

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

FRANCIÉLLI DE PAULA DELA COSTA

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA VAZÃO E NA DINÂMICA DE
SEDIMENTOS EM GRANDES BACIAS HIDROGRÁFICAS: ESTUDO DE CASO
DA BACIA DO RIO DOCE**

**VITÓRIA
2021**

FRANCIÉLLI DE PAULA DELA COSTA

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA VAZÃO E NA DINÂMICA DE
SEDIMENTOS EM GRANDES BACIAS HIDROGRÁFICAS: ESTUDO DE CASO
DA BACIA DO RIO DOCE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Costa Buarque

VITÓRIA

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

P324i Paula Dela Costa, Franciéli de, 1996-
Impacto das mudanças climáticas na vazão e na dinâmica de sedimentos em grandes bacias hidrográficas: estudo de caso da bacia do rio Doce / Franciéli de Paula Dela Costa. - 2021.
163 f. : il.

Orientador: Diogo Costa Buarque.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Modelagem matemática. 2. Mudanças climáticas. 3. Sedimentos. 4. Recursos hídricos. I. Costa Buarque, Diogo. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Ata da Quadringentésima Trigésima Oitava (438ª) Sessão de Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) do Centro Tecnológico (CT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), da aluna **Franciéli de Paula Dela Costa**, candidata ao grau de Mestra em Engenharia Ambiental.

Às nove horas do dia treze de agosto de dois mil e vinte e um (13/08/2021) por videoconferência. O Prof. Dr. Diogo Costa Buarque, presidindo a Sessão, deu início aos trabalhos apresentando ao público presente à candidata **Franciéli de Paula Dela Costa**, e a banca examinadora da dissertação, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. José Antônio Tosta dos Reis – Examinador Interno - PPGEA/CT/UFES e o Prof. Dr. Walter Collischonn – Examinador Externo – IPH/UFRGS. O Senhor Presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Diogo Costa Buarque passou em seguida a palavra à candidata, que em trinta minutos apresentou a Dissertação de Mestrado intitulada **“IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA VAZÃO E NA DINÂMICA DE SEDIMENTOS EM GRANDES BACIAS HIDROGRÁFICAS: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO DOCE”**. Dando prosseguimento aos trabalhos de defesa da dissertação, o Senhor Presidente passou a palavra aos membros da Banca, um a um, iniciando os comentários de arguição da candidata com o examinador externo. Após, o Senhor Presidente teceu comentários sobre o trabalho da candidata e franqueou a palavra ao público presente. Findada a arguição, o Senhor Presidente convidou a Banca Examinadora se reunir em separado, para deliberação. Ao retornar, o Senhor Presidente informou ao público presente a decisão da banca que resultou na APROVAÇÃO da examinada. Por fim, o presidente da sessão alertou que a aprovada somente terá direito ao título de Mestre em Engenharia Ambiental após entrega da versão final de sua dissertação, em papel e meio digital, à Secretária do Programa com as correções apontadas pela banca, cumpridos todos os trâmites exigidos pelo Regimento do PPGEA e da homologação do resultado da defesa pelo Colegiado Acadêmico do PPGEA. Por fim, declarou encerrada a sessão, e eu Diogo Costa Buarque, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, do Centro Tecnológico, lavrei a presente ata, que irá assinada pelos membros da Banca Examinadora e pela mestranda.

Prof. Dr. Diogo Costa Buarque
Orientador - PPGEA/CT/UFES

Prof. Dr. José Antônio Tosta dos Reis
Examinador Interno – PPGEA/CT/UFES

Prof. Dr. Walter Collischonn
Examinador Externo – IPH/UFRGS

Franciéli de Paula Dela Costa

Vitória/ES, 13 de agosto de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA

O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
DIOGO COSTA BUARQUE - SIAPE 1042788
Departamento de Engenharia Ambiental - DEACT
Em 16/08/2021 às 17:43

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/250502?tipoArquivo=O>

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me iluminar e me dar forças para seguir em frente.

Aos meus pais, Elilda e Sebastião, pelo incentivo, por me proporcionarem a oportunidade de estudar e crescer profissionalmente, por terem me acolhido e me dado todo o suporte para que eu finalizasse o mestrado em casa, em virtude da pandemia.

Ao meu orientador, Diogo Costa Buarque, por ser tão paciente, pela compreensão, por ter me ensinado tanto e pela confiança na minha capacidade. Não poderia ter tido melhor orientador!

À Lizandra e ao João Brêda, mesmo que tão distantes, por terem me ensinado tanto, pela paciência em explicar cada detalhe e por me ouvirem em todos os momentos. Vocês foram sensacionais, muito obrigada!

Às colegas Gabriella, Julielza, Brunela e Carol pela convivência agradável no breve período que convivemos juntas.

À minha amiga Karine pelo apoio, amizade e incentivo sempre. Obrigada por tudo.

Ao professor Carlos Nobre pela ajuda fundamental e a todos os demais pesquisadores do Instituto de Estudos Climáticos do Espírito Santo - ES.

Ao CPTEC/INPE por me fornecerem dados do modelo Eta, essenciais para o meu trabalho.

À Fapes pelo auxílio financeiro necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

À todos que contribuíram de alguma maneira para realização deste trabalho.

RESUMO

A avaliação dos efeitos das mudanças climáticas na vazão e na descarga sólida em suspensão fornece informações relevantes para o desenvolvimento de planos de gerenciamento de recursos hídricos e da elaboração de estratégias de mitigação e adaptação em bacias hidrográficas. Este estudo verificou os impactos das mudanças climáticas na vazão e no transporte de sedimentos em suspensão da bacia do rio Doce, localizada nos estados do Espírito Santo e de Minas Gerais. A bacia apresenta altas concentrações de sedimentos, que resultam em uma das maiores cargas de sedimentos entre as grandes bacias brasileiras. Para essa investigação, foram utilizados o MGB-SED e as projeções futuras dos MCR Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES 20 km, com resolução espacial de 20 km, e do Eta-HadGEM2-ES 05 km, com resolução espacial de 05 km. Três períodos futuros foram considerados para as simulações (2015 - 2040, 2041 - 2070 e 2071 - 2099), realizadas com passo de tempo diário, considerando os cenários climáticos RCP 4.5 e o RCP 8.5. As simulações com as projeções dos modelos climáticos mostram uma tendência de redução da vazão média anual e da descarga sólida em suspensão média anual na bacia do rio Doce no século XXI. No entanto, em alguns cursos d'água pode haver aumento das vazões médias anuais e das descargas sólidas em suspensão médias anuais geradas a partir das simulações do Eta-BESM e do Eta-MIROC5, especialmente a região mais ao norte da área de estudo. Nos principais afluentes e no exutório da bacia, as tendências da vazão média anual variam de -5% a -84% em 2015 - 2040, de 0% a -76% em 2041 - 2070 e de -2% a -91% em 2071 - 2099. Já as tendências da descarga sólida em suspensão média anual nesses pontos variam de -5% a -91% em 2015 - 2040, de +9% a -82% em 2041 - 2070 e de +12% a -93% em 2071 - 2099. Na bacia do rio Suaçuí Grande foram verificadas variações positivas decorrentes das simulações com as projeções do Eta-MIROC5. Os resultados indicam diferenças consideráveis nos impactos das mudanças climáticas na vazão média anual e na descarga sólida média anual em função dos modelos climáticos regionais e dos cenários climáticos (RCP). No entanto, o estudo feito mostra que todas as projeções indicam que a bacia do rio Doce pode sofrer graves problemas relacionados à diminuição da vazão, bem como reduções significativas no transporte de sedimentos em suspensão. Reduções no transporte de sedimentos nos cursos d'água podem afetar significativamente os habitats das espécies e a erosão dos canais. Já as reduções na vazão podem comprometer o abastecimento de água para consumo humano e a disponibilidade de água para agropecuária, indústria, geração de energia elétrica, que são importantes para o leste mineiro e o noroeste do Espírito Santo.

Palavras-chave: mudanças climáticas; vazão; descarga sólida em suspensão; bacia do rio Doce.

ABSTRACT

Assessing the effects of climate change on flow and suspended sediments discharge provides relevant information for the development of water resources management plans and the elaboration of mitigation and adaptation strategies in river basins. This study verified the impacts of climate change on the flow and suspended sediments transport at the Doce river basin, located in the states of Espírito Santo and Minas Gerais. The basin has high sediment concentrations, which result in one of the highest sediment loads among large Brazilian basins. For this investigation, the MGB-SED and the future projections of the RCM Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-MIROC5 and Eta-HadGEM2-ES 20 km were used, with a spatial resolution of 20 km, and of the Eta-HadGEM2-ES 05 km, with a spatial resolution of 05 km. Three future periods were considered for the simulations (2015 - 2040, 2041 - 2070 and 2071 - 2099), carried out with a daily time step, considering the climate scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5. Simulations with the projections of climate models show a tendency to reduce the average annual flow and the average annual suspended sediments discharge in the Doce river basin in the 21st century. However, in some watercourses there may be an increase in the average annual flows and average annual suspended sediments discharges generated from the Eta-BESM and Eta-MIROC5 simulations, especially in the northernmost region of the study area. In the main tributaries and in the basin's outlet, the average annual flow trends vary from -5% to -84% in 2015 - 2040, from 0% to -76% in 2041 - 2070 and from -2% to -91% in 2071 - 2099. The average annual suspended sediments discharge trends at these points vary from -5% to -91% in 2015 - 2040, from +9% to -82% in 2041 - 2070 and from +12% to -93 % in 2071 - 2099. In the Suaçuí Grande river basin, positive variations were verified arising from the simulations with the projections of Eta-MIROC5. The results indicate considerable differences in the impacts of climate change on average annual flow and average annual solid discharge as a function of regional climate models and climate scenarios (RCP). However, the study carried out shows that all projections indicate that the Doce River basin may suffer serious problems related to decrease in flow, as well as significant reductions in the suspended sediments transport. Reductions in sediment transport in watercourses can significantly affect species habitats and channel erosion. Flow reductions, on the other hand, can compromise the supply of water for human consumption and the availability of water for agriculture, industry, electricity generation, which are important for eastern Minas Gerais and northwestern Espírito Santo.

