e erro relativo absoluto de 21,7%, no período de avaliação. Embora este não tenha

sido o melhor desempenho (quantitativo) observado durante todas as tentativas de simulação, esta configuração se mostrou consistente e a mais eficiente, principalmente, por sua simplicidade (fácil interpretação e mais controle por parte do pesquisador) e por representar adequadamente os processos físicos envolvidos entre as variáveis de entrada e a vazão de saída, como foi observado na análise de sensibilidade do modelo. Além disto, o modelo de RNA selecionado apresentou uma razoável capacidade de extrapolação, tendo-se em vista que foram testados valores que excediam os limites utilizados no treinamento da rede.

Já no **Módulo 2**, foram avaliados os cenários provenientes do modelo Eta. A combinação dos membros do modelo Eta CPTEC com os métodos de correção originou 16 cenários climáticos para comparação com os dados observados no período entre 1976 e 1990. A partir da modelagem hidrológica, foram obtidos também 16 cenários de vazão no mesmo período.

Com base na avaliação realizada, conclui-se que apenas o membro Eta HIGH não se mostrou satisfatório na maioria dos aspectos analisados quanto à precipitação, evapotranspiração e vazão. De modo geral, os outros membros se intercalaram em termos de vantagens em relação ao desempenho, de acordo com o critério analisado.

Na avaliação das vazões resultantes, se destacaram os membros LOW, MID e CNTRL, com pequena vantagem ao primeiro. A versão LOW do modelo Eta apresentou os melhores resultados em relação às vazões médias mensais (erro médio de 22,6%), às curvas anuais de permanência das vazões (erro médio de 12,6%) e às curvas trimestrais de permanência das vazões (erro médio de 27,3%). Além disto, pode-se observar um bom ajuste tanto às vazões baixas (permanência superior a 90%) quanto às vazões altas (permanência inferior a 10%).

Em análise individual, considerando todos os aspectos analisados, um dos cenários que se destacou foi o LOW, com aplicação do método de correção *Direct Approach*. Neste cenário climático corrigido, foram obtidos os melhores resultados quanto à permanência de vazões mensais considerando a análise trimestral e também quanto às vazões baixas. Além disso, neste cenário foram obtidos bons ajustes na curva de permanência das vazões mensais considerando a análise anual.

Com base nos resultados obtidos no Módulo 2, conclui-se que as incertezas dos cenários de precipitação do modelo Eta são muito superiores às incertezas referentes aos cenários de evapotranspiração. A imprecisão na estimativa da precipitação gera certo grau de

inconsistência também nas vazões obtidas a partir do processo de modelagem hidrológica, resultando em erros algumas vezes superiores a 20%, pelos nos critérios analisados. Deve-se, portanto, considerar que estas incertezas serão reproduzidas em cenários futuros (para as próximas décadas do século XXI), tendo em vista que a metodologia a ser adotada segue os mesmos princípios da avaliação realizada neste estudo.

No **Módulo 3** foram analisadas as possíveis alterações e incertezas relacionadas à disponibilidade hídrica no futuro, com base no cenário de mudança climática Eta LOW. O modelo estocástico desenvolvido para a geração de séries de vazão mensal preservou diversas características da série original simulada para o período entre 2011 e 2040. Dentre essas, destacam-se a QMLP e as vazões médias mensais, ambas com diferenças de apenas 0,5%. O desvio padrão mensal foi razoavelmente preservado, com diferença absoluta percentual média de 13,9% entre a série original e a tendência central das 1.000 séries geradas. Ficou evidente também a semelhança entre a curva de permanência das vazões mensais da série original e a tendência central observada nas séries estocásticas geradas. A partir de todos estes resultados, pode-se concluir que o modelo estocástico proposto é adequado para a geração de séries de vazão mensal.

Diversos resultados demonstraram uma tendência de aumento nas vazões em um contexto geral. A QMLP, por exemplo, apresentou uma alteração de 141,6 m³/s (1961-1990) para 200,3 m³/s (2011-2040), representando um aumento médio de 41,4%. Na comparação entre os dois períodos, a diferença entre o volume total escoado em 30 anos foi de 53.303 Hm³. Também foi possível observar que a vazão média e o desvio padrão mensal aumentaram entre os meses de janeiro e outubro, no período entre 2011 e 2040. Entre os meses de fevereiro e junho, o percentual de aumento na vazão média mensal superou 100%. Pode-se constatar ainda que, no período de base (1961-1990), o coeficiente de variação (CV) oscilou entre 0,698 (fevereiro) e 0,716 (novembro), enquanto que, no período futuro (2011-2040), este mesmo índice variou entre 0,801 (abril) e 0,848 (maio), indicando um real incremento na variabilidade mensal das vazões, com maiores flutuações das vazões no futuro.

Com base na comparação das curvas de permanência da vazão mensal entre os períodos de base e futuro, conclui-se que a vazão apresentou valores menores (-5,1%) apenas em intervalos de permanência superiores a 90%, nos meses de estiagem. Para vazões com permanência igual ou inferior a Q90 (vazão intermediária e alta), a tendência é de aumento nos valores de vazão. Como exemplo, no período base (1961-1990), em média, a vazão com

permanência igual ou inferior a 50% dos meses (Q50) foi de 108,2 m³/s. Já no período futuro, a Q50 foi bem superior, com valor de 145,1 m³/s (aumento de 34,2%).

Pode-se observar também que as menores alterações quanto à permanência das vazões ocorreram entre os meses de agosto e janeiro. Por outro lado, nos demais meses, as mudanças foram drásticas, com destaque para o mês de maio, em que foi constatada uma diferença média absoluta de 130,5 m³/s entre as curvas de permanência.

