

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em
Manejo e Conservação do Solo e da Água



Tese

Modelagem do impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo

Tamara Leitzke Caldeira

Pelotas, 2019

Tamara Leitzke Caldeira

Modelagem do impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Luís Carlos Timm
Co-orientador: Prof. Dr. André Becker Nunes

Pelotas, 2019

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

C146m Caldeira, Tamara Leitzke

Modelagem do impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo / Tamara Leitzke Caldeira ; Luís Carlos Timm, orientador ; André Becker Nunes, coorientador. — Pelotas, 2019.

240 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Rio Piratini. 2. Arroio Pelotas. 3. Arroio fragata. 4. Disponibilidade hídrica. 5. Gestão de recursos hídricos. I. Timm, Luís Carlos, orient. II. Nunes, André Becker, coorient. III. Título.

CDD : 551.48

Elaborada por Gabriela Machado Lopes CRB: 10/1842

Tamara Leitzke Caldeira

Modelagem do impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias
da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutora em
Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da
Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 21/03/2019.

Banca Examinadora:

.....

Prof. Dr. Luís Carlos Timm (Orientador)

Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da
Universidade de São Paulo.

.....

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola

Doutor em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de
Lavras.

.....

Prof^a. Dr^a. Tirzah Moreira Siqueira

Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal
do Rio Grande do Sul.

.....

Prof^a. Dr^a. Maria Cândida Moitinho Nunes

Doutora em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A minha filha

Marina

Aos meus pais

Simone Leitzke & Mario Luis Caldeira

Aos meus avós

Maria Rosa & Anibal Caldeira

Adelaide Leitzke (*in memoria*)

DEDICO.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Dr. Luis Carlos Timm, por sua competência técnico-científica e pela orientação, meu respeito e admiração.

Ao Professor Dr. André Becker Nunes, pela co-orientação desta Tese, meu respeito e admiração.

Ao Professor Dr. Samuel Beskow, um grande pesquisador, por ter despertado em mim o interesse pela área de hidrologia nos primeiros anos da graduação e, por hoje, compartilhar seus dias comigo, minha admiração e meu amor.

Aos Professores Dr. Carlos Rogério de Mello e Dr. Marcelo Ribeiro Viola, por serem grandes entusiastas da engenharia hidrológica, meu respeito e admiração.

A Professora Dra. Tirzah Moreira Siqueira e a Professora Dra. Maria Cândida Moitinho Nunes que, na qualidade de integrantes da banca examinadora, contribuíram muito para com este estudo, meu respeito e admiração.

A minha família, em especial a minha filha Marina, por ter sido um divisor de águas na minha vida, aos meus pais Mario Luis e Simone, pela educação que me proporcionaram, e aos meus avós Anibal e Maria Rosa, pelo apoio e incentivo de sempre, minha gratidão e meu amor.

Aos colegas do Laboratório de Hidrologia e Modelagem Hidrológica, em especial às minhas companheiras incansáveis nesta caminhada, Marcelle, Maíra e Zandra, minha gratidão por terem tornado os dias mais floridos.

Aos colegas da turma de 2016 do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Alexssandra, Héric, Jaqueline, Luis, Marlon, Miguel, Mussa, Sibebe, Stefan, Thais e Yasmim, pela amizade e solidariedade, meu carinho e admiração pelos profissionais e seres humanos que são.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, por terem contribuído para o meu crescimento profissional e pessoal, muito obrigada.

Aos colegas professores do Curso de Engenharia Civil e do Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas, em especial as Professoras Dra. Ângela Azevedo de Azevedo, Dra. Aline Ribeiro Paliga, Dra. Isabela Fernandes Andrade e Dra. Aline Tabarelli, pelo incentivo à conclusão desta Tese, muito obrigada.

As turmas do Curso de Engenharia Civil ingressantes em 2015/1 e 2016/1, meus primeiros alunos nesta recente jornada como professora do Magistério

Superior, pelas palavras de carinho e incentivo à conclusão desta Tese, muito obrigada.

A Universidade Federal de Pelotas, mais especificamente ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, por ter proporcionado minha formação acadêmica ao nível de Doutorado.

Ao Laboratório de Agrometeorologia da EMBRAPA Clima Temperado, em especial ao Pesquisador Dr. Carlos Reisser Júnior, pela cedência de dados meteorológicos essenciais ao estudo.

Ao Laboratório de Planejamento Ambiental da EMBRAPA Clima Temperado, em especial ao Pesquisador Dr. José Maria Filippini Alba e ao MSc. Henrique Noguez da Cunha, pela cedência do mapa de solos.

Ao INPE, em especial ao Diego José Chagas, pela gentileza de, por várias vezes, me encaminhar dados das projeções climáticas.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsa de pesquisa durante os dois primeiros anos do doutoramento.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, pelo aporte financeiro ao projeto de pesquisa coordenado pelo Prof. Dr. Samuel Beskow, contemplado junto ao Edital do Programa de Apoio à Núcleos Emergentes de 2014.

A Deus, por me permitir agradecê-los neste momento.

*“Que nada nos limite, que nada nos defina, que
nada nos sujeite. Que a liberdade seja nossa própria
substância, já que viver é ser livre.”
(Simone de Behaviour)*

Resumo

CALDEIRA, Tamara Leitzke. **Modelagem do impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo**. 2019. 240f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

Este estudo teve como objetivo avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de três sub-bacias da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo, uma bacia hidrográfica situada no bioma Pampa e considerada uma área com relevante interesse ambiental, social e econômico. Inicialmente, o modelo hidrológico Lavras Simulation of Hydrology (LASH) foi calibrado e validado para cada sub-bacia ao passo de tempo diário, considerando dados hidrometeorológicos observados, informações de relevo, solo e uso do solo. Em seguida, o modelo hidrológico LASH foi forçado com dados meteorológicos diários do clima presente modelado (1961 a 2005) e de projeções futuras (2006 a 2099) fundamentadas nos Caminhos Representativos de Concentração (RCP's) 4.5 e 8.5, de quatro modelos climáticos globais regionalizados pelo modelo climático regional ETA, a saber: i) Brazilian Earth System Model versão 2.3.1 (BESM); ii) Canadian Earth System Model segunda geração (CANESM2); iii) Hadley Centre Global Environmental Model versão 2 (HadGEM2-ES); e iv) Model for Interdisciplinary Research on Climate versão 5 (MIROC5). As estatísticas de precisão empregadas para avaliar a calibração e validação do modelo LASH para cada sub-bacia deram indícios de representação satisfatória dos indicadores analisados. Em relação aos impactos das mudanças climáticas, os prognósticos deste estudo indicam que pode haver aumento nas vazões médias mensais, com exceção de julho, agosto e setembro, assim como nas vazões anuais médias, máximas e mínimas, na vazão média de enchente e na produção de água. Os incrementos nas vazões foram mais pronunciados quando os hidrogramas foram estimados pelo modelo LASH forçado pelos modelos climáticos com base no RCP 4.5. Quanto aos períodos futuros, os prognósticos indicam maiores incrementos das vazões médias entre os anos de 2041 e 2070 para os dois RCP's, enquanto que espera-se que as vazões máximas e mínimas tenham maior incremento entre 2071 e 2099 perante o RCP 4.5 e, entre 2041 e 2070, perante o RCP 8.5. Estes resultados são animadores porque indicam aumento da disponibilidade hídrica nas sub-bacias analisadas, as quais são predominantemente agrícolas. No entanto, os incrementos nas vazões médias de enchente são preocupantes, porque evidenciam lâminas consideráveis de escoamento superficial direto e também de alguns problemas derivadas destas, especialmente associados com cheias e com o manejo e conservação do solo e da água.

Palavras-chave: rio Piratini; arroio Pelotas; arroio Fragata; disponibilidade hídrica; gestão de recursos hídricos

Abstract

CALDEIRA, Tamara Leitzke. **Modeling of climate change impacts on hydrology of subwatersheds of the Mirim-São Gonçalo transboundary watershed**. 2019. 240p. Dissertation (Doctor of Sciences) – Graduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Eliseu Maciel Agronomy Faculty, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2019.

This study had as objective to assess the impact of climate changes on hydrology of three subwatersheds of the Mirim-São Gonçalo transboundary watershed which is situated in the Pampa biome and is considered an area of relevant interest for environmental, social and economical issues. The Lavras Simulation of Hydrology (LASH) was calibrated and validated for each subwatershed on a daily basis considering hydrometeorological data, and relief, soil and land-use information. LASH model was then used in conjunction with daily meteorological datasets obtained from four global climate model downscaled by ETA regional climate model based on the Representative Concentration Pathways (RCP's) 4.5 and 8.5 to represent the baseline period (1961 – 2005) and future projections (2006 – 2099), as follows: i) Brazilian Earth System Model version 2.3.1 (BESM); ii) Canadian Earth System Model second generation (CANESM2); iii) Hadley Centre Global Environmental Model version 2 (HadGEM2-ES); and iv) Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5 (MIROC5). The precision statistics used to evaluate the calibration and validation of LASH model for each subwatershed made it possible to infer that the analyzed indicators were satisfactorily represented. Relative to the impact of climate changes, the prognoses of this study indicate that there might be increase in monthly average stream flows (except in July, August and September), annual average stream flows, annual maximum and minimum stream flows, average flood stream flow and water yield. The increases in stream flows were more pronounced when the hydrographs were estimated according to LASH model combined with climate models based on RCP 4.5. With respect to the future projections, the prognoses indicate larger increments of average stream flows between 2041 and 2070 for both RCP's, whereas, maximum and minimum stream flows are expected to have larger increments from 2071 to 2099 for RCP 4.5 and between 2041 and 2070 for RCP 8.5. These results are encouraging because they suggest increase in water availability for the analyzed subwatersheds, which have predominance of agriculture. Nevertheless, the increments in the average flood stream flows are worrisome, as considerable depths of direct surface runoff and some problems derived from them are expected to occur, especially associated with floods and soil and water management and conservation.

Key-words: Piratini river; Pelotas river; Fragata river; water availability; water resources management

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação dos principais componentes do ciclo hidrológico em escala global	33
Figura 2 - Diferentes comportamentos para registros climáticos.....	50
Figura 3 – Localização da porção brasileira da bacia hidrográfica da Lagoa Mirim-São Gonçalo (BHSMG) e das sub-bacias do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).	61
Figura 4 – Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDE-HC) para as bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).....	63
Figura 5 – Declividade do terreno de acordo com a classificação da EMBRAPA (1979) para as bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).....	64
Figura 6 – Sub-bacias hidrográficas e rede de drenagem numérica definidas para as bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).....	66
Figura 7 – Sub-bacias hidrográficas delimitadas a partir da rede de drenagem numérica e do limiar mínimo de 6.000 ha de área de drenagem para a bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO).....	67
Figura 8 - Sub-bacias hidrográficas delimitadas a partir da rede de drenagem numérica e do limiar mínimo de 750 ha de área de drenagem para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).....	67

Figura 9 - Sub-bacias hidrográficas delimitadas a partir da rede de drenagem numérica e do limiar mínimo de 250 ha de área de drenagem para a bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).	68
Figura 10 – Distribuição espacial das classes de solo, até o segundo nível categórico, encontradas nas bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).	72
Figura 11 - Pontos de amostragem de solo definidos por Aquino (2014) (a, c) e Soares (2017) (b), sobre a área de estudo, empregados para determinação das variáveis necessárias à modelagem hidrológica.	74
Figura 12 – Variação espacial do uso e cobertura do solo nas bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).	78
Figura 13 – Pontos de monitoramento das séries históricas hidrometeorológicas empregadas neste estudo.	82
Figura 14 – Ponto central da grade dos modelos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-HADGEM2-ES e ETA-MIROC5 sobre a área de estudo, compreendida pelas bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).	90
Figura 15 - Hidrogramas diários observados e estimados pelo modelo LASH para os períodos de calibração (a) e de validação (b) na seção de controle da bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO).	102
Figura 16 – Hidrogramas diários observados e estimados pelo modelo LASH para os períodos de calibração (a) e de validação (b) na seção de controle da bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).	103

Figura 17 - Hidrogramas diários observados e estimados pelo modelo LASH para os períodos de calibração (a) e de validação (b) na seção de controle da bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).	104
Figura 18 - Vazões médias diárias acumuladas para os períodos de calibração e validação para as bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO) (a), arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) (b) e a bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC) (c). ...	106
Figura 19 - Dados de cota versus vazão obtidos por campanhas de medição realizadas pela CPRM na seção de controle “Pedro Osório” da bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP-PO), na seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP-PCF) e na seção de controle “Passo dos Carros” da bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF-PC), desde a implementação dos postos até o presente momento.	109
Figura 20 - Vazões máximas (a), médias (b) e mínimas (c) diárias observadas na seção de controle “Pedro Osório” da bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP-PO) e estimadas pelo modelo LASH, considerando os períodos de calibração e validação.	113
Figura 21 – Vazões máximas (a), médias (b) e mínimas (c) diárias observadas na seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP-PCF) e estimadas pelo modelo LASH, considerando os períodos de calibração e validação.	114
Figura 22 – Vazões máximas (a), médias (b) e mínimas (c) diárias observadas na seção de controle “Passo dos Carros” da bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF-PC) e estimadas pelo modelo LASH, considerando os períodos de calibração e validação.	115
Figura 23 – Curvas de permanência de vazões médias diárias observadas e estimadas pelo modelo LASH nas seções de controle “Pedro Osório”, da bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP-PO) (a), “Ponte Cordeiro de Farias”, da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP-PCF) (b), e “Passo dos Carros”, da bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF-PC) (c).	118

Figura 24 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-BESM, para o clima presente(1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.....	122
Figura 25 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-CANESM2, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.....	123
Figura 26 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-HADGEM2-ES, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.....	124
Figura 27 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-MIROC5, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.....	125
Figura 28 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-BESM, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.....	130
Figura 29 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-CANESM2, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.....	131
Figura 30 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-HADGEM2-ES, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5...	132
Figura 31 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-MIROC5, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.....	133
Figura 32 - Vazões médias mensais da bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) derivadas de dados diários observados entre 1965 e 2005, vazões médias mensais estimadas, para o mesmo período, pelo modelo LASH forçado pelos modelos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, a média das vazões estimadas (Ensemble Mean) (a) e erro de estimativa da vazão (ΔQ) entre os dados observado e simulado (b).	136
Figura 33 - Vazões médias mensais da bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (Bhaf-PC)	

derivadas de dados diários observados entre 1965 e 2005, vazões médias mensais estimadas, para o mesmo período, pelo modelo LASH forçado pelos modelos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, a média das vazões estimadas (Ensemble Mean) (a) e erro de estimativa da vazão (ΔQ) entre os dados observado e simulado (b).138

Figura 34 – Vazões máximas (a), médias (b) e mínimas (c) anuais observadas, estimadas pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, e a média das vazões estimadas (Ensemble Mean), considerando o período de 1965 a 2005, para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).140

Figura 35 – Vazões máximas (a), médias (b) e mínimas (c) anuais observadas, estimadas pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, e a média das vazões estimadas (Ensemble Mean), considerando o período de 1965 a 2005, para a bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).141

Figura 37 – Vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961 a 2005) (a) e para as projeções futuras de 2006 a 2040, RCP 4.5 (b) e 8.5 (c), 2041 a 2070, RCP 4.5 (d) e 8.5 (e), e 2071 a 2099, RCP 4.5 (f) e 8.5 (g) para a bacia hidrográfica do rio Piratini delimitada à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO).145

Figura 38 - Vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961 a 2005) (a) e para as projeções futuras de 2006 a 2040, RCP 4.5 (b) e 8.5 (c), 2041 a 2070, RCP 4.5 (d) e 8.5 (e), e 2071 a 2099, RCP 4.5 (f) e 8.5 (g) para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).148

Figura 39 - Vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-

CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961 a 2005) (a) e para as projeções futuras de 2006 a 2040, RCP 4.5 (b) e 8.5 (c), 2041 a 2070, RCP 4.5 (d) e 8.5 (e), e 2071 a 2099, RCP 4.5 (f) e 8.5 (g) para a bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).....151

Figura 40 - Vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do rio Piratini delimitada à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO).156

Figura 41 – Vazões médias anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO).157

Figura 42 - Vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).....158

Figura 43 – Vazões médias anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).159

Figura 44 - Vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para

a bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).	160
Figura 45 – Vazões médias anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP’s 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).	161
Figura 46 - Vazões máximas anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2009, considerando os RCP’s 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do rio Piratini delimitada à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO).	167
Figura 47 – Vazões máximas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP’s 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO).	168
Figura 48 - Vazões máximas anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2009, considerando os RCP’s 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).....	169
Figura 49 – Vazões máximas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP’s 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).	170
Figura 50 - Vazões máximas anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005)	

e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle "Passo dos Carros" (BHAF-PC).	171
Figura 51 – Vazões máximas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle "Passo dos Carros" (BHAF-PC).	172
Figura 52 - Vazões mínimas anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do rio Piratini delimitada à montante da seção de controle "Pedro Osório" (BHRP-PO).	177
Figura 53 – Vazões mínimas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle "Pedro Osório" (BHRP-PO).	178
Figura 54 - Vazões mínimas anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle "Ponte Cordeiro de Farias" (BHAP-PCF).....	179
Figura 55 – Vazões mínimas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle "Ponte Cordeiro de Farias" (BHAP-PCF).	180

Figura 56 - Vazões mínimas anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle "Passo dos Carros" (BHAF-C).....181

Figura 57 – Vazões mínimas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle "Passo dos Carros" (BHAF-PC).182

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Estações de monitoramento fluviométrico empregadas para delimitação das bacias hidrográficas do rio Piratini (BHRP) e dos arroios Pelotas (BHAP) e Fragata (BHAF)	60
Tabela 2 – Área da bacia hidrográfica, em percentual, compreendida por cada classe de declividade do terreno, conforme classificação sugerida por EMBRAPA (1979)	65
Tabela 3 - Variáveis associadas ao relevo, determinadas a partir da base de dados espacial, para a Bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO)	69
Tabela 4 - Variáveis associadas ao relevo, determinadas a partir da base de dados espacial, para a Bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF)	70
Tabela 5 – Variáveis associadas ao relevo, determinadas a partir da base de dados espacial, para a Bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC)	71
Tabela 6 - Percentual da área de cada bacia hidrográfica ocupado por cada classe de solo	73
Tabela 7 - Valores empregados, para cada classe de solo, de umidade no ponto de saturação (θ_s) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e referência bibliográfica consultada	75
Tabela 8 - Profundidade do solo (Z_{SOLO}) adotada para as classes encontradas na área de estudo e referência bibliográfica consultada	76
Tabela 9 – Área percentual das bacias hidrográficas ocupada pelas diferentes classes de uso e cobertura do solo	79
Tabela 10 - Valores empregados para quantificar as variáveis atreladas aos usos do solo identificados na área de estudo e referência bibliográfica consultada	80
Tabela 11 - Caracterização das estações de monitoramento meteorológico e pluviométrico empregadas no estabelecimento da base de dados temporais para o presente estudo	83

Tabela 12 - Breve descrição dos Modelos Climáticos Globais (MCG's) empregados neste estudo, com ênfase na resolução horizontal e vertical dos mesmos e na forma com que consideram o ano civil, em número de dias, para suas simulações	88
Tabela 13 - Parâmetros calibrados pelo modelo LASH para as bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC)	95
Tabela 14 – Valores obtidos para a Raíz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE), o Coeficiente de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) e sua versão para valores logaritmizados ($C_{NS} \log(Q)$) e o erro na estimativa das vazões (ΔQ), para avaliação de desempenho do modelo nos períodos de calibração e validação	99
Tabela 15 - Valores do coeficiente de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) e sua versão para valores logaritmizados ($C_{NS} \log(Q)$) obtidos em outros estudos envolvendo a calibração e validação do modelo LASH	100
Tabela 16 - Curvas-chave cota (H, m) <i>versus</i> vazão (Q, $m^3.s^{-1}$) válidas para o período de 1994 a 2005 das séries históricas de vazões empregadas neste estudo	110
Tabela 17 - Vazão média de longo termo e produção de água observadas e estimadas pelo modelo LASH para as bacias hidrográficas analisadas neste estudo.	117
Tabela 18 – Vazões de referência da curva de permanência e suas respectivas vazões observadas e estimadas pelo modelo LASH para nas seções de controle “Pedro Osório”, da bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP-PO), “Ponte Cordeiro de Farias”, da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP-PCF), e “Passo dos Carros”, da bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF-PC).....	119
Tabela 19 – Valores de precipitação total anual média (mm) para as bacias hidrográficas analisadas neste estudo, obtidos das simulações dos 4 diferentes modelos climáticos para o clima presente (1961-2005) e anomalias (%) verificadas para os períodos futuros de 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, considerando os RCP's 4.5 e 8.5	121
Tabela 20 - Síntese da análise de tendência, pelo teste de Mann-Kendall, para o clima presente e as projeções futuras de precipitação total anual	127

Tabela 21 - Valores de média da temperatura média diária anual para as bacias hidrográficas analisadas neste estudo, obtidos das simulações dos 4 diferentes modelos climáticos para o clima presente (1961-2005) e anomalias (%) verificadas para os períodos futuros de 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, considerando os RCP's 4.5 e 8.5	129
Tabela 22 - Síntese da análise de tendência, pelo teste de Mann-Kendall, para o período clima presente e as projeções futuras de temperatura média anual	134
Tabela 23 – Erros médios de estimativa (ΔQ , %) das vazões máximas, médias e mínimas anuais obtidos da comparação entre dados observados e estimados por modelagem hidrológica forçada pelos modelos climáticos para as bacias hidrográficas do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).....	142
Tabela 24 – Variação nas vazões médias mensais (ΔQ , %) extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para os RCP's 4.5 e 8.5, quando comparadas àquelas extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo clima presente modelado, para a bacia hidrográfica do rio Piratini delimitada à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO).....	146
Tabela 25 - Variação nas vazões médias mensais (ΔQ , %) extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para os RCP's 4.5 e 8.5, quando comparadas àquelas extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo clima presente modelado, para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF)	149
Tabela 26 - Variação nas vazões médias mensais (ΔQ , %) extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para os RCP's 4.5 e 8.5, quando comparadas àquelas extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo clima presente modelado, para a bacia	

hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).....	152
Tabela 27 – Variação (ΔQ , %) nos valores de vazão média anual quando comparados os dados obtidos por <i>Ensemble Mean</i> para o clima presente e para as projeções do clima futuro perante os RCP's 4.5 e 8.5	163
Tabela 28 – Produção de água ($\text{l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$) estimada pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções do clima futuro perante os RCP's 4.5 e 8.5	165
Tabela 29 – Variação (ΔQ , %) nos valores de vazão média de enchente quando comparados os dados obtidos por <i>Ensemble Mean</i> para o clima presente e para as projeções do clima futuro perante os RCP's 4.5 e 8.5	175
Tabela 30 – Variação (ΔQ , %) nas médias das vazões mínimas anuais quando comparados os dados obtidos por <i>Ensemble Mean</i> para o clima presente e para as projeções do clima futuro perante os RCP's 4.5 e 8.5	184

Lista de Quadros

Quadro 1 - Testes sugeridos por Klemeš (1986) para validação de modelos hidrológicos	43
Quadro 2 - Breve descrição dos Patamares Representativos de Concentração (RCP's) dos gases do efeito, definidos por Moss et al. (2010) e empregados no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (IPCC, 2013)	54

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AR4	Quarto Relatório de Avaliação
AR5	Quinto Relatório de Avaliação
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
BESM	Brazilian Earth System Model
BHAF	Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata
BHAF-PC	Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata – Passo dos Carros
BHAP	Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas
BHAP-PCF	Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas – Ponte Cordeiro de Farias
BHMSG	Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo
BHRP	Bacia Hidrográfica do Rio Piratini
BHRP-PO	Bacia Hidrográfica do Rio Piratini – Pedro Osório
CANESM2	Canadian Earth System Model versão 2
CEMADEM	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
COREDE-SUL	Conselho Regional de Desenvolvimento da Região Sul
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Mineirais
CN	Método do Número da Curva
CN-Mofidicado	Método do Número da Curva Modificado
CPACT	Centro de Pesquisa Agropecuária Clima Temperado
DHSVM	Distributed Hydrology Soil Vegetation Model

EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
HadGEM2-ES	Hadley Centre Global Environmental Model versão 2
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LASH	Lavras Simulation of Hydrology
LandSat	Land Remote Sensing Satellite
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDE-HC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
MCG	Modelo de Circulação Geral
MCGAO	Modelo de Circulação Geral Atmosfera-Oceano
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate versão 5
RCP	Caminho Representativo de Concentração
SCE-UA	Shuffled Complex Evolution – University of Arizona
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
SWAT	Soil and Water Assessment Tool

Sumário

1	Introdução	29
1.1.	Hipóteses	30
1.2.	Objetivo geral	31
1.3.	Objetivos específicos.....	31
2	Revisão de Literatura	32
2.1.	Hidrologia, ciclo hidrológico e bacia hidrográfica.....	32
2.2.	Modelagem hidrológica	38
2.2.1.	Definições e conceitos introdutórios	38
2.2.2.	Classificações associadas aos modelos hidrológicos	39
2.2.3.	Escolha de um modelo hidrológico.....	40
2.2.4.	Etapas da modelagem hidrológica	41
2.3.	O modelo hidrológico Lavras Simulation of Hydrology (LASH) .	44
2.4.	Mudanças climáticas	49
2.4.1.	Variabilidade do clima e mudanças climáticas	49
2.4.2.	Forçantes radiativas das mudanças no clima.....	51
2.4.3.	Projeções futuras.....	53
2.5.	Impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos	55
3	Material e Métodos.....	60
3.1.	Área de estudo	60
3.2.	Base de dados espaciais.....	61
3.2.1.	Dados do relevo	62
3.2.1.	Solos	71
3.2.1.	Uso e cobertura do solo	76
3.3.	Base de dados temporais.....	81
3.4.	Calibração e validação do modelo hidrológico LASH	84

3.5.	Projeções climáticas.....	87
3.5.1.	Análise de tendência	90
3.6.	Avaliação do escoamento simulado pelo modelo LASH forçado pelos MCG's regionalizados pelo Eta	93
3.7.	Simulação do impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos	94
4	Resultados e Discussão.....	95
4.1.	Calibração e validação do modelo LASH	95
4.1.1.	Parâmetros de calibração.....	95
4.1.2.	Estatísticas de precisão.....	99
4.1.3.	Estimativa do hidrograma diário e outros indicadores	101
4.2.	Análise de tendência nas projeções climáticas	119
4.3.	Avaliação do escoamento simulado pelo modelo LASH forçado pelos MCG's regionalizados pelo Eta	135
4.4.	Impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos	144
4.4.1.	Vazões médias	144
4.4.2.	Vazões máximas	166
4.4.3.	Vazões mínimas	176
5	Considerações Finais.....	186
5.1.	Aspectos gerais.....	186
5.2.	Limitações do estudo.....	189
5.3.	Recomendações para estudos futuros	190
	REFERÊNCIAS.....	191
	APÊNDICES.....	208

1 Introdução

A compreensão dos complexos fenômenos naturais que envolvem o ciclo hidrológico e da forma com que estes se relacionam tem grande relevância (Mello et al., 2008), uma vez que inúmeros são os fatores que influenciam na hidrologia das bacias hidrográficas. Dentre estes fatores, destacam-se as mudanças climáticas e seu potencial efeito sobre os recursos hídricos, conforme relata o Quinto Relatório de Avaliação (*Fifth Assessment Report – AR5*) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) (IPCC, 2014).

Para Döll et al. (2015), não existe um usuário ou uso de água que não seja afetado pelas mudanças climáticas, sendo que os autores destacam a vulnerabilidade dos setores de agricultura irrigada, abastecimento e geração de energia. Neste contexto, a antecipação às mudanças climáticas, bem como aos impactos decorrentes destas, é algo extremamente útil e necessário para promover uma melhor gestão dos recursos hídricos, especialmente quando um dos grandes desafios globais do século XXI é a segurança alimentar (FAO, 2011).

Os cenários futuros do clima global podem ser simulados através de Modelos de Circulação Geral (MCG's), relatam Barry e Chorley (2013). No AR5 do IPCC (IPCC, 2013), diversos MCG's foram empregados para estimar o clima global passado e projetar, sob diferentes cenários de emissão de gases do efeito estufa, o clima futuro até o final do século XXI. No entanto, Chou et al. (2014a) afirmam que a resolução espacial desses MCG's geralmente é incompatível com a avaliação dos impactos das mudanças climáticas em escala local. Frente a tal limitação, tem-se os Modelos Climáticos Regionais (MCR's), os quais são aninhados aos MCG'S para promover o refinamento da escala.

As projeções do clima futuro podem alimentar modelos hidrológicos chuva-vazão que, uma vez calibrados e validados, permitem avaliar os seus impactos sobre os recursos hídricos na escala da bacia hidrográfica. No entanto, estas projeções climáticas estão sujeitas a incertezas significativas, conforme relatam Döll et al. (2015), motivo pelo qual inúmeros estudos têm gerado, para uma ou mais variáveis hidrológicas, um conjunto de possíveis alterações a partir de diversos modelos climáticos e um ou mais modelos hidrológicos. Embora ainda possuam

incertezas, mesmo que reduzidas quando comparadas ao emprego de apenas um modelo climático, estas simulações são ferramentas valiosas para a gestão dos recursos hídricos, fomentando a elaboração de estratégias de mitigação.

A bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo (BHMSG) é uma bacia de 62.500 km² localizada no bioma Pampa, ao sul do estado do Rio Grande do Sul, na fronteira do Brasil com o Uruguai, estando 47% da sua área de drenagem em território brasileiro e, 53%, em território uruguaio (ALM, 2018). É caracterizada pelos grandes espelhos d'água, a Lagoa Mirim e a Lagoa Mangueira, por uma hidrovia internacional, a hidrovia do Canal São Gonçalo, por contemplar usos múltiplos, dentre os quais destaca-se a produção de arroz irrigado, e por abrigar áreas de interesse ambiental, tais como o banhado do Taim e a Reserva Ecológica do Taim.

Embora seja uma bacia de relevante interesse ambiental, social e econômico, a gestão de recursos não é efetiva, uma vez que o Plano de Bacias, previsto na Política Nacional de Recursos Hídricos de 1997 (BRASIL, 1997), ainda não saiu do papel (PINTO, 2018). Somado a este fato, ressalta-se a rede pouco densa de postos de monitoramento hidrológico de domínio público. Outrossim, poucos são os estudos hidrológicos realizados na referida bacia e divulgados em periódicos científicos (BESKOW et al., 2016; CASSALHO et al., 2017; DONGLI et al. 2017; BESKOW et al., 2018, CALDEIRA et al., 2019; STEINMETZ et al., 2019), não tendo sido encontradas investigações sobre o impacto das mudanças climáticas em seus recursos hídricos.

1.1. Hipóteses

As hipóteses do presente estudo são:

- O modelo hidrológico LASH é capaz de capturar o comportamento hidrológico das sub-bacias analisadas;
- As projeções climáticas indicam aumento da precipitação total anual e da temperatura média diária anual;
- Os hidrogramas estimados com base na modelagem hidrológica forçada pelo clima presente dos modelos climáticos produz

indicadores semelhantes àqueles obtidos a partir dos hidrogramas observados; e

- As mudanças climáticas ao longo do século XXI promovem aumento nos indicadores de vazões médias e máximas, bem como de produção de água, nas três sub-bacias analisadas.

1.2. Objetivo geral

O objetivo geral do presente estudo foi avaliar os possíveis impactos de mudanças climáticas sobre a hidrologia em três sub-bacias (rio Piratini e arroios Pelotas e Fragata) da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo.

1.3. Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram: i) verificar a capacidade do modelo hidrológico em reproduzir o hidrograma diário e outros indicadores quando calibrado e validado para as bacias analisadas; ii) verificar a existência de tendência de aumento ou diminuição nas projeções climáticas de precipitação total anual e temperatura média anual; iii) avaliar se os hidrogramas estimados a partir do clima presente modelado pelos modelos climáticos têm boa correspondência aos hidrogramas observados; e iv) avaliar o impacto das projeções climáticas fundamentadas em dois cenários de emissão de gases do efeito estufa – um relativamente otimista e outro pessimista – sobre a hidrologia das bacias hidrográficas.

2 Revisão de Literatura

2.1. Hidrologia, ciclo hidrológico e bacia hidrográfica

A hidrologia, segundo Chow (1964), é o ramo da ciência que estuda a ocorrência, circulação e distribuição da água na Terra, suas propriedades físicas e químicas e sua relação com o meio ambiente.

A ocorrência da água na Terra se dá num espaço denominado de hidrosfera, o qual situa-se entre 1 km abaixo da litosfera e 15 km acima da atmosfera, conforme descrevem Chow, Maidment e Mays (1988). Segundo Press et al. (2004), a hidrosfera, a litosfera e atmosfera consistem nos principais componentes do sistema Terra; a litosfera pode ser compreendida como uma camada espessa de rocha que vai da crosta e da parte superior do manto terrestre até 100 km de profundidade, enquanto que a atmosfera, como um invólucro gasoso que se estende da superfície terrestre até 100 km de altitude, relatam os autores.

A circulação da água na hidrosfera é o que denominamos de ciclo hidrológico, sendo este o princípio fundamental da hidrologia. Para Linsley, Kohler e Paulhus (1975), ciclo hidrológico é um termo descritivo aplicado à circulação geral da água dos oceanos para a atmosfera, para a superfície, e de volta aos oceanos. Suguio (2006), por sua vez, descreve o ciclo hidrológico como a representação dos mecanismos de transferência contínua da água na Terra, dos oceanos e dos próprios continentes para a atmosfera, em forma de vapor, e, em seguida, precipitando sobre os oceanos e continentes, envolvendo assim vários reservatórios naturais entre os quais as partículas de água se movem com o decorrer do tempo. Davie (2008) relata que o ciclo hidrológico é um modelo conceitual de como a água se movimenta entre a Terra e a atmosfera em seus estados líquido, sólido e gasoso. Miranda, Oliveira e Silva (2010) relatam que o ciclo hidrológico é uma sucessão de vários processos naturais pelos quais a água inicia seu caminho indo de um estágio inicial até retornar à posição primitiva, impulsionada especialmente pela radiação solar. Já Mello e Silva (2013) definem o ciclo hidrológico como a dinâmica da água no meio ambiente, compreendendo seus diferentes estados físicos – líquido, vapor e sólido – encontrados em diferentes

ambientes do globo terrestre, tais como atmosfera, oceano, solo, leitos naturais de escoamento, montanhas e outros.

Os principais processos que envolvem o ciclo hidrológico estão ilustrados na Figura 1 para uma escala global. Entretanto, o ciclo hidrológico é comumente analisado em escala de bacia hidrográfica, sendo esta definida como uma área delimitada topograficamente pelos divisores de água, constituída por uma rede de drenagem, a qual converge o escoamento para uma seção comum denominada de seção de controle ou exutório da bacia (MELLO e SILVA, 2013). A bacia hidrográfica pode apresentar dimensões bastante variáveis, de poucos hectares até milhões de km², ressalta Davie (2008). A definição da escala, segundo Mello e Silva (2013) depende dos objetivos técnicos e científicos da análise.

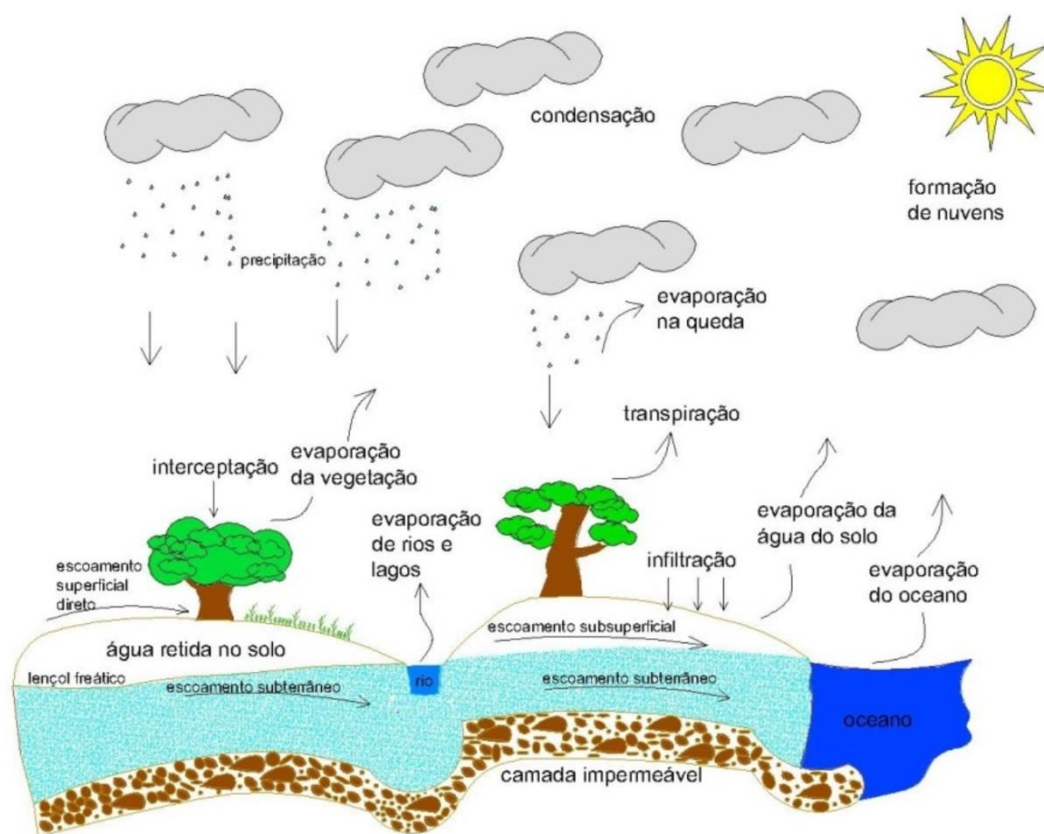


Figura 1 - Representação dos principais componentes do ciclo hidrológico em escala global
Fonte: Beskow, Souza e Luz (2015)

O ciclo hidrológico (Figura 1), apesar de não ter início nem fim e ocorrer de forma contínua no tempo, pode ser entendido a partir da evaporação da água dos oceanos, como propõem Linsley, Kohler e Paulhus (1975).

Dada a definição de Allen et al. (1998), a evaporação pode ser compreendida como o processo pelo qual a água é convertida do estado líquido para o estado de vapor e, então, removida da superfície de evaporação. Para os hidrólogos, no entanto, Linsley, Kohler e Paulhus (1975) relatam que a evaporação consiste simplesmente na taxa de transferência da água líquida para a atmosfera. Os oceanos formam o principal reservatório do ciclo hidrológico global, retendo mais de 97% da água existente na Terra (CHAHINE, 1992). Em superfícies líquidas como os oceanos, o processo de evaporação é influenciado por inúmeros fatores, dentre os quais Raghunath (2006) destaca a temperatura do ar e da água, a umidade relativa, a velocidade do vento, a área superficial exposta. Sobre o processo de evaporação da água superficial dos oceanos, Suguio (2006) relata que o mesmo ocorre de forma lenta e que o vapor de água transmitido para a atmosfera tem um tempo médio de residência de 10 dias, quando, então, é precipitado.

A precipitação é a principal forma de entrada de água no ciclo hidrológico em sua fase terrestre, relatam Davie (2008), Mello e Silva (2013) e outros. Conforme Mello e Silva (2013), este processo pode ser compreendido como uma forma de umidade presente na atmosfera que, em função de condições termodinâmicas, condensa, forma nuvens e precipita. A precipitação pode ocorrer na forma de garoa, chuva, neve, granizo, saraiva, geada ou orvalho (TUCCI, 2009), sendo a precipitação que atinge a superfície na forma líquida, ou seja, a chuva, a mais comum, principalmente em regiões de clima tropical e subtropical, destacam Mello e Silva (2013).

A precipitação pode incidir sobre os corpos hídricos, como rios e lagos, ou sobre a superfície. Caldeira (2016) menciona que, uma vez incidindo sobre a superfície, parte da precipitação pode ser interceptada pela vegetação ou outros obstáculos, retornando à atmosfera devido ao processo de evaporação. A interceptação, neste caso, pode ser compreendida como a capacidade que a vegetação ou outros tipos de obstáculos possuem de reter a chuva, segundo Miranda, Oliveira e Silva (2010). Raghunath (2006), por sua vez, descreve a interceptação como uma forma de perda de água, na qual parte da precipitação é

interceptada pela vegetação e por edificações e retorna para a atmosfera sem atingir a superfície terrestre de fato. Logo, inúmeros são os fatores que exercem influência sobre este processo, dentre os quais Tucci (2009) menciona as características das precipitações, as condições climáticas, a densidade da vegetação, a estrutura e arquitetura do dossel e o comportamento fisiológico das plantas durante o ano.

Beskow, Souza e Luz (2015) indicam que a precipitação incidente sobre a superfície e que atinge o solo, não ficando interceptada, pode: i) ficar armazenada em depressões do terreno; ii) escoar sobre a superfície; iii) infiltrar no solo; iv) ou escoar pelo solo como fluxo subsuperficial. O armazenamento de água em depressões do terreno pode ocorrer, segundo Linsley, Kohler e Paulhus (1975), na ordem de magnitude de partículas de solo a grandes áreas inundadas, podendo a água armazenada retornar à atmosfera por evaporação ou infiltrar no solo após cessar a precipitação.

Já a infiltração, conforme Miranda, Oliveira e Silva (2010), é o processo de penetração da precipitação que atinge o solo nas camadas próximas à superfície do terreno, a qual percola para baixo através dos poros vazios e sob ação da gravidade, até atingir uma camada que a retém e resulta no teor de umidade do solo. A infiltração tem a função de suprir a deficiência de umidade do solo e, quando ocorre em excesso, de recarregar os reservatórios subterrâneos de água (RAGHUNATH, 2006). De acordo com Tucci (2009), este processo depende da água disponível para infiltrar, do tipo de solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e de ar presentes no seu interior. Numa perspectiva ambiental, Mello e Silva (2013) destacam a importância da infiltração, pois, além de exercer influência direta sobre outros processos (escoamento superficial direto, por exemplo), promove o preenchimento dos poros do solo pela água, a qual pode ficar retida na matriz e ser utilizada pelas plantas ou recarregar os aquíferos.

Uma vez retida na matriz do solo, a água pode retornar à atmosfera por meio da evaporação e da transpiração (CALDEIRA, 2016). Conforme Allen et al. (1998), a transpiração é a vaporização da água líquida contida nos tecidos das plantas e a posterior transferência desse vapor para a atmosfera. Os autores relatam que a evaporação da água retida na matriz do solo e a transpiração pelas plantas ocorrem simultaneamente e é difícil distinguir os dois processos, por isso são somados,

conceituando a evapotranspiração. Evapotranspiração é, por tanto, a perda de água para atmosfera em decorrência da evaporação do solo e da transpiração das plantas (RAGHUNATH, 2006).

Segundo Viola (2008), a ocorrência de deficiência de água nas camadas superiores do solo pode implicar na ocorrência de um fluxo ascendente originário do lençol freático, denominado de ascensão capilar. Este fenômeno é geralmente observado, segundo o autor, em regiões de descarga de aquífero.

Retornando à precipitação que atinge o solo, Caldeira (2016) relata que se sua intensidade for superior à capacidade de infiltração do solo, ou ainda se este encontra-se saturado, o excesso de precipitação escoar superficialmente até atingir um corpo hídrico ou passa a ser retido em depressões do terreno, outrora mencionadas. Segundo Silva et al. (2008), a parcela da precipitação que excede a capacidade de infiltração do solo e não fica retida nas depressões do terreno é denominada de precipitação efetiva. O escoamento ocasionado pela precipitação efetiva, por sua vez, é denominado de escoamento superficial direto e está diretamente relacionado ao dimensionamento de estruturas hidráulicas e ao estudo de erosão e transporte de sedimentos (SILVA et al., 2008).

Os escoamentos superficial direto, subsuperficial e de base, constituem os três componentes do escoamento superficial, um seguimento do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento das águas na superfície terrestre e que é extremamente importante para o manejo das bacias hidrográficas, destacam Silva et al. (2008).

O escoamento subsuperficial ocorre, segundo Raghunath (2006), quando existe uma camada de solo relativamente impermeável, a qual faz com que a água percole e escoe lateralmente na subsuperfície do solo. Por este motivo, Miranda, Oliveira e Silva (2010) relatam que é difícil quantificar tal processo de forma isolada, sendo muitas vezes analisado junto ao escoamento superficial direto (MIRANDA, OLIVEIRA e SILVA, 2010). Comparando em termos dinâmicos os escoamentos superficial direto e subsuperficial, Mello e Silva (2013) indicam que o segundo ocorre de forma mais lenta que o primeiro.

Já o escoamento de base, também conhecido como escoamento subterrâneo, é aquele produzido pela drenagem natural do aquífero, sendo bastante relevante do ponto de vista ambiental, segundo Mello e Silva (2013), porque alimenta os cursos d'água durante períodos de estiagem. Os autores

relatam ainda que o escoamento de base, frente aos demais, é bastante lento, podendo demorar vários dias para que haja mudança significativa nos valores de vazão em uma seção de controle após um evento de precipitação.

A água proveniente da precipitação direta sobre as calhas dos rios e dos escoamentos superficial direto, subsuperficial e de base se concentra em cursos d'água e pode atingir corpos hídricos maiores, como lagos, lagoas, oceanos, etc., onde evapora novamente, visto que o ciclo hidrológico continua (BESKOW, SOUZA e LUZ, 2015).

Conforme Miranda, Oliveira e Silva (2010), o ciclo hidrológico analisado na escala de bacia hidrográfica apresenta variação contínua, dentro de amplos limites, na quantidade de água disponível em cada uma das suas partes; numa análise global, as quantidades são praticamente constantes. Este fato explica, segundo os autores, a abundância e escassez das chuvas sobre a Terra.

De acordo com Chow, Maidment e Mays (1988), a hidrologia de uma região é determinada pelos seus padrões climáticos e por fatores físicos, como a topografia, a geologia e a vegetação. No entanto, os autores destacam que as atividades humanas vêm gradualmente alterando os recursos hídricos naturais e, por consequência, a dinâmica de equilíbrio do ciclo hidrológico. Dentre as atividades humanas que afetam a circulação e a qualidade da água na natureza, Chow, Maidment e Mays (1988) destacam a irrigação de culturas, a fertilização dos solos, o desmatamento, o bombeamento de água subterrânea, a construção de barragens em rios e o despejo de resíduos em rios e lagos.

Neste contexto, Mello et al. (2008) relatam que o entendimento acerca dos complexos fenômenos naturais que envolvem o ciclo hidrológico, bem como a forma com que estes se inter-relacionam desde a precipitação até a ocorrência de escoamento superficial, é de extrema importância para fundamentar estudos de simulação hidrológica.

Os modelos hidrológicos chuva-vazão, os quais representam a parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão, devem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evapotranspiração e nas depressões do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea e as parcelas do escoamento superficial, subsuperficial e no rio (TUCCI, 2005).

2.2. Modelagem hidrológica

2.2.1. Definições e conceitos introdutórios

Conforme relatam Caldeira et al. (2018), inúmeras são as terminologias específicas na área de modelagem hidrológica, sendo um bom começo a definição de “sistema”, “modelo” e “simulação”.

Dooge (1973) apresenta uma definição clássica sobre sistema. Segundo o autor, um sistema pode ser compreendido como uma estrutura, esquema ou procedimento, de caráter real ou abstrato, que num tempo de referência inter-relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação. Chow, Maidment e Mays (1988), por sua vez, conceituam sistema como um conjunto de partes conectadas de um todo, empregando o ciclo hidrológico como exemplo para tal, onde as partes são a precipitação, evaporação, o escoamento, etc. Estas partes, segundo os autores, podem ser representadas por subsistemas, analisados separadamente e combinados de acordo com a forma que interagem.

Conforme relatam Sorooshian et al. (2008), a representação simplificada do comportamento de um sistema se dá por meio de um modelo. Para Tucci (2005), os modelos que buscam representar um sistema podem ser classificados como físicos, analógicos ou matemáticos, sendo que os modelos matemáticos são aqueles que buscam descrever a natureza do sistema através de equações ou sequências lógicas; este é o caso dos modelos hidrológicos. A versatilidade dos modelos matemáticos, resultante da possibilidade de se analisar diferentes situações em um mesmo sistema ou diferentes sistemas, é destacada por Tucci (2005), o qual relata também que os mesmos apresentam algumas desvantagens, especialmente associadas à dificuldade de discretização dos processos contínuos e à representação matemática de certos processos físicos.

Ao processo de utilização do modelo, dá-se o nome de simulação. Na simulação, outros conceitos surgem, tais como (TUCCI, 2005): i) fenômeno, que é o processo físico que implica em alteração do estado do sistema; ii) variável, que é a forma quantitativa de descrever o fenômeno; e iii) parâmetro, que é o valor que caracteriza o sistema, podendo variar no tempo e no espaço.

2.2.2. Classificações associadas aos modelos hidrológicos

Os modelos hidrológicos são classificados sob diferentes aspectos, destacam Caldeira et al. (2018). Beven (2004), por exemplo, sugere que inicialmente sejam distinguidos os modelos concentrados e distribuídos. De acordo com o autor, os modelos concentrados consideram a bacia como uma unidade homogênea, com variáveis de estado médias para a área de análise. Esta abordagem, destaca Hartmann, Bales e Sorooshian (1999), não permite considerar a heterogeneidade natural da vegetação, do solo e do relevo na bacia. Tal limitação é, no entanto, minimizada quando os modelos são distribuídos, relata Collischonn (2001), uma vez que estes analisam os processos em sub-bacias (modelo semidistribuído) ou em uma grade regular de células (modelo distribuído).

Outra classificação empregada é quanto ao modelo ser estocástico ou determinístico. Um modelo estocástico é aquele que, segundo Shaw (1994), faz uso de distribuições de probabilidade para gerar séries temporais de variáveis hidrológicas, enquanto que os modelos determinísticos transformam a chuva em vazão através da quantificação dos processos físicos que ocorrem na bacia. Beven (2004), por sua vez, relata que os modelos determinísticos se caracterizam por sempre produzir o mesmo resultado na simulação perante o mesmo conjunto de valores de entrada e parâmetros, diferente dos modelos estocásticos, os quais aceitam aleatoriedade ou incerteza nos resultados da simulação devido à incerteza nas variáveis de entrada, condições de contorno ou parâmetros do modelo. O autor destaca ainda que a grande maioria dos modelos hidrológicos chuva-vazão são determinísticos.

Quanto à formulação, os modelos hidrológicos podem ser classificados como conceituais ou empíricos, sendo os modelos conceituais aqueles que consideram os processos físicos nas formulações que representam o sistema, e os modelos empíricos, aqueles que não levam em consideração tais processos (TUCCI, 2005). Um modelo conceitual é algo abstrato, relata Viola (2011), pois embora aplique-se formulações para descrever os processos físicos, parâmetros calibráveis são considerados, o que mantém o empirismo. Modelos com esta abordagem podem, segundo o autor, ser classificados como semiconceituais.

Quanto à forma de representação dos dados, os modelos podem ser classificados como discretos ou contínuos. De acordo com Marinho Filho et al. (2012), os modelos discretos analisam períodos isolados de uma série histórica, como por exemplo um evento de cheia. Já os modelos contínuos, analisam longos períodos de dados, geralmente contemplando diferentes comportamentos hidrológicos.

Por fim, os modelos hidrológicos podem ainda, segundo Marinho Filho *et al.* (2012), ser estacionários ou dinâmicos, descrevendo o fenômeno sem a variação temporal dos parâmetros ou variando os parâmetros em função do tempo.

2.2.3. Escolha de um modelo hidrológico

Inúmeros modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos, cada um com suas características particulares e diferentes propostas de aplicação, as quais permeiam entre pequena bacia hidrográfica e a escala global (DEVI, GANASRI e DWARAKISH, 2015).

A Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2008) recomenda que a escolha de um modelo hidrológico deva ser pautada em diversos aspectos, dentre eles, o objetivo geral da modelagem, a variável hidrológica a ser modelada, as características climáticas e fisiográficas do sistema a ser modelado, a disponibilidade e qualidade dos dados requeridos para calibração do modelo, a simplicidade do modelo, no que se refere à complexidade dos fenômenos hidrológicos e facilidade de aplicação.

Para Devi, Ganasri e Dwarakish (2015), o melhor modelo é aquele que fornece resultados próximos da realidade sem alta complexidade e fazendo uso de poucos parâmetros. Beven (2004) sugere que o hidrólogo, ao escolher um modelo hidrológico, responda aos seguintes questionamentos:

- 1) Quais modelos hidrológicos encontram-se prontamente disponíveis para serem utilizados? Existem outros modelos cujo investimento de tempo e dinheiro pode valer a pena?

- 2) Quais são as variáveis estimadas pelos modelos elencados? O modelo produzirá os resultados necessários para atender o objetivo do projeto?
- 3) Quais as suposições feitas por esses modelos? Elas se enquadram nos objetivos do projeto?
- 4) Os modelos necessitam de quais dados de entrada? Estes dados podem ser obtidos dentro dos limites de tempo e custo do projeto?

Se, após responder aos questionamentos, não restar nenhum modelo dentre os inicialmente levantados, Beven (2004) indica que o hidrólogo deve repensar os critérios usados, de modo que pelo menos um possa ser empregado. Conforme o autor, uma vez escolhido o modelo, a próxima etapa consiste em abordar o problema da calibração de seus parâmetros.

2.2.4. Etapas da modelagem hidrológica

Apresentadas as definições e classificações acerca da modelagem hidrológica, se faz necessário conceituar as etapas que envolvem a utilização de um modelo, a saber: i) análise de sensibilidade; ii) calibração; iii) validação; e iv) predição.

A primeira etapa de aplicação de um modelo hidrológico consiste na análise de sensibilidade, a qual tem por objetivo avaliar a influência da alteração do valor de diferentes parâmetros de entrada sobre a resposta de uma variável de saída, sendo os parâmetros mais sensíveis, ou aqueles que exercem maior influência, empregados na etapa de calibração (WHITE e CHAUBEY, 2005). Conforme relatam Caldeira et al. (2018), a literatura apresenta inúmeros métodos para análise de sensibilidade, os quais podem ser classificados como locais ou globais. Saltelli et al. (2004) conceituam a análise de sensibilidade local como aquela que dispõe a tendência do modelo em um dado ponto amostral, enquanto que a análise de sensibilidade global abrange todo o espaço amostrado, sendo analiticamente mais complexa.

O ato de ajustar para uma bacia hidrográfica os parâmetros do modelo indicados pela análise de sensibilidade é denominado de calibração (CALDEIRA et

al., 2018). A calibração é uma etapa que, segundo Arnold et al. (2012), decorre da seleção de valores para os parâmetros de entrada de um modelo, os quais permitem gerar previsões que são comparadas aos dados observados para um determinado conjunto de condições assumidas. De acordo com Collischonn e Tucci (2003), esta etapa exige a compreensão do comportamento do modelo e dos parâmetros, bem como dos problemas atrelados à qualidade e representatividade dos dados hidrológicos.

Beskow (2009) destaca que a calibração de parâmetros do modelo pode ser realizada, basicamente, por tentativa e erro ou por métodos automáticos. O método por tentativa e erro é demorado e subjetivo, sendo que a eficácia é altamente dependente da experiência do usuário, relatam Collischonn e Tucci (2003). Conforme os autores, o ajuste dos parâmetros por tal método ocorre de forma manual, em repetidas execuções do modelo e análises de resultados; a cada tentativa, o hidrólogo deve verificar, com base nos hidrogramas observado e estimado, o formato geral e o ajuste das vazões mínimas e de cheias, podendo ainda observar os valores de algumas funções objetivo.

Frente às limitações impostas pela calibração por tentativa e erro, foram desenvolvidas técnicas automáticas de otimização de parâmetros. Essas técnicas buscam valores para os parâmetros de forma automática, proporcionando o melhor resultado para uma função dependente dessas variáveis, dentro de um objetivo e obedecendo suas restrições, relata Tucci (2005), salientando que isso não implica em dispensar a experiência do hidrólogo, pois a solução matemática também pode convergir para valores de parâmetros irreais. O procedimento comumente adotado para calibração automática emprega algoritmos de calibração, funções objetivo e critérios de parada.

Existem várias classes de algoritmos de calibração disponíveis na literatura, como os de busca local, os de gradiente, os baseados na segunda derivada e os de otimização global, destaca Beskow (2009). Segundo o autor, os algoritmos de otimização global, como o Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) desenvolvido por Duan, Sorooshian e Gupta (1992), tem ampla aplicação na modelagem hidrológica.

A aplicação de algoritmos de calibração está atrelada à escolha de uma função objetivo, a qual busca representar matematicamente a qualidade dos resultados obtidos para um conjunto de parâmetros calibrados (COLLISCHONN e

TUCCI, 2003). Conforme descrevem Caldeira et al. (2018), o algoritmo atribui valores aos parâmetros de calibração e, posteriormente, calcula a função objetivo, seguindo em busca do valor ótimo até que seja constatada a convergência. Em outras palavras, visa aproximar o hidrograma calculado a partir do modelo àquele observado na seção de controle, sendo a função objetivo responsável por quantificar a discrepância entre eles para que a mesma possa ser reduzida (TUCCI, 2005). A avaliação de uma única função objetivo caracteriza a calibração automática como mono-objetivo, enquanto que avaliar duas ou mais funções, como multiobjetivo. O critério de parada do processo iterativo de busca pelos melhores valores para os parâmetros de calibração pode ser (DUAN, SOROOSHIAN e GUPTA (1992): i) a convergência da função objetivo; ii) a convergência dos valores dos parâmetros; ou iii) um número máximo de iterações.

Por fim, tem-se a etapa de validação de um modelo hidrológico, a fim de analisar sua acurácia nas aplicações pretendidas. Segundo Viola (2008), a validação deve estar fundamentada em testes avaliados por coeficientes estatísticos. Um roteiro de testes para validar modelos hidrológicos é apresentado por Klemeš (1986) em quatro distintas aplicações, brevemente descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Testes sugeridos por Klemeš (1986) para validação de modelos hidrológicos

Teste	Descrição	Aplicação
<i>Split sample</i>	Consiste na aplicação de dois períodos de tempo distintos, um período para calibrar o modelo hidrológico e outro para aplicar os parâmetros obtidos com a calibração.	Validação de modelos para aplicação a processos estacionários com calibração e simulação na mesma bacia.
<i>Proxy basin</i>	São empregadas duas bacias hidrográficas A e B com características edafoclimáticas semelhantes à da bacia C onde deseja-se obter os dados, utilizando uma para calibração e outra para validação.	Validar de modelos para aplicação a processos estacionários com calibração e simulação em bacias distintas.
<i>Differential Split-sample</i>	Consiste em calibrar o modelo para um período de tempo prévio às alterações avaliadas e validá-lo para um período de tempo posterior.	Validação de modelos para aplicação a processos não estacionários, com calibração e simulação na mesma bacia.
<i>Proxy-basin Differential Split-sample</i>	Combinação dos testes <i>Proxy-basin</i> e <i>Differential Split-sample</i>	Validação de modelos para aplicação em processos não estacionários, com calibração e simulação em bacias distintas

As principais medidas estatísticas empregadas para avaliação do desempenho dos modelos são, segundo Collischonn (2001): o coeficiente de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) (NASH e SUTCLIFFE, 1970), o coeficiente de determinação (R^2) (LEGATES e MCCABE, 1999) e a relação entre volumes medidos e calculados de vazões (Δv).

2.3. O modelo hidrológico Lavras Simulation of Hydrology (LASH)

Idealizado para ser um modelo hidrológico chuva-vazão visando à estimativa de vazões em bacias hidrográficas de clima tropical e subtropical, o modelo hidrológico Lavras Simulation of Hydrology (LASH) teve seu desenvolvimento iniciado em 2008, através de uma parceria entre pesquisadores da Universidade Federal de Lavras, em Minas Gerais, e a Universidade de Purdue, nos Estados Unidos (CALDEIRA, 2016). O grande desafio na concepção da primeira versão do LASH, segundo relatos de Mello et al. (2016), consistiu na concepção de um modelo que fosse compatível com a realidade de países em desenvolvimento, como o Brasil, quanto à carência na disponibilidade de dados temporais e espaciais.

A estrutura da primeira versão do modelo LASH foi apresentada por Viola (2008): um modelo hidrológico chuva-vazão semiconceitual, determinístico, de longo termo e semidistribuído por sub-bacias hidrográficas. Esta versão, em sua abordagem de discretização espacial concentrada, foi avaliada pelo autor, ao passo de simulação diária, em duas bacias hidrográficas da região do alto rio Grande, em Minas Gerais.

Os resultados promissores alcançados por Viola (2008) para a bacia hidrográfica do rio Grande (2.080 km²) deram origem ao estudo apresentado por Mello et al. (2008), no qual os autores empregaram o modelo LASH com discretização espacial semidistribuída por sub-bacias hidrográficas. A análise estatística indicou, segundo Mello et al. (2008), que o modelo foi capaz de estimar de forma satisfatória as vazões diárias, incluindo períodos de El-Niño e La-Niña, assim como de simular os impactos hidrológicos decorrentes de alterações de uso do solo simuladas para a bacia.

A mesma abordagem de discretização espacial foi avaliada para a bacia hidrográfica do rio Aiuruoca (2.094 km²) por Viola et al. (2009), os quais também constataram a capacidade do modelo simular o comportamento hidrológico da bacia. Para os autores, as análises de precisão realizadas no estudo produziram resultados animadores, contudo, os autores reconheceram que o modelo ainda precisaria ser testado em outras bacias hidrográficas para que se pudesse concluir, de forma mais efetiva, sobre sua precisão (CALDEIRA, 2016).

O modelo, no entanto, só ganhou a forma de um programa de computador quando Beskow (2009) o apresentou com diversas adaptações e aprimoramentos. Foi nesta segunda versão que o modelo passou, oficialmente, a ser denominado “Lavras Simulation of Hydrology”.

A principal diferença entre as duas versões consistiu na abordagem de discretização espacial, a qual passou a ser distribuída. Além disso, relatam Caldeira et al. (2019), foi implementado ao modelo um módulo de calibração automática empregando o algoritmo genético Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) (DUAN, SOROOSHIAN e GUPTA, 1992); a versão anterior contava com calibração manual ou por intermédio de um algoritmo de propósito geral (LASDON, WARREN, et al., 1978).

No estudo conduzido por Beskow (2009), a segunda versão do modelo LASH foi avaliada na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará (32 km²), em Minas Gerais. As principais constatações do autor indicam que: i) o módulo de calibração automática SCE-UA foi eficiente e apresentou uma convergência bastante rápida dos valores dos parâmetros; ii) com base nas estatísticas de precisão, o modelo demonstrou grande potencial para ser aplicado para a geração de séries de vazões máximas, mínimas e de curvas de permanência; e iii) o modelo poderia ser empregado com sucesso em bacias hidrográficas de tamanho similar à analisada.

Após estes estudos, o modelo LASH vem sendo aplicado com sucesso em bacias hidrográficas brasileiras de diferentes tamanhos, como pode ser observado em Beskow, Mello e Norton (2011), Beskow et al. (2011), Viola et al. (2012), Beskow, Norton e Mello (2013), Viola et al. (2013), Viola et al. (2015), Beskow et al. (2016), Caldeira (2016) e Caldeira et al. (2019).

Beskow, Mello e Norton (2011) descreveram a segunda versão do modelo, enfatizando sua estrutura, componentes, formulações e potencialidades. Os

autores realizaram análise de sensibilidade, de redução do intervalo dos parâmetros e das incertezas que ocorrem anteriormente à etapa de calibração. Beskow et al. (2011), por sua vez, calibraram e validaram o modelo para a bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara (sul de Minas Gerais), constatando sua capacidade em prever adequadamente o hidrograma, inclusive picos e vazões de estiagem, e o seu potencial como ferramenta de gestão dos recursos hídricos.

Em uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Lontra, afluente do rio Araguaia, ao norte do estado do Tocantins, Viola et al. (2012) calibraram e validaram a primeira versão do modelo, empregando medidas estatísticas para avaliar o erro na estimativa de vazões de referência da curva de permanência, bem como seu desempenho em longo termo. Os autores constataram o bom desempenho do modelo nas etapas de calibração e de validação e a forte aderência da curva de permanência estimada à observada, o que dá indícios da aplicabilidade do modelo para gestão de planejamento de recursos hídricos no Tocantins.

Viola et al. (2013), por sua vez, aplicaram a primeira versão do LASH para simular o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas dos rios Aiuruoca, Grande, Sapucaí e Verde, na região de cabeceira da bacia hidrográfica do rio Grande, ao sul de Minas Gerais. Conforme relatam os autores, as curvas de permanência estimadas foram condizentes àquelas observadas, porém, com alguns erros na estimativa de vazões decorrentes de eventos extremos de precipitação. Ainda assim, Viola et al. (2013) evidenciam um bom desempenho do modelo para a área de estudo, ressaltando suas potencialidades quanto à simulação do impacto de diferentes cenários de alteração de uso e cobertura do solo e condições climáticas sobre os recursos hídricos da região.

No tocante à simulação do impacto da alteração no uso e cobertura do solo sobre os recursos hídricos, destaca-se o estudo desenvolvido por Beskow et al. (2013) na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara. Os autores compararam o uso corrente do solo com duas tendências regionais, substituindo áreas de pastagem por cultivo de eucalipto e vice-versa. Os resultados obtidos pela simulação com a segunda versão do modelo LASH dão indícios de que a substituição total da área de pastagem por eucalipto poderia reduzir a produção de água na bacia, acarretando em impactos negativos sobre o reservatório da usina hidrelétrica de Camargos, da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). A simulação da

substituição total de eucalipto por pastagem, segundo os autores, não apresentou alterações pronunciadas sobre o cenário atual.

Outro estudo sobre os efeitos da alteração no uso e cobertura do solo foi conduzido por Viola et al. (2014), com a primeira versão do modelo LASH, na região de cabeceira da bacia hidrográfica do rio Grande, sul de Minas Gerais. Os autores definiram 5 diferentes cenários:

- 1) reflorestamento com eucalipto em 20% da área de campo corrente;
- 2) reflorestamento com eucalipto em 50% da área de campo corrente;
- 3) reflorestamento com eucalipto em 100% da área de pastagem, mas apenas em sub-bacias onde esta tendência é predominante;
- 4) desmatamento de 30% dos remanescentes florestais da Serra da Mantiqueira para cultivo de pastagem; e
- 5) desmatamento de 70% dos remanescentes florestais da Serra da Mantiqueira para cultivo de pastagem.

De acordo com Viola et al. (2014), as vazões seriam reduzidas caso ocorressem os cenários 1, 2 e 3, enquanto que para os cenários 4 e 5, as vazões aumentariam, implicando em cheias e outros riscos associados ao maior escoamento superficial direto.

Na mesma área de estudo, Viola et al. (2015) buscaram avaliar o impacto das projeções climáticas sobre o regime hidrológico. Os autores empregaram simulações do Modelo Climático Global (MCG) HadCM3 regionalizadas pelo Modelo Climático Regional (MCR) ETA para o cenário A1B do clima futuro. Segundo Viola et al. (2015), o escoamento total anual apresentou pequena redução para o futuro próximo (2011-2040), enquanto que para os períodos de 2041-2070 e 2071-2099, houve um forte incremento nas vazões. Os autores destacam ainda que o aumento das chuvas no verão (período chuvoso) provocaria aumento do escoamento superficial direto, implicando em alterações sobre o regime de cheias dos rios da região. Em contraponto, a redução das chuvas no final do inverno (período seco) e início da primavera poderiam alterar a dinâmica da recarga subterrânea, afetando o fluxo de escoamento de base e a disponibilidade hídrica.

Na região sul do país, um dos primeiros estudos envolvendo o modelo LASH foi conduzido por Beskow et al. (2016), os quais calibraram e validaram o modelo para a bacia hidrográfica do arroio Fragata, sul do Rio Grande do Sul. A partir de

vazões médias diárias, os autores estimaram com sucesso alguns indicadores anuais e a curva de permanência, o que dá indícios de que o modelo pode ser empregado na gestão de recursos hídricos em bacias com condições de edafoclimáticas semelhantes à área de estudo.

Perante os resultados animadores obtidos na calibração e validação do modelo LASH para bacias hidrográficas de diferentes regiões do país, o Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas tem dispensado tempo e recurso de Projetos de Pesquisa financiados por agências de fomento, como CNPq e FAPERGS, no desenvolvimento da sua terceira versão. Os principais aprimoramentos para esta versão são de caráter computacional, visando maior usabilidade do software e o desenvolvimento de módulos para análise de dados temporais e espaciais. Do ponto de vista hidrológico, a discretização espacial por sub-bacias hidrográficas foi escolhida para esta versão. Maiores detalhes podem ser encontrados em Caldeira (2016) e Vargas et al. (2019).

A terceira versão do modelo LASH já foi avaliada em duas bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul (CALDEIRA, 2016): a bacia hidrográfica do arroio Fragata, objeto de estudo de Beskow et al. (2016), e a bacia hidrográfica do arroio Pelotas. Segundo Caldeira (2016), o modelo foi capaz de capturar o comportamento geral das vazões observadas nas duas bacias, tanto no período de calibração quanto de validação, no entanto, havia suspeita sobre a representatividade espacial dos processos hidrológicos pelo modelo quando comparado à segunda versão.

Frente ao exposto por Caldeira (2016), e considerando o estudo de Beskow et al. (2016), Caldeira et al. (2019) apresentaram um estudo pioneiro com o LASH, focado na análise da discretização espacial sobre a performance do modelo. Segundo os autores, as etapas de calibração e validação com vazões médias diárias apresentaram melhor desempenho, do ponto de vista estatístico, com a segunda versão do modelo, embora a terceira tivesse apresentado bons resultados.

Segundo Caldeira et al. (2019), tal constatação pode ser atribuída à melhor discretização espacial das variáveis de entrada (solo e uso e cobertura do solo, especialmente) e da quantificação dos processos hidrológicos quando a bacia é representada de forma distribuída (segunda versão), comparando-se à semidistribuída por sub-bacias (terceira versão). Neste aspecto, o presente estudo

busca justamente preencher a lacuna existente na qualidade da informação atrelada aos solos empregada por Caldeira (2016), visando melhorar o desempenho da calibração da terceira versão do modelo para as bacias hidrográficas analisadas.

2.4. Mudanças climáticas

2.4.1. Variabilidade do clima e mudanças climáticas

Entende-se por *tempo* o estado da atmosfera num determinado instante e lugar. Os registros das variáveis climáticas que descrevem o *tempo*, tais como precipitação e temperatura do ar, observados ao longo do tempo, permitem compreender o *clima*, o qual consiste numa abordagem estatística, em termos de média e variabilidade, do *tempo* (IPCC, 2013).

Os registros de variáveis climáticas à escala global tiveram início em meados do século XIX, tendo sido mais abrangentes e diversificados a partir de 1950, conforme relatado pelo IPCC (2013). Associados a reconstruções do clima passado, como reconstruções paleoclimáticas que datam de centenas de milhões de anos, esses registros são informações cruciais para o entendimento da variabilidade do clima a longo prazo (IPCC, 2013).