Keywords: climate change; flow; suspended sediments discharge; Doce river basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da bacia do rio Doce e seus principais afluentes.	23
Figura 2: Tipos de solo presentes na bacia do rio Doce. Fonte: adaptado de PIRH-DOCE (2010).....	25
Figura 3: Fluxograma das principais etapas deste estudo.	27
Figura 4: Localização das estações fluviométricas com séries diárias de vazão.	28
Figura 5: Localização das estações meteorológicas com normais climatológicas e pluviométricas com dados diários de precipitação.	29
Figura 6: Relevo da bacia hidrográfica do rio Doce.....	30
Figura 7: Distribuição das minibacias discretizadas para bacia do rio Doce.	31
Figura 8: Mapa das 9 URH da bacia do rio Doce.	32
Figura 9: Localização das estações sedimentométricas.	36
Figura 10: Distribuição espacial das estatísticas de desempenho calculadas para a vazão no período de calibração do módulo hidrológico MGB (1990 - 2014) aplicado à bacia do rio Doce. (Continua).....	43
Figura 11: Distribuição espacial das estatísticas de desempenho calculadas para a vazão no período de validação do módulo hidrológico MGB (1970 - 1989) aplicado à bacia do rio Doce.	46
Figura 12: Hidrogramas de vazões observada e simulada para diferentes estações fluviométricas.	49
Figura 13: Distribuição espacial das estatísticas de desempenho calculadas para a descarga sólida em suspensão no período de calibração do módulo de sedimentos MGB-SED (2005 - 2014) aplicado à bacia do rio Doce.	50
Figura 14: Distribuição espacial das estatísticas de desempenho calculadas para a descarga sólida em suspensão no período de validação do módulo de sedimentos MGB-SED (1998 - 2004) aplicado à bacia do rio Doce.	52

Figura 15: Descargas sólidas em suspensão (DSS) simuladas e observadas para diferentes estações da ANA no período de validação do MGB-SED (1998 - 2004)..	54
Figura 16: Descargas sólidas em suspensão (DSS) simuladas e observadas na estação da CEMIG no período de validação do MGB-SED (1998 - 2004).....	55
Figura 17: Precipitação observada média nos períodos chuvoso e seco e precipitação observada média mensal para o período base (1998 - 2014).....	56
Figura 18: Precipitação média da bacia do rio Doce nos períodos chuvoso e seco sob o RCP 4.5 (a) e o RCP 8.5 (b) e variação relativa e absoluta sob o RCP 4.5 (c) e o RCP 8.5 (d) em relação ao período base (1998 - 2014), no período de 2015 a 2040.	58
Figura 19: Precipitação média da bacia do rio Doce nos períodos chuvoso e seco sob o RCP 4.5 (a) e o RCP 8.5 (b) e variação relativa e absoluta sob o RCP 4.5 (c) e o RCP 8.5 (d) em relação ao período base (1998 - 2014), no período de 2041 a 2070.	60
Figura 20: Precipitação média da bacia do rio Doce nos períodos chuvoso e seco sob o RCP 4.5 (a) e o RCP 8.5 (b) e variação relativa e absoluta sob o RCP 4.5 (c) e o RCP 8.5 (d) em relação ao período base (1998 - 2014), no período de 2071 a 2099.	62
Figura 21: Temperatura observada do CRU média em DJF, MAM, JJA e SON (1961 - 1990).	65
Figura 22: Temperatura média da bacia do rio Doce e a variação absoluta em 2015 - 2040 sob o RCP 4.5 (a) e o RCP 8.5 (b) e temperatura média da bacia do rio Doce e a variação absoluta em 2041 - 2070 sob o RCP 4.5 (c) e o RCP 8.5 (d) em relação aos dados observados do CRU (1961 - 1990).	68
Figura 23: Temperatura média da bacia do rio Doce e a variação absoluta em 2071 - 2099 sob o RCP 4.5 (c) e o RCP 8.5 (d) em relação aos dados observados do CRU (1961 - 1990).....	69
Figura 24: Pontos de interesse na bacia do Doce para análise das vazões futuras.	72

Figura 25: Variação da vazão média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 4.5 em 2015 - 2040 em relação ao período base (1998 - 2014)....	74
Figura 26: Variação da vazão média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 8.5 em 2015 - 2040 em relação ao período base (1998 - 2014)....	74
Figura 27: Variação da vazão média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 4.5 em 2041 - 2070 em relação ao período base (1998 - 2014)....	76
Figura 28: Variação da vazão média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 8.5 em 2041 - 2070 em relação ao período base (1998 - 2014)....	76
Figura 29: Variação da vazão média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 4.5 em 2071 - 2099 em relação ao período base (1998 - 2014)....	77
Figura 30: Variação da vazão média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 8.5 em 2071 - 2099 em relação ao período base (1998 - 2014)....	78
Figura 31: <i>Box plot</i> da variação da vazão média anual dos pontos de interesse sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 em 2015 - 2040.	79
Figura 32: <i>Box plot</i> da variação da vazão média anual dos pontos de interesse sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 em 2041 - 2070.	80
Figura 33: <i>Box plot</i> da variação da vazão média anual dos pontos de interesse sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 em 2071 - 2099.	81
Figura 34: Vazão média anual para o período base (1998 - 2014) em m ³ /s.	82
Figura 35: <i>Box plot</i> da variação da vazão média anual em todos os trechos de rio sob o RCP 4.5 e RCP 8.5 em 2015 - 2040.	83
Figura 36: Variação da vazão média anual do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d), do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 (e) e sob o RCP 8.5 (f) em 2015 - 2040 em relação a vazão média anual do período base (1998 - 2014).	86
Figura 37: Variação da vazão média anual do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b) e do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 (c) e sob o	

RCP 8.5 (d) em 2015 - 2040 em relação a vazão média anual do período base (1998 - 2014).....	87
Figura 38: <i>Box plot</i> da variação da vazão média anual em todos os trechos de rio sob o RCP 4.5 e RCP 8.5 em 2041 - 2070.	88
Figura 39: Variação da vazão média anual do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d), do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 (e) e sob o RCP 8.5 (f) em 2041 - 2070 em relação a vazão média anual do período base (1998 - 2014).	90
Figura 40: Variação da vazão média anual do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d) em 2041 - 2070 em relação a vazão média anual do período base (1998 - 2014).....	91
Figura 41: <i>Box plot</i> da variação da vazão média anual em todos os trechos de rio sob o RCP 4.5 e RCP 8.5 em 2071 - 2099.	92
Figura 42: Variação da vazão média anual do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d), do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 (e) e sob o RCP 8.5 (f) em 2071 - 2099 em relação a vazão média anual do período base (1998 - 2014).	95
Figura 43: Variação da vazão média anual do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d) em 2071 - 2099 em relação a vazão média anual do período base (1998 - 2014).....	96
Figura 44: Variação da DSS média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 4.5 em 2015 - 2040 em relação ao período base (1998 - 2014).	98
Figura 45: Variação da DSS média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 8.5 em 2015 - 2040 em relação ao período base (1998 - 2014).	99
Figura 46: Variação da DSS média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 4.5 em 2041 - 2070 em relação ao período base (1998 - 2014).	100

Figura 47: Variação da DSS média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 8.5 em 2041 - 2070 em relação ao período base (1998 - 2014).	100
Figura 48: Variação da DSS média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 4.5 em 2071 - 2099 em relação ao período base (1998 - 2014).	102
Figura 49: Variação da DSS média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 8.5 em 2071 - 2099 em relação ao período base (1998 - 2014).	102
Figura 50: <i>Box plot</i> da variação da DSS média anual dos pontos de interesse sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 em 2015 - 2040.	103
Figura 51: <i>Box plot</i> da variação da DSS média anual dos pontos de interesse sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 em 2041 - 2070.	104
Figura 52: <i>Box plot</i> da variação da DSS média anual dos pontos de interesse sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 em 2071 - 2099.	105
Figura 53: Descarga sólida em suspensão (DSS) média anual para o período base (1998 - 2014) em 10 ³ t/ano.	106
Figura 54: <i>Box plot</i> da variação da DSS média anual em todos os trechos de rio sob o RCP 4.5 e RCP 8.5 em 2015 - 2040.	107
Figura 55: Variação da DSS média anual do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d), do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 (e) e sob o RCP 8.5 (f) em 2015 - 2041 em relação a DSS média anual do período base (1998 - 2014).	109
Figura 56: Variação da DSS média anual do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d) em 2015 - 2040 em relação a DSS média anual do período base (1998 - 2014).	110
Figura 57: <i>Box plot</i> da variação da DSS média anual em todos os trechos de rio sob o RCP 4.5 e RCP 8.5 em 2041 - 2070.	111
Figura 58: Variação da DSS média anual do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d), do Eta-MIROC5	

sob o RCP 4.5 (e) e sob o RCP 8.5 (f) em 2041 - 2070 em relação a DSS média anual do período base (1998 - 2014).	113
Figura 59: Variação da DSS média anual do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d) em 2041 - 2070 em relação a DSS média anual do período base (1998 - 2014).	114
Figura 60: <i>Box plot</i> da variação da DSS média anual em todos os trechos de rio sob o RCP 4.5 e RCP 8.5 em 2071 - 2099.	115
Figura 61: Variação da DSS média anual do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d), do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 (e) e sob o RCP 8.5 (f) em 2041 - 2070 em relação a DSS média anual do período base (1998 - 2014).	117
Figura 62: Variação da DSS média anual do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d) em 2071 - 2099 em relação a DSS média anual do período base (1998 - 2014).	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação da qualidade dos resultados da modelagem para vazão em função dos valores de ENS e PBIAS.....	35
Tabela 2: Precipitação média anual da bacia do rio Doce e variação relativa dos períodos de 2015 - 2040, 2041 - 2070 e 2071 - 2099, em relação a precipitação média anual do período de base (1998 - 2014).	63
Tabela 3: Temperatura média anual da bacia do rio Doce e variação absoluta para 2015 - 2040, 2041 - 2070, 2071 - 2099, em relação a temperatura média anual observada do CRU (1961 - 1990).	70
Tabela 4: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Guandu.....	139
Tabela 5: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Piracicaba.....	140
Tabela 6: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Caratinga.	141
Tabela 7: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Casca.	142
Tabela 8: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Piranga.	143
Tabela 9: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Santo Antônio.	144
Tabela 10: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Manhuaçu.....	145
Tabela 11: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Suaçuí Grande.....	146
Tabela 12: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Doce.	147

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABRH	Associação Brasileira de Recursos Hídricos
ANA	Agência Nacional de Águas
AR4	<i>Fourth Assessment Report</i>
AR5	<i>Fifth Assessment Report</i>
APP	Áreas de preservação permanente
CMIP5	Quinta Fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ENS	Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
ENSLog	Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos
GEE	Gases de efeito estufa
Id	Índice de concordância de Willmott
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MAE	Erro médio absoluto
MDE	Modelo Digital de Elevação
MCG	Modelos climáticos globais
MCR	Modelo climático regional
MGB	Modelo Hidrológico de Grandes Bacias
MMA	Ministério do Meio Ambiente
PBIAS	Erro de volume total
r	Coeficiente de correlação de Pearson

RCP *Representative Concentration Pathway*

SWAT *Soil and Water Assessment Tool*

UHE Usina hidrelétrica

URH Unidades de resposta hidrológica

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 OBJETIVO GERAL	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3 REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1 MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS E CENÁRIOS DE EMISSÕES FUTURAS.....	5
3.2 MODELOS CLIMÁTICOS REGIONAIS.....	7
3.2.1 Modelo climático regional Eta.....	7
3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS	9
3.3.1 Modelo hidrológico de grandes bacias (MGB).....	10
3.4 GERAÇÃO DE SEDIMENTOS.....	13
3.4.1 Modelagem da geração e do transporte de sedimentos.....	14
3.5 MODELAGEM DE SEDIMENTOS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	16
3.6 MGB-SED	19
4 METODOLOGIA	22
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	22
4.2 ABORDAGEM PARA MODELAGEM	26
4.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	27
4.3.1 Dados hidrológicos e meteorológicos.....	28
4.3.2 Discretização da bacia hidrográfica e definição das URH.....	29
4.3.3 Calibração e validação do módulo hidrológico	32
4.4 MODELAGEM DE SEDIMENTOS.....	35
4.4.1 Dados de sedimentos.....	35
4.4.2 Definição de parâmetros da MUSLE	36
4.4.3 Calibração e validação do modelo de sedimentos	37
4.5 DADOS DO MCR ETA	38
4.6 MÉTODO DE CORREÇÃO DE VIÉS	39
4.7 AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA HIDROSEDIMENTOLÓGICA.....	41

5	RESULTADOS	43
5.1	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	43
5.1.1	MGB	43
5.1.2	MGB-SED	50
5.2	MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO DOCE	56
5.2.1	Precipitação	56
5.2.2	Temperatura	65
5.3	IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA VAZÃO	71
5.3.1	Avaliação pontual	71
5.3.2	Análise espacial	81
5.4	IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO	97
5.4.1	Avaliação pontual	97
5.4.2	Análise espacial	105
6	CONCLUSÕES	120
7	RECOMENDAÇÕES	122
	REFERÊNCIAS	123
	APÊNDICE A	139

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas podem ocasionar alterações significativas na geração e transporte de sedimentos, reduzindo o aporte de sedimentos que atingem as zonas costeiras (PRASKIEVICZ et al., 2014; DARBY et al., 2015; DUNN et al., 2019; RANASINGHE et al., 2019). As praias e os processos de sedimentação da planície costeira adjacentes à foz do rio Doce são diretamente afetados pelo rio Doce, como uma continuação natural da evolução geológica da área (ALBINO; SUGUIO, 2010). Segundo Ranasinghe et al. (2019), a redução do aporte de sedimentos dos rios para as zonas costeiras adjacentes pode levar à erosão costeira generalizada e consequentes perdas de solo, com ameaças às comunidades e ao desenvolvimento da zona costeira existentes, além de comprometer a sua expansão.