De modo geral, com base nos resultados obtidos, conclui-se que entre os meses de janeiro e outubro, há uma tendência de incremento nas vazões de cheia. Entre os meses de fevereiro e junho, também as vazões com elevada permanência (vazões de estiagem) apresentaram valores mais altos no futuro em relação ao período de base. Já nos meses de janeiro, julho, agosto, setembro e outubro, foram observados valores ainda mais baixos de vazão de estiagem, indicando, nestes meses, uma tendência de amplificação dos valores extremos. Por fim, nos meses de novembro e dezembro, a tendência observada é de redução nos valores de vazão de modo generalizado, tanto na parcela das vazões altas quanto na parcela das baixas vazões.

Considerando as séries estocásticas de vazão geradas para o futuro, pode-se afirmar que existe certa tendência de aumento na variabilidade hidrológica no período entre 2011 e 2040. Tal constatação implica em uma maior incerteza quanto à disponibilidade de água no futuro, com a possibilidade de ocorrência de séries temporais com acentuadas diferenças quanto à ocorrência de períodos de estiagem e de cheias.

No **Módulo 4** foram realizadas as projeções de população, criação animal e de áreas irrigadas para geração de séries estocásticas de demanda hídrica entre 2011 e 2040. Nesta etapa do trabalho, foi estimada uma população média de 222.740 habitantes em 2040, representando um crescimento de 7.836 habitantes (3,65%) entre 2011 e 2040. Em 90% dos cenários populacionais projetados para o futuro, a população na bacia hidrográfica do rio Ijuí, em 2040, ficou entre 219.771 e 226.052 habitantes.

Quanto aos rebanhos, no mesmo período, foi observada uma tendência média de crescimento das atividades pecuárias relativas à criação de caprinos (+117,4%), de ovinos (+58,6%), de suínos (+51,1%) e de gado leiteiro (+66,9%). Os demais rebanhos apresentam tendência de redução de efetivo no período futuro: codornas (-67,8%), coelhos (-95,5%), equinos (-53,7%), galinhas (-55,2%) e gado de corte (-9,3%).

Considerando a média das séries geradas, tanto a demanda hídrica para o abastecimento humano quanto para a criação animal deverá crescer no período entre 2011 e 2040. A demanda média para atendimento à população em 2040 foi estimada em 0,356 m³/s (+3,4% em relação a 2011). Já para a criação animal a demanda média estimada foi de 0,175 m³/s, o que representa um aumento de 28,2% entre 2011 e 2040.

Quanto às áreas irrigadas, mantida a tendência e os resíduos modelados entre 2003 e 2010, a média das séries estocásticas geradas para o futuro indica que haverá 1.954 km² de áreas irrigadas em 2040. Este valor representa um aumento de 344% nas áreas irrigadas na bacia. Já quanto às incertezas relacionadas à modelagem, em 90% dos cenários gerados para o futuro a área irrigada ficou entre 1.796 km² e 2.105 km² no ano de 2040.

O expressivo aumento nas áreas irrigadas deverá influenciar no crescimento da demanda hídrica para o setor agrícola. Em 2011, por exemplo, considerando-se a média das séries estocásticas geradas, a demanda oscilou entre 6,3 m³/s (janeiro) e 0,23 m³/s (maio). Já em 2040, a demanda ficou entre 28 m³/s (janeiro) e 1,04 m³/s (maio).

Conclui-se, portanto, que a tendência de crescimento das atividades agrícolas irrigadas no período analisado é bem superior à tendência observada em relação à criação animal e ao abastecimento humano. Além disso, o volume demandado para as atividades agrícolas, considerando o mês de maior consumo de água (janeiro), é o mais representativo dos usos consuntivos da água.

No início do período analisado, em 2011, a demanda hídrica média anual para usos consuntivos foi de 3,27 m³/s, variando de 0,72 m³/s em maio para 6,79 m³/s em janeiro. Já no final do período, no ano de 2040, a demanda hídrica média anual foi de 12,91 m³/s, com valores mensais entre 1,57 m³/s (maio) e 28,53 m³/s (janeiro). Isto representa, em termos gerais, um aumento de 295% na demanda hídrica para usos consuntivos entre 2011 e 2040.

Quanto ao intervalo de confiança das demandas, considerando-se um nível de significância de 0,1, a vazão necessária para atender aos usos consuntivos no mês mais crítico das séries geradas (janeiro de 2040), ficará entre 26,28 m³/s e 30,71 m³/s. A amplitude deste intervalo representa 15,5% do valor médio obtido através das 1.000 séries, sendo este um grau de incerteza razoável para a estimativa da demanda hídrica no futuro.

No **Módulo 5** foi realizada a análise da relação entre a disponibilidade e a demanda hídrica, através da combinação das séries estocásticas geradas nos módulos anteriores. Ao calcular a razão entre a demanda para usos consuntivos e a disponibilidade hídrica

(demanda/disponibilidade), no período entre 2011 e 2040, foi observada uma tendência de aumento neste percentual ao longo dos anos. Em média, a relação demanda/disponibilidade em 2011 foi de apenas 6,06%, variando entre 0,81% (maio) e 20,15% (dezembro). Já em 2040 esta proporção aumentou para 13,82%, variando entre 1,09% (maio) e 43,3% (dezembro).

Ficou evidente que a relação demanda/disponibilidade aumenta significativamente no período do verão, principalmente entre os meses de novembro e março, quando ocorre a irrigação da soja e de outros cultivos de verão. Além disso, pode-se perceber que a tendência de crescimento nos percentuais durante o período entre 2011 e 2040 é mais marcante nos meses de verão.

O mês de dezembro foi o que apresentou os maiores valores no que diz respeito à razão demanda/disponibilidade, com percentual médio de 34,16%, variando entre 20,15% e 45,66% entre 2011 e 2040. Com base neste resultado, conclui-se que o mês de dezembro é o que deverá apresentar o maior risco de desabastecimento no futuro, se confirmado o cenário simulado de mudança climática.

No entanto, é importante destacar que nos meses de abril a outubro, em geral, o risco de desabastecimento de água é baixo na bacia do rio Ijuí, quando o percentual médio da razão entre a demanda e a disponibilidade de água é inferior a 6%.