Conforme Barry e Chorley (2013), os registros climáticos, quando analisados ao longo do tempo, podem apresentar diversos comportamentos, destacando-se (Figura 2):

- Longas oscilações (A);
- Mudanças abruptas entre um estado médio e outro (B);
- Uma tendência gradual seguida por um novo estado médio (C);
- Mudança na variância sem alteração na média do período (D);
- Flutuações semiperiódicas em um estado médio estável (B); e
- Flutuações não periódicas em um estado médio estável (C).

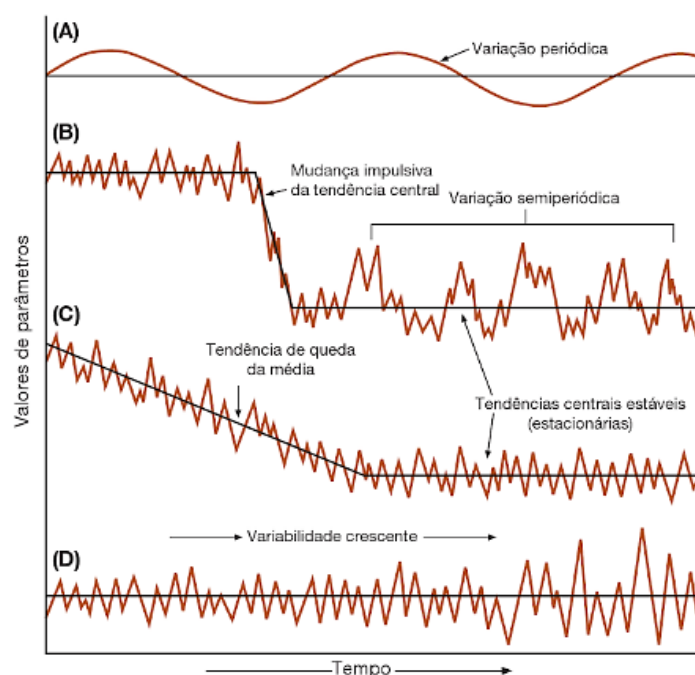


Figura 2 - Diferentes comportamentos para registros climáticos.
 Fonte: World Meteorological Organization *apud* Barry e Chorley (2013)

Para Barry e Chorley (2013), todos os comportamentos ilustrados na Figura 2 são expressões de variabilidade. Os autores fazem essa afirmação baseados na definição de variabilidade climática apresentada no AR5 (IPCC, 2013) e em outros documentos do IPCC: variabilidade climática é a variação do estado médio e outras estatísticas, como o desvio padrão e a distribuição de frequências, de variáveis climáticas em todas as escalas espaciais e temporais, além de eventos de caráter individual.

Quando a variabilidade do clima persiste por um período prolongado de tempo, isto é, por décadas ou mais, podemos denominá-la de mudança climática (IPCC, 2013). Mudanças climáticas são, portanto, variações estatisticamente significativas no estado médio do clima ou em sua variabilidade, relatam Barry e Chorley (2013).

Inúmeros testes estatísticos podem ser empregados para avaliar tendência em registros climáticos, destacando-se os testes paramétricos e não-paramétricos. Conforme relatam Yue, Pilon e Cavadias (2002), Moreira e Naghettini (2016) e Asfaw et al. (2018), a principal razão para a utilização de testes estatísticos não-paramétricos, comparados aos testes paramétricos, é o fato de que os primeiros

são mais adequados para conjuntos de dados que não apresentam distribuição normal, o que frequentemente ocorre com esses registros.

Quando se trata de testes estatísticos não-paramétricos voltados à análise de tendência monotônica em séries de dados hidrometeorológicos, os principais são, segundo Yue, Pilon e Cavadias (2002), o de Mann-Kendall e o de Spearman's Rho, sendo o primeiro amplamente empregado (GEBREMEDHIN, SHETTY e NANDAGIRI, 2016); MOREIRA e NAGHETTINI, 2016; ASFAW *et al.*, 2018)

Por fim, ressalta-se que a diferença entre variabilidade e mudança climática depende da escala temporal de análise: o aumento da temperatura média global nos últimos 100 anos pode ser compreendido como uma mudança climática e, os aspectos observados em menor escala temporal, como uma variabilidade, porém, se analisarmos este aquecimento ao longo de 1.000 anos, o podemos compreendê-lo como variabilidade, e não mudança (BARRY e CHORLEY, 2013).

2.4.2. Forçantes radiativas das mudanças no clima

Conforme relatado no AR5 do IPCC, a variabilidade e a mudança no clima podem se manifestar em decorrência de processos naturais internos ao sistema climático ou por variações nas forçantes climáticas naturais e antropogênicas. Já a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC, 1992) atribui as mudanças climáticas às atividades humanas que alteram, direta ou indiretamente, a composição da atmosfera global, e que se somam à variabilidade climática natural observada ao longo do tempo.

As forçantes climáticas naturais ou antropogênicas são perturbações impostas ao sistema global que provocam alterações no estado climático, destacam Barry e Chorley (2013). Os principais exemplos de forçantes climáticas são, segundo os autores, a tectônica de placas, as periodicidades astronômicas, a variabilidade solar, erupções vulcânicas, e as mudanças induzidas pelo homem sobre a composição da atmosfera e na cobertura do solo.

As forçantes climáticas acima mencionadas influenciam, sob diferentes aspectos, o balanço de radiação no topo da atmosfera. No entanto, as implicações decorrentes de variações na radiação solar, erupções vulcânicas e fatores

antropogênicos têm efeitos imediatos, em nível global e anual, sendo denominadas de forçantes radiativas (BARRY e CHORLEY, 2013).

O AR5 do IPCC (IPCC, 2014) define forçante radiativa como uma medida de variação líquida no balanço de energia do sistema terrestre em resposta a alguma perturbação externa. A forçante radiativa é expressa em W.m^{-2} e pode ser positiva ou negativa, o que indica, respectivamente, aquecimento ou resfriamento. Consiste num valor médio em escala global e anual e é estimada em relação ao ano de 1750, início da revolução industrial.

A forçante radiativa líquida do clima em decorrência de atividades antrópicas, entre 1750 e 2011, foi estimada em $2,29 \text{ W.m}^{-2}$ para o AR5 (IPCC, 2013) tendo sido os gases do efeito estufa responsáveis por uma forçante radiativa positiva de $2,83 \text{ W.m}^{-2}$.

Conforme descrito por Fung, Lopez e New (2011), a radiação solar que atinge o topo da atmosfera pode ser absorvida pela atmosfera, refletida de volta ao espaço, especialmente pelas nuvens, ou atingir a superfície da Terra e os oceanos. A parcela da radiação solar incidente à superfície, por sua vez, pode ser absorvida e refletida, sendo que a radiação refletida pode escapar para o espaço ou ser refletida de volta à superfície pela atmosfera, principalmente pelas nuvens. Segundo Barry e Chrolely (2013), a radiação solar é caracterizada por ser predominante de ondas curtas, enquanto que a radiação que emana da Terra, de ondas longas ou infravermelha. O efeito estufa se caracteriza justamente pelo fato de que a atmosfera possui grande capacidade de absorção dessa radiação infravermelha que deveria escapar para o espaço, particularmente em função do vapor d'água e de outros gases, relatam Barry e Chrolely (2013). É um fenômeno essencial para a vida humana na Terra, pois a temperatura média na superfície seria extremamente baixa, cerca de -18°C , frente aos 15°C atuais, se a atmosfera não tivesse capacidade de absorver radiação de onda longa (VILLELA, FREITAS e ROSA, 2012).

Os principais gases do efeito estufa, conforme descrito no AR5 do IPCC (IPCC, 2013), são: o vapor d'água (H_2O), o dióxido de carbono (CO_2), o óxido nitroso (N_2O), o metano (CH_4) e o ozônio (O_3). No entanto, o aquecimento provocado pelos gases do efeito estufa é comumente associado aos efeitos do aumento da concentração de CO_2 na atmosfera (BARRY e CHORLEY, 2013); isto

pode ser justificado pelo fato de que o CO₂ representa 64% da forçante radiativa decorrente de gases do efeito estufa, outrora mencionado.

2.4.3. Projeções futuras

As concentrações de CO₂, N₂O e CH₄ na atmosfera têm sido sem precedentes nos últimos 800 mil anos, destaca do AR5 (IPCC, 2013). No que concerne à concentração de CO₂, um crescimento de 40% foi verificado desde a era pré-indutrial e, num período mais recente, de 2002 à 2011, a razão de incremento anual desta concentração saltou de 1,9 para 2,1 ppm.ano⁻¹ (IPCC, 2013). As principais causas para este aumento são a queima de combustíveis fósseis e as mudanças no uso e cobertura do solo, nesta ordem (IPCC, 2013).

A forma com que a concentração dos gases do efeito estufa na atmosfera irão evoluir ao longo do tempo futuro é bastante incerta, pois é produto de sistemas dinâmicos muito complexos, os quais têm como forças motrizes o desenvolvimento demográfico, socioeconômico e da tecnologia (IPCC, 2000). No entanto, a influência dessas forças motrizes sobre tal efeito, bem como as incertezas associadas, podem ser avaliadas mediante cenários. O AR5 do IPPC (IPCC, 2013) emprega, para tal finalidade, 4 cenários definidos por Moss et al. (2010), os quais são denominados de “Caminhos Representativos de Concentração”, do inglês *Representative Concentration Pathways* (RCP'S), descritos brevemente no Quadro 2. Estes cenários vão do mais otimista (RCP 2.6) ao mais pessimista (RCP 8.5) em relação às emissões futuras de gases do efeito estufa (CHOU et al., 2014b).

Quadro 2 - Breve descrição dos Caminhos Representativos de Concentração (RCP's) dos gases do efeito estufa, definidos por Moss et al. (2010) e empregados no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (IPCC, 2013)

Cenário	Descrição
RCP 2.6	Patamar onde o forçamento radioativo atinge cerca de 3 W m^{-2} antes do ano de 2100 e, então, declina
RCP 4.5	Patamar intermediário, para o qual o forçamento radioativo se estabiliza em $4,5 \text{ W.m}^{-2}$ após 2100
RCP 6.0	Patamar intermediário, para o qual o forçamento radioativo se estabiliza em $6,0 \text{ W.m}^{-2}$ após 2100
RCP 8.5	Patamar elevado onde o forçamento radiativo é superior a $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ em 2100 e continua a aumentar durante algum tempo

Estes cenários futuros, assim como o clima passado, podem ser simulados através de Modelos de Circulação Geral (MCG's), relatam Barry e Chorley (2013), sendo que os mais sofisticados são fundamentados em representações matemáticas da estrutura e operação do sistema Terra-Oceano-Atmosfera (MCGAO's). No AR5 do IPCC (IPCC, 2013), diversos MCGAO's foram empregados para estimar o clima passado, do período industrial moderno (1850) até 2005, e projetar o clima futuro, sobre os diferentes RCP's, até o final do século XXI.

Embora o AR5 do IPCC relate ter havido um ganho no desempenho destes modelos, especialmente em função da complexidade dos processos físicos incorporados às suas mais recentes versões, a resolução espacial dos mesmos geralmente é incompatível com a avaliação dos impactos das mudanças climáticas futuras em escala local, afirmam Chou et al. (2014a). Frente à esta limitação, tem-se os Modelos Climáticos Regionais (MCR's), os quais consistem em modelos climáticos numa resoluções mais elevada sobre uma área limitada (IPCC, 2013). Segundo Chou et al. (2014b), estes modelos, aninhados aos MCG'S, promovem o refinamento da escala, conhecido como *downscaling*, fornecendo projeções futuras detalhadas que podem ser empregadas para análise de impactos locais.

Em se tratando do impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos em escala de bacia hidrográfica, simulações por *downscaling*, aninhando um MCR à um MCG, são amplamente empregadas (SAMUELS et al., 2010; RANEESH e SANTOSH, 2011; SOSA et al., 2011; HASSON et al., 2014; VIOLA et

al., 2015; KUMAR et al., 2017; HIRPA et al., 2018; MARHAENTO, BOOIJ e HOEKSTRA, 2018).

2.5. Impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos

A compreensão dos complexos fenômenos naturais que envolvem o ciclo hidrológico, bem como das suas inter-relações, desde a precipitação até a ocorrência de escoamento nos cursos d'água, é de suma importância (MELLO et al., 2008). Inúmeros são os fatores que podem influenciar no regime hidrológico de uma bacia hidrográfica, destacando-se as mudanças climáticas, as quais têm potencial para impactar os diferentes processos que ocorrem no ciclo hidrológico.

De acordo com o IPCC (2013), a resposta do ciclo hidrológico ao aquecimento global ao longo do século XXI não será uniforme, evidenciando o constraste na precipitação entre regiões úmidas e secas e entre as estações úmidas e secas, com exceções regionais. É muito provável, segundo o IPCC (2013) que regiões úmidas de altas latitudes experienciem maiores quantidades de precipitação, enquanto que é provável que regiões de latitude média e áridas e semiáridas subtropicais experienciem diminuição da precipitação, e que regiões úmidas de latitude média experienciem aumento. Quanto aos eventos de precipitação de curta duração, o IPCC (2013) indica que estes ocorrerão com maior intensidade, sendo muito provável eventos extremos mais intensos e frequentes em porções terrestres de latitude média e em regiões tropicais úmidas. O IPCC (2013) indica ainda, dentre outros prognósticos, que a evaporação média da superfície irá aumentar a medida que a temperatura global for se elevando, assim como o risco de ocorrência de secas agrícolas, sendo proeminentes na África austral e no noroeste da África ao longo do Mediterrâneo.

Para Döll et al. (2015), todos os usuários da água são afetados com as mudanças climáticas, em especial a agricultura irrigada, o abastecimento e a geração de energia. A agricultura irrigada – o setor de maior uso de água no mundo – é afetada tanto pela alteração na disponibilidade quanto na demanda hídrica, segundo os autores, uma vez que temperaturas mais elevadas e maior variabilidade da chuva tendem a aumentar a demanda por unidade de área irrigada. No setor de

geração de energia, Döll et al. (2015) ressaltam os impactos decorrentes das alterações no regime de vazões dos rios.

As mudanças hidrológicas provenientes das mudanças no clima, combinadas com outras pressões sobre os recursos hídricos, tais como crescimento populacional, mudança de uso e cobertura do solo e mudanças de estilo de vida, serão um grande desafio para a gestão de recursos hídricos no século XXI, relatam Kundzewicz et al. (2008).

Tendo em vista a segurança hídrica em um clima sob mudança, Döll et al. (2015) ressaltam a necessidade da gestão integrada dos recursos hídricos perante os riscos provenientes destas mudanças. Neste contexto, os autores definem o risco de um dado impacto como a interação entre desastres, exposição e vulnerabilidade. Todavia, o risco frequentemente é estimado a partir da probabilidade de ocorrência de eventos catastróficos ou tendências multiplicadas pelos impactos que decorrem caso estes eventos ou tendências de fato ocorram (IPCC, 2014). Segundo Döll et al. (2015), avaliações probabilísticas de desastres têm sido utilizadas para gestão de recursos hídricos em virtude da natureza estocástica do clima, sendo possível citar aplicações para elaboração de mapas de risco e de cheias, variabilidade de vazões, etc.

Thirel et al. (2015) relatam que a previsão do impacto de mudanças ambientais sobre bacias hidrográficas tem se tornado uma atividade útil para profissionais que trabalham na área de recursos hídricos; entretanto, estes têm tido preocupações crescentes, visto que os modelos usados para simulação na avaliação do impacto, bem como ferramentas de suporte à tomada de decisão, podem não ser adequados para tal fim.

A avaliação dos impactos potenciais das mudanças no clima sob o ponto de vista quantitativo é extremamente útil, no entanto, é necessário envolver a aplicação de uma série de modelos, estando os resultados de saída destes sujeitos a incertezas significativas (DÖLL et al., 2015). Frente às incertezas, tais pesquisadores sugerem que os impactos devem ser quantificados por meio de um intervalo de projeções plausíveis. Neste contexto, o estado-da-arte consiste em estudos multi-modelo, onde os resultados de diversos modelos climáticos alimentam um ou mais modelos hidrológicos a fim de gerar um conjunto de cenários de alterações potenciais de riscos.

Ressalta-se assim três conclusões de Kundzewicz et al. (2008) sobre as projeções climáticas e suas implicações nos recursos hídricos de água doce e na gestão:

1) os impactos das mudanças climáticas e as alternativas mais eficazes para se adaptar a elas dependem substancialmente das condições hidrológicas, econômicas, sociais e políticas, sendo difícil extrapolar resultados ou conclusões de uma bacia para outra;

2) mudanças climáticas são sobrepostas a outras pressões sobre os recursos hídricos; e

3) atualmente, pouco pode ser dito a respeito das implicações das mudanças climáticas na disponibilidade de água para os mais vulneráveis, ou seja, para os mais carentes em zonas urbanas e rurais de países em desenvolvimento.

A estimativa dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos e sua gestão devem ser melhoradas (KUNDZEWICZ et al., 2008); ademais, o avanço, no que se refere à compreensão destas, está condicionado à disponibilidade adequada de dados observados, o que evidencia a necessidade de ampliação da rede de monitoramento, principalmente em países em desenvolvimento, onde praticamente são inexistentes em termos de quantidade. Neste sentido, Kundzewicz et al. (2008) salientam que dados apropriados são fundamentais para o entendimento das mudanças e para melhorar o desempenho dos modelos climáticos. Os autores destacam ainda que, dentre as necessidades urgentes de pesquisa, estão aquelas que podem levar à redução de incertezas para melhor compreender como as mudanças climáticas podem afetar os recursos hídricos e para dar suporte aos gestores, os quais precisam se adaptar a elas.

Visando um planejamento futuro, torna-se fundamental – especialmente com relação aos cenários para as próximas décadas – o emprego da modelagem climática. Viola (2011) relata que, de acordo com o IPCC, um dos pontos que precisam ser avaliados com critério científico no Brasil diz respeito aos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas, haja vista que são projetadas alterações nos regimes térmico e pluvial, tendo consequências diretas sobre o ciclo hidrológico e, conseqüentemente, na capacidade de produção de água de bacias hidrográficas. No intuito de avaliar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, geralmente são calibrados e validados modelos hidrológicos do tipo

chuva-vazão. Neste contexto, Viola (2011) ressalta que a simulação hidrológica representa uma importante ferramenta no que se refere à gestão de recursos hídricos, especialmente para a determinação de vazões de outorga e avaliação dos impactos nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica frente às diferentes pressões, tais como alterações no uso do solo e mudanças climáticas.

Inúmeros são os estudos que buscam avaliar, via modelagem hidrológica, o impacto das mudanças climáticas sobre diversos indicadores hidrológicos em bacias hidrográficas, dentre eles, pode-se mencionar Ribeiro Neto et al. (2016), Oliveira et al. (2017), Alvarenga et al. (2018), Bajracharya et al. (2018) e Nilawar e Waikar (2019).

Ribeiro Neto et al. (2016) avaliaram o impacto do clima futuro projetado pelos RCP's 4.5 e 8.5 do AR5 do IPCC sobre os processos hidrológicos das principais regiões hidrográficas brasileiras, empregando para tal finalidade modelagem hidrológica forçada pelos dados climáticos dos modelos ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5. Segundo os autores, pode-se esperar redução na disponibilidade hídrica em toda a área de estudo, com exceção da região sul, afetando as principais bacias hidrográficas geradoras de energia hidrelétrica do país.

Oliveira et al. (2017) avaliaram o impacto das mudanças climáticas sobre a vazão e o potencial hidroenergético de uma bacia de cabeceira da bacia hidrográfica do rio Grande, no sul de Minas Gerais. Os autores empregaram, para tal finalidade, o modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) e os dados do clima presente e de projeções futuras dos modelos climáticos ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5 frente aos RCP's 4.5 e 8.5. Os resultados encontrados por Oliveira et al. (2017), por ambos os modelos climáticos e RCP's, dão indícios de que haverá uma redução considerável na vazão e, por consequência, no potencial de geração de energia, ao longo do século XXI. Tal redução pode acarretar em sérios problemas de disponibilidade de água na região, causando impactos não somente locais, mas em todo o sistema hidrelétrico instalado na bacia do rio Grande, ressaltam os autores.

Alvarenga et al. (2018) avaliaram o impacto das mudanças climáticas na hidrologia de uma pequena bacia hidrográfica localizada na Serra da Mantiqueira, em Minas Gerais. Os autores empregaram o modelo hidrológico Distributed Hydrology Soil Vegetation Model (DHSVM) forçado pelo modelo climático ETA-

HadGEM2-ES frente aos RCP's 4.5 e 8.5. Os resultados encontrados apontam para uma redução nas vazões médias sazonais em todos os períodos futuros analisados e para os dois RCP's, tendo a situação mais crítica ocorrido durante o verão, entre 2011 e 2040 (RCP 4.5) e 2071-2099 (RCP 8.5). Além disso, reduções preocupantes também foram verificadas no balanço hídrico da bacia, o que pode implicar em escassez de água para abastecimento, agricultura e geração de energia, relatam os autores, destacando ainda a necessidade de estudos mais aprofundados dos impactos das mudanças climáticas frente aos cenários do AR5 do IPCC.

Bajracharya et al. (2018) avaliaram o impacto das mudanças climáticas sobre o regime hidrológico de uma bacia hidrográfica do Nepal, dominada pela ocorrência de neve. A simulação hidrológica foi conduzida junto ao modelo SWAT e, as projeções climáticas, obtidas para os RCP's 4.5 e 8.5. Segundo relatam os autores, o efeito sinérgico de aumento da precipitação e da temperatura provoca maior derretimento de neve, implicando diretamente no aumento das vazões e produção de água no exutório da bacia.

Nilawar e Waikar (2019) avaliaram o impacto das mudanças climáticas nas vazões e concentração de sedimentos em uma bacia hidrográfica da China. Os autores empregaram o modelo hidrológico SWAT e três modelos climáticos sob os RCP's 4.5 e 8.5, obtendo resultados que indicam acréscimo nas vazões médias mensais e na concentração média mensal de sedimentos, sendo mais pronunciado quando analisado o RCP 8.5. Para Nilawar e Waikar (2019) o estudo fornece informações úteis sobre futuros cenários hidrológicos, fomentando a formulação e implementação de estratégias de gestão dos recursos hídricos.

3 Material e Métodos

3.1. Área de estudo

O Rio Grande do Sul, sob a perspectiva dos recursos hídricos, divide-se em 3 regiões hidrográficas – do rio Uruguai, do Guaíba e do Litoral – e em 25 bacias (SEMA, 2018). Uma destas 25 bacias é a Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo (BHMSG), a qual apresenta-se em território brasileiro e uruguaio, na proporção de 47% e 53% dos 62.500 km² de área de drenagem, respectivamente (ALM, 2018).

No lado brasileiro, dentre os usos múltiplos que contempla, a BHMSG destaca-se por ser a força motriz da produção orizícola do estado, desempenhando, numa visão holística, um papel ímpar no setor econômico e social. Ademais, a referida bacia, localizada no bioma Pampa, abriga áreas de relevante interesse ecológico, como o Banhado do Taim, onde localiza-se a Estação Ecológica do Taim, um ponto de pouso, descanso e nidificação de aves migratórias que, com uma diversificada fauna e flora, constitui uma das Unidades de Conservação Federal e é tombada pela UNESCO como Reserva da Biosfera (ALM, 2018).

Como principal corpo hídrico da BHMSG, tem-se a lagoa Mirim – um espelho d'água da ordem de 3.750 km² – que se conecta à laguna dos Patos através do canal São Gonçalo, uma estratégica via navegável de 76 km de extensão e importante manancial para abastecimento público urbano. O rio Piratini é o principal afluente ao canal São Gonçalo, seguido por outros como os arroios Pelotas e Fragata. Por possuírem série histórica de dados de vazão, obtida por meio de estações fluviométricas (Tabela 1) mantidas pela Agência Nacional de Águas (ANA), as bacias hidrográficas delimitadas à montante dessas seções de controle foram escolhidas como área de estudo.

Tabela 1 – Estações de monitoramento fluviométrico empregadas para delimitação das bacias hidrográficas do rio Piratini (BHRP) e dos arroios Pelotas (BHAP) e Fragata (BHAF)

Curso d'água	Estação fluviométrica	Código HidroWeb/ANA	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Rio Piratini	Pedro Osório	88641000	-31,856°	-52,831°	27
Arroio Pelotas	Ponte Cordeiro de Farias	88850000	-31,574°	-52,463°	40
Arroio Fragata	Passo dos Carros	88750000	-31,714°	-52,477°	10

Desta forma, constituiu-se a bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), com uma área de drenagem de 4.701,3 km², a bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF), com uma área de drenagem de 369,8 km², e a bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (Bhaf-PC), com uma área de drenagem de 129,4 km² (Figura 3).

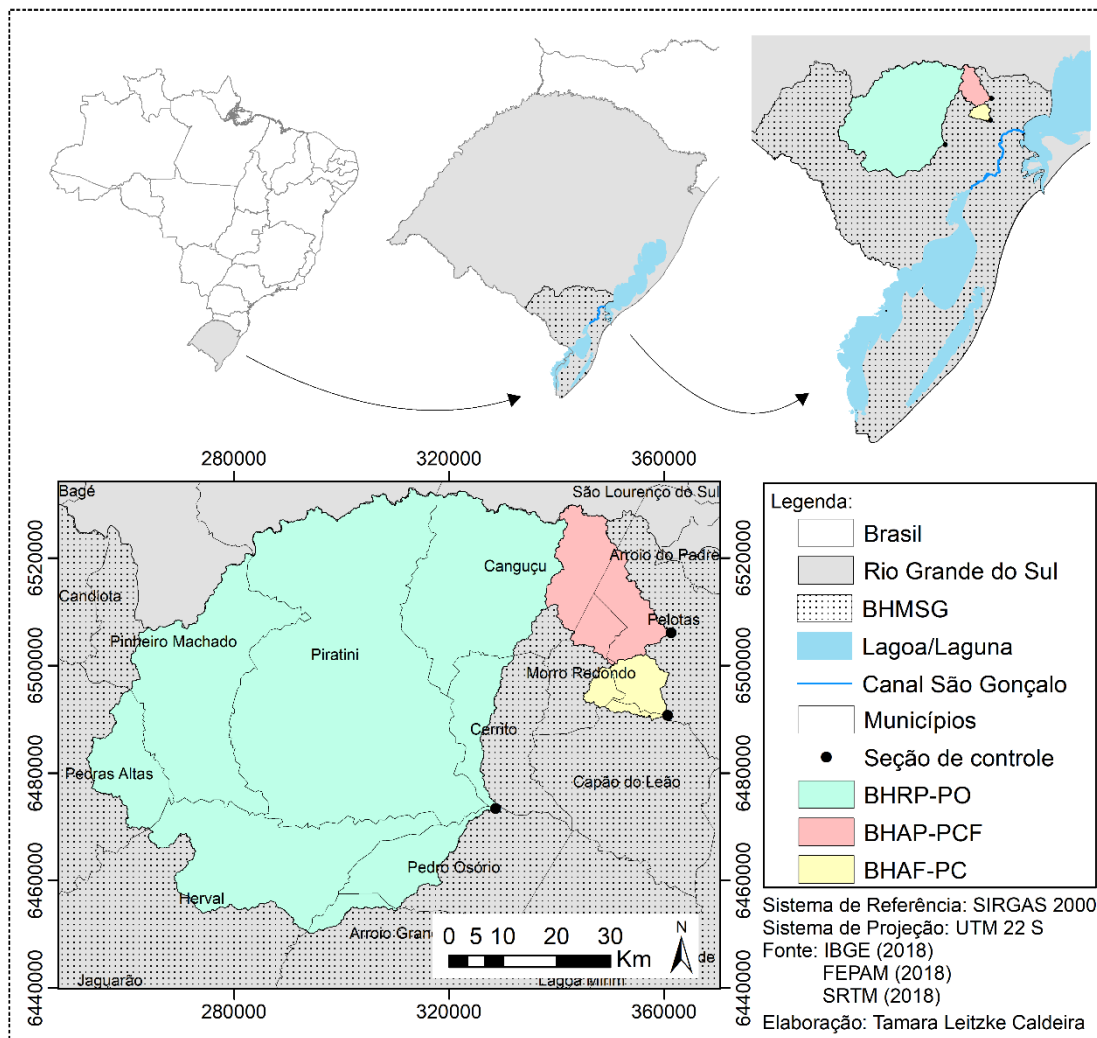


Figura 3 – Localização da porção brasileira da bacia hidrográfica da Lagoa Mirim-São Gonçalo (BHSMG) e das sub-bacias do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (Bhaf-PC).

3.2. Base de dados espaciais

A base de dados espaciais para as bacias hidrográficas que compõem a área de estudo foi definida a partir das informações requeridas pelo modelo hidrológico

LASH, tendo sido levantados dados de relevo, solo e uso e cobertura do solo, basicamente.

3.2.1. Dados do relevo

No que concerne ao relevo, foi empregado o Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pela *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 m, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) junto ao projeto TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (INPE, 2018a). A partir deste MDE, definiu-se o MDE Hidrologicamente Consistente (MDE-HC), no ambiente do SIG ArcGIS 10.5, empregando a ferramenta “Fill” para preenchimento de depressões espúrias. Para a área de estudo, o referido MDE-HC pode ser visualizado na Figura 4.

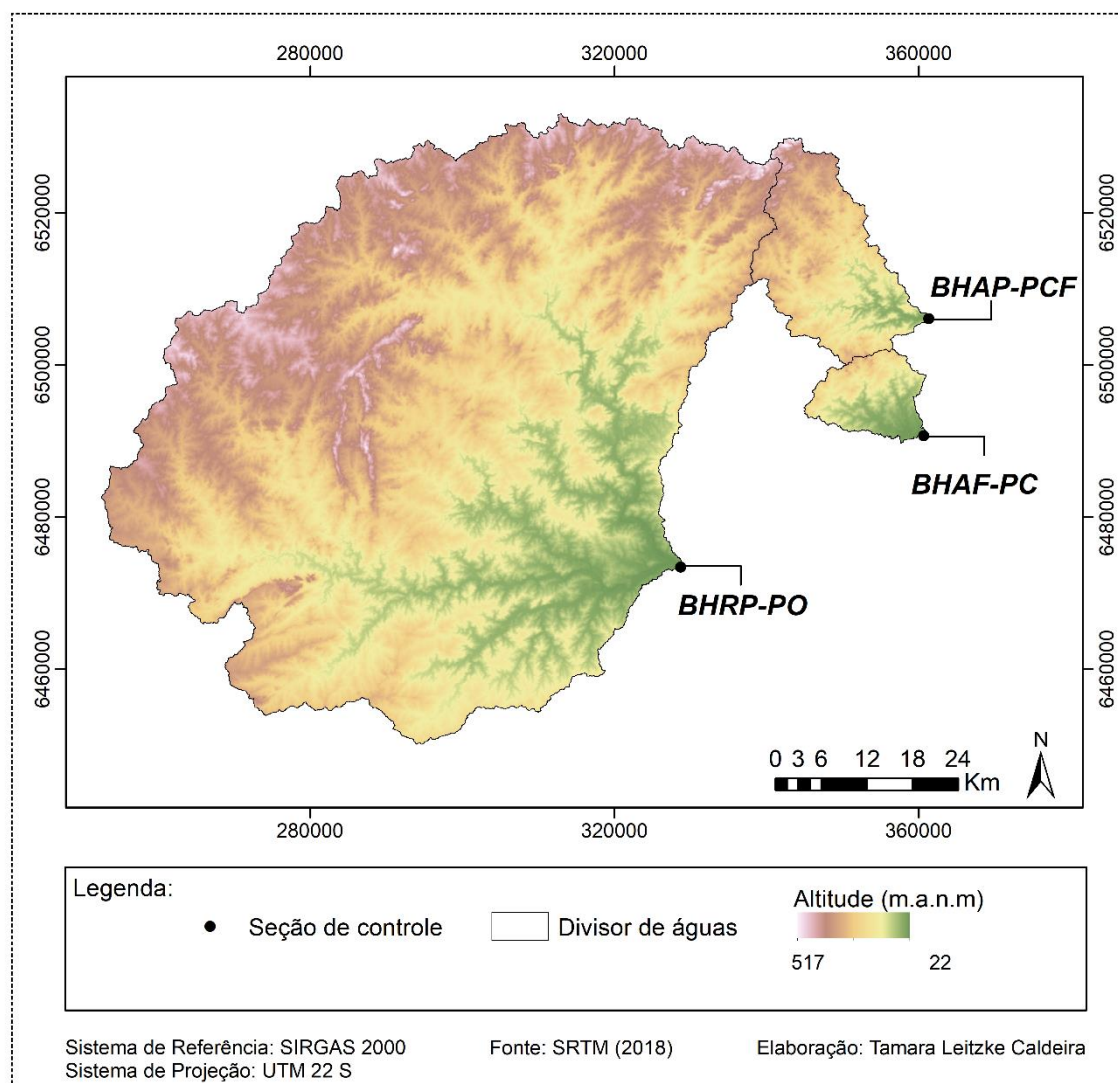


Figura 4 – Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDE-HC) para as bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).

Pode-se visualizar na Figura 4 que, na área de estudo, as altitudes mais elevadas ocorrem na região de cabeceira da BHRP-PO e da BHAP-PCF. A BHAP-PCF tem seu ponto mais elevado à 517m.a.n.m, enquanto seu exutório encontra-se à 37m.a.n.m, resultando num desnível de 480m, bastante próximo àquele verificado na BHRP-PO, uma vez que o ponto mais elevado desta bacia está à 503m.a.n.m. e o exutório à 22m.a.n.m. Já a BHAF-PC tem seu ponto mais elevado e o exutório à 345 e 27m.a.n.m, respectivamente, resultando num desnível menor, da ordem de 318m.

A partir do MDE-HC (Figura 4), ainda em ambiente do SIG ArcGIS 10.5, foram elaborados os mapas de: i) declividade do terreno, empregando a ferramenta “Slope”; ii) direção de fluxo, com a ferramenta “Flow Direction”; e iii) acúmulo de fluxo, com a ferramenta “Flow Accumulation”.

Na Figura 5 pode-se visualizar o mapa de declividade do terreno para a área de estudo. Foi empregada, para efeitos visuais, a classificação proposta pela EMBRAPA (1979), a qual indica relevo plano para declividades de 0 a 3%, suave-ondulado, para 3 a 8%, ondulado, de 8 a 20%, forte-ondulado, para 20 a 45%, montanhoso, de 45 a 75% e forte-montanhoso, para declividades superiores à 75%.

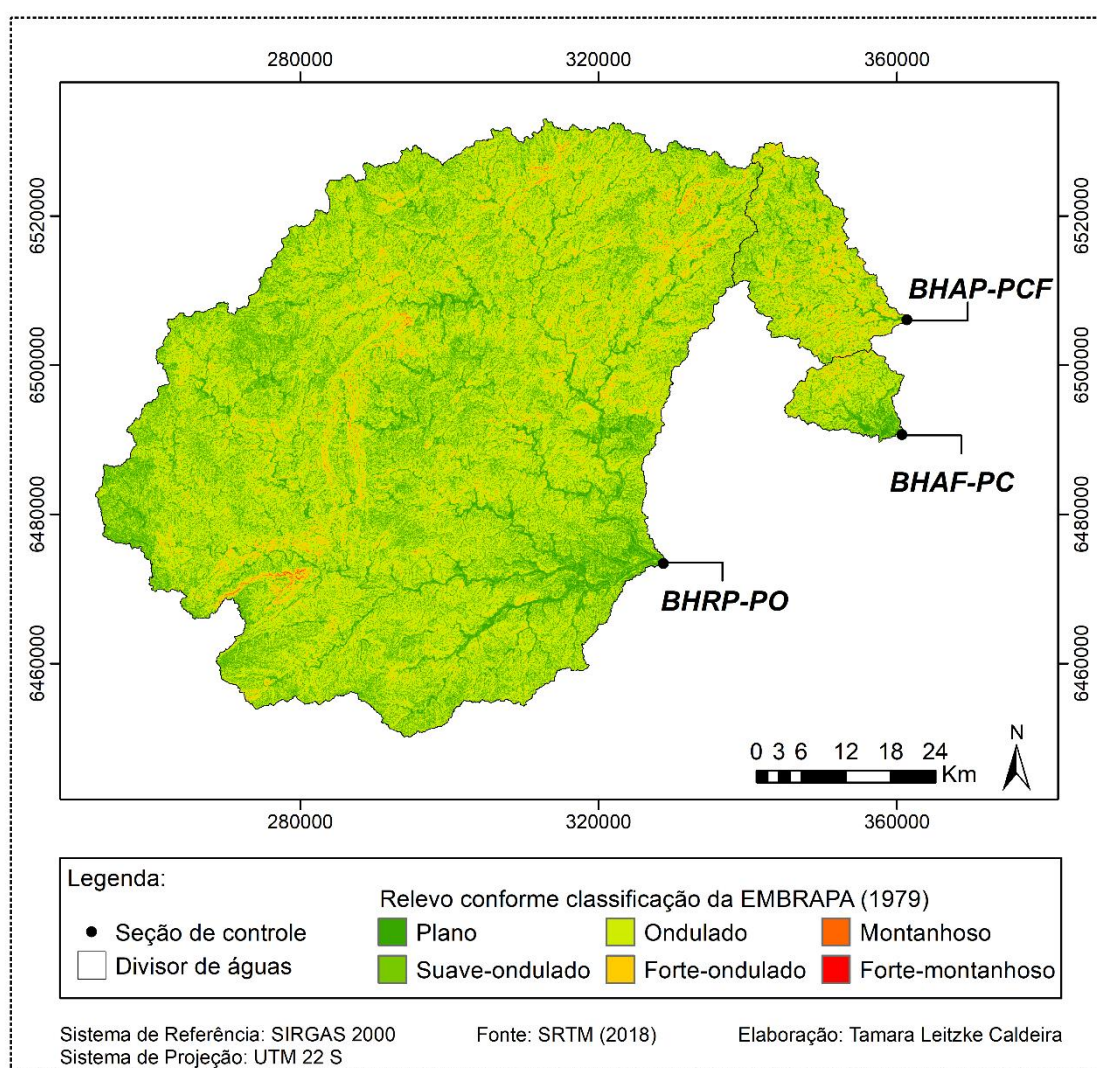


Figura 5 – Declividade do terreno de acordo com a classificação da EMBRAPA (1979) para as bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).

A declividade média do terreno verificada na BHRP-PO foi de 10,2%, enquanto que na BHAP-PCF foi de 12%, e na BHAF-PC, foi de 9,9%, enquadrando o relevo como ondulado, em média. Na região baixa das bacias, verifica-se (Figura 5) relevo plano a suave-ondulado, especialmente na BHAF-PC, enquanto que relevo montanhoso a forte montanhoso é mais observado na BHAP-PCF e na BHRP-PO. Esta questão pode ser melhor elucidada observando-se os dados da Tabela 2, os quais indicam o percentual da área de cada bacia ocupado por cada classe distinta de declividade do terreno.

Tabela 2 – Área da bacia hidrográfica, em percentual, compreendida por cada classe de declividade do terreno, conforme classificação sugerida por EMBRAPA (1979)

Classe	Declividade (%)	Área (%) compreendida pela classe		
		BHRP-PO	BHAP-PCF	BHAF-PC
Plano	0 – 3	9,41	7,54	12,95
Suave-ondulado	3 – 8	32,33	26,69	29,99
Ondulado	8 – 20	51,08	51,90	48,97
Forte-ondulado	20 – 45	7,01	13,70	8,01
Montanhoso	45 – 75	0,13	0,20	0,07
Forte-montanhoso	>75	0,04	0,00	0,00

BHRP-PO = Bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório”; BHAP-PCF = Bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias”; BHAF-PC = Bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros”

Os mapas de direção e acúmulo de fluxo, derivados do MDE-HC, foram empregados para determinação, em ambiente do SIG ArcGIS 10.5, da rede de drenagem numérica. Este procedimento foi realizado empregando a “Raster Calculator”, indicando um valor mínimo de pixels drenantes para que um pixel qualquer seja considerado parte constituinte da rede de drenagem. Para a BHAP-PO, este limiar foi de 2.778 pixels (250 ha), enquanto que para a BHAP-PCF foi de 8.334 pixels (750 ha), e para a BHAF-PC, de 66.667 pixels (6.000 ha), tendo sido estes valores definidos de modo a aproximar a rede de drenagem numérica da rede de drenagem obtida da base cartográfica do Rio Grande do Sul, na escala de 1:50.000 (HASENACK e WEBER, 2010). Com a rede de drenagem numérica estabelecida, pode-se delimitar as sub-bacias hidrográficas utilizando a ferramenta “Watershed”. Para a área de estudo, a rede de drenagem numérica e as sub-bacias hidrográficas podem ser visualizadas na Figura 6.

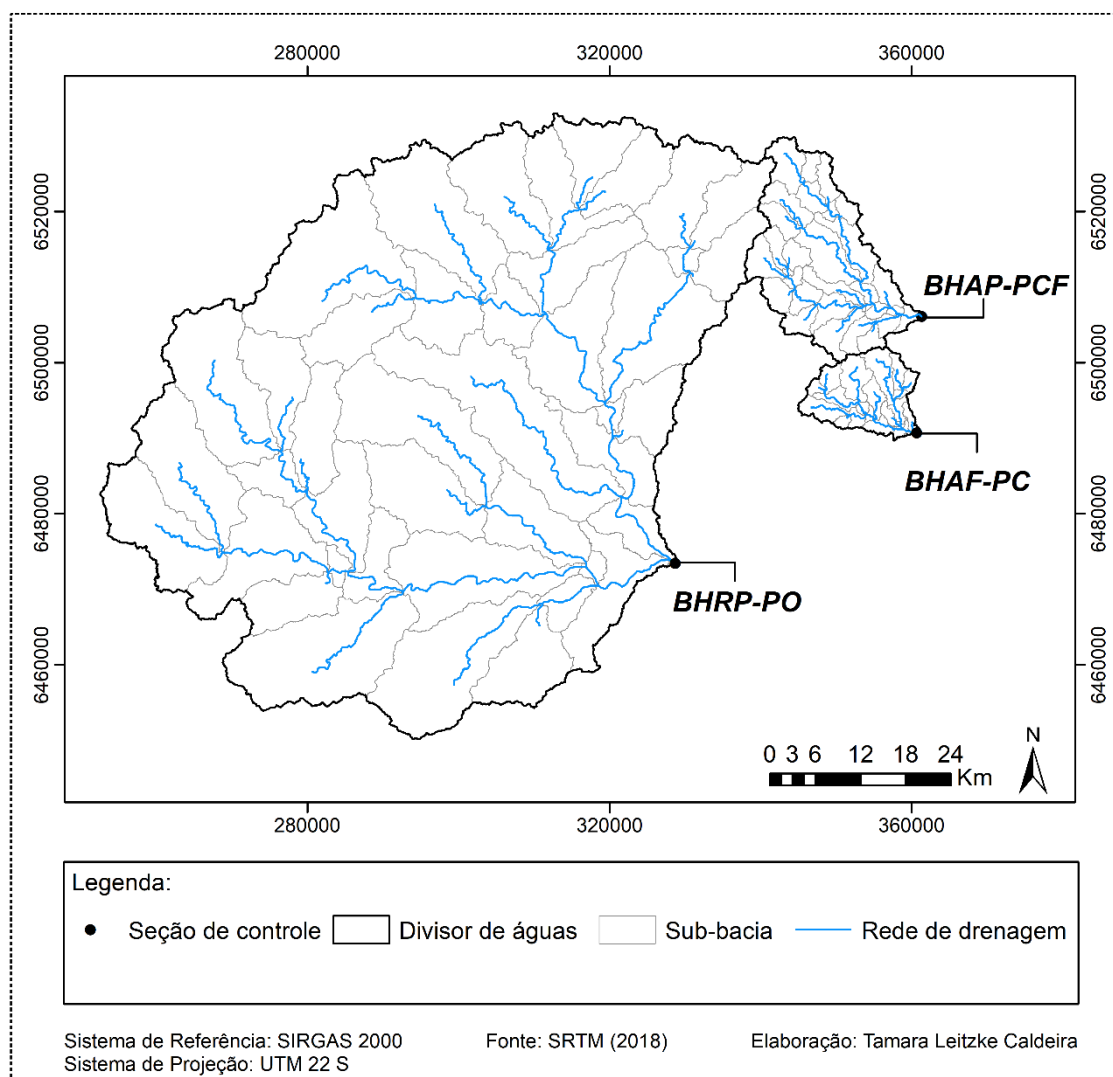


Figura 6 – Sub-bacias hidrográficas e rede de drenagem numérica definidas para as bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).

Na versão do modelo hidrológico LASH empregada neste estudo (CALDEIRA, 2016), a sub-bacia hidrográfica é a unidade de análise dos processos hidrológicos e de definição das variáveis médias associadas ao relevo, solo e uso do solo. Por este motivo, as Figuras 7, 8 e 9 permitem visualizar com maior detalhamento as sub-bacias delimitadas para a BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC, respectivamente. Para a BHRP-PO foram delimitadas 43 sub-bacias, enquanto que para a BHAP-PCF, 31 sub-bacias, e para a BHAF-PC, 21 sub-bacias.

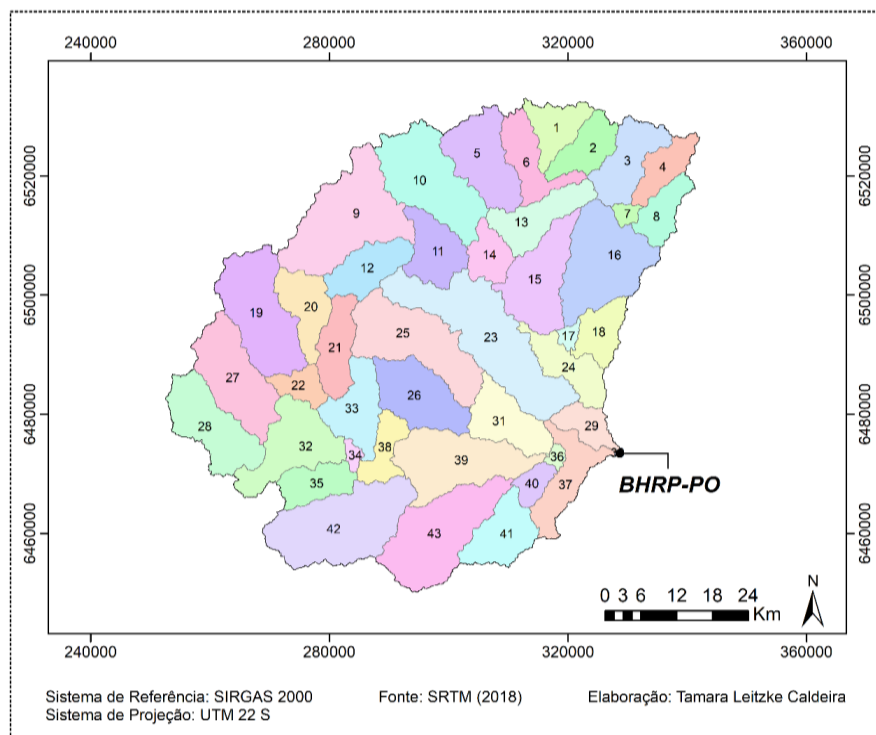


Figura 7 – Sub-bacias hidrográficas delimitadas a partir da rede de drenagem numérica e do limiar mínimo de 6.000 ha de área de drenagem para a bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle "Pedro Osório" (BHRP-PO).

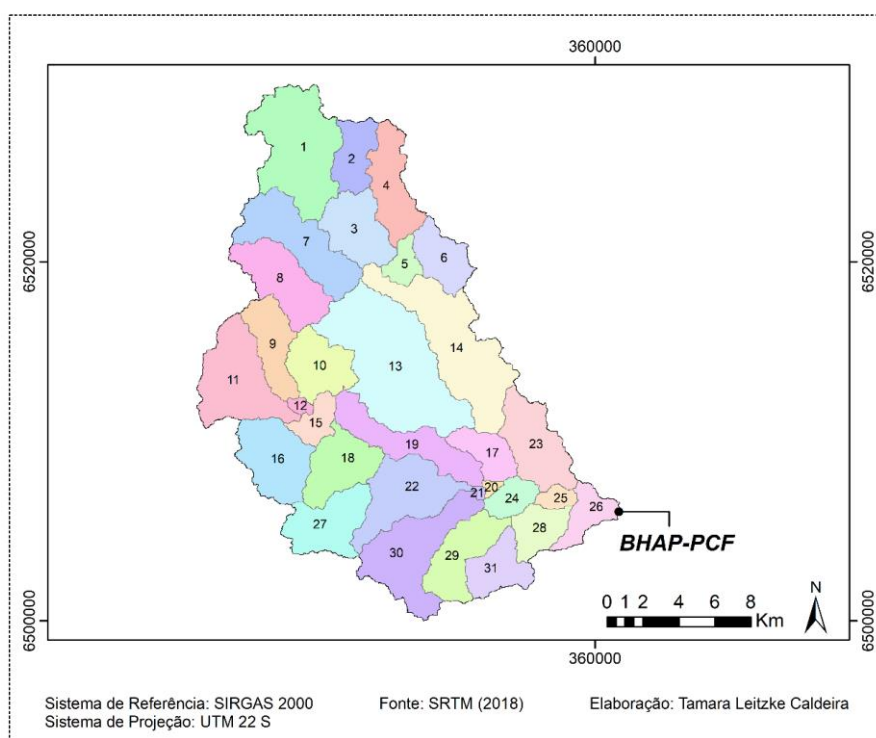


Figura 8 - Sub-bacias hidrográficas delimitadas a partir da rede de drenagem numérica e do limiar mínimo de 750 ha de área de drenagem para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle "Ponte Cordeiro de Farias" (BHAP-PCF).

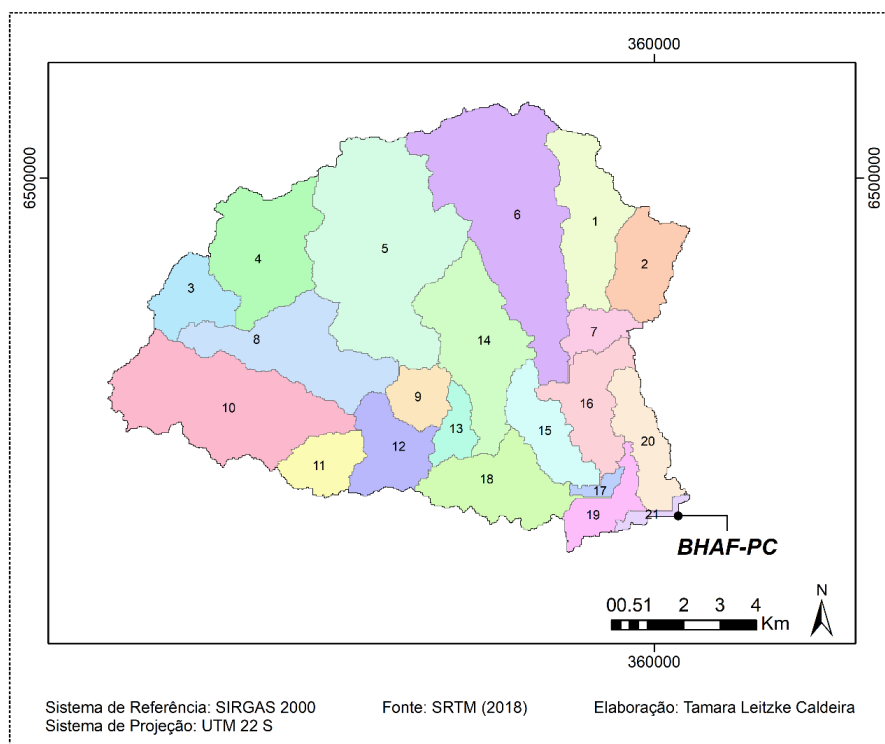


Figura 9 - Sub-bacias hidrográficas delimitadas a partir da rede de drenagem numérica e do limiar mínimo de 250 ha de área de drenagem para a bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).

Para cada sub-bacia hidrográfica, foram levantadas características do relevo necessárias à modelagem hidrológica no LASH, a saber: área, latitude do centroide e altitude média, determinadas no SIG ArcGIS 10.5, e tempo de concentração, calculado pela equação de Kirpich (Equação 1).

$$T_c = 57 \cdot L^{1,155} \cdot H^{-0,385} \quad (1)$$

onde T_c é o tempo de concentração da sub-bacia (min), L é o comprimento do curso d'água principal da sub-bacia (km) e H é o desnível do curso d'água principal (m), do ponto mais distante em relação ao exutório da sub-bacia, tendo sido estes parâmetros determinados no SIG ArcGIS 10.5. Tais características podem ser visualizadas na Tabela 3 para a BHRP-PO, na Tabela 4 para a BHAP-PCF, e na Tabela 5 para a BHAF-PC.

Tabela 3 - Variáveis associadas ao relevo, determinadas a partir da base de dados espacial, para a Bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO)

Sub-bacia	Área (km ²)	Latitude do centroide (graus decimas)	Tempo de concentração (min)	Altitude média (m.a.n.m)
1	70,91	-31,37	201,20	325,41
2	73,69	-31,40	210,73	319,23
3	104,24	-31,42	219,73	340,45
4	63,30	-31,43	208,80	337,57
5	138,97	-31,41	318,12	303,26
6	87,56	-31,41	231,80	293,67
7	13,59	-31,50	67,63	210,42
8	61,39	-31,50	204,91	264,45
9	249,41	-31,50	436,85	346,94
10	199,86	-31,44	381,46	326,98
11	92,97	-31,55	184,69	248,90
12	89,68	-31,57	255,83	312,93
13	100,00	-31,50	295,06	225,49
14	56,63	-31,56	167,48	204,05
15	151,31	-31,60	317,35	179,03
16	204,65	-31,57	396,17	200,47
17	12,25	-31,68	84,90	93,81
18	66,12	-31,68	204,94	146,68
19	195,65	-31,64	419,24	343,58
20	87,91	-31,63	280,57	358,18
21	84,62	-31,69	273,25	296,74
22	41,87	-31,75	171,17	241,18
23	293,75	-31,68	623,00	190,76
24	83,96	-31,73	277,39	104,94
25	202,89	-31,69	416,06	255,86
26	134,36	-31,77	255,88	209,30
27	163,35	-31,74	380,78	306,01
28	147,32	-31,81	324,70	293,31
29	50,11	-31,82	201,95	61,29
30	0,56	-31,86	29,57	25,65
31	104,76	-31,81	306,42	99,72
32	147,22	-31,84	390,00	214,01
33	102,26	-31,79	260,91	233,25
34	11,10	-31,86	58,39	138,70
35	71,12	-31,90	215,27	235,15
36	10,18	-31,87	125,85	53,07
37	97,71	-31,90	354,14	75,31
38	56,41	-31,85	232,90	166,79
39	187,24	-31,87	490,25	118,50
40	31,97	-31,91	150,84	72,03
41	99,02	-31,98	270,48	124,39

42	245,30	-31,96	426,05	215,92
43	214,10	-31,98	450,64	158,30

Tabela 4 - Variáveis associadas ao relevo, determinadas a partir da base de dados espacial, para a Bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF)

Sub-bacia	Área (km²)	Latitude do centroide (graus decimas)	Tempo de concentração (min)	Altitude média (m,a,n,m)
1	25,98	-31,39	89,46	55,75
2	7,86	-31,39	211,64	76,26
3	12,20	-31,43	115,30	59,52
4	12,18	-31,41	188,13	85,19
5	3,63	-31,45	185,49	116,07
6	8,42	-31,44	366,33	95,50
7	18,00	-31,43	326,64	70,23
8	14,57	-31,45	289,55	102,86
9	10,13	-31,49	307,75	93,39
10	10,96	-31,50	247,27	65,96
11	19,27	-31,50	249,67	52,77
12	1,05	-31,52	320,84	115,60
13	39,16	-31,50	302,00	103,84
14	28,46	-31,49	283,44	91,49
15	4,63	-31,52	256,91	81,51
16	14,61	-31,54	277,67	107,99
17	6,76	-31,54	223,48	16,06
18	12,11	-31,55	214,11	170,31
19	14,11	-31,54	200,35	175,57
20	0,69	-31,56	240,28	43,88
21	0,39	-31,56	252,20	72,07
22	16,69	-31,56	101,64	79,06
23	14,11	-31,54	195,78	68,61
24	4,74	-31,56	180,25	133,53
25	2,30	-31,56	78,77	20,15
26	6,21	-31,57	85,02	11,69
27	12,84	-31,58	150,68	128,26
28	7,07	-31,58	124,27	78,84
29	12,03	-31,59	84,43	53,32
30	20,09	-31,59	86,98	34,04
31	8,54	-31,60	195,17	55,21

Tabela 5 – Variáveis associadas ao relevo, determinadas a partir da base de dados espacial, para a Bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC)

Sub-bacia	Área (km ²)	Latitude do centroide (graus decimas)	Tempo de concentração (min)	Altitude média (m.a.n.m)
1	6,96	-31,64	66,81	139,64
2	4,48	-31,65	49,19	107,44
3	3,56	-31,66	40,55	204,23
4	8,61	-31,64	61,67	209,61
5	19,21	-31,64	94,89	188,71
6	18,02	-31,64	122,57	165,91
7	2,01	-31,66	53,19	71,86
8	8,74	-31,67	89,75	129,35
9	2,44	-31,68	41,26	70,21
10	13,90	-31,68	92,54	143,94
11	3,00	-31,70	38,80	97,57
12	4,39	-31,69	51,36	75,73
13	1,76	-31,69	37,68	56,58
14	9,32	-31,67	88,12	106,81
15	4,12	-31,69	71,48	55,21
16	4,85	-31,68	86,75	51,90
17	0,58	-31,70	29,02	31,05
18	6,48	-31,70	95,44	49,36
19	2,56	-31,71	79,01	33,15
20	3,84	-31,69	73,25	45,09
21	0,57	-31,71	52,72	29,41

3.2.1. Solos

A variação espacial dos solos na área de estudo foi extraída do Mapa de Solos da Região do Conselho Regional de Desenvolvimento da Região Sul (COREDE-SUL). Este mapa, em formato “shapefile”, foi elaborado pelo Laboratório de Planejamento Ambiental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Clima Temperado, tendo em vista os estudos realizados por Cunha, Silveira e Severo (2006). As classes de solo, especificadas até o segundo nível categórico, podem ser visualizadas na Figura 10.

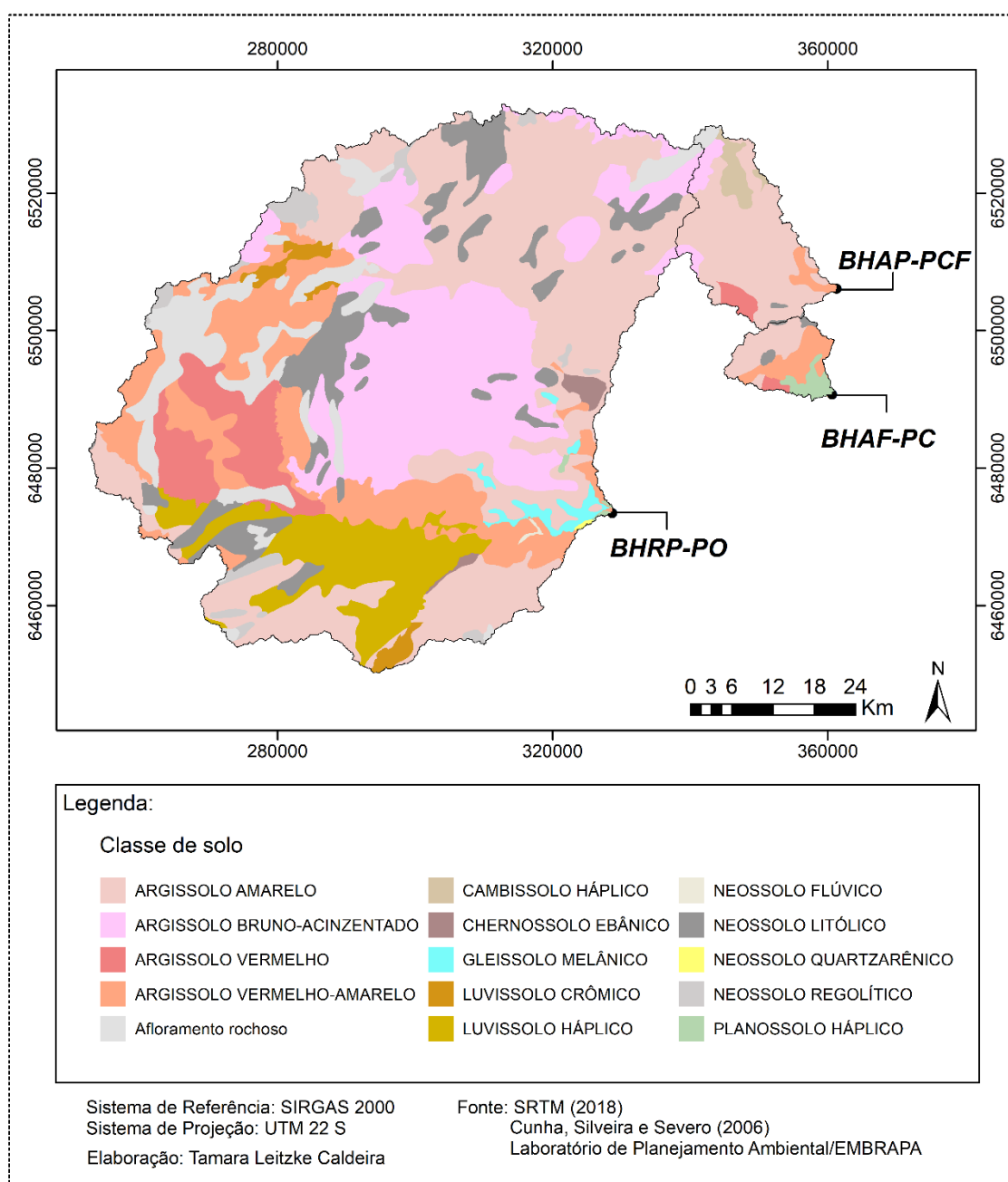


Figura 10 – Distribuição espacial das classes de solo, até o segundo nível categórico, encontradas nas bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).

Pode-se verificar, na Figura 10, que a área de estudo apresenta predominância de Argissolo Amarelo, Argissolo Bruno-Acinzentado e Argissolo Vermelho-Amarelo. Estas classes de solo juntas compreendem 67,77% da área de estudo, e são seguidas por Neossolo Litólico, Luvisso Háplico, Afloramento rochoso e Argissolo Vermelho, sendo as demais pouco expressivas (Tabela 6).

Tabela 6 - Percentual da área de cada bacia hidrográfica ocupado por cada classe de solo

Classe de solo	BHRP-PO (%)	BHAP-PCF (%)	BHAF-PC (%)
Argissolo Amarelo	31,55	72,49	38,98
Argissolo Bruno-Acinzentado	21,61	6,84	-
Argissolo Vermelho-Amarelo	13,19	4,39	35,49
Neossolo Litólico	8,29	0,79	5,09
Luvissolo Háplico	8,04	-	-
Afloramento rochoso	7,54	2,07	-
Argissolo Vermelho	5,21	4,69	4,51
Neossolo Regolítico	1,86	-	-
Luvissolo Crômico	1,09	-	-
Gleissolo Melânico	0,90	-	-
Cambissolo Háplico	-	8,73	-
Chernossolo Ebânico	0,55	-	-
Planossolo Háplico	0,08	-	15,93
Neossolo Flúvico	0,05	-	-
Neossolo Quartzarênico	0,04	-	-

BHRP-PO = Bacia Hidrográfica do Rio Piratini à montante da seção de controle Pedro Osório; BHAP-PCF = Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas à montante da seção de controle Ponte Cordeiro de Farias; BHAF-PC = Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata à montante da seção de controle Passo dos Carros

Para cada classe de solo verificada nas bacias hidrográficas, o modelo hidrológico LASH requer dados de: i) profundidade do solo (Z); ii) umidade do solo no ponto da saturação (θ_s); e iii) umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}). Os valores de referência para cada classe foram obtidos da literatura.

Aquino (2014) realizou amostragem de solo na BHAP-PCF e na BHAF-PC, tendo demarcado 100 pontos equidistantes ao longo de duas transeções, sendo de 25 km de extensão para a BHAP-PCF (Figura 11a) e de 15 km para a BHAF-PC (Figura 11c). Em cada ponto, Aquino (2014) determinou diversos atributos do solo, dentre eles a curva de retenção de água no solo, da qual se extraiu os valores de θ_s e θ_{PMP} , considerando, respectivamente, os conteúdos de água retidos às tensões de 0 kPa e 1.500 kPa (REICHARDT e TIMM, 2012).

Soares (2017) avaliou a variabilidade espacial de atributos físico-hídricos na bacia hidrográfica da sanga Ellert, uma sub-bacia de cabeceira da BHAP-PCF. Sobre a área da bacia (0,66 km²), o autor definiu uma malha de 50 x 75m, resultando em 106 pontos amostrais (Figura 11b). Do estudo de Soares (2017), extraiu-se valores de θ_s e θ_{PMP} .

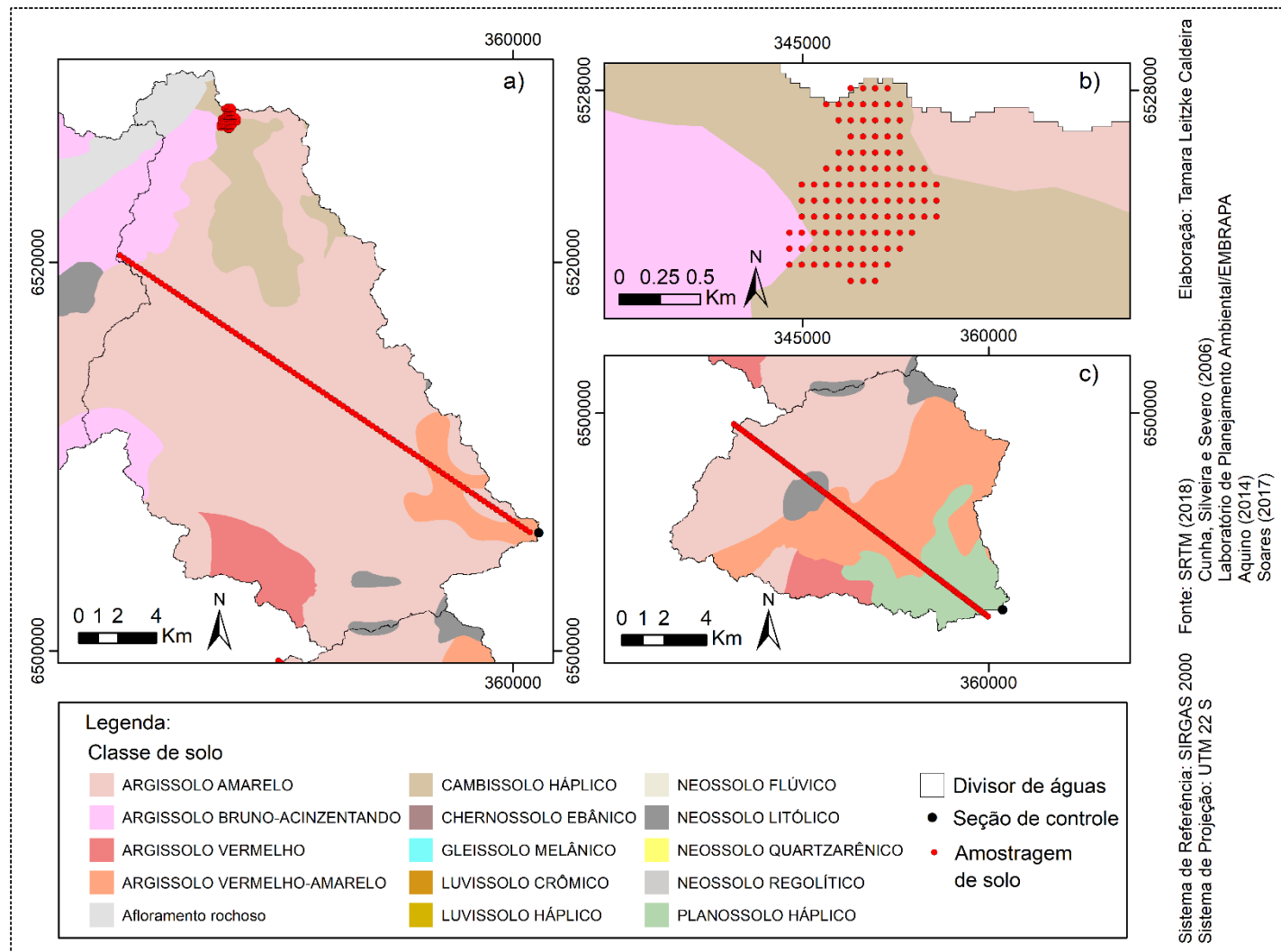


Figura 11 - Pontos de amostragem de solo definidos por Aquino (2014) (a, c) e Soares (2017) (b), sobre a área de estudo, empregados para determinação das variáveis necessárias à modelagem hidrológica.

Para as classes de solo não contempladas nos estudos de Aquino (2014) e Soares (2017), especialmente àquelas encontradas na BHRP-PO, os valores de θ_s e θ_{PMP} foram obtidos junto ao HYBRAS – Hydrophysical Database for Brazilian Soils (OTTONI *et al.*, 2018). O HYBRAS é um banco de dados hidrofísicos de solos brasileiros fruto de um projeto desenvolvido e financiado pelo Departamento de Hidrologia da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Os valores de θ_s e θ_{PMP} apresentados no HYBRAS foram obtidos por Ottoni *et al.* (2018).

Ainda assim, valores de referência de θ_s e θ_{PMP} para Neossolo Quartzarênico, Luvisolo Háplico e Luvisolo Crômico tiveram de ser obtidos na literatura geral. Para Neossolo Quartzarênico, empregou-se dados obtidos no estudo de Silva *et al.* (2006) e, para os Luvisolos Háplico e Crômico, de Silva (2008).