O ciclo hidrológico é influenciado pelas mudanças climáticas, alterando a frequência e a intensidade das chuvas (IPCC, 2008), o que pode levar a muitos problemas ambientais relacionados aos recursos hídricos, além de significativos impactos nos processos erosivos (NEARING; PRUSKI; O'NEAL, 2004). As projeções futuras indicam que haverá chuvas mais concentradas em algumas regiões, com secas prolongadas e mais frequentes em função da redução da precipitação distribuída (IPCC, 2013).

Os modelos hidrológicos distribuídos, cujos parâmetros têm uma representação conceitual/física dos processos hidrológicos, podem ser usados como ferramentas para estimar o impacto das mudanças climáticas no ciclo hidrológico (SANTOS et al., 2014). Neste sentido, diversos estudos têm avaliado a influência das mudanças climáticas para diferentes finalidades, como produção de energia elétrica (QUEIROZ et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2017; QIN et al., 2020), seca hidrológica¹ (ZHAO et al., 2019), disponibilidade hídrica (SCHUSTER et al., 2020), dinâmica de inundação (SORRIBAS et al., 2016) e regime hidrológico (BAJRACHARYA et al., 2018; BRÊDA et al., 2020).

Os modelos hidrossedimentológicos são ferramentas importantes na investigação dos efeitos das mudanças climáticas na dinâmica de sedimentos, segundo Pandey et al. (2016). Recentemente têm sido investigados os efeitos das mudanças climáticas na

¹Seca hidrológica é um tipo de seca caracterizada por um período mais longo de déficit de precipitação, estando associada à redução dos níveis médios de água em reservatórios superficiais e subterrâneos (MEDEIROS; MAIA; MEDEIROS, 2016).

taxa de erosão (HIPT et al., 2018), na produção (ZABALETA et al., 2014; SANTOS et al., 2015; AZIM et al. 2016; ZUO et al., 2016; ZHOU et al., 2017; ZHANG et al., 2019), no transporte (BUSSI et al., 2016), na produção e transporte (SHRESTHA; WANG, 2018) e na concentração de sedimentos (NILAWAR; WAIKAR, 2019) em bacias hidrográficas.

No Brasil, diversos estudos investigaram os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos (ADAM; COLLISCHONN, 2013; VIOLA et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2017; SCHUSTER; FAN; COLLISCHONN, 2019; SCHUSTER et al., 2020; SANTOS et al., 2019; ANDRADE et al., 2020; BRÊDA et al., 2020; LUCAS-BORJA et al., 2020). Porém, poucos estudos, como Oliveira et al. (2019), têm buscado avaliar esses impactos na geração de sedimentos na bacia do Alto Rio Paranaíba em Minas Gerais, demonstrando que as mudanças climáticas tendem a alterar a geração de sedimentos. Contudo, as alterações variam consideravelmente em função do modelo climático adotado, com reduções significativas das cargas de sedimentos simuladas com o Eta-HadGEM2-ES e com o Eta-CanESM2 e reduções mais brandas com o Eta-BESM. Já os resultados com o Eta-MIROC5 demonstraram aumentos durante períodos de acréscimo da temperatura e diminuição nos demais períodos do século XXI.

A investigação dos efeitos das mudanças climáticas na vazão e na dinâmica dos sedimentos, têm sido realizados por estudos de modelagem hidrológica e sedimentológica utilizando séries históricas de dados meteorológicos, por exemplo, Zhang et al. (2017) que, para compreender os efeitos da variabilidade climática na vazão da bacia do rio Sang-Kan (China), usaram os cenários de clima de 1979 a 2012. Ademais, grande parte dos estudos têm aplicado projeções de modelos climáticos globais (MCG), com resolução espacial de centenas de quilômetros (TIAN et al., 2020; GUO et al., 2020), e de modelos climáticos regionais (MCR), com resolução de dezenas de quilômetros (OLIVEIRA et al., 2019; XU et al., 2019), como dados de entrada de modelos hidrossedimentológicos. Os MCR são capazes de capturar melhor as características das superfícies, como a topografia, importantes na avaliação das mudanças climáticas, fornecendo detalhes necessários para representar as condições climáticas para estudos de escala local (CHOU et al., 2014a; CHOU et al., 2014b).

Desta forma, avaliar os efeitos das mudanças climáticas na vazão e na dinâmica de sedimentos pode fornecer informações importantes para o desenvolvimento de planos de gerenciamento de recursos hídricos e para criação de estratégias de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas para as bacias hidrográficas brasileiras. Neste sentido, este estudo se propõe a investigar os impactos das mudanças climáticas na vazão e na dinâmica de sedimentos da bacia hidrográfica do rio Doce, utilizando o modelo hidrossedimentológico MGB-SED (BUARQUE, 2015; FÖEGER et al., 2019a; FAGUNDES et al., 2020) e projeções futuras do modelo climático regional Eta (MARENGO et al., 2011).

A bacia hidrográfica do rio Doce, localizada no Sudeste brasileiro, possui área de drenagem de 83.465 km², abrangendo os estados de Minas Gerais e do Espírito Santo (COELHO, 2007). Em função do desmatamento e das práticas inadequadas de uso da terra, a bacia produz grande quantidade de sedimentos (SOUZA; KNOPPERS, 2003; LIMA et al., 2005; FAGUNDES, 2018; FAGUNDES et al., 2020). Os recursos hídricos da bacia são imprescindíveis no leste mineiro e noroeste do Espírito Santo, pois fornecem água para agropecuária, complexos industriais e geração de energia elétrica (ANA, 2016), ademais a bacia apresenta reservas minerais significativas. A parte da bacia localizada no Espírito Santo possui como atividades econômicas mais importantes o cultivo do café, olerícolas, fruticultura e a silvicultura (PIRH-DOCE, 2010).

As figuras e as tabelas apresentadas neste trabalho são originais e produzidas pela autora, exceto as referenciadas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar o impacto dos cenários futuros das mudanças climáticas na dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Doce.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as mudanças futuras de precipitação e temperatura na bacia do rio Doce sob as projeções do modelo climático regional Eta.
- Avaliar o impacto das mudanças climáticas na vazão e no transporte de sedimentos da bacia do rio Doce em função das projeções climáticas do modelo climático regional Eta.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

As alterações no regime hidrossedimentológico decorrentes das mudanças climáticas são uma das preocupações atuais, uma vez que as mudanças climáticas estão sobrecarregando cada vez mais os corpos d'água (PETROVIC, 2021). Espera-se, em escala global, que haja aumento da frequência e da intensidade de eventos climáticos extremos, como enchentes, secas e ondas de calor, além da acidificação dos oceanos e a elevação do nível do mar.

Com relação ao impacto hidrossedimentológico das mudanças climáticas, o procedimento geralmente adotado nos estudos consiste da aplicação dos modelos hidrossedimentológicos, previamente calibrados com base em observações na bacia hidrográfica. Esses modelos são aplicados com base em cenários de clima futuro obtidos de modelos de projeção climática globais ou regionais.

3.1 MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS E CENÁRIOS DE EMISSÕES FUTURAS

Os modelos de circulação geral, popularmente chamados de modelos climáticos globais (MCG), são representações matemáticas de processos importantes no sistema climático terrestre. A principal função desses modelos é contribuir para o entendimento da dinâmica dos componentes do sistema climático, tais como temperatura da atmosfera e dos oceanos, precipitação, ventos, nuvens, correntes oceânicas e extensão do gelo marinho e realizar projeções climáticas (IPCC, 2014a).

Tais MCG são ferramentas capazes de fornecer informações sobre a tendência de mudanças climáticas, considerando diferentes cenários de emissões futuras de Gases de Efeito Estufa (GEE) e poluentes atmosféricos e de mudanças no uso da terra. Dentre os fatores que conduzem ao aumento das emissões antropogênicas de GEE estão o crescimento econômico e populacional, as mudanças associadas ao uso de energia e da terra, a tecnologia e as políticas climáticas (IPCC, 2014a).

No Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC-AR4) (IPCC, 2007a) foram usados cenários criados no Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (*Special Report on Emissions Scenarios - SRES*) (IPCC, 2000), comumente chamados de cenários SRES, que estão divididos em cenários A1, A2, B1 e B2. Os cenários SRES baseiam-se em caminhos

alternativos de crescimento populacional e econômico, tecnologias aplicadas e as emissões resultantes de GEE.

No cenário A1 é descrito que haverá rápido crescimento econômico e da população mundial com pico em meados do século XXI, e que serão rapidamente introduzidas tecnologias mais eficientes por três caminhos: uso intensivo de combustível fóssil (A1FI), recursos energéticos não fósseis (A1T) e equilíbrio entre todos os tipos de fontes de energia (A1B). O cenário A2 descreve o alto crescimento populacional associado a pouco desenvolvimento econômico e mudança tecnológica. O cenário B1 descreve rápidas mudanças nas estruturas econômicas e introdução de tecnologias limpas e eficientes. Por fim, o cenário B2 descreve o crescimento econômico com ênfase em soluções locais para sustentabilidade econômica, social e ambiental.

Quatro cenários de emissões futuras de gases e aerossóis, chamados de *Representative Concentration Pathways* (RCP), foram utilizados para desenvolver projeções climáticas no CMIP5 e avaliados no Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC-AR5) (IPCC, 2014a), expressos em termos de forçantes radiativas no final do século XXI. A palavra "*representative*" significa que cada RCP fornece apenas um dos muitos cenários possíveis que levariam a características específicas de forçantes radiativas, enquanto o termo "*pathways*" enfatiza que não apenas os níveis de concentração a longo prazo são de interesse, mas também a trajetória levada ao longo do tempo para alcançar esse resultado (MOSS et al., 2010).

Os RCP incluem um cenário de mitigação rigoroso (RCP 2.6), dois cenários intermediários (RCP 4.5 e RCP 6.0) e um cenário com emissões muito altas de GEE (RCP 8.5). Cenários sem esforços adicionais para restringir as emissões levam a cenários que variam entre o RCP 6.0 e o RCP 8.5. No caso do cenário mais otimista, o RCP 2.6, espera-se que o sistema terrestre alcance um pico da forçante radiativa de cerca de 3 W/m^2 ($\sim 490 \text{ ppm de CO}_{2\text{eq}}$) antes do ano 2100, retornando para $2,6 \text{ W/m}^2$ até 2100; no RCP 4.5 há a estabilização em $4,5 \text{ W/m}^2$ ($\sim 650 \text{ ppm de CO}_{2\text{eq}}$) após 2100; no RCP 6.0 há a estabilização em 6 W/m^2 ($\sim 850 \text{ ppm de CO}_{2\text{eq}}$) após 2100; no cenário mais pessimista, o RCP 8.5, espera-se que o sistema terrestre alcance uma forçante radiativa de $8,5 \text{ W/m}^2$ ($\sim 1370 \text{ ppm de CO}_{2\text{eq}}$) em 2100 (MOSS et al., 2010; VAN VUUREN et al., 2011). A expectativa é de que o aumento da

temperatura média da superfície global no final do século XXI (2081-2100), em relação a 1986 - 2005, seja de 0,3°C a 1,7°C no RCP 2.6, de 1,1°C a 2,6°C no RCP 4.5, de 1,4°C a 3,1°C no RCP 6.0 e de 2,6°C a 4,8°C no RCP 8.5 (IPCC, 2014a).