Por último, quanto às mudanças nas curvas de regularização obtidas através da simulação do balanço hídrico em um reservatório fictício, os resultados atestam que, em caso de confirmação do cenário de mudança climática utilizado, haverá a necessidade de reservatórios com capacidade cada vez maior para atender à demanda para usos consuntivos, em virtude do agravamento das estiagens no início do verão, justamente na época do ano com maior consumo de água para a agricultura irrigada. Por outro lado, considerando o setor energético, caso aumente a demanda hídrica para geração de energia hidrelétrica, existe uma clara tendência de superdimensionamento dos reservatórios ao ignorar as mudanças climáticas projetadas na geração de séries estocásticas de vazão.

6. REFERÊNCIAS

- Abbott, M. B.; Bathurst, J. C.; O'Connell, J. A.; Rasmussen, J. 1986. An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen. SHE, 2 Structures of a physically-based distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, 87, p. 61-77.
- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723.
- Alcamo, J.; Döll, P.; Henrichs, T.; Kaspar, F.; Lehner, B.; Rösch, T.; Siebert, S. 2003. Global estimates of water withdrawals and availability under current and future “business-as-usual” conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 48:3, p. 339-348.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, K., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). Rome: FAO. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- Anmala, J., Zhang, B., Govindaraju, R.S. 2000. Comparison of ANNs and empirical approaches for predicting watershed runoff. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Reston: ASCE, v.126, n.3, 156-166.
- Arnell, N. W. 1998. Climate change and water resources in Britain. *Climatic Change* 39, p. 83-110.
- Arnell, N. W. 1999. Climate change and global water resources. *Global Environmental Change*, 9, p. 31-49.
- Arnell, N. W. 2003. Effect of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: a global perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(5), p. 619-641.
- Arnell, N. W. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14, p. 31-52.
- Bailey, N. T. J. 1964. *The Elements of Stochastic Processes*, Wiley, New York.
- Barbosa, P. R. D. J. 1981. Modelagem estocástica de vazões diárias. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro. 212p.
- Bárdossy, A.; Pegram, G. 2011. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. *Water Resources Research*, 47, W04505, doi:10.1029/2010WR009689.
- Barnett, T. P.; Adam, J. C.; Lettenmaier, D. P. 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438:17, p. 303-309.
- Bergström, S.; Carlsson, B.; Gardelin, M.; Lindström, G.; Pettersson, A.; Rummukainen, M. 2001. Climate change impacts on runoff in Sweden – assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modeling. *Climate Research*, 16, p. 101-112.
- Berthelot, R. 1970. Curso de Hidrologia Sintética. Mestrado em Hidrologia Aplicada do IPH-UFRGS.
- Beven, K.; Lamb, R.; Quinn, P.; Romanowicz, R.; Freer, J. 1994. Topmodel. In: *Computer Model of Watershed Hydrology*. V. P. Singh (ed.) Water Resources Publication. Fort Collins.
- Block, P.J., Souza Filho, F.A., Sun, L., Kwon, H. 2009. A streamflow forecasting framework using multiple climate and hydrological models. *Journal of the American Water Resources Association*, 45:4, 828-843.
- Boé, J.; Terray, L.; Habets, F.; Martin, E. 2007. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *Int J Climatol* 27, p. 1643–1655.
- Booij, M. J. 2005. Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. *Journal of Hydrology*, 303, p. 176-198.

- Bowden, G. J.; Dandy, G. C.; Maier, H. R. 2005. Input determination for neural network models in water resources applications. Part I – background and methodology. *Journal of Hydrology*, 301, 75-92.
- Box, G. E. P.; Jenkins, G. 1970. *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, San Francisco, Holden-Day.
- Bruhn, J. A.; Fry, W. E.; Fick, G. W. 1980. Simulation of daily weather data using theoretical probability distributions. *Journal of Applied Meteorology*, v. 19, n. 9, p. 1029-1036.
- Campos, C. G. C. 2011. Padrões climáticos atuais e futuros de temperatura do ar na região sul do Brasil e seus impactos nos cultivos de pêssego e de nectarina em Santa Catarina. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: INPE. 165p.
- Castellvi, F.; Stockle, C. O.; Ibañez, M. 2001. Comparing a locally calibrated versus a generalized temperature generation process. *Transactions of the ASCE*, v. 44, n. 5, p. 1143-1148.
- Castro, N. M. R.; Auzet, A. V.; Chevallier, P.; Leprun, J. C. 1999. Land use change effects on runoff and erosion from plot to catchment scale on the basaltic plateau of Southern Brazil. *Hydrological Processes*, 13 (11), p. 1621-1628.
- Castro, N. M. R.; Chevallier, P.; Goldenfum, J. A. 2000. Projeto Potiribu, atualização 1989-1998 – dados básicos de fluviometria e pluviometria. IPH: UFRGS, *Revista de Recursos Hídricos*, v. 35.
- Castro, N. M. R.; Pinheiro, A.; Fernandes, C. V. S.; Paiva, E. M. C. D.; Merten, G. H.; Minella, J. P. G.; Paiva, J. B. D.; Goldenfum, J. A.; Silva, M. R.; Gastaldini, M. C. C.; Braga, S. M. 2010. Relatório Final das atividades de março de 2007 a maio de 2010. Relatório de pesquisa – IPH, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- CERILUZ, 2014. Geração de energia na Usina RS-155. Disponível em: <<http://www.ceriluz.com.br/index.php/geracao-de-energia/usina-rs-155>>. Acesso em 12 ago. 2014.
- Chou, S. C.; Marengo J. A.; Lyra, A.; Sueiro, G.; Pesquero, J.; Alves, L. M.; Kay, G.; Betts, R.; Chagas, D.; Gomes, J. L. Bustamante, J.; Tavares, P. 2012. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-011-1002-8.
- Chow, V. T. 1964. *Handbook of applied hydrology*. MacGraw-Hill Book Co., New York.
- Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais – CPRM. 2006. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, Escala 1:750.000. Serviço Geológico do Brasil – Superintendência de Porto Alegre.
- Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Defesa do Meio Ambiente - CETESB. 1976. *Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água*. 2ª ed., São Paulo, BNH/ABES/CETESB.
- Coordenadoria Estadual de Defesa Civil do Rio Grande do Sul - CEDEC-RS, 2012. Registros de Estiagens no Rio Grande do Sul (1982-2011). Comunicações. Disponível em: <<http://www.defesacivil.rs.gov.br>>. Acesso em: 14 jun. 2012.
- Coser, M. C. 2011. Modelagem Estocástica de Séries Mensais Apresentando Dependência de Longo Termo para Dimensionamento de Reservatórios de Regularização. (Tese de Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.
- Couto, S. E. R. 2002. Criação e Manejo de Coelho. In: Andrade, A.; Pinto, S. C. e Oliveira, R. S. (org.). *Animais de Laboratório: criação e experimentação* [online]. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 2002. p. 93-103.
- Crawford, M.; Linsley, R. 1966. *Digital Simulation in Hydrology*. Technical Report n. 39, Department of Civil Engineer, Stanford University.
- Crosetti, A. H.; Schmitt, R. C. 1956. A Method of Estimating the Intercensal Population of Counties. *Journal of the American Statistical Association*, v. 51, n. 276, p. 587-590.