Tabela 7 - Valores empregados, para cada classe de solo, de umidade no ponto de saturação (θ_s) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e referência bibliográfica consultada

Classe de solo	θ_s (m ³ .m ⁻³)	θ_{PMP} (m ³ .m ⁻³)	Referência
Argissolo Amarelo	0,458	0,179	Aquino (2014)
Argissolo Bruno-Acinzentado	0,471	0,195	Aquino (2014)
Argissolo Vermelho-Amarelo	0,459	0,192	Aquino (2014)
Neossolo Litólico	0,470	0,165	Aquino (2014)
Luvisolo háplico	0,419	0,143	Silva (2008)
Afloramento rochoso	-	-	-
Argissolo Vermelho	0,459	0,192	Idem ao AVA
Neossolo Regolítico	0,345	0,106	Ottoni <i>et al.</i> (2018)
Luvisolo Crômico	0,419	0,143	Silva (2008)
Gleissolo Melânico	0,418	0,205	Ottoni <i>et al.</i> (2018)
Cambissolo Háplico	0,427	0,100	Soares (2017)
Chernossolo Ebânico	0,421	0,302	Ottoni <i>et al.</i> (2018)
Planossolo Háplico	0,405	0,175	Aquino (2014)
Neossolo Flúvico	0,425	0,221	Ottoni <i>et al.</i> (2018)
Neossolo Quartzarênico	0,444	0,097	Silva <i>et al.</i> (2006)

Quanto à profundidade do solo, os valores empregados para cada classe (Tabela 8) foram definidos do seguinte modo:

- i) o mapa de solos apresentado na Figura 10 foi comparado, visualmente, aos mapas municipais de solos e unidades

- geomorfológicas elaborados pelo pesquisador Noel Gomes da Cunha, da EMBRAPA-CPACT, e colaboradores, a partir do reconhecimento dos solos da BHMSG realizado por Sombroek (1969);
- ii) para áreas representativas de cada classe de solo, buscou-se identificar a correspondência com os mapas de solos e de unidades geomorfológicas;
 - iii) nos documentos que descrevem os mapas de solo e de unidades geomorfológicas, incluindo perfis representativos, buscou-se informações sobre a profundidade do solo;
 - iv) havendo mais de um perfil disponível para a classe de solo analisada, valores médios foram adotados.

Tabela 8 - Profundidade do solo (Z_{SOLO}) adotada para as classes encontradas na área de estudo e referência bibliográfica consultada

Classe de solo	Z_{SOLO} (cm)	Referência
Argissolo Amarelo	108	Cunha et al. (1997a,b) e Cunha, Silveira e Severo (1996b)
Argissolo Bruno-Acinzentado	124	Cunha et al. (1997b)
Argissolo Vermelho-Amarelo	146	Cunha e Silveira (1996c)
Neossolo Litólico	30	Cunha, Silveira e Severo (1996b) e Cunha et al. (1997b)
Luvissolo Háplico	117	Cunha, Silveira e Severo (1996b)
Afloramento rochoso	-	-
Argissolo Vermelho	162	Cunha e Silveira (1996b)
Neossolo Regolítico	60	Cunha et al. (1997b)
Luvissolo Crômico	75	Cunha et al., (1998)
Gleissolo Melânico	100	Cunha et al. (1997b)
Cambissolo Háplico	70	Cunha et al. (1997a,b)
Chernossolo Ebânico	110	Cunha e Silveira (1996a)
Planossolo Háplico	160	Cunha e Silveira (1996 a,b)
Neossolo Flúvico	130	Cunha, Silveira e Severo (1996a)
Neossolo Quartzarênico	200	Cunha e Silveira (1996a)

3.2.1. Uso e cobertura do solo

A imagem empregada para mapeamento do uso e cobertura do solo na área de estudo, obtida no Banco de Imagens da Divisão de Geração de Imagens do

INPE (INPE, 2018b), foi capturada através da missão espacial *Land Remote Sensing Satellite* (LandSat), mais especificamente pelo satélite LandSat 7 com órbita 222 e ponto 82.

A cena em questão data de 11 de novembro de 1999, tendo sido escolhida porque representaria de forma satisfatória o uso e cobertura do solo nos períodos de calibração e de validação, além de possuir baixa interferência por nebulosidade.

O software ENVI (*Environment for Visualizing Images*) foi empregado como ferramenta para classificação supervisionada pelo método da máxima verossimilhança, conforme recomendações de Richards (2013). Após a classificação, sua acurácia foi verificada pela matriz de confusão, pelos erros de comissão e omissão e pelo índice Kappa.

Sendo assim, a variação espacial do uso e cobertura do solo para a área de estudo pode ser visualizada na Figura 12, enquanto que os percentuais das áreas de cada bacia hidrográfica ocupados pelas diferentes clases, na Tabela 9. Considerando que a unidade de análise deste estudo é a sub-bacia hidrográfica, o Apêndice B permite visualizar a variação espacial de uso e cobertura do solo, em área percentual, para cada sub-bacia da BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC.

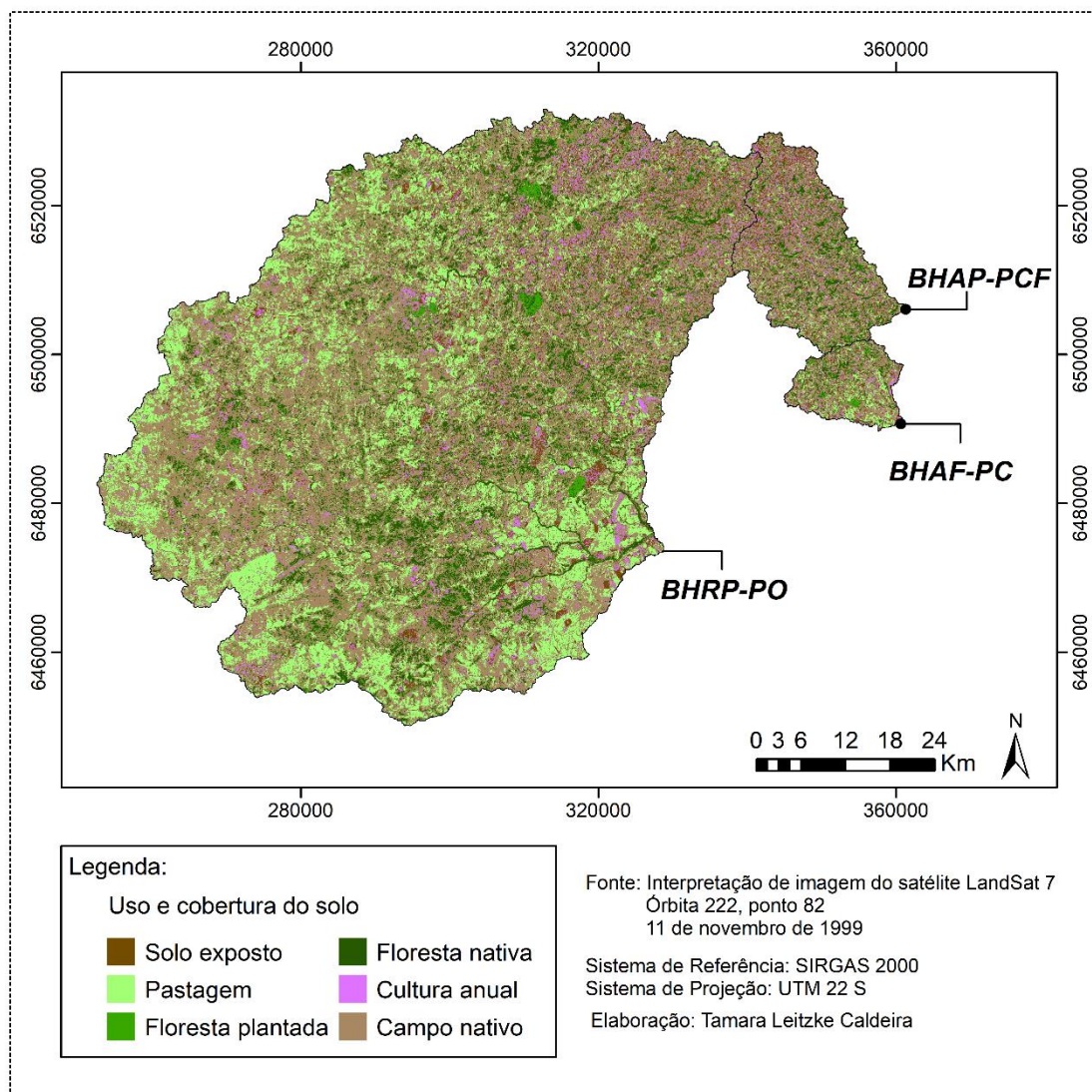


Figura 12 – Variação espacial do uso e cobertura do solo nas bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).

Tabela 9 – Área percentual das bacias hidrográficas ocupada pelas diferentes classes de uso e cobertura do solo

Uso e cobertura	Área (%) ocupada na		
	BHRP-PO	BHAP-PCF	BHAF-PC
Solo exposto	4,83	12,57	8,53
Pastagem	21,39	6,75	15,56
Floresta plantada	4,47	6,16	6,06
Floresta nativa	12,74	17,05	14,42
Cultura anual	5,27	11,92	8,35
Campo nativo	51,30	45,55	47,09

BHRP-PO = Bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório”; BHAP-PCF = Bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias”; BHAF-PC = Bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros”

Percebe-se que a área de estudo é predominante agrícola, não havendo ocorrência de significativos aglomerados urbanos. A cobertura do solo mais evidente nas três bacias hidrográficas é o campo nativo, seguido por áreas de pastagem, na BHRP-PO e na BHAF-PC, e por floresta nativa, na BHAP-PCF. Sobre as culturas anuais, observa-se na região o cultivo de arroz, soja, milho e fumo.

Para cada classe de uso e cobertura do solo, o modelo LASH requer dados de albedo, índice de área foliar (IAF), altura de planta, resistência estomática e de profundidade do sistema radicular, havendo a possibilidade de considerar a variabilidade temporal desses parâmetros ao longo do ano (CALDEIRA, 2016). Os valores dos parâmetros acima mencionados, empregados neste estudo, assim como em Caldeira (2016), podem ser visualizados na (Tabela 10).

Tabela 10 - Valores empregados para quantificar as variáveis atreladas aos usos do solo identificados na área de estudo e referência bibliográfica consultada

Classe de uso	Mês	Albedo	Índice de área foliar (m.m ⁻²)	Altura (m)	Resistência estomática (s.m ⁻¹)	Profundidade do sistema radicular (mm)
Floresta nativa	janeiro	0,13	6,25	10,00	100,00	2000,00
	fevereiro	0,13				
	março	0,14				
	abril	0,15				
	maio	0,16				
	junho	0,17				
	julho	0,18				
	agosto	0,18				
	setembro	0,17				
	outubro	0,16				
	novembro	0,15				
	dezembro	0,14				
Referência		a	b	c	d	e
Cultura anual	janeiro	0,18	5,67	1,50	70,00	500,00
	fevereiro	0,18	2,97	1,50		500,00
	março	0,22	3,99	0,50		600,00
	abril	0,23	3,21	0,50		600,00
	maio	0,24	3,21	0,50		600,00
	junho	0,25	3,21	0,50		600,00
	julho	0,26	1,86	0,50		600,00
	agosto	0,25	1,86	0,50		600,00
	setembro	0,24	1,86	0,50		600,00
	outubro	0,21	1,98	0,32		545,16
	novembro	0,18	4,17	0,65		500,00
	dezembro	0,18	5,87	1,25		500,00
Referência		d	f	f	c	g
Pastagem	janeiro	0,20	3,99	0,50	70,00	600,00
	fevereiro	0,21	3,99			
	março	0,22	3,99			
	abril	0,23	3,21			
	maio	0,24	3,21			
	junho	0,25	3,21			
	julho	0,26	1,86			
	agosto	0,25	1,86			
	setembro	0,24	1,86			
	outubro	0,23	2,67			
	novembro	0,22	2,67			
	dezembro	0,21	2,67			
Referência		d	h	c	c	g
Campo nativo	janeiro	0,20	0,50	0,20	70,00	500,00
	fevereiro	0,21				
	março	0,22				
	abril	0,23				
	maio	0,24				
	junho	0,25				

	julho	0,26				
	agosto	0,25				
	setembro	0,24				
	outubro	0,23				
	novembro	0,22				
	dezembro	0,21				
Referência		d			c	i
Floresta plantada	janeiro	0,13	3,50	5,00	100,00	1500,00
	fevereiro	0,13				
	março	0,14				
	abril	0,15				
	maio	0,16				
	junho	0,17				
	julho	0,18				
	agosto	0,18				
	setembro	0,17				
	outubro	0,16				
	novembro	0,15				
	dezembro	0,14				
Referência		a	j	c	d	E

^aMiranda *et al.* (1996), ^bMarques Filho, Dallarosa e Pachêco (2005), ^cCollischonn (2001), ^dShuttleworth (1993), ^eLima (1986), ^fManfron *et al.* (2003), ^gAllen *et al.* (1998), ^hFagundes *et al.* (2006), ⁱViola (2008), ^jAlmeida e Soares (2003)

3.3. Base de dados temporais

Para compor a base de dados temporais necessários o modelo LASH, foram empregadas séries históricas de vazão, de precipitação e de variáveis meteorológicas.

No que concerne às séries históricas de vazão média diária, estas foram obtidas junto a ANA, através do portal HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas, e correspondem à dados monitorados nas seções de controle da BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC, cuja descrição encontra-se na Tabela 1 e, a localização, nas Figuras 3 e 13.

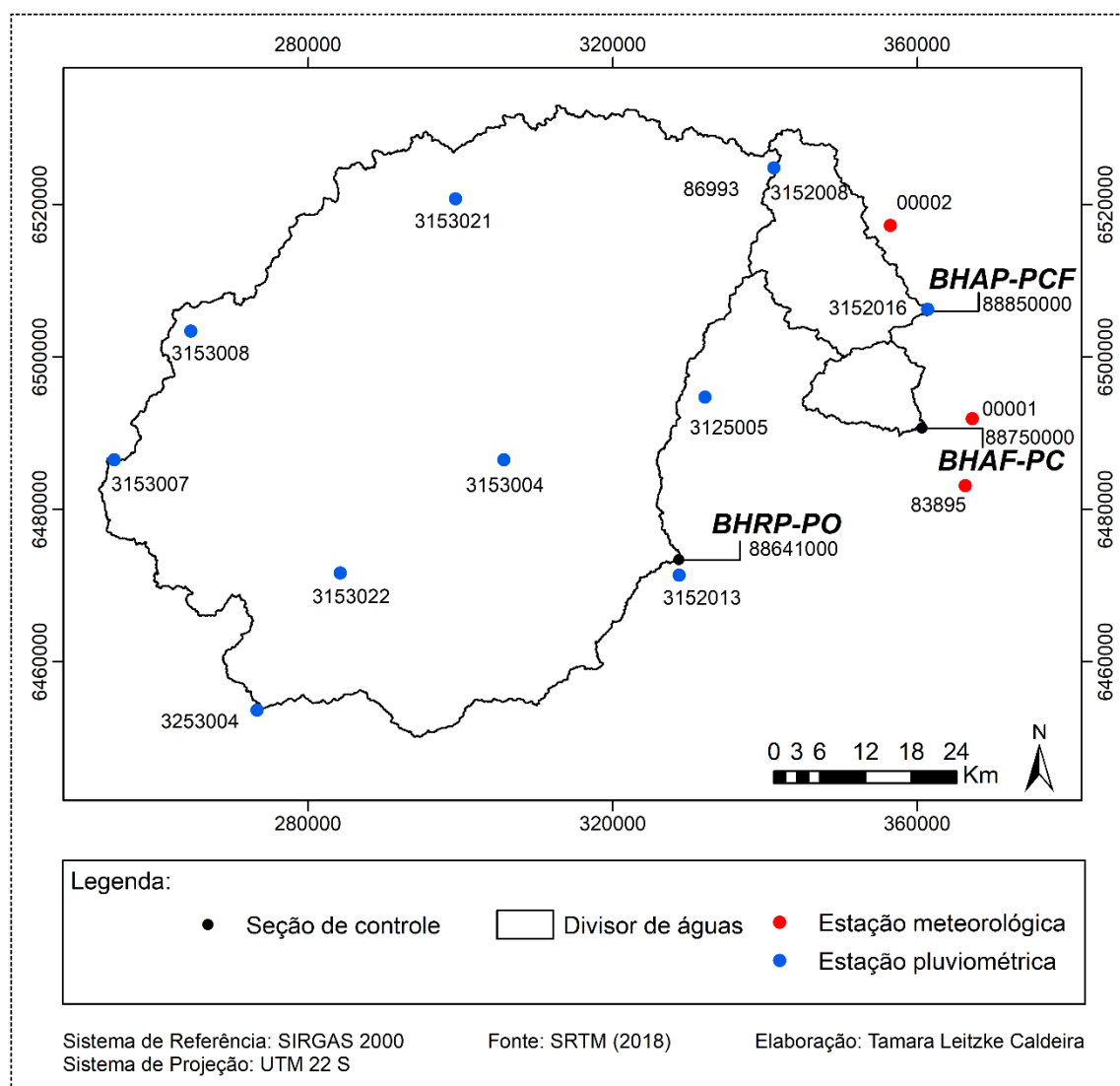


Figura 13 – Pontos de monitoramento das séries históricas hidrometeorológicas empregadas neste estudo.

Dados diários de temperatura mínima e máxima do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e horas de sol foram obtidos junto ao Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet) e ao Centro de Pesquisa Agropecuária Clima Temperado (CPACT) da EMBRAPA. No HidroWeb, por sua vez, foram obtidas as séries históricas de precipitação total diária (Tabela 11). Diferentemente das estações meteorológicas, os pontos de monitoramento de chuva, em maior número, apresentam-se bem distribuídos espacialmente, conforme pode-se observar na Figura 13, principalmente quando analisada a BHRP-PO.

Tabela 11 - Caracterização das estações de monitoramento meteorológico e pluviométrico empregadas no estabelecimento da base de dados temporais para o presente estudo

Nome	Responsável	Código	Variável	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Sede	CPACT/EMBRAPA	01	M/P	-31°42'00"	-52°24'00"	20
Cascata	CPACT/EMBRAPA	02	M/P	-31°28'12"	-52°30'36"	169
Estação Agrometeorológica de Pelotas	INMET - CPACT/EMBRAPA UFPel	83895	M/P	-31°46'48"	-52°24'36"	14
Ponte Cordeiro de Farias	ANA	3452016	P	-31°34'12"	-52°27'36"	40
Canguçu	ANA	3152003	P	-31°24'00"	-52°40'12"	400
Passo da Capela	ANA	3153006	P	-31°7'48"	-53°3'00"	120
Estação Experimental do Piratini	ANA	3153021	P	-31°25'48"	-53°6'36"	340
Pinheiro Machado	ANA	3153008	P	-31°34'48"	-53°28'48"	440
Pedras Altas	ANA	3153007	P	-31°43'48"	-53°35'24"	380
Ferraria	ANA	3153004	P	-31°44'24"	-53°3'00"	200
Cerro Chato	ANA	3153022	P	-31°52'12"	-53°16'48"	100
Herval	ANA	3253004	P	-32°1'48"	-53°24'00"	260
Pedro Osório	ANA	3152013	P	-31°52'48"	-52°48'36"	27
Vila Freire	ANA	3152005	P	-31°40'12"	-52°46'12"	250
Arroio Grande	ANA	3253001	P	-31°14'24"	-53°5'24"	3

M/P = Meteorológica/Pluviométrica; P = Pluviométrica

Tendo em vista a distribuição espacial dos postos de monitoramento pluviométrico e meteorológico, a técnica do “vizinho mais próximo” foi empregada na determinação de quais seriam utilizados para cada bacia hidrográfica. Em outras palavras, determinou-se a distância entre o posto e o centroide da sub-bacia para cada sub-bacia da BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC, definindo-se aqueles postos pluviométrico e meteorológico mais próximos.

3.4. Calibração e validação do modelo hidrológico LASH

A modelagem hidrológica foi conduzida na BHAP-PCF e na BHAF-PC empregando o período de dados observados entre 1994 e 2005, enquanto que na BHRP-PO, de 2007 a 2016. Este período foi definido em função da disponibilidade de séries históricas contínuas – ou com poucos períodos falhos – de vazão, precipitação e dados meteorológicos. Além disso, foi levado em consideração o período do clima presente dos modelos climáticos, que vai de 1961 a 2005.

O período de 1994 e de 2007 – primeiros anos de dados observados – foram utilizados para aquecimento do modelo, pois no início da simulação ocorrem incertezas atreladas ao desconhecimento das condições hidrológicas iniciais, principalmente quanto à umidade do solo. O período de aquecimento de 1 ano é usualmente empregado em simulações com o modelo LASH, conforme pode-se observar em Mello *et al.* (2008), Beskow *et al.* (2016) e Caldeira *et al.* (2019).

Os períodos de 1995 a 2000, para a BHAP-PCF e BHAF-PC, e de 2008 a 2012, para a BHRP-PO, por sua vez, foram empregados na calibração de 7 parâmetros do modelo LASH (BESKOW, MELLO e NORTON, 2011), a saber:

- Coeficiente de abstração inicial (λ), com intervalo de variação entre 0,01 e 0,5;
- Condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo (K_B), com intervalo de variação entre 0 e 6 mm.dia⁻¹;
- Condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial (K_{SS}), com intervalo de variação entre 0 e 250 mm.dia⁻¹;

- Densidade de fluxo máxima para retorno por ascensão capilar (K_{CAP}), com intervalo de variação entre 0 e 5 mm.dia⁻¹;
- Parâmetro do tempo de resposta do reservatório superficial (C_S), com intervalo de variação entre 10 e 100;
- Parâmetro do tempo de resposta do reservatório subsuperficial (C_{SS}), com intervalo de variação entre 10 e 500;
- Parâmetro do tempo de retardo do escoamento de base (C_B), com intervalo de variação entre 10 e 100 dias.

Esses parâmetros foram escolhidos para calibração porque estudos anteriores envolvendo o modelo LASH, tais como Beskow, Mello e Norton (2011) e Viola *et al.* (2013), os indicaram como sendo mais sensíveis.

A estratégia de calibração adotada foi a de ajustar um único valor para cada parâmetro. Para tal, foi empregado o algoritmo de calibração automática *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA) (DUAN, SOROOSHIAN e GUPTA, 1992), inicializado com o intervalo de variação de cada parâmetro, mencionado anteriormente, o critério de parada e a função objetivo a ser utilizada.

Como critério de parada, estabeleceu-se o número máximo de 5.000 iterações. Outros estudos que empregaram o modelo LASH, como Beskow *et al.* (2011) e Beskow *et al.* (2016), adotaram, respectivamente 1.000 e 2.000 iterações como critério de parada.

No que tange à função objetivo, foi escolhida a minimização da raiz quadrada do erro quadrático médio (Root-Mean-Square Error, RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Q_{obs_t} - Q_{est_t})^2} \quad (2)$$

em que Q_{obs_t} é a vazão observada no tempo $t=i$, Q_{est_t} é a vazão estimada no tempo $t=i$ e n é o número de ordenadas do hidrograma.

Com relação à validação do modelo LASH, foi utilizado o *Split Sample Test* (KLEMEŠ, 1986) empregando o período de 2001 a 2005 para a BHAP-PCF e a

BHAF-PC, e de 2013 a 2016 para a BHRP-PO. Nesta etapa, assim como na calibração, procedeu-se uma análise comparativa entre as séries de vazões observadas e estimadas pelo modelo, tendo sido consideradas como medidas estatísticas o Coeficiente de Nash e Sutcliffe (1970) (C_{NS}), sua versão para valores logaritmizados ($C_{NS} \log(Q)$) e o erro relativo da estimativa de vazões (ΔQ).

O C_{NS} (Equação 3) reflete a eficiência do modelo para estimativas mais acertadas em períodos de cheias, segundo Guilhon e Rocha (2007), enquanto que o $C_{NS} \log(Q)$ (Equação 4) possibilita verificar a capacidade do modelo em estimar vazões durante o período de estiagem (BESKOW, 2009).

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - Q_{est_t})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_t} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

$$C_{NS} \log(Q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{obs_t}) - \log(Q_{obs_t}))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{obs_t}) - (\log \bar{Q}_{obs}))^2} \quad (4)$$

em que Q_{obs_t} é a vazão observada no tempo $t=i$, Q_{est_t} é a vazão estimado no tempo $t=i$, $\bar{Q}_{obs}$ é a vazão média observada, e N é o número de ordenadas do hidrograma.

Valores de C_{NS} podem variar de $-\infty$ a 1. De acordo com Motovilov *et al.* (1999), um bom ajuste entre dados observados e estimados é indicado por valores de C_{NS} maiores que 0,75, já um ajuste satisfatório, para valores entre 0,36 e 0,75

O ΔQ (Equação 5), por sua vez, permite analisar se o modelo super ou subestima as estimativas em relação aos valores observados, sendo que valores negativos refletem subestimativa, positivos refletem superestimativa e 0 reflete um ajuste perfeito. Segundo Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003), valores de ΔQ inferiores a 10% representam um ajuste muito bom, entre 10 e 15%, um ajuste bom, entre 15 e 25%, satisfatório, e acima de 25% as estimativas são inadequadas.

$$\Delta Q = \frac{\sum_{t=1}^N Q_{est_t} - \sum_{t=1}^N Q_{obs_t}}{\sum_{t=1}^N Q_{obs_t}} \quad (5)$$

em que Q_{obs_t} é a vazão observada no tempo $t=i$, Q_{est_t} é a vazão estimado no tempo $t=i$ e n é o número de ordenadas do hidrograma.

3.5. Projeções climáticas

As projeções do clima futuro para a área de estudo foram obtidas junto à plataforma PROJETA – Projeções de Mudanças do Clima para a América do Sul Regionalizados pelo Modelo Eta. O PROJETA é um projeto do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que disponibiliza diversas variáveis meteorológicas geradas por *downscaling* pelo MCR Eta para diferentes MCG's , brevemente apresentados na Tabela 12.

O Eta é um MCR desenvolvido através de uma parceria entre a Universidade de Belgrado e o Instituto de Meteorologia de Iugoslávia, tendo sido empregado pela primeira vez pelo CPTEC/INPE em 1997, para subsidiar a previsão do tempo que vinha sendo realizada a partir de um MCG (CHOU, 1996). Atualmente, é utilizado para *downscaling* de MCG's (MESINGER et al., 2012) em inúmeros estudos sobre mudanças climáticas, tais como Chou et al. (2014a,b), Viola et al. (2015), Anjos (2018) e Lyra et al. (2018).

Tabela 12 - Breve descrição dos Modelos Climáticos Globais (MCG's) empregados neste estudo, com ênfase na resolução horizontal e vertical dos mesmos e na forma com que consideram o ano civil, em número de dias, para suas simulações

Modelo Climático Global	Referência*	País		Resolução horizontal	Níveis de resolução vertical	Dias no ano
BESM – <i>Brazilian Earth System Model</i> versão 2.3.1	Nobre et al. (2013)	Brasil	Componente atmosférico	250 km	28	365 ou 366
			Componente oceânico	1° na longitude por, na latitude, 0,25° entre 10°S e 10°N, 1° entre 10-45° S e 10-45° N, e 2° entre 45-90° S e 45-90°N.	50	
CANESM2 – <i>Canadian Earth System Model</i> segunda geração	Arora et al. (2011)	Canadá	2,75° na latitude por 2,8125° na longitude		35	365
HadGEM2-ES – <i>Hadley Centre Global Environmental Model</i> versão 2	Collins et al. (2011)	Inglaterra	Componente atmosférico	1,250° na latitude por 1,875° na longitude	38	360
			Componente oceânico	1/3° nos trópicos e 1° nas latitudes maiores que 30°.	40	
MIROC5 – <i>Model for Interdisciplinary Research on Climate</i> versão 5	Watanabe et al. (2010)	Japão	Componente atmosférico	150 km	40	365
			Componente oceânico	1,4° na latitude por 0,5 a 1,4° na longitude	50	

*Maiores informações sobre o princípio de funcionamento dos MCG's podem ser obtidas nas referências citadas

As simulações dos modelos BESM, CANESM2, HadGEM2-ES e MIROC5 regionalizadas pelo modelo Eta estão disponíveis na plataforma PROJETA para o clima presente, o qual compreende 01 de janeiro de 1961 à 31 de dezembro de 2005, e para as projeções futuras dos RCP's 4.5 e 8.5, de 01 de janeiro de 2006 à 31 de dezembro de 2099.

Neste estudo, as seguintes variáveis simuladas foram empregadas:

- i. Precipitação total – PREC
- ii. Temperatura máxima do ar a 2m da superfície – MXTP
- iii. Temperatura mínima do ar a 2m da superfície – MNTP
- iv. Umidade relativa do ar a 2m da superfície – UR2M
- v. Intensidade do vento a 10m da superfície – W10M
- vi. Radiação de onda curta incidente à superfície – OCIS

As variáveis acima apresentadas são disponibilizadas pela PROJETA sem remoção de erros sistemáticos, diferente de outros índices, os quais já vêm corrigidos. Para sanar esta questão, foi realizado contato com o INPE, através do qual obteve-se as seguintes variáveis corrigidas: precipitação total, temperatura máxima e mínima, velocidade do vento e radiação de ondas curtas incidentes.

Foram utilizados os dados históricos diários de 1994 a 2005, tendo em vista o período empregado nas etapas de aquecimento, calibração e validação do modelo LASH com dados observados em estações hidrometeorológicas. Quanto às projeções futuras, foram empregados dados diários para o período completo (2006 – 2099), tendo sido este período dividido em 3 futuros, conforme sugere o CPTEC/INPE: 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099.

Essas variáveis foram adquiridas para uma grade de pontos que cobre toda a área de estudo, conforme se pode visualizar na Figura 14.

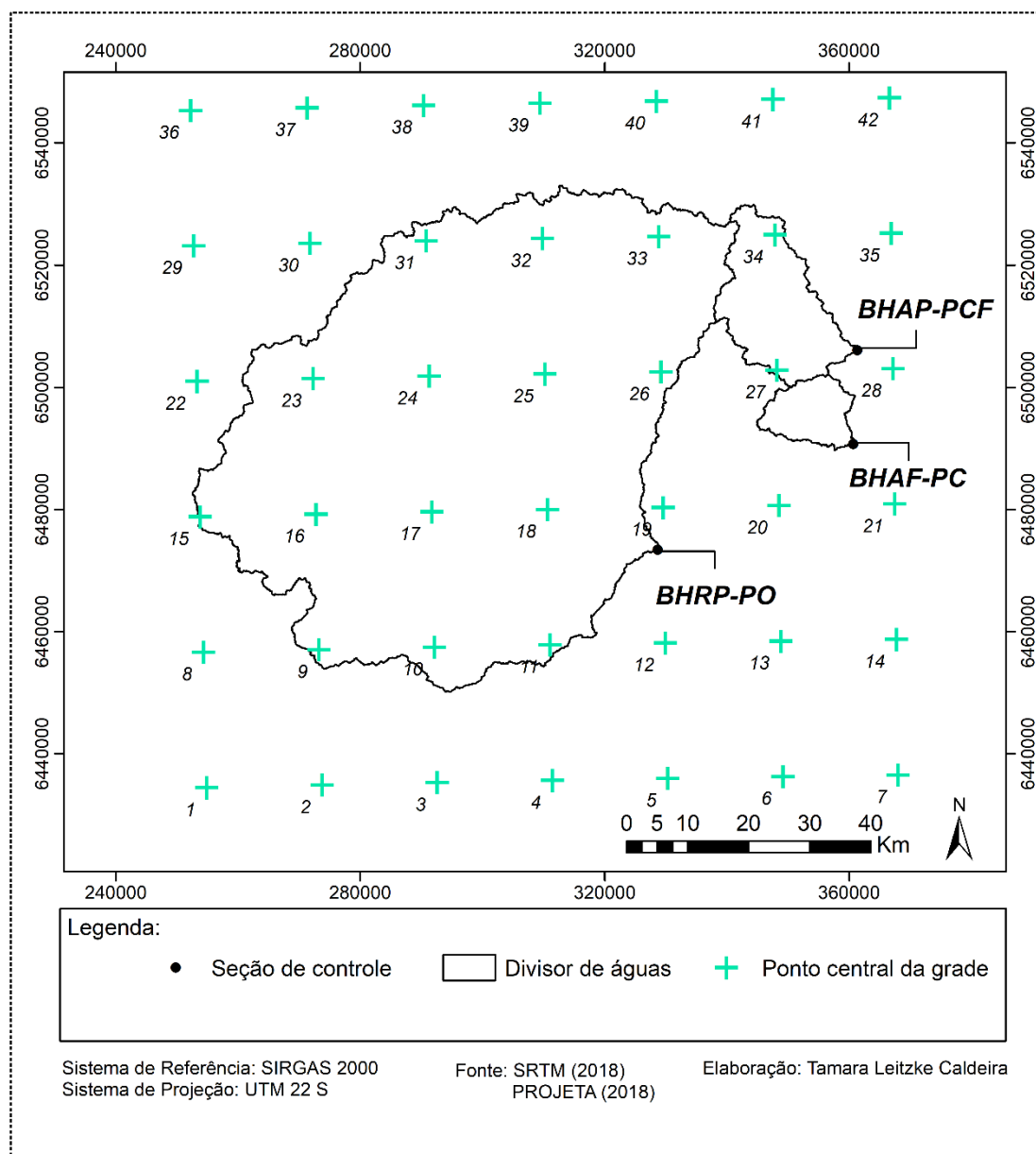


Figura 14 – Ponto central da grade dos modelos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-HADGEM2-ES e ETA-MIROC5 sobre a área de estudo, compreendida pelas bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).

3.5.1. Análise de tendência

O presente estudo também buscou avaliar se as projeções dos MCG's regionalizadas pelo modelo Eta expressam tendências monotônicas de mudanças climáticas sobre a área de estudo e ao longo do período analisado.

A análise de tendência monotônica foi conduzida sobre séries de precipitação total anual e temperatura média diária anual, obtidas por meio dos dados diários outrora mencionados, para cada ponto central da grade apresentado na Figura 14, e para o clima presente e cenários futuros sobre os RCP's 4.5 e 8.5. Estas variáveis foram escolhidas por serem amplamente empregadas para detectar tendências de mudanças climáticas, conforme relata IPCC (2007) e destacam Asfaw et al. (2018).

O teste estatístico não-paramétrico empregado na análise de tendência foi o de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), o qual apresenta bom desempenho, sendo usualmente empregado (GEBREMEDHIN, SHETTY e NANDAGIRI, 2016; MOREIRA e NAGHETTINI, 2016; ASFAW et al., 2018).

O teste de Mann-Kendall é descrito por Yue, Pilon e Cavadias (2002) a partir da determinação da estatística S:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sinal}(x_j - x_i) \quad (6)$$

em que x são os valores dos elementos que compõem a série de dados X e n é o número de elementos de X.

A estatística S do teste de Mann-Kendall (Equação 6) considera a série X_i , constituída pelos elementos ordenados de $i = 1$ até $i = n-1$, e X_j , para a qual os elementos são ordenados de $i = n+1$ até $i = n$. Cada elemento x da série X_i é tomado como referência e comparado à todos elementos de X_j , retornando um sinal:

$$\text{sinal}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{se } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{se } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Para séries com $n \geq 8$, Mann (1945) e Kendall (1975) indicam que a estatística S segue aproximadamente uma distribuição normal. Não havendo

ocorrência de valores repetidos na série, a estatística do teste apresenta média $E(S) = 0$ e variância $Var(S)$ dada pela Equação 8; havendo, no entanto, valores repetidos, $V(S)$ é corrigida conforme Equação 9.

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (8)$$

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (9)$$

em que t_p é o número de dados repetidos de índice p até q .

Uma vez definidos S e $Var(S)$, a significância do teste é verificada através de um teste bilateral com estatística padronizada Z :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

De acordo com Moreira e Naghettini (2016), valores positivos de Z (Equação 10) indicam tendência de aumento, ao longo do tempo, nos valores da variável analisada, enquanto que valores negativos Z , de diminuição.

O teste de Mann-Kendall, conforme Moreira e Naghettini (2016), é um teste de significância da hipótese nula (H_0) de ausência de tendência na série de dados avaliada. Os autores relatam que o fato de rejeitar H_0 quando a mesma é verdadeira implica em erro do tipo I, enquanto que aceitar H_0 quando a mesma é falsa, em erro do tipo II, sendo a probabilidade de ocorrência desses erros denotada, respectivamente, por α e β .

A hipótese H_0 é rejeitada, segundo Moreira e Naghettini (2016), quando:

$$|Z| \leq \frac{Z_{\alpha}}{2} \quad (11)$$

em que $Z_{\alpha/2}$ é o valor da distribuição normal padrão com probabilidade de excedência de $\alpha/2$.

Os níveis de significância α comumente adotados para o teste de Mann-Kendall são 0,01, 0,05 e 0,10, para os quais Z_{α} corresponde à, respectivamente, 2,58, 1,96 e 1,65. O p-valor da estatística S, por sua vez, pode ser estimado pela probabilidade acumulada da distribuição normal, de modo que p-valores inferiores ao nível de significância α indicam rejeição da hipótese H_0 , ou seja, existência de tendência (MOREIRA e NAGHETTINI, 2016).

Neste estudo, o teste de Mann-Kendall foi executado no ambiente do R[®] utilizando o pacote “Kendall”, desenvolvido por McLeod (2011). Este pacote permite extrair, dentre outros, o p-valor do teste, a estatística S e sua variância Var(S).

Os resultados obtidos no teste de Mann-Kendall para o p-valor foram avaliados ao nível de significância α de 0,05 (ou 5%), tendo sido constatada tendência toda vez que p-valor fosse inferior à α . Para determinar se a tendência era de aumento ou diminuição dos valores das variáveis ao longo do tempo, empregou-se os resultados do teste de Mann-Kendall para a estatística S e Var(S), tendo sido calculado Z conforme a Equação 10.

3.6. Avaliação do escoamento simulado pelo modelo LASH forçado pelos MCG's regionalizados pelo Eta

As simulações climáticas dos MCG's BESM, HadGEM2-ES, CANESM2 e MIROC5 regionalizadas pelo modelo Eta para o clima presente foram utilizadas para determinar *baselines*, ou condições de referência, em termos de estimativa do escoamento. Para tal intento, o modelo hidrológico LASH, calibrado e validado para as 3 bacias hidrográficas a partir de dados monitorados em estações

hidrometeorológicas no período de 1994 a 2005, foi forçado com os dados das simulações climáticas para o clima presente (1961-2005).

Neste estudo, considerando os diferentes MCG's regionalizados, 4 condições de referência foram estabelecidas e avaliadas para a BHAP-PFC e para a BHAF-PC. Nestas bacias, a série histórica observada teve início em meados de 1964, fato este que limitou esta avaliação ao período de 1965 a 2005. Para a BHRP-PO, tal avaliação não pôde ser realizada porque a série histórica observada teve início em 2007.

3.7. Simulação do impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos

A avaliação dos possíveis impactos decorrentes das mudanças climáticas sobre as vazões da BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC foi realizada considerando o escoamento estimado pelo modelo LASH a partir das simulações do clima presente, *baselines*, e das simulações do clima futuro, nos períodos de 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, conforme divisão sugerida pelo CPTEC/INPE

Inúmeros aspectos associados ao escoamento no exutório de cada bacia foram avaliados, dentre eles: indicadores de vazões máximas, médias e mínimas anuais, médias mensais, produção de água, etc.

4 Resultados e Discussão

4.1. Calibração e validação do modelo LASH

4.1.1. Parâmetros de calibração

Os parâmetros do modelo LASH calibrados para a BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC podem ser visualizados na Tabela 13. Estes parâmetros foram obtidos por calibração automática empregando o algoritmo SCE-UA (DUAN, SOROOSHIAN e GUPTA, 1992), e representam, para cada bacia hidrográfica, a melhor iteração em termos de estatística de precisão.

Tabela 13 - Parâmetros calibrados pelo modelo LASH para as bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO), do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC)

Parâmetro			BHRP- PO	BHAP- PCF	BHAF- PC
Coeficiente de abstração inicial	λ	adimensional	0,09	0,09	0,13
Condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial	K_{SS}	mm.dia ⁻¹	77,08	95,24	4,39
Condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo	K_B	mm.dia ⁻¹	0,65	1,36	0,79
Densidade de fluxo máxima para retorno por ascensão capilar	K_{CAP}	mm.dia ⁻¹	2,55	2,25	2,02
Parâmetro do tempo de resposta do reservatório superficial	C_S	adimensional	11,63	24,52	40,39
Parâmetro do tempo de resposta do reservatório subsuperficial	C_{SS}	adimensional	40,64	1534,36	295,08
Parâmetro do tempo de retardo do escoamento de base	C_B	dia	43,48	68,18	32,40

A abstração inicial da precipitação (I_a) representa as perdas que ocorrem antes da geração do escoamento superficial direto. No método do Número da Curva (CN) desenvolvido pelo SCS (1971), I_a é função do potencial de armazenamento de água no solo (S) e do coeficiente de abstração inicial (λ), para o qual o valor

recomendado pelo SCS (1971) é de 0,2, o que implica em considerar que I_a equivale à 20% de S . O modelo hidrológico LASH, no entanto, emprega o método do Número da Curva Modificado (CN-Modificado) por Mishra et al. (2003), para o qual I_a é função de S , de λ , e da umidade antecedente do solo (M). Mishra et al. (2006) avaliaram o escoamento superficial direto em 84 bacias hidrográficas americanas através do CN-Modificado e constataram que λ pode apresentar considerável variação, especialmente em função das condições edafoclimáticas do local. Os autores encontraram valores para λ entre 0 e 0,21 para bacias hidrográficas cuja área de drenagem era de 0,17 a 74 ha. Assim como Mishra et al. (2006), inúmeros são os estudos que consideram a calibração de λ .

O valor calibrado de λ para a BHRP-PO e BHAP-PCF foi de 0,09, enquanto que para a BHAF-PC, foi de 0,13. Estes valores indicam que, considerando os mesmos eventos de precipitação, S e M , o início do escoamento superficial direto ocorre mais rapidamente na BHRP-PO e na BHAP-PCF. Esta constatação foi também relatada por Caldeira (2016) que, embora empregando fontes de informação e configuração do modelo diferentes daquelas empregadas neste estudo, encontrou valores de λ de 0,024 para a BHAP-PCF e de 0,115 para a BHAF-PC. Valor de λ bastante próximo ao calibrado para a BHAF-PC – 0,147 – foi também encontrado por Beskow et al. (2016) com a segunda versão do modelo LASH.

Outro fato que corrobora com esta discussão é a condutividade hidráulica do solo saturado (K_{SAT}), para a qual as análises de Aquino (2014) indicam uma média de 101 mm.h⁻¹ para a BHAP-PCF e 18 mm.h⁻¹ para a BHAF-PC. Seguindo a classificação para valores de K_{SAT} para solos brasileiros (PRUSKI et al., 1997) visando à aplicação do método do CN (SCS, 1971), os valores obtidos para a BHAP-PCF indicam infiltração superior à média, enquanto que para a BHAF-PC, abaixo da média, tendo potencial para geração de escoamento superficial direto acima da média.

A calibração de λ para estimativa do escoamento superficial direto pelo método do CN-Modificado foi também realizada em outros estudos envolvendo o modelo LASH. Mello et al. (2008), empregando a primeira versão do modelo para uma bacia de 2.080 km², encontraram valores de λ variando de 0,001 a 0,5 ao calibrar tal parâmetro de forma distribuída por sub-bacias. A mesma estratégia de calibração de λ foi empregada por Viola et al. (2009) para uma bacia de 2.094 km²,

tendo encontrado valores entre 0,01 e 0,2. Já Beskow et al. (2011), calibrando a segunda versão do modelo para uma bacia de 32 km², encontrou λ de 0,105. Frente aos resultados obtidos para λ neste e em outros estudos com LASH, percebe-se que a calibração deste parâmetro é extremamente importante para um bom desempenho do modelo frente à estimativa do escoamento superficial direto.

Os parâmetros K_{SS} e K_B refletem, respectivamente, a condutividade hidráulica dos reservatórios subsuperficial e subterrâneo, e são empregados pelo modelo LASH na estimativa das referidas parcelas do escoamento seguindo recomendações de Rawls et al. (1993). Neste estudo K_{SS} foi calibrado em 77,08, 95,24 e 4,39 mm.dia⁻¹ para a BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC, respectivamente, enquanto que K_B foi calibrado em 0,65, 1,36 e 0,79 mm.dia⁻¹.

Uma vez que K_{SS} e K_B estão diretamente relacionados ao tipo de solo, é esperada variação nos seus valores para diferentes bacias hidrográficas. Outros estudos com o modelo LASH conduzidos na BHAP-PCF e BHAF-PC apontam para a mesma discrepância entre as bacias. Caldeira (2016) calibrou K_{SS} de 137,49 mm.dia⁻¹ e K_B de 1,87 mm.dia⁻¹ para a BHAP-PCF, enquanto que para a BHAF-PC, Caldeira (2016) e Beskow et al. (2016) encontraram, respectivamente, 5,261 e 2,08 mm.dia⁻¹ para K_{SS} e 0,63 e 0,19 mm.dia⁻¹ para K_B .

Empregando a primeira versão do modelo LASH em uma bacia de 2.080 km², Mello et al. (2008) calibraram K_{SS} entre 12 e 182,4 mm.dia⁻¹ e K_B de 0,9 mm.dia⁻¹. Com a mesma versão do modelo, porém em uma bacia de 2.094 km², Viola et al. (2009) encontraram K_{SS} entre 0,01 e 82,65 mm.dia⁻¹ e K_B entre 0,1 e 2,5 mm.dia⁻¹. Já Beskow et al. (2011), com a segunda versão do modelo, calibraram K_{SS} de 182,15 mm.dia⁻¹ e K_B de 3,18 mm.dia⁻¹ para uma bacia de 32 km².

Quanto à K_{CAP} , os valores calibrados foram de 2,55 mm.dia⁻¹ para a BHRP-PO, 2,25 mm.dia⁻¹ para a BHAP-PCF e 2,02 mm.dia⁻¹ para a BHAF-PC. Estes valores indicam a máxima densidade de fluxo por ascensão capilar que a bacia apresentará em condições de umidade do solo propícias à sua ocorrência. De acordo com Collischon (2001), não existem dados que permitam estimar o valor de K_{CAP} , por isso, o fluxo por ascensão capilar é frequentemente desprezado. O autor relata que desprezar esse processo é o mesmo que considerar bacia hidrográfica como uma área única e exclusivamente de recarga de aquífero, o que de fato não

ocorre, haja vista a existência de áreas de descarga, como por exemplo matas ciliares.

O mesmo valor de K_{CAP} foi encontrado por Caldeira (2016) para a BHAF-PC, enquanto que Beskow et al. (2016) encontraram $2,67 \text{ mm.dia}^{-1}$ para essa bacia. Já para a BHAP-PCF, Caldeira (2016) calibrou este parâmetro em $2,93 \text{ mm.dia}^{-1}$, $0,68 \text{ mm.dia}^{-1}$ a mais que aquele calibrado neste estudo.

Os parâmetros C_s e C_{ss} refletem o tempo de resposta dos reservatórios superficial e subsuperficial, respectivamente, sendo empregados na calibração do modelo porque existem incertezas atreladas ao cálculo do tempo de concentração da sub-bacia hidrográfica. Valores de C_s e C_{ss} foram calibrados em, respectivamente, 11,63 e 40,64 para a BHRP-PO, em 24,52 e 1534,36 para a BHAP-PCF, e 40,39 e 295,08 para a BHAF-PC.

Por fim, o parâmetro C_B que reflete o tempo de retardo do escoamento de base para cálculo da vazão de base, foi calibrado em 43,48, 68,18 e 32,40 dias para a BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC, respectivamente. Os valores deste parâmetro são muito importantes no auxílio à compreensão do escoamento de base na bacia hidrográfica, uma vez que é esta parcela do escoamento que alimenta os cursos d'água durante períodos de estiagem.

Alguns estudos envolvendo o modelo LASH, tais como Mello et al. (2008), Viola et al. (2009) e Beskow et al. (2011), optaram por calcular o parâmetro C_B a partir de dados observados de vazão na seção de controle da bacia, enquanto outros, como Beskow et al. (2016) e Caldeira (2016), optaram por considerá-lo um parâmetro de calibração. Caldeira (2016) inclusive apresenta valores de C_B calculados para diferentes períodos de recessão nos hidrogramas da BHAP-PCF e da BHAF-PC, no entanto, segundo a autora, os valores são tão variáveis e dependentes da experiência do hidrólogo que a calibração dos mesmos reduz as incertezas associadas. No estudo de Caldeira (2016), os valores de C_B calibrados foram de 44,34 dias para a BHAP-PCF e de 57,54 dias para a BHAF-PC; para a BHAF-PC, Beskow et al. (2016) encontraram C_B de 49,9 dias.

4.1.2. Estatísticas de precisão

Na Tabela 14 podem ser visualizadas as medidas estatísticas empregadas para avaliar o desempenho do modelo LASH na estimativa das vazões na BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC nos períodos de calibração e validação.

Tabela 14 – Valores obtidos para a Raíz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE), o Coeficiente de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) e sua versão para valores logaritimizados ($C_{NS} \log(Q)$) e o erro na estimativa das vazões (ΔQ), para avaliação de desempenho do modelo nos períodos de calibração e validação

	Período de calibração				Período de validação			
	RMSE ($m^3.s^{-1}$)	C_{NS}	$C_{NS} \log(Q)$	ΔQ (%)	RMSE ($m^3.s^{-1}$)	C_{NS}	$C_{NS} \log(Q)$	ΔQ (%)
BHRP-PO	85,12	0,69	0,78	-21,67	95,35	0,72	0,82	0,22
BHAP-PCF	13,74	0,73	0,58	-25,62	14,03	0,64	0,70	-4,81
BHAF-PC	3,44	0,73	0,67	-12,95	4,37	0,52	0,76	-11,63

BHRP-PO = Bacia Hidrográfica do Rio Piratini à montante da seção de controle Pedro Osório; BHAP-PCF = Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas à montante da seção de controle Ponte Cordeiro de Farias; BHAF-PC = Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata à montante da seção de controle Passo dos Carros

Considerando a classificação proposta por Motovilov et al. (1999) para as estatísticas C_{NS} e $C_{NS} \log(Q)$, é possível verificar que, de forma geral, a calibração e validação do modelo LASH para as bacias analisadas foi satisfatória, com exceção do período de validação para a BHAF-PC, o qual apresentou bom ajuste.

Visto que C_{NS} indica a precisão do modelo em estimar vazões mais elevadas, enquanto que $C_{NS} \log(Q)$, vazões em períodos secos (VIOLA et al., 2009), os resultados apresentados na Tabela 14 permitem inferir que o modelo hidrológico LASH apresentou melhor desempenho na estimativa de vazões mais baixas tanto na calibração quanto na validação para a BHRP-PO, enquanto que para BHAP-PCF e a BHAF-PC, o modelo hidrológico LASH teve melhor desempenho na

estimativa de vazões em períodos de cheia na calibração e, em períodos secos, na validação. Resultados para essas estatísticas obtidos em outros estudos envolvendo o modelo LASH podem ser visualizados na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores do coeficiente de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) e sua versão para valores logaritmizados ($C_{NS} \log(Q)$) obtidos em outros estudos envolvendo a calibração e validação do modelo LASH

Estudo	Bacia Hidrográfica/ Estado	C_{NS}		$C_{NS} \log(Q)$	
		Calibração	Validação	Calibração	Validação
Viola et al. (2009)	Rio Aiuruoca/MG	0,87	0,92	0,92	0,94
Beskow et al. (2011)	Ribeirão Jaguara/MG	0,82	0,76	0,82	0,77
Viola et al. (2012)	Rio Lontra/TO	0,74	0,75	0,80	0,84
Beskow et al. (2016)	BHAF-PC/RS	0,81	0,72	0,69	0,83
Caldeira (2016)	BHAP-PCF/RS	0,74	0,80	0,69	0,82
Caldeira (2016)	BHAF-PC/RS	0,83	0,68	0,75	0,81

Quando comparados os valores de C_{NS} e $C_{NS} \log(Q)$ para a calibração e validação do modelo LASH para a BHAF-PC (Tabelas 14 e 15) pode-se verificar que o desempenho do modelo foi melhor nos estudos de Beskow et al. (2016) e Caldeira (2016). O mesmo se verifica para a BHAP-PCF, tendo Caldeira (2016) encontrado estatísticas mais satisfatórias. Este fato pode ser justificado com base no estudo de Caldeira et al. (2019), os quais evidenciam o efeito da discretização espacial dos processos hidrológicos e variáveis de entrada sobre o desempenho do modelo; no estudo de Caldeira (2016), a BHAP-PCF e a BHAF-PC foram subdivididas em, respectivamente, 43 e 23 sub-bacias, enquanto que neste estudo, foram subdivididas em 31 e 21 sub-bacias.

Diversos estudos acerca da aplicação de modelos hidrológicos têm empregado o coeficiente C_{NS} para avaliar a acurácia dos resultados obtidos. Pereira et al. (2016) calibraram e validaram o modelo SWAT a partir de vazões diárias para uma bacia hidrográfica localizada na região sudeste do Brasil, e obtiveram C_{NS} de 0,76 nas duas etapas e $C_{NS} \log(Q)$ de 0,79 e 0,78 para a primeira e segunda etapas, respectivamente. Havrylenko et al. (2016), na região do Pampa Argentino, calibraram e validaram o modelo SWAT com vazões médias mensais e encontraram C_{NS} de 0,59 na calibração e 0,75 na validação. Alvarenga et al. (2018) calibram e validaram o modelo DHSVM com vazões médias mensais para uma pequena bacia hidrográfica localizada na região sudeste do Brasil, e encontraram

valores para C_{NS} de 0,63 na calibração e 0,77 na validação. Em todas essas situações, os modelos foram considerados de boa precisão e passíveis de aplicação para simulação hidrológica nas regiões mencionadas, assim como indicam os resultados obtidos neste estudo.

Quanto à estatística ΔQ (Tabela 14) os valores obtidos indicam um ajuste muito bom no período de validação do modelo para a BHRP-PO e a BHAP-PCF, bom para a validação da BHRP-PO e calibração e validação para a BHAF-PC, e inadequado para a calibração para a BHAP-PCF. Este valor inadequado para a BHAP-PCF indica que as vazões foram subestimadas em 25,62%, muito próximo ao limiar aceitável (25%); no estudo de CALDEIRA (2016), embora C_{NS} e $C_{NS} \log(Q)$ tenham ficado melhores que aqueles encontrados neste estudo, as vazões foram subestimadas em mais de 26%.

A estatística RMSE, por sua vez, apresentou valores de 85,12, 13,74 e 14,03 e de 95,35, 3,44 e 4,37 para os períodos de calibração e de validação da BHRP-PO, da BHAP-PCF e da BHAF-PC, respectivamente. Tendo em vista que os valores de RMSE são fortemente influenciados pela magnitude das vazões, Caldeira (2016) relata que não é indicado que esta seja empregada para comparar o desempenho de um modelo em diferentes bacias hidrográficas.

Em suma, as estatísticas da calibração e da validação do modelo LASH ao passo de tempo diário, para três bacias analisadas neste estudo, apresentaram resultados que, de modo geral, podem ser considerados satisfatórios, especialmente quando observada a disponibilidade de dados temporais na região.

4.1.3. Estimativa do hidrograma diário e outros indicadores

Nas Figuras 15, 16 e 17 podem ser visualizados os hidrogramas médios diários observados nas seções de controle e estimados pelo modelo LASH para a BHRP-PO, BHAP-PCF e para a BHAF-PC, respectivamente.

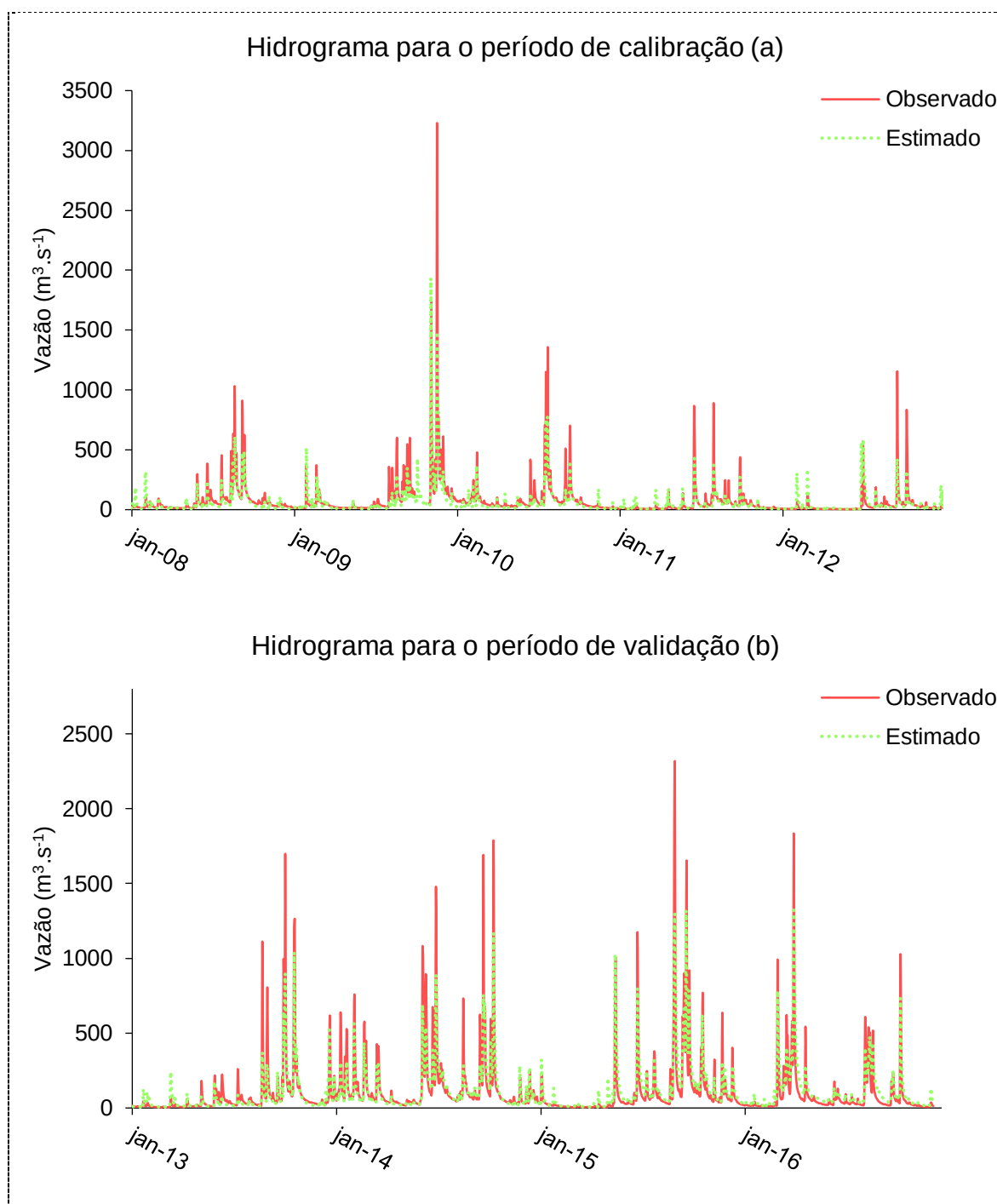


Figura 15 - Hidrogramas diários observados e estimados pelo modelo LASH para os períodos de calibração (a) e de validação (b) na seção de controle da bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO).

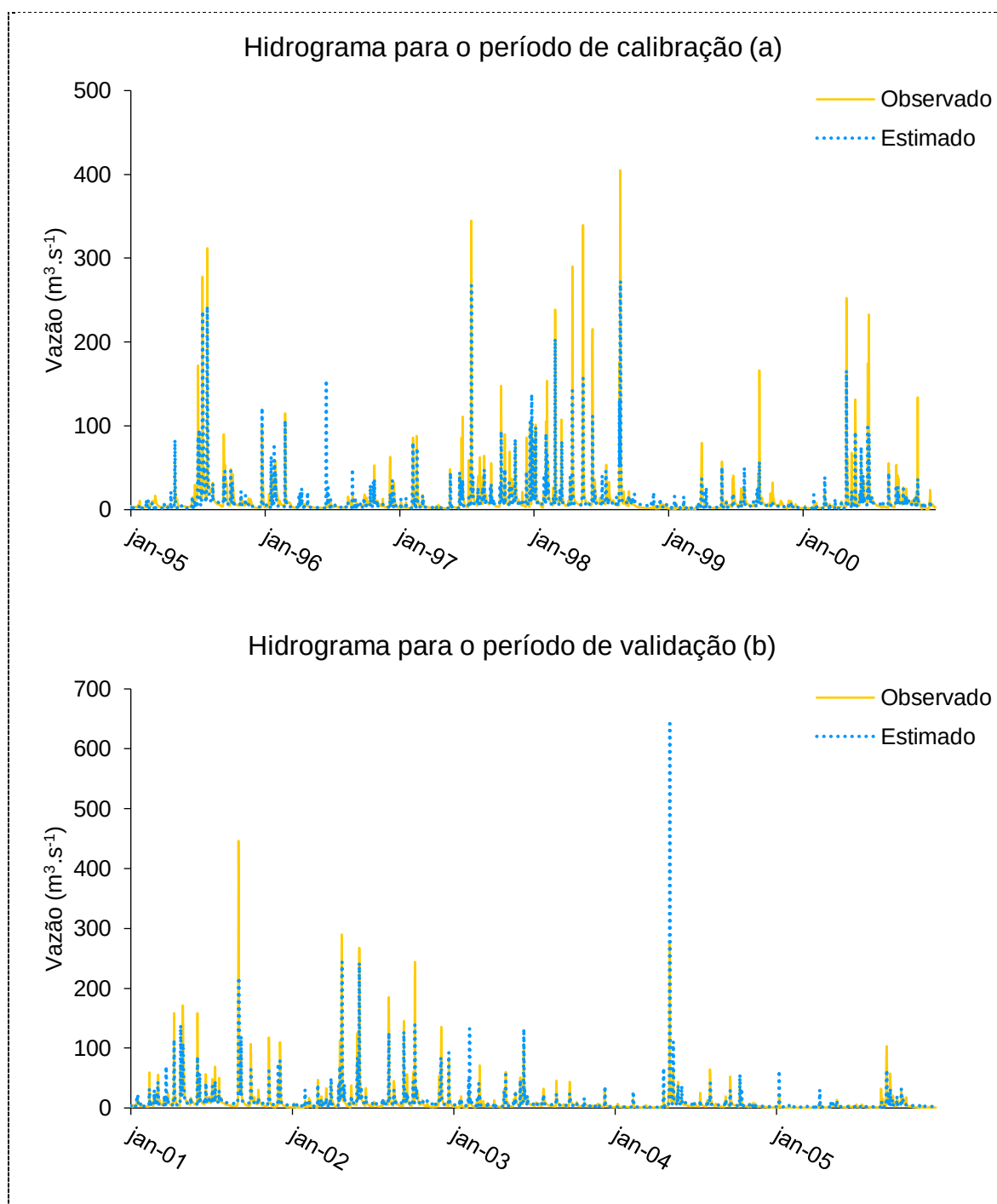


Figura 16 – Hidrogramas diários observados e estimados pelo modelo LASH para os períodos de calibração (a) e de validação (b) na seção de controle da bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).

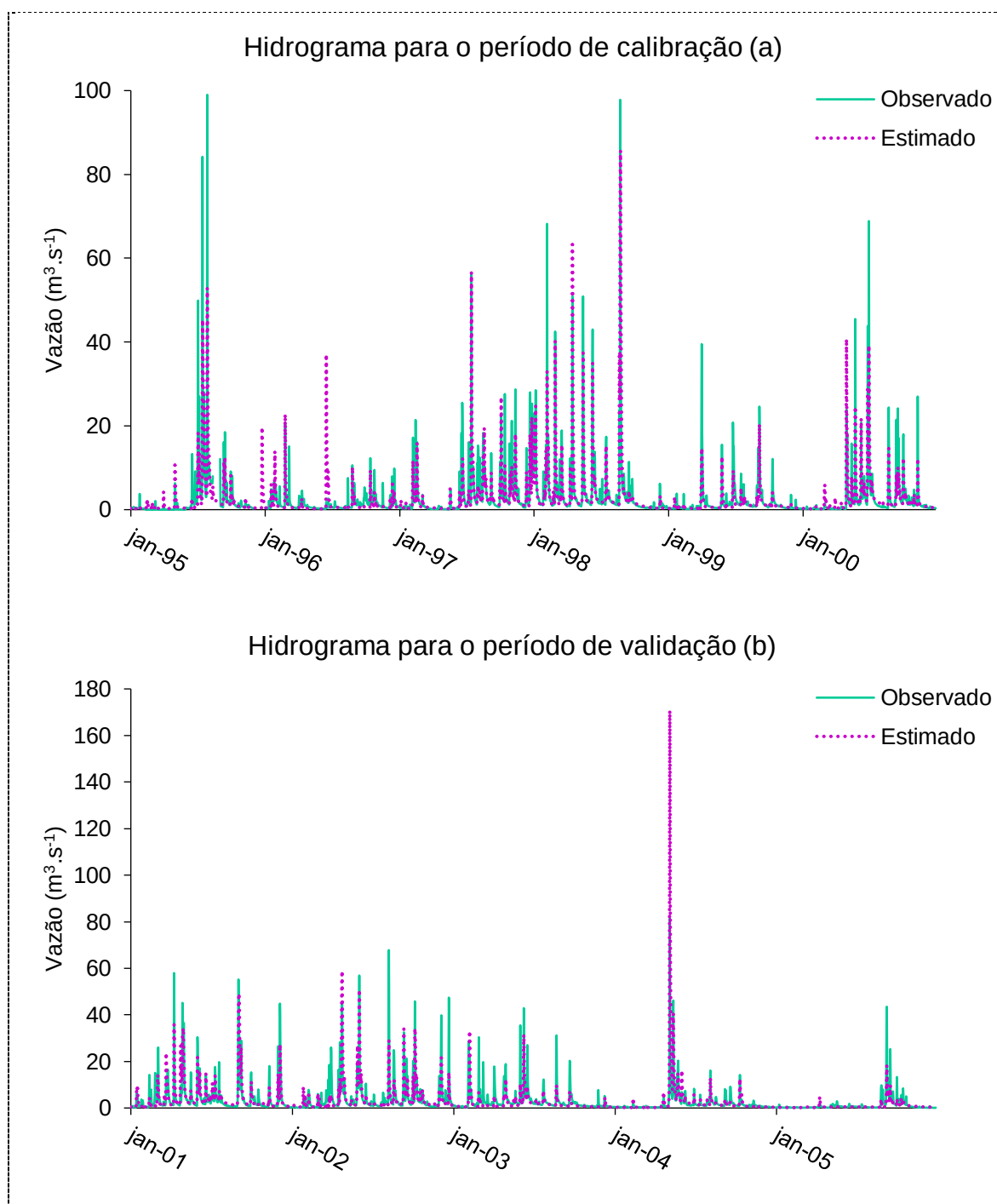


Figura 17 - Hidrogramas diários observados e estimados pelo modelo LASH para os períodos de calibração (a) e de validação (b) na seção de controle da bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).

Observando as Figuras 15, 16 e 17, pode-se verificar que o modelo LASH conseguiu capturar o comportamento geral dos hidrogramas observados nas seções de controle das bacias analisadas. Entretanto, alguns picos de vazão foram, na maioria das vezes, subestimados quando comparados aos dados observados.

Tal constatação já havia sido indicada pelos valores calculados pela estatística ΔQ (Tabela 14), negativos – indicando subestimativa – para os períodos de calibração e validação da BHAP-PCF e BHAF-PC, e de calibração da BHRP-PO. Ainda assim, é enfatizada pela análise das vazões médias diárias acumuladas nos referidos períodos, conforme Figura 18, na qual é possível visualizar a maior subestimativa no período de calibração do modelo LASH para a BHAP-PCF.

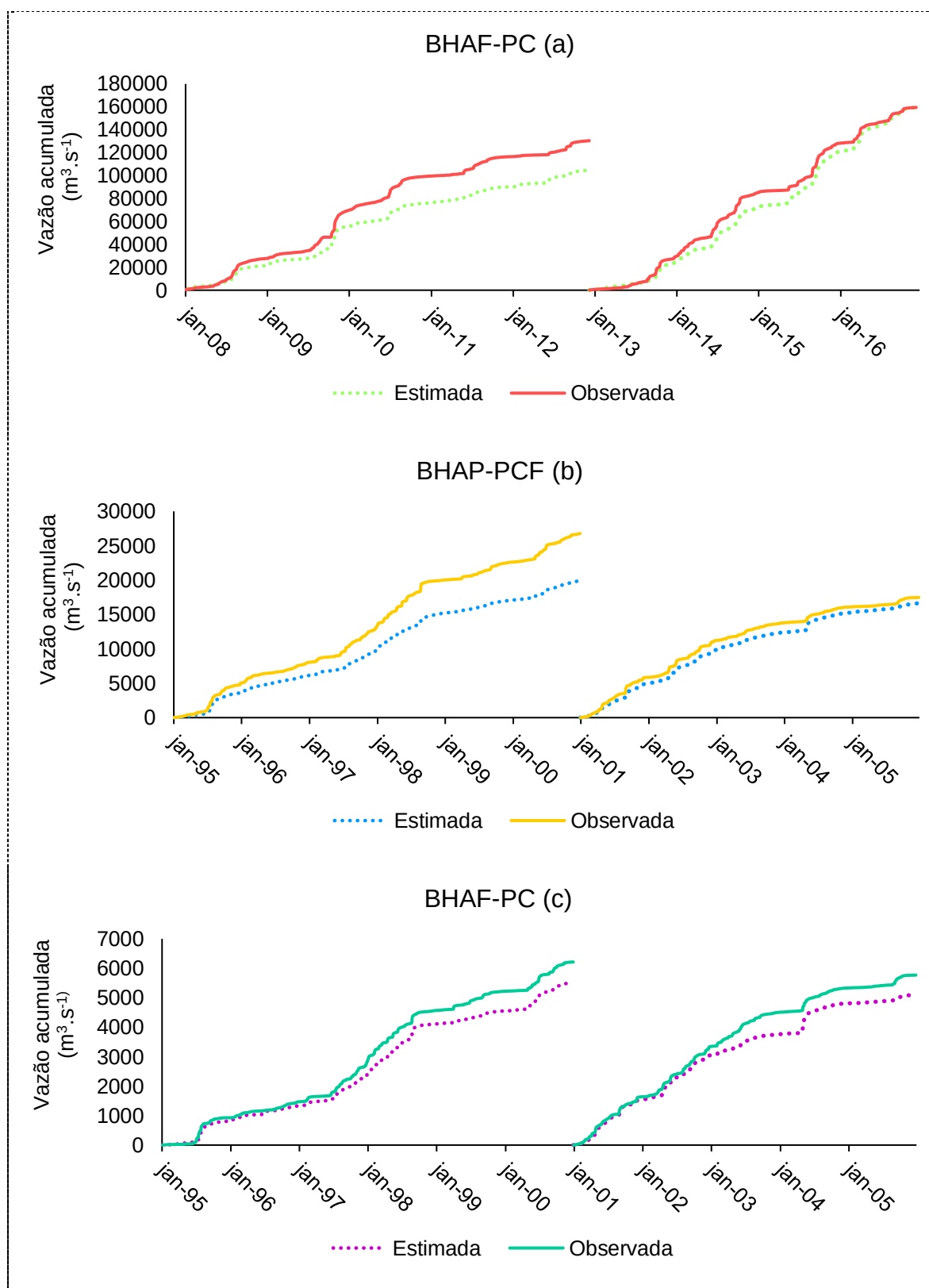


Figura 18 - Vazões médias diárias acumuladas para os períodos de calibração e validação para as bacias hidrográficas do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO) (a), arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) (b) e a bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC) (c).