3.2 MODELOS CLIMÁTICOS REGIONAIS

Os MCG possuem resolução de aproximadamente 100 km a 200 km e, com isso, detalhes locais importantes para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas futuras em escala local podem não ser bem representados (CHOU et al., 2014a; CHOU et al., 2014b). Por esse motivo, tem sido realizada a regionalização, que utiliza modelos climáticos regionais (MCR) forçados por modelos de circulação geral da atmosfera. Os MCG são responsáveis por responder à influência da circulação de grande escala, ao passo que os MCR reproduzem as forçantes dos efeitos locais, sendo influenciados pelas forçantes do modelo global (CABRAL et al., 2016).

Os MCR são modelos de área limitada, ou seja, todo o esforço computacional é direcionado sobre uma determinada área do globo, o que propicia um grande aumento na resolução atingindo dezenas de quilômetros (LAPRISE et al., 2008). As condições de contorno dos MCR são fornecidas pela interpolação de dados simulados por MCG, conhecido como *downscaling* dinâmico (LAPRISE et al., 2008).

3.2.1 Modelo climático regional Eta

O MCR Eta é utilizado operacionalmente pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) desde 1996 para previsões meteorológicas na América do Sul. Além disso, foi desenvolvida uma versão do modelo Eta para estudos de mudanças climáticas (MARENGO et al., 2011). Uma das principais características é a coordenada vertical *eta* (η) (MESINGER, 1984; MESINGER, 1988), que resulta em superfícies de coordenadas aproximadamente horizontais e, assim, reduzem os erros no cálculo das derivadas nessa direção (MESINGER, 2012; LYRA et al., 2017). A coordenada vertical é matematicamente definida por:

$$\eta = \left[\frac{p - p_T}{p_S - p_T} \right] \left[\frac{p_{ref}(z_S) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T} \right], \quad 1$$

onde p é a pressão; p_T é a pressão na superfície superior do modelo; p_S é a pressão na superfície inferior do modelo; p_{ref} é a pressão de referência; z_S é a elevação na superfície inferior do modelo.

Estudos têm avaliado a performance do MCR Eta na representação das séries de precipitação e temperatura, comparando-as com dados observados, bem como as tendências para o século XXI (CHOU et al., 2014a; CHOU et al., 2014b; LYRA et al., 2017; ALMAGRO et al., 2020).

As simulações com o Eta-HadGEM2-ES, o Eta-BESM e o Eta-MIROC5 para a América do Sul, América Central e Caribe mostraram que quando comparadas a dados observados, a simulação da precipitação média sazonal é subestimada em grande parte do domínio no verão austral (dezembro, janeiro e fevereiro - DJF), ao passo que no inverno (junho, julho e agosto - JJA) é superestimada no sul da Amazônia e subestimada na região sul do Brasil e na costa leste do nordeste do Brasil, de acordo com Chou et al. (2014a). Em relação à correlação espacial da precipitação média sazonal simulada e observada, o Eta-HadGEM2-ES possui maior correlação no verão austral e o Eta-BESM no inverno para a região Centro-Sul do Brasil que abrange a região Sudeste, Sul e os estados do Mato Grosso do Sul e Goiás. Em relação à temperatura média anual, foi subestimada em todas as simulações em grande parte do ano para todas as regiões do Brasil.

As projeções climáticas do modelo regional Eta-HadGEM2-ES e do Eta-MIROC5 para América do Sul no século XXI indicam tendências maiores de aquecimento para o Eta-HadGEM2-ES em relação às simulações do Eta-MIROC5. Em relação a precipitação, as simulações do Eta-MIROC5 apresentam maior precipitação comparadas ao Eta-HadGEM2-ES durante a estação chuvosa (DJF) e menor durante a estação seca (JJA). Logo, o Eta-MIROC5 exibe amplitude maior do ciclo anual de precipitação, conforme mostrado por Chou et al. (2014b) a partir de simulações do MCR Eta com resolução espacial de 20 km. Ademais, há tendência de redução da precipitação durante todas as estações do ano para as simulações do Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, exceto em setembro, outubro e novembro (SON) em que o Eta-MIROC5 apresenta pequena tendência de aumento na região Centro-Sul do Brasil durante o Século XXI, havendo aumento dos valores extremos de temperatura e precipitação à medida que se avança para o final do século XXI.

Lyra et al. (2017) avaliaram as mudanças climáticas nas regiões metropolitanas de Rio de Janeiro, São Paulo e Santos utilizando o MCR Eta com resolução espacial de 05 km, conduzido nos limites laterais por simulações do Eta com resolução de 20 km, que por sua vez, foi conduzido pelo MCG HadGEM2-ES (COLLINS et al., 2011; MARTIN et al., 2011). Quando comparado com o Eta-HadGEM2-ES de 20 km, o Eta-HadGEM2-ES de 05 km possui melhor representação da distribuição espacial de temperatura e precipitação, dos ciclos anuais e da distribuição de frequências. Segundo os autores, porém, há subestimação da precipitação e as simulações não representam as chuvas mais fortes que 150 mm/dia, independente da resolução de 05 km ou 20 km. De modo geral, os autores estimam que os ciclos anuais de precipitação sofrerão uma grande redução nos meses mais chuvosos e que a temperatura máxima aumentará aproximadamente 9°C para o RCP 8.5 até o fim do século XXI.

Recentemente, Almagro et al. (2020) realizaram uma avaliação do desempenho de Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para representar a precipitação média mensal e sazonal de longo período sobre os principais biomas brasileiros no período de 1980 a 2005. Os autores indicam que o Eta-HadGEM2-ES representa melhor a precipitação para o bioma Mata Atlântica, Cerrado e Pampa, ao passo que o Eta-MIROC5 para a Caatinga e Pantanal. No entanto, o Eta-HadGEM2-ES e o Eta-MIROC5 possuem vieses relacionados ao MCR Eta, ao *downscaling* com os MCG e às incertezas dos dados observados. Esses vieses podem estar presentes nas projeções futuras, comprometendo o uso dos dados sem correção para aplicação hidrológica, segundo Almagro et al. (2020).

3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A modelagem hidrológica é de grande importância para compreensão dos processos hidrológicos que ocorrem em bacias hidrográficas, sendo uma representação matemática dos processos do ciclo hidrológico (TUCCI, 1998). Inicialmente os modelos hidrológicos eram simplificados baseados em relações empíricas ou conceituais, e a bacia hidrográfica era representada de forma concentrada. Porém, processos como a percolação da água no interior do solo e o escoamento nos canais são processos distribuídos, pois variam no espaço ao longo da bacia (CHOW, 1988). Devido à maior disponibilidade de informações distribuídas, como tipos de solo, uso

da terra e cobertura vegetal, modelos digitais de elevação e dados de chuva por satélite, tem crescido o uso de modelos hidrológicos distribuídos fisicamente significativos (TODINI, 2007).

Alguns estudos têm utilizado modelos hidrológicos associados a séries históricas de dados climáticos tratados estatisticamente para projeção de clima futuro e projeções diretas de MCG e MCR. As projeções de clima futuro atreladas a modelos hidrológicos são utilizadas na avaliação dos impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico (BAJRACHARYA et al., 2018; SANTOS et al., 2019; ANDRADE et al., 2020), no armazenamento e geração de energia elétrica (QUEIROZ et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2017; QIN et al., 2020), no escoamento superficial (LUCAS-BORJA et al., 2020), na ocorrência, duração e intensidade de secas hidrológicas (ZHAO et al., 2019). Há, também, investigação do impacto das mudanças climáticas e das incertezas das projeções climáticas na vazão (TAN et al., 2014). O efeito das mudanças climáticas e a sensibilidade dos resultados em relação à diferentes modelos hidrológicos também são foco de estudos, como Karlsson et al. (2016).

3.3.1 Modelo hidrológico de grandes bacias (MGB)

O MGB (COLLISCHONN; TUCCI, 2001; COLLISCHONN et al., 2007) foi desenvolvido para simular diversos processos do ciclo hidrológico, como balanço hídrico no solo, evapotranspiração, interceptação, geração e propagação do escoamento, entre outros (COLLISCHONN; TUCCI, 2001). O MGB é um modelo hidrológico distribuído baseado em processos, ou seja, são utilizadas equações físicas e conceituais para simular o ciclo hidrológico na superfície terrestre.

No MGB, a bacia hidrográfica é discretizada em unidades menores interconectadas chamadas de minibacias, que são pequenas áreas de contribuição para cada trecho de rio correspondente, onde ocorrerá a propagação de vazão. As minibacias são definidas em função do Modelo Digital de Elevação (MDE) e divididas em Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que consistem na combinação de mapas de tipos do solo e mapas de cobertura vegetal ou uso da terra.

A propagação do escoamento na rede de drenagem dentro do MGB é realizada através do método de Muskingum-Cunge ou do método inercial de propagação de vazão, incluído no MGB por Pontes et al. (2015) e Pontes et al. (2017). O método

inercial é uma aproximação das equações de Saint-Venant que despreza o termo de inércia advectiva na equação da dinâmica. As equações de Saint-Venant (CHOW, 1988; CHANSON, 2004) são um conjunto de equações diferenciais que representam a conservação de massa e de quantidade de movimento no rio.

Fan e Collischonn (2014) integraram o MGB a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), facilitando a criação dos dados de entrada e o entendimento e análise dos resultados. Como descrito anteriormente, Pontes et al. (2015) e Pontes et al. (2017) aprimoraram módulo de propagação de vazões do MGB com a implementação do modelo inercial, o qual foi aplicado na bacia do rio da Prata. Essa nova versão proporcionou um avanço na discretização da bacia hidrográfica, com objetivo de representar regiões muito planas e com drenagem complexa.

Desde o seu desenvolvimento, o MGB tem sido aplicado e validado em diferentes bacias da América do Sul (COLLISCHONN; TUCCI, 2001; COLLISCHONN et al., 2007; PAIVA, 2009; GETIRANA et al., 2011; JIMÉNEZ, 2011; PAIVA et al., 2011; PAZ et al., 2013; LOPES et al., 2018; SIQUEIRA et al., 2018; FLEISCHMANN; COLLISCHONN; PAIVA, 2019). Por exemplo, Getirana et al. (2011) descreveram a modelagem hidrológica da bacia do rio Negro com o auxílio conjunto da altimetria e gravimetria espaciais para calibração e validação. Paiva et al. (2011) utilizaram estimativas de precipitação TRMM na modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia Amazônica. Paz et al. (2013) avaliaram a influência do balanço hídrico vertical na dinâmica de inundação do rio Paraguai.

O MGB também foi utilizado para avaliação dos impactos das mudanças climáticas em recursos hídricos em diversos estudos (COLLISCHONN et al., 2005; NÓBREGA et al., 2011; ADAM; COLLISCHONN, 2013; QUEIROZ et al., 2016; SCHUSTER; FAN; COLLISCHONN, 2019; SCHUSTER et al., 2020; BRÊDA et al.; 2020). Collischonn et al. (2005) utilizaram o MGB para previsão sazonal de vazões na bacia do rio Uruguai, combinando-o com o modelo climático do CPTEC. As previsões retrospectivas de vazão foram realizadas para os anos de 1995 a 2001 e comparadas com a série histórica de vazões observadas usando os parâmetros estatísticos média e mediana mensais. De acordo com os autores, as chuvas geradas pelo modelo climático são subestimadas, principalmente na estação mais seca, o inverno, porém com a correção

é possível diminuir os erros sistemáticos das previsões de chuvas e gerar previsões de vazão maiores que as geradas por médias ou medianas mensais.