- Cruz, G.; Camargo, C.; Monteiro, M.; Braga, H.; Pinto, E. 2009. Levantamento de horas de frio nas diferentes regiões de Santa Catarina. *Revista Agropecuária Catarinense*, Florianópolis, v. 22, n. 1, p. 44-47.
- Da Rocha, R. P.; Morales, C. A.; Cuadra, S. V.; Ambrizzi, T. 2009. Precipitation diurnal cycle and summer climatology Assessment over South America: an evaluation of Regional Climate Model version 3 simulations. *J Geophys Res* 114:D10108. doi: 10.1029/2008JD010212.
- Departamento de Recursos Hídricos - Secretaria Estadual do Meio Ambiente - DRH/SEMA. 2007. *Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul - Relatório Síntese da Fase A - RSA - Diagnóstico e Prognóstico Hídrico das Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul. Junho/2007.*
- Döll, P.; Flörke, M. 2005. Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge. Frankfurt Hydrology Paper 03, Institute of Physical Geography, Frankfurt University, Germany. Disponível em: <http://www.geo.uni-frankfurt.de/ipg/ag/dl/f_publicationen/2005/FHP_03_Doell_Floerke_2005.pdf>. Acesso em 28 mar. 2012.
- Dooge, J. C. I. 1973. *Linear Theory of Hydrologic Systems*. Technical Bulletin, n. 1948, ARS, US Department of Agriculture.
- Dornelles, F.; Goldenfum, J.; Pedrollo, O. 2013. Artificial neural network methods applied to forecasting river levels. *RBE. Revista Brasileira de Engenharia. Caderno de Recursos hídricos*. ISSN: 0102-2652. Vol. 18, nº 4, p. 45-54.
- Embrapa, 2010. *Cultivo do Milho. Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de Produção*. ISSN 1679-012X, Versão Eletrônica – 6ª Ed., set/2010.
- Fitzhugh Jr.; H. A. 1976. Analysis of growth curves and strategies for altering their shape. *Journal of Animal Science*, v. 42, n. 4, p. 1036-1051.
- Freire, F. H. M. A. 2001. *Projeção populacional para pequenas áreas pelo método das componentes demográficas usando estimadores bayesianos espaciais. (Tese de Doutorado) Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional da Faculdade de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG. 129p.*
- Freitas, A. R. 2005. *Curvas de Crescimento na Produção Animal. Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 34, n.3, p. 786-795.
- Freitas, A. R.; Loibel, S. M. C.; Andrade, M. G.; Val, J. B. R. 2005. Modelagem do crescimento populacional do rebanho bovino brasileiro. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 34, n. 6, p. 2225-2232.
- Gabriel, R.; Neumann, J. 1962. A Markov Chain Model for Daily Rainfall Occurrence in Tel Aviv, Israel. *Q. J. R. Met. Soc.* 88, p. 90-95.
- Gangopadhyaya, M.; Uryvaev, V. A.; Omar, M. H.; Nordenson, T. J.; Harbeck, G. E. 1966. *Measurement and estimation of evapotranspiration. Geneva: World Meteorological Organization, WMO, Technical Note, 83.*
- Garcias, C. M.; Sanches, A. M. 2009. Vulnerabilidades socioambientais e as disponibilidades hídricas urbanas: levantamento teórico-conceitual e análise aplicada à região metropolitana de Curitiba - PR. *Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo - PPG Depto. Arquitetura e Urbanismo - USP*. 10 (2), p. 96-111.
- Garreaud, R.; Falvey, M. 2008. The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. *Int J Climatol* 29:543–554. doi:10.1002/joc.1716
- Giorgi, F.; Mearns, L. O. 1991. Approaches to the Simulation of Regional Climate Change: a Review. *Rev. Geophys.* 29, p. 191-216.
- Gleick, P. H. 1996. Basic water requirements for human activities: meeting basic needs. *Water International*, 21, p. 83-92.