A subestimativa das vazões de pico é algo comum em modelagem hidrológica. Para Viola et al. (2009), as limitações apresentadas pelos modelos hidrológicos na estimativa das vazões de pico decorrem de inúmeros fatores, dentre os quais os autores destacam a representatividade da variabilidade espacial da chuva e o intervalo de tempo adotado na modelagem. Green et al. (2006), corroboram com Viola et al. (2009) ao relatarem que a rede de monitoramento existente e a distribuição das estações pluviométricas exercem influência na estimativa das vazões de pico, acrescentando também a representatividade da curva-chave.

De fato, não existem estações pluviométricas – dentre aquelas consideradas neste estudo – localizadas dentro dos divisores de água da BHAP-PCF e BHAF-PC (Figura 13), o que implica em baixa representatividade da variabilidade espacial da chuva. Há 8 anos, o Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas (2018) iniciou o estabelecimento de uma rede de monitoramento automático de precipitação, vazão e sedimentos na BHAP-PCF. Os dados de precipitação, monitorados com variabilidade espacial e em intervalos de tempo de 10 minutos, indicam haver variação de total precipitado e duração do evento ao longo da bacia. Espera-se que o estabelecimento de séries históricas contínuas e representativas nessa rede de monitoramento promova, no futuro, melhor desempenho do modelo LASH na BHAP-PCF. Em se tratando das demais bacias hidrográficas, espera-se que os dados de precipitação monitorados pela recente rede de postos do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEM, 2018), uma vez empregados na modelagem hidrológica, também impliquem em melhora na calibração e validação do modelo.

Quanto ao intervalo de tempo empregado na modelagem hidrológica, sabe-se que a calibração com dados de vazão média mensal, ou ainda anual, tende a proporcionar melhores estatísticas de precisão que a calibração com dados diários, visto que as oscilações diárias naquele período são atenuadas. Este assunto é abordado por Sudheer et al. (2007), os quais avaliaram o impacto do intervalo de tempo sobre o desempenho do modelo SWAT na calibração, validação e simulação. Segundo os autores, muitos estudos calibram e validam modelos hidrológicos em escala mensal ou anual, com boas estatísticas de precisão, e depois realizam simulações diárias, para as quais o desempenho satisfatório

outrora mencionado não é assegurado. Neste sentido, Sudheer et al. (2007) sugerem que a calibração dos modelos seja realizada no intervalo de tempo diário, preservando com precisão o comportamento hidrológico da bacia. Em contraponto, Beskow et al. (2011) relatam que a calibração de modelos hidrológicos em escala diária pode influenciar na estimativa das vazões de pico em bacias hidrográficas com tempo de concentração inferior a 1 dia, as quais são sensíveis à eventos de precipitação de curta duração.

Quanto à representatividade da curva-chave de vazões, mencionada por Green et al. (2006), buscou-se analisar seu efeito sobre os resultados obtidos neste estudo. Os dados observados de cota *versus* vazão, obtidos em campanhas de medição conduzidas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Mineiros (CPRM) – operadora das estações fluviométricas – desde a implementação dos postos até o presente, podem ser visualizados na Figura 19. Embora estes dados não tenham sido empregados na sua totalidade para a determinação das curvas-chave válidas para o período de tempo considerado neste estudo (Tabela 16), uma vez que estas são periodicamente atualizadas, é possível identificar a existência de uma lacuna nas medições de vazões mais elevadas.

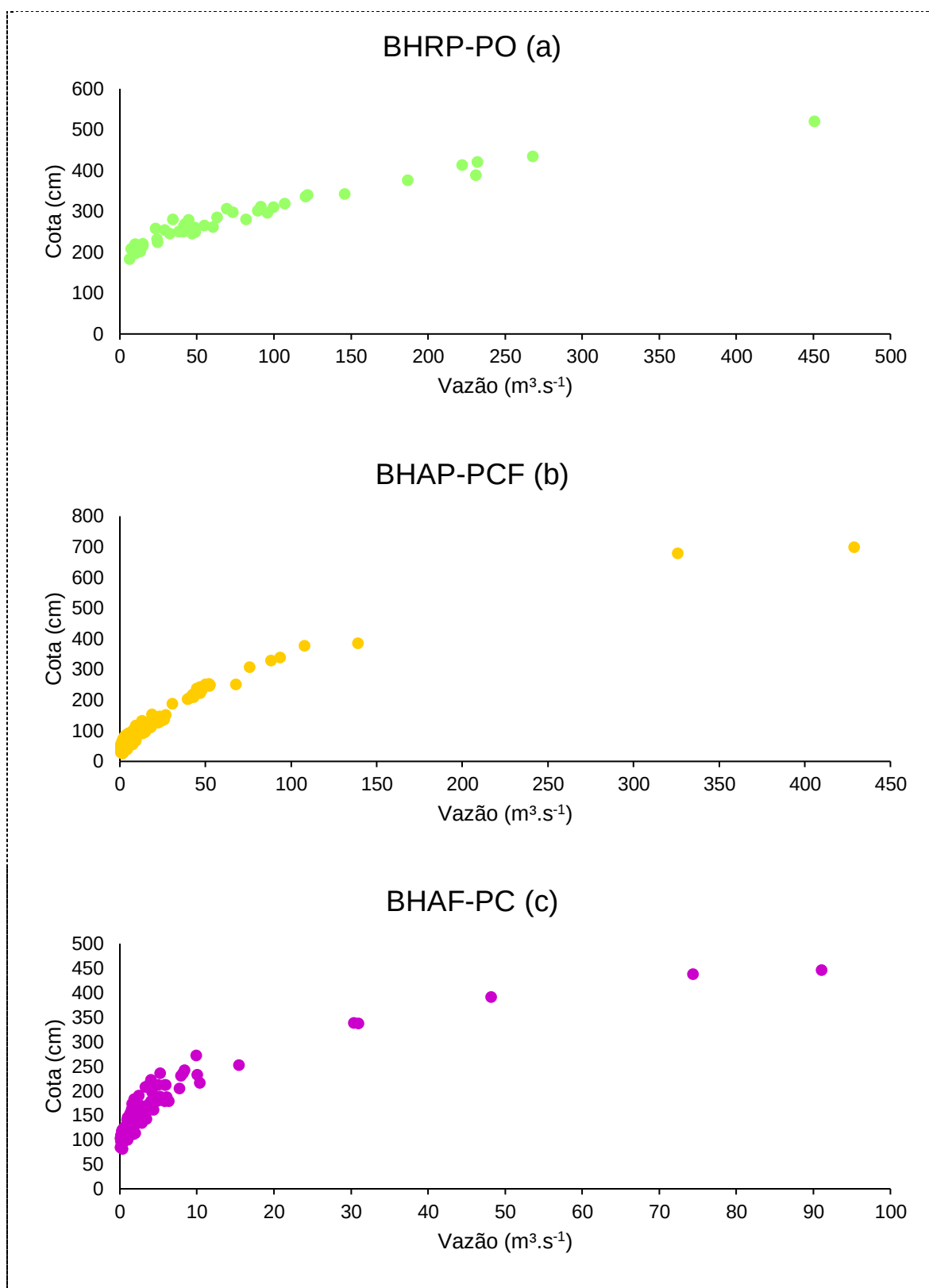


Figura 19 - Dados de cota versus vazão obtidos por campanhas de medição realizadas pela CPRM na seção de controle “Pedro Osório” da bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP-PO), na seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP-PCF) e na seção de controle “Passo dos Carros” da bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF-PC), desde a implementação dos postos até o presente momento.

Tabela 16 - Curvas-chave cota (H, m) *versus* vazão (Q, m³.s⁻¹) válidas para o período de 1994 a 2005 das séries históricas de vazões empregadas neste estudo

2005 das séries históricas de vazões empregadas neste estudo			
Data de início	Data de fim	Cota válida (m)	Equação
BHRP-PO			
08/11/2006	25/04/2011	1,70 a 237	$Q = 15,00 \cdot (H - 1,29)^{2,36}$
		2,37 a 5,06	$Q = 43,00 \cdot (H - 1,74)^{1,87}$
		5,06 a 5,89	$Q = 41,65 \cdot (H - 1,49)^{1,79}$
		5,89 a 13,00	$Q = 36,40 \cdot (H - 1,49)^{1,88}$
26/04/2011	16/09/2013	1,70 a 1,81	$Q = 41,45 \cdot (H - 1,49)^{1,80}$
		1,81 a 2,91	$Q = 25,00 \cdot (H - 1,29)^{2,36}$
		2,91 a 5,95	$Q = 41,70 \cdot (H - 1,49)^{1,79}$
		5,95 a 8,00	$Q = 36,40 \cdot (H - 1,49)^{1,88}$
17/09/2013	31/12/2014	2,10 a 2,34	$Q = 15,00 \cdot (H - 1,29)^{2,36}$
		2,34 a 2,89	$Q = 44,05 \cdot (H - 1,74)^{1,87}$
		2,89 a 3,19	$Q = 92,75 \cdot (H - 2,15)^{1,63}$
		3,19 a 9,50	$Q = 36,40 \cdot (H - 1,49)^{1,88}$
01/01/2015	31/12/2016	1,30 a 4,14	$Q = 23,31 \cdot (H - 1,30)^{2,17}$
		4,14 a 13,50	$Q = 99,80 \cdot (H - 2,40)^{1,46}$
BHAP-PCF			
19/09/1985	28/07/1995	0,40 a 3,38	$Q = 15,80 \cdot (H - 0,43)^{1,62}$
		3,38 a 7,00	$Q = 12,62 \cdot (H - 0,43)^{1,80}$
29/07/1995	02/05/2000	0,50 a 1,09	$Q = 17,30 \cdot (H - 0,39)^{1,68}$
		1,09 a 7,50	$Q = 14,50 \cdot (H - 0,31)^{1,71}$
03/05/2000	08/05/2004	0,40 a 1,85	$Q = 14,80 \cdot (H - 0,28)^{1,59}$
		1,85 a 8,00	$Q = 14,50 \cdot (H - 0,31)^{1,71}$
09/08/2004	19/11/2009	0,20 a 0,51	$Q = 7,31 \cdot (H - (-0,12))^{2,1}$
		0,51 a 0,91	$Q = 13,50 \cdot (H - 0,16)^{1,50}$
		0,91 a 1,99	$Q = 18,00 \cdot (H - 0,33)^{1,32}$
		1,99 a 6,50	$Q = 14,50 \cdot (H - 0,31)^{1,71}$
BHAF-PC			
16/02/1990	13/10/2004	0,80 a 1,10	$Q = 4,94 \cdot (H - 0,70)^{2,50}$
		1,10 a 6,00	$Q = 5,76 \cdot (H - 0,81)^{1,91}$
14/10/2004	01/08/2012	0,70 a 1,02	$Q = 5,90 \cdot (H - 0,61)^{2,05}$
		1,02 a 1,43	$Q = 5,72 \cdot (H - 0,80)^{1,45}$
		1,43 a 3,05	$Q = 5,90 \cdot (H - 0,75)^{1,82}$
		3,05 a 6,00	$Q = 5,76 \cdot (H - 0,81)^{1,91}$

BHRP-PO = bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório”; BHAP-PCF = bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias”; BHAF-PC = bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros”

Para a BHRP-PO, os dados da Figura 19a correspondem a 2 medições com cotas inferiores a 2m, 27 medições com cotas entre 2 e 3m, 10 medições com cotas entre 3 e 4m, 3 com cotas entre 4 e 5m, e 1 entre 5 e 6m. Neste sentido, é notório o fato de que uma curva-chave ajustada com base nestes dados – em sua totalidade – seria representativa de vazões até 268 m³, ao mesmo tempo que apresentaria incertezas para vazões mais elevadas. Ao que tudo indica, estas incertezas estariam atreladas à interpolação da curva-chave para cotas entre 4,34 e 5,20 e à extrapolação da mesma para cotas mais elevadas, visto que a série histórica empregada neste estudo apresenta vários registros de vazão superiores àqueles verificados nas campanhas hidrológicas.

No caso da BHAP-PCF, os dados da Figura 19b correspondem a 263 medições com cotas inferiores a 2m, 17 medições para cotas entre 2 e 3m, 5 medições para cotas entre 3 e 4m e 2 medições para cotas entre 6 e 7m. Uma curva-chave ajustada com base nestes registros seria bastante representativa de vazões de até 68 m³.s⁻¹, considerando cotas de até 3m, no entanto, apresentaria incertezas para vazões mais elevadas. Essas incertezas não estariam atreladas à extrapolação da curva-chave, uma vez que série histórica empregada não apresenta vazão superior ao valor máximo obtido nas campanhas; o mesmo não pode ser afirmado quanto à interpolação da curva-chave para cotas entre 1,39 e 3,26m.

Para a BHAF-PC (Figura 19c), tem-se o registro de 221 medições com cotas inferiores a 2m, 15 medições com cotas entre 2 e 3m, 3 medições com cota entre 3 e 4m e 2 medições com cotas entre 4 e 5m. Pode-se dizer, portanto, que existe boa representatividade da curva-chave para cotas de até 3m, com vazão máxima de 6,4 m³.s⁻¹. A problemática de extrapolação da curva-chave também não é verificada, enquanto que as incertezas devido à sua interpolação para vazões mais elevadas ocorrem em menor magnitude quando comparada à BHRP-PO (Figura 19a) e à BHAP-PCF (Figura 19b), pois embora tenha havido poucas medições para cotas entre 3 e 5m, as existentes são bem distribuídas.

Frente ao exposto, acredita-se que a representatividade das curvas-chave para a BHAP-PCF (Tabela 16) seja melhor para vazões mais baixas, e que a interpolação das referidas curvas-chave para uma ampla faixa de vazões médias a

altas, seja uma fonte de incerteza na transformação do linigrama em hidrograma, o qual é empregado na calibração do modelo hidrológico.

Caldeira (2016) relata que, embora seja um processo complexo, é fundamental que o modelo hidrológico produza resultados satisfatórios no tocante à estimativa das vazões de pico, visto que a mesma é de suma importância para diversos fins práticos, tais como projetos de estruturas hidráulicas, sistemas de conservação do solo em bacias hidrográficas, gestão de cheias, etc. Para dar subsídio à compreensão do desempenho do modelo frente à estimativa de vazões máximas, bem como de médias e mínimas, pode-se visualizar nas Figuras 20, 21 e 22 os indicadores anuais observados e estimados para a BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC, respectivamente.

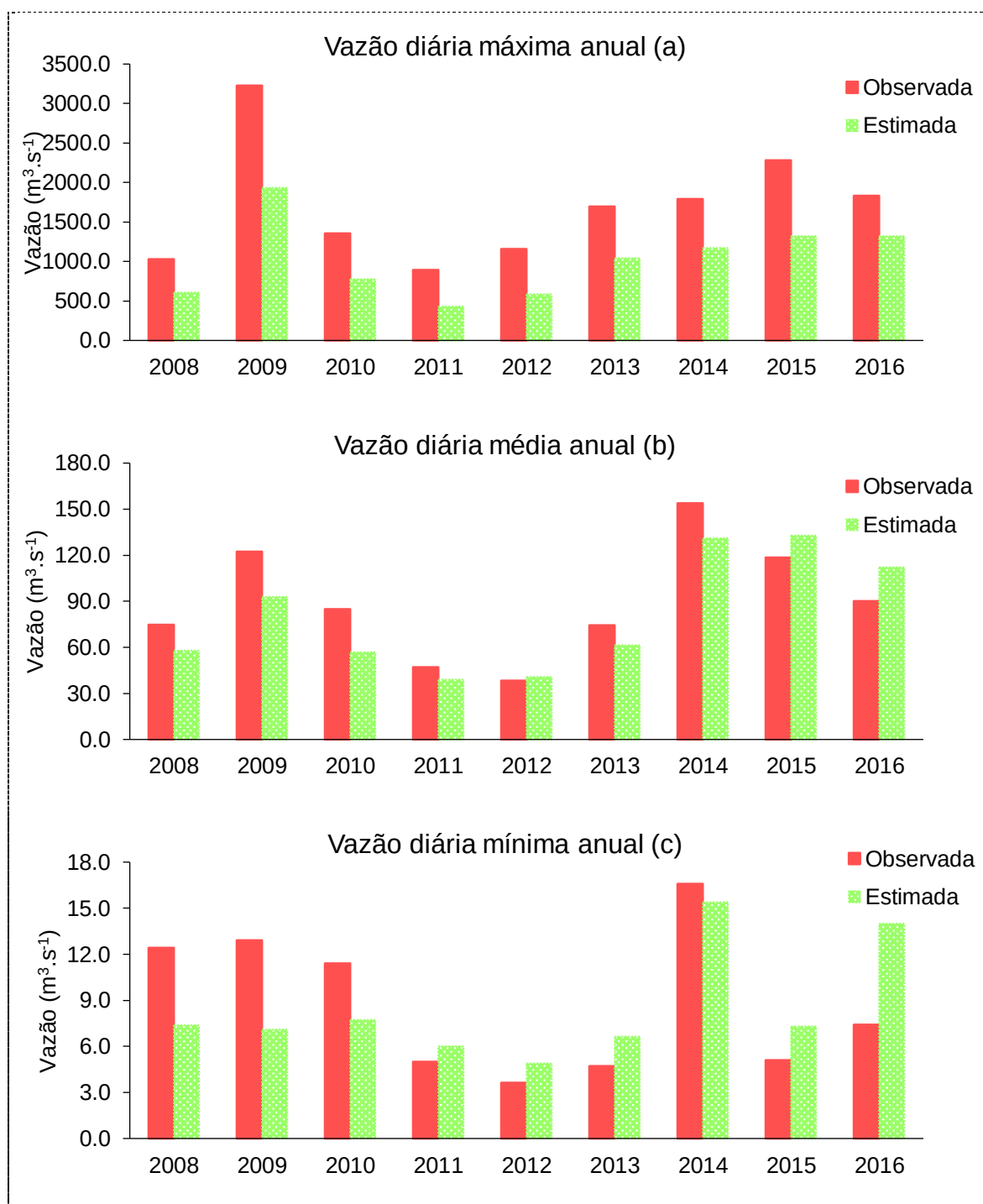


Figura 20 - Vazões máximas (a), médias (b) e mínimas (c) diárias observadas na seção de controle “Pedro Osório” da bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP-PO) e estimadas pelo modelo LASH, considerando os períodos de calibração e validação.

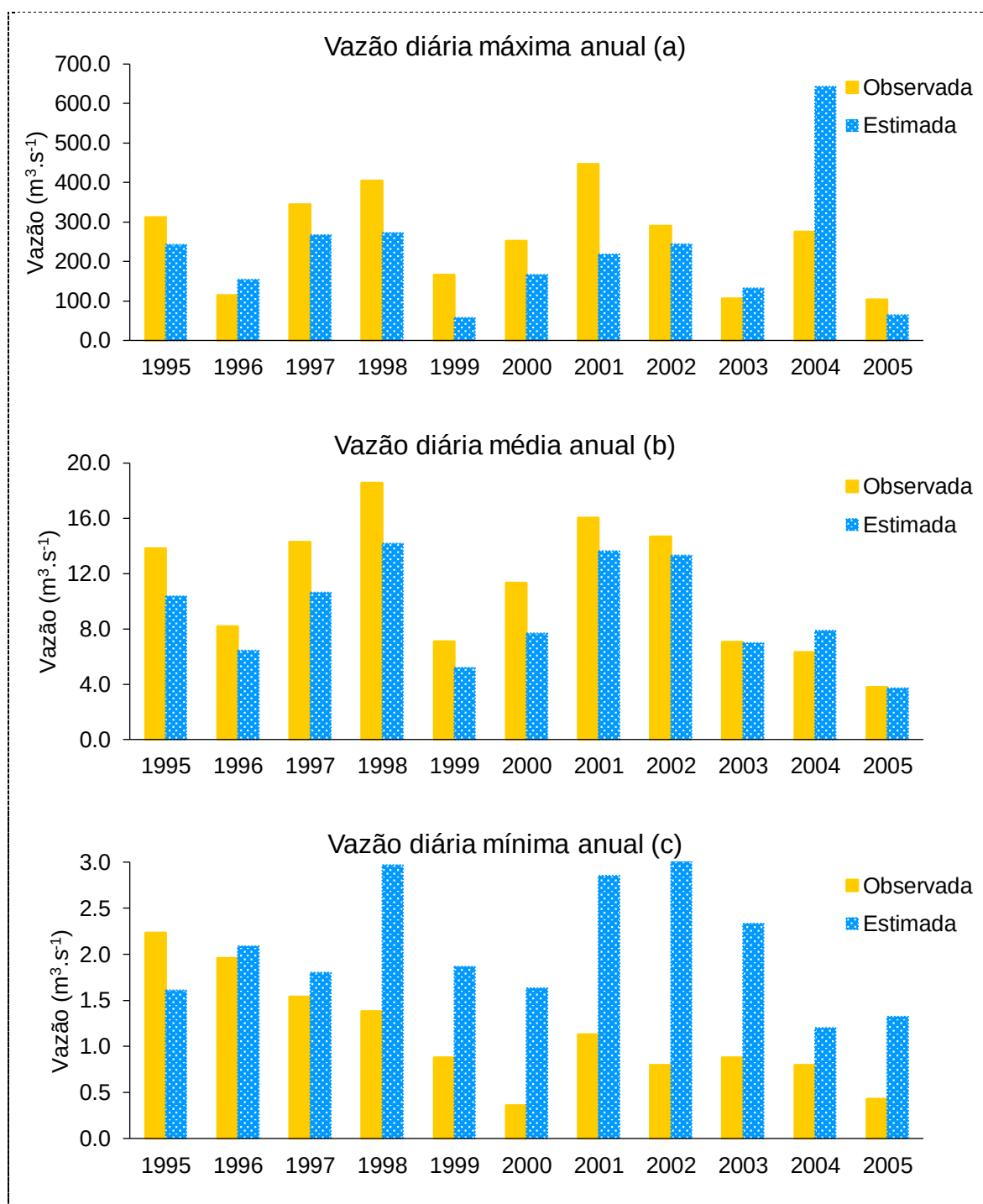


Figura 21 – Vazões máximas (a), médias (b) e mínimas (c) diárias observadas na seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP-PCF) e estimadas pelo modelo LASH, considerando os períodos de calibração e validação.

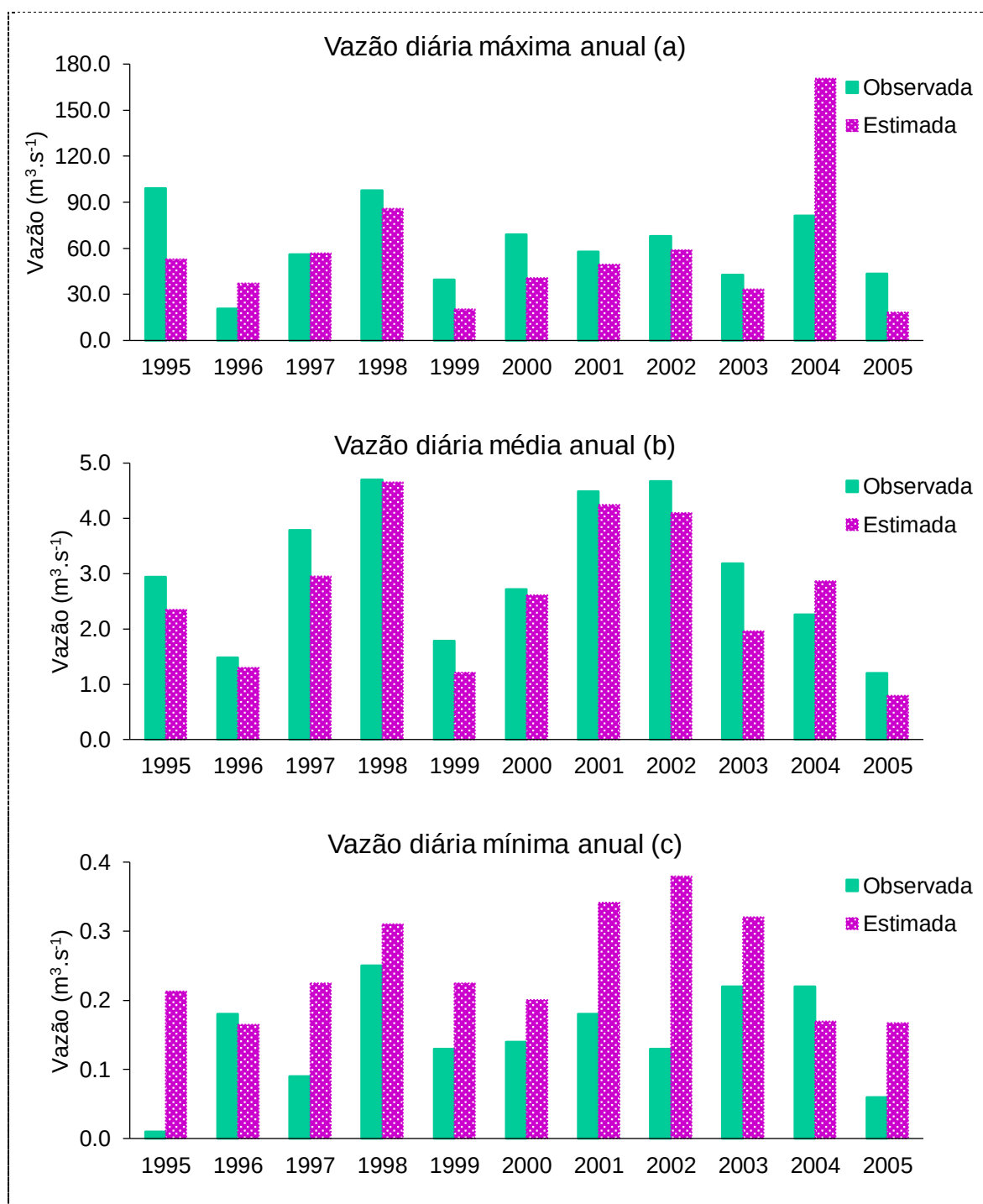


Figura 22 – Vazões máximas (a), médias (b) e mínimas (c) diárias observadas na seção de controle “Passo dos Carros” da bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF-PC) e estimadas pelo modelo LASH, considerando os períodos de calibração e validação.

Pode-se verificar, com base nas Figuras 20a, 21a e 22a, que as vazões máximas diárias anuais estimadas pelo modelo LASH para as bacias foram, em sua maioria, menores que aquelas observadas, reforçando o que já havia sido discutido neste estudo. No entanto, dos poucos anos em que se verificou

superestimativa, deve-se destacar 2004, ou mais especificamente seu dia 07 de maio. Neste dia, o pluviômetro instalado próximo à seção de controle da BHAP-PCF registrou um total acumulado de 344,5 mm de precipitação, o segundo maior valor verificado no local desde a instalação do equipamento, em 1964. Em decorrência do evento de precipitação, as vazões médias diárias observadas na BHAP-PCF e BHAF-PC foram de 275 e 81,4 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, respectivamente, enquanto que as estimadas foram de 642 e 170,7 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Embora tenha havido considerável superestimativa do valor observado, acredita-se que esta diferença poderia ter sido reduzida se as seções de controle possuísssem monitoramento em menor escala temporal, visto que as bacias apresentam tempo de concentração inferior a um dia e a vazão média diária é obtida pela média das vazões para duas leituras (07 e 17 horas) da régua linimétrica, as quais, além de muito provavelmente não terem captado o pico dos hidrogramas, acabam por atenuar tal vazão.

A tendência de subestimativa é verificada também quando analisam-se as vazões diárias médias anuais para ambas as bacias (Figuras 20b, 21b e 22b), com exceção do ano de 2004, cuja média é afetada pelos altos valores estimados em decorrência do evento de precipitação supracitado. Um bom desempenho do modelo perante a estimativa de vazões médias também é importante. Conforme relatam Beskow, Souza e Luz (2015), a vazão média de longo termo, estimada pela média aritmética de todos os valores que compõem a série histórica, é um importante indicador associado à disponibilidade hídrica e que representa a quantidade média de água disponível para atender à demanda oriunda das atividades humanas e para a conservação do ecossistema.

A partir da vazão média de longo termo, pode-se estimar o rendimento específico, ou produção de água, da bacia, que é a vazão média por área de drenagem, geralmente expressa na unidade de $\text{L}.\text{s}^{-1}.\text{km}^{-2}$. Para as bacias hidrográficas contempladas neste estudo, a vazão média de longo termo e a produção de água podem ser visualizadas na Tabela 17, considerando suas estimativas a partir de dados observados e estimados pelo modelo LASH. Ao analisar os valores desses indicadores (Tabela 17) a partir da estatística de precisão ΔQ e da classificação proposta por Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003), verifica-se que o ajuste foi “muito bom” para BHRP-PO, com ΔQ de -9,49%, e

“satisfatório” para as demais, com ΔQ de -17,43% para a BHP-PCF e de -19,01% para a BHAF-PC.

Tabela 17 - Vazão média de longo termo e produção de água observadas e estimadas pelo modelo LASH para as bacias hidrográficas analisadas neste estudo.

Bacia	Período	Área (km ²)	Vazão média de longo termo (m ³ .s ⁻¹)		Produção de água (l.s ⁻¹ .km ²)	
			Observada	Estimada	Observada	Estimada
BHRP-PO	01/01/2008 a 31/12/2016	4.701,3	89,02	80,57	18,93	17,14
BHAP-PCF	01/01/1995 a 31/12/2005	369,8	11,01	9,09	29,77	24,58
BHAF-PC	01/01/1995 a 31/12/2005	129,4	3,26	2,64	25,19	20,40

BHRP-PO = Bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório”; BHAP-PCF = Bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias”; BHAF-PC = bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros”

Quanto às vazões mínimas diárias anuais (Figuras 20c, 21c e 22c), é possível verificar que houve tendência de superestimativa na BHAP-PCF e na BHAF-PC, enquanto que na BHRP-PO ocorreu equilíbrio entre sub e superestimativas. A estimativa de vazões mínimas também é importante, uma vez que indicadores associados a essas vazões fornecem subsídio para, por exemplo, a identificação de susceptibilidade a estiagens e a determinação de vazões outorgáveis. Em se tratando de outorga de uso d’água, destaca-se a curva de permanência, a qual permite relacionar as vazões médias diárias observadas com a frequência com que essas vazões são igualadas ou excedidas. Na maioria das vezes, as curvas de permanência são utilizadas para determinar valores de referência de vazões mínimas, como a Q90% e a Q95%, as quais correspondem a vazões igualadas ou excedidas em 90 e 95% do tempo, respectivamente.

Na Figura 23a é possível verificar a curva de permanência de vazões médias diárias observadas na seção de controle da BHRP-PO e estimadas pelo modelo LASH para a referida bacia para os períodos de calibração e validação. Para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, tais curvas de permanência podem ser visualizadas nas Figuras 23b e 23c, respectivamente.

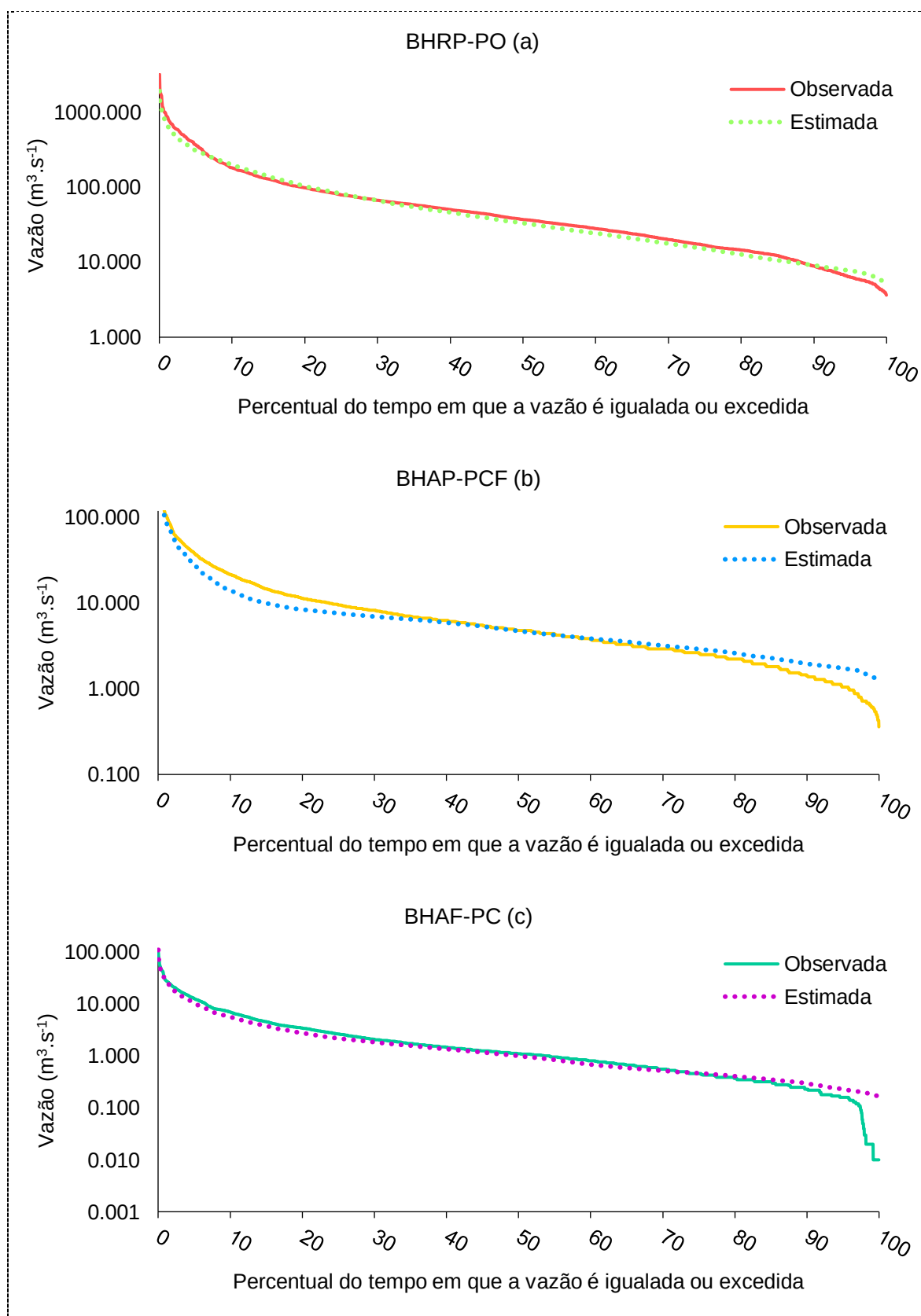


Figura 23 – Curvas de permanência de vazões médias diárias observadas e estimadas pelo modelo LASH nas seções de controle “Pedro Osório”, da bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP-PO) (a), “Ponte Cordeiro de Farias”, da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP-PCF) (b), e “Passo dos Carros”, da bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF-PC) (c).

É possível verificar visualmente que, de modo geral, as curvas de permanência estimadas e observadas foram condizentes, especialmente para a BHRP-PO (Figura 23a), no entanto, tenderam a se afastar nas vazões mínimas. O afastamento das curvas é notado na BHAP-PCF (Figura 23b) para vazões com permanência superior à 80% do tempo, enquanto que na BHAF-PC (Figura 23c), para vazões com permanência superior à 85%.

Das curvas de permanência acima apresentadas, extraiu-se algumas vazões de referência e suas respectivas vazões estimadas e observadas, as quais podem ser analisadas na Tabela 18. Nesta Tabela e também Figura 23, pode-se perceber que, para a BHAP-PCF e a BHAF-PC, as vazões máximas da curva de permanência tendem a ser subestimadas pelo modelo LASH, enquanto que as vazões mínimas, superestimadas; para a BHRP-PO, as máximas e as mínimas foram sempre superestimadas.

Tabela 18 – Vazões de referência da curva de permanência e suas respectivas vazões observadas e estimadas pelo modelo LASH para nas seções de controle “Pedro Osório”, da bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP-PO), “Ponte Cordeiro de Farias”, da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP-PCF), e “Passo dos Carros”, da bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF-PC)

Vazão de referência	BHRP-PO		BHAP-PCF		BHAF-PC	
	Estimada (m ³ ,s ⁻¹)	Observada (m ³ ,s ⁻¹)	Estimada (m ³ ,s ⁻¹)	Observada (m ³ ,s ⁻¹)	Estimada (m ³ ,s ⁻¹)	Observada (m ³ ,s ⁻¹)
Q _{10%}	197,68	182,59	14,18	21,72	5,74	7,10
Q _{20%}	104,08	98,95	8,44	11,38	2,78	3,48
Q _{30%}	66,83	67,20	7,01	8,30	1,86	2,09
Q _{40%}	46,42	50,68	5,94	6,32	1,36	1,48
Q _{50%}	33,31	37,26	4,74	4,81	1,00	1,11
Q _{60%}	24,39	28,17	3,87	3,78	0,69	0,81
Q _{70%}	17,79	20,08	3,19	2,93	0,52	0,56
Q _{80%}	12,78	14,54	2,62	2,23	0,41	0,37
Q _{90%}	9,10	8,91	1,96	1,42	0,30	0,23
Q _{95%}	7,73	6,30	1,74	1,05	0,23	0,16
Q _{98%}	6,59	5,31	1,52	0,72	0,20	0,03

4.2. Análise de tendência nas projeções climáticas

Os valores de precipitação total anual média para as bacias hidrográficas analisadas neste estudo, obtidos a partir das simulações dos modelos climáticos para o clima presente, de 1961 a 2005, e o clima futuro, para os períodos de 2006

a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, perante os RCP's 4.5 e 8.5, podem ser visualizados na Tabela 19. Verifica-se nessa Tabela que: i) a precipitação total anual média simulada para o clima presente é maior na BHAP-PCF (1.486,2 mm), seguida pela BHRP-PO (1.447,0 mm) e pela BHAF-PC (1.377,7 mm); ii) que os modelos climáticos concordam entre si na projeção do aumento da precipitação total anual média perante o RCP 4.5; quando analisado o RCP 8.5, os modelos climáticos discordam quanto à projeção da precipitação total anual média no final do século XXI (2071-2099), visto que dois indicam aumento e dois indicam diminuição; iv) analisando a média da precipitação total anual média em todas as bacias, os maiores aumentos em relação ao clima presente são esperados perante ao RCP 4.5; v) analisando os dados fundamentos no RCP 4.5, a BHAF-PC apresenta aumento gradativo nos valores de precipitação total anual média ao longo dos períodos futuros, enquanto que a BHAP-PCF, aumento gradativo seguido por estagnação ao final do século (2071-2099), e a BHRP-PO, aumento gradativo e aumento em menor magnitude ao final do século (2071-2099); e vi) quanto ao RCP 8.5, as três bacias hidrográficas apresentam aumento gradativo da precipitação total anual média até o meio do século (2041-2070), seguido por aumento em menor magnitude ao final do século (2071-2099).

Os resultados obtidos junto ao teste de Mann-Kendall, na análise de tendência da precipitação total anual a partir de dados do clima presente e de projeções futuras dos MCG's BESM, CANESM2, HadGEM2-ES e MIROC5 regionalizados pelo MCR Eta para os RCP's 4.5 e 8.5, podem ser visualizados nas Figuras 24, 25, 26 e 27. A estatística Z do teste de Mann-Kendall e o p-valor para cada ponto da grade (Figura 14) podem ser visualizados no Apêndice D.

Tabela 19 – Valores de precipitação total anual média (mm) para as bacias hidrográficas analisadas neste estudo, obtidos das simulações dos 4 diferentes modelos climáticos para o clima presente (1961-2005) e anomalias (%) verificadas para os períodos futuros de 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, considerando os RCP's 4.5 e 8.5

Bacia	MCR/MCG	Precipitação total anual média (mm)	Anomalia (%) em relação ao clima presente (1961-2005)					
			RCP 4.5			RCP 8.5		
		1961-2005	2006-2040	2041-2070	2071-2099	2006-2040	2041-2070	2071-2099
BHRP-PO	ETA-BESM	1456,2	10,4	12,6	11,1	5,7	4,7	-1,2
	ETA-CANESM2	1451,9	12,1	17,1	13,6	15,8	18,8	-2,8
	ETA-HADGEM2-ES	1432,4	7,3	14,0	14,4	2,5	13,6	22,3
	ETA-MIROC5	1447,6	9,0	9,8	12,9	9,5	10,5	19,1
	Média	1447,0	9,7	13,4	13,0	8,4	11,9	9,3
BHAP-PC	ETA-BESM	1495,5	11,8	12,9	12,3	5,9	5,7	-3,7
	ETA-CANESM2	1491,0	10,6	16,3	12,8	13,6	16,9	-4,2
	ETA-HADGEM2-ES	1471,9	4,2	11,1	11,3	1,1	10,9	19,5
	ETA-MIROC5	1486,3	8,7	10,3	14,3	9,4	12,7	20,1
	Média	1486,2	8,8	12,7	12,7	7,5	11,6	7,8
BHAF-PC	ETA-BESM	1387,5	15,3	16,0	15,3	7,7	7,2	-4,5
	ETA-CANESM2	1380,9	10,8	17,1	14,6	13,8	18,7	-4,0
	ETA-HADGEM2-ES	1363,6	4,4	12,6	13,6	1,9	12,9	22,2
	ETA-MIROC5	1378,7	9,1	11,5	16,0	10,7	14,5	22,6
	Média	1377,7	9,9	14,3	14,9	8,5	13,3	9,0

BHRP-PO = Bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório”; BHAP-PCF = Bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias”; BHAF-PC = bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros”

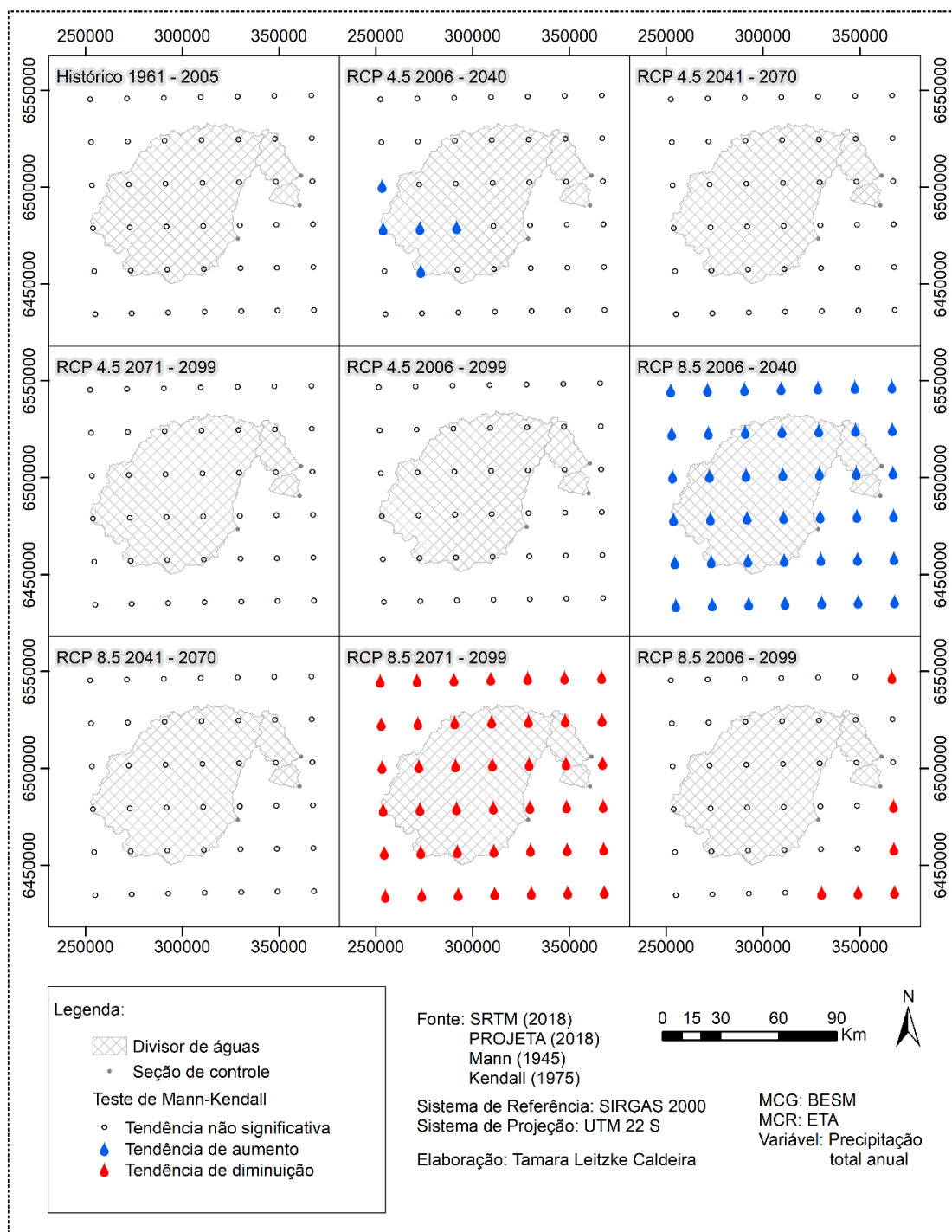


Figura 24 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-BESM, para o clima presente(1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

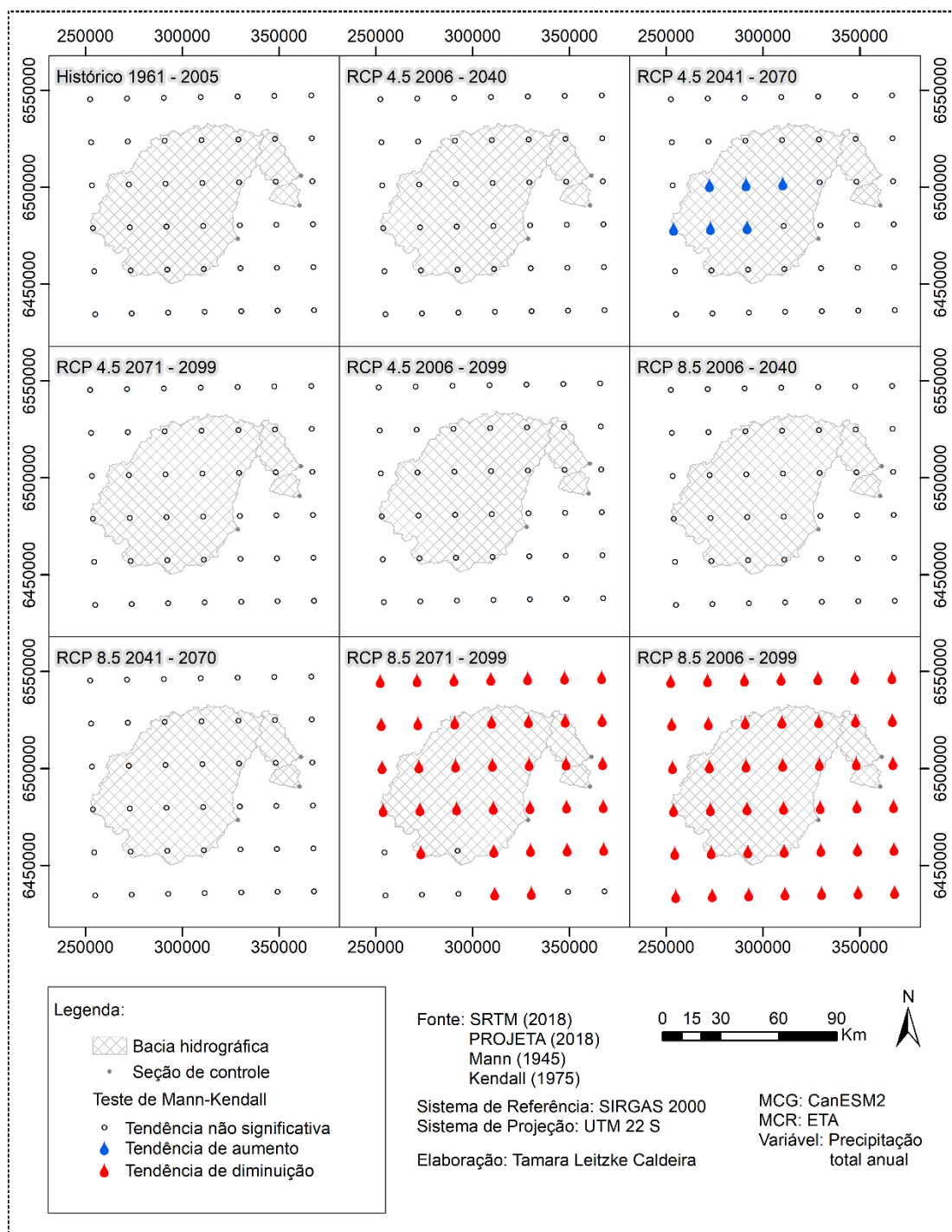


Figura 25 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-CANESM2, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

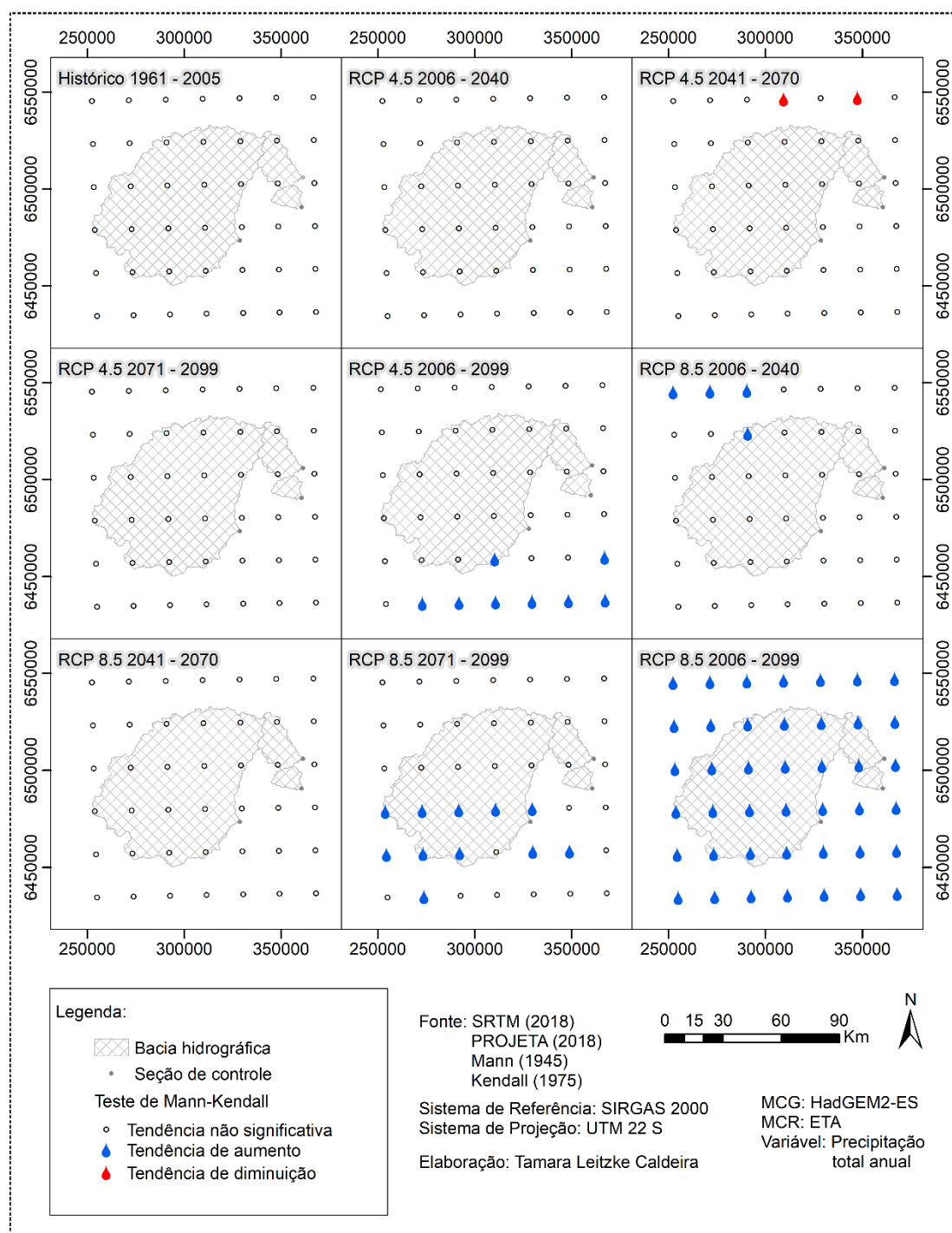


Figura 26 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-HADGEM2-ES, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5

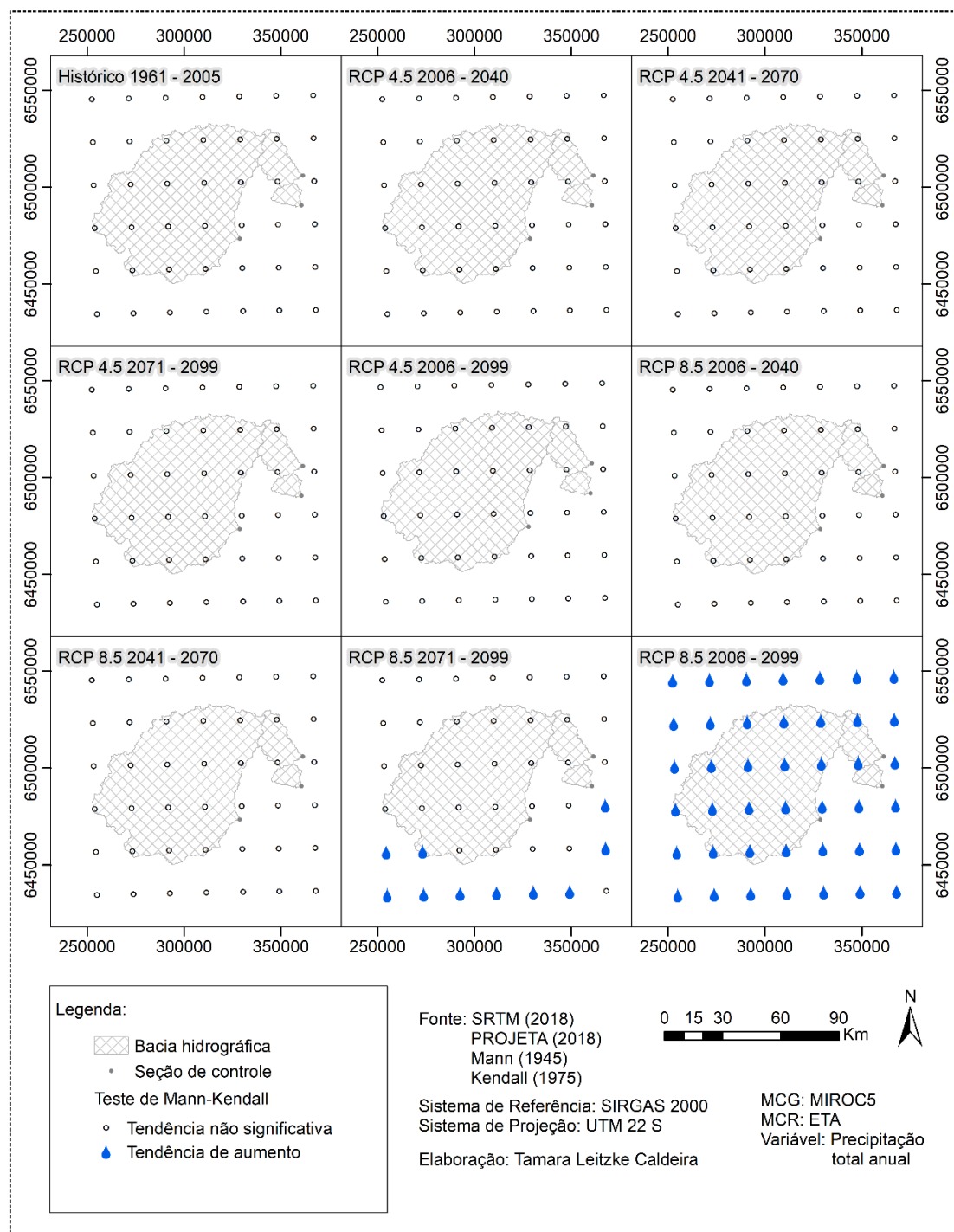


Figura 27 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de precipitação total anual, oriundos do modelo ETA-MIROC5, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

Pode-se perceber, com base nos resultados apresentados nas Figuras 24, 25, 26 e 27, que a precipitação total anual não apresentou tendência estatisticamente significativa para o clima presente (1961 – 2005) simulado pelos

MCG's regionalizados pelo MCR Eta. Algumas tendências foram verificadas, no entanto, quando analisadas as projeções para os RCP's 4.5 (relativamente otimista) e RCP 8.5 (pessimista).

Considerando o RCP 4.5 e o futuro próximo, período compreendido entre 2006 e 2040, as projeções do modelo ETA-BESM foram as únicas a apresentar tendência, indicando aumento da precipitação total anual em alguns pontos da grade, os quais estão localizados sobre a região sudoeste da BHRP-PO. Para o período de 2041 a 2070, tendências foram verificadas nas projeções do ETA-CANESM2, indicando aumento em alguns pontos da grade localizados no centro da BHRP-PO, e do ETA-HADGEM2-ES, indicando diminuição em dois pontos da grade localizados no entorno da área de estudo, próximos à BHAP-PCF. Já para o futuro distante, entre 2071 e 2099, não houve tendência nas projeções em nenhum ponto da grade. Por fim, considerando as projeções entre 2006 e 2099, apenas para o modelo ETA-HADGEM2-ES foi verificada tendência, tendo sido esta de aumento da precipitação total anual em um ponto da grade sobre a região sul da BHRP-PO e no entorno deste.

Frente ao RCP 8.5, e considerando o período de 2006 a 2040, o teste de Mann-Kendall indicou tendência de aumento da precipitação total anual em todos os pontos da grade do ETA-BESM e em 4 pontos do ETA-HADGEM2-ES, estando um deles ao norte da BHRP-PO e os demais acima deste. Para o período de 2041 a 2070 não houve tendência estatisticamente significativa, diferentemente do período de 2071 a 2099, para o qual verificou-se tendência de diminuição nas projeções do ETA-BESM – em todos os pontos da grade – e do ETA-CANESM2 – em quase todos os pontos – e de aumento nas projeções do ETA-HADGEM2-ES e do ETA-MIROC5, ocorrendo na metade sul da BHRP-PO, no primeiro caso, e em um ponto da grade ao sul da BHRP-PO, bem como em outros pontos do entorno, no segundo caso. Já o período de 2006 a 2099 evidenciou tendência de diminuição em alguns pontos da grade do ETA-BESM, todos fora da área de estudo, e em todos os pontos da grade do ETA-CANESM2, enquanto que a tendência de aumento foi verificada em todos os pontos da grade do ETA-HADGEM2-ES e do ETA-MIROC5.

Os resultados acima apresentados, tanto para o clima presente quanto para as projeções pelos RCP's 4.5 e 8.5, encontram-se sumarizados na Tabela 20.

Tabela 20 - Síntese da análise de tendência, pelo teste de Mann-Kendall, para o clima presente e as projeções futuras de precipitação total anual

	Clima presente		RCP 4.5				RCP 8.5			
Ano de início	1961	2006	2041	2071	2006	2006	2041	2071	2006	2006
Ano de fim	2005	2040	2070	2099	2099	2040	2071	2099	2099	2099
ETA-BESM	N	S+	N	N	N	S+	N	S-	S-	S-
ETA-CANESM2	N	N	S+	N	N	N	N	S-	S-	S-
ETA-HADGEM2-ES	N	N	S-	N	S+	S+	N	S+	S+	S+
ETA-MIROC5	N	N	N	N	N	N	N	S+	S+	S+

N = não houve tendência estatisticamente significativa; S+ = houve tendência estatisticamente significativa de aumento; S- = houve tendência estatisticamente significativa de diminuição

É possível verificar na Tabela 20, assim como na Figura 24, que as projeções do modelo ETA-BESM apresentaram tendência de aumento da precipitação total anual para o futuro próximo (2006 – 2040), tanto para cenário relativamente otimista de geração de gases do efeito estufa quanto para o cenário pessimista, tendo sido o último mais expressivo, contemplando todos os pontos da grade. Por outro lado, suas projeções para o final do século (2071 – 2099) perante o cenário pessimista indicam tendência de diminuição em todos os pontos da grade, o que já era esperado, haja vista as anomalias negativas apresentadas anteriormente, na Tabela 19.

Quanto ao modelo ETA-CANESM2, verifica-se na Tabela 20 e na Figura 25 que suas projeções para o RCP 4.5 indicam, em alguns pontos da grade, que há tendência de aumento da precipitação entre 2041 e 2070. Contudo, para o RCP 8.5, tal tendência é de diminuição em quase toda a grade, o que também era esperado – assim como para o ETA-BESM – em decorrência das anomalias negativas encontradas (Tabela 19).

Para o modelo ETA-HADGEM2-ES, conforme Tabela 20 e Figura 26, as projeções perante o RCP 4.5 indicam redução da precipitação total anual em apenas 2 pontos da grade, a qual ocorre entre 2041 e 2070. No que tange ao RCP 8.5, a tendência é de aumento no futuro próximo (2006 – 2040) e no futuro distante (2071 – 2099), não tendo sido verificada tendência entre 2041 e 2070.

Já as projeções do modelo ETA-MIROC5 não apresentaram tendência estatisticamente significativa para o RCP 4.5 e para os períodos de 2006 a 2040 e 2041 a 2070 do RCP 8.5, tendo ocorrido tendência de aumento para o final do

século (2071 – 2099) em pontos que estão, quase que em sua totalidade, fora da área de estudo.

Portanto, levando em consideração as anomalias apresentadas na Tabela 19 e os resultados do teste de Mann-Kendall, pode-se constatar que os modelos climáticos, via de regra, indicam aumento da precipitação total anual média e que em alguns períodos existem tendência estatisticamente significativa de aumento ou diminuição da variável ao longo do tempo. Os modelos climáticos geralmente concordam entre si na simulação de aumento da precipitação total anual média, tendo sido verificada discordância apenas quando analisadas as simulações do final do século (2071-2099) fundamentadas no RCP 8.5. Estes resultados vão ao encontro dos prognósticos apresentados no AR5 do IPCC (2013), os quais indicam que regiões úmidas de altas latitudes experimentarão incrementos na precipitação no clima futuro.

No que tange à temperatura média diária anual, os valores médios para as bacias hidrográficas analisadas neste estudo, obtidos a partir das simulações dos modelos climáticos para o clima presente, de 1961 a 2005, e o clima futuro, para os períodos de 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, perante os RCP's 4.5 e 8.5, podem ser visualizados na Tabela 21. Os resultados do teste de Mann-Kendall para a temperatura média diária anual, por sua vez, podem ser visualizados nas Figuras 28, 29, 30 e 31 para os dados do clima presente e das projeções futuras dos modelos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-HadGEM2-ES e ERA-MIROC5, respectivamente; a estatística Z do teste de Mann-Kendall e o p-valor para cada ponto da grade (Figura 14) podem ser visualizados no Apêndice D.