Nóbrega et al. (2011) quantificaram as incertezas relacionadas ao impacto das mudanças climáticas do rio Grande, um dos principais afluentes do rio Paraná, considerando os cenários de emissão de gases de efeito estufa (A1B, A2, B1 e B2) adotados no IPCC-AR4, aquecimento de temperatura prescrito de 1°C a 6°C, seis MCG da Terceira Fase Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados - CMIP3 aplicadas ao MGB. Para os autores, na bacia do rio Grande a principal fonte de incerteza está nos MCG, comparados ao cenário de emissão e ao aumento da temperatura média.

Adam e Collischonn (2013) realizaram a análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão da bacia hidrográfica do rio Ibicuí. Séries futuras de temperatura e precipitação foram obtidas por meio do gerador de cenários MAGICC/SCENGEN, considerando os resultados de 20 MCG e três cenários de emissão de gases de efeito estufa (A1B, A2 e B2) do IPCC-AR4. Segundos os autores, a principal fonte de incerteza está relacionada à magnitude das variações da precipitação e à discordância nos resultados dos MCG sobre aumento ou diminuição da precipitação. Além disso, as vazões máximas e médias são as mais sensíveis às mudanças na precipitação na bacia.

Também foram realizados estudos com MGB para avaliar os impactos das mudanças climáticas na geração de energia hidrelétrica brasileira (QUEIROZ et al., 2016) usando o cenário de mudança climática A1B introduzido no MCR Eta (MARENGO et al., 2011). Os autores mostraram que a geração de energia será menor em termos percentuais no século XXI, principalmente em função da redução da precipitação na região amazônica, afetando drasticamente a capacidade de geração de energia.

Os efeitos das mudanças climáticas na vazão e nas inundações na bacia Amazônica foram avaliados por Sorribas et al. (2016) usando o MGB e projeções futuras (2070 - 2099), obtidas de cinco MCG do CMIP5 para o cenário RCP 8.5. Os resultados das vazões demonstraram grande diferença em função dos modelos climáticos.

Schuster et al. (2020) avaliaram a disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica transfronteiriça da Laguna dos Patos, com base em dados de 20 MCG do CMIP5

aplicados ao MGB. A remoção de viés dos dados climatológicos foi por meio do método denominado *Delta Change* (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012). A maior parte dos resultados indicam tendência de aumento das vazões médias projetadas. Sendo que, a maior tendência de aumento das vazões é a partir da simulação com as projeções a partir de dados do MCG HadGEM2-ES.

Brêda et al. (2020) avaliaram o efeito das mudanças climáticas projetadas para o final do século (2081 - 2100) utilizando dados de 25 MCG para os RCP 4.5 e RCP 8.5 como entrada do MGB na América do Sul. Assim como em Schuster et al. (2020), a remoção de viés dos dados climatológicos foi realizada através do método *Delta Change* (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012).

Os autores observaram redução da precipitação e do escoamento na maior parte da América do Sul. Sendo esperadas grandes reduções na vazão média anual para as bacias Orinoco, Tocantins e Amazonas, somente a bacia do Uruguai apresenta tendência de aumento da vazão média. Concluiu-se que além das opções de modelagem, a correção de viés dos dados de clima pode acrescentar diferentes fontes de incerteza para os resultados das projeções.

3.4 GERAÇÃO DE SEDIMENTOS

O processo de erosão consiste na remoção e no transporte do solo devido aos agentes erosivos naturais ou aos agentes erosivos antropogênicos (PANDEY et al., 2016). Quando a erosão é causada pela água, ela é denominada erosão hídrica. Dentre os fatores que podem afetar a erosão hídrica estão as interações entre condições climáticas, tipo de solo, cobertura vegetal, relevo e uso da terra. De acordo com Carvalho (2008), a erosão hídrica pode ser definida como:

- a erosão por *splash* é a desagregação das partículas devido ao impacto das gotas de chuva ao caírem sobre as superfícies desprotegidas;
- a erosão laminar ocorre durante fortes chuvas, quando já houve saturação da camada superficial do solo, sendo produzida por um desgaste suave e uniforme da camada superficial em toda sua extensão;
- a erosão em sulcos e ravinas é caracterizada por filetes de água, que se dividem em braços que se espalham e se juntam e infiltrando-se depois de uma

curta distância, deposita o material transportado. O escoamento da água pode formar depressões que aos poucos são capazes de se transformar em sulcos;

- a erosão por escoamento concentrado é provocada pela falta de boa estrutura do solo que tenha a camada impermeável profunda, fazendo com que os sulcos sofram deslizamentos e desabamentos, formando as voçorocas.

A taxa de erosão hídrica é limitada pelo desagregamento das partículas ou capacidade de transporte devido à interação de gotas de chuva e o escoamento (NI et al., 2019), logo quando a taxa de desagregamento é maior que a capacidade de transporte, ocorre a deposição. Reduções nas áreas de florestas podem alterar a estrutura do solo, contribuindo para uma erosão mais acelerada, causando mudanças na dinâmica da água e reduzindo a disponibilidade hídrica (ALVARENGA et al., 2016a). Routschek, Schmidt e Kreienkamp (2014) afirmaram que as mudanças climáticas acarretarão um expressivo aumento da erosão, agravado pela não adaptação do uso da terra.

3.4.1 Modelagem da geração e do transporte de sedimentos

Facilitou-se o desenvolvimento e a aplicação de modelagem de erosão e de transporte de sedimentos com a criação de novos algoritmos, o avanço tecnológico e a disponibilização de dados, tais como modelos digitais de elevação e precipitação por sensoriamento remoto, (PANDEY et al., 2016). Diversos modelos de erosão e transporte de sedimentos desenvolvidos diferem nos processos que conseguem representar, na complexidade, nos dados de entrada, na extensão do uso e nos tipos de resultados obtidos (MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003). No que diz respeito à modelagem dos processos físicos, aos algoritmos que descrevem os processos e aos dados utilizados, os modelos podem ser classificados em empíricos, conceituais ou físicos (MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003; PANDEY et al., 2016). Em função da variabilidade espacial em que os modelos representam a área de estudo e apresentam os resultados, eles podem ser definidos como concentrados ou distribuídos (TUCCI, 1998).

De acordo com Merritt, Letcher e Jakeman (2003), os modelos empíricos são considerados simples em relação aos conceituais e físicos. De modo geral, são baseados em observações, caracterizando as respostas a partir dos dados de entrada

e ignorando a variabilidade espacial das características da bacia. Os modelos conceituais, por outro lado, representam a bacia como uma série de armazenamentos internos (MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003). Esses modelos incluem a descrição geral dos processos, sem incluir os detalhes específicos das interações dos processos na bacia. Já os modelos físicos são baseados nas equações físicas fundamentais da conservação da massa e de movimento que descrevem o escoamento e a geração de sedimentos.

Os modelos concentrados consideram que a bacia é homogênea e os seus parâmetros não representam a variabilidade espacial das propriedades físicas da bacia (TUCCI, 1998). Esses modelos são usados em pequenas bacias com propriedades homogêneas ou quando se deseja obter uma informação média e preliminar na bacia. Já os modelos distribuídos representam a variabilidade espacial dos processos e resultados (TUCCI, 1998), porém podem requerer grande quantidade de dados. Para grandes bacias hidrográficas utilizam-se modelos do tipo distribuídos, pois representam a heterogeneidade dos processos na bacia e são compatíveis com as limitações de quantidade e qualidade das informações disponíveis nessa extensão.

No que diz respeito aos modelos de sedimentos, eles normalmente são divididos em modelos de geração de sedimentos na bacia e de transporte de sedimentos em rios e canais. Sendo preferíveis os modelos integrados de geração de sedimentos na bacia e de transporte de sedimentos ao longo da rede de drenagem e que integrem ainda um módulo hidrológico a sua estrutura.

As primeiras modelagens de erosão e geração de sedimentos utilizaram modelos empíricos como a Equação Universal de Perda de Solo - USLE (WISCHMEIER; SMITH, 1965; WISCHMEIER; SMITH, 1978). A USLE permite prever a perda média anual de longo prazo do solo, não sendo baseada em eventos, o que não possibilita identificar os eventos com maior probabilidade de afetar a erosão (MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003). Muitos modelos utilizam a USLE e suas variações (RUSLE, RUSLE2, MUSLE, USLE-M) para estimar a geração de sedimentos e modelar o transporte de sedimentos em grandes bacias, entre eles pode-se citar o SWAT (ARNOLD et al., 1998), LASCAM (VINEY; SIVAPALAN, 1999) e o MGB-SED (BUARQUE, 2015; FÖEGER et al., 2019a; FAGUNDES et al., 2020).

Embora o escoamento e o transporte de sedimentos sejam tridimensionais em cursos d'água, os modelos tridimensionais demandam grande esforço computacional. Com simplificações, tais como média de profundidade e de largura, são estabelecidos os modelos uni e bidimensionais. Apesar das simplificações, os modelos unidimensionais são largamente aplicados na modelagem do transporte de sedimentos nos cursos d'água (FRAGOSO JR; FERREIRA; DA MOTTA, 2009).

3.5 MODELAGEM DE SEDIMENTOS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Diversos estudos indicam que as mudanças climáticas podem desempenhar um papel importante não apenas na vazão dos corpos d'água, mas na futura erosão do solo e, conseqüente, geração de sedimentos (ZABALETA et al., 2014; SANTOS et al., 2015; AZIM et al., 2016; BUSSI et al., 2016; SHRESTHA et al., 2016; ZUO et al., 2016; ZHOU et al., 2017; HIPT et al., 2018; ZHANG et al., 2019; NILAWAR; WAIKAR, 2019).

Santos et al. (2015) avaliaram os efeitos das alterações do uso da terra e das mudanças climáticas entre 1967 - 1974 e 1995 - 2008 na geração de sedimentos da bacia do rio Tapacurá usando o modelo SWAT. Foram utilizados dois mapas de uso e cobertura da terra, o primeiro para o período de 1967 - 1974 possuindo como usos da terra predominantes a caatinga (48%), a agricultura (39%) e a floresta tropical (9%), e o segundo para o período de 1995 - 2008 apresentando como usos predominantes a agricultura (39%), a pecuária (39%) e a cana (11%). Os resultados mostraram que a geração de sedimentos reduziu de 18,21 t.ha⁻¹.ano⁻¹ entre 1967 e 1974 para 7,67 t.ha⁻¹.ano⁻¹ entre 1995 - 2008. Segundo os autores, a mudança na geração de sedimentos é devido à variabilidade de uso e cobertura da terra, bem como à diminuição da precipitação média no período estudado.

As incertezas nas estimativas de vazão e de sedimentos foram avaliadas na bacia do rio Mekong por Shrestha et al. (2016), usando o modelo SWAT associado a três MCG do CMIP5, três cenários de emissão (RCP 2.6, RCP 6.0 e RCP 8.5) e três conjuntos de parâmetros estatísticos. De acordo com os autores, as incertezas dos MCG e RCP aumentam ao longo do tempo para precipitação e temperatura. Para todas as simulações, a geração de sedimentos da bacia aumentará de acordo com as projeções, com probabilidade de aumento de 63,5% a 94,0%. Os autores concluíram,

que a geração de sedimentos comparada à vazão projetada, é mais sensível às mudanças de precipitação e temperatura.