- Gondim, R. S.; Castro, M. A. H.; Evangelista, S. R. M.; Teixeira, A. S.; Fuck Júnior, S. C. F. 2008. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, 43:12, p. 1657-1664.
- Gontijo, N. T. 2007. Avaliação das Relações de Frequência entre Precipitações e Enchentes Raras por meio de Séries Sintéticas e Simulação Hidrológica. (Dissertação de Mestrado) Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG. 156p.
- Graham, L. P. 2000. Large-scale hydrological modeling in the Baltic basin. Division of Hydraulic Engineering, Dept of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Report TRITA-AMI PHD 1033, Stockholm.
- Graham, L. P. 2004. Climate change effects on river flow to the Baltic Sea. *Ambio*, v. 33, n. 4-5, p. 235-241.
- Haan, C. T. 1994. *Statistical Methods in Hydrology*. The Iowa State University Press/Ames, 6^a ed., Iowa.
- Haan, C. T.; Allen, D. M.; Street, J. D. 1976. A Markov Chain Model of Daily Rainfall. *Water Resources Research*, v. 12, n. 3, p. 443-449.
- Hanson, C. L.; Cummings, A.; Woolhiser, D. A.; Richardson, C. W. 1994. Microcomputer program for daily weather simulation in the contiguous United States. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, DC.
- Hecht-Nielsen, R. 1987. Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. *Proceedings of the First IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, San Diego, California, pp. 11-14, IEEE, New York.
- Hecht-Nielsen, R. 1990. *Neurocomputation*. Reading, MA: Addison-Wesley, p. 433.
- Helfer, F. 2006. Demandas e disponibilidades hídricas da bacia hidrográfica do rio Pardo (RS) nos cenários atual e futuro para diferentes sistemas de produção de arroz irrigado. (Dissertação de Mestrado) Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS. 236p.
- Horikoshi, A. S.; Fisch, G. 2007. Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no Município de Taubaté, SP, Brasil. *Revista Ambiente e Água*, 2:2, p. 33-46.
- Hornik, K.; Stinchcombe, M.; White, H. 1989. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural networks*, v. 2, n. 5, p. 359-366.
- Hsu, K.L., Gupta, H.V., Sorooshian, S. 1995. Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water Resources Research*, 31:10, 2517-2530.
- Hulme, M.; Sheard, N. 1999. Cenários de alterações climáticas para o Brasil. Norwich: Climate Research Unit., 6p. Disponível em: <www.cru.uea.ac.uk/~mikeh/research/brazil.pdf>. Acesso em 13 jul. 2011.
- Ines, A. V. M.; Hansen, J. W. 2006. Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138, 44-53.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 1986. Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro: IBGE.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2002. Mapa Exploratório de Solos do Estado do Rio Grande do Sul. Diretoria de Geociências – DGC. Rio de Janeiro: IBGE.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2003. Vegetação, Escala 1:250.000. Folhas SH.21-X-B Santo Ângelo e SH.22-V-A Cruz Alta. Diretoria de Geociências – DGC. Rio de Janeiro: IBGE.

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2008. Projeção da População do Brasil por Sexo e Idade: 1980-2050, Revisão 2008. Estudo & Pesquisas: Informação demográfica e socioeconômica, Rio de Janeiro: IBGE, 93p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2010. Censo Demográfico de 2010. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em 14 ago. 2014.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2014. Projeções e estimativas da população do Brasil e das Unidades da Federação. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em 15 ago. 2014.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. 2000. Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. 2001. Climate change: the scientific basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK. Disponível em: <http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/>. Acesso em 26 mar. 2012.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. 2007. Summary for policymakers: contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. This Summary for Policymakers was formally approved at the 10th Session of Working Group I of the IPCC, Paris, February, 996p.
- Intergovernmental Panel On Climate Change - IPCC. 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the IPCC, Stockholm, September, 2216p.
- Jain, A.; Kumar, A. M. 2007. Hybrid neural network models for hydrologic time series forecasting. *Applied Soft Computing*, n.7, p. 585-592.
- Jain, A.; Kumar, S. 2009. Dissection of trained neural network hydrologic models for knowledge extraction. In: *Water Resources Research*, vol. 45; 1-17.
- Jain, A.; Sudheer, K. P.; Srinivasulu, S. 2004. Identification of physical processes inherent in artificial neural network rainfall runoff models. *Hydrological Processes*, n. 18, pp. 571-581.
- Kaczmarek, Z.; Napiórkowski, J.; Strzepek, K. M. 1996. Climate change impacts on the water supply system in the Warta River Catchment, Poland. *International Journal of Water Resources*. 12, p. 165-180.
- Kleinn, J.; Frei, C.; Gurtz, J.; Lüthi, D.; Vidale, P. L.; Schär, C. 2005. Hydrologic simulations in the Rhine basin driven by a regional climate model. *Journal of Geophysical Research*, 110, D04102, p. 1-18.
- Kwon, H., Souza Filho, F.A., Block, P.J., Sun, L., Lall, U., Reis Jr, D.S. 2012. Uncertainty assessment of hydrologic and climate forecast models in Northeastern Brazil. *Hydrological Processes*, 26, 3875-3885.
- Leahy, P., Kiely, G., Corcoran, G. 2008. Structural optimisation and input selection of an artificial neural network for river level prediction. *Journal of Hydrology*, v. 355, 192-201.
- Leander, R.; Buishand, T. A. 2007. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology* 332, 487-496.
- Lek, S., Delacoste, M., Baran, P., Dimopoulos, I., Lauga, J., Aulagnier, S. 1996. Application of neural networks to modelling nonlinear relationships in ecology. *Ecological Modelling* 90, 39-52.
- Lenderink, G.; Buishand, A.; Van Deursen, W. 2007. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrol. Earth System Science*, 11(3), p. 1145-1159.
- Lettenmaier, D. P.; Wood, A. W.; Palmer, R. N.; Wood, E. F.; Stakhiv, E. Z. 1999. Water resources implications of global warming: A. U. S. regional perspective. *Climatic Change* 43, p. 537-579.