Tabela 21 - Valores de média da temperatura média diária anual para as bacias hidrográficas analisadas neste estudo, obtidos das simulações dos 4 diferentes modelos climáticos para o clima presente (1961-2005) e anomalias (%) verificadas para os períodos futuros de 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, considerando os RCP's 4.5 e 8.5

Bacia	MCR/MCG	Média da temperatura média diária anual (°C)	Anomalia (%) em relação ao clima presente (1961-2005)					
			RCP 4.5			RCP 8.5		
		1961-2005	2006-2040	2041-2070	2071-2099	2006-2040	2041-2070	2071-2099
BHRP-PO	ETA-BESM	17,9	0,39	3,62	4,23	3,23	10,68	18,90
	ETA-CANESM2	17,9	6,75	11,68	14,19	7,21	14,91	23,43
	ETA-HADGEM2-ES	18,0	7,41	11,03	12,75	9,34	13,41	22,78
	ETA-MIROC5	17,8	2,16	4,73	5,46	3,23	7,48	11,14
	Média	17,9	4,19	7,77	9,17	5,76	11,63	19,07
BHAP-PC	ETA-BESM	18,5	0,73	3,79	4,27	3,17	9,92	17,63
	ETA-CANESM2	18,5	6,31	11,02	13,37	6,74	13,88	21,29
	ETA-HADGEM2-ES	18,7	6,84	10,20	11,87	8,35	12,13	20,85
	ETA-MIROC5	18,5	2,02	4,37	5,16	3,19	6,79	10,58
	Média	18,5	3,98	7,35	8,67	5,37	10,68	17,60
BHAF-PC	ETA-BESM	19,0	0,77	3,76	4,24	3,04	9,42	16,72
	ETA-CANESM2	18,9	6,03	10,60	12,89	6,41	13,15	19,97
	ETA-HADGEM2-ES	19,1	6,39	9,66	11,28	7,69	11,36	19,70
	ETA-MIROC5	18,9	1,95	4,13	5,05	3,09	6,44	10,21
	Média	19,0	3,79	7,05	8,37	5,06	10,09	16,66

BHRP-PO = Bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório”; BHAP-PCF = Bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias”; BHAF-PC = bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros”

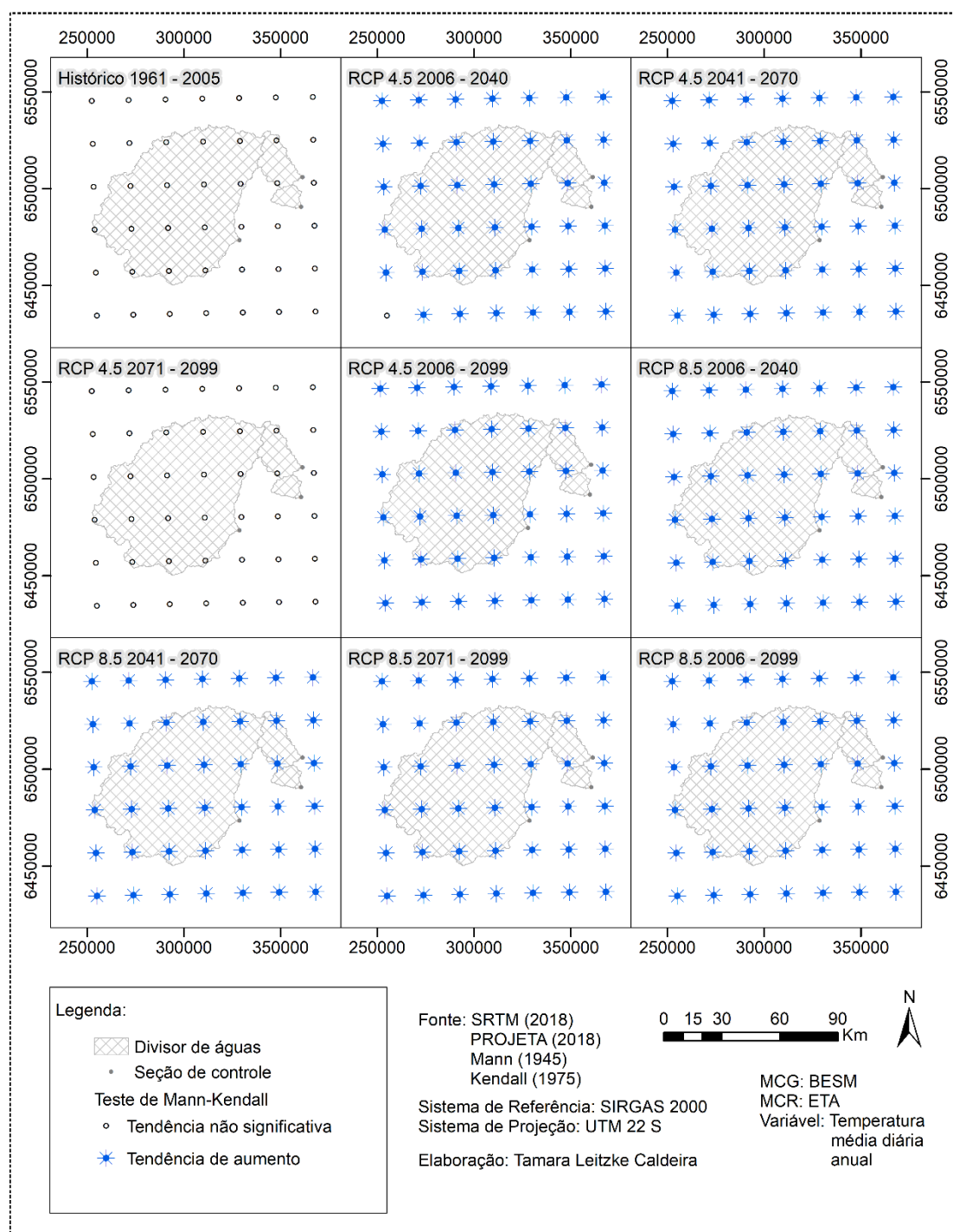


Figura 28 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-BESM, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

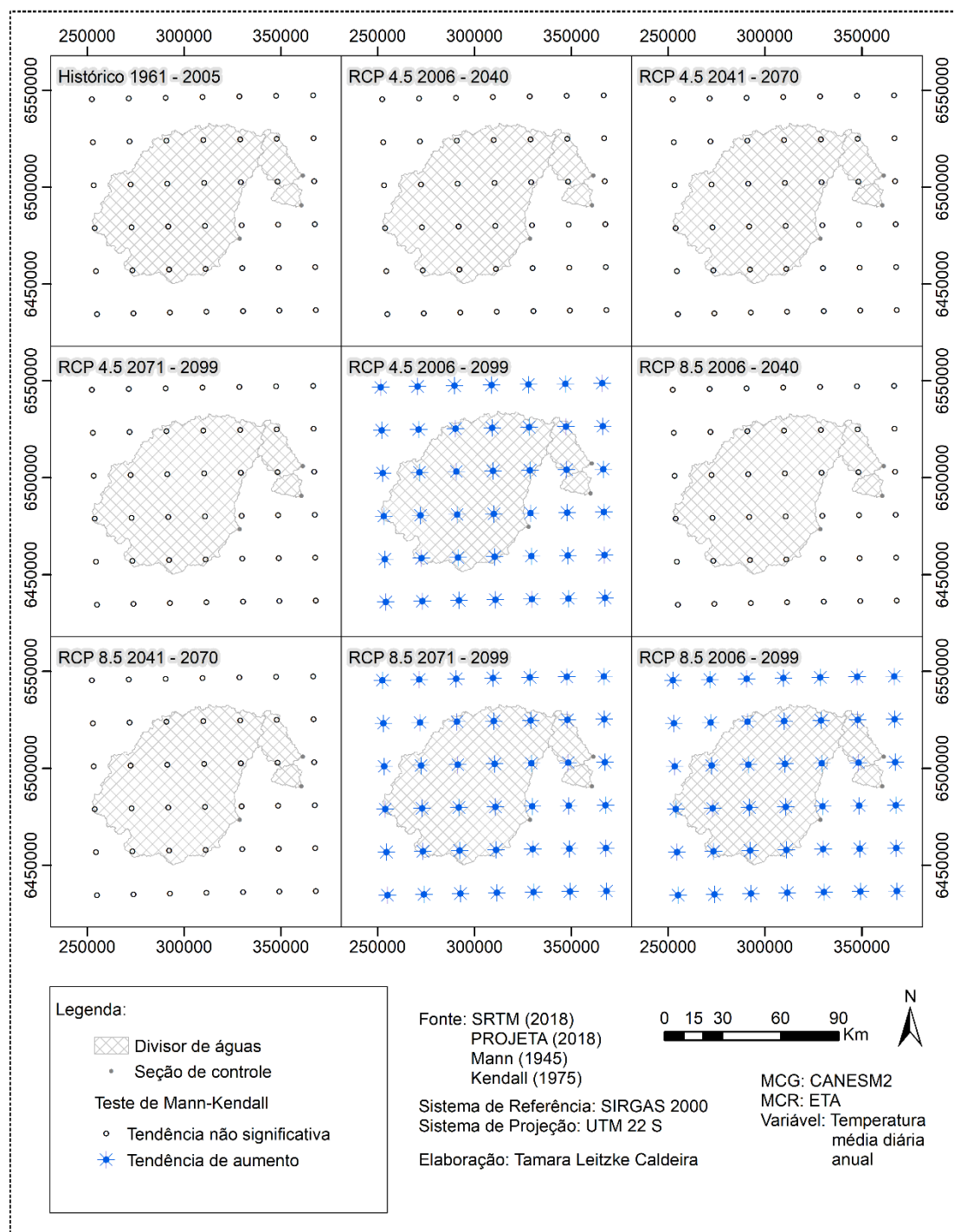


Figura 29 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-CANESM2, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

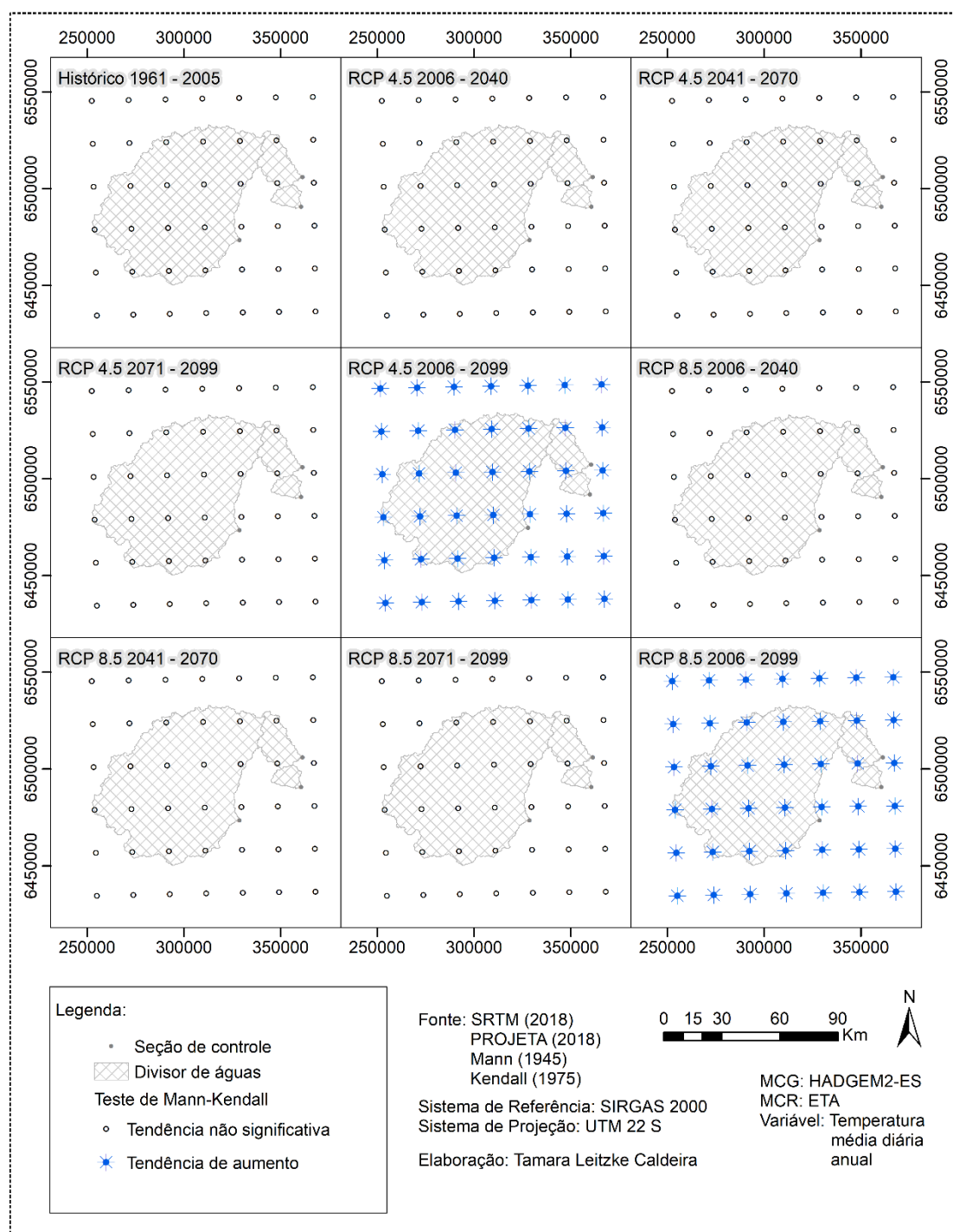


Figura 30 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-HADGEM2-ES, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

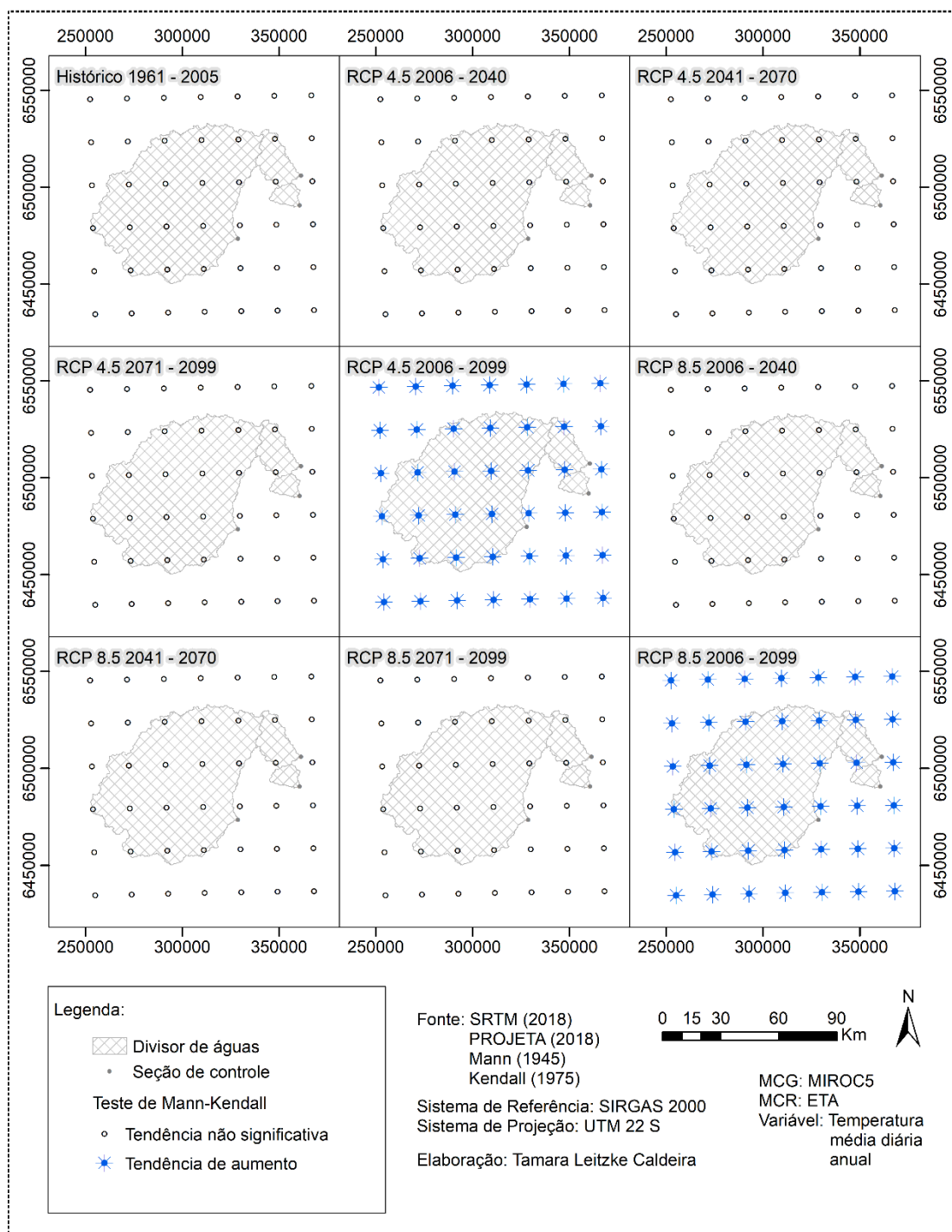


Figura 31 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de temperatura média diária anual, oriundos do modelo ETA-MIROC5, para o clima presente (1961-2005) e para os cenários futuros dos RCP's 4.5 e 8.5.

Verifica-se, com base na Tabela 21, que a temperatura média diária anual para o clima presente (1961-2005) simulado pelos modelos climáticos apresenta valor médio superior para a BHAF-PC (19°C), seguido pela BHAP-PCF (18,5°C) e

pela BHRP-PO (17,9°C). Verifica-se também que as projeções dos modelos climáticos para o clima futuro, tanto pelo RCP 4.5 quanto pelo RCP 8.5, concordam entre si, indicando aumento gradual nos valores médios de temperatura média diária anual nos períodos de 2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099, e que os aumentos da variável são mais pronunciados na BHRP-PO.

Quanto aos resultados do teste de Mann-Kendall, as Figuras acima apresentadas permitem verificar que não houve tendência estatisticamente significativa de aumento ou diminuição da temperatura média diária anual ao longo do tempo durante o clima presente (1961 – 2005). Em contraponto, os períodos futuros projetados pelo ETA-BESM apresentaram tendência de aumento da referida variável ao longo do tempo para os dois RCP's, com exceção do período de 2071 a 2099, para o qual a tendência foi verificada somente perante o RCP 8.5. Quanto às demais projeções, tem-se que apenas os dados do ETA-CANESM2 para o período de 2071 a 2099 apresentaram tendência estatisticamente significativa além do período futuro completo (2006 – 2099), cuja tendência foi verificada para todas as projeções. Estes resultados podem ser visualizados de forma sumarizada na Tabela 22.

Tabela 22 - Síntese da análise de tendência, pelo teste de Mann-Kendall, para o período clima presente e as projeções futuras de temperatura média anual

	Clima presente				RCP 4.5		RCP 8.5		
Ano de início	1961	2006	2041	2071	2006	2006	2041	2071	2006
Ano de fim	2005	2040	2070	2099	2099	2040	2071	2099	2099
ETA-BESM	N	S+	S+	N	S+	S+	S+	S+	S+
ETA-CANESM2	N	N	N	N	S+	N	N	S+	S+
ETA-HADGEM2-ES	N	N	N	N	S+	N	N	N	S+
ETA-MIROC5	N	N	N	N	S+	N	N	N	S+

N = não houve tendência estatisticamente significativa; S+ = houve tendência estatisticamente significativa de aumento

Em síntese, nos casos em que houve tendência estatisticamente significativa, foi sempre de aumento da temperatura média diária anual ao longo do período, e nunca de diminuição, o que já esperado tendo em vista as projeções crescentes da referida variável ao longo do século XXI (Tabela 22).

4.3. Avaliação do escoamento simulado pelo modelo LASH forçado pelos MCG's regionalizados pelo Eta

Neste tópico foi realizada uma análise comparativa entre vários indicadores obtidos dos hidrogramas diários observados nas seções de controle da BHAP-PCF e da BHAF-PC e dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH com base em dados dos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES. O período avaliado foi de 1965 a 2005, tomando como referência clima presente ou baseline dos modelos climáticos (1961 a 2005) e considerando a disponibilidade de dados observados, a qual data de meados de 1964 para as duas bacias. Esta análise não pôde ser conduzida na BRHP-PO, conforme mencionado anteriormente (Item 3.5), porque o início da sua série histórica de vazões data de meados de 2007.

As vazões médias mensais observadas na seção de controle da BHAP-PCF, as vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES e as vazões médias mensais obtidas pela média aritmética das vazões estimadas (*Ensemble Mean*), considerando o período de 1965 a 2005, podem ser visualizadas na Figura 32a. Na Figura 32b é possível observar os erros (ΔQ 's) na estimativa das vazões médias mensais, bem como o erro médio entre os meses do ano.

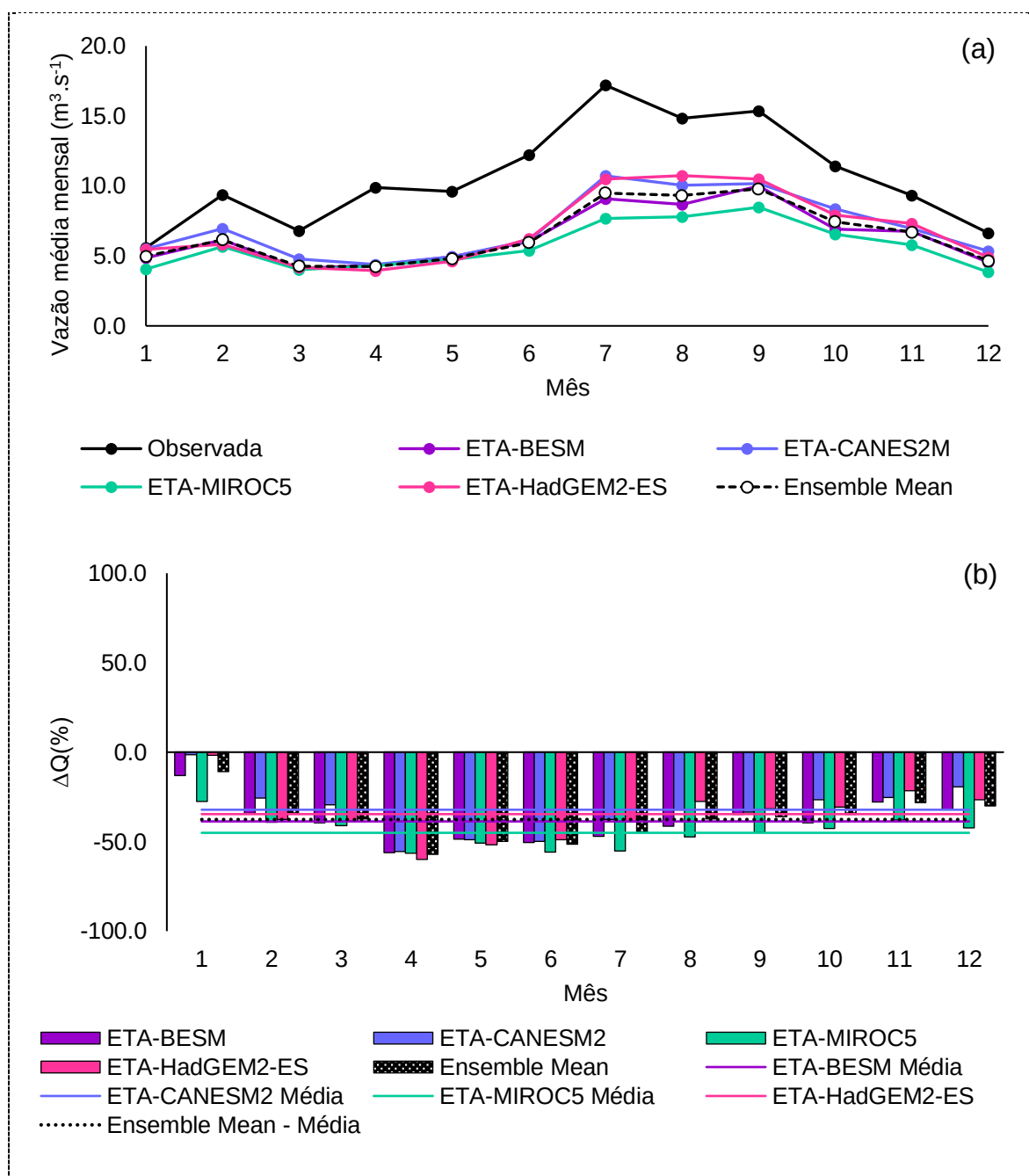


Figura 32 - Vazões médias mensais da bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) derivadas de dados diários observados entre 1965 e 2005, vazões médias mensais estimadas, para o mesmo período, pelo modelo LASH forçado pelos modelos ETA-BESM, ETA-CANES2M, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, a média das vazões estimadas (Ensemble Mean) (a) e erro de estimativa da vazão (ΔQ) entre os dados observado e simulado (b).

É possível verificar (Figura 32a) que as vazões médias mensais estimadas pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos ETA-BESM, ETA-CANES2M, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES foram, em sua totalidade, subestimadas quando comparadas às vazões médias mensais observadas. Porém, quando

analisada a variação sazonal das vazões, é notório que o regime hidrológico da BHAP-PCF, em termos de ocorrência de períodos úmidos e secos ao longo do ano, foi bem representado quando o modelo LASH foi forçado pelos dados do clima presente dos 4 MCG's regionalizados pelo Eta.

Também é possível verificar (Figura 32a) que as simulações, forçadas pelos diferentes modelos climáticos, concordam entre si para os meses em que ocorrem vazões mais baixa e divergem na tentativa de reproduzir vazões mais elevadas. Em termos de acurácia, é possível observar (Figuras 32a e 32b) que as vazões médias mensais estimadas pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo ETA-CANESM2 e pelo ETA-HadGEM2-ES foram as que mais se aproximaram, de modo geral, das vazões médias mensais observadas, com um ΔQ médio de -32,2% e -34,6%, respectivamente; em oposto, tem-se as vazões médias mensais estimadas pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo ETA-MIROC5, cujo ΔQ médio foi de -45,1%. As vazões médias mensais estimadas pelo modelo forçado pelo ETA-BESM, por sua vez, apresentaram ΔQ médio de -38,7%, próximo àquele encontrado para o *Ensemble Mean* (-37,6%). Os menores erros foram observados para o mês de janeiro, e maiores, para o mês de abril.

Comportamento semelhante foi verificado para a BHAF-PC, cujas vazões médias mensais observadas e estimadas pelo LASH forçado pelos modelos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, bem como a *Ensemble Mean* e os erros de estimativa, podem ser visualizados na Figura 33. Para esta bacia, o menor ΔQ médio (-33,7%) também foi obtido para as vazões médias mensais estimadas pelo modelo hidrológico forçado pelo ETA-CANESM2, seguido do ETA-HadGEM2-ES (-37,7%), do ETA-BESM (-41,2%) e do ETA-MIROC5 (-47,7%); para o *Ensemble Mean*, o ΔQ médio foi de 40,1%. Os meses de janeiro e abril também foram os que apresentarem melhor e pior estimativa, respectivamente, com exceção da vazão média de dezembro estimada por modelagem hidrológica forçada pelo ETA-MIROC5, a qual teve erro maior que a de abril.

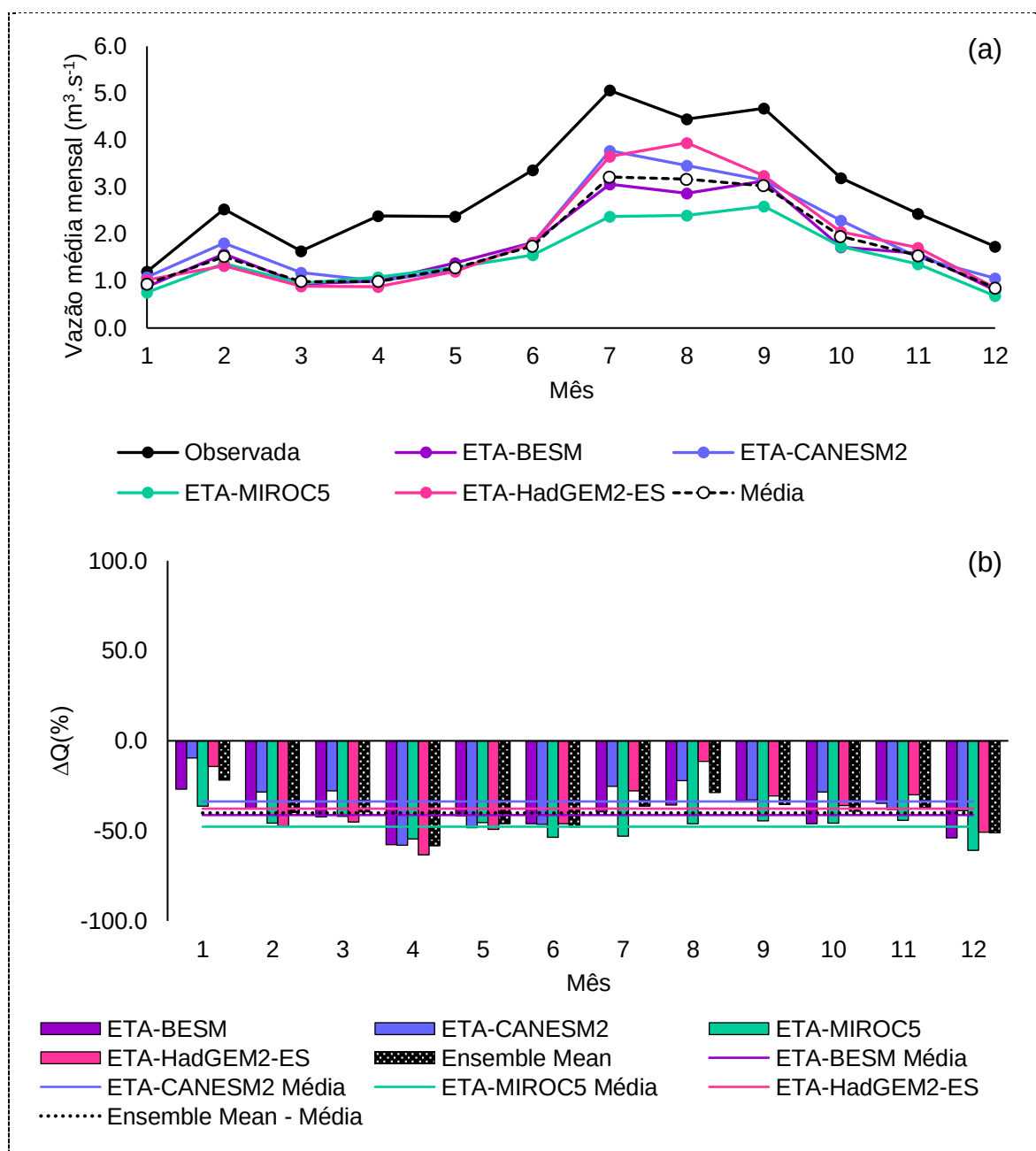


Figura 33 - Vazões médias mensais da bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC) derivadas de dados diários observados entre 1965 e 2005, vazões médias mensais estimadas, para o mesmo período, pelo modelo LASH forçado pelos modelos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, a média das vazões estimadas (Ensemble Mean) (a) e erro de estimativa da vazão (ΔQ) entre os dados observado e simulado (b).

Oliveira et al. (2017) buscaram avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre as vazões e o potencial de geração de energia hidrelétrica na região de cabeceira da bacia do rio Grande, sul de Minas Gerais. Os autores compararam, para o clima presente, as vazões médias mensais observadas com as vazões médias mensais estimadas pelo modelo SWAT forçado pelos dados climáticos dos

modelos ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5, tendo constatado, na maioria das vezes, superestimativa da variável pelos dois modelos climáticos, comportamento oposto àquele verificado neste estudo. Já Viola (2011), avaliando o impacto hidrológico das mudanças climáticas na mesma região que Oliveira et al. (2017), porém empregando o modelo hidrológico LASH e o modelo climático ETA-HadCM3, observou tanto superestimativa quanto subestimativa das vazões médias mensais observadas, tendo em vista a análise para 4 bacias hidrográficas.

Nas Figuras 34 e 35 podem ser visualizados, para a BHAP-PCF e BHAF-PC, respectivamente, os indicadores anuais de vazão diária máxima, média e mínima observadas e estimadas pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, para o período de 1965 a 2005.

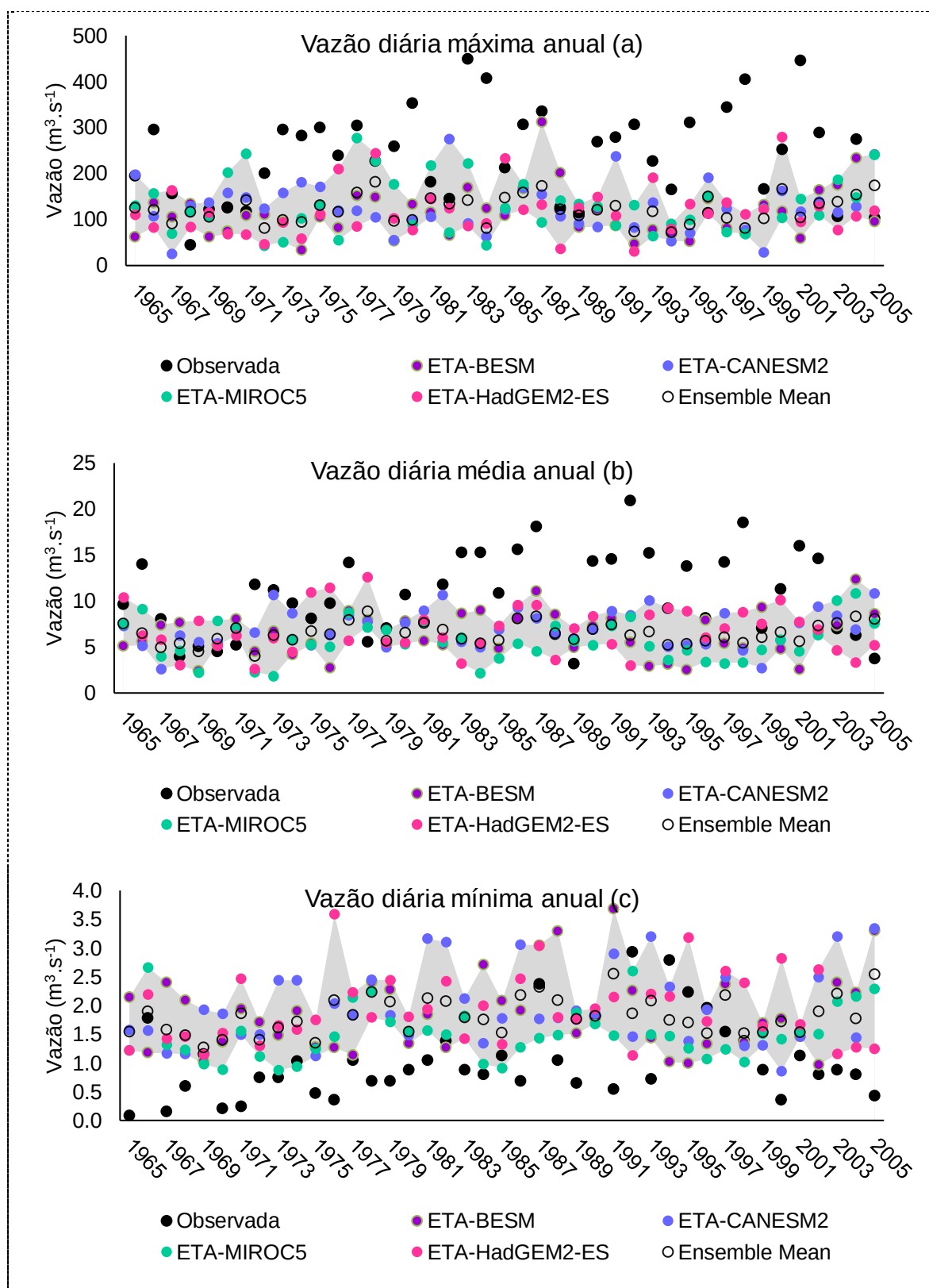


Figura 34 – Vazões máximas (a), médias (b) e mínimas (c) anuais observadas, estimadas pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, e a média das vazões estimadas (Ensemble Mean), considerando o período de 1965 a 2005, para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).

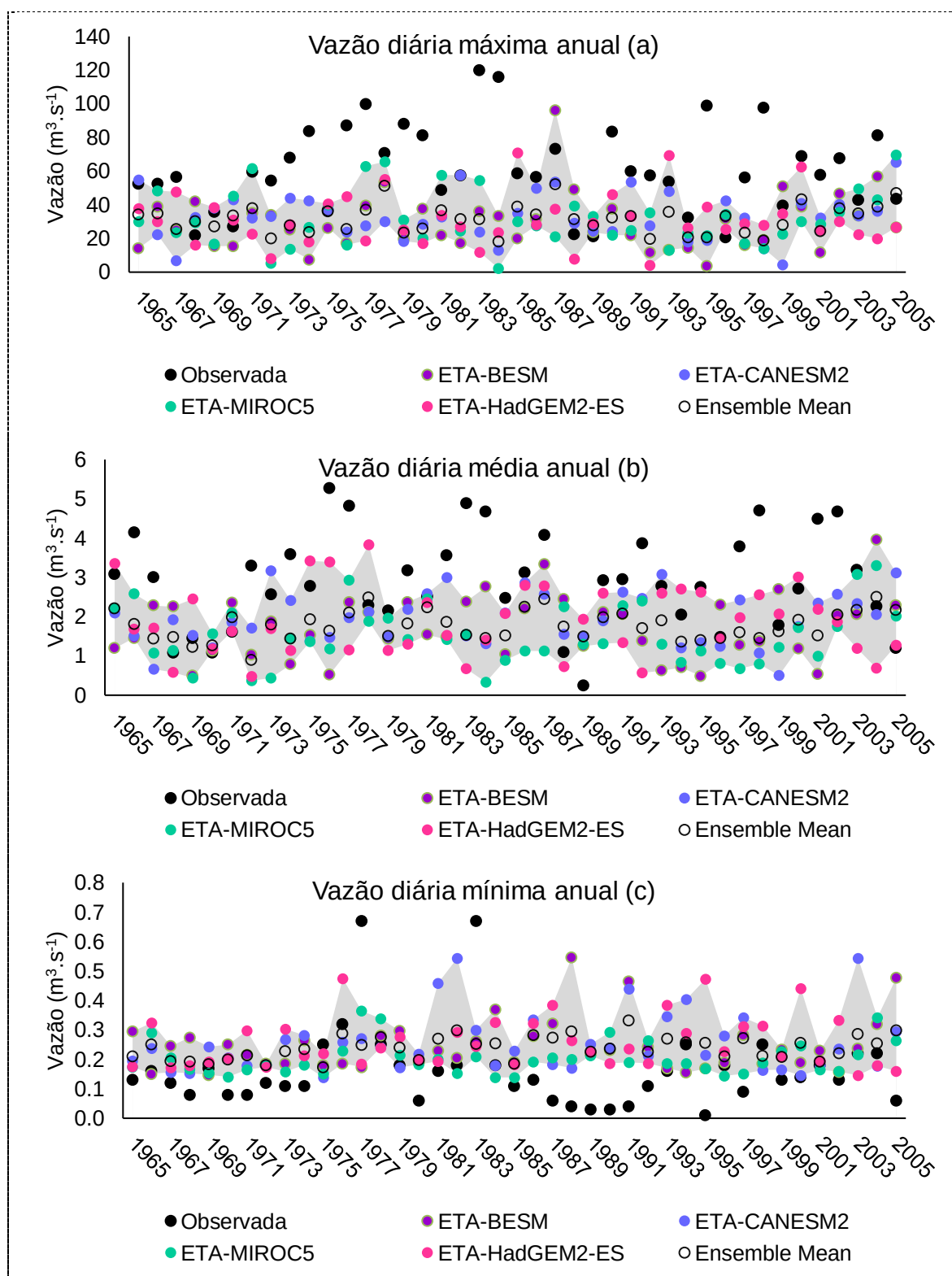


Figura 35 – Vazões máximas (a), médias (b) e mínimas (c) anuais observadas, estimadas pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, e a média das vazões estimadas (Ensemble Mean), considerando o período de 1965 a 2005, para a bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAFF-PC).

Os indicadores anuais acima apresentados (Figuras 34 e 35) têm comportamento semelhante entre as bacias hidrográficas analisadas, tendo sido as vazões diárias máximas e médias quase sempre subestimadas, enquanto que as vazões diárias mínimas, superestimadas. Levando em consideração os erros médios de estimativa desses indicadores em relação aos dados observados (Tabela 23), o melhor desempenho para as vazões máximas da BHAP-PC foi verificado pela modelagem hidrológica forçada pelo ETA-MIROC5, seguido pelo ETA-CANESM2, ETA-BESM e ETA-HadGEM2-ES, enquanto que da BHAF-PC, ocorreu pelo ETA-CANESM2, seguido pelo ETA-MIROC5, ETA-HadGEM2-ES e ETA-BESM. Quanto às vazões médias diárias anuais, o comportamento foi semelhante àquelas mensais em ambas as bacias, tendo sido as melhores estimativas oriundas da modelagem hidrológica forçada pelo modelo climático ETA-CANES2M, seguido pelo ETA-HadGEM2-ES, ETA-BESM e ETA-MIROC5. Para as vazões diárias mínimas da BHAP-PCF, o melhor desempenho foi por modelagem hidrológica forçada pelo ETA-MIROC5, subsequente pelo ETA-HadGEM2-ES, ETA-CANESM2 e ETA-BESM, enquanto que da BHAF-PC, foi pelo ETA-MIROC5, seguido pelo ETA-CANESM2, ETA-BESM e ETA-HadGEM2-ES.

Tabela 23 – Erros médios de estimativa (ΔQ , %) das vazões máximas, médias e mínimas anuais obtidos da comparação entre dados observados e estimados por modelagem hidrológica forçada pelos modelos climáticos para as bacias hidrográficas do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC)

Vazão diária anual	ETA-BESM	ETA-CANESM2	ETA-MIROC5	ETA-HadGEM2-ES
BHAP-PCF				
Máxima	-39,29%	-30,31%	-27,71%	-40,49%
Média	-24,49%	-20,00%	-31,33%	-22,50%
Mínima	243.29%	219.22%	147.66%	216.63%
BHAF-PC				
Máxima	-40,83%	-31,93%	-33,95	-40,21%
Média	-16,69%	-10,05%	-26,63%	-10,65%
Mínima	204.69%	191.07%	135.85%	246.07%

Cabe destacar que, em ambas as bacias, houve uma grande discrepância entre os erros médios obtidos para as vazões máximas e médias e aqueles obtidos para as vazões mínimas (Tabela 23). As elevadas diferenças entre os valores de vazão diária mínima anual observados nas seções de controle e estimados pelo

modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos pode ser atribuída, em parte, à função-objetivo escolhida para a calibração dos parâmetros (Tabela 13), haja vista que o RMSE tende a priorizar vazões médias e altas.

Quanto à produção de água na BHAP-PCF entre 1965 e 2005, o resultado obtido da modelagem hidrológica forçada pelo ETA-CANESM2 foi o que o mais se aproximou daquele obtido pelos dados observados, tendo sido o primeiro igual a $19,01 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^2$ e, o segundo, a $28,92 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^2$; desempenho próximo foi obtido pelo ETA-HadGEM2-ES, com $18,55 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^2$ de produção de água, seguido pelo ETA-BESM, com $17,23 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^2$, e pelo ETA-MIROC5, com $15,40 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^2$. Na BHAF-PC, cuja produção de água observada entre 1965 e 2005 foi de $22,55 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^2$, foi verificado mesmo desempenho dos modelos climáticos, sendo que ETA-CANESM2, o ETA-HadGEM2-ES, o ETA-BESM e o ETA-MIROC5 produziram estimativas de, respectivamente, 15,03, 14,53, 13,37 e $11,68 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^2$.

Frente ao exposto, pode-se constatar que os hidrogramas estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5, de forma geral, tenderam a subestimar as vazões médias e altas e superestimar as vazões mínimas. Segundo Teutschbein e Seibert (2010), é de se esperar que ocorram variações em relação aos dados observados, haja vista que a modelagem hidrológica forçada pelos modelos climáticos não consegue reproduzi-los de forma satisfatória, apresentando desvios nas escalas de tempo e de magnitude. Além do mais, existem incertezas atreladas ao próprio modelo hidrológico escolhido, sendo este assunto ainda pouco explorado na literatura, destacam Karlsson et al. (2016).

Para a BHAP-PCF, os indicadores de vazão média mensal e anual, bem como a produção de água, foram mais próximos aos dados observados quando derivados da modelagem forçada pelo ETA-CANESM2; quando analisadas as vazões diárias máximas e mínimas anuais, o modelo climático que se destaca é o ETA-MIROC5. Para a BHAF-PC, o hidrograma obtido da modelagem hidrológica forçada pelo ETA-CANESM2 proporcionou as melhores estimativas de vazões médias mensais e anuais, vazão diária máxima anual e produção de água, já pelo ETA-MIROC5, as melhores estimativas de vazão diária mínima anual.

O hidrograma obtido pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo ETA-HadGEM2-ES, embora não tenha apresentado os menores erros de estimativa

para os indicadores analisados neste tópico, teve desempenho próximo ao ETA-CANESM2 em termos de vazões médias mensais e anuais e de produção de água para as duas bacias. Já o hidrograma obtido pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM não apresentou performance superior aos demais em nenhum indicador.

4.4. Impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos

Os impactos das mudanças climática foram analisados neste tópico tomando como referência os hidrogramas estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelas projeções climáticas dos modelos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES frente aos RCP's 4.5 (relativamente otimista) e 8.5 (pessimista) de emissão dos gases do efeito estufa. As análises comparativas apresentadas levam em consideração os hidrogramas estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos dados dos modelos climáticos para o clima presente (1961 a 2005), não tendo sido empregados dados de vazão observados para esta finalidade. Os períodos futuros avaliados foram divididos em 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, conforme sugerem os dados obtidos junto ao CPTEC/INPE.

4.4.1. Vazões médias

As vazões médias mensais obtidas dos hidrogramas estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, para o clima presente (1961 a 2005) e para os períodos futuros de 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, considerando nas projeções futuras os RCP's 4.5 e 8.5, podem ser visualizadas nas Figuras 36, 37 e 38 para a BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC, respectivamente. Também pode ser visualizado, para cada período futuro e RCP, o *Ensemble Mean*, isto é, a média aritmética das vazões médias mensais estimadas. Já as Tabelas 24, 25 e 26 permitem visualizar a variação, em relação ao clima presente (1961 a 2005), dos valores de vazão média mensal e dos *Ensemble Mean* para o período futuro na BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC, respectivamente.

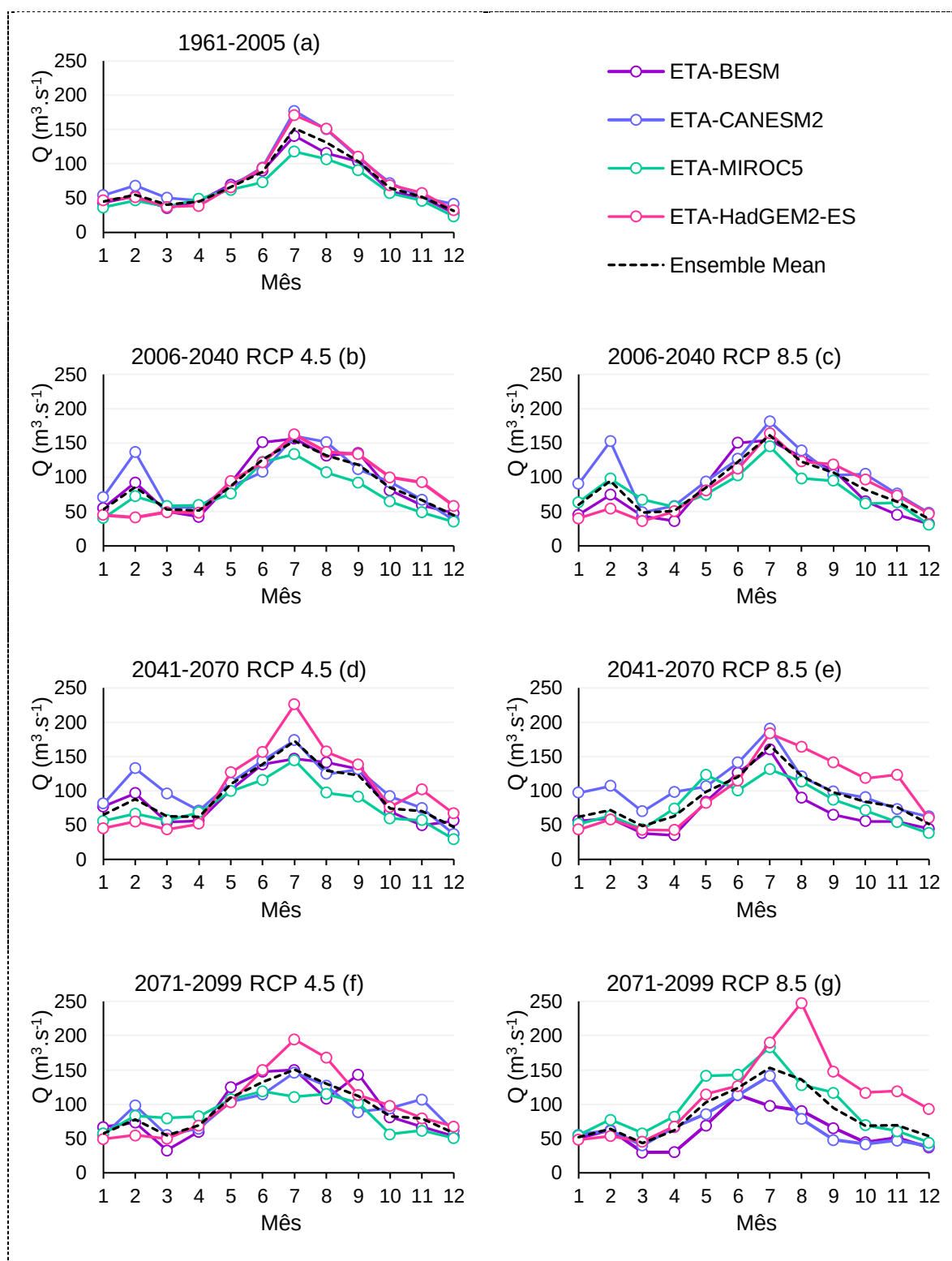


Figura 36 – Vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961 a 2005) (a) e para as projeções futuras de 2006 a 2040, RCP 4.5 (b) e 8.5 (c), 2041 a 2070, RCP 4.5 (d) e 8.5 (e), e 2071 a 2099, RCP 4.5 (f) e 8.5 (g) para a bacia hidrográfica do rio Piratini delimitada à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO).

Tabela 24 – Variação nas vazões médias mensais (ΔQ , %) extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para os RCP's 4.5 e 8.5, quando comparadas àquelas extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo clima presente modelado, para a bacia hidrográfica do rio Piratini delimitada à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO)

Mês	RCP	2006 - 2040					2041 - 2070					2071 - 2099				
		ETA-				Ensemble Mean	ETA-				Ensemble Mean	ETA-				Ensemble Mean
		BESM	CANESM2	MIROC5	HadGEM2-ES		BESM	CANESM2	MIROC5	HadGEM2-ES		BESM	CANESM2	MIROC5	HadGEM2-ES	
Jan	4.5	27.75	30.97	10.98	-4.80	16.87	77.57	49.00	53.03	-4.27	42.77	54.61	0.07	57.51	4.56	25.81
	8.5	4.27	66.46	74.64	-15.26	31.94	29.68	78.50	41.60	-8.00	36.89	16.66	2.33	50.62	2.47	15.49
Fev	4.5	75.39	99.59	54.07	-18.87	56.40	83.09	93.77	41.64	7.86	60.01	39.65	43.98	77.98	7.36	41.66
	8.5	41.20	122.82	109.12	6.66	73.16	12.95	56.10	35.71	13.79	31.49	18.41	-9.75	65.81	5.33	16.69
Mar	4.5	42.32	9.83	56.62	31.27	32.84	54.01	89.46	52.56	16.62	56.14	-6.42	9.53	114.32	33.54	35.98
	8.5	22.81	-3.73	80.46	-3.24	21.79	7.67	38.12	16.63	15.24	21.11	-15.07	-20.72	54.91	22.05	8.06
Abr	4.5	-7.39	21.49	21.31	24.63	14.77	22.17	52.26	39.24	33.07	36.94	31.17	39.03	67.88	78.75	53.42
	8.5	-20.54	24.93	16.40	29.98	12.13	-23.46	110.76	50.89	9.42	38.57	-34.24	42.90	66.97	74.90	36.71
Mai	4.5	31.28	29.29	21.83	42.58	31.37	45.45	67.16	59.60	91.44	65.71	78.75	55.07	72.47	55.94	65.62
	8.5	29.65	40.42	19.94	22.49	28.30	19.70	58.86	97.36	23.82	48.86	-0.95	28.57	126.92	73.70	55.15
Jun	4.5	67.86	13.99	67.23	29.73	43.05	53.55	51.58	58.27	67.03	57.59	63.98	20.71	62.60	60.16	51.00
	8.5	66.97	33.64	40.39	20.07	39.96	40.15	48.90	37.58	22.84	37.36	26.31	19.87	95.58	35.61	41.45
Jul	4.5	10.96	-9.60	13.61	-5.17	0.93	4.11	-2.04	22.79	31.97	13.80	6.63	-17.36	-5.68	13.66	-0.78
	8.5	9.45	2.55	23.12	-4.00	6.30	13.51	7.49	11.38	7.23	9.57	-30.61	-20.17	55.46	11.23	0.93
Ago	4.5	14.02	0.74	0.18	-9.45	0.61	22.24	-17.47	-9.22	3.70	-0.92	-6.23	-15.51	7.92	11.16	-0.99
	8.5	12.27	-7.56	-7.80	-18.69	-6.45	-22.41	-19.78	6.05	8.37	-6.97	-21.78	-47.79	20.07	63.74	3.98
Set	4.5	30.99	2.69	1.95	20.91	14.49	27.11	20.49	0.76	24.95	19.02	38.79	-18.29	13.14	2.83	8.53
	8.5	6.93	-5.11	4.84	7.53	3.46	-37.27	-9.17	-4.02	27.81	-5.17	-36.79	-55.67	29.24	33.43	-8.51
Out	4.5	37.23	28.99	13.12	44.39	31.50	17.59	27.60	4.47	10.33	15.53	37.70	31.08	-1.22	41.58	28.25

	8.5	10.10	45.30	7.77	39.45	27.32	-6.34	25.43	24.54	71.20	30.24	-24.21	-41.47	21.98	69.22	6.32
Nov	4.5	16.08	31.53	5.37	61.15	30.11	-3.16	46.02	22.89	76.71	37.20	30.90	109.93	33.91	38.84	53.39
	8.5	-11.18	48.83	36.91	27.79	25.38	7.94	43.34	17.56	114.07	48.54	0.81	-7.12	31.48	107.24	35.47
Dez	4.5	68.31	-8.92	49.87	77.79	41.97	98.53	-11.09	24.99	103.97	50.24	90.12	48.71	116.44	106.94	85.80
	8.5	13.54	16.71	31.00	42.92	25.49	57.82	50.36	62.57	83.48	62.94	31.69	-5.33	89.92	184.09	70.07

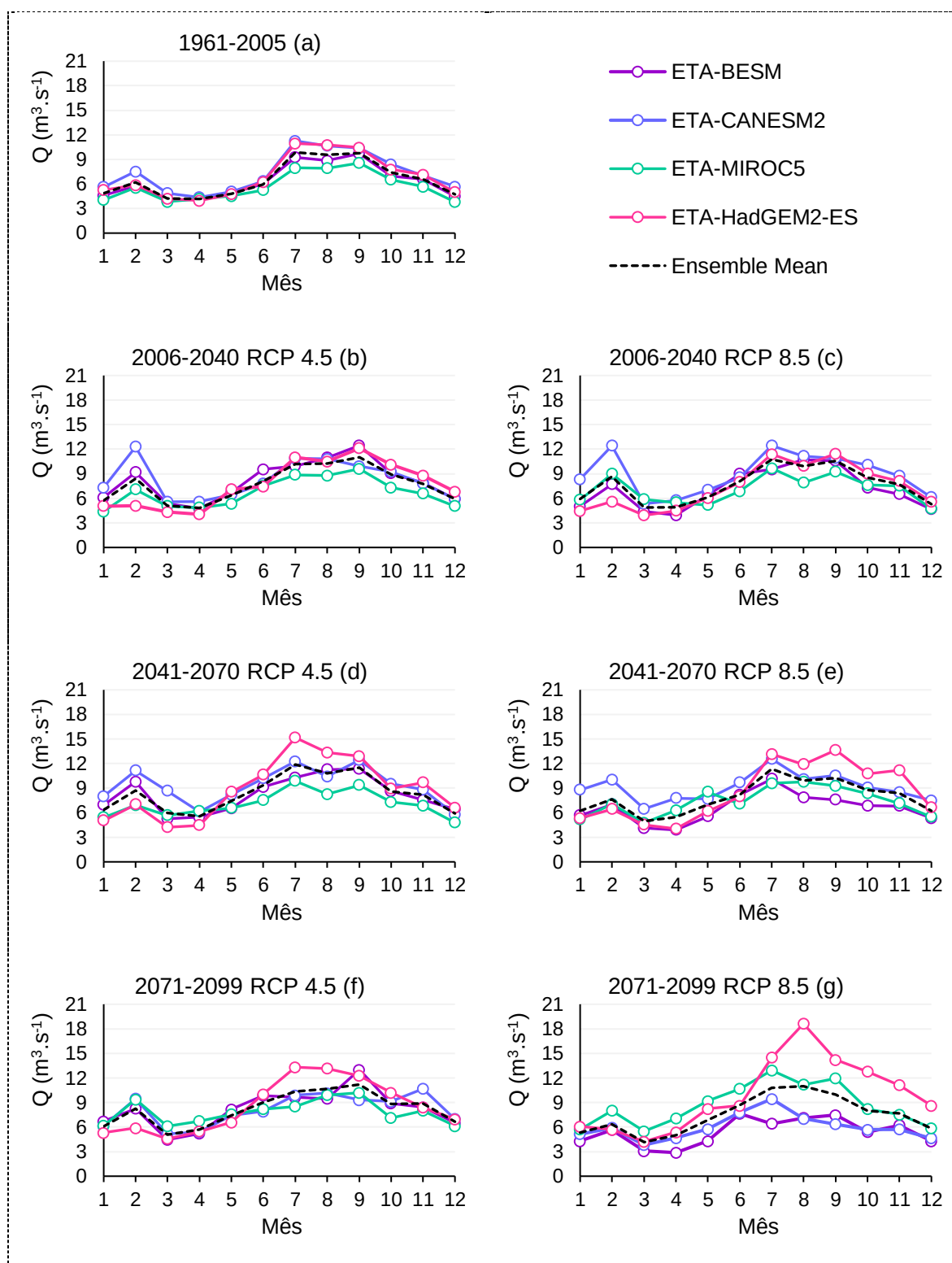


Figura 37 - Vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961 a 2005) (a) e para as projeções futuras de 2006 a 2040, RCP 4.5 (b) e 8.5 (c), 2041 a 2070, RCP 4.5 (d) e 8.5 (e), e 2071 a 2099, RCP 4.5 (f) e 8.5 (g) para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).

Tabela 25 - Variação nas vazões médias mensais (ΔQ , %) extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para os RCP's 4.5 e 8.5, quando comparadas àquelas extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo clima presente modelado, para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle "Ponte Cordeiro de Farias" (BHAP-PCF)

Mês	RCP	2006 - 2040					2041 - 2070					2071 - 2099				
		ETA-				Ensemble Mean	ETA-				Ensemble Mean	ETA-				Ensemble Mean
		BESM	CANESM2	MIROC5	HadGEM2-ES		BESM	CANESM2	MIROC5	HadGEM2-ES		BESM	CANESM2	MIROC5	HadGEM2-ES	
Jan	4.5	32.29	29.58	8.72	-3.87	16.91	50.77	41.61	33.88	-4.42	29.79	45.85	8.94	53.03	0.95	24.60
	8.5	8.87	47.57	44.12	-15.43	20.79	23.05	55.81	27.71	1.34	27.63	-6.77	-8.90	41.36	15.25	8.49
Fev	4.5	58.64	63.45	27.28	-13.16	36.01	69.22	48.12	24.34	19.28	40.87	43.00	25.86	68.71	0.22	33.42
	8.5	33.80	65.35	61.85	-4.86	40.52	21.14	33.31	26.48	9.49	23.27	-2.37	-21.39	44.22	-2.96	2.18
Mar	4.5	34.53	14.62	32.17	2.10	20.15	32.69	78.14	47.91	-0.05	41.06	12.29	6.45	59.37	8.04	20.22
	8.5	10.49	9.84	53.94	-7.06	15.77	3.64	33.06	24.12	7.32	17.68	-21.92	-21.60	43.51	0.22	-1.45
Abr	4.5	14.65	28.25	16.42	2.05	15.66	31.07	40.40	48.08	12.16	33.29	25.42	23.96	60.69	37.90	36.86
	8.5	-5.19	31.95	31.26	12.79	17.96	-6.47	78.22	49.58	1.68	31.71	-30.86	7.06	68.14	35.22	19.64
Mai	4.5	37.63	27.09	17.63	48.94	32.93	34.10	60.95	45.10	79.13	54.90	67.21	45.78	66.97	38.66	54.44
	8.5	30.30	38.25	14.21	26.74	27.73	13.72	51.06	88.36	30.27	45.24	-11.99	13.25	102.53	72.94	42.62
Jun	4.5	59.16	22.63	42.81	19.33	35.41	52.67	60.51	42.45	70.85	57.25	64.61	24.51	55.65	60.61	50.90
	8.5	50.14	34.76	30.00	28.23	35.86	36.81	52.60	34.15	27.63	38.03	27.45	22.87	102.48	38.37	45.68
Jul	4.5	7.52	-3.49	11.51	0.43	3.21	10.86	8.81	23.89	38.51	20.58	3.98	-12.14	6.81	21.61	4.84
	8.5	2.82	10.40	21.53	4.00	9.09	9.16	11.47	20.27	20.04	15.08	-30.73	-16.24	62.37	32.33	9.71
Ago	4.5	23.99	1.35	10.34	-2.42	7.40	27.40	-2.62	3.81	23.93	13.14	6.77	-4.96	25.12	22.22	11.65
	8.5	20.99	4.60	-0.23	-7.34	4.03	-11.15	-5.40	23.05	10.59	3.68	-19.80	-34.07	41.06	73.06	14.98
Set	4.5	28.38	-4.44	12.07	15.87	12.75	17.08	19.66	9.17	23.37	17.71	34.03	-10.24	19.00	17.57	14.59
	8.5	9.12	4.92	8.19	9.68	7.95	-21.82	1.57	8.09	30.66	4.97	-23.11	-38.86	39.42	36.15	2.24
Out	4.5	30.32	10.06	11.76	30.15	20.45	24.21	13.57	11.46	15.06	15.99	28.24	8.65	9.05	31.26	19.26

	8.5	5.04	20.06	16.81	16.37	14.86	-1.25	8.14	27.86	38.77	18.31	-22.33	-32.24	25.75	64.46	8.20
Nov	4.5	19.14	11.38	16.07	23.32	17.55	14.49	25.65	20.89	35.90	24.60	27.57	52.15	41.52	17.95	34.49
	8.5	-1.46	24.52	33.03	13.80	16.96	2.98	21.17	26.10	56.90	27.32	-5.53	-18.65	32.91	56.35	15.93
Dez	4.5	31.48	4.74	33.18	36.05	25.02	41.99	1.29	25.74	31.87	23.89	44.30	23.08	61.38	38.74	39.90
	8.5	3.64	7.73	24.22	11.50	11.05	17.85	31.81	44.39	32.34	31.16	-4.94	-18.28	54.31	71.88	23.17

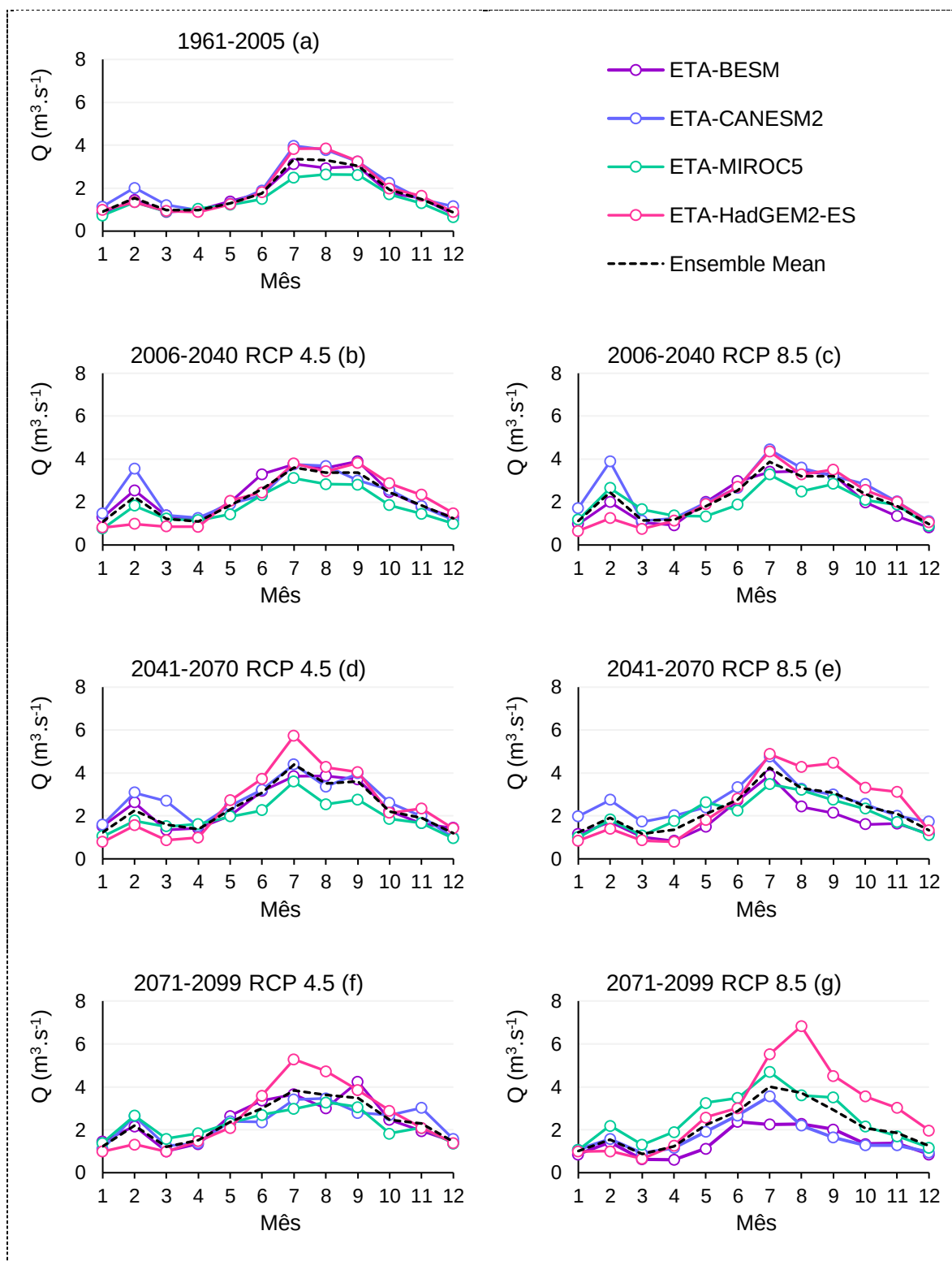


Figura 38 - Vazões médias mensais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961 a 2005) (a) e para as projeções futuras de 2006 a 2040, RCP 4.5 (b) e 8.5 (c), 2041 a 2070, RCP 4.5 (d) e 8.5 (e), e 2071 a 2099, RCP 4.5 (f) e 8.5 (g) para a bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAFF-PC).

Tabela 26 - Variação nas vazões médias mensais (ΔQ , %) extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para os RCP's 4.5 e 8.5, quando comparadas àquelas extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo clima presente modelado, para a bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle "Passo dos Carros" (BHAFF-PC)

Mês	RCP	2006 - 2040					2041 - 2070					2071 - 2099				
		ETA-				Ensemble Mean	ETA-				Ensemble Mean	ETA-				Ensemble Mean
		BESM	CANESM2	MIROC5	HadGEM2-ES		BESM	CANESM2	MIROC5	HadGEM2-ES		BESM	CANESM2	MIROC5	HadGEM2-ES	
Jan	4.5	59.65	29.32	3.33	-17.81	18.22	86.88	39.60	42.64	-20.59	34.55	78.42	-1.64	90.54	0.31	35.03
	8.5	20.24	50.45	60.13	-33.15	23.27	40.09	74.03	35.52	-15.06	34.93	5.67	-5.37	44.74	1.19	8.84
Fev	4.5	74.20	76.31	36.17	-27.71	44.32	79.47	52.70	32.33	14.87	46.33	48.03	30.73	98.44	-2.80	42.22
	8.5	36.17	92.52	96.88	-7.76	58.19	17.91	35.53	35.18	3.31	24.23	-3.23	-22.31	63.44	-26.20	0.01
Mar	4.5	53.82	13.43	34.02	-9.28	21.84	51.51	121.47	65.18	-8.25	61.96	12.32	2.13	75.11	5.62	22.02
	8.5	18.94	-7.07	82.63	-20.19	16.26	14.47	41.40	19.31	-10.00	18.04	-29.33	-25.34	43.25	-31.01	-11.83
Abr	4.5	17.12	30.15	9.35	-4.48	13.35	44.67	55.16	54.01	10.55	42.02	37.54	42.25	75.11	66.50	55.46
	8.5	-5.72	27.45	30.72	26.49	19.76	-14.88	107.03	67.40	-10.59	38.77	-38.39	19.96	81.82	43.41	27.30
Mai	4.5	44.96	50.36	16.56	63.64	44.09	46.18	94.28	60.56	116.67	78.79	92.58	87.78	88.13	66.29	83.90
	8.5	44.46	53.31	8.58	51.28	39.76	8.37	87.50	114.48	43.37	61.90	-18.17	49.94	165.95	105.56	72.93
Jun	4.5	85.09	22.56	54.84	35.16	48.72	77.21	70.00	50.17	106.10	76.92	89.06	24.78	79.78	99.10	72.25
	8.5	66.30	40.98	24.89	49.59	46.21	52.83	75.62	49.39	54.25	58.63	33.22	41.31	132.68	66.76	65.47
Jul	4.5	20.48	-5.61	24.21	-0.79	7.39	23.16	10.60	43.91	49.60	30.85	17.08	-14.04	18.84	37.77	14.11
	8.5	9.02	11.87	31.03	13.78	15.32	24.36	19.84	39.17	27.21	26.59	-27.77	-10.33	87.83	43.93	19.37
Ago	4.5	22.40	-2.80	7.21	-11.13	2.38	31.47	-11.27	-4.18	10.83	6.09	2.34	-8.42	24.36	22.94	9.67
	8.5	17.12	-5.02	-5.62	-14.87	-3.09	-17.43	-13.71	21.34	11.35	-0.23	-22.33	-41.85	36.74	77.29	12.92
Set	4.5	29.67	-7.44	6.86	17.71	11.61	22.82	22.84	5.03	24.37	19.39	40.76	-13.59	16.64	18.58	15.07
	8.5	8.92	-0.95	8.44	7.99	5.93	-29.05	-7.70	4.67	37.14	1.70	-32.69	-49.20	33.56	39.16	-3.49
Out	4.5	41.74	13.89	8.22	44.09	26.77	26.87	15.79	8.88	7.23	14.55	41.39	19.57	6.82	44.90	28.25

	8.5	13.82	25.69	22.83	27.96	22.95	-8.06	13.29	36.19	65.55	27.06	-22.99	-43.13	26.36	78.25	8.29
Nov	4.5	16.93	21.65	12.02	42.53	24.09	7.99	34.31	27.97	42.73	28.49	27.53	103.42	60.72	27.54	53.70
	8.5	-12.39	36.30	43.82	22.00	21.50	7.02	34.61	30.44	89.76	41.81	-9.52	-13.98	31.38	83.98	24.06
Dez	4.5	64.56	0.92	52.48	66.14	41.59	82.53	-15.01	44.95	58.30	36.95	83.57	36.02	109.95	56.93	65.96
	8.5	4.31	-4.26	36.86	20.18	11.63	48.22	48.82	69.00	49.11	52.55	9.88	-17.08	79.62	121.84	42.59

Os resultados obtidos neste estudo, sumarizados nas Figuras 36, 37 e 38 e nas Tabelas 24, 25 e 26, indicam que, de modo geral, acréscimos nas vazões médias mensais podem ser esperados ao longo do século XXI. Prognósticos específicos para cada bacia hidrográfica, observados junto ao *Ensemble Mean*, são descritos a seguir:

- BHRP-PO: pode-se esperar pequenas reduções nas vazões médias do mês de julho entre 2071 e 2099 (RCP 4.5), de agosto entre 2006 e 2040 (RCP 8.5), 2041 e 2070 (RCP's 4.5 e 8.5) e 2071 e 2099 (RCP 4.5), e de setembro entre 2041 a 2070 (RCP 8.5) e de 2071 a 2099 (RCP 8.5). Já os maiores acréscimos são observados no mês de fevereiro entre 2006 e 2040, no mês de maio (RCP 4.5) e de dezembro (RCP 8.5) entre 2041 e 2070 e no mês de dezembro entre 2071 e 2099.
- BHAP-PCF: espera-se haver maior acréscimo nas vazões médias do mês de fevereiro, entre 2006 e 2040, e dos meses de maio (RCP 4.5) e de junho (RCP 8.5), entre 2041 e 2070 e 2071 e 2099. Redução, embora pequena (1,45%), só foi verificada para o mês de março entre 2071 e 2099.
- BHAF-PC: pode-se esperar maior acréscimo nos meses de março (RCP 4.5) e de junho (RCP 8.5), entre 2006 e 2040, e no mês de maio, entre 2041 e 2070 e 2071 a 2099, e redução nos meses de agosto (RCP 8.5), entre 2006 e 2040 e 2041 e 2070, de março e de setembro (RCP 8.5), entre 2071 e 2099.

Perante o exposto, evidenciam-se os seguintes aspectos gerais nas três bacias hidrográficas analisadas: i) o prognóstico é de aumento nas vazões médias mensais nos períodos futuros em comparação ao clima presente, sendo geralmente mais evidente entre 2041 e 2070; ii) independente do período e do RCP avaliado, as maiores variações nas vazões médias, quando comparadas ao clima presente, poderão ocorrer nos meses de janeiro a junho e de outubro a dezembro, enquanto que as menores variações, nos meses de julho, agosto e setembro, meses estes que coincidem com os maiores valores de vazão média observados; iii) no período

de 2071 a 2099, o número de vezes em que se verificou redução das vazões médias mensais foi maior que nos demais períodos, porém, predominam os acréscimos; e iv) independente do período analisado, o *Ensemble Mean*, via de regra, indica valores mais altos de vazão média mensal perante o RCP 4.5.

Embora neste estudo tenha sido avaliada somente a precipitação total anual para o clima presente simulado e as projeções do clima futuro, pode-se dizer o incremento da variável ao longo do século XXI tem relação direta com o prognóstico de aumento nas vazões médias mensais de janeiro a junho e de outubro a dezembro, das bacias hidrográficas analisadas. O IPCC (2013) relata que em regiões úmidas de altas latitudes é esperado aumento da precipitação e maior contraste entre estações úmidas e secas, com exceções regionais, ressaltando que o aumento do escoamento é provável e consistente com os aumentos previstos na precipitação. Pode-se, portanto, considerar a área em estudo uma exceção, uma vez que os resultados indicam redução do contraste entre as vazões médias dos meses úmidos e secos.

Tendência de aumento das vazões médias mensais foi também verificada no estudo de Nilawar e Waikar (2019) para uma bacia hidrográfica localizada na China, empregando o modelo hidrológico SWAT e 3 modelos climáticos distintos daqueles empregados neste estudo. Porém, os autores verificaram maior aumento quando os dados climáticos consideravam o cenário mais pessimista de emissão de gases do efeito estufa (RCP 8.5), diferente do que foi observado neste estudo. Outro estudo que, de modo geral, apresenta aumento nas vazões médias mensais é o de Viola (2011) para a região sul de Minas Gerais, empregando o modelo hidrológico LASH e dados de um modelo climático sob um cenário intermediário do AR4.

Quanto às vazões médias anuais obtidas nos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, para o clima presente, de 1961 a 2005, e os períodos futuros, considerando os RCP's 4.5 e 8.5, bem como o *Ensemble Mean*, estas podem ser visualizadas nas Figuras 39 e 40 para a BHRP-PO, nas Figuras 41 e 42 para a BHAP-PCF e nas Figuras 43 e 44 para a BHAF-PCF.

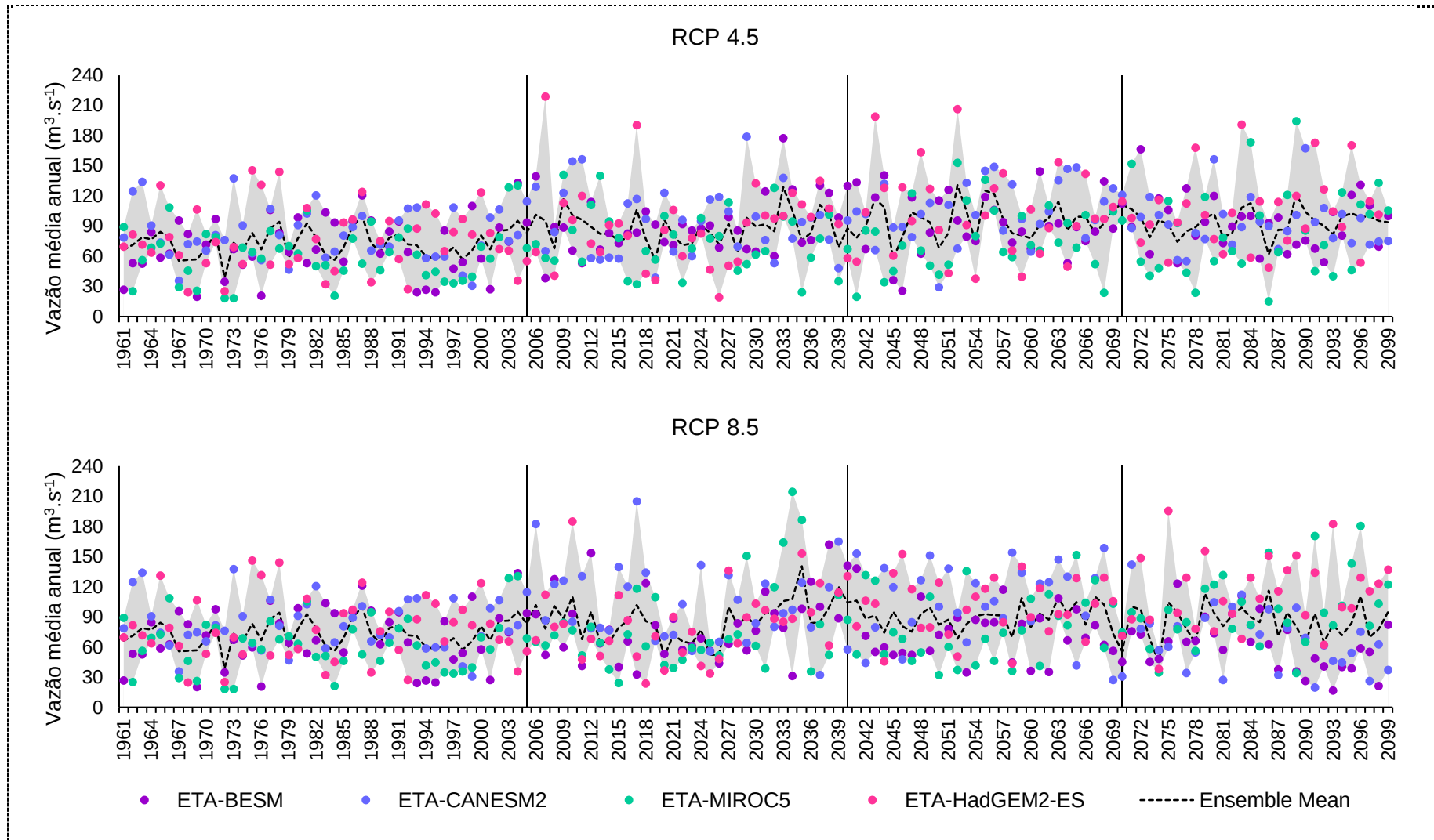


Figura 39 - Vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do rio Piratini delimitada à montante da seção de controle "Pedro Osório" (BHRP-PO).