Zhou et al. (2017) avaliaram os efeitos potenciais das mudanças climáticas na geração de sedimentos na bacia do rio Yinma na China. Os autores aplicaram o modelo SWAT para simulação mensal usando os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 2021 a 2050. De acordo com os resultados, para ambas as projeções de mudanças climáticas há aumento da vazão e da geração de sedimentos anual em comparação com o período de referência (1981 - 2010). A produção de sedimentos anual aumentará 237% para o RCP 4.5 e 133% para o RCP 8.5, principalmente devido às mudanças na precipitação.

Nilawar e Waikar (2019) avaliaram o impacto das mudanças climáticas na vazão e na concentração de sedimentos na bacia do rio Purna na Índia entre 2009 e 2099 com base em três MCR, no RCP 4.5 e no RCP 8.5 e no SWAT. De acordo com os resultados obtidos por Nilawar e Waikar (2019), a precipitação mensal prevista é aumentada durante a estação chuvosa, principalmente para o RCP 8.5, e diminui durante a estação mais seca. A concentração média anual de sedimentos aumentou de 1,36 a 15,99% e 2,23 a 14,90% sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5, respectivamente. No entanto, haverá redução da concentração média mensal na estação mais seca para a bacia do rio Purna, segundo os autores.

Zuo et al. (2016) avaliaram os efeitos das mudanças climáticas e do uso da terra no escoamento superficial e na produção de sedimentos na bacia do rio Huangfuchuan na China. As mudanças no uso da terra foram avaliadas com base em mapas de uso da terra de 1980, para o período de 1979 a 1984 e de 2005 para o período de 2006 a 2011. De acordo com autores, as alterações no uso da terra e as mudanças climáticas impactam principalmente na produção de sedimentos. Prados e terras agrícolas, tipos dominantes de uso da terra, diminuíram 0,86% e 3,74%, respectivamente, ao passo que, as florestas e as terras nuas aumentaram 14,67% e 15,55%. O efeito do uso da terra diminuiu 25,3% da produção de água anual e 40,6% da produção de sedimentos anual, enquanto o efeito da mudança climática nas duas variáveis foi uma redução de 53,7% e 81,0%, respectivamente.

Os impactos das variações climáticas e alterações na cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Tamisa (Reino Unido) foram avaliados por Bussi et al. (2016),

considerando um conjunto de alterações na série de dados observados de temperatura e precipitação, que resultaram em 225 séries temporais de precipitação e temperatura. Segundo Bussi et al. (2016), o impacto das mudanças no uso da terra é pequeno em comparação com a faixa de incerteza das mudanças climáticas, mas certas mudanças no uso da terra podem aumentar ou reduzir sistematicamente o impacto das mudanças climáticas, uma vez que um aumento de 70% na extensão das terras aráveis pode aumentar a produção de sedimentos em cerca de 12% nas áreas de planície e uma redução de 50% das terras aráveis pode diminuir a produção de sedimentos em cerca de 13%, em relação ao período de controle (1960 - 1990).

Hipt et al. (2018) simularam o impacto das mudanças climáticas na erosão em uma bacia hidrográfica na África Ocidental. Os dados climáticos oriundos de seis MCR e MCG para os RCP 4.5 e RCP 8.5 foram usados para simulações com o SHETRAN, modelo hidrológico e de erosão do solo. Segundo os autores, é necessário aplicar a correção de viés para obtenção de simulações de descarga e erosão mais próximas da realidade, uma vez que há superestimação da precipitação em relação as observações, no entanto, de acordo com os autores a correção não remove completamente os vieses. De modo geral, há grandes incertezas sobre as previsões de descarga total e a geração de sedimentos em suspensão.

Oliveira et al. (2019) avaliaram os impactos das mudanças climáticas na vazão e na geração de sedimentos na bacia do Alto Paranaíba, no Sudeste do Brasil. Os dados de precipitação e temperatura futuros do Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5, Eta-BESM e Eta-CanESM2, com resolução espacial de 20 km, foram usados como dados de entrada do modelo SWAT. Para correção de viés dos dados de precipitação e temperatura foi aplicado o escalonamento linear (LENDERINK; BUIHAND; VAN DEURSEN, 2007).

Em relação a 1961 - 2005, os resultados indicam reduções na vazão mensal de -27,8% a -84,3% durante o período chuvoso ao longo do século XXI, com maior impacto hidrológico para as simulações com o Eta-HadGEM2-ES e o Eta-CanESM2. As maiores reduções das cargas anuais de sedimentos projetadas, de -28,4 a -79,7%, foram para o Eta-HadGEM2-ES e o Eta-CanESM2. Reduções mais brandas entre -7,4 a -59,1% foram estimadas a partir do Eta-BESM, ao passo que o Eta-MIROC5 apresentou variação de -21,7% a +12,8%. De acordo com Chou et al. (2014a), o Eta-

HadGEM2-ES é mais sensível ao incremento dos gases de efeito estufa. Para os autores, a bacia do Alto Paranaíba sofrerá graves problemas de disponibilidade hídrica ao longo do século XXI.

Os estudos mostram que reduções na precipitação ocasionam redução na produção e no transporte de sedimentos, ao passo que o aumento da precipitação causa aumento nos sedimentos. Além disso, os trabalhos mostraram que a produção e o transporte de sedimentos são mais sensíveis às mudanças climáticas em comparação com a vazão. A avaliação dos impactos das mudanças climáticas na produção e no transporte de sedimentos em bacias hidrográficas brasileiras é restrita a algumas pesquisas (SANTOS et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2019), que investigam com base em séries históricas de dados observados de clima e com base em simulações com passo de tempo mensal. Há uma escassez de estudos que consideram dados de modelos climáticos com escala de tempo diária, como dados de entrada de modelos hidrossedimentológicos.

3.6 MGB-SED

O MGB-SED, desenvolvido por Buarque (2015) e aperfeiçoado por Föeger et al. (2019a) e Fagundes et al. (2020), consiste em um modelo de geração e transporte de sedimentos para grandes bacias acoplado à estrutura da versão atual do MGB com propagação inercial de vazões (PONTES et al., 2015; PONTES et al., 2017).

O MGB-SED é dividido nas componentes bacia, rio e planície de inundação. Na componente bacia é estimada a perda de solo na camada superficial de cada minibacia e a contribuição de sedimentos destas para a rede de drenagem. Na componente rio ocorre a propagação das cargas de sedimentos provenientes das minibacias e daquelas advindas da erosão do próprio canal, considerando o volume de sedimento erodido e depositado em cada trecho do canal. Na componente planície, ocorre troca e armazenamento de sedimentos finos por deposição entre rios e planícies de inundação (BUARQUE, 2015).

Recentemente, Föeger et al. (2019a) acoplaram o MGB-SED ao MGB com o método inercial de propagação de vazão, estabelecendo a versão mais recente do modelo de sedimentos. A geração de sedimentos é estimada em cada minibacia, para cada URH, utilizando a Equação Universal de Perda de Solo Modificada – MUSLE (WILLIAMS,

1975), descrita na Equação 3. O volume de escoamento superficial gerado pelo MGB e a vazão de pico do escoamento são utilizados pela MUSLE para estimar a perda de solo. Em virtude da escala na qual o modelo é aplicado, parte dos sedimentos gerados nas minibacias não chegam à rede de drenagem em um passo de tempo do modelo (diário), de forma que a carga de sedimentos geradas nas minibacias são retardadas antes de chegarem na drenagem aplicando-se o conceito de reservatório linear simples.

$$SED = \alpha(Q_{sup} \times q_{pico} \times A)^{\beta} \times K \times C \times P \times LS , \quad 2$$

sendo SED [t/dia] é a geração de sedimentos, Q_{sup} [mm/ha] é o volume de escoamento superficial, q_{pico} [m³/s] é a taxa de pico do escoamento superficial, A [ha] é a área superficial, K [0,013.t.m².h./m³.t.cm] é o fator erodibilidade do solo, C [-] é fator de cobertura e manejo do solo, P [-] é o fator de práticas conservacionistas, LS [-] é o fator topográfico, α e β são coeficientes de ajuste calibrados de acordo com a metodologia proposta por Fagundes (2018).

A carga de sedimentos geradas nas minibacias é dividida em 3 classes de partículas: silte, argila e areia. Posteriormente é realizada a propagação destas classes de partículas na rede de drenagem, considerando que os sedimentos finos (silte e argila) são transportados em suspensão, enquanto a classe areia é considerada como cargas de fundo, para a qual é permitido os processos de erosão ou deposição. Em resumo, o modelo assume que o transporte no rio é separado em transporte de material fino em suspensão e em transporte de partículas maiores como carga de fundo. Haverá deposição, caso o volume de areia seja maior que a capacidade de transporte do trecho, caso contrário haverá erosão. Silte e argila mantém-se em suspensão durante a propagação em virtude da turbulência do escoamento, não contribuindo para erosão ou deposição na calha do rio, embora o modelo permita troca lateral de sedimentos em suspensão entre o rio e sua planície de inundação, com possibilidade de deposição nas planícies (BUARQUE, 2015).

Estudos utilizando o MGB-SED obtiveram bons resultados comparados a dados observados de sedimentos, como Buarque (2015) e Föeger et al. (2019a) na bacia do rio Madeira, Fagundes et al. (2017), Fagundes (2018) e Fagundes, Fan e Paiva (2019),

Fagundes et al. (2020) na bacia do rio Doce e Rossoni, Fan e Lopes (2018) no Lago Guaíba/RS.

Dela Costa et al. (2020) investigaram os impactos das mudanças climáticas na vazão e na descarga sólida em suspensão na bacia hidrográfica do rio Doce, utilizando o modelo hidrossedimentológico MGB-SED (BUARQUE, 2015; FÖEGER et al., 2019a; FAGUNDES et al., 2020) e projeções futuras do MCR Eta (MARENGO et al., 2011).

4 METODOLOGIA

Para atingir o objetivo de avaliar o impacto dos cenários futuros das mudanças climáticas na dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Doce, foi utilizado o modelo hidrossedimentológico MGB-SED, previamente calibrado e validado, para simular o transporte de sedimentos e a vazão futuros, com base em projeções futuras de clima e precipitação do MCR Eta para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Obtendo resultados que foram analisados a partir de médias de longo período nos trechos de rios simulados, e comparados com os resultados das simulações do período atual, que foram realizadas com dados observados de precipitação e clima.

Os próximos itens descrevem a área de estudo, a modelagem hidrológica, a modelagem de sedimentos, incluindo os procedimentos de calibração e validação, os dados hidrológicos, de sedimentos e meteorológicos. Além dos dados do MCR Eta, a metodologia de correção de viés e os períodos futuros de simulação.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Doce está localizada no sudeste brasileiro, integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste entre as latitudes 17°45' e 21°15' S e as longitudes 39°30' e 43°45' W com área de drenagem de 83.465 km², sendo que 86% de seu território está no estado de Minas Gerais e 14% no Espírito Santo (COELHO, 2007).

O rio Doce é formado, inicialmente, pelo rio Xopotó, que desagua no rio Piranga e na confluência desse com o ribeirão do Carmo entre os municípios de Ponte Nova, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado em Minas Gerais. O curso d'água principal da bacia tem extensão de 850 km desde a nascente do rio Xopotó, na serra da Mantiqueira, até a sua foz, em Regência no município de Linhares - ES.

Os principais afluentes do rio Doce pela margem esquerda no estado de Minas Gerais são os rios do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande e Suaçuí Grande e no Espírito Santo são São José e Pancas, já pela margem direita em Minas Gerais são os rios Casca, Matipó, Caratinga-Cuieté e Manhuaçu e no Espírito Santo são os rios Guandu, Santa Joana e Santa Maria do Rio Doce (PIRH-DOCE, 2010). A bacia hidrográfica do rio Doce e os seus principais afluentes são apresentados na Figura 1.



Figura 1: Localização da bacia do rio Doce e seus principais afluentes.