- Lima, A. A.; Naghettini, M. 2005. Modelo estocástico para geração de precipitação diária baseado em cadeia de Markov de primeira ordem. Anais Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa/PB, p. 1-20.
- Loibel, S. M. C. 2004. Inferência e indicadores de viabilidade para modelos estocásticos de crescimento de populações. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 114p.
- Lopes, J.E., Braga, B.F.F., Conejo, J.L. 1982. A Simplified Hydrologic Model in Applied Modeling in Catchment Hydrology. Water Resources Publication.
- Machado, L. N. 2009. Estimativa dos impactos gerados pelas mudanças no Estado de Santa Catarina. TCC (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Florianópolis, 63p.
- Madeira, J. L.; Simões, C. S. 1972. Estimativas preliminares da população urbana e rural segundo as Unidades de Federação, de 1960/1980 por uma nova metodologia. Revista Brasileira de Estatística, v. 33, n. 129, p. 3-11.
- Marengo, J. A. 2007. Boletim do projeto: uso de cenários de mudanças climáticas regionais em estudo de vulnerabilidade e adaptação no Brasil e na América do Sul (GOF-UK-CPTEC). News Letter, Ano 2, Abril, 2007. Disponível em: <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/newsletters/Newsletter_No4_Port.pdf>. Acesso em 21 jan. 2011.
- Marengo, J. A.; Ambrizzi, T.; Rocha, R. P.; Alves, L. M.; Cuadra, S. V.; Valverde, M. C.; Torres, R. R. Santos, D. C.; Ferraz, S. E. T. 2009a. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. Climate Dynamics, v. 35, n. 6, p. 1073-1097.
- Marengo, J. A.; Chou, S. C.; Kay, G.; Alves, L.; Pesquero, J. F.; Soares, W. R.; Santos, D. C.; Lyra, A. A.; Sueiro, G.; Betts, R.; Chagas, D. J.; Gomes, J. L.; Bustamante, J. F.; Tavares, P. 2012. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTec/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. Clim Dyn 38:1829–1848. doi:10.1007/s00382-011-1155-5.
- Marengo, J. A.; Jones, R.; Alves, L. M.; Valverde, M. C. 2009b. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. International Journal Climatology. Published online in Wiley InterScience. doi:10.1002/joc.1863. Disponível em: <<http://www.interscience.wiley.com>>. Acesso em 27 mar. 2012.
- Marengo, J. A.; Valverde, M. C. 2007. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudança de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. Revista Multiciência, Ed. 8, p. 5-28.
- Matos, J. C. C. T. 2007. Proposição de método para definição de cotas per capita mínimas de água para consumo humano. (Dissertação de Mestrado) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília: UnB. 108p.
- Matos, A. B. 2012. Efeito do controle de montante na previsão hidrológica de curto prazo com redes neurais: aplicação à bacia do Ijuí. (Dissertação de Mestrado) Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Maurer, E. P.; Hidalgo, H. G. 2008. Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods. Hydrology and Earth System Sciences, 12, 551.
- McCulloch, W.; Pitts, W. 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 5, pp. 115-133.

- Mearns, L. O.; Rosenzweig, C.; Goldberg, R. 1996. The effect of Changes in Daily and Interannual Climatic Variability on CERES-Wheat Yields: A Sensitivity Study. *Climatic Change*, 32, p. 257-292.
- Mello, E. L.; Oliveira, F. A.; Pruski, F. F.; Figueiredo, J. C. 2008. Efeito das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Paracatu. *Revista Eng. Agríc.*, Jaboticabal, 28:4, p. 635-644.
- Menéndez, C.; De Castro, M.; Boulanger, J. P.; D'onofrio, A.; Sanchez, E.; Sörensson, A. A.; Blazquez, J.; Elizalde, A.; Jacob, D.; Le Treut, H.; Zx Li; Nuñez, M. N.; Pessacg, N.; Pfeiffer, S.; Rojas, M.; Rolla, A.; Samuelsson, P.; Solman, S. A.; Teichmann, C. 2010. Downscaling extreme month-long anomalies in southern South America. *Clim Change* 98:379-403. doi:10.1007/s10584-009-9739-3.
- Menzel, L.; Bürger, G. 2002. Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany). *Journal of Hydrology*, 267, p. 53-64.
- Middelkoop, H.; Daamen, K.; Gellens, D.; Grabs, W.; Kwadijk, J. C. J.; Lang, H.; Parmet, B. W. A. H.; Schädler, B.; Schulla, J.; Wilke, K. 2001. Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine Basin. *Climatic Change*, 49, p. 105-128.
- Milly, P. C. D.; Dunne, K. A.; Vecchia, A. V. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438:17, p. 347-350.
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.*, XIX, p. 205-234.
- Mu, J.; Khan, S. 2007. Stochastic analysis of water supply and demand at the River Basin Level. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc. (MSSANZ). Proceedings MODSIM07. Disponível em: <http://www.mssanz.org.au/MODSIM07/papers/3_s59/StochasticAnalysisOfWate_s59_Mu_J_.pdf>. Acesso em 29 mar. 2012.
- Naghetini, M.; Pinto, E. J. A. 2007. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM. 561 p.
- Nicks, A. D.; Harp, J. F. 1980. Stochastic Generation of Temperature and Solar Radiation Data. *Journal of Hydrology*, 48, 1-2, p. 1-17.
- Nicks, A. D.; Lane, L. J.; Gander, G. A. 1995. Weather Generator - Weather Generator: USDA - Water erosion prediction USDA-ARS. National Soil Erosion Research Laboratory.
- Nijssen, B.; O'Donnell, G. M.; Hamlet, A. F.; Lettenmaier, D. P. 2001. Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change. *Climatic Change*, 50, p. 143-175.
- Nobre, C. A. 2001. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do País. *Parcerias Estratégicas*, Brasília, n. 12, p. 238-258.
- Nobre, C.; Sampaio, G.; Salazar, L. F. 2007. Mudanças climáticas e Amazônia. *Ciência e Cultura*, v. 59, p. 22-27.
- Nobre, C.; Sampaio, G.; Salazar, L. F. 2008. Cenários de Mudança Climática para a América do Sul para o final do século 21. *Parcerias Estratégicas*, v. 13, n. 27, p. 19-42.
- Nohara, D.; Kitoh, A.; Hosaka, M.; Oki, T. 2006. Impact of climate change on river discharge projected by multimodel ensemble. *Journal of Hydrometeorology*, 7, p. 1076-1089.
- Nuñez, M. N.; Solman, S. A.; Cabré, M. F. 2008. Regional Climate change experiments over southern South America. II: climate change scenarios in the late twenty-first century. *Clim Dyn.* doi:10.1007/s00382-08-0449-8.
- Oliveira, P. A. V. 2009. Uso Racional da Água na Suinocultura. In: Miranda, C. R.; Bonêz, G. (Org.) Dia de Campo: suinocultura e meio ambiente: termo de ajustamento de condutas da suinocultura. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2009.
- Oliveira, G. G., Pedrollo, O. C., Castro, N. M. R. 2011. Metodologia de análise de sensibilidade e exclusão de variáveis de entrada em simulação hidrológica por Redes Neurais Artificiais (RNAs): resultados preliminares. In: Anais XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió.