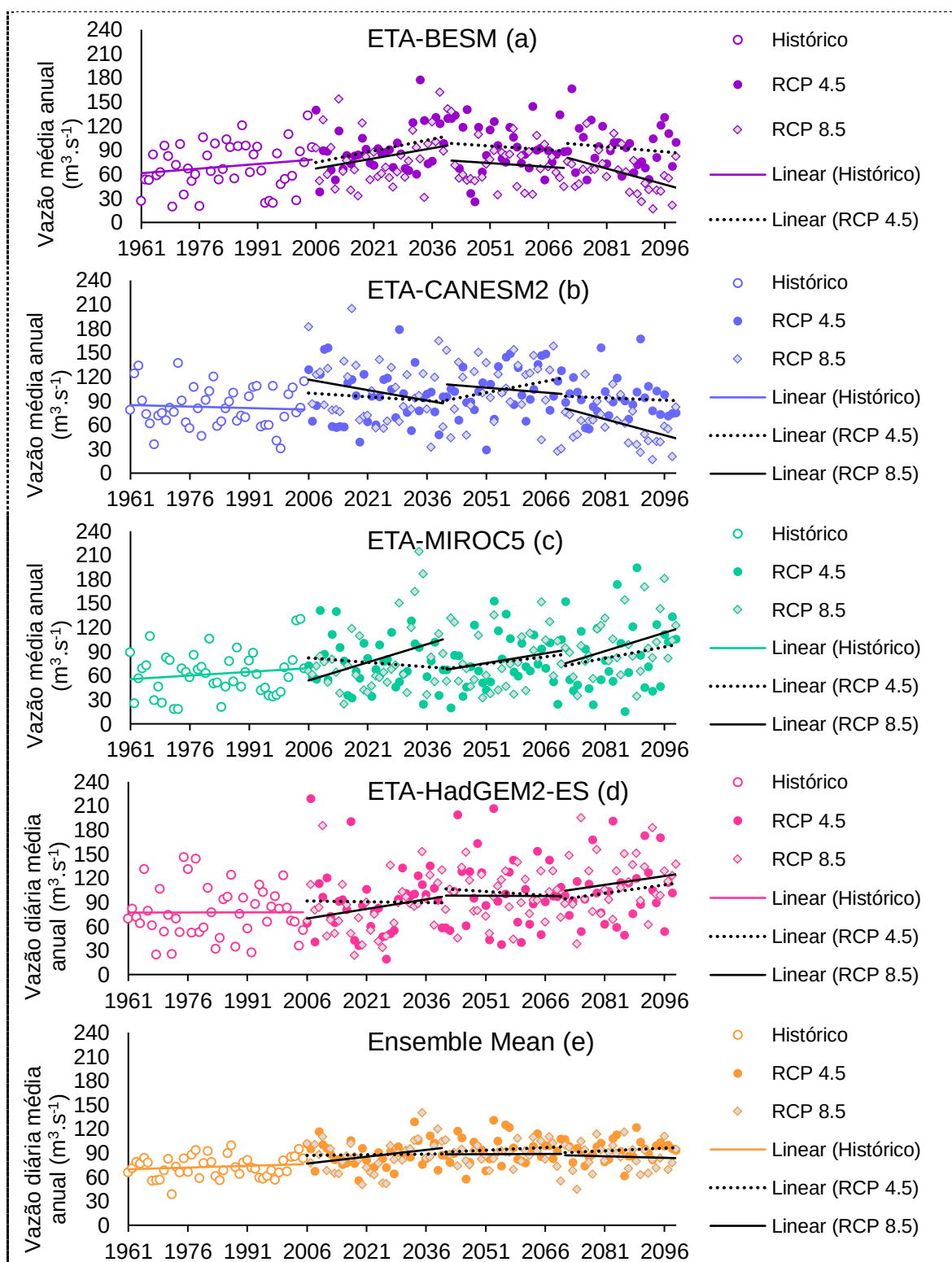


Figura 40 – Vazões médias anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle "Pedro Osório" (BHRP-PO).

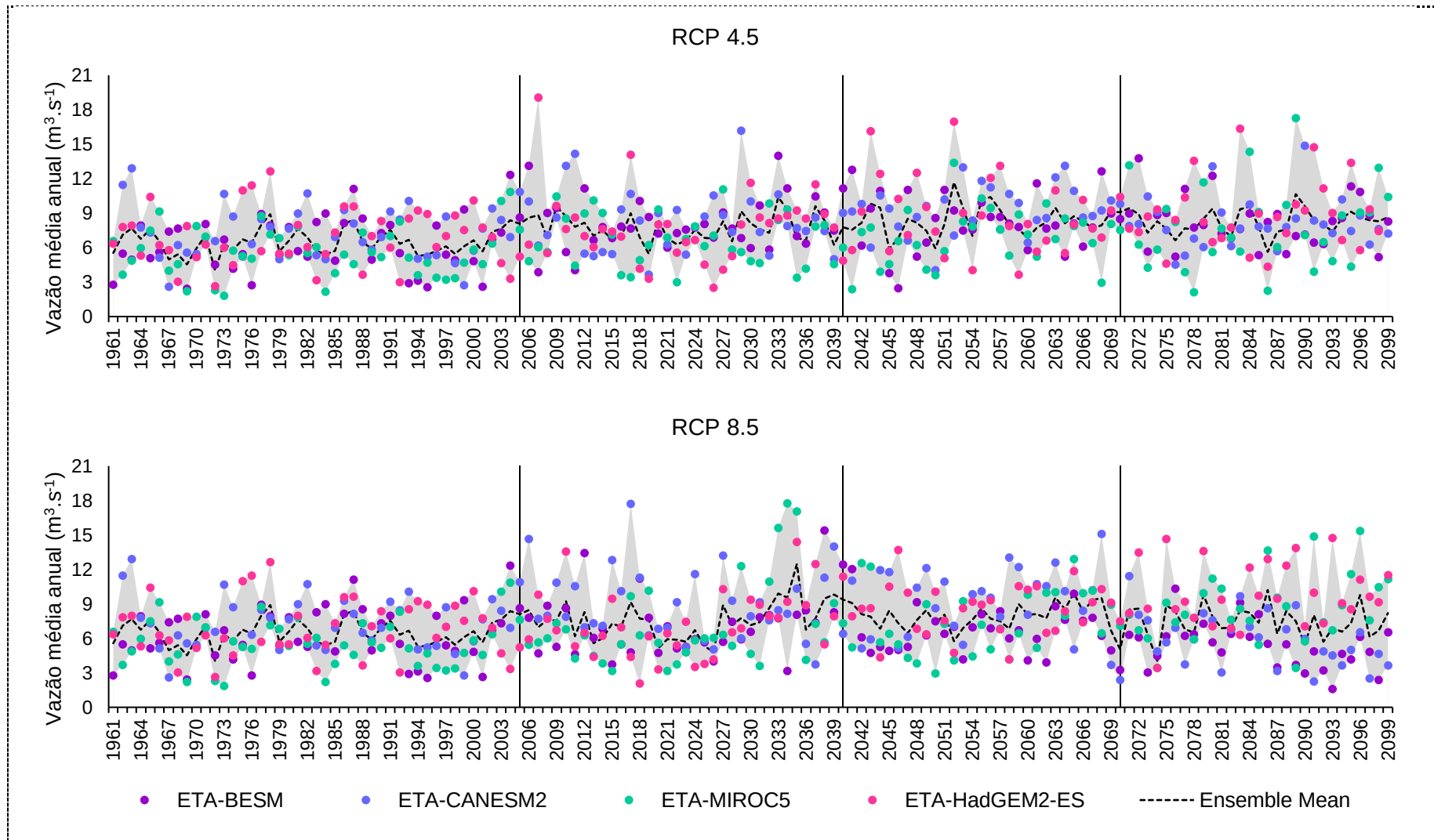


Figura 41 - Vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle "Ponte Cordeiro de Farias" (BHAP-PCF).

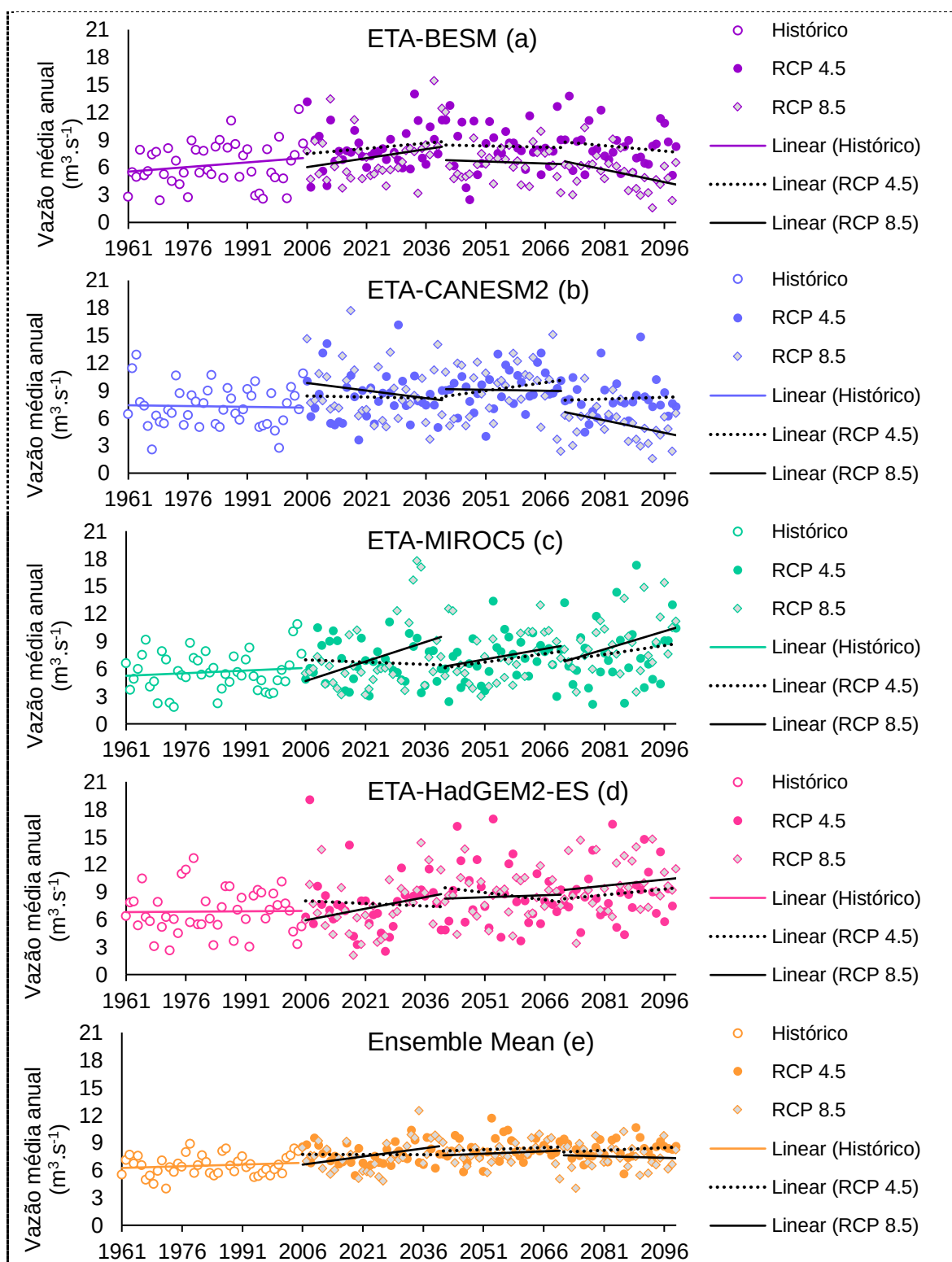


Figura 42 – Vazões médias anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).

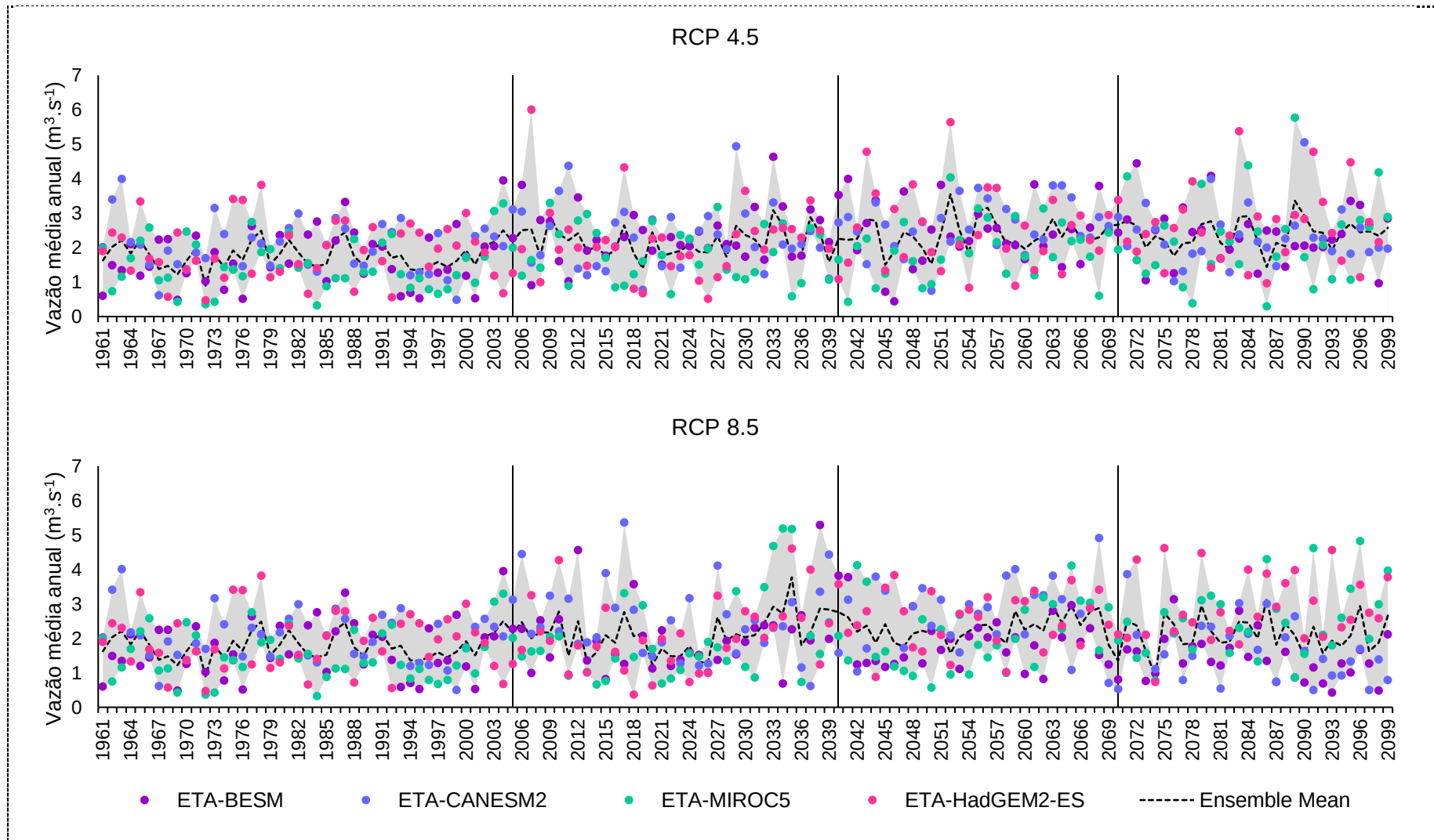


Figura 43 - Vazões médias anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle "Passo dos Carros" (BHAF-PC).

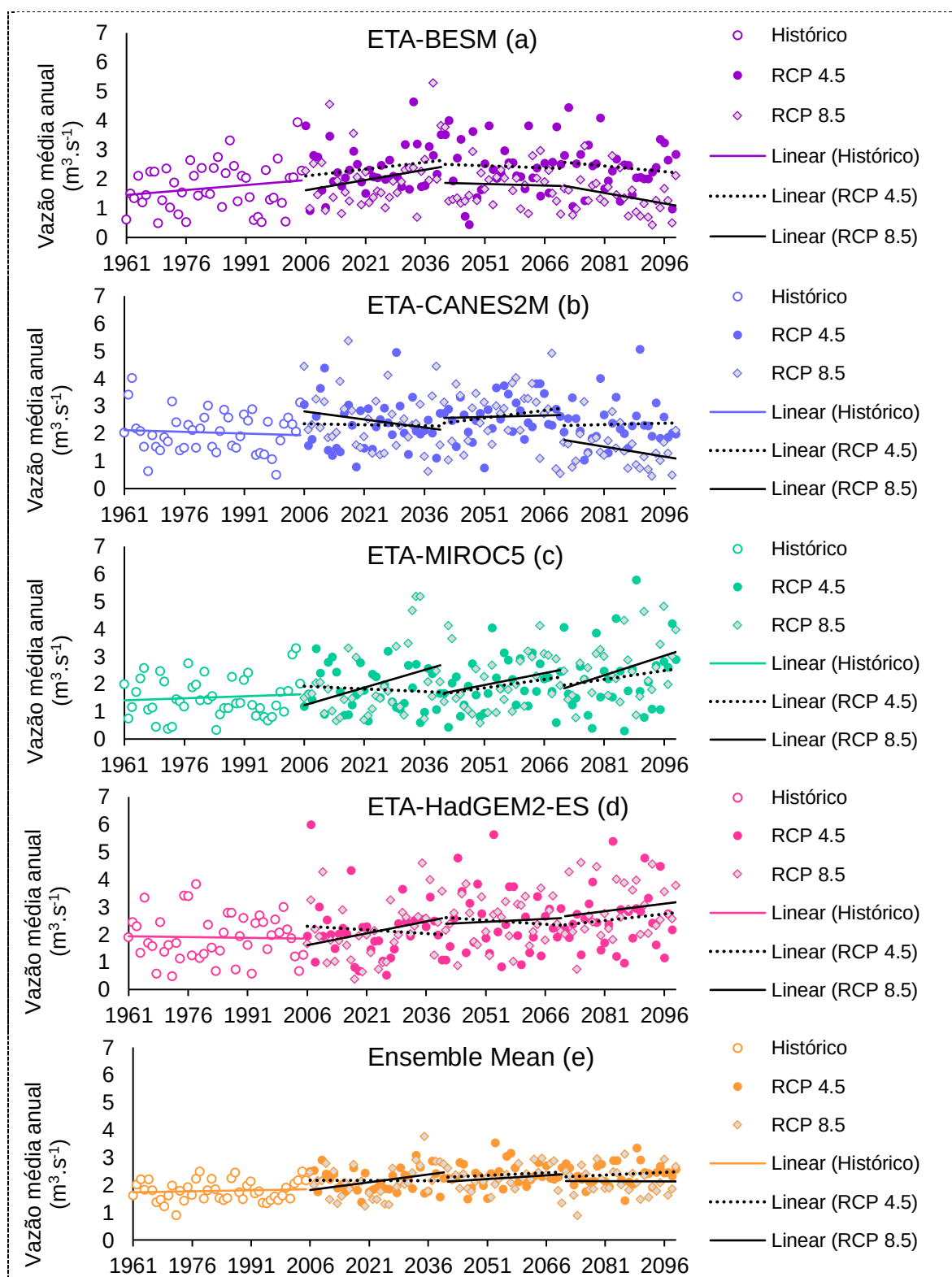


Figura 44 – Vazões médias anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAF-PC).

Analisando especialmente as Figuras 40, 42 e 44, as quais permitem visualizar a variação temporal das vazões médias diárias anuais para o clima presente e futuro, obtidas a partir dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, bem como as linhas de tendência dos dados para os períodos futuros de 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, pode-se verificar um comportamento semelhante entre as bacias hidrográficas analisadas neste estudo. De modo geral, verifica-se que:

- 2006 a 2040: os dados derivados das projeções climáticas do ETA-BESM e do ETA-CANESM2 indicam, respectivamente, tendência de aumento e diminuição nas vazões médias anuais ao longo dos anos para os dois RCP's, enquanto que do ETA-MIROC e do ETA-HadGEM2-ES indicam diminuição para o RCP 4.5 e aumento para o RCP 8.5;
- 2041 a 2070: reduções nas vazões médias mensais ao longo do tempo podem ser esperadas quando analisados os dados oriundos do ETA-BESM e do ETA-HadGEM2-ES para os dois RCP's, já acréscimos, para os dados oriundos do ETA-MIROC5, também para os dois RCP's, e do ETA-CANESM2 para o RCP 4.5, pois para o RCP 8.5 pode-se esperar redução;
- 2071 a 2099: podem ser esperados aumentos nas vazões médias anuais ao longo do tempo quando analisados os valores obtidos pelo ETA-MIROC5 e pelo ETA-HadGEM2-ES em ambos os RCP's, enquanto que diminuições são esperadas pelo ETA-BESM também pelos dois RCP's. Quanto aos dados oriundos do ETA-CANESM2, estes indicam aumento pelo RCP 4.5 e diminuição pelo RCP 8.5.
- *Ensemble Mean*: as vazões médias anuais pelo RCP 4.5, para as três bacias hidrográficas, apresentam linha de tendência com inclinação positiva nos períodos de 2041 a 2070 e de 2071 a 2099, enquanto que pelo RCP 8.5, tal comportamento é verificado para os períodos de 2006 a 2040 e 2041 a 2070.

As médias das vazões médias anuais para o período do clima presente, considerando o *Ensemble Mean* da BHRP-PO, BHAP-PCF e BHAF-PC, correspondem a, respectivamente, 72,82, 6,51 e 1,79 m³.s⁻¹. Para os períodos futuros, o prognóstico para estes valores é de acréscimo, haja vista as variações sempre positivas verificadas para o *Ensemble Mean* (Tabela 27).

Tabela 27 – Variação (ΔQ , %) nos valores de vazão média anual quando comparados os dados obtidos por *Ensemble Mean* para o clima presente e para as projeções do clima futuro perante os RCP's 4.5 e 8.5

Bacia hidrográfica	Período	RCP	Variação (%) em relação a 1961-2005
BHRP-PO	2006-2040	4.5	20,73
		8.5	18,75
	2041-2070	4.5	30,72
		8.5	21,64
	2071-2099	4.5	28,48
		8.5	17,25
BHAP-PCF	2006-2040	4.5	18,25
		8.5	16,75
	2041-2070	4.5	28,19
		8.5	20,80
	2071-2099	4.5	26,53
		8.5	14,66
BHAF-PC	2006-2040	4.5	20,96
		8.5	19,56
	2041-2070	4.5	33,78
		8.5	26,20
	2071-2099	4.5	33,65
		8.5	19,50

BHRP-PO = Bacia Hidrográfica do Rio Piratini à montante da seção de controle Pedro Osório; BHAP-PCF = Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas à montante da seção de controle Ponte Cordeiro de Farias; BHAF-PC = Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata à montante da seção de controle Passo dos Carros

Verifica-se também, na Tabela 27, que o acréscimo na média das vazões médias anuais é maior quando este indicador é obtido a partir dos hidrogramas estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos frente ao RCP 4.5. Uma vez que a precipitação é a principal forma de entrada de água no ciclo hidrológico em sua fase terrestre (DAVIE, 2008), este fato pode ser justificado em decorrência das projeções dos modelos climáticos para o RCP 4.5, em média,

sempre indicarem maiores incrementos da precipitação total anual média nos períodos futuros, quando comparados ao clima presente simulado (Tabela 19).

Quanto aos períodos futuros, os maiores acréscimos na média das vazões médias anuais podem ser observados entre 2041 e 2070 (Tabela 27), independentemente do RCP e da bacia analisados. Este prognóstico está, em parte, associado ao maior incremento na precipitação total anual média para este período, verificado para o RCP 4.5 na BHRP-PO e para o RCP 8.5 em todas as bacias. Os menores acréscimos, por sua vez, são observados entre 2071 e 2099 perante o RCP 8.5, provavelmente influenciados pelo efeito combinado das tendências estatisticamente significativas de redução da precipitação total anual e de aumento da temperatura média diária anual indicadas por dois dos quatro modelos climáticos avaliados.

Outro indicador interessante de ser analisado, no contexto das mudanças climáticas, é a produção de água das bacias hidrográficas. Os valores encontrados de produção de água para as bacias analisadas neste estudo, extraídos dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente e os períodos futuros, podem ser visualizados na Tabela 28. De modo geral, verifica-se nesta Tabela um comportamento semelhante entre as bacias hidrográficas, os períodos futuros e os RCP's analisados.

Tabela 28 – Produção de água ($\text{l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$) estimada pelo modelo hidrológico LASH forçado pelo ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções do clima futuro perante os RCP's 4.5 e 8.5

Período	ETA-BESM		ETA-CANESM2		ETA-MIROC5		ETA-HadGEM2-ES	
	RCP		RCP		RCP		RCP	
	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5
BHRP-PO								
1961-2005	14,82		17,44		13,25		16,29	
2006-2040	19,37	17,32	20,06	21,62	16,11	16,93	19,35	17,91
2041-2070	19,80	15,40	22,42	22,24	16,67	16,87	22,14	21,14
2071-2099	19,68	13,15	19,78	14,55	18,18	20,57	22,36	24,36
BHAP-PCF								
1961-2005	16,95		19,65		15,29		18,43	
2006-2040	22,01	19,29	22,37	24,02	18,10	19,10	20,94	20,05
2041-2070	22,19	17,70	25,08	24,48	19,06	19,92	24,03	23,44
2071-2099	22,19	14,56	21,97	16,21	21,15	23,38	24,19	26,43
BHAF-PC								
1961-2005	13.16		15.72		11.71		14.51	
2006-2040	18,31	15,56	17,89	19,12	13,99	15,11	16,69	16,37
2041-2070	18,52	14,03	20,51	20,25	15,14	16,16	19,69	19,66
2071-2099	18,50	11,04	18,08	13,03	17,41	19,37	20,20	22,44

BHRP-PO = Bacia Hidrográfica do Rio Piratini à montante da seção de controle Pedro Osório; BHAP-PCF = Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas à montante da seção de controle Ponte Cordeiro de Farias; BHAF-PC = Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata à montante da seção de controle Passo dos Carros

Conforme pode ser visualizado na Tabela 28, os prognósticos indicam incrementos em menor magnitude na produção de água para o período de 2071 a 2099 quando analisados os hidrogramas da modelagem hidrológica forçada pelos modelos ETA-BESM e ETA-CANESM2 frente ao RCP 8.5. Por outro lado, quando os modelos climáticos são o ETA-MIROC5 e o ETA-HadGEM2-ES, pelos dois RCP's, os prognósticos indicam aumento gradual em todas as bacias.

Na análise por *Ensemble Mean*, pode-se esperar que: i) na BHRP-PO, a produção de água aumente entre os períodos de 2006 a 2040 e de 2041 a 2070 e diminua no período de 2071 a 2099, apresentando como valores 18,72, 20,26 e 20,00 $\text{l.s}^{-1}.\text{km}^2$, respectivamente, frente ao RCP 4.5, e 18,45, 18,91 e 18,61 $\text{l.s}^{-1}.\text{km}^2$, respectivamente, pelo RCP 8.5; ii) na BHAP-PCF, a produção de água tenha comportamento semelhante à BHRP-PO, sendo de 20,86, 22,59 e 22,38 $\text{l.s}^{-1}.\text{km}^2$

para os períodos de 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, respectivamente, pelo RCP 4.5, enquanto que pelo RCP 8.5, de 20,62, 21,39 e 20,15 l.s⁻¹.km² para os referidos períodos; na BHAF-PC, a produção de água tenha aumento gradual pelo RCP 4.5, sendo de 16,72, 18,47 e 18,55 l.s⁻¹.km² para, respectivamente, 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, e que tenha aumento seguido por redução pelo RCP 8.5, cujos valores indicam 16,54, 17,53 e 16,47 l.s⁻¹.km² para os períodos futuros. Nesta análise, verifica-se ainda que a produção de água estimada a partir de dados obtidos por modelagem hidrológica forçada pelas projeções climáticas fundamentadas no RCP 8.5, tende a apresentar valores mais baixos que aqueles encontrados quando as projeções se baseiam no RCP 4.5, e que os maiores incrementos ocorrem entre 2041 e 2070, o que já havia sido constatado na análise das médias das vazões médias anuais.

Inúmeras são as relações sinérgicas que podem causar aumento ou redução da produção de água em uma bacia hidrográfica. Novamente, destaca-se que os prognósticos de menor incremento na produção de água no final do século, quando analisados os modelos ETA-BESM e ETA-CANESM2 perante o RCP 8.5, estão associados as tendências estatisticamente significativas de redução na precipitação total anual e de aumento na temperatura média diária. Outros estudos encontram relações diferentes, que refletem as especificidades climáticas da região; no Nepal, por exemplo, Bajracharya et al. (2018) constataram que as mudanças climáticas podem causar considerável incremento na produção de água, haja vista a tendência de aumento tanto da precipitação quanto da temperatura e, por consequência, maior derretimento de neve.

4.4.2. Vazões máximas

As vazões diárias máximas anuais observadas nos hidrogramas estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, para o clima presente (1961 a 2005) e os períodos futuros (2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099), considerando os RCP's 4.5 e 8.5, bem como o *Ensemble Mean*, podem ser visualizadas nas Figuras 45 e 46 para a BHRP-PO, nas Figuras 47 e 48 para a BHAP-PCF e nas Figuras 49 e 50 para a BHAF-PCF.

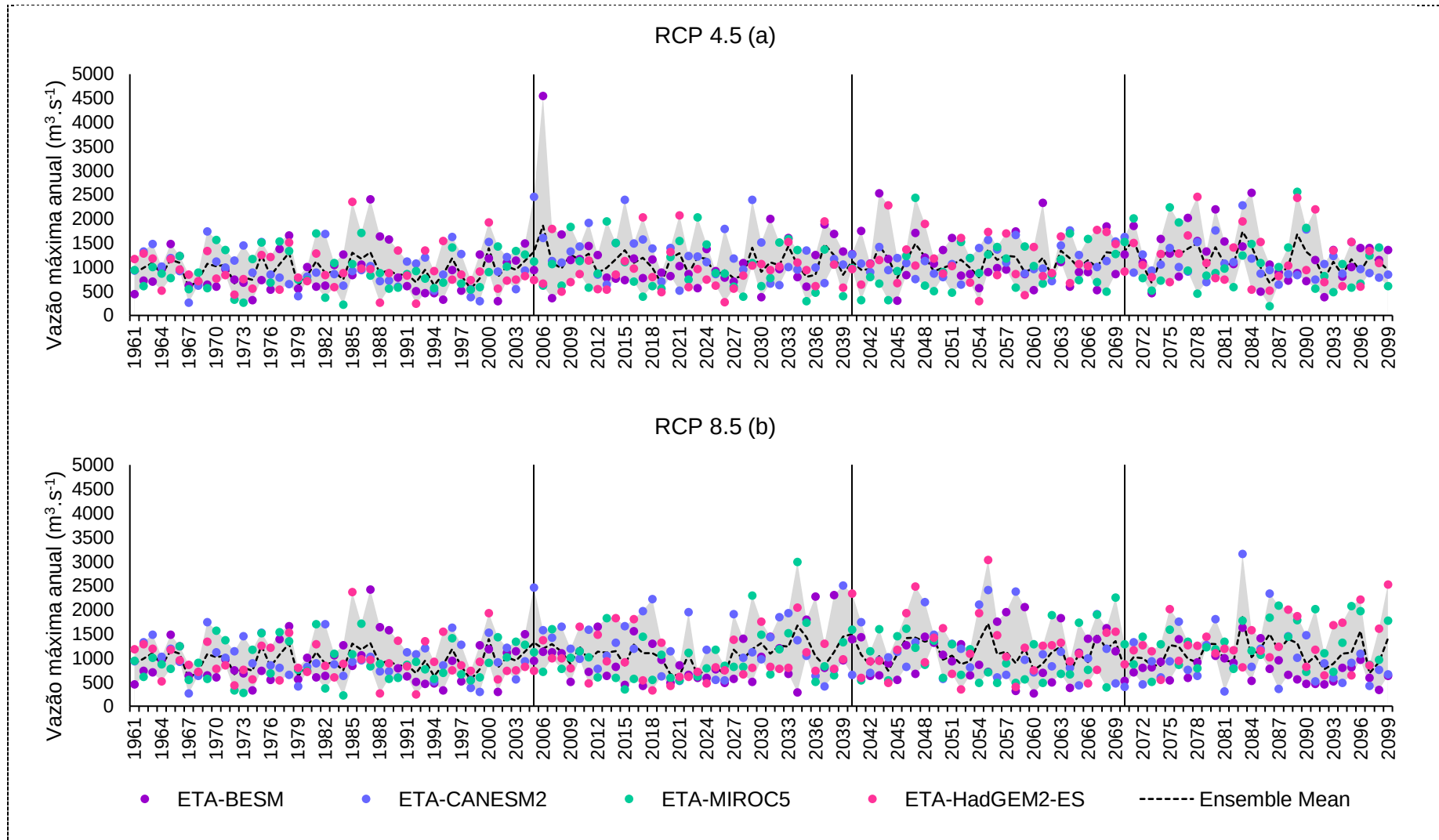


Figura 45 - Vazões máximas anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do rio Piratini delimitada à montante da seção de controle "Pedro Osório" (BHRP-PO).

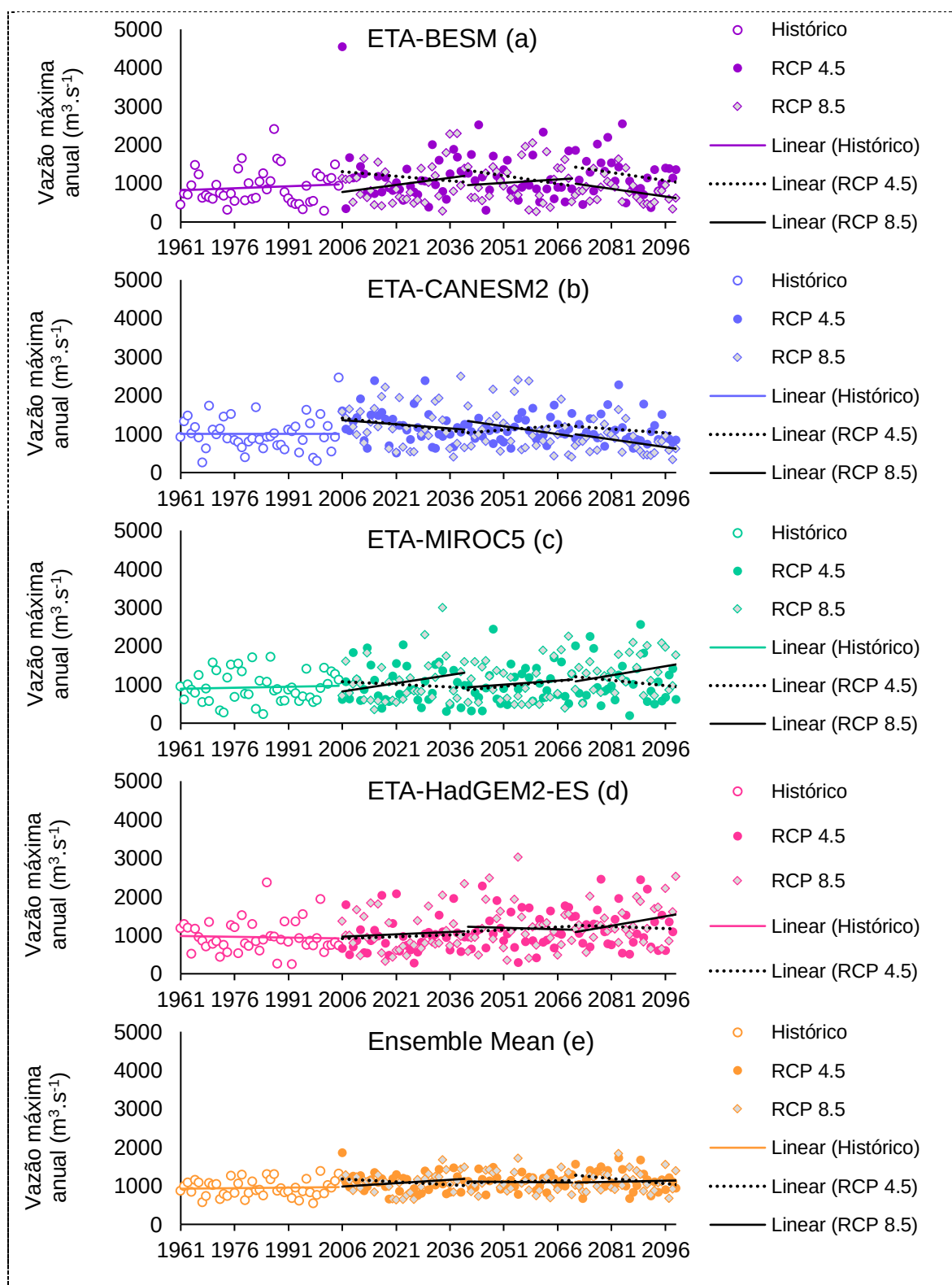


Figura 46 – Vazões máximas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle “Pedro Osório” (BHRP-PO).

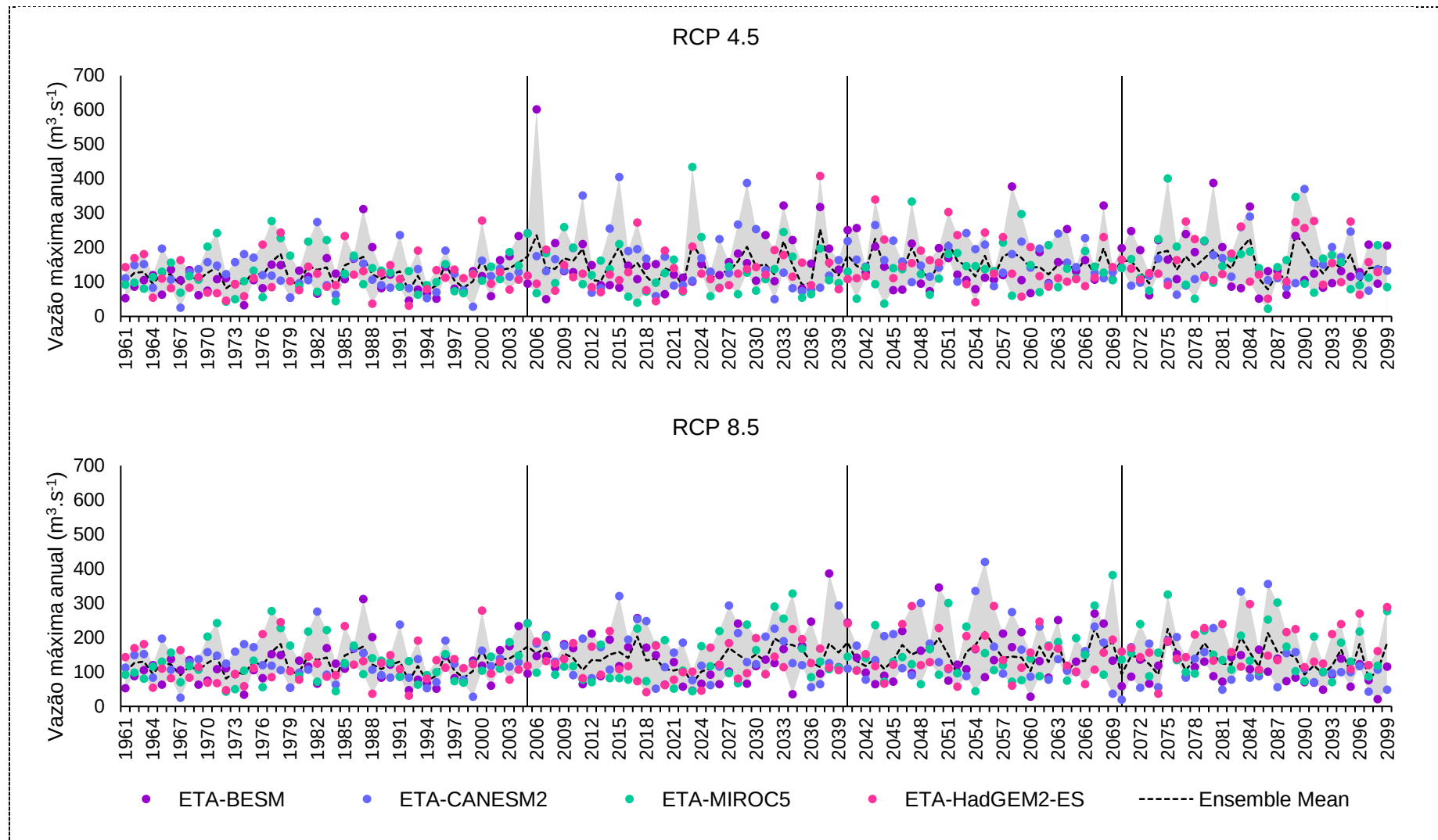


Figura 47 - Vazões máximas anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle "Ponte Cordeiro de Farias" (BHAP-PCF).

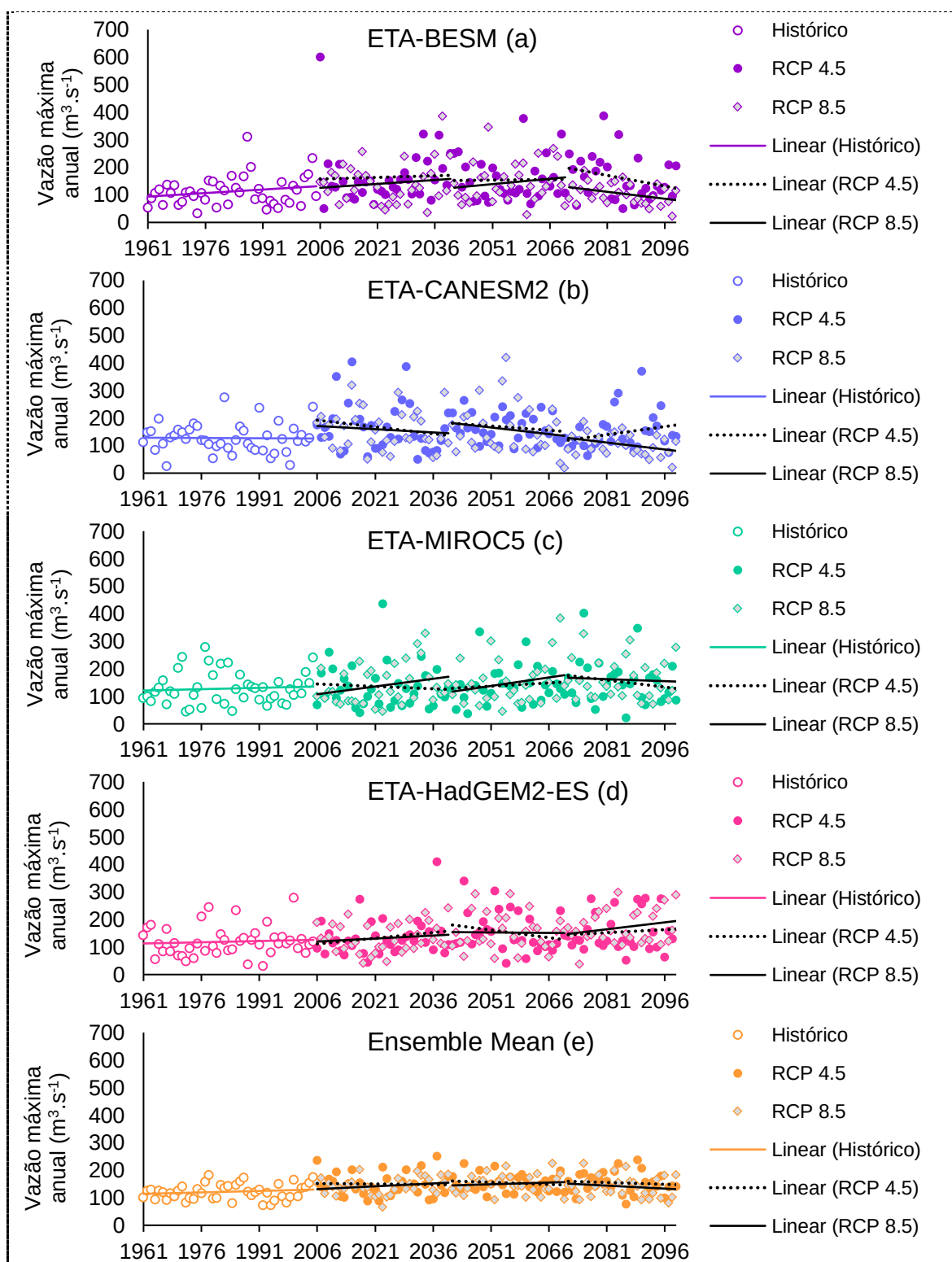


Figura 48 – Vazões máximas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção "Ponte Cordeiro de Farias" (BHAP-PCF).

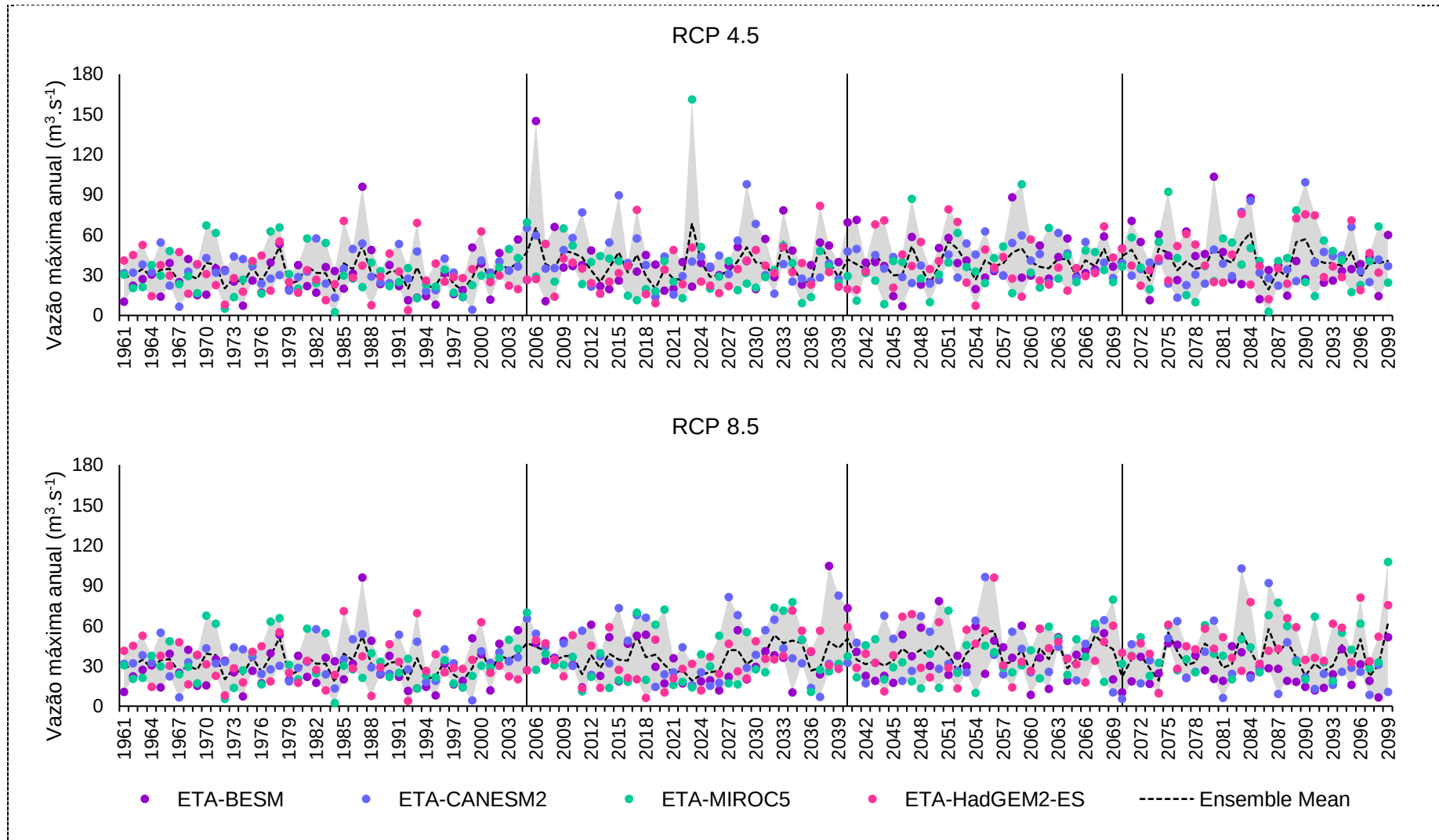


Figura 49 - Vazões máximas anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle "Passo dos Carros" (BHAf-PC).

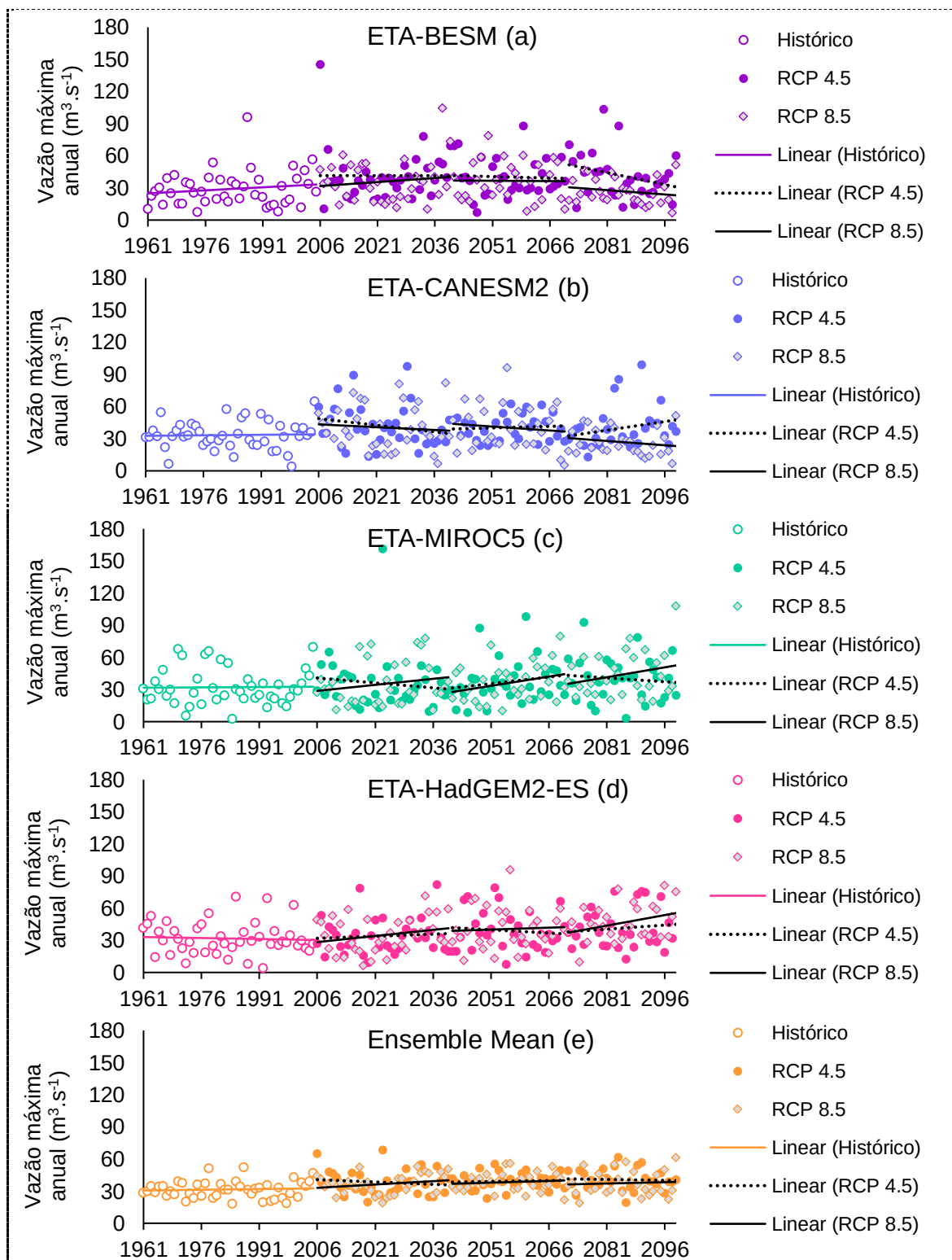


Figura 50 – Vazões máximas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle “Passo dos Carros” (BHAFF-PC).

Analisando os resultados encontrados para a BHRP-PO (Figuras 45 e 46) entre os anos de 2006 e 2040, verifica-se que as vazões máximas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM apresentam linhas de tendência com inclinações opostas, sendo positiva para o RCP 4.5 e negativa para o RCP 8.5, fato que também é verificado quando o modelo é forçado pelo ETA-MIROC5. Já pelo ETA-CANESM2 e pelo ETA-HadGEM2-ES, há tendência de aumento e diminuição, respectivamente, ao longo dos anos e para os dois RCP's. No período de 2041 a 2070, percebe-se tendência de aumento quando, perante o RCP 4.5, os hidrogramas são estimados pelo modelo forçado pelo ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES e, de diminuição, quando pelo ETA-BESM; perante o RCP 8.5, a tendência é de aumento pelo ETA-BESM e do ETA-MIROC5 e de diminuição pelo ETA-CANESM2 e pelo ETA-HadGEM2-ES, embora seja pouco notória no último caso. Entre 2071 e 2099, tendências de aumento das vazões máximas anuais somente são verificados quando analisados os hidrogramas estimados pelo modelo LASH forçado pelos modelos ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES perante o RCP 8.5. O *Ensemble Mean*, por sua vez, apresenta tendência de diminuição das vazões máximas anuais quando analisados os períodos de 2006 a 2040 e de 2071 a 2099, ambos pelo RCP 4.5. Tendência positiva é verificada apenas quando analisado o período de 2006 a 2040 pelo RCP 8.5.

Para a BHAP-PCF (Figuras 47 e 48), os prognósticos indicam aumento das vazões máximas anuais entre 2006 e 2040 quando analisados hidrogramas estimados pelo modelo LASH forçado pelos modelos ETA-BESM e ETA-HadGEM2-ES para os dois RCP's, de modo oposto ao ETA-CANESM2; os dados derivados do modelo ETA-MIROC5 indicam tendência de diminuição para o RCP 4.5 e de aumento para o RCP 8.5. No período de 2041 a 2070, há tendência de aumento perante os dois RCP's pelo ETA-BESM e pelo ETA-MIROC5 e, de diminuição, pelo ETA-CANESM2, já pelo ETA-HadGEM2-ES, há tendência de diminuição pelo RCP 4.5. Para o futuro distante, tanto o ETA-BESM quanto o ETA-MIROC5 promovem redução da vazão máxima anual, enquanto que o ETA-HadGEM2-ES indica aumento e o ETA-CANESM2, aumento pelo RCP4.5 e diminuição pelo RCP 8.5. O *Ensemble Mean* para a bacia tem linhas de tendência com suave inclinação, podendo ser observada uma linha quase que paralela ao

eixo das abcissas para o RCP 4.5 entre 2006 e 2099, enquanto que para o RCP 8.5, um leve aumento de 2006 a 2040 e de 2041 a 2070, e uma leve diminuição entre 2071 e 2099.

Em se tratando da BHAF-PC, os modelos ETA-BESM e ETA-HadGEM2-ES indicam aumento para o período de 2006 a 2040, enquanto que o ETA-BESM indica diminuição e o ETA-MIROC5 aumento pelo RCP 8.5 e diminuição pelo RCP 4.5 – o mesmo comportamento verificado para a BHAP-PCF. Para o período de 2041 a 2070, o aumento das vazões máximas anuais é mais evidente pelo ETA-MIROC5 para ambos os RCP's e pelo ETA-HadGEM2-ES para o RCP 8.5, já a diminuição é observada para o RCP 4.5 pelo ETA-BESM e pelo ETA-HadGEM2-ES e para o RCP 8.5 pelo ETA-CANESM2 para o RCP 8.5. Para o período entre 2071 e 2099, há indícios de diminuição pelo ETA-BESM e de aumento pelo ETA-HadGEM2-ES, enquanto que o ETA-CANESM2 apresenta aumento pelo RCP4.5 e diminuição pelo RCP 8.5, contrário do que é observado pelo ETA-MIROC5. O *Ensemble Mean* para a bacia indica leve aumento para o RCP 8.5, enquanto que para o RCP 4.5, leve diminuição entre 2006 e 2040 e 2071 e 2099, e aumento entre 2041 e 2070.

Neste tópico, outro indicador de especial interesse consiste na vazão média de enchente, a qual é obtida pela média aritmética das vazões máximas anuais durante um determinado período de tempo. A vazão média de enchente, observada no clima presente (1961 a 2005), a partir do *Ensemble Mean* das vazões máximas anuais, obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos diferentes modelos climáticos, foi de $945,86 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para a BHRP-PO, de $121,79 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para a BHAP-PCF e de $31,58 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para a BHAF-PC.

Considerando o *Ensemble Mean* derivado das projeções climáticas futuras, os prognósticos (Tabela 29) indicam acréscimo nos valores de vazão média de enchente nas três bacias hidrográficas analisadas, sendo este acréscimo mais pronunciado quando os hidrogramas diários são obtidos por modelagem hidrológica forçada por dados climáticos que refletem um cenário relativamente otimista de emissão de gases do efeito estufa (RCP 4.5), quando comparado ao acréscimo frente ao cenário pessimista (RCP 8.5). Os prognósticos também indicam aumento gradativo da vazão média de enchente da BHRP-PO durante os períodos futuros para ambos os RCP's, o que é verificado para a BHAP-PCF e BHAF-PC perante o RCP 4.5; no caso do RCP 8.5, as vazões médias de enchente dessas duas bacias

têm aumento gradativo nos períodos de 2006 a 2040 e 2041 a 2070, sendo reduzido no período de 2071 a 2099.

Tabela 29 – Variação (ΔQ , %) nos valores de vazão média de enchente quando comparados os dados obtidos por *Ensemble Mean* para o clima presente e para as projeções do clima futuro perante os RCP's 4.5 e 8.5

Bacia hidrográfica	Período	RCP	Variação (%) em relação a 1961-2005
BHRP-PO	2006-2040	4.5	15,45
		8.5	14,22
	2041-2070	4.5	18,07
		8.5	16,16
	2071-2099	4.5	21,90
		8.5	17,49
BHAP-PCF	2006-2040	4.5	22,82
		8.5	17,26
	2041-2070	4.5	25,69
		8.5	23,74
	2071-2099	4.5	26,05
		8.5	15,84
BHAF-PC	2006-2040	4.5	21,00
		8.5	15,83
	2041-2070	4.5	24,48
		8.5	21,48
	2071-2099	4.5	28,66
		8.5	18,45

BHRP-PO = Bacia Hidrográfica do Rio Piratini à montante da seção de controle Pedro Osório; BHAP-PCF = Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas à montante da seção de controle Ponte Cordeiro de Farias; BHAF-PC = Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata à montante da seção de controle Passo dos Carros

O aumento do risco potencial de cheia nos rios é um dos impactos mais frequentemente citados nos estudos sobre o clima futuro e as bacias hidrográficas (ARNELL e GOSLING, 2016). Se por um lado é animador o fato de que os prognósticos indicam aumento da disponibilidade hídrica nas bacias, por outro, é preocupante o fato de que as vazões médias de enchente tendem a aumentar, e por consequência, elevar a cota média de enchente. Este fato se agrava quando já existem históricos de danos causados por enchentes e inundações, como se verifica na área urbana de Pedro Osório e Cerrito (TELLES, 2002), às margens do rio Piratini, próximo à seção de controle da BHRP-PO. Neste contexto, estudos

como este se apresentam como uma ferramenta estratégica para a elaboração de Planos de Bacia e, mais especificamente, de Planos Diretores e de Zoneamento Urbano em municípios ribeirinhos.

4.4.3. Vazões mínimas

As vazões mínimas anuais obtidas nos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, para o clima presente (1961 a 2005) e os períodos futuros (2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099), considerando os RCP's 4.5 e 8.5, bem como o *Ensemble Mean*, podem ser visualizadas nas Figuras 51 e 52 para a BHRP-PO, nas Figuras 53 e 54 para a BHAP-PCF e nas Figuras 55 e 56 para a BHAF-PCF.

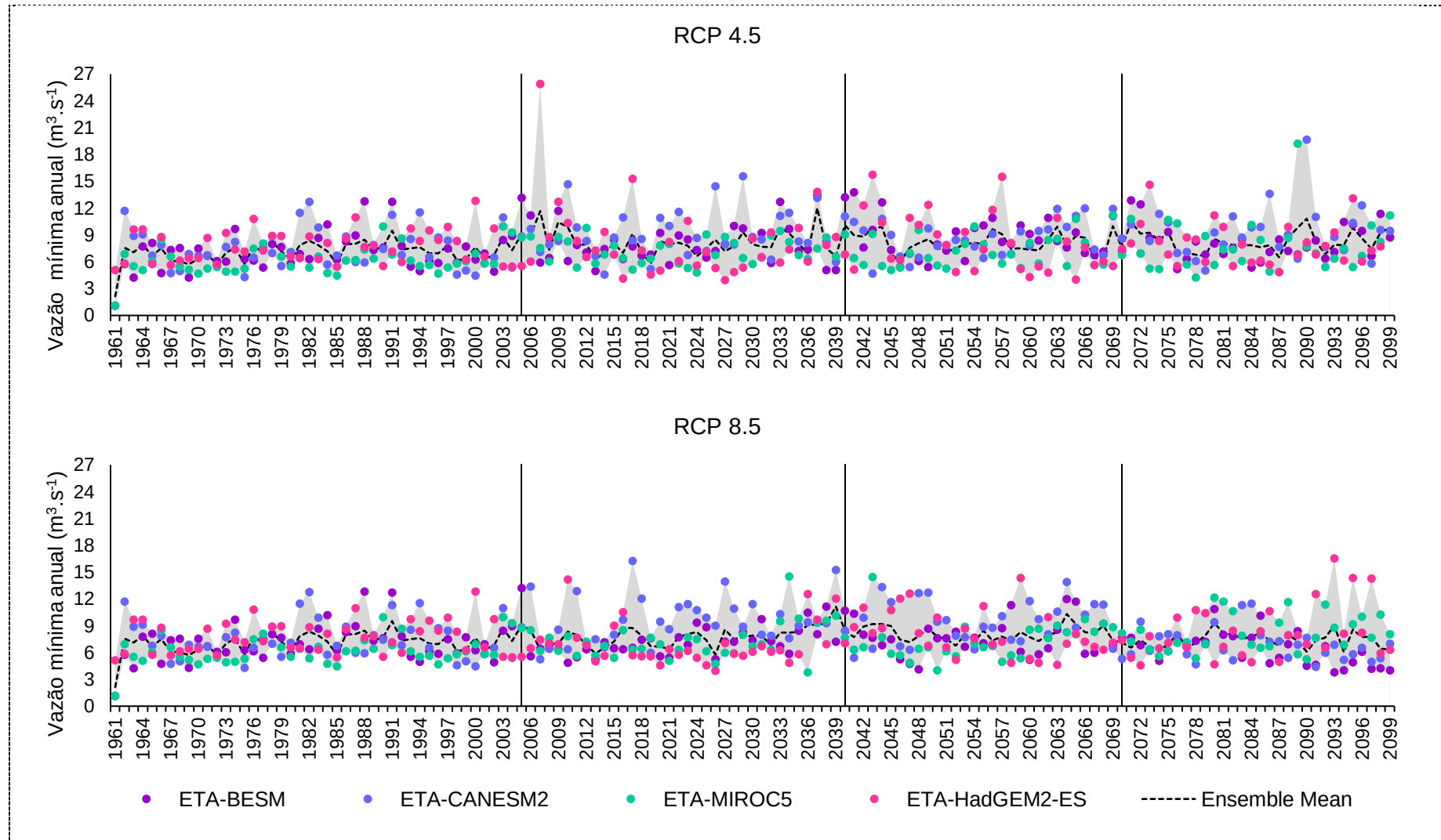


Figura 51 - Vazões mínimas anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do rio Piratini delimitada à montante da seção de controle "Pedro Osório" (BHRP-PO).

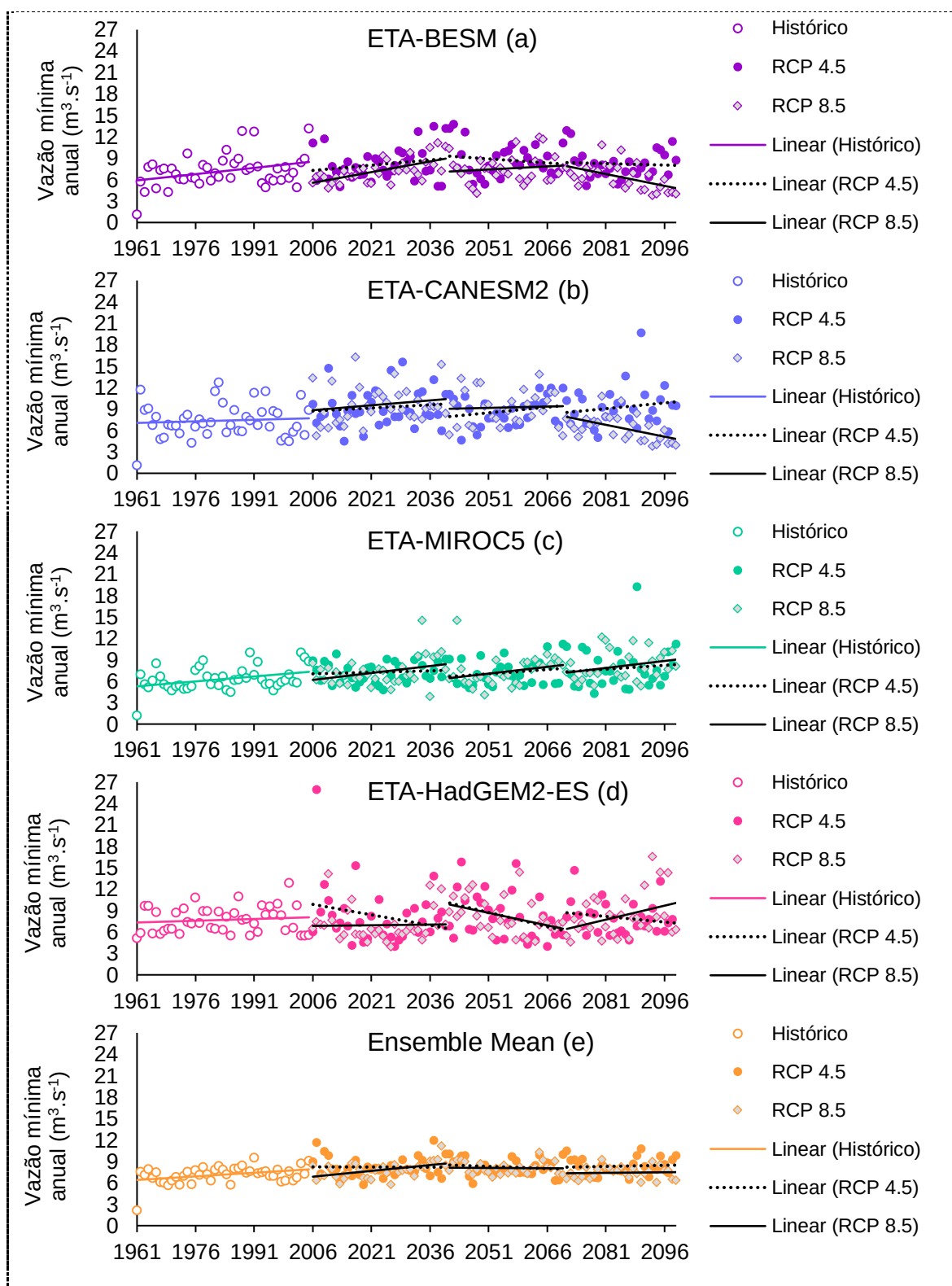


Figura 52 – Vazões mínimas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do rio Piratini à montante da seção de controle "Pedro Osório" (BHRP-PO).