A bacia faz limite ao sul com a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, a sudoeste com a bacia do rio Grande, a oeste com a bacia do rio São Francisco, ao norte e noroeste com a bacia do rio Jequitinhonha, a sudeste com as bacias do litoral sul do Espírito Santo e a nordeste com as bacias do litoral norte do Espírito Santo.

A bacia hidrográfica rio Doce compreende 225 municípios total ou parcialmente inseridos, destes 200 pertencem ao estado de Minas Gerais e 25 ao Espírito Santo, e uma população de cerca de 3,6 milhões de habitantes (ANA, 2016), com mais de 70% da população total da bacia vivendo em áreas urbanas.

A bacia do rio Doce está inserida em uma região de clima tropical úmido, sendo marcada por heterogeneidade climática. De acordo com a classificação de Köppen, a bacia do rio Doce pode ser classificada em três tipos climáticos: o clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos, presente nas vertentes das serras da Mantiqueira e do Espinhaço e nas nascentes do rio Doce; clima tropical de altitude

com chuvas de verão e verões quentes, presentes nas nascentes de seus afluentes; e clima quente com chuvas de verão, presentes nos trechos médio e baixo do rio Doce e de seus afluentes (PINTO; LIMA; ZANETTI, 2015). A heterogeneidade climática presente na bacia deve-se a um conjunto de fatores, principalmente, em função da posição geográfica, características de relevo e do encontro de massas de ar que atuam no interior da bacia, como é o caso do Sistema Tropical Atlântico, que prevalece em grande parte do ano, e do Sistema Equatorial Continental, ocasionando Linhas de Instabilidade Tropical, que provocam chuvas intensas predominantemente no verão (COELHO, 2009).

O regime de chuvas na bacia possui dois períodos bem definidos, o período chuvoso, nos meses de outubro a março, e o período seco, entre abril e setembro (CUPOLILLO, 2008a). As regiões litorâneas e de maior altitude são as que apresentam maiores totais anuais, variando entre 900 mm e 1500 mm, enquanto os fundos de vales apresentam os menores totais anuais, variando entre 700 e 1000 mm (COELHO, 2006).

Segundo Oliveira e Quaresma (2017), na estação de monitoramento da Ponte de Colatina - ES entre 1990 e 2003 a vazão mediana anual mínima do rio Doce foi de 305 m³/s em 2001 e máxima 897 m³/s em 2005, representando o único ano em que a mediana superou 800 m³/s, e o valor mediano de todos os anos foi de 564 m³/s. A estação seca, de abril a setembro, é caracterizada por vazões medianas mensais mais baixas (368 m³/s), já a estação chuvosa, entre outubro e março, é caracterizada por vazões medianas mensais mais altas (965 m³/s).

O relevo da bacia é acidentado, fortemente ondulado e montanhoso, caracterizado por serras, cordilheiras e colinas alongadas na porção mais ocidental da bacia, e por tabuleiros e planícies na porção oriental da bacia (OLIVEIRA; QUARESMA, 2017). Na bacia rio Doce predominam dois tipos de solos, os Latossolos Vermelho-Amarelos e Argissolos Vermelhos (COELHO, 2007), como mostrado na Figura 2. Os Latossolos Vermelho-Amarelos são solos profundos e acentuadamente drenados, já os Argissolos Vermelhos compreendem solos de profundidade variável.

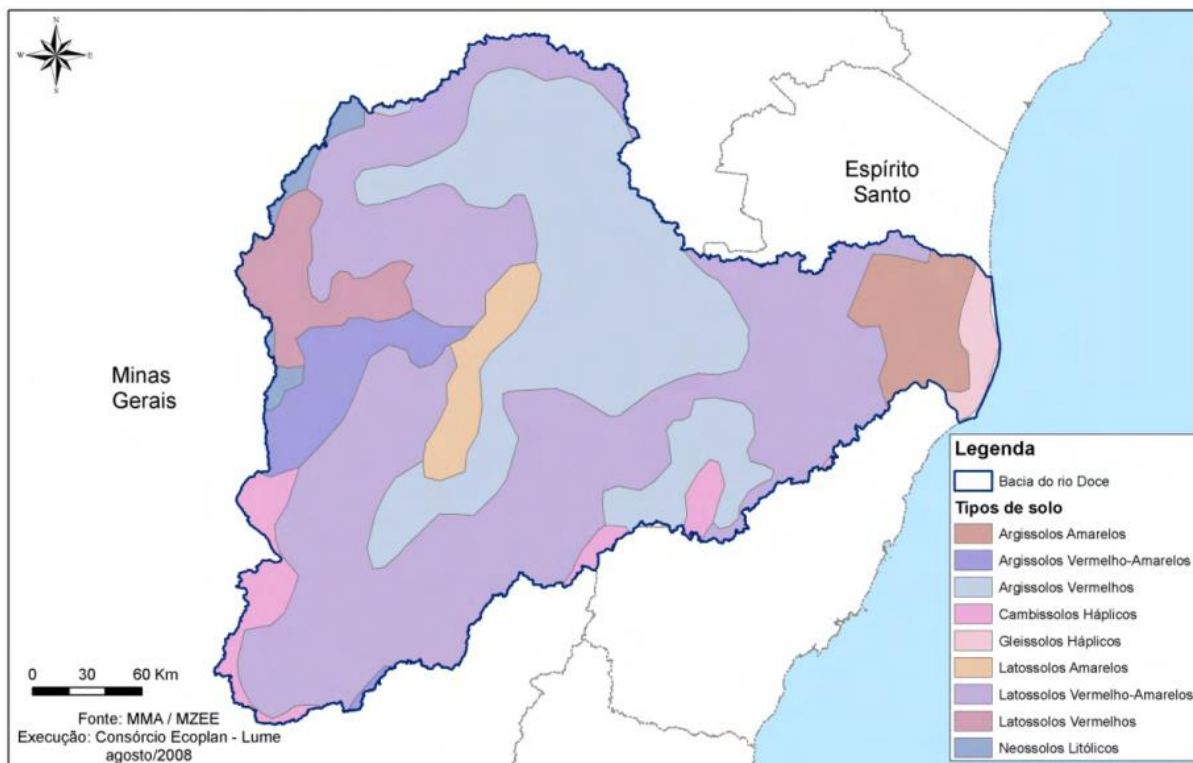


Figura 2: Tipos de solo presentes na bacia do rio Doce. Fonte: adaptado de PIRH-DOCE (2010).

A atividade econômica da bacia do rio Doce consiste, principalmente, em agropecuária representada pela cultura de café, cana-de-açúcar, criação de gado leiteiro e de corte e na suinocultura; agroindústria sucroalcooleira; mineração; indústria de celulose, siderurgia e laticínios; comércio e os complexos industriais; e geração de energia elétrica (PIRH-DOCE, 2010). Além disso, a bacia apresenta reservas minerais significativas, por esses motivos a bacia é tão importante para a economia nacional.

A bacia do rio Doce possui 98% da sua área inserida no bioma brasileiro Mata Atlântica e os 2% restantes pertencentes ao Cerrado, porém devido à grande supressão da vegetação nativa, as florestas permanecem apenas em áreas mais declivosas da bacia. Em virtude da intensa antropização, em 59% da área da bacia predomina-se a pastagem, seguida da vegetação nativa, que cobre 27% do território, outros 5% são ocupados por áreas agrícolas e 4% por áreas reflorestadas, segundo o mapeamento de uso e cobertura da terra na bacia do Doce em 2013 (ANA, 2016). A bacia apresenta altas concentrações de sedimentos em suspensão, que resultam em uma carga total de sedimentos de $11,22 \times 10^6 \text{ t.ano}^{-1}$ (estação de Colatina), segundo Lima et al. (2005).

Em função do rápido crescimento econômico não sustentável, a bacia tem sofrido diversos impactos ambientais significativos decorrentes da exploração indevida dos recursos naturais. O desmatamento e o mau uso da terra têm causado um intenso processo de erosão na bacia do rio Doce, cujos sedimentos contribuem para o assoreamento dos cursos d'água. Associada aos fenômenos meteorológicos, a retirada da vegetação nativa tem contribuído para as inundações, especialmente a partir do século XIX devido ao plantio de café e cana-de-açúcar, exploração de madeira e formação de pastagem, que modificaram a capacidade de infiltração e o armazenamento do solo, agravando os efeitos das chuvas intensas (PIRH-DOCE, 2010). Junto a isso, a crescente ocupação da planície de inundação dos rios, principalmente na zona urbana, tem acentuado os danos causados pelas inundações (CUPOLILLO, 2008b).

Em função da extração de minério na bacia do rio Doce, existem diversas barragens de contenção de rejeitos. Na região de cabeceira da bacia hidrográfica do rio Doce, no município de Mariana, rompeu-se a barragem de Fundão em 05 de novembro de 2015 liberando aproximadamente 34 milhões de metros cúbicos de rejeitos provenientes da extração de minério de ferro, o que ocasionou a destruição do distrito mais próximo, Bento Rodrigues, e grandes impactos socioeconômicos em vários outros distritos (MARTA-ALMEIDA et al., 2016). Destacam-se ainda, os impactos nos recursos hídricos da bacia principalmente no rio Doce, como na qualidade da água, geração de energia elétrica, indústria, pesca, irrigação, balneabilidade e na vida aquática (ANA, 2016).

4.2 ABORDAGEM PARA MODELAGEM

As principais etapas metodológicas deste estudo são esquematizadas no fluxograma ilustrado na Figura 3. Em relação ao rompimento da barragem de Fundão em 2015, sua ocorrência foi desprezada, visto que o estudo busca avaliar os impactos no horizonte somente das projeções climáticas.

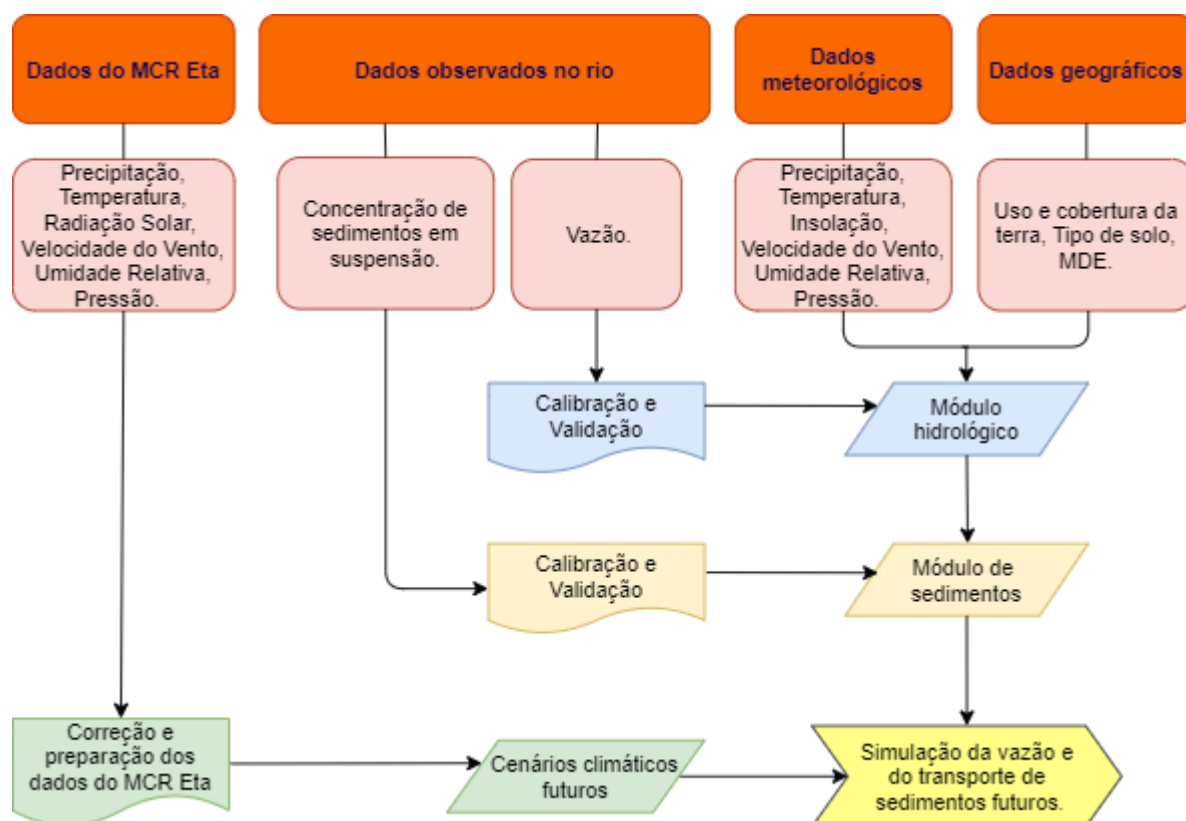


Figura 3: Fluxograma das principais etapas deste estudo.