- Oliveira, G. G., Pedrollo, O. C., Castro, N. M. R. 2013. Simulações hidrológicas com diferentes proporções de área controlada na bacia hidrográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol. 18, n.3, p. 193-204.
- Oliveira, G. G., Pedrollo, O. C., Castro, N. M. R. 2014. Simplifying Artificial Neural Network models of river basin behaviour by an automated procedure for input variable selection. Artigo aceito para publicação na *Engineering Applications of Artificial Intelligence*.
- Oliveira, V. P. S. 2003. Modelo para a Geração de Séries Sintéticas de Precipitação. (Tese de Doutorado) Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: UFV. 156p.
- Paiva, E. M. C. D. 1996. Regime de Precipitação na Amazônia e sua Relação com o Desmatamento e Temperatura da Superfície do Mar. (Tese de Doutorado) Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS. Porto Alegre: UFRGS. 298p.
- Panofsky, H. A.; Brier, G. W. 1968. *Some Applications of Statistics to Meteorology*, The Pennsylvania State University, University Park, 224 pp.
- Pedrollo, O. C.; Pedrollo M. 2013. Sistema de alerta de cheias da bacia do rio Caí: previsão de níveis com redes neurais artificiais. In: Guasselli, L. A.; Oliveira, G. G.; Alves, R. C. M. (Org.) *Eventos extremos no Rio Grande do Sul: inundações e movimentos de massa*. Porto Alegre: Evangraf, 2013. P. 101-120.
- Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, A193, p. 120-145.
- Penman, H. L. 1956. Evaporation: an introductory survey. *Netherland Journal of Agriculture Science*, Wageningen, v. 4, p. 9-29.
- Pereira, N. M.; Pereira, S. Y.; Cavalcanti, R. N.; Genovez, A. M.; Paula, G. 2004. Disponibilidade hídrica da bacia do rio Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil. *HOLOS Environment*, 4:2, p. 97-113.
- Perotto, D.; Cue, R. I.; Lee, A. J. 1992. Comparison of nonlinear functions for describing the growth curve of three genotypes of dairy cattle. *Canadian Journal of Animal Science*, v. 72, n. 3, p. 773-782.
- Pesquero, J. F. 2009. Balanço de umidade na região do sistema de monção da América do Sul em cenários climáticos futuros (2071-2100) utilizando o modelo Eta: um estudo de modelagem. Tese de Doutorado. São José dos Campos. INPE, 2009. 204 p. (INPE-16602-TDI/1588).
- Piani, C.; Weedon, G. P.; Best, M.; Gomes, S. M.; Viterbo, P.; Hagemann, S.; Haerter, J. O. 2010. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.10.024.
- Qian, J. H.; Seth, A.; Zebiak, S. 2003. Reinitialized versus Continuous Simulations for Regional Climate Downscaling. *Monthly Weather Review*, 131, p. 2857-2874.
- Racsko, P.; Szeidl, L.; Semenov, M. 1991. A Serial Approach to Local Stochastic Weather Models. *Ecological Modelling*, 57, p. 27-41.
- Rajurkar, M.P., Kothiyari, U.C., Chaube, U.C. 2004. Modeling of daily rainfall-runoff relationship with artificial neural network. *Journal of Hydrology*, London: Elsevier, v.285, n.1-4, 96-113.
- Richards, F. J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal Exp. Bot.* 10, p. 290-300.
- Richardson, C. W. 1981. Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature and Solar Radiation. *Water Resources Research*, 17, p. 182-190.
- Richardson, C. W.; Wright, D. A. 1984. WGEN: A model for generating daily weather variables. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8, USDA, Washington, DC.
- Richter, G. M.; Semenov, M. A. 2005. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. *Agricultural Systems*, v. 84, p. 77-97.

- Rockwood, D. M. 1958. Columbia Basin Streamflow Routing by Computer. *Journal of the Waterways and Harbors Division*. ASCE v. 84 NWW-5.
- Rosenzweig, C.; Strzepek, K. M.; David, C.; Major, D. C.; Iglesias, A.; Yates, D. N.; McCluskey, A.; Hillel, D. 2004. Water resources for agriculture in a changing climate: international case studies. *Global Environmental Change*, Guildford, v. 14, p. 345-360.
- Rossato, M. S. 2011. Os Climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia. (Tese de Doutorado) Programa de Pós-graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS/PPGEA. 240p.
- Rumelhart, D. E.; Hinton, G. E.; Williams, R. J. 1986. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, vol. 323, p. 533-536.
- Sajikumar, N.; Thandaveswara, B. S. 1999. A non-linear rainfall-runoff model using an artificial neural network. *Journal of Hydrology*, n. 216, p. 32-55.
- Salas, J. D.; Delleur, J. W.; Yevjevich, V.; Lane, W. L. 1980. *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Publications: Littleton, Colorado, U.S.A., p. 484.
- SCS. 1975. *Urban hydrology for small watersheds*. Washington. US Dept. Agr. Technical Release, n. 55.
- Schuster, R. C.; Collischonn, W.; Fan, F. M.; Collischonn, B. 2013. Estimativa de potencial de ocupação por pivôs centrais de irrigação. *Anais... XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. ABRH: Bento Gonçalves, 1-8.
- Sediyama, G. C. 1996. *Evapotranspiração: necessidade de água para os cultivos*. Brasília: ABAES. 167p.
- Sediyama, G. C.; Chancellor, W. J.; Burkhardt, T. H.; Goss, J. R. 1978. Simulação de parâmetros climáticos para a época de crescimento das plantas. *Revista Ceres*, v. 25, n. 141.
- Semenov, M. A.; Barrow, E. M. 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*, 35, p. 397-414.
- Semenov, M. A.; Brooks, R. J.; Barrow, E. M.; Richardson, C. W. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Research* 10, p. 95-107.
- Semenov, M. A.; Porter, J. R. 1995. Climatic Variability and the Modelling of Crop Yields. *Agric. Forest Meteorol.* 73, p. 265-283.
- Shamseldin, A. Y. 1997. Application of a neural network technique to rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, n.199, p. 272-294.
- Sibson, R. 1981. A brief description of natural neighbor interpolation. In: Barnett, V. (Ed.). *Interpreting Multivariate Data*, Wiley, Chichester, p. 21-36.
- Silva Neto, A. R. 2011. Cenários de abastecimento futuro de Palmas-TO com base na simulação da disponibilidade hídrica do Ribeirão Taquarussu Grande. (Dissertação de Mestrado) Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS. 77p.
- Silva, V. S. V. 2011. Estimativa de precipitação pontual em diferentes escalas para uso em modelo concentrado chuva-vazão. (Dissertação de Mestrado) Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Silveira, A. L. L. 2007. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: Tucci, C. E. M. (org.). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4 ed. Porto Alegre, Ed. UFRGS/ABRH, p. 35-51.
- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS. 2012. SNIS - Série Histórica 2010: Água e Esgotos 1995-2010 e Resíduos Sólidos 2002-2010. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, MCIDADES/SNSA/SNIS: Maio/2012.

- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS. 2014. SNIS - Série Histórica 2012: Água e Esgotos 1995-2012. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, MCIDADES/SNSA/SNIS: Maio/2014.
- Soares, W. R.; Marengo J. A. 2008. Assessments of moisture fluxes east of the Andes in South America in a global warming scenario. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.1800.
- Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado - SOSBAI. 2005. Arroz Irrigado: Recomendações da pesquisa para o Sul do Brasil. Santa Maria: SOSBAI.
- Solman, S. A.; Nuñez, M. N.; Cabré, M. F. 2008. Regional climate change experiments over southern South America. I: present climate. *Clim Dyn* 30:533–552. doi:10.1007/s00382-007-0304-3.
- Sugai, M. R. V. B. 2003. Outorga de direito de uso de recursos hídricos. In: Freitas, M. (Org.). O estado das águas no Brasil 2001-2002. Brasília: ANA, 2003. 524p.
- Themeßl, M. J.; Gobiet, A.; Heinrich, G. 2012. Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal, *Climatic Change*, 112, 449–468, doi:10.1007/s10584-011-0224-4, 2012. 6189.
- Themeßl, M. J.; Gobiet, A.; Leuprecht, A. 2011. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int J Climatol* 31:1531–1544. doi:10.1002/joc.2168.
- Thomas, H. A.; Fiering, M. B. 1962. Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation. In: Mass, A. et al., eds. Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, p. 459-493.
- Thorntwaite, W. C.; Mather, R. J. 1955. The water balance. New Jersey: Laboratory of climatology. 104p.
- Tsutiya, M. T. 2005. Abastecimento de Água. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2 Ed., São Paulo. 643p.
- Tucci, C. E. M. (org.) 2007. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4 ed. Porto Alegre, Ed. UFRGS/ABRH, 943p.
- Tucci, C. E. M. 1998. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: Ed. Universidade, UFRGS, ABRH. 640p.
- Tucci, C. E. M.; Beltrame, L. F. S. 2007. Evaporação e Evapotranspiração. In: Tucci, C. E. M. (org.). Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4 ed. Porto Alegre, Ed. UFRGS/ABRH, p. 253-287.
- Tucci, C. E. M.; Ordonez, J. S.; Simões, M. L. 1981. Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II: Alguns Resultados. Anais IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, Fortaleza.
- Valverde, M. C.; Marengo, J. A. 2010. Mudanças na circulação atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros de clima projetados pelos modelos globais do IPCC AR4. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v. 25, n. 1, p. 125-145.
- Van Vuuren, D. P.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Thomson, A.; Hibbard, K.; Hurtt, G. C.; Kram, T.; Krey, V.; Lamarque, J. F.; Masui, T.; Mainshausen, M.; Nakicenovic, N.; Smith, S. J.; Rose, S. K. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, Vol. 109, p. 5-31.
- Vera, C.; Silvestri, G.; Liebmann, B.; González, P. 2006. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophysical Research Letters*, v. 33, L13707.
- Viana, T. V. A.; Araújo, W. F.; Andrade Júnior, A. S.; Azevedo, B. M.; Crisóstomo Júnior, R. R. 2000. Análise estocástica da ocorrência de períodos secos e chuvosos para o município Cedro-Ceará. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11., Resumo, 2000, 8p.
- Vogl, T.P.; Mangis, J.K.; Zigler, A.K.; Zink, W.T.; Alkon, D.L. 1988. Accelerating the convergence of the backpropagation method. *Bio. Cybern.*, vol. 59, pp. 256-264, Sept. 1988.

- Vörösmarty, C. J.; Green, P.; Salisbury, J.; Lammers, R. B. 2000. Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science* 289, p. 284-288.
- Widrow, B.; Hoff, M. E. 1960. Adaptive switching circuits. In: 1960 IRE WESCON Convention Record, New York: IRE Part 4, p. 96-104.
- Wilks, D. S. 1992. Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Climatic Change*, 22, p. 67-84.
- Wilks, D. S. 1999. Simultaneous stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation at multiple sites in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96, p. 85-101.
- Wood, A. W.; Leung, L. R.; Sridhar, V.; Lettenmaier, D. P. 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscale climate model outputs. *Clim Chang* 62:189–216.
- Yevjevich, V. M. 1963. Fluctuations of wet and dry years. Part 1. Research data assembly and mathematical models. Hydrology Paper 1, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Zhang, X. C.; Liu, W. Z. 2005. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 131, n. 3-4, p. 127-142.
- Zorita, E.; Von Storch, H. 1999. The analog method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *Journal of Climate*, v. 12, p. 2474-2489.