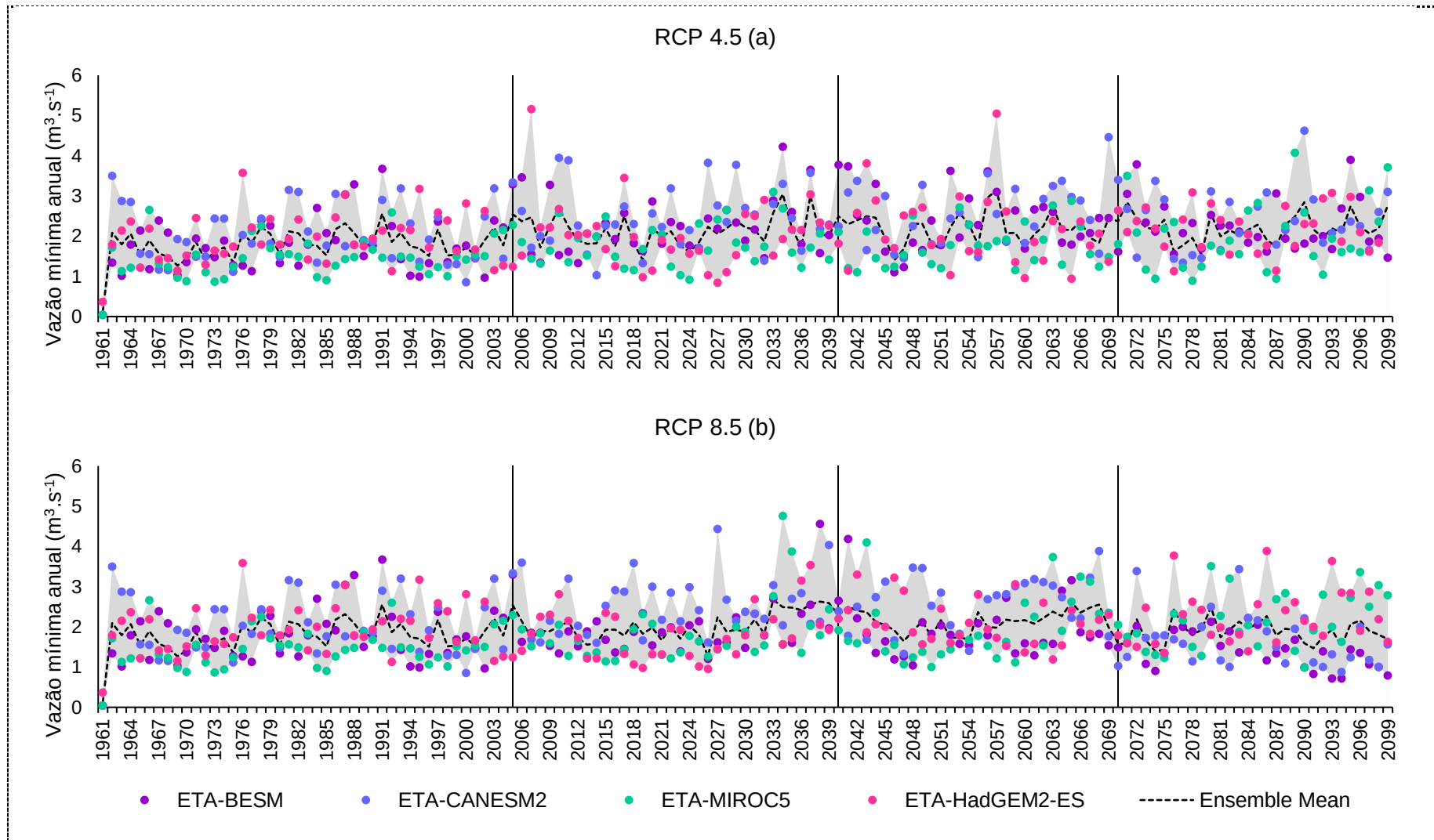


Figura 53 - Vazões mínimas anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas delimitada à montante da seção de controle "Ponte Cordeiro de Farias" (BHAP-PCF).

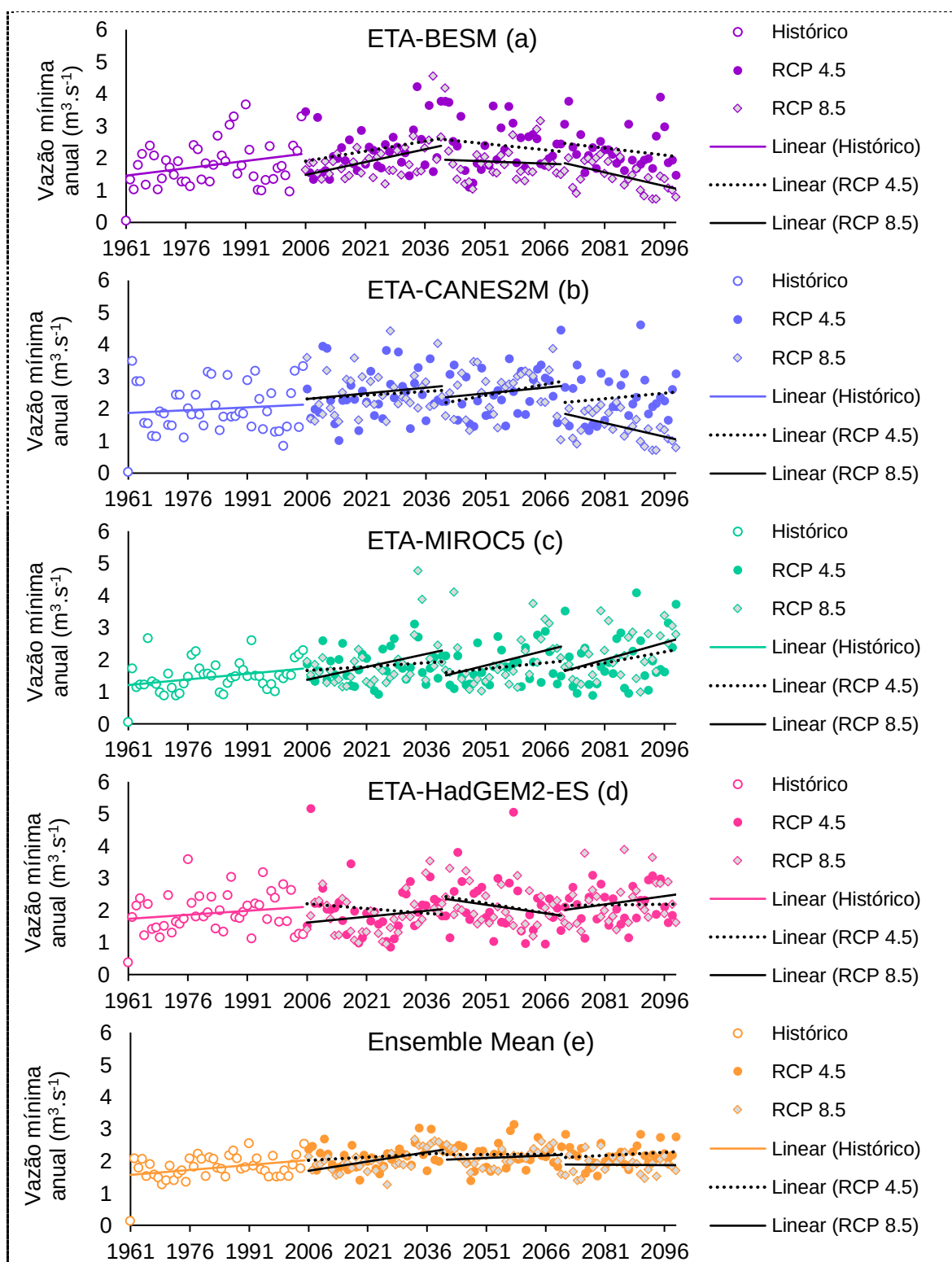


Figura 54 – Vazões mínimas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas à montante da seção de controle “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF).

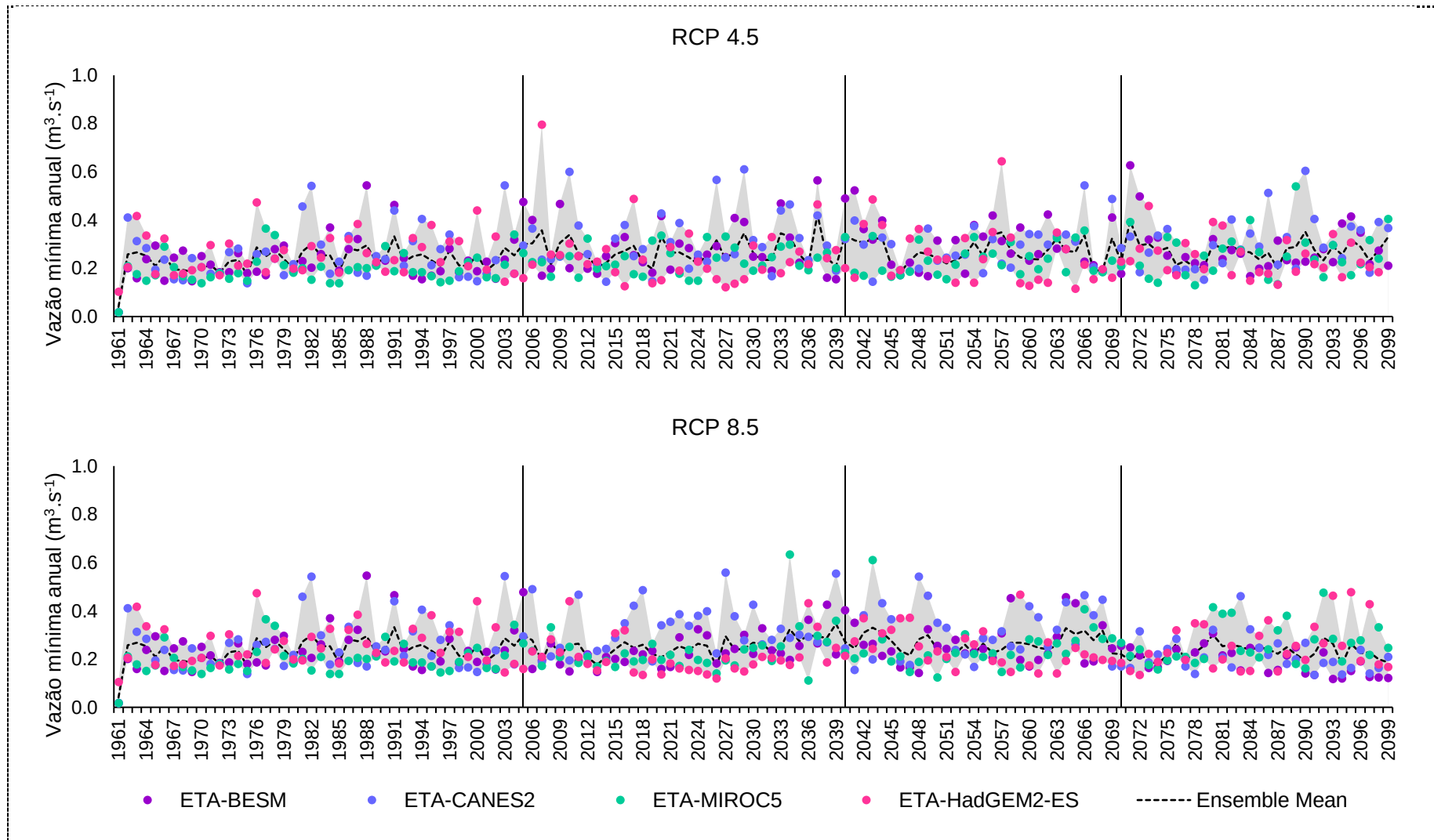


Figura 55 - Vazões mínimas anuais extraídas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo hidrológico LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para o clima presente (1961-2005) e projeções futuras de 2006 a 2099, considerando os RCP's 4.5 (a) e 8.5 (b), para a bacia hidrográfica do arroio Fragata delimitada à montante da seção de controle "Passo dos Carros" (BHAF-C).

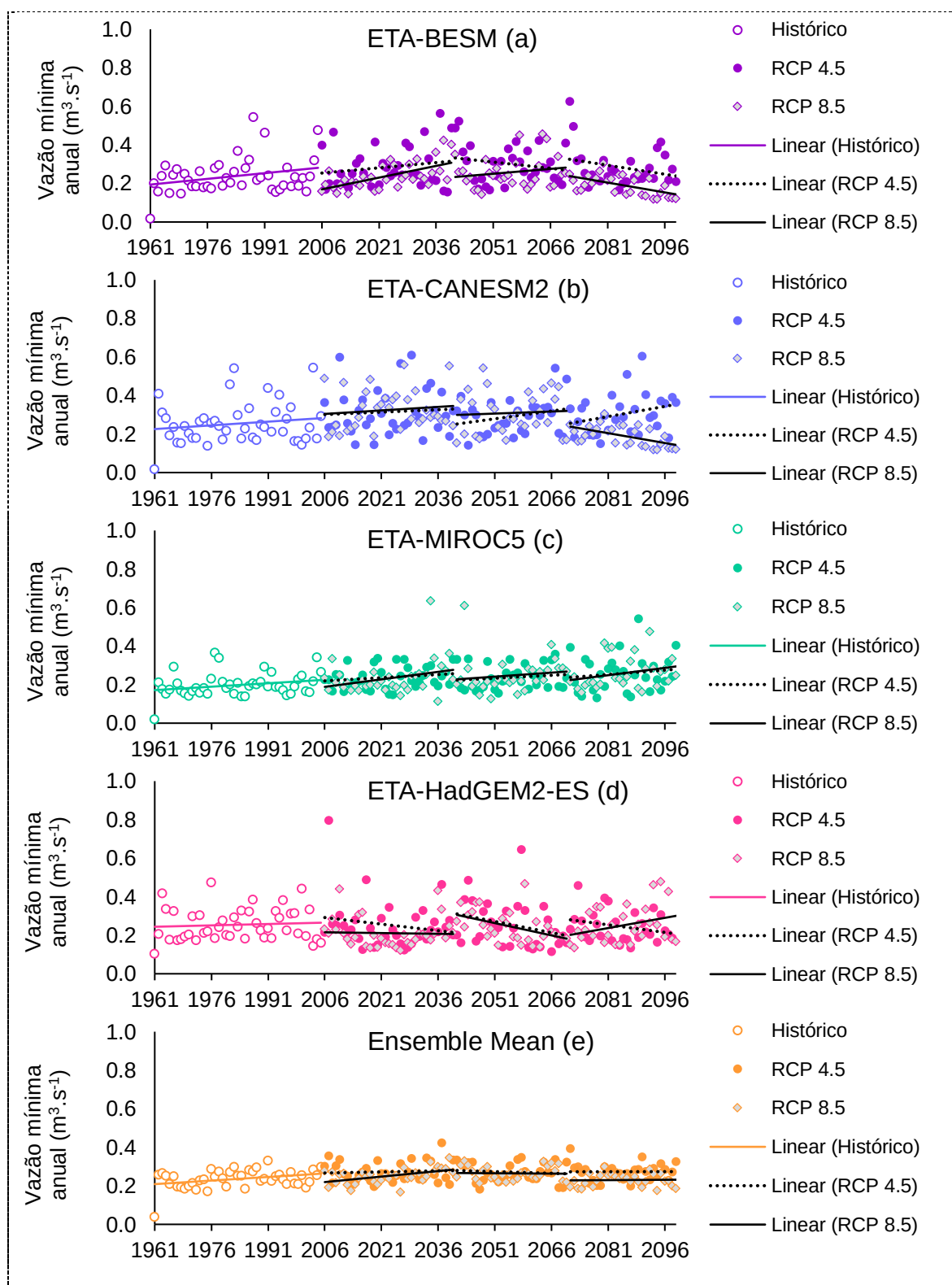


Figura 56 – Vazões mínimas anuais obtidas dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelo ETA-BESM (a), ETA-CANESM2 (b), ETA-MIROC5 (c), ETA-HadGEM2-ES (d), o Ensemble Mean (e) e as linhas de tendência linear para os dados clima presente e dos RCP's 4.5 e 8.5, para a bacia hidrográfica do arroio Fragata à montante da seção de controle "Passo dos Carros" (BHAF-PC).

Considerando as variações nas vazões mínimas anuais ao longo dos períodos presente e futuro, obtidas a partir dos hidrogramas diários estimados pelo modelo LASH forçado pelos modelos climáticos ETA-BESM, ETA-CANESM2, ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, além das linhas de tendência dos dados para os períodos futuros de 2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, é possível verificar que existe um comportamento semelhante entre as bacias hidrográficas.

De modo geral, para o período de 2006 a 2040 em todas as bacias hidrográficas e pelos dois RCP's, as linhas de tendência são sempre positivas, isto é, indicam aumento das vazões mínimas anuais ao longo do tempo, com exceção dos dados derivados do ETA-HadGEM2-ES, para os quais as linhas indicam tendência de diminuição. Para o período de 2041 a 2070, verifica-se tendência de aumento das vazões mínimas ao longo dos anos pelo ETA-CANESM2 e ETA-MIROC5, para ambos os RCP's, e pelo ETA-BESM para o RCP 8.5; pelo ETA-BESM para o RCP 4.5, a tendência é de diminuição, assim como verificado para o ETA-HadGEM2-ES, porém, para ambos os RCP's. Já para 2071 a 2099 pelo ETA-BESM e os dois RCP's, a tendência é de diminuição, pelo ETA-CANESM2 para o RCP 4.5 é de aumento e para o RCP 8.5 é de diminuição, pelo ETA-MIROC5 a tendência é de aumento pelos dois RCP's e pelo ETA-HadGEM2-ES, diminuição pelo RCP 4.5 e de aumento pelo RCP 8.5. O Ensemble Mean geralmente apresenta inclinação positiva suave da linha de tendência, com exceção do período de 2071 a 2099 pelo RCP 8.5, para o qual a inclinação é negativa.

Analisando o período presente (1961-2005) do *Ensemble Mean* de cada bacia, verificam-se as seguintes médias das vazões mínimas anuais: $7,14\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ para a BHRP-PO, $1,79\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ para a BHAP-PCF e $0,24\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para a BHAF-PC. As variações das médias das vazões mínimas anuais para os períodos futuros, em comparação com os valores acima apresentados para o período presente, podem ser visualizadas na Tabela 30.

Tabela 30 – Variação (ΔQ , %) nas médias das vazões mínimas anuais quando comparados os dados obtidos por *Ensemble Mean* para o clima presente e para as projeções do clima futuro perante os RCP's 4.5 e 8.5

Bacia hidrográfica	Período	RCP	Variação (%) em relação a 1961-2005
BHRP-PO	2006-2040	4.5	14,95
		8.5	8,97
	2041-2070	4.5	13,73
		8.5	13,05
	2071-2099	4.5	16,81
		8.5	3,87
BHAP-PCF	2006-2040	4.5	18,92
		8.5	12,77
	2041-2070	4.5	22,66
		8.5	18,02
	2071-2099	4.5	22,63
		8.5	4,86
BHAF-PC	2006-2040	4.5	15,66
		8.5	6,68
	2041-2070	4.5	13,36
		8.5	12,19
	2071-2099	4.5	15,84
		8.5	-2,50

BHRP-PO = Bacia Hidrográfica do Rio Piratini à montante da seção de controle Pedro Osório; BHAP-PCF = Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas à montante da seção de controle Ponte Cordeiro de Farias; BHAF-PC = Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata à montante da seção de controle Passo dos Carros

Na Tabela 30 é possível verificar que, diferentemente das vazões máximas e médias anuais – cuja totalidade dos dados indicou acréscimo – pode ocorrer uma redução de 2,50% na média das vazões mínimas anuais da BHAF-PC entre 2071 e 2099, frente ao cenário pessimista de emissão de gases do efeito estufa (RCP 8.5), quando comparadas ao clima presente; para as demais bacias, períodos futuros e RCP's, o prognóstico é sempre de acréscimo.

O comportamento observado para as vazões máximas e médias anuais, quanto às maiores variações em relação ao clima presente ocorrerem quando os dados advêm de modelagem hidrológica forçada por projeções do clima futuro perante o RCP 4.5, também foi verificado para as vazões mínimas anuais. Verifica-se também que, pelo RCP 8.5, as médias das vazões mínimas anuais apresentam

aumento gradativo nos períodos de 2006 a 2040 e 2041 a 2070, enquanto que entre 2071 e 2099, diminuem consideravelmente; este fato está associado ao efeito combinado da redução da média da precipitação total anual média entre 2071-2099, quando comparada à média entre 2041 e 2070 (Tabela 19), e ao elevado percentual de incremento da média da temperatura média diária anual (Tabela 21), acarretando em menor entrada de água no sistema e, provavelmente, em maior perda por evapotranspiração, reduzindo, portanto, o escoamento. Para o RCP 4.5 na BHRP-PO e na BHAF-PC, os maiores aumentos são esperados para o futuro distante – 2071 a 2099 – enquanto que para a BHAP-PCF, para o período de 2041 a 2070.

Shrestha et al. (2019) avaliaram o impacto das mudanças no clima futuro sobre as vazões mínimas em uma bacia hidrográfica americana, empregando para tal finalidade o modelo hidrológico SWAT e um conjunto de 10 projeções climáticas fundamentadas nos RCP's 4.5 e 8.5. Segundo os autores, os resultados apontam para aumento nas vazões mínimas, potencialmente atribuído ao incremento na intensidade e distribuição da precipitação projetada pelos modelos climáticos. No presente estudo, a influência da precipitação também é verificada, visto que pelo RCP 8.5 para o período de 2071 a 2099, as projeções de dois dos quatro modelos climáticos avaliados indicam incremento em menor magnitude da precipitação total anual e têm tendência estatisticamente significativa de redução da variável ao longo do tempo segundo dois dos quatro modelos climáticos avaliados, o que pode ter causado uma redução e os demais pequenos acréscimos nas vazões mínimas anuais no período.

5 Considerações Finais

5.1. Aspectos gerais

Neste estudo, foi avaliado o impacto das mudanças climáticas sobre aspectos hidrológicos de três sub-bacias da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo. O modelo hidrológico LASH foi calibrado, validado e, posteriormente, empregado para a simulação dos hidrogramas diários frente ao clima presente e às projeções climáticas de quatro MCG's regionalizados pelo MCR Eta, considerando dois cenários de emissão de gases do efeito estufa apresentados no AR5 do IPCC, sendo um relativamente otimista (RCP 4.5) e o outro pessimista (RCP 8.5). Foram analisadas as vazões médias mensais, a produção de água, as vazões máximas, médias e mínimas anuais, a média das vazões médias e mínimas anuais e a vazão média de enchente, tendo sido estas análises conduzidas em 3 períodos futuros (2006 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099) e comparadas ao período presente (1961 a 2005).

Quanto à modelagem hidrológica, os resultados obtidos confirmam a hipótese definida no início da pesquisa. A calibração do modelo LASH, ao passo diário, para as bacias analisadas apresentou resultados que, de modo geral, podem ser considerados satisfatórios frente à disponibilidade de dados, especialmente temporais, na região. Neste contexto – de disponibilidade de dados – destaca-se a baixa representatividade da variação espacial e temporal da chuva, especialmente no caso da BHAP-PCF e da BHAF-PC, cujas áreas de drenagem são bem menores que a da BHRP-PO, e o tempo de concentração é inferior a um dia.

Quanto às mudanças climáticas, os resultados obtidos confirmam mais uma vez as hipóteses da pesquisa, de que haveria aumento nas vazões médias, máximas e mínimas anuais, e que as maiores variações seriam obtidas frente às projeções climáticas fundamentadas no RCP 4.5. Mais especificamente, constatou-se que:

- Via de regra, os prognósticos indicam aumento nas vazões médias mensais nas três bacias analisadas, sendo mais pronunciado: i) na BHRP-PO nos meses de fevereiro (2006-2040), maio (2041-2070) e

dezembro (2071-2099); ii) na BHAP-PCF nos meses de fevereiro (2006-2040), junho (2041-2070) e maio (2071-2099); e iii) na BHAF-PC, nos meses de fevereiro (2006-2040) e de maio (2041-2099).

- Pode ocorrer também algumas reduções, sendo: i) na BHRP-PO, nos meses de julho (2071-2099, RCP 4.5), agosto (2006-2070, RCP 8.5; 2041-2099, RCP 4.5) e setembro (2041-2099, RCP 8.5); ii) na BHAP-PCF, no mês de março (2071-2099, RCP 8.5); e na BHAF-PC, nos meses de agosto (2006-2070, RCP 8.5) e março e setembro (2071-2099, RCP 8.5);
- As vazões médias anuais e a produção de água das bacias poderão sofrer acréscimos até o final do século perante o RCP 4.5, enquanto que pelo RCP 8.5, os acréscimos poderão ser atenuados entre 2071 e 2099;
- Um comportamento semelhante ao das vazões médias ocorreu para as vazões máximas anuais, enquanto que para a vazão média de enchente, houve projeção de incremento gradativo até o final do século pelos dois RCP's para a BHRP-PO e pelo RCP 4.5 para a BHAP-PCF e a BHAF-PC, e de incremento seguido de redução para pelo RCP 8.5 para essas duas bacias;
- Quanto às vazões mínimas anuais, pode-se esperar pequena redução percentual entre 2071 e 2099 pelo RCP 8.5 na BHAF-PC; para as demais bacias, tal cenário indica aumento gradativo entre 2006 e 2070, seguido por redução entre 2071 e 2099.

Alguns indicadores avaliados com base na modelagem hidrológica forçada por projeções climáticas fundamentadas no RCP 8.5 apresentam acréscimos em menor magnitude ao final do século XXI. Estes acréscimos são atenuados provavelmente pela relação sinérgica entre a redução da precipitação total anual e o aumento da temperatura média diária, indicados por análise de tendência para dois dos quatro modelos avaliados.

O prognóstico de aumento nas vazões médias mensais, especialmente durante o verão, é animador quando considerado o fato de que as bacias são predominantemente agrícolas e que a região faz uso, neste período, de

fornecimento suplementar de água às culturas mediante técnicas de irrigação. Durante o inverno, são observadas nas séries históricas as maiores magnitudes de vazão média mensal, o que dá indícios de um impacto relativamente baixo aos usuários de água das bacias no que tange aos prognósticos de redução para o período futuro. Neste mesmo contexto, ressalta-se a relevância dos aumentos das vazões médias e mínimas anuais e também da produção de água das bacias. Por outro lado, é preocupante o prognóstico de aumento nas vazões médias de enchente, especialmente quando existem históricos de danos causados por enchentes e inundações, como se verifica na área urbana de Pedro Osório e Cerrito, às margens do rio Piratini (BHRP-PO); resultados como os encontrados neste estudo podem servir de ferramenta para elaboração de Planos de Bacia e, mais especificamente, de Planos Diretores e de Zoneamento Urbano em municípios ribeirinhos. Outro problema associado ao aumento das vazões máximas tange à conservação do solo e da água, uma vez que estas vazões tem grande parcela de escoamento superficial direto, responsável pelo processo de erosão hídrica e transporte de sedimentos nas bacias. Maiores índices de escoamento superficial direto tendem a elevar a perda de solo agricultável nas bacias e a comprometer a qualidade das águas dos mananciais. Cabe neste aspecto uma análise mais detalhada a respeito das parcelas do escoamento verificadas nos hidrogramas diários estimados por modelagem hidrológica forçada pelos modelos climáticos, para verificar se, de fato, isso ocorre, e do comportamento da erosividade da chuva frente às mudanças climáticas.

Quanto às vazões mínimas anuais, apenas para a BHAF-PC, ao final do século XXI (2071 a 2099) e frente ao RCP 8.5, espera-se redução, embora percentualmente pequena. De modo geral, o cenário pessimista de emissão de gases do efeito estufa (RCP 8.5) implicou em aumento gradativo das vazões mínimas anuais entre 2006 e 2070, seguido de redução entre 2071 e 2099, enquanto que o cenário relativamente otimista (RCP 4.5) indicou as maiores variações positivas para a BHRP-PO e para a BHAF-PC entre 2071 e 2099 e, para a BHAP-PCF, entre 2041 e 2070.

5.2. Limitações do estudo

Cabe destacar que os resultados obtidos nesta pesquisa são válidos para algumas suposições e considerações, a saber:

- i) O uso e cobertura do solo nas bacias hidrográficas analisadas foi obtido por interpretação de uma única imagem de satélite;
- ii) Os dados associados aos solos da BHRP-PO foram obtidos da literatura, diferentemente da BHAP-PCF e da BHAF-PC, para as quais haviam transeções espaciais amostradas e inúmeras características físico-hídricas avaliadas;
- iii) A representatividade espaço-temporal da chuva foi pequena devido ao baixo número de postos de monitoramento com séries históricas consolidadas na área de estudo, especialmente nas BHAP-PCF e na BHAF-PC;
- iv) A calibração do modelo hidrológico LASH foi realizada de forma mono-objetivo, isto é, empregando uma única função objetivo para ajuste dos parâmetros;
- v) A análise de tendência nas projeções climáticas limitou-se apenas aos dados de precipitação total anual e temperatura média diária anual;
- vi) A comparação entre indicadores obtidos por modelagem hidrológica forçada pelos clima presente dos modelos climáticos e indicadores obtidos da série histórica de vazões pode ser realizada somente para a BHAP-PCF e BHAF-PC, tendo em vista a inexistência de dados observados no período para a BHRP-PO;
- vii) Os possíveis impactos das mudanças climáticas foram avaliados somente sobre indicadores associados ao escoamento total no exutório de cada bacia; e
- viii) Foram empregados dados do clima presente e de projeções climáticas de apenas 4 MCG's aninhados a 1 MCR, assim como foi utilizado somente 1 modelo hidrológico, sendo as características intrínsecas e incertezas associadas não exploradas neste estudo;

5.3. Recomendações para estudos futuros

Recomendações para pesquisas futuras vão ao encontro das limitações verificadas no desenvolvimento deste estudo. Neste sentido, recomenda-se que estudos futuros nestas bacias:

- i) sejam realizados empregando mapas sazonais de uso e cobertura do solo, visando representar, na calibração do modelo hidrológico, a variabilidade interanual presente na região predominantemente agrícola;
- ii) sejam considerados cenários de alteração de uso e cobertura do solo;
- iii) considerem a definição de uma transeção espacial na BHRP-PO, para fins de amostragem e caracterização dos solos da bacia;
- iv) avaliem a possibilidade de empregar dados diários e até mesmo sub-diários de chuva oriundos de produtos de sensoriamento remoto, com maior representatividade espacial e temporal;
- v) conduzam a calibração multiobjetivo dos parâmetros do modelo LASH, tendo em vista a melhor representatividade simultânea de períodos de cheias e seca;
- vi) busquem avaliar as projeções climáticas de outros MCG's;
- vii) busquem avaliar tendências sazonais nas projeções climáticas precipitação e temperatura;
- viii) avaliem o impacto das mudanças climáticas de modo mais específico, analisando, por exemplo, as alterações projetadas sobre a evapotranspiração, além do escoamento superficial direto e do escoamento de base; e
- ix) busquem reduzir as incertezas das projeções não somente pela análise por conjunto de modelos climáticos, mas também por análise por conjunto de modelos hidrológicos.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome: FAO, 1998. 300 p.

ALM. **Agência da Lagoa Mirim**, 2018. Disponível em:
<<https://wp.ufpel.edu.br/alm/bacia-da-lagoa-mirim>>. Acesso em: 06 Agosto 2018.

ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre o uso da água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.

ALVARENGA, L. A. et al. Impacts of Climate Change on the Hydrology of a Small Brazilian Headwater Catchment Using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. **American Journal of Climate Change**, v. 7, p. 355-366, 2018.

ANJOS, R. R. **Cenários de Mudanças climáticas e análise de tendências de temperatura e precipitação para Pelotas/RS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, p. 74. 2018.

AQUINO, L. S. **Modelagem hidrológica na região sul do Rio Grande do Sul utilizando os modelos SWAT e LASH**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, p. 101. 2014.

ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N. The impacts of climate change on river flood. **Climatic Change**, v. 134, p. 387–401, 2016.

ARNOLD, J. G. et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1494-1508, 2012.

ARORA, V. K. et al. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 1-6, 2011.

ASFAW, A. et al. Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: A case study in Woleka sub-basin. **Weather and Climate Extremes**, v. 19, p. 29-41, 2018.

BAJRACHARYA, A. R. et al. Climate change impact assessment on the hydrological regime of the Kaligandaki Basin, Nepal. **Science of The Total Environment**, v. 625, p. 837-848, 2018.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, Tempo e Clima**. 9^a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 494 p.

BESKOW, S. **LASH Model: a hydrological simulation tool in GIS framework**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 118. 2009.

BESKOW, S. et al. Soil erosion prediction in the Grande River, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, p. 49-59, 2009b.

BESKOW, S. et al. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, 2016.

BESKOW, S. et al. Geomorphology-based unit hydrograph models for flood risk management: case study in Brazilian watersheds with contrasting physiographic characteristics. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, p. 1873-1890, 2018.

BESKOW, S.; MELLO, C. R. D.; NORTON, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 265-274, 2011.

BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. Hydrological Prediction in a Tropical Watershed Dominated by Oxisols Using a Distributed Hydrological Model. **Water Resources Management**, v. 27, p. 341-363, 2013.

BESKOW, S.; SOUZA, M. R.; LUZ, E. P. D. Ciclo hidrológico. In: RODRIGUES, C. **Programa Gestor de Recursos Hídricos**. Santa Cruz do Sul: Essere Nel Mondo, 2015. Cap. 1, p. 6-12.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. 1ª. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

BRASIL. Lei n. 9.433, de 8 de jan de 1997, Brasília, DF, jan 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/l9433.htm>. Acesso em: 21 jun. 2018.

CALDEIRA, T. L. **Aprimoramento computacional do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH): aplicação em duas bacias do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, p. 213. 2016.

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

CALDEIRA, T. L. et al. LASH hydrological model: An analysis focused on spatial discretization. **Catena**, 173, 2019. 183-193.

CASSALHO, F. C. et al. Hydrological regionalization of maximum stream flows using an approach based on L-moments. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, p. e27, 2017.

CEMADEM. Mapa Interativo da Rede Observacional para Monitoramento de Risco de Desastres Naturais do Cemaden. **Centro de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais**, 2018. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>>. Acesso em: 03 Dezembro 2018.

CHAHINE, M. T. The hydrological cycle and its influence on climate. **Nature**, v. 359, n. 1, p. 373-380, 1992.

CHOU, S. C. Modelo Regional ETA. **Climanalise - Edição Comemorativa de 10 anos**, 1996.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 438-454, 2014a.

CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512-525, 2014b.

CHOW, V. T. **Handbook of Applied hydrology - a compendium of water resources technology**. New York: McGraw-Hill, 1964. 1495 p. ISBN 978-0070107748.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1988. 588 p.

COLLINS, W. J. et al. Development and evaluation of an Earth-System model - HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 1051-1075, 2011.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 194. 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 27-41, 2003.

CUNHA, N. G. et al. **Estudo dos solos do município de Canguçu**. Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1997a. 86 p.

CUNHA, N. G. et al. **Estudo dos solos do município de Piratini**. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 1997b. 91 p.

CUNHA, N. G. et al. **Estudo dos solos do município de Pinheiro Machado**. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 1998. 80 p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C. **Geomorfologia, Solos e Capacidade de Uso das Terras do município de Pedro Osório**. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 1996a. 54 p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C. **Estudo dos solos do município de Capão do Leão**. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 1996b. 54 p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C. **Estudo dos solos do município de Pelotas**. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 1996c. 50 p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Estudo dos solos do município de Arroio Grande**. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 1996a. 105 p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Estudo dos solos do município de Herval**. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 1996b. 45 p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Solos e Terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e Planícies Costeira**. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 2006. 43 p.

DAVIE, T. **Fundamentals of Hydrology**. 2^a. ed. New York: Routledge, 2008.

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

DÖLL, P. et al. Integrating risks of climate change into water management. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 1, p. 4-13, 2015.

DONGLI, S. et al. Multi-scale correlations between soil hydraulic properties and associated factors along a Brazilian watershed transect. **Geoderma**, v. 286, p. 15-24, 2017.

DOOGE, J. **Linear Theory of Hydrological Systems. Technical Bulletin n. 1468**. Washington DC: Agricultural Research Service - US Department of Agriculture, 1973. 327 p.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. **Water Resources Research**, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992.

EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rio de Janeiro. 1979.

FAGUNDES, J. L. et al. Características morfogênicas e estruturais do capim-braquiária em pastagem adubada com nitrogênio avaliadas nas quatro estações do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 1, p. 21-29, 2006.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO in the 21st century: ensuring food security in a change world**. Roma: FAO, 2011. 239 p.

FUNG, F.; LOPEZ, A.; NEW, M. **Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources**. [S.l.]: Wiley-Blackwell, 2011. 187 p.

GEBREMEDHIN, K.; SHETTY, A.; NANDAGIRI, L. Analysis of variability and trends in rainfall over northern Ethiopia. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 9, n. 451, 2016.

GREEN, C. H. et al. Hydrologic evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 2, p. 413-422, 2006.

GRUPO DE PESQUISA EM HIDROLOGIA E MODELAGEM HIDROLÓGICA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS. Monitoramento Hidrológico. **Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas**, 2018.

Disponível em: <<https://wp.ufpel.edu.br/hidrologiaemodelagemhidrologica/rede-de-monitoramento-hidrologico/>>. Acesso em: 3 Dezembro 2018.

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

HARTMANN, H. C.; BALES, R.; SOROOSHIAN, S. **Weather, climate and hydrologic forecasting for the southwest U.S.** Tucson: The University of Arizona, 1999. 172 p.

HASENACK, H.; WEBER, E. **Base cartográfica vetorial continua do Rio Grande do Sul – escala 1:50.000**. UFRGS - Centro de Ecologia. Porto Alegre. 2010.

HASSON, S. et al. Seasonality of the hydrological cycle in major South and Southeast Asian river basins as simulated by PCMDI/CMIP3 experiments. **Earth System Dynamics**, v. 5, p. 67-87, 2014.

HAVRYLENKO, S. B. et al. Assessment of Soil Water Content in the Pampas region using SWAT. **Catena**, v. 137, p. 298-309, 2016.

HIRPA, F. A. et al. Finding sustainable water futures in data-sparse regions under climate change: insights from the Turkwel River basin, Kenya. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 19, p. 124-135, 2018.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**, 2018a. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 2018 Setembro 04.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Banco de Imagens da DGI/INPE**, 2018b. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 27 set. 2018.

IPCC. **Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S.l.]: [s.n.], 2000. 20 p.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

IPCC. Resumo para decisores. In: STOCKER, T. F., et al. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014: Synthesis Report**. Switzerland: IPCC, 2014. 155 p.

KARLSSON, I. B. et al. Combined effects of climate models, hydrological model structures and land use scenarios on hydrological impacts of climate change. **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 301-317, 2016.

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

KLEMEŠ, V. Operational testing of hydrological simulation. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, n. 1, p. 13-24, 1986.

KUMAR, N. et al. Impact of climate change on water resources of upper Kharun catchment in Chhattisgarh, India. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 13, p. 189-207, 2017.

KUNDZEWICZ, Z. W. et al. The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. **Hydrological Sciences Journal**, v. 53, n. 1, p. 3-10, 2008.

LASDON, L. S. et al. Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. **ACM Trans. Math. Softw.**, 4, 1978. 34-50.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of "goodness of fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 26, p. 69-86, 1999.

LIMA, W. P. **Princípios de hidrologia florestal para manejo de bacias hidrográficas**. São Paulo: ESALQ, 1986. 242 p.

LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. **Applied Hydrology**. New York: Tata McGraw-Hill, 1975. 689 p.

LYRA, A. et al. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, p. 663-682, 2018.

MANFRON, P. A. B. O. O. S. et al. Modelo do índice de área foliar da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 333-342, 2003.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245-259, 1945.

MARHAENTO, H.; BOOIJ, M. J.; HOEKSTRA, A. Y. Hydrological response to future land-use change and climate change in a tropical catchment. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, n. 9, p. 1368-1385, 2018.

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

MARQUES FILHO, A. O.; DALLAROSA, R. G.; PACHÊCO, V. B. Radiação solar e distribuição vertical de área foliar em floresta - Reserva Biológica do Cuieiras - ZF2, Manaus. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 4, p. 427-436, 2005.

MCLEOD, A. I. Kendall: Kendall rank correlation and Mann-Kendall. R package version 2.2., 2011. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=Kendall>>.

MELLO, C. R. D. et al. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 1, 2016.

MELLO, C. R. D.; SILVA, A. M. D. **Hidrologia**: princípios e aplicações em sistemas agrícolas. 1ª. ed. Lavras: UFLA, 2013. 455 p.

MELLO, C. R. et al. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, v. 75, n. 3, p. 235-247, 2008.

MESINGER, F. et al. An upgraded version of the Eta Model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, p. 63-79, 2012.

MIRANDA, A. C. et al. Carbon dioxide fluxes over a cerrado sensu stricto in central Brazil. In: GASH, J. H. C., et al. **Amazonian deforestation and climate**. New York: Wiley, 1996. p. 353-364.

MIRANDA, R. A. C.; OLIVEIRA, M. V. S.; SILVA, D. F. D. Ciclo hidrológico planetário: abordagens e Conceitos. **Geo UERJ**, v. 1, n. 21, p. 109-119, 2010.

MISHRA, S. K. et al. A modified SCA-CN method: Characterization and testing. **Water Resources Management**, v. 17, n. 1, p. 37-68, 2003.

MISHRA, S. K. et al. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. **Water Resources Management**, v. 20, n. 5, p. 646-660, 2006.

MOREIRA, J. G. V.; NAGHETTINI, M. Detecção de Tendências Monotônicas Temporais e Relação com Erros dos Tipos I e II: Estudo de Caso em Séries de Precipitações Diárias Máximas Anuais do Estado do Acre. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 394-402, 2016.

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, p. 747-756, 2010.

MOTOVILOV, Y. G. et al. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 98-99, p. 257-277, 1999.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-298, 1970.

NILAWAR, A. P.; WAIKAR, M. L. Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India. **Science of The Total Environment**, v. 650, n. 2, p. 2685-2696, 2019.

NOBRE, P. et al. Climate Simulations and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, v. 26, p. 6716-6732, 2013.

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

OTTONI, M. V. et al. Hydrophysical Database for Brazilian Soils (HYBRAS) and Pedrotransfer Functions for Water Retention. **Vadose Zone Journal**, 17, n. 1, 2018. 1-17.

PEREIRA, D. D. S. et al. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 5, p. 149-163, 2016. ISSN 10.1016/j.ejrh.2015.11.008.

PINTO, F. P. **Diagnóstico preliminar do lado brasileiro ba bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo como suporte ao Plano de Recursos Hídricos**. (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, p. 91. 2018.

PRESS, F. et al. **Understanding Earth**. 4^a. ed. New York: W. H. Freeman, 2004. 568 p. ISBN 0716796171.

PRUSKI, F. F. et al. A model to design level terraces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 123, n. 1, p. 8-12, 1997. ISSN 10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:1(8).

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 301-307, 2001.

RAGHUNATH, H. M. **Hydrology: Principles, Analyses and Design**. New Delhi: New Age International, 2006. 476 p.

RANEESH, K. Y.; SANTOSH, T. A study on the impact of climate change on streamflow at the watershed scale in the humid tropics. **Hydrological Sciences Journal**, v. 56, n. 6, p. 946-965, 2011.

RAWLS, W. J. et al. Infiltration and soil water movement. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993. Cap. 50-07-039732-5, p. 1-51.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2ª. ed. Barueri: Manole, 2012. 524 p.

RIBEIRO NETO, A. et al. Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, p. 1103-1127, 2016.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. 5th. ed. Berlin - Heidelberg: Springer, 2013. 494 p.

SALTELLI, A. et al. **Sensitivity Analysis in Practice: a guide to assessing scientific models**. Chichester: Wiley, 2004. 219 p.

SAMUELS, R. et al. Climate Change Impacts on Jordan River Flow: Downscaling Application from a Regional Climate Model. **Journal of Hydrometeorology**, v. 11, p. 860-879, 2010.

SCS. **National Engineering Handbook**. Washington: Soil Conservation Service/USDA, 1971.

SEMA. Secretaria Estadual do Meio Ambiente - Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul, 2018. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas>>. Acesso em: 07 Agosto 2018.

SHAW, E. M. **Hydrology in Practice**. 3ª. ed. London: Chapman & Hall, 1994. 613 p.

SHRESTHA, S. et al. Impact of global climate change on stream low flows: A case study of the great Miami river watershed, Ohio, USA. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** , v. 12, n. 1, p. 84-95, 2019.

SHUDDER, K. P. et al. Impact of time-scale of the calibration objective function on the performance of watershed models. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 25, p. 3409-3419, 2007.

SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993. p. 1-53.

SILVA, E. M. D. et al. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 323-330, 2006.

SILVA, G. L. D. **Qualidade física de um Luvissole cultivado com sistemas agroflorestais e convencional no semi-árido cearense**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 68. 2008.

SILVA, P. M. D. O. et al. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 258-265, 2008.

SOARES, M. F. **Variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos e do carbono orgânico do solo de uma bacia hidrográfica de cabeceira em Canguçu – RS**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, p. 102. 2017.

SOMBROEK, W. G. **Soil studies in the Merin lagoon basin**. Treinta y Tres: CLM/PNUD/FAO, v. 1, 1969. 325 p.

SOROOSHIAN, S. et al. **Hydrological modelling and water cycle**. Heidelberg: Springer, 2008. 291 p.

SOSA, J. M. R. et al. Climate change impact on the hydrological balance of the Itaipu Basin. **Meteorological Application**, v. 18, p. 163-170, 2011.

STEINMETZ, A. A. et al. Assessment of Soil Loss Vulnerability in Data-Scarce Watersheds in Southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, p. no prelo, 2019.

SUGUIO, K. **Água**. Ribeirão Preto: Holos, 2006. 242 p.

TELLES, R. M. **Inundações urbanas nos municípios de Pedro Osório e Cerrito - RS**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade Federal do Rio Grande. Porto Alegre, p. 74. 2002.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Regional Climate Models for Hydrological Impact Studies at the Catchment Scale: A Review of Recent Modeling Strategies. **Geography Compass**, v. 4, n. 7, p. 834-860, 2010.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005. 678 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p.

UNFCCC. **United Nations Framework Convention on Climate Change. UN General Assembly**. New York: [s.n.], 1992. 33 p.

VAN LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G.; GARBRECHT, J. D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: choosing between two models. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 6, p. 1539-1551, 2003.

VARGAS, M. M. et al. SYHDA – System of Hydrological Data Acquisition and Analysis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, e11, 2019.

VILLELA, A. A.; FREITAS, M. A. V.; ROSA, L. P. **Emissões de carbono na mudança de uso do solo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 194 p.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na região do Alto Rio Grande a montante do Reservatório de Camargos/CEMIG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 120. 2008.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na cabeceira da Bacia Hidrográfica do Rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 286. 2011.

VIOLA, M. R. et al. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009.

VIOLA, M. R. et al. Applicability of the LASH Model for hydrological simulation of the Grand River Basin, Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 12, p. 1639-1652, 2013.

VIOLA, M. R. et al. Impacts of land-use changes on the hydrology of the Grande river basin headwaters, Southeastern, Brazil. **Water Resources Management**, v. 28, n. 13, p. 4537-4550, 2014.

VIOLA, M. R. et al. Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 35, p. 1054-1068, 2015.

WATANABE, M. et al. Improve Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, p. 6312-6335, 2010.

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity Analysis, Calibration and Validation for a Multisite and Multivariable SWAT Model. **Journal of the American Water Resources Association**, p. 1077-1089, 2005.

YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. **Journal of Hydrology**, v. 259, p. 254-271, 2002.

APÊNDICES

Apêndice A. Rotina hidrológica do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH)

Neste Apêndice são apresentadas as principais equações empregadas na rotina hidrológica da terceira versão do modelo LASH, conforme descrita por Caldeira (2016).

A.1 Balanço hídrico do solo

O armazenamento atual de água no solo (A_t) é uma variável de estado primordial aos modelos hidrológicos, uma vez que atua diretamente sobre a geração das diferentes parcelas do escoamento (VIOLA, 2008). Na terceira versão do modelo LASH, A_t (Equação A1) é estimada a partir da variação de armazenamento de água no solo ΔA (Equação A2), também denominada de balanço hídrico do solo. A unidade de análise é a sub-bacia hidrográfica e o passo de simulação é o diário, podendo ser considerados outros intervalos de tempo.

$$A_t = A_{t-1} + \Delta A \quad (A1)$$

$$\Delta A = (P + D_{CR} - ET_R - D_B - D_{SS} - D_{SUP}) \cdot \Delta t \quad (A2)$$

em que ΔA é a variação de armazenamento de água no solo (mm), P é a precipitação média (mm), descontada a interceptação, D_{CR} é a ascensão capilar (mm), ET_R é a evapotranspiração real (mm), D_B é a lâmina de escoamento subterrâneo (mm), D_{SS} é a lâmina de escoamento subsuperficial (mm), D_{SUP} é a lâmina de escoamento superficial (mm), Δt é o intervalo de tempo de 1 dia, A_t é o armazenamento atual de água no solo (mm) e A_{t-1} é o armazenamento de água no solo (mm) no intervalo de tempo imediatamente anterior à t .

A1.1 Interceptação

O modelo LASH estima a Capacidade do Reservatório de Interceptação (CRI) de cada sub-bacia hidrográfica considerando a CRI como uma função linear do índice de área foliar (IAF):

$$CRI = \alpha \cdot IAF \quad (A3)$$

em que α é a capacidade máxima de armazenamento de água por unidade de área das folhas.

Após determinar CRI para cada sub-bacia, o modelo LASH realiza o balanço hídrico no reservatório de interceptação do seguinte modo:

- se inexistir lâmina armazenada no reservatório no tempo $t-1$ (LI_{t-1}) e a precipitação total no tempo t (P_t) for superior à CRI, a lâmina armazenada no tempo t (LI_t) passa a ser a própria CRI, assim como quando LI_{t-1} acrescida à P_t for superior à CRI.
- se inexistir lâmina armazenada no reservatório no tempo $t-1$ (LI_{t-1}) e a lâmina total precipitada no tempo t (P_t), for inferior à CRI, a lâmina armazenada no tempo t (LI_t) é igual à P_t .
- se a lâmina armazenada no reservatório no tempo $t-1$ (LI_{t-1}), acrescida da lâmina total precipitada no tempo t (P_t), for inferior à CRI, a lâmina armazenada no tempo t (LI_t) é dada pela soma de LI_{t-1} e P_t .

Em seguida, o modelo estima a parcela da lâmina de precipitação (P) que atingiu o solo no tempo t :

$$P = P_t - (LI_t - LI_{t-1}) \quad (A4)$$

em que LI_t é a lâmina interceptada durante o intervalo de tempo (mm), LI_{t-1} é a lâmina no reservatório de interceptação ao início do intervalo de tempo (mm), P_t é a precipitação total (mm) e P é a precipitação descontada a interceptação (mm).

Ao final do tempo t , o modelo LASH então estima o esvaziamento do reservatório de interceptação de cada sub-bacia hidrográfica, descontando da lâmina armazenada (LI_t) a evapotranspiração potencial (ET_P).

A.1.2 Escoamento superficial direto

A estimativa do escoamento superficial direto no modelo LASH se dá pelo método do Número da Curva (CN) (SCS, 1971), desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS – atual Natural Resources Conservation Services do United States Department of Agriculture) e modificado por Mishra *et al.* (2003), denominado neste estudo de CN-Modificado. Tal estimativa fundamenta-se nas seguintes equações:

$$D_{SUP} = \frac{(P_t - I_a) \cdot (P_t - I_a + M)}{P_t - I_a + M + S} \quad (A5)$$

$$M = 0,5 \cdot (-(1 + \lambda) \cdot S) + \sqrt{(1 - \lambda)^2 \cdot S^2 + 4 \cdot P_5 \cdot S} \quad (A6)$$

$$I_a = \frac{\lambda \cdot S^2}{S + M} \quad (A7)$$

$$S = (\theta_s - \theta_A) \cdot h \quad (A8)$$

$$S = A_m - A_t \quad (A9)$$

em que D_{SUP} é a lâmina de escoamento superficial direto (mm), P_t é a precipitação total que atinge o solo (mm), I_a é a abstração inicial (mm), M é a umidade antecedente (mm), S corresponde ao armazenamento potencial de água no solo compreendido entre o conteúdo de água no solo no ponto de saturação (θ_s) e o conteúdo atual de água no solo (θ_A), podendo ser estimado pelas equações A8 e A9, e λ é o coeficiente de abstração inicial.

A.1.3 Escoamento subsuperficial

A parcela de escoamento subsuperficial é estimada pelo modelo LASH, para cada sub-bacia hidrográfica, conforme recomendam Rawls *et al.* (1993). Quando o armazenamento de água no solo no tempo t (A_t) for inferior ao limiar de

armazenamento a partir do qual ocorre geração de escoamento subsuperficial (A_{cc}), essa parcela é nula, no entanto, se for superior, é estimada por:

$$D_{ss} = K_{ss} \cdot \left(\frac{A_t - A_{cc}}{A_m - A_{cc}} \right)^{\left(3 + \frac{2}{Pr}\right)} \quad \text{se } A_t \geq A_{cc} \quad (A104)$$

em que D_{ss} é o escoamento subsuperficial (mm), K_{ss} é a condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial (mm.h^{-1}), Pr é o índice de porosidade do solo e A_{cc} representa o armazenamento de água no solo a partir do qual ocorre escoamento subsuperficial.

A.1.4 Escoamento de base

O escoamento de base, ou escoamento subterrâneo, é estimado no modelo hidrológico LASH seguindo as recomendações de Rawls *et al.* (1993). Quando o armazenamento de água no solo no tempo t (A_t) for inferior ao limiar de armazenamento a partir do qual ocorre geração de escoamento subterrâneo (A_c), essa parcela será nula, entretando, se superior, é estimada pela seguinte equação:

$$D_B = K_B \cdot \left(\frac{A_t - A_c}{A_m - A_c} \right) \quad \text{se } A_t \geq A_c \quad (A11)$$

em que D_B é o escoamento subterrâneo, em mm.dia^{-1} , K_B é a condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo, em mm.dia^{-1} , e A_c representa o armazenamento de água no solo a partir do qual ocorre escoamento subterrâneo.

A.1.5 Ascensão capilar

O componente de ascensão capilar é estimado no modelo LASH tendo em vista a simulação de situações em que a disponibilidade hídrica do solo é baixa, implicando na elevação da água do aquífero raso para a camada do solo e tornando-a disponível para evapotranspiração. Para situações em que o armazenamento atual de água no solo é inferior armazenamento limite para ocorrer fluxo de água por ascensão capilar, tal fluxo é calculado por:

$$D_{CR} = K_{CAP} \left(\frac{A_{CR} - A_t}{A_{CR}} \right) \quad (A12)$$

em que K_{CAP} é o fluxo máximo retornado ao solo por ascensão capilar (mm.dia^{-1}), A_t é o armazenamento atual de água no solo (mm) e A_{CR} o armazenamento limite para o qual ocorrer ascensão capilar.

A.1.6 Evapotranspiração

O módulo de evapotranspiração do modelo hidrológico LASH foi fundamentado em dados meteorológicos normalmente disponíveis, aplicados à metodologia de Penman-Monteith (ALLEN, PEREIRA, *et al.*, 1998) para estimativa de uma série histórica de evapotranspiração da cultura (ET_c):

$$ET_c = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \left(\frac{86400 \cdot \gamma \cdot \varepsilon}{T_{Kv} \cdot R \cdot r_a} \right) \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (A53)$$

sendo ET_c a evapotranspiração da cultura (mm), Δ a declividade da curva de pressão de saturação da água ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) na temperatura do ar T ($^\circ\text{C}$), R_n a radiação líquida ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), e_a a pressão atual do vapor d'água (kPa), e_s a pressão de saturação do vapor d'água (kPa), G é o fluxo de energia para o solo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), considerado nulo, γ a constante psicrométrica ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), ε uma razão do peso molecular do vapor d'água/ar seco (0,622, adimensional), T_{Kv} a temperatura virtual (K), R a constante de gás específico, r_a a resistência aerodinâmica ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) e r_s a resistência estomatal ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$).

Diversas variáveis do método de Penman-Monteith se inter-relacionam e dependem de outras equações para serem determinadas, portanto, recomenda-se consultar Allen *et al.* (1998) para maiores detalhes.

Quando não há condições ótimas de umidade ou nutrientes, a evapotranspiração real da cultura (ET_R) é menor ou, no máximo, igual à ET_c , sendo possível expressar a relação entre ambas por meio de um coeficiente que depende da umidade do solo (K_s) (Allen *et al.* (1998); Pereira, Villa Nova e Sedyama (1997); Bernardo, Soares e Mantovani (2005)):

$$ET_R = ET_C \cdot K_S \quad (A14)$$

em que K_S é um coeficiente que representa um decaimento exponencial da relação entre a ET_R e ET_C a partir de um armazenamento limite de água no solo (A_L).

O coeficiente K_S da Equação A13 representa um decaimento exponencial da relação entre a ET_R e ET_C a partir de um armazenamento limite de água no solo (A_L) e é determinado pela seguinte equação adaptada de Bernardo, Soares e Mantovani (2005):

$$K_S = \frac{\ln(A_t - A_{PMP})}{\ln(A_L - A_{PMP})} \quad \text{se } A_t < A_L \quad (A15)$$

$$K_S = 1 \quad \text{se } A_t \geq A_L \quad (A16)$$

em que K_S é o coeficiente de umidade do solo, adimensional, A_L é o armazenamento limite a partir do qual ocorre decréscimo da evapotranspiração, em mm, e A_{PMP} é o armazenamento de água no solo no ponto de murcha permanente, em mm.

A.2 Propagação nos reservatórios

Uma vez estimados, para cada sub-bacia hidrográfica, os valores de D_{SUP} (Equação A5), D_{SS} (Equação A10) e D_B (Equação A11), o modelo LASH os transforma em vazão, empregando três reservatórios lineares: o superficial, o subsuperficial e o subterrâneo (Collischonn, 2001; Tucci, 2005).

A vazão de saída dos reservatórios lineares superficial, subsuperficial e subterrâneo é dada por:

$$Q_{SUP} = \frac{D_{SUP} \cdot A_{sub-bacia}}{C_S \cdot T_c} = \frac{V_{SUP}}{C_{SUP} \cdot T_c} \quad (A17)$$

$$Q_{SS} = \frac{D_{SS} \cdot A_{\text{sub-bacia}}}{C_{SS} \cdot T_c} = \frac{V_{SS}}{C_{SS} \cdot T_c} \quad (\text{A18})$$

$$Q_B = \frac{D_B \cdot A_{\text{sub-bacia}}}{C_B} = \frac{V_B}{C_B} \quad (\text{A19})$$

em que Q_{SUP} , Q_{SS} e Q_B são as vazões de saída dos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), respectivamente, $A_{\text{sub-bacia}}$ é a área de drenagem de cada da sub-bacia (m^2), V_{SUP} , V_{SS} e V_B representam o volume nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrânea (m^3), respectivamente, T_c representa o tempo de concentração da bacia (s), e C_S , C_{SS} e C_B são parâmetros de calibração da propagação dos reservatórios superficial, subsuperficial e de base, respectivamente.

A vazão simulada a cada passo do modelo hidrológico, em cada sub-bacia hidrográfica, é, então, obtida pelo somatório das vazões de saída dos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo.

A.3 Propagação nos canais

Dada a estimada da vazão no exutório de uma sub-bacia hidrográfica, esta atingirá a rede de drenagem à jusante, sendo propagada pelos canais até o próximo exutório, onde será acrescida da vazão estimada no exutório da sub-bacia à jusante. No modelo LASH, a vazão no exutório de cada sub-bacia hidrográfica é propagada pela rede de drenagem através do modelo Muskingum-Cunge Linear. A equação principal deste modelo é dada por:

$$Q_S^{t+1} = C_1 \cdot Q_e^t + C_2 \cdot Q_e^{t+1} + C_3 \cdot Q_S^t \quad (\text{A20})$$

em que Q_S é a vazão de saída do trecho de propagação, Q_e é a vazão de entrada no trecho e C_1 , C_2 e C_3 são constantes de propagação.

Maiores detalhes acerca do Modelo de Muskingum-Cunge Linear, tal como foi implementado nesta versão do modelo LASH, podem ser obtidos em Tucci (2005).

Apêndice B. Classes de solo nas bacias e parâmetros associados

Tabela B1 - Classes de solo, em percentual de área, encontradas nas sub-bacias da BHRP-PO

Sub-bacia	Argissolo Amarelo	Argissolo Vermelho-Amarelo	Argissolo Vermelho	Argissolo Bruno-acinzentado	Chernossolo Ebânico	Neossolo Litólico	Neossolo Regolítico	Luvisso Crômico	Gleissolo Melânico	Afloramento rochoso	Planossolo Hápico	Luvisso hápico	Neossolo Flúvico	Neossolo Quartzarênico
1	81,09	-	-	10,13	-	2,00	6,78	-	-	-	-	-	-	-
2	91,73	-	-	8,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	51,24	-	-	36,47	-	6,79	-	-	-	5,51	-	-	-	-
4	0,83	-	-	45,05	-	21,14	-	-	-	32,98	-	-	-	-
5	69,11	-	-	1,38	-	28,09	1,42	-	-	-	-	-	-	-
6	53,99	-	-	9,71	-	36,30	-	-	-	-	-	-	-	-
7	91,55	-	-	-	-	8,45	-	-	-	-	-	-	-	-
8	70,00	-	-	12,36	-	17,64	-	-	-	-	-	-	-	-
9	23,30	27,46	-	4,55	-	2,12	11,65	10,77	-	20,15	-	-	-	-
10	9,72	-	-	49,36	-	27,54	9,19	-	-	4,19	-	-	-	-
11	6,86	-	-	60,28	-	24,39	-	-	-	8,47	-	-	-	-
12	1,21	38,82	-	9,94	-	10,47	-	4,92	-	34,65	-	-	-	-
13	86,16	-	-	3,80	-	10,04	-	-	-	-	-	-	-	-
14	47,68	-	-	49,27	-	3,04	-	-	-	-	-	-	-	-
15	38,87	-	-	53,72	-	7,41	-	-	-	-	-	-	-	-
16	86,07	0,30	-	11,04	-	1,81	0,78	-	-	-	-	-	-	-
17	38,64	5,33	-	3,67	1,27	43,55	6,33	-	1,20	-	-	-	-	-
18	65,07	1,36	-	-	29,24	-	3,91	-	0,42	-	-	-	-	-
19	-	19,96	27,58	-	-	-	4,29	-	-	48,18	-	-	-	-
20	-	63,43	4,38	-	-	-	-	-	-	32,19	-	-	-	-

21	-	49,94	20,31	-	-	18,76	-	-	-	10,99	-	-	-	-
22	-	23,41	76,59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	4,88	-	-	84,57	-	8,92	-	-	-	1,63	-	-	-	-
24	33,50	13,67	-	36,15	-	10,82	-	-	5,82	-	0,04	-	-	-
25	1,34	0,10	-	69,45	-	28,31	-	-	-	0,81	-	-	-	-
26	11,18	5,13	-	75,88	-	0,22	-	-	-	7,60	-	-	-	-
27	-	78,78	-	-	-	-	-	-	-	21,22	-	-	-	-
28	36,35	22,97	8,37	-	-	8,22	0,12	-	-	7,58	-	16,40	-	-
29	37,85	17,89	-	29,02	-	-	-	-	9,90	-	5,35	-	-	-
30	-	45,66	-	-	-	-	-	-	-	-	54,34	-	-	-
31	48,09	16,98	-	26,59	-	-	-	-	8,35	-	-	-	-	-
32	3,66	12,54	22,50	-	-	22,98	-	-	-	15,55	-	22,77	-	-
33	-	21,75	17,43	37,82	-	11,04	-	-	-	9,59	-	2,37	-	-
34	-	-	49,95	-	-	-	-	-	-	0,20	-	49,85	-	-
35	0,28	10,29	-	-	-	33,08	15,60	-	-	8,50	-	32,25	-	-
36	10,79	29,25	-	-	-	-	-	-	48,51	-	-	-	11,45	-
37	51,41	25,17	-	5,64	-	-	-	-	14,64	-	1,17	-	0,04	1,93
38	-	34,58	-	12,25	-	6,15	-	-	-	3,06	-	43,96	-	-
39	3,51	54,71	-	1,82	-	-	-	-	2,43	-	-	37,52	-	-
40	13,92	81,43	-	-	-	-	-	-	0,01	-	-	0,02	4,61	-
41	89,97	3,03	-	-	-	-	4,55	-	-	2,45	-	-	-	-
42	55,36	-	-	-	-	5,27	5,08	-	-	1,71	-	32,57	-	-
43	33,61	0,32	-	-	3,03	-	-	9,38	-	-	-	53,67	-	-

Tabela B2 - Classes de solo, em percentual de área, encontradas nas sub-bacias da BHAP-PCF

Sub-bacia	Argissolo Amarelo	Argissolo Vermelho-Amarelo	Argissolo Vermelho	Argissolo Bruno-acinzentado	Cambissolo Hápico	Neossolo Litólico	Afloramento rochoso
1	19,57	-	-	34,64	16,42	-	29,37
2	23,94	-	-	-	76,06	-	-
3	1,71	-	-	-	98,29	-	-
4	83,28	-	-	-	16,72	-	-
5	75,58	-	-	-	24,42	-	-
6	88,72	-	-	-	11,28	-	-
7	46,80	-	-	39,40	13,80	-	-
8	85,02	-	-	14,98	-	-	-
9	100	-	-	-	-	-	-
10	100	-	-	-	-	-	-
11	79,67	-	-	20,33	-	-	-
12	100	-	-	-	-	-	-
13	97,67	-	-	-	2,33	-	-
14	91,83	-	-	-	7,72	0,45	-
15	100	-	-	-	-	-	-
16	72,13	-	-	27,87	-	-	-
17	94,17	5,83	-	-	-	-	-
18	93,83	-	6,17	-	-	-	-
19	100	-	-	-	-	-	-
20	69,30	30,70	-	-	-	-	-
21	100	-	-	-	-	-	-
22	100	-	-	-	-	-	-
23	39,67	60,33	-	-	-	-	-
24	54,21	45,79	-	-	-	-	-
25	25,85	74,15	-	-	-	-	-
26	53,08	46,92	-	-	-	-	-
27	46,93	-	53,07	-	-	-	-
28	93,61	6,39	-	-	-	-	-
29	85,73	-	-	-	-	14,27	-
30	60,51	-	39,49	-	-	-	-
31	87,64	-	-	-	-	12,36	-

Tabela B3 - Classes de solo, em percentual de área, encontradas nas sub-bacias da BHAF-PC

Sub-bacia	Argissolo Amarelo	Argissolo Vermelho- Amarelo	Neossolo Litólico	Argissolo Vermelho	Planossolo Hápico
1	-	87,36	11,86	-	0,78
2	-	97,50	-	-	2,50
3	100,00	-	-	-	-
4	100,00	-	-	-	-
5	73,21	13,75	13,04	-	-
6	47,27	41,89	9,86	-	0,98
7	-	42,75	-	-	57,25
8	45,93	37,20	16,87	-	-
9	-	96,49	-	-	3,51
10	62,07	35,90	-	2,03	-
11	26,87	0,04	-	73,09	-
12	-	30,92	-	55,61	13,47
13	-	29,58	-	0,27	70,15
14	24,11	72,76	-	-	3,13
15	-	44,14	-	-	55,86
16	-	37,23	-	-	62,77
17	-	-	-	-	100,00
18	-	9,02	-	14,17	76,81
19	-	-	-	-	100,00
20	-	25,09	-	-	74,91
21	-	-	-	-	100,00

Tabela B4 – Valores médios, por sub-bacia, empregados para umidade do solo no ponto de saturação (θ_s) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e para profundidade do solo (Z_{SOLO})

Sub-bacia	BHRP-PO			BHAP-PCF			BHAF-PC		
	θ_s	θ_{PMP}	Z_{SOLO}	θ_s	θ_{PMP}	Z_{SOLO}	θ_s	θ_{PMP}	Z_{SOLO}
	($m^3.m^{-3}$)		(mm)	($m^3.m^{-3}$)		(mm)	($m^3.m^{-3}$)		(mm)
1	0,452	0,175	1048,039	0,323	0,119	755,858	0,460	0,189	1323,516
2	0,459	0,180	1093,232	0,434	0,119	790,955	0,458	0,192	1463,500
3	0,438	0,174	1025,937	0,428	0,101	706,505	0,458	0,179	1080,000
4	0,315	0,124	630,942	0,453	0,166	1016,451	0,458	0,179	1080,000
5	0,460	0,174	856,282	0,45	0,160	987,189	0,460	0,179	1030,538
6	0,464	0,175	812,397	0,455	0,170	1037,15	0,459	0,183	1167,370
7	0,459	0,178	1014,087	0,459	0,174	1090,613	0,428	0,182	1540,150
8	0,462	0,179	962,159	0,460	0,181	1103,970	0,460	0,181	1089,774
9	0,349	0,135	865,989	0,458	0,179	1080,000	0,457	0,191	1464,914
10	0,438	0,169	854,767	0,458	0,179	1080,000	0,458	0,184	1227,382
11	0,430	0,170	894,760	0,461	0,182	1112,532	0,459	0,189	1474,838
12	0,300	0,120	771,284	0,458	0,179	1080,000	0,452	0,190	1567,834
13	0,460	0,178	1007,747	0,457	0,177	1071,134	0,421	0,180	1558,642
14	0,465	0,186	1135,101	0,456	0,173	1047,149	0,457	0,188	1372,764
15	0,466	0,187	1108,110	0,458	0,179	1080,000	0,429	0,183	1538,204
16	0,459	0,180	1080,909	0,462	0,183	1124,592	0,425	0,181	1547,878
17	0,456	0,171	735,328	0,458	0,180	1102,157	0,405	0,175	1600,000
18	0,443	0,212	1071,894	0,458	0,180	1113,301	0,418	0,179	1590,206
19	0,233	0,096	763,860	0,458	0,179	1080,000	0,405	0,175	1600,000
20	0,311	0,130	997,007	0,458	0,183	1196,658	0,419	0,179	1564,874
21	0,411	0,166	1114,487	0,458	0,179	1080,000	0,405	0,175	1600,000
22	0,459	0,192	1582,537	0,458	0,179	1080,000	-	-	-
23	0,463	0,188	1128,192	0,459	0,187	1309,246	-	-	-
24	0,462	0,187	1100,922	0,458	0,185	1254,007	-	-	-
25	0,467	0,185	962,020	0,459	0,189	1361,763	-	-	-
26	0,433	0,178	1137,172	0,458	0,185	1258,299	-	-	-
27	0,362	0,151	1150,194	0,459	0,186	1366,579	-	-	-
28	0,418	0,162	1080,714	0,458	0,18	1104,288	-	-	-
29	0,455	0,188	1214,283	0,46	0,177	968,680	-	-	-
30	0,430	0,183	1536,077	0,458	0,184	1293,228	-	-	-
31	0,458	0,188	1180,373	0,459	0,177	983,620	-	-	-
32	0,381	0,144	922,373	-	-	-	-	-	-
33	0,420	0,171	1129,746	-	-	-	-	-	-
34	0,438	0,167	1392,391	-	-	-	-	-	-
35	0,393	0,137	723,460	-	-	-	-	-	-
36	0,435	0,200	1177,543	-	-	-	-	-	-
37	0,452	0,185	1196,883	-	-	-	-	-	-
38	0,430	0,163	1189,591	-	-	-	-	-	-
39	0,443	0,174	1322,646	-	-	-	-	-	-

40	0,457	0,192	1399,596	-	-	-	-	-	-
41	0.442	0.172	1043.206	-	-	-	-	-	-
42	0.432	0.160	1025.320	-	-	-	-	-	-
43	0.432	0.160	1099.152	-	-	-	-	-	-

Apêndice C. Classes de uso e cobertura do solo nas bacias

Tabela C1 – Sub-bacias da BHRP-PO e a respectiva área ocupada pelos diferentes usos e coberturas do solo

Sub-bacia	Solo exposto (%)	Pastagem (%)	Floresta plantada (%)	Floresta nativa (%)	Cultura anual (%)	Campo nativo (%)
1	12.25	7.51	6.42	15.62	14.01	44.18
2	8.58	13.76	4.34	13.73	10.84	48.75
3	13.63	9.70	6.24	14.45	11.05	44.93
4	15.44	4.83	7.21	15.88	11.37	45.28
5	5.04	15.87	4.91	17.32	4.96	51.90
6	2.69	11.88	8.62	23.18	4.14	49.49
7	10.67	8.83	6.91	16.19	9.78	47.62
8	12.08	7.39	4.33	13.40	13.18	49.63
9	3.04	29.12	3.04	7.94	2.94	53.91
10	5.34	27.19	3.09	12.79	4.22	47.37
11	6.87	20.87	6.78	12.21	7.64	45.62
12	2.78	22.46	2.92	9.59	4.24	58.01
13	11.61	12.44	4.81	12.78	11.73	46.63
14	4.75	19.60	6.39	17.15	4.41	47.70
15	7.66	9.26	6.31	19.14	6.97	50.66
16	9.59	10.83	4.66	15.95	8.31	50.66
17	6.47	21.56	4.63	17.12	4.64	45.58
18	7.01	17.73	3.59	13.32	9.96	48.38
19	2.84	21.49	4.94	10.37	4.85	55.51
20	2.86	27.64	3.13	7.28	2.61	56.48
21	2.27	18.04	3.29	8.92	2.68	64.79
22	5.38	17.22	2.64	8.01	5.43	61.33
23	5.53	17.56	5.30	15.34	4.99	51.29
24	4.43	19.28	4.92	17.75	4.31	49.32
25	2.84	18.22	4.01	14.96	3.49	56.49
26	2.57	21.72	4.80	17.39	3.03	50.49
27	1.05	22.32	3.96	6.72	2.40	63.56
28	1.87	37.26	1.53	3.80	3.19	52.35
29	6.04	34.71	2.02	10.51	8.83	37.89
30	19.61	37.78	0.32	1.61	11.58	29.10
31	2.30	34.78	3.34	12.29	3.60	43.69
32	3.23	24.87	3.44	6.23	5.58	56.66
33	1.27	13.64	5.70	13.58	3.00	62.81
34	1.92	23.23	5.01	11.00	2.02	56.82
35	1.05	32.47	3.20	7.52	3.23	52.52
36	13.69	32.62	3.41	17.36	8.41	24.51
37	7.33	39.39	1.23	3.54	6.00	42.51
38	0.79	18.40	6.76	19.17	1.51	53.36

39	2.87	14.53	6.56	21.30	4.85	49.89
40	1.24	36.96	1.75	8.75	3.63	47.68
41	3.85	32.77	2.71	8.44	6.15	46.08
42	2.09	31.50	4.26	9.11	2.99	50.05
43	4.41	24.79	5.28	15.23	3.73	46.55

Tabela C2 – Sub-bacias da BHAP-PCF e a respectiva área ocupada pelos diferentes usos e coberturas do solo

Sub-bacia	Solo exposto (%)	Pastagem (%)	Floresta plantada (%)	Floresta nativa (%)	Cultura anual (%)	Campo nativo (%)
1	23.94	5.67	5.15	9.72	16.69	38.84
2	27.31	3.21	3.85	7.96	17.15	40.53
3	13.19	4.37	6.88	19.69	13.82	42.06
4	22.78	6.65	4.63	9.72	16.70	39.51
5	18.48	3.10	5.28	15.23	15.73	42.18
6	13.01	4.53	9.31	20.27	12.68	40.21
7	18.56	7.33	6.10	12.42	15.36	40.23
8	16.21	6.10	6.63	15.14	14.36	41.56
9	22.28	5.52	3.34	8.68	17.64	42.54
10	11.86	3.41	7.43	22.64	10.78	43.88
11	16.42	7.52	3.38	10.53	14.25	47.90
12	11.69	9.80	7.22	17.97	7.74	45.57
13	12.28	5.76	4.67	16.54	12.64	48.11
14	6.53	4.78	9.44	24.34	9.61	45.31
15	9.81	7.19	4.87	14.49	10.39	53.25
16	10.30	9.71	5.42	12.84	10.35	51.38
17	7.44	8.00	5.39	18.37	12.43	48.36
18	7.33	7.70	6.06	22.54	8.98	47.40
19	6.48	5.17	6.39	23.83	11.38	46.76
20	21.24	6.87	1.81	9.33	15.41	45.34
21	5.09	4.40	4.40	23.15	7.18	55.79
22	7.32	7.89	6.19	21.74	9.50	47.36
23	8.57	8.63	7.26	17.70	10.17	47.67
24	6.88	3.80	7.32	23.29	10.11	48.60
25	17.23	4.66	6.62	23.03	11.87	36.58
26	7.68	6.98	5.77	25.62	6.51	47.44
27	9.42	11.09	7.10	17.19	8.38	46.82
28	9.51	9.37	8.05	22.10	9.68	41.29
29	6.32	8.35	7.42	18.22	7.33	52.36
30	8.01	11.01	5.42	15.23	8.31	52.01
31	5.12	5.88	10.27	26.15	6.33	46.25

Tabela C3 – Sub-bacias da BHAF-PC e a respectiva área ocupada pelos diferentes usos e coberturas do solo

Sub-bacia	Solo exposto (%)	Pastagem (%)	Floresta plantada (%)	Floresta nativa (%)	Cultura anual (%)	Campo nativo (%)
1	2,96	10,80	4,69	22,01	4,40	55,14
2	12,23	6,79	3,09	9,12	16,51	52,26
3	8,12	20,33	4,48	16,94	5,46	44,68
4	9,03	9,48	9,37	22,12	7,36	42,64
5	10,01	9,01	7,39	20,87	8,69	44,04
6	5,60	11,48	7,44	16,00	8,86	50,62
7	5,41	26,36	1,52	13,45	11,13	42,14
8	6,06	11,87	7,64	18,70	5,02	50,72
9	1,62	25,81	15,13	8,65	2,84	45,95
10	12,83	13,20	4,57	11,64	10,55	47,21
11	8,83	26,49	2,61	10,96	7,72	43,39
12	10,08	22,61	3,56	7,62	10,39	45,74
13	2,46	20,55	34,50	9,48	4,20	28,81
14	9,19	21,60	6,02	11,33	6,56	45,31
15	7,52	27,42	2,45	3,98	6,34	52,31
16	6,79	19,32	1,73	8,54	10,13	53,50
17	18,04	44,32	3,27	0,93	10,89	22,55
18	12,33	25,89	2,04	6,16	8,93	44,66
19	9,99	35,26	3,66	8,48	10,34	32,27
20	8,85	12,03	2,55	12,78	9,90	53,87
21	12,95	32,39	2,21	1,58	9,32	41,55

Apêndice D. Análise de tendência de séries de precipitação total anual e temperatura média diária oriundas dos MCG's regionalizados pelo MCR ETA para a área de estudo

Tabela D1 – Resultados do teste de Mann-Kendall para a variável precipitação total anual oriunda do modelo climático ETA-BESM

Ponto	Clima presente		RCP 4.5								RCP 8.5							
	1961 - 2005		2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099		2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099	
	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor
1	1,59	0,111	1,68	0,094	0,36	0,721	-0,36	0,722	0,93	0,350	2,39	0,017	0,00	1,000	-2,49	0,013	-1,35	0,178
2	1,61	0,107	1,68	0,094	0,07	0,943	-0,02	0,985	1,03	0,302	2,27	0,023	0,04	0,972	-2,08	0,037	-1,35	0,178
3	1,63	0,102	1,25	0,211	0,67	0,498	0,13	0,896	1,00	0,318	2,39	0,017	0,25	0,803	-2,27	0,023	-1,57	0,115
4	1,56	0,120	0,91	0,363	0,50	0,617	0,02	0,985	0,66	0,509	2,27	0,023	0,60	0,544	-2,38	0,017	-1,91	0,056
5	1,30	0,193	0,71	0,478	0,43	0,669	0,13	0,896	0,60	0,548	2,36	0,018	1,03	0,301	-2,76	0,006	-2,39	0,017
6	1,28	0,200	0,31	0,755	0,25	0,803	-0,43	0,666	0,14	0,886	2,33	0,020	0,82	0,412	-3,06	0,002	-3,00	0,003
7	1,22	0,221	0,45	0,650	0,28	0,775	-0,13	0,896	0,08	0,938	2,36	0,018	0,67	0,498	-2,95	0,003	-3,02	0,002
8	1,42	0,156	1,82	0,069	0,00	1,000	0,02	1,000	0,99	0,321	2,44	0,015	-0,11	0,915	-3,13	0,002	-0,93	0,350
9	1,77	0,077	2,05	0,041	0,00	1,000	-0,09	0,925	0,86	0,389	2,50	0,012	-0,46	0,643	-2,87	0,004	-1,06	0,290
10	1,59	0,111	1,48	0,140	0,11	0,915	-0,13	0,896	0,65	0,514	2,56	0,011	0,25	0,803	-2,19	0,028	-0,96	0,337
11	1,57	0,115	0,97	0,334	0,11	0,915	-0,17	0,866	0,56	0,574	2,39	0,017	0,53	0,592	-2,04	0,041	-1,36	0,174
12	1,52	0,129	0,88	0,379	0,18	0,858	0,06	0,955	0,53	0,597	2,53	0,011	0,89	0,372	-2,61	0,009	-1,70	0,088
13	1,16	0,244	1,14	0,256	0,36	0,721	0,13	0,896	0,69	0,493	2,53	0,011	1,38	0,164	-3,10	0,002	-1,86	0,063
14	1,18	0,237	1,31	0,191	0,36	0,721	0,28	0,778	0,43	0,666	2,61	0,009	1,21	0,225	-3,25	0,001	-2,54	0,011
15	1,61	0,107	2,41	0,016	-0,36	0,721	-0,39	0,694	0,86	0,392	2,22	0,027	-0,50	0,617	-3,21	0,001	-1,11	0,267
16	1,54	0,125	2,39	0,017	-0,32	0,748	-0,28	0,778	0,91	0,360	2,33	0,020	-0,25	0,803	-3,17	0,002	-1,03	0,302
17	1,50	0,134	1,99	0,047	-0,21	0,830	-0,24	0,807	0,95	0,344	2,84	0,005	-0,11	0,915	-2,61	0,009	-0,85	0,396
18	1,40	0,162	1,70	0,088	0,11	0,915	-0,24	0,807	0,71	0,480	2,64	0,008	0,85	0,392	-2,31	0,021	-1,06	0,290
19	1,40	0,162	1,08	0,280	0,00	1,000	-0,32	0,750	0,37	0,710	2,61	0,009	0,64	0,521	-2,64	0,008	-1,46	0,145
20	1,22	0,221	0,91	0,363	0,25	0,803	-0,09	0,925	0,36	0,719	2,61	0,009	0,92	0,354	-2,76	0,006	-1,74	0,082

21	1,40	0,162	1,19	0,233	0,04	0,972	0,06	0,955	0,25	0,804	2,47	0,013	0,89	0,372	-3,17	0,002	-2,08	0,038
22	1,65	0,098	2,56	0,011	-0,11	0,915	-0,51	0,613	0,88	0,378	2,50	0,012	-0,21	0,830	-3,58	0,000	-1,12	0,261
23	1,77	0,077	1,90	0,057	-0,18	0,858	-0,24	0,807	0,54	0,588	1,99	0,047	-0,53	0,592	-3,28	0,001	-0,78	0,433
24	1,46	0,145	1,79	0,074	-0,43	0,669	-0,43	0,666	0,78	0,433	2,64	0,008	-0,04	0,972	-2,83	0,005	-0,61	0,539
25	1,50	0,134	1,45	0,147	-0,18	0,858	-0,69	0,488	0,66	0,509	2,78	0,005	0,11	0,915	-2,87	0,004	-0,93	0,350
26	1,48	0,140	1,25	0,211	0,00	1,000	-0,47	0,639	0,54	0,588	2,44	0,015	0,28	0,775	-2,91	0,004	-1,28	0,200
27	1,30	0,193	0,68	0,495	0,04	0,972	-0,13	0,896	0,37	0,714	2,50	0,012	0,78	0,432	-3,02	0,003	-1,27	0,205
28	1,09	0,278	0,68	0,495	0,18	0,858	0,02	1,000	0,42	0,671	2,56	0,011	0,50	0,617	-2,98	0,003	-1,65	0,098
29	1,73	0,083	1,73	0,083	-0,39	0,695	-1,18	0,237	0,27	0,784	2,39	0,017	-0,18	0,858	-3,81	0,000	-1,19	0,234
30	1,54	0,125	1,56	0,118	-0,25	0,803	-0,92	0,358	0,33	0,739	2,39	0,017	-0,11	0,915	-3,66	0,000	-1,21	0,227
31	1,16	0,244	1,36	0,173	-0,14	0,887	-0,77	0,442	0,33	0,744	2,07	0,038	0,11	0,915	-3,13	0,002	-0,21	0,834
32	1,42	0,156	1,05	0,293	0,04	0,972	-0,62	0,536	0,53	0,597	2,64	0,008	0,18	0,858	-3,25	0,001	-1,08	0,281
33	1,30	0,193	0,85	0,394	0,00	1,000	-0,51	0,613	0,54	0,588	2,70	0,007	0,07	0,943	-3,02	0,003	-1,29	0,196
34	1,14	0,252	0,40	0,691	0,00	1,000	-0,36	0,722	0,35	0,724	2,64	0,008	-0,39	0,695	-3,02	0,003	-1,27	0,205
35	1,11	0,269	0,31	0,755	0,21	0,830	-0,36	0,722	0,39	0,695	2,73	0,006	0,43	0,669	-3,17	0,002	-1,80	0,071
36	1,36	0,174	1,08	0,280	-0,11	0,915	-1,14	0,253	0,05	0,964	2,81	0,005	0,00	1,000	-3,58	0,000	-1,39	0,164
37	1,24	0,214	0,94	0,349	0,11	0,915	-1,07	0,285	-0,03	0,979	2,78	0,005	0,00	1,000	-3,62	0,000	-1,51	0,131
38	1,11	0,269	0,94	0,349	0,00	1,000	-0,84	0,399	0,20	0,845	2,61	0,009	-0,18	0,858	-3,51	0,000	-1,69	0,091
39	1,07	0,286	0,48	0,629	0,14	0,887	-0,54	0,586	0,34	0,734	2,64	0,008	-0,53	0,592	-3,43	0,001	-1,61	0,107
40	1,05	0,295	0,57	0,570	0,04	0,972	-0,73	0,464	0,52	0,606	2,73	0,006	-0,57	0,568	-3,10	0,002	-1,77	0,077
41	0,77	0,440	0,40	0,691	-0,04	0,972	-0,47	0,639	0,50	0,615	2,76	0,006	-0,60	0,544	-3,06	0,002	-1,84	0,066
42	0,83	0,406	0,23	0,820	-0,14	0,887	-0,43	0,666	0,42	0,676	2,56	0,011	-0,25	0,803	-3,02	0,003	-2,09	0,037

Tabela D2 – Resultados do teste de Mann-Kendall para a variável precipitação total anual oriunda do modelo climático ETA-CANESM2

Ponto	Clima presente		RCP 4.5								RCP 8.5							
	1961 - 2005		2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099		2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099	
	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor
1	0,30	0,762	0,09	0,932	1,53	0,125	-1,11	0,268	0,04	0,969	-0,77	0,443	-0,78	0,432	-1,41	0,159	-3,20	0,001
2	0,11	0,914	0,00	1,000	1,74	0,080	-0,99	0,320	0,18	0,860	-0,57	0,570	-0,14	0,887	-1,63	0,103	-2,84	0,004
3	0,09	0,930	0,14	0,887	1,49	0,134	-0,84	0,399	0,10	0,922	-0,60	0,551	-0,07	0,943	-1,89	0,058	-2,95	0,003
4	0,01	1,000	0,00	1,000	1,35	0,175	-0,66	0,511	0,24	0,809	-0,54	0,589	-0,14	0,887	-2,01	0,045	-2,99	0,003
5	0,67	0,500	0,68	0,495	1,60	0,108	-0,24	0,807	0,81	0,418	-0,06	0,955	0,14	0,887	-1,97	0,049	-2,90	0,004
6	0,83	0,406	0,80	0,426	1,14	0,254	-0,51	0,613	0,41	0,685	-0,37	0,712	0,21	0,830	-1,82	0,069	-3,17	0,001
7	0,34	0,732	0,43	0,670	1,17	0,239	-0,47	0,639	0,14	0,891	-0,26	0,798	0,39	0,695	-1,82	0,069	-3,07	0,002
8	0,09	0,930	-0,34	0,733	1,88	0,059	-0,96	0,339	-0,05	0,964	-0,51	0,609	-0,50	0,617	-1,78	0,075	-3,14	0,002
9	-0,36	0,717	-0,40	0,691	1,63	0,101	-0,77	0,442	-0,08	0,938	-0,62	0,532	-0,39	0,695	-1,97	0,049	-2,92	0,003
10	0,07	0,945	0,11	0,910	1,74	0,080	-0,73	0,464	0,48	0,633	-0,68	0,495	0,04	0,972	-1,63	0,103	-2,41	0,016
11	0,19	0,853	0,28	0,776	1,49	0,134	-0,36	0,722	0,52	0,606	-0,51	0,609	-0,07	0,943	-2,19	0,028	-2,69	0,007
12	0,36	0,717	0,54	0,589	1,35	0,175	-0,47	0,639	0,80	0,425	-0,65	0,514	0,21	0,830	-2,16	0,031	-2,79	0,005
13	0,56	0,577	0,80	0,426	1,03	0,301	0,06	0,955	1,01	0,311	-0,31	0,755	0,36	0,721	-2,16	0,031	-2,52	0,012
14	0,50	0,618	0,91	0,363	1,07	0,284	-0,32	0,750	0,76	0,449	-0,14	0,887	0,46	0,643	-2,49	0,013	-2,99	0,003
15	0,26	0,792	-0,40	0,691	2,17	0,030	-0,51	0,613	0,14	0,886	-0,80	0,426	-0,43	0,669	-2,31	0,021	-3,41	0,001
16	-0,13	0,899	-0,31	0,755	2,02	0,042	-0,66	0,511	0,35	0,729	-0,62	0,532	-0,46	0,643	-2,34	0,019	-3,23	0,001
17	0,34	0,732	-0,14	0,887	2,10	0,035	-0,77	0,442	0,50	0,620	-0,60	0,551	-0,04	0,972	-2,19	0,028	-2,89	0,004
18	0,66	0,512	0,20	0,842	1,74	0,080	-0,81	0,420	0,46	0,647	-0,40	0,691	0,39	0,695	-2,31	0,021	-2,39	0,017
19	0,17	0,868	0,23	0,820	1,53	0,125	-0,28	0,778	0,90	0,367	-0,48	0,629	0,43	0,669	-2,19	0,028	-2,67	0,008
20	0,22	0,822	0,48	0,629	1,42	0,153	-0,17	0,866	1,06	0,290	-0,62	0,532	0,39	0,695	-2,38	0,017	-2,85	0,004
21	0,81	0,417	0,34	0,733	1,14	0,254	0,02	0,985	1,20	0,232	-0,51	0,609	0,60	0,544	-2,42	0,016	-2,68	0,007
22	0,56	0,577	0,34	0,733	1,81	0,069	-0,47	0,639	0,50	0,615	-0,85	0,394	-0,53	0,592	-2,79	0,005	-3,62	0,000
23	0,52	0,604	0,03	0,977	2,02	0,042	-0,43	0,666	0,20	0,845	-0,80	0,426	-0,25	0,803	-2,95	0,003	-3,40	0,001
24	0,38	0,703	-0,03	0,977	2,13	0,032	-0,51	0,613	0,57	0,565	-0,74	0,460	0,00	1,000	-2,34	0,019	-3,21	0,001

25	0,22	0,822	0,34	0,733	1,95	0,050	0,02	0,985	0,93	0,354	-0,37	0,712	0,00	1,000	-2,46	0,014	-3,06	0,002
26	-0,17	0,868	0,40	0,691	1,85	0,064	0,09	0,925	1,02	0,308	-0,20	0,842	0,11	0,915	-2,46	0,014	-2,89	0,004
27	-0,22	0,822	0,26	0,798	1,67	0,094	0,09	0,925	0,74	0,456	-0,65	0,514	0,21	0,830	-2,34	0,019	-2,95	0,003
28	0,15	0,883	0,43	0,670	1,42	0,153	-0,13	0,896	1,10	0,270	-0,37	0,712	0,36	0,721	-2,72	0,007	-2,49	0,013
29	0,44	0,660	0,77	0,443	1,17	0,239	-0,77	0,442	0,24	0,809	-0,88	0,379	-0,36	0,721	-3,10	0,002	-3,97	0,000
30	-0,07	0,945	0,51	0,609	1,38	0,164	-0,62	0,536	0,24	0,814	-0,91	0,363	-0,67	0,498	-3,21	0,001	-4,02	0,000
31	0,13	0,899	0,31	0,755	1,63	0,101	-0,73	0,464	0,62	0,535	-0,88	0,379	-0,28	0,775	-2,38	0,017	-3,14	0,002
32	0,01	0,992	0,31	0,755	1,56	0,116	-0,17	0,866	0,59	0,552	-0,45	0,650	-0,43	0,669	-2,87	0,004	-3,48	0,000
33	0,42	0,674	0,65	0,514	1,92	0,054	0,21	0,837	0,97	0,330	-0,28	0,776	-0,25	0,803	-2,79	0,005	-3,44	0,001
34	0,62	0,538	0,71	0,478	1,78	0,074	0,28	0,778	0,97	0,330	-0,43	0,670	-0,25	0,803	-2,91	0,004	-3,47	0,001
35	0,17	0,868	0,91	0,363	1,78	0,074	-0,47	0,639	1,48	0,140	-0,20	0,842	-0,36	0,721	-2,79	0,005	-3,12	0,002
36	0,11	0,914	0,77	0,443	0,82	0,412	-1,14	0,253	0,19	0,850	-0,94	0,349	-0,53	0,592	-3,02	0,003	-3,96	0,000
37	-0,17	0,868	0,60	0,551	1,03	0,301	-0,84	0,399	0,26	0,794	-0,85	0,394	-0,67	0,498	-3,25	0,001	-4,23	0,000
38	-0,28	0,777	0,71	0,478	1,10	0,269	-1,03	0,302	0,29	0,774	-0,65	0,514	-0,78	0,432	-3,25	0,001	-4,14	0,000
39	-0,32	0,747	0,65	0,514	1,03	0,301	-0,77	0,442	0,51	0,610	-0,74	0,460	-0,64	0,521	-2,91	0,004	-3,92	0,000
40	0,30	0,762	0,85	0,394	1,46	0,143	-0,39	0,694	0,87	0,385	-0,40	0,691	-0,71	0,475	-3,21	0,001	-3,95	0,000
41	0,52	0,604	1,19	0,233	1,56	0,116	-0,09	0,925	1,27	0,205	-0,40	0,691	-0,53	0,592	-3,02	0,003	-3,93	0,000
42	0,60	0,551	1,56	0,118	1,21	0,225	-0,39	0,694	1,48	0,140	-0,34	0,733	-0,43	0,669	-2,83	0,005	-3,77	0,000

Tabela D3 – Resultados do teste de Mann-Kendall para a variável precipitação total anual oriunda do modelo climático ETA-HADGEM2-ES

Ponto	Clima presente				RCP 4.5				RCP 8.5									
	1961 - 2005		2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099		2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099	
	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor
1	-0,03	0,977	0,20	0,842	-0,50	0,617	-0,06	0,955	1,57	0,115	0,77	0,443	-1,85	0,064	1,89	0,058	3,51	0,000
2	-0,13	0,899	0,26	0,798	-0,14	0,887	-0,06	0,955	1,99	0,047	0,85	0,394	-1,28	0,199	2,27	0,023	3,95	0,000
3	-0,15	0,883	0,11	0,910	0,28	0,775	0,17	0,866	2,49	0,013	0,97	0,334	-0,99	0,318	1,82	0,069	3,83	0,000
4	-0,15	0,883	-0,06	0,955	0,00	1,000	-0,02	0,985	2,27	0,023	1,19	0,233	-0,78	0,432	1,82	0,069	3,74	0,000
5	0,22	0,822	-0,14	0,887	0,07	0,943	-0,32	0,750	2,53	0,011	1,48	0,140	-0,89	0,372	1,93	0,053	3,81	0,000
6	0,62	0,538	-0,23	0,820	-0,11	0,915	-0,21	0,837	2,02	0,044	1,39	0,164	-0,99	0,318	1,63	0,103	3,17	0,002
7	0,22	0,822	-0,26	0,798	-0,28	0,775	-0,32	0,750	2,12	0,034	1,11	0,268	-1,03	0,301	1,67	0,095	2,99	0,003
8	-0,19	0,853	0,51	0,609	-0,85	0,392	-0,21	0,837	1,34	0,181	1,05	0,293	-1,85	0,064	2,08	0,037	3,65	0,000
9	-0,42	0,674	0,54	0,589	-0,78	0,432	-0,21	0,837	1,35	0,178	0,99	0,320	-1,31	0,187	2,08	0,037	3,33	0,001
10	-0,21	0,837	0,37	0,712	-0,04	0,972	-0,13	0,896	1,82	0,068	1,48	0,140	-1,07	0,284	2,46	0,014	4,17	0,000
11	-0,19	0,853	0,23	0,820	0,11	0,915	0,02	1,000	1,99	0,047	1,19	0,233	-0,89	0,372	1,93	0,053	3,80	0,000
12	-0,01	0,992	0,23	0,820	0,00	1,000	-0,36	0,722	1,95	0,051	1,42	0,156	-0,92	0,354	2,08	0,037	3,74	0,000
13	0,19	0,853	-0,23	0,820	-0,07	0,943	-0,54	0,586	1,83	0,067	1,25	0,211	-0,92	0,354	1,97	0,049	3,44	0,001
14	0,32	0,747	-0,28	0,776	-0,32	0,748	-0,32	0,750	2,44	0,015	1,33	0,182	-0,50	0,617	1,89	0,058	3,87	0,000
15	-0,05	0,961	0,26	0,798	-1,14	0,254	-0,32	0,750	1,01	0,311	1,51	0,132	-0,67	0,498	2,01	0,045	3,78	0,000
16	-0,21	0,837	0,71	0,478	-0,99	0,318	-0,69	0,488	1,16	0,245	1,56	0,118	-0,92	0,354	2,12	0,034	3,97	0,000
17	-0,19	0,853	0,65	0,514	-0,67	0,498	-0,62	0,536	1,41	0,158	1,39	0,164	-0,67	0,498	2,04	0,041	4,19	0,000
18	-0,05	0,961	0,17	0,865	-0,25	0,803	0,06	0,955	1,61	0,107	1,42	0,156	-0,43	0,669	2,16	0,031	4,53	0,000
19	-0,11	0,914	0,31	0,755	-0,39	0,695	-0,58	0,561	1,58	0,114	1,45	0,147	-0,36	0,721	2,08	0,037	3,96	0,000
20	0,17	0,868	0,20	0,842	-0,36	0,721	-0,96	0,339	1,65	0,100	1,39	0,164	-0,67	0,498	1,86	0,063	3,75	0,000
21	0,46	0,646	-0,03	0,977	-0,53	0,592	-0,62	0,536	1,76	0,078	1,62	0,105	-0,32	0,748	1,29	0,196	3,96	0,000
22	0,11	0,914	0,26	0,798	-1,31	0,187	-0,13	0,896	1,01	0,314	1,76	0,078	-0,75	0,454	1,82	0,069	4,19	0,000
23	-0,09	0,930	0,43	0,670	-0,96	0,335	-0,24	0,807	0,89	0,371	1,56	0,118	-0,75	0,454	1,86	0,063	3,63	0,000
24	-0,17	0,868	0,68	0,495	-0,96	0,335	-0,69	0,488	1,20	0,232	1,73	0,083	-0,46	0,643	1,78	0,075	4,20	0,000

25	-0,11	0,914	0,60	0,551	-0,96	0,335	-0,58	0,561	1,27	0,203	1,65	0,099	-0,64	0,521	1,67	0,095	4,42	0,000
26	-0,21	0,837	0,68	0,495	-1,17	0,239	-0,58	0,561	1,29	0,196	1,68	0,094	-0,64	0,521	1,63	0,103	4,04	0,000
27	-0,13	0,899	0,26	0,798	-1,35	0,175	-0,84	0,399	0,98	0,327	1,59	0,112	-0,53	0,592	1,41	0,159	3,60	0,000
28	-0,03	0,977	0,11	0,910	-1,46	0,143	-0,81	0,420	1,18	0,237	1,33	0,182	-0,32	0,748	1,78	0,075	3,81	0,000
29	0,07	0,945	0,31	0,755	-1,28	0,199	-0,51	0,613	0,85	0,396	1,96	0,050	-1,21	0,225	1,59	0,111	4,06	0,000
30	-0,21	0,837	0,14	0,887	-1,14	0,254	-0,39	0,694	0,83	0,407	1,87	0,061	-0,89	0,372	1,44	0,149	4,09	0,000
31	-0,05	0,961	0,88	0,379	-1,21	0,225	-0,88	0,378	0,78	0,433	2,02	0,044	-0,14	0,887	1,26	0,209	4,34	0,000
32	-0,21	0,837	0,62	0,532	-1,63	0,101	-0,62	0,536	0,95	0,340	1,82	0,069	-1,03	0,301	1,33	0,183	4,17	0,000
33	0,44	0,660	0,20	0,842	-1,60	0,108	-0,58	0,561	0,93	0,350	1,87	0,061	-0,99	0,318	0,92	0,358	4,00	0,000
34	0,58	0,564	0,17	0,865	-1,60	0,108	-0,81	0,420	0,89	0,371	1,70	0,088	-0,57	0,568	0,81	0,420	3,65	0,000
35	0,01	0,992	0,28	0,776	-1,85	0,064	-0,39	0,694	1,05	0,293	1,42	0,156	-0,43	0,669	1,18	0,237	3,80	0,000
36	0,03	0,977	0,14	0,887	-1,46	0,143	-0,02	0,985	1,12	0,264	2,13	0,033	-1,28	0,199	1,18	0,237	4,33	0,000
37	-0,15	0,883	0,11	0,910	-1,56	0,116	-0,17	0,866	1,03	0,302	2,02	0,044	-1,14	0,254	1,03	0,302	4,19	0,000
38	-0,17	0,868	0,31	0,755	-1,81	0,069	0,06	0,955	1,24	0,215	1,99	0,047	-1,46	0,143	1,07	0,285	4,31	0,000
39	-0,36	0,717	0,23	0,820	-2,06	0,038	-0,21	0,837	1,06	0,290	1,56	0,118	-0,89	0,372	1,03	0,302	4,19	0,000
40	0,05	0,961	0,03	0,977	-1,67	0,094	-0,73	0,464	1,15	0,250	1,73	0,083	-0,99	0,318	0,84	0,399	4,44	0,000
41	0,32	0,747	0,00	1,000	-2,02	0,042	-0,43	0,666	1,08	0,278	1,53	0,125	-0,89	0,372	0,66	0,511	3,97	0,000
42	0,44	0,660	-0,09	0,932	-1,85	0,064	-0,47	0,639	1,12	0,261	1,45	0,147	-0,85	0,392	0,88	0,378	3,84	0,000

Tabela D4 – Resultados do teste de Mann-Kendall para a variável precipitação total anual oriunda do modelo climático ETA-MIROC5

Ponto	Clima presente				RCP 4,5				RCP 8,5									
	1961 - 2005		2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099		2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099	
	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor
1	0,11	0,914	-0,60	0,551	0,89	0,372	0,32	0,750	0,08	0,938	0,20	0,842	1,28	0,199	2,23	0,026	2,24	0,025
2	0,05	0,961	-0,85	0,394	0,92	0,354	0,24	0,807	0,12	0,901	0,31	0,755	1,28	0,199	2,12	0,034	2,33	0,020
3	0,11	0,914	-0,94	0,349	0,96	0,335	0,36	0,722	0,14	0,886	0,20	0,842	1,49	0,134	1,97	0,049	2,42	0,016
4	-0,01	0,992	-1,02	0,307	0,78	0,432	0,21	0,837	0,24	0,814	0,20	0,842	1,35	0,175	1,97	0,049	2,36	0,018
5	-0,42	0,674	-0,60	0,551	0,36	0,721	0,13	0,896	0,47	0,638	0,48	0,629	1,31	0,187	1,97	0,049	2,72	0,006
6	-0,38	0,703	-0,37	0,712	0,21	0,830	0,21	0,837	0,63	0,531	0,68	0,495	1,35	0,175	2,08	0,037	2,68	0,007
7	-0,54	0,591	-0,68	0,495	0,00	1,000	0,24	0,807	0,37	0,710	0,34	0,733	1,49	0,134	1,93	0,053	2,65	0,008
8	0,28	0,777	-0,26	0,798	1,17	0,239	0,54	0,586	0,45	0,652	0,28	0,776	1,24	0,212	1,97	0,049	2,42	0,016
9	0,28	0,777	-0,80	0,426	1,07	0,284	0,51	0,613	0,11	0,912	0,00	1,000	1,35	0,175	2,16	0,031	2,10	0,036
10	0,03	0,977	-0,65	0,514	0,96	0,335	0,21	0,837	0,37	0,714	0,06	0,955	1,74	0,080	1,74	0,081	2,44	0,015
11	0,01	0,992	-0,82	0,410	0,75	0,454	0,43	0,666	0,50	0,620	0,28	0,776	1,60	0,108	1,89	0,058	2,46	0,014
12	-0,40	0,688	-0,60	0,551	0,71	0,475	0,13	0,896	0,76	0,445	0,62	0,532	1,56	0,116	1,82	0,069	2,74	0,006
13	-0,24	0,807	-0,85	0,394	0,21	0,830	0,02	1,000	0,61	0,539	0,68	0,495	1,21	0,225	1,93	0,053	2,65	0,008
14	-0,67	0,500	-0,62	0,532	0,18	0,858	0,02	0,985	0,65	0,514	0,80	0,426	1,53	0,125	2,12	0,034	2,98	0,003
15	0,24	0,807	-0,17	0,865	1,10	0,269	0,84	0,399	0,50	0,615	0,57	0,570	1,74	0,080	1,56	0,119	2,48	0,013
16	0,21	0,837	-0,54	0,589	1,17	0,239	0,69	0,488	0,44	0,662	0,51	0,609	1,49	0,134	1,41	0,159	2,47	0,014
17	0,05	0,961	-0,60	0,551	0,92	0,354	0,66	0,511	0,35	0,729	0,51	0,609	1,46	0,143	1,59	0,111	2,68	0,007
18	-0,01	0,992	-0,14	0,887	0,85	0,392	0,06	0,955	0,78	0,433	0,68	0,495	1,56	0,116	1,37	0,171	2,78	0,005
19	-0,32	0,747	-0,20	0,842	0,75	0,454	0,39	0,694	1,00	0,318	0,68	0,495	1,46	0,143	1,78	0,075	2,68	0,007
20	-0,38	0,703	-0,40	0,691	0,28	0,775	0,17	0,866	1,01	0,311	0,60	0,551	1,63	0,101	1,89	0,058	2,89	0,004
21	-0,17	0,868	-0,88	0,379	0,43	0,669	-0,09	0,925	0,95	0,340	0,85	0,394	1,56	0,116	2,08	0,037	3,03	0,002
22	0,24	0,807	-0,37	0,712	0,89	0,372	1,03	0,302	0,71	0,476	1,08	0,280	1,67	0,094	1,33	0,183	2,75	0,006
23	0,22	0,822	-0,62	0,532	1,14	0,254	0,58	0,561	0,39	0,695	0,91	0,363	1,46	0,143	1,44	0,149	2,50	0,013
24	0,17	0,868	-0,68	0,495	1,03	0,301	0,69	0,488	0,46	0,647	0,91	0,363	1,53	0,125	1,71	0,088	2,78	0,005

25	-0,07	0,945	-0,65	0,514	0,71	0,475	0,43	0,666	0,58	0,561	0,97	0,334	1,60	0,108	1,59	0,111	3,00	0,003
26	-0,07	0,945	-0,65	0,514	0,82	0,412	0,51	0,613	0,74	0,458	0,82	0,410	1,49	0,134	1,26	0,209	2,79	0,005
27	-0,11	0,914	-0,40	0,691	0,78	0,432	0,36	0,722	0,95	0,340	0,71	0,478	1,85	0,064	1,67	0,095	2,98	0,003
28	-0,22	0,822	-0,88	0,379	0,57	0,568	0,06	0,955	0,88	0,381	0,85	0,394	1,49	0,134	1,78	0,075	2,94	0,003
29	0,07	0,945	-0,48	0,629	1,14	0,254	0,81	0,420	0,66	0,509	1,33	0,182	1,35	0,175	1,22	0,223	2,76	0,006
30	0,01	1,000	-0,48	0,629	1,07	0,284	0,73	0,464	0,75	0,453	1,22	0,222	1,31	0,187	1,37	0,171	2,76	0,006
31	-0,07	0,945	-0,57	0,570	1,07	0,284	0,69	0,488	0,57	0,570	1,02	0,307	1,35	0,175	1,41	0,159	2,72	0,006
32	-0,11	0,914	-0,82	0,410	0,96	0,335	0,69	0,488	0,64	0,522	1,31	0,191	1,31	0,187	1,56	0,119	3,01	0,003
33	-0,32	0,747	-0,82	0,410	0,99	0,318	0,66	0,511	0,78	0,437	1,14	0,256	1,63	0,101	1,22	0,223	3,10	0,002
34	-0,13	0,899	-0,60	0,551	0,85	0,392	0,58	0,561	0,69	0,493	1,08	0,280	1,28	0,199	1,29	0,196	2,97	0,003
35	-0,05	0,961	-0,80	0,426	0,53	0,592	0,36	0,722	0,78	0,433	0,91	0,363	1,42	0,153	1,48	0,138	3,04	0,002
36	0,13	0,899	-0,60	0,551	1,31	0,187	0,81	0,420	0,68	0,497	1,36	0,173	1,49	0,134	1,33	0,183	2,67	0,008
37	0,01	0,992	-0,77	0,443	1,24	0,212	0,73	0,464	0,72	0,472	1,22	0,222	1,21	0,225	1,11	0,268	2,59	0,010
38	-0,03	0,977	-0,91	0,363	1,17	0,239	0,73	0,464	0,70	0,485	1,19	0,233	1,07	0,284	0,99	0,320	2,63	0,008
39	-0,15	0,883	-1,19	0,233	1,21	0,225	0,62	0,536	0,61	0,539	1,16	0,244	1,17	0,239	1,07	0,285	2,74	0,006
40	-0,34	0,732	-1,08	0,280	0,92	0,354	0,62	0,536	0,51	0,610	1,11	0,268	1,24	0,212	0,81	0,420	2,94	0,003
41	-0,34	0,732	-0,77	0,443	1,14	0,254	0,73	0,464	0,70	0,485	1,16	0,244	1,28	0,199	0,88	0,378	2,84	0,005
42	-0,15	0,883	-0,65	0,514	1,07	0,284	0,77	0,442	0,91	0,364	0,91	0,363	1,46	0,143	0,84	0,399	2,82	0,005

Tabela D5 – Resultados do teste de Mann-Kendall para a variável temperatura média diária anual oriunda do modelo climático ETA-BESM

Tabela D5 - Resultados do teste de Mann-Whitney para a variável temperatura média diária anual oriunda do modelo climático LFA-BESIM																		
Ponto	Clima presente		RCP 4.5						RCP 8.5									
			2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099		2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099	
	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor
1	0,66	0,51	1,93	0,05	2,45	0,01	0,28	0,78	5,90	0,00	2,73	0,01	3,41	0,00	3,02	0,00	10,73	0,00
2	0,75	0,45	2,02	0,04	2,38	0,02	0,24	0,81	5,96	0,00	2,84	0,00	3,41	0,00	3,06	0,00	10,77	0,00
3	0,71	0,48	2,33	0,02	2,45	0,01	0,21	0,84	6,08	0,00	2,95	0,00	3,41	0,00	2,91	0,00	10,85	0,00
4	0,87	0,38	2,47	0,01	2,45	0,01	0,32	0,75	6,15	0,00	3,07	0,00	3,30	0,00	2,98	0,00	10,94	0,00
5	1,11	0,27	2,67	0,01	2,59	0,01	0,21	0,84	6,21	0,00	3,15	0,00	3,69	0,00	3,06	0,00	11,11	0,00
6	1,11	0,27	2,76	0,01	2,73	0,01	0,36	0,72	6,26	0,00	3,32	0,00	3,73	0,00	3,02	0,00	11,15	0,00
7	1,11	0,27	2,90	0,00	2,91	0,00	0,36	0,72	6,21	0,00	3,38	0,00	3,87	0,00	3,06	0,00	11,22	0,00
8	0,71	0,48	2,05	0,04	2,52	0,01	0,47	0,64	5,85	0,00	2,87	0,00	3,80	0,00	3,10	0,00	10,81	0,00
9	0,71	0,48	2,02	0,04	2,41	0,02	0,39	0,69	5,85	0,00	2,84	0,00	3,66	0,00	3,06	0,00	10,78	0,00
10	0,60	0,55	2,19	0,03	2,49	0,01	0,43	0,67	5,94	0,00	2,90	0,00	3,41	0,00	3,02	0,00	10,79	0,00
11	0,83	0,41	2,44	0,01	2,45	0,01	0,39	0,69	6,02	0,00	2,93	0,00	3,48	0,00	3,10	0,00	10,97	0,00
12	0,95	0,34	2,50	0,01	2,56	0,01	0,36	0,72	6,08	0,00	3,01	0,00	3,52	0,00	3,10	0,00	11,03	0,00
13	1,11	0,27	2,67	0,01	2,66	0,01	0,47	0,64	6,17	0,00	3,10	0,00	3,69	0,00	3,10	0,00	11,12	0,00
14	1,20	0,23	2,76	0,01	2,95	0,00	0,54	0,59	6,25	0,00	3,35	0,00	3,94	0,00	3,06	0,00	11,22	0,00
15	0,85	0,39	2,13	0,03	2,59	0,01	0,43	0,67	5,87	0,00	3,12	0,00	3,87	0,00	3,36	0,00	10,90	0,00
16	0,77	0,44	2,10	0,04	2,56	0,01	0,47	0,64	5,85	0,00	3,07	0,00	3,66	0,00	3,32	0,00	10,86	0,00
17	0,75	0,45	2,22	0,03	2,52	0,01	0,58	0,56	5,88	0,00	3,07	0,00	3,55	0,00	3,25	0,00	10,90	0,00
18	0,85	0,39	2,61	0,01	2,70	0,01	0,47	0,64	6,03	0,00	3,04	0,00	3,44	0,00	3,02	0,00	10,94	0,00
19	0,85	0,39	2,58	0,01	2,66	0,01	0,51	0,61	6,00	0,00	2,98	0,00	3,52	0,00	3,10	0,00	10,97	0,00
20	1,07	0,29	2,67	0,01	2,70	0,01	0,36	0,72	5,96	0,00	2,98	0,00	3,52	0,00	3,10	0,00	11,01	0,00
21	1,22	0,22	2,73	0,01	2,77	0,01	0,43	0,67	6,12	0,00	3,04	0,00	3,76	0,00	3,10	0,00	11,09	0,00
22	0,89	0,37	2,30	0,02	2,70	0,01	0,58	0,56	5,95	0,00	3,18	0,00	3,84	0,00	3,47	0,00	10,92	0,00
23	0,83	0,41	2,24	0,02	2,52	0,01	0,62	0,54	5,82	0,00	3,27	0,00	3,84	0,00	3,47	0,00	10,97	0,00
24	0,83	0,41	2,10	0,04	2,63	0,01	0,58	0,56	5,74	0,00	3,07	0,00	3,69	0,00	3,51	0,00	10,92	0,00

25	0,97	0,33	2,33	0,02	2,66	0,01	0,66	0,51	5,79	0,00	3,07	0,00	3,76	0,00	3,25	0,00	10,94	0,00
26	0,99	0,32	2,50	0,01	2,63	0,01	0,51	0,61	5,77	0,00	3,07	0,00	3,55	0,00	3,25	0,00	10,97	0,00
27	0,99	0,32	2,53	0,01	2,70	0,01	0,39	0,69	5,68	0,00	2,98	0,00	3,59	0,00	3,13	0,00	10,92	0,00
28	1,22	0,22	2,64	0,01	2,98	0,00	0,36	0,72	5,85	0,00	3,15	0,00	3,76	0,00	3,13	0,00	11,06	0,00
29	0,95	0,34	2,76	0,01	2,56	0,01	0,58	0,56	5,76	0,00	3,18	0,00	3,76	0,00	3,43	0,00	10,89	0,00
30	0,97	0,33	2,30	0,02	2,59	0,01	0,66	0,51	5,72	0,00	3,21	0,00	3,80	0,00	3,55	0,00	10,92	0,00
31	0,97	0,33	2,16	0,03	2,63	0,01	0,62	0,54	5,50	0,00	3,12	0,00	3,87	0,00	3,58	0,00	10,94	0,00
32	1,14	0,25	2,44	0,01	2,70	0,01	0,66	0,51	5,75	0,00	3,12	0,00	3,94	0,00	3,58	0,00	11,01	0,00
33	1,14	0,25	2,56	0,01	2,77	0,01	0,66	0,51	5,72	0,00	3,27	0,00	3,94	0,00	3,51	0,00	11,05	0,00
34	1,24	0,21	2,56	0,01	2,84	0,00	0,54	0,59	5,63	0,00	3,12	0,00	3,76	0,00	3,47	0,00	10,99	0,00
35	1,34	0,18	2,67	0,01	2,91	0,00	0,39	0,69	5,66	0,00	3,04	0,00	3,84	0,00	3,32	0,00	11,03	0,00
36	1,11	0,27	2,39	0,02	2,81	0,00	0,73	0,46	5,77	0,00	3,15	0,00	3,76	0,00	3,51	0,00	10,89	0,00
37	1,09	0,28	2,36	0,02	2,77	0,01	0,58	0,56	5,72	0,00	3,29	0,00	3,84	0,00	3,62	0,00	10,97	0,00
38	1,14	0,25	2,50	0,01	2,81	0,00	0,58	0,56	5,79	0,00	3,29	0,00	3,91	0,00	3,66	0,00	11,03	0,00
39	1,20	0,23	2,50	0,01	2,95	0,00	0,58	0,56	5,78	0,00	3,29	0,00	4,01	0,00	3,62	0,00	11,04	0,00
40	1,28	0,20	2,56	0,01	2,81	0,00	0,62	0,54	5,64	0,00	3,18	0,00	4,12	0,00	3,62	0,00	11,03	0,00
41	1,38	0,17	2,56	0,01	2,91	0,00	0,62	0,54	5,55	0,00	3,15	0,00	4,05	0,00	3,58	0,00	11,05	0,00
42	1,44	0,15	2,70	0,01	2,98	0,00	0,58	0,56	5,59	0,00	3,24	0,00	3,98	0,00	3,55	0,00	11,07	0,00

Tabela D6 – Resultados do teste de Mann-Kendall para a variável temperatura média diária anual oriunda do modelo climático ETA-HADGEM2-ES

Ponto	Clima presente		RCP 4.5								RCP 8.5							
			2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099		2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099	
	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor
1	-0,01	0,95	-0,04	0,87	-0,04	0,83	-0,09	0,69	0,82	0,00	0,05	0,82	0,00	0,94	-0,17	0,49	2,06	0,00
2	-0,01	0,94	-0,04	0,85	-0,05	0,81	-0,09	0,70	0,84	0,00	0,04	0,86	-0,01	0,92	-0,17	0,48	2,10	0,00
3	-0,01	0,96	-0,04	0,85	-0,06	0,78	-0,09	0,68	0,86	0,00	0,02	0,90	0,00	0,94	-0,18	0,47	2,13	0,00
4	-0,01	0,95	-0,04	0,85	-0,06	0,78	-0,10	0,67	0,89	0,00	0,02	0,90	-0,01	0,92	-0,18	0,45	2,16	0,00
5	-0,01	0,96	-0,05	0,82	-0,07	0,74	-0,10	0,65	0,93	0,00	0,00	0,98	0,00	0,94	-0,19	0,44	2,18	0,00
6	-0,01	0,96	-0,07	0,78	-0,09	0,71	-0,11	0,62	0,95	0,00	-0,01	1,00	0,00	0,95	-0,19	0,43	2,20	0,00
7	-0,02	0,93	-0,07	0,77	-0,08	0,73	-0,11	0,62	0,98	0,00	0,00	0,97	0,02	1,00	-0,19	0,43	2,19	0,00
8	-0,01	0,95	-0,04	0,85	-0,04	0,84	-0,08	0,72	0,84	0,00	0,06	0,79	-0,01	0,92	-0,16	0,52	2,10	0,00
9	-0,02	0,94	-0,05	0,83	-0,05	0,80	-0,09	0,69	0,85	0,00	0,05	0,84	0,00	0,96	-0,17	0,49	2,13	0,00
10	-0,02	0,93	-0,06	0,81	-0,06	0,78	-0,09	0,70	0,87	0,00	0,03	0,89	0,00	0,94	-0,18	0,47	2,16	0,00
11	-0,02	0,93	-0,06	0,82	-0,06	0,78	-0,08	0,71	0,90	0,00	0,02	0,91	0,00	0,94	-0,17	0,48	2,17	0,00
12	-0,03	0,92	-0,06	0,81	-0,07	0,75	-0,10	0,66	0,90	0,00	0,01	0,95	0,01	0,97	-0,18	0,47	2,18	0,00
13	-0,01	0,96	-0,06	0,82	-0,08	0,73	-0,10	0,66	0,95	0,00	-0,01	0,98	0,02	1,00	-0,19	0,45	2,22	0,00
14	-0,03	0,91	-0,08	0,75	-0,09	0,69	-0,12	0,61	0,97	0,00	0,01	1,00	0,01	0,98	-0,19	0,44	2,23	0,00
15	0,00	0,97	-0,04	0,86	-0,04	0,83	-0,08	0,72	0,88	0,00	0,07	0,77	-0,01	0,93	-0,14	0,55	2,17	0,00
16	0,00	0,98	-0,05	0,83	-0,05	0,82	-0,08	0,72	0,89	0,00	0,06	0,80	0,00	0,95	-0,15	0,54	2,18	0,00
17	0,00	0,98	-0,05	0,83	-0,06	0,78	-0,08	0,73	0,90	0,00	0,05	0,84	0,01	0,98	-0,16	0,52	2,19	0,00
18	-0,01	0,96	-0,05	0,82	-0,06	0,78	-0,07	0,75	0,93	0,00	0,02	0,90	0,00	0,94	-0,15	0,53	2,22	0,00
19	0,00	0,97	-0,05	0,83	-0,06	0,78	-0,07	0,74	0,92	0,00	0,03	0,90	0,00	0,96	-0,16	0,51	2,21	0,00
20	0,00	0,97	-0,07	0,79	-0,08	0,73	-0,09	0,69	0,93	0,00	0,00	0,96	0,01	0,98	-0,19	0,44	2,20	0,00
21	-0,02	0,92	-0,06	0,80	-0,08	0,72	-0,11	0,65	0,97	0,00	0,01	1,00	-0,01	0,96	-0,19	0,43	2,24	0,00
22	0,00	0,99	-0,03	0,88	-0,04	0,82	-0,07	0,75	0,92	0,00	0,08	0,75	-0,01	0,93	-0,13	0,58	2,25	0,00
23	0,00	0,98	-0,03	0,88	-0,04	0,83	-0,07	0,75	0,93	0,00	0,09	0,72	0,00	0,96	-0,13	0,58	2,26	0,00
24	0,02	0,94	-0,03	0,89	-0,05	0,81	-0,07	0,73	0,93	0,00	0,08	0,76	0,02	1,00	-0,14	0,56	2,25	0,00

25	0,00	0,97	-0,04	0,86	-0,04	0,82	-0,07	0,76	0,94	0,00	0,07	0,79	-0,01	0,98	-0,14	0,56	2,25	0,00
26	0,00	0,98	-0,04	0,87	-0,05	0,81	-0,06	0,78	0,96	0,00	0,06	0,80	-0,01	0,98	-0,15	0,54	2,28	0,00
27	0,01	0,97	-0,05	0,83	-0,06	0,78	-0,08	0,72	0,95	0,00	0,03	0,88	0,01	0,93	-0,16	0,50	2,25	0,00
28	-0,02	0,93	-0,07	0,79	-0,06	0,77	-0,08	0,71	0,97	0,00	0,01	0,94	0,00	0,93	-0,19	0,44	2,26	0,00
29	0,01	0,96	-0,02	0,92	-0,03	0,87	-0,06	0,77	0,94	0,00	0,11	0,67	0,01	0,98	-0,11	0,63	2,29	0,00
30	0,02	0,93	-0,02	0,92	-0,04	0,84	-0,06	0,78	0,95	0,00	0,11	0,67	0,01	0,98	-0,11	0,62	2,30	0,00
31	0,04	0,88	0,00	0,96	-0,04	0,84	-0,06	0,78	0,97	0,00	0,12	0,66	0,00	0,94	-0,12	0,61	2,32	0,00
32	0,05	0,87	0,00	0,97	-0,03	0,85	-0,04	0,81	1,03	0,00	0,11	0,67	0,01	0,91	-0,12	0,61	2,41	0,00
33	0,06	0,84	0,01	0,99	-0,03	0,86	-0,04	0,83	1,04	0,00	0,12	0,66	0,02	0,88	-0,12	0,62	2,43	0,00
34	0,05	0,86	0,01	1,00	-0,03	0,86	-0,05	0,81	1,03	0,00	0,10	0,71	0,03	0,87	-0,13	0,58	2,40	0,00
35	0,03	0,92	-0,02	0,92	-0,05	0,81	-0,05	0,79	1,02	0,00	0,06	0,81	0,03	0,87	-0,15	0,52	2,37	0,00
36	0,02	0,92	0,00	0,95	-0,03	0,87	-0,05	0,80	1,00	0,00	0,13	0,64	-0,01	0,98	-0,10	0,66	2,38	0,00
37	0,04	0,89	0,01	0,98	-0,03	0,86	-0,05	0,80	1,01	0,00	0,13	0,63	-0,01	0,98	-0,11	0,64	2,42	0,00
38	0,05	0,85	0,00	0,95	-0,02	0,89	-0,04	0,84	1,07	0,00	0,14	0,61	0,01	0,91	-0,10	0,65	2,48	0,00
39	0,06	0,83	0,01	0,92	0,00	0,94	-0,02	0,88	1,08	0,00	0,15	0,59	0,03	0,85	-0,10	0,67	2,51	0,00
40	0,09	0,77	0,04	0,86	0,01	0,98	-0,02	0,88	1,11	0,00	0,15	0,59	0,04	0,83	-0,10	0,66	2,53	0,00
41	0,09	0,78	0,04	0,85	-0,02	1,00	-0,01	0,91	1,10	0,00	0,14	0,61	0,06	0,78	-0,10	0,67	2,53	0,00
42	0,08	0,80	0,03	0,87	0,01	0,98	-0,02	0,89	1,10	0,00	0,11	0,67	0,05	0,79	-0,11	0,64	2,51	0,00

Tabela D7 – Resultados do teste de Mann-Kendall para a variável temperatura média diária anual oriunda do modelo climático ETA-CANES2M

Ponto	Clima presente		RCP 4.5								RCP 8.5							
			2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099		2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099	
	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor
1	-0,08	0,78	0,01	0,95	0,00	0,93	-0,92	0,36	7,88	0,00	-0,03	0,87	-0,07	0,75	3,77	0,00	11,90	0,00
2	-0,09	0,76	0,01	0,95	-0,01	0,91	-0,92	0,36	7,89	0,00	-0,02	0,91	-0,07	0,76	3,66	0,00	11,88	0,00
3	-0,10	0,74	0,00	0,96	-0,02	0,90	-0,99	0,32	7,94	0,00	-0,02	0,91	-0,06	0,78	3,77	0,00	11,92	0,00
4	-0,10	0,75	-0,01	0,98	-0,02	0,89	-1,29	0,20	8,02	0,00	-0,02	0,92	-0,04	0,83	4,07	0,00	11,99	0,00
5	-0,13	0,69	0,01	0,99	-0,03	0,85	-1,22	0,22	8,16	0,00	-0,01	0,93	-0,03	0,85	4,00	0,00	12,06	0,00
6	-0,13	0,68	-0,01	0,94	-0,03	0,87	-1,22	0,22	8,19	0,00	-0,01	0,95	-0,04	0,85	3,96	0,00	12,09	0,00
7	-0,12	0,71	0,00	0,96	-0,02	0,88	-1,29	0,20	8,16	0,00	0,00	0,96	-0,02	0,89	3,88	0,00	12,06	0,00
8	-0,08	0,79	0,00	0,97	0,00	0,94	-1,07	0,28	7,83	0,00	-0,02	0,91	-0,06	0,78	3,85	0,00	11,90	0,00
9	-0,09	0,77	0,00	0,95	-0,01	0,92	-0,99	0,32	7,90	0,00	0,00	0,95	-0,06	0,79	3,73	0,00	11,90	0,00
10	-0,11	0,73	0,00	0,95	-0,02	0,90	-1,11	0,27	7,87	0,00	0,00	0,95	-0,06	0,78	3,85	0,00	11,89	0,00
11	-0,11	0,72	0,00	0,96	-0,01	0,92	-1,22	0,22	7,92	0,00	0,00	0,97	-0,05	0,81	4,03	0,00	11,93	0,00
12	-0,12	0,71	-0,01	0,98	-0,02	0,89	-1,37	0,17	7,93	0,00	0,00	0,95	-0,04	0,83	4,03	0,00	11,99	0,00
13	-0,13	0,69	0,00	0,98	-0,02	0,88	-1,37	0,17	8,02	0,00	0,00	0,96	-0,03	0,86	3,92	0,00	12,03	0,00
14	-0,14	0,67	-0,01	0,94	-0,02	0,90	-1,41	0,16	8,02	0,00	0,00	0,97	-0,03	0,86	4,03	0,00	12,05	0,00
15	-0,08	0,79	-0,01	0,98	0,00	0,96	-1,11	0,27	7,86	0,00	0,00	0,95	-0,05	0,80	4,30	0,00	11,96	0,00
16	-0,09	0,77	0,00	0,97	0,00	0,96	-1,07	0,28	7,87	0,00	0,00	0,96	-0,05	0,79	4,15	0,00	11,94	0,00
17	-0,10	0,74	0,00	0,96	0,01	0,97	-1,26	0,21	7,79	0,00	0,01	0,99	-0,05	0,80	4,11	0,00	11,97	0,00
18	-0,11	0,72	-0,01	0,98	0,00	0,93	-1,11	0,27	7,86	0,00	0,01	0,98	-0,04	0,84	4,00	0,00	11,89	0,00
19	-0,11	0,72	0,00	0,97	-0,01	0,93	-1,14	0,25	7,88	0,00	0,01	0,98	-0,04	0,84	4,03	0,00	11,92	0,00
20	-0,12	0,71	0,01	0,98	-0,02	0,90	-1,26	0,21	7,90	0,00	0,01	0,99	-0,03	0,85	3,88	0,00	11,95	0,00
21	-0,14	0,67	0,01	1,00	-0,02	0,90	-1,37	0,17	7,95	0,00	0,01	0,98	-0,03	0,85	4,00	0,00	12,00	0,00
22	-0,10	0,74	0,00	0,96	-0,01	0,98	-1,22	0,22	7,73	0,00	0,01	0,99	-0,05	0,80	4,45	0,00	11,88	0,00
23	-0,10	0,74	0,01	0,94	0,00	0,96	-1,14	0,25	7,82	0,00	0,00	0,96	-0,06	0,78	4,33	0,00	11,93	0,00
24	-0,11	0,73	0,02	0,91	0,00	0,95	-1,18	0,24	7,86	0,00	0,01	0,94	-0,05	0,80	4,18	0,00	11,93	0,00

25	-0,11	0,74	0,02	0,92	0,00	0,95	-1,11	0,27	7,88	0,00	0,01	0,93	-0,04	0,84	4,15	0,00	11,95	0,00
26	-0,10	0,74	0,00	0,95	0,00	0,96	-1,18	0,24	7,86	0,00	0,01	0,93	-0,03	0,85	4,07	0,00	11,93	0,00
27	-0,10	0,76	0,00	0,96	-0,01	0,98	-1,26	0,21	7,91	0,00	0,02	0,92	-0,03	0,86	4,00	0,00	11,92	0,00
28	-0,12	0,71	0,01	0,99	0,00	0,93	-1,33	0,18	7,88	0,00	0,00	0,95	-0,03	0,86	3,88	0,00	11,95	0,00
29	-0,09	0,77	0,02	0,90	0,01	0,92	-1,18	0,24	7,72	0,00	0,00	0,96	-0,04	0,83	4,45	0,00	11,80	0,00
30	-0,09	0,78	0,02	0,90	0,02	0,90	-1,18	0,24	7,77	0,00	0,01	0,93	-0,04	0,83	4,52	0,00	11,87	0,00
31	-0,08	0,78	0,04	0,85	0,03	0,86	-1,22	0,22	7,83	0,00	0,03	0,87	-0,05	0,81	4,30	0,00	11,89	0,00
32	-0,08	0,79	0,04	0,84	0,04	0,82	-1,22	0,22	7,86	0,00	0,05	0,84	-0,03	0,85	4,41	0,00	11,95	0,00
33	-0,07	0,81	0,05	0,84	0,04	0,82	-1,22	0,22	7,88	0,00	0,05	0,83	-0,02	0,88	4,30	0,00	11,93	0,00
34	-0,09	0,78	0,03	0,88	0,04	0,83	-1,29	0,20	7,94	0,00	0,05	0,84	-0,02	0,90	4,11	0,00	11,92	0,00
35	-0,10	0,74	0,01	0,93	0,01	0,92	-1,33	0,18	7,83	0,00	0,05	0,83	-0,01	0,91	4,07	0,00	11,97	0,00
36	-0,09	0,78	0,03	0,89	0,03	0,86	-1,03	0,30	7,77	0,00	0,02	0,91	-0,03	0,86	4,75	0,00	11,86	0,00
37	-0,08	0,80	0,04	0,85	0,03	0,85	-1,07	0,28	7,84	0,00	0,04	0,87	-0,03	0,85	4,71	0,00	11,90	0,00
38	-0,06	0,83	0,05	0,84	0,05	0,81	-1,26	0,21	7,81	0,00	0,05	0,84	-0,03	0,86	4,45	0,00	11,88	0,00
39	-0,04	0,89	0,06	0,79	0,06	0,78	-1,26	0,21	7,85	0,00	0,06	0,80	-0,01	0,91	4,37	0,00	11,89	0,00
40	-0,03	0,92	0,07	0,78	0,07	0,74	-1,29	0,20	7,79	0,00	0,06	0,80	-0,01	0,93	4,26	0,00	11,88	0,00
41	-0,03	0,91	0,08	0,76	0,07	0,74	-1,26	0,21	7,79	0,00	0,06	0,81	0,00	0,94	4,18	0,00	11,86	0,00
42	-0,05	0,86	0,07	0,78	0,06	0,79	-1,29	0,20	7,81	0,00	0,06	0,80	0,00	0,96	4,18	0,00	11,90	0,00

Tabela D8 – Resultados do teste de Mann-Kendall para a variável temperatura média diária anual oriunda do modelo climático ETA-MIROC5

Ponto	Clima presente		RCP 4.5								RCP 8.5							
			2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099		2006 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099		2006 - 2099	
	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor	Z	p valor
1	0,00	0,98	-0,05	0,83	0,05	0,79	0,28	0,78	4,83	0,00	-0,05	0,83	-0,11	0,65	0,47	0,64	8,00	0,00
2	-0,01	0,96	-0,04	0,86	0,06	0,79	0,36	0,72	4,79	0,00	-0,05	0,83	-0,11	0,64	0,62	0,54	7,95	0,00
3	-0,01	0,95	-0,04	0,86	0,05	0,80	0,54	0,59	4,90	0,00	-0,05	0,84	-0,10	0,66	0,62	0,54	7,96	0,00
4	0,01	0,99	-0,03	0,88	0,04	0,83	0,62	0,54	4,96	0,00	-0,04	0,85	-0,09	0,69	0,81	0,42	8,09	0,00
5	0,00	0,99	-0,05	0,84	0,03	0,87	0,51	0,61	5,10	0,00	-0,05	0,84	-0,09	0,71	0,92	0,36	8,22	0,00
6	0,01	1,00	-0,06	0,80	0,02	0,88	0,43	0,67	5,19	0,00	-0,06	0,81	-0,07	0,74	0,96	0,34	8,23	0,00
7	0,01	0,99	-0,06	0,79	0,03	0,87	0,47	0,64	5,35	0,00	-0,06	0,81	-0,05	0,79	1,07	0,28	8,37	0,00
8	0,01	1,00	-0,05	0,83	0,06	0,78	0,24	0,81	4,84	0,00	-0,05	0,84	-0,10	0,67	0,28	0,78	8,01	0,00
9	0,00	0,98	-0,03	0,87	0,05	0,80	0,39	0,69	4,87	0,00	-0,04	0,85	-0,09	0,69	0,47	0,64	7,88	0,00
10	0,00	0,97	-0,03	0,87	0,05	0,80	0,36	0,72	4,81	0,00	-0,04	0,85	-0,10	0,66	0,28	0,78	7,81	0,00
11	0,00	0,98	-0,04	0,86	0,05	0,81	0,66	0,51	4,81	0,00	-0,04	0,86	-0,09	0,68	0,58	0,56	7,94	0,00
12	-0,01	0,96	-0,03	0,88	0,04	0,83	0,54	0,59	4,85	0,00	-0,05	0,83	-0,09	0,70	0,77	0,44	8,05	0,00
13	0,00	0,98	-0,04	0,87	0,03	0,86	0,47	0,64	5,02	0,00	-0,06	0,81	-0,08	0,72	0,88	0,38	8,20	0,00
14	0,00	0,97	-0,05	0,82	0,03	0,87	0,43	0,67	5,14	0,00	-0,05	0,82	-0,06	0,78	1,03	0,30	8,36	0,00
15	0,01	0,96	-0,03	0,87	0,06	0,78	0,21	0,84	4,79	0,00	-0,02	0,92	-0,08	0,72	0,58	0,56	8,01	0,00
16	0,00	0,98	-0,03	0,89	0,05	0,80	0,47	0,64	4,83	0,00	-0,02	0,91	-0,09	0,70	0,62	0,54	7,92	0,00
17	0,00	0,99	-0,02	0,92	0,05	0,81	0,47	0,64	4,73	0,00	-0,02	0,90	-0,09	0,71	0,69	0,49	7,81	0,00
18	0,00	0,99	-0,03	0,89	0,05	0,79	0,58	0,56	4,76	0,00	-0,03	0,89	-0,08	0,71	0,77	0,44	8,02	0,00
19	0,00	0,98	-0,02	0,91	0,05	0,80	0,54	0,59	4,74	0,00	-0,03	0,88	-0,08	0,71	0,77	0,44	8,01	0,00
20	0,00	0,97	-0,03	0,88	0,05	0,81	0,47	0,64	4,81	0,00	-0,05	0,83	-0,09	0,70	0,88	0,38	8,08	0,00
21	0,00	0,98	-0,03	0,87	0,04	0,83	0,39	0,69	4,95	0,00	-0,05	0,82	-0,07	0,74	1,03	0,30	8,32	0,00
22	0,04	0,89	-0,03	0,87	0,07	0,76	0,32	0,75	4,77	0,00	0,01	0,98	-0,06	0,79	0,88	0,38	8,09	0,00
23	0,03	0,90	-0,02	0,90	0,06	0,79	0,51	0,61	4,87	0,00	0,01	0,99	-0,07	0,75	0,84	0,40	7,98	0,00
24	0,02	0,93	-0,01	0,94	0,05	0,80	0,47	0,64	4,63	0,00	0,01	0,99	-0,08	0,72	0,84	0,40	7,82	0,00

25	0,01	0,95	0,01	0,99	0,04	0,82	0,58	0,56	4,66	0,00	0,00	0,97	-0,08	0,71	0,81	0,42	7,90	0,00
26	0,02	0,94	0,01	0,99	0,05	0,80	0,51	0,61	4,74	0,00	0,00	0,97	-0,08	0,73	0,88	0,38	7,98	0,00
27	0,00	0,98	0,00	0,97	0,06	0,77	0,54	0,59	4,66	0,00	-0,02	0,91	-0,07	0,74	1,03	0,30	7,96	0,00
28	0,00	0,99	-0,02	0,90	0,05	0,81	0,39	0,69	4,75	0,00	-0,05	0,84	-0,07	0,74	1,18	0,24	8,24	0,00
29	0,07	0,81	-0,02	0,92	0,07	0,75	0,17	0,87	4,75	0,00	-0,01	0,98	-0,06	0,77	0,96	0,34	8,10	0,00
30	0,06	0,83	-0,01	0,93	0,07	0,74	0,58	0,56	4,81	0,00	-0,01	0,99	-0,07	0,75	1,03	0,30	8,08	0,00
31	0,08	0,80	0,01	0,98	0,07	0,75	0,47	0,64	4,70	0,00	0,00	0,95	-0,07	0,75	0,92	0,36	7,86	0,00
32	0,09	0,76	-0,01	0,99	0,08	0,73	0,32	0,75	4,76	0,00	0,02	0,90	-0,05	0,81	1,14	0,25	8,02	0,00
33	0,10	0,76	0,00	0,95	0,08	0,73	0,43	0,67	4,75	0,00	0,03	0,89	-0,05	0,82	0,96	0,34	8,07	0,00
34	0,07	0,81	0,00	0,97	0,07	0,74	0,43	0,67	4,73	0,00	0,02	0,92	-0,05	0,80	0,88	0,38	8,05	0,00
35	0,05	0,87	0,00	0,97	0,07	0,76	0,54	0,59	4,74	0,00	-0,01	1,00	-0,05	0,80	1,18	0,24	8,09	0,00
36	0,10	0,75	0,00	0,95	0,09	0,70	0,06	0,96	4,68	0,00	0,01	0,92	-0,06	0,78	1,22	0,22	8,13	0,00
37	0,12	0,72	0,00	0,97	0,10	0,66	0,06	0,96	4,70	0,00	0,02	0,90	-0,04	0,83	1,18	0,24	8,15	0,00
38	0,13	0,68	0,00	0,97	0,11	0,65	0,17	0,87	4,74	0,00	0,04	0,87	-0,02	0,90	1,18	0,24	8,15	0,00
39	0,15	0,64	0,01	0,95	0,12	0,62	0,28	0,78	4,83	0,00	0,06	0,82	-0,01	0,92	1,18	0,24	8,13	0,00
40	0,16	0,62	0,02	0,91	0,12	0,61	0,39	0,69	4,83	0,00	0,07	0,77	0,01	0,97	1,18	0,24	8,19	0,00
41	0,14	0,66	0,03	0,89	0,13	0,58	0,32	0,75	4,70	0,00	0,08	0,76	0,02	1,00	1,11	0,27	8,14	0,00
42	0,13	0,68	0,03	0,88	0,11	0,64	0,43	0,67	4,69	0,00	0,07	0,78	0,00	0,96	1,22	0,22	8,15	0,00