4.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

O módulo hidrológico MGB, neste trabalho, foi aplicado com a propagação inercial de vazões implementada por Pontes et al. (2015) e Pontes et al. (2017), com a representação da planície de inundação. Essa versão representa melhor regiões muito planas e com drenagem complexa, proporcionando um avanço na discretização da bacia.

Optou-se por utilizar o modelo hidrológico do MGB, pois sua performance foi avaliada e validada em estudos anteriores (COLLISCHONN; TUCCI, 2001; COLLISCHONN et al., 2007; PAIVA, 2009; GETIRANA et al., 2011; JIMÉNEZ, 2011; PAIVA et al., 2011; PAZ et al., 2013; LOPES et al., 2018; SIQUEIRA et al., 2018; FLEISCHMANN; COLLISCHONN; PAIVA, 2019) e, também, teve aplicação bem sucedida em diversos estudos de avaliação do impacto das mudanças climáticas em recursos hídricos (COLLISCHONN et al., 2005; NÓBREGA et al., 2011; ADAM; COLLISCHONN, 2013; QUEIROZ et al., 2016; SCHUSTER; FAN; COLLISCHONN, 2019; SCHUSTER et al., 2020; BRÊDA et al., 2020).

4.3.1 Dados hidrológicos e meteorológicos

Os dados de vazão e precipitação foram obtidos a partir de séries históricas diárias de 62 estações fluviométricas (Figura 4) e 101 pluviométricas (Figura 5), respectivamente, pertencentes à base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), obtidas por meio do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) e disponíveis em <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>.

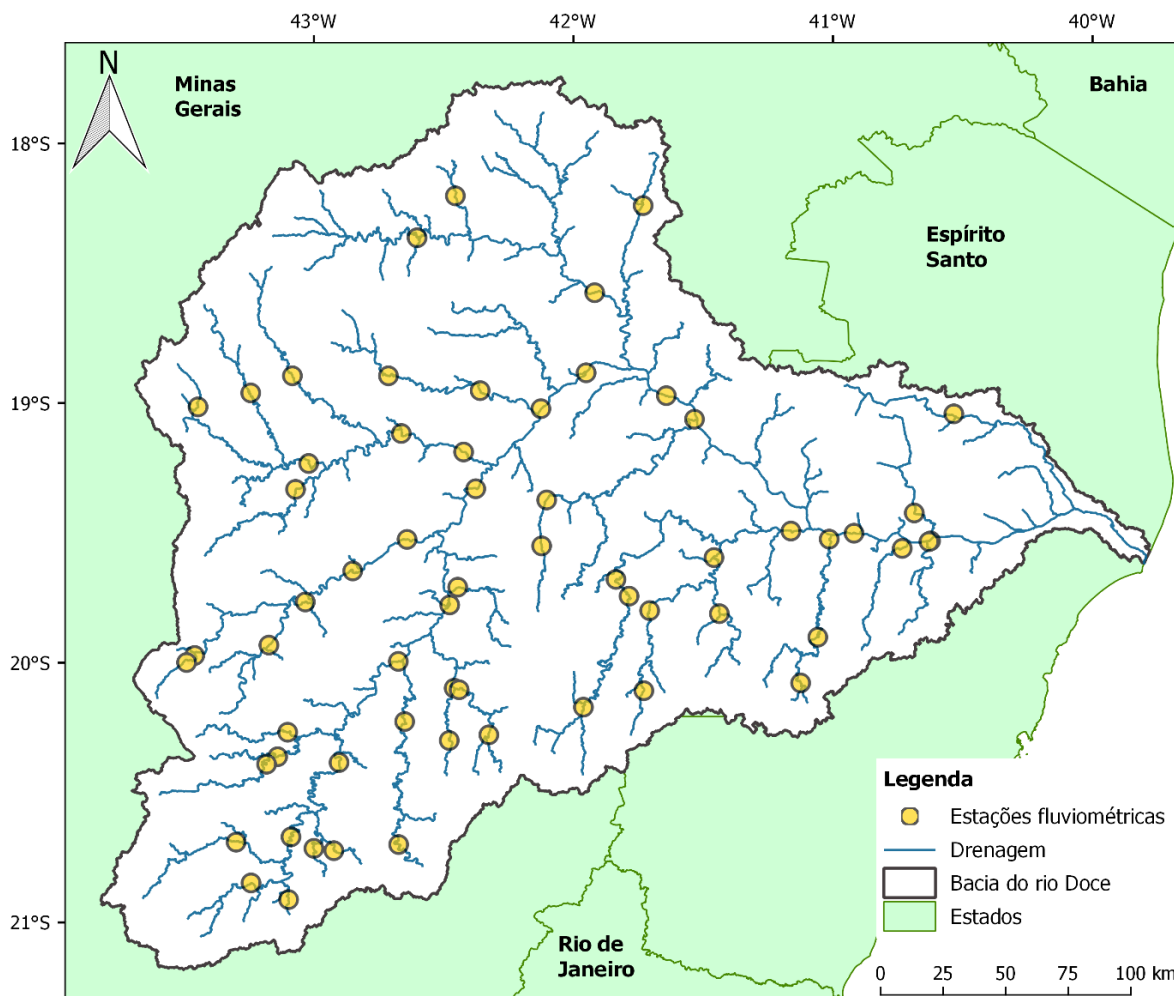


Figura 4: Localização das estações fluviométricas com séries diárias de vazão.

Os dados meteorológicos mensais utilizados no modelo são normais climatológicas (1961 - 1990), disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019), e consistem em dados de temperatura, umidade, insolação (horas de sol por dia), velocidade do vento e pressão, pertencentes às estações distribuídas espacialmente conforme a Figura 5.

Os dados de precipitação e os demais dados meteorológicos são dados de entrada do módulo hidrológico MGB. Os dados de vazão das estações fluviométricas foram

utilizados para a calibração e a validação do MGB para a bacia do rio Doce. Os postos pluviométricos selecionados são aqueles cujas séries históricas de dados são do mesmo período dos dados das estações fluviométricas e que possuam a menor porcentagem de falhas na série (20%). Os dados de precipitação e vazão são dados diários obtidos para os anos de 1990 a 2014, que compreendem os períodos de calibração e validação.

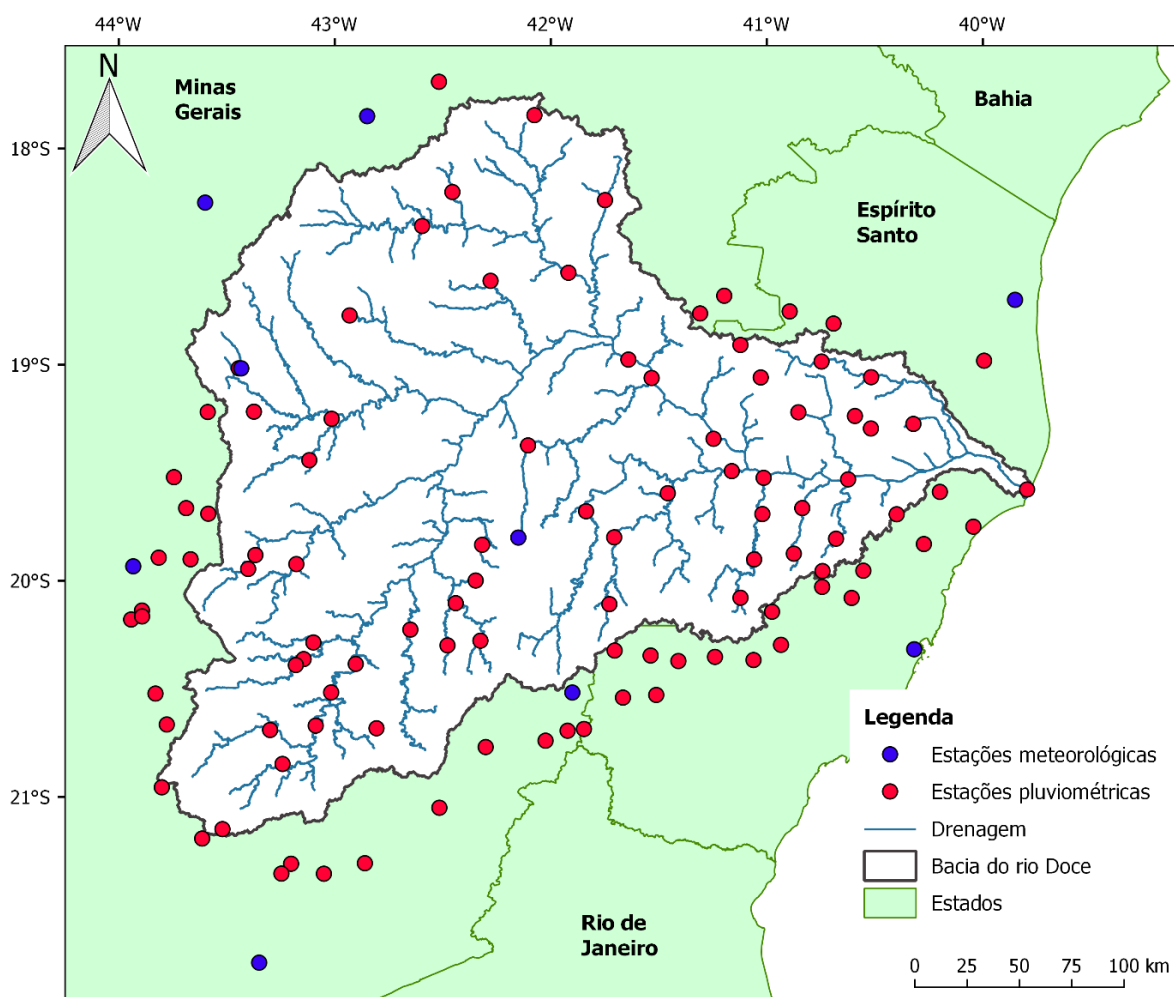


Figura 5: Localização das estações meteorológicas com normais climatológicas e pluviométricas com dados diários de precipitação.

4.3.2 Discretização da bacia hidrográfica e definição das URH

A discretização da bacia hidrográfica foi realizada com base no MDE do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 90 metros (Figura 6), disponibilizado pela NASA em <http://srtm.csi.cgiar.org/>. A discretização utiliza o *IPH-Hydro Tools* (SIQUEIRA et al., 2016), que consiste em um conjunto de ferramentas desenvolvidas para o processamento de MDE em ambiente SIG, permitindo a

extração de redes de drenagem e características topológicas para bacias hidrográficas, assim como informações necessárias para o MGB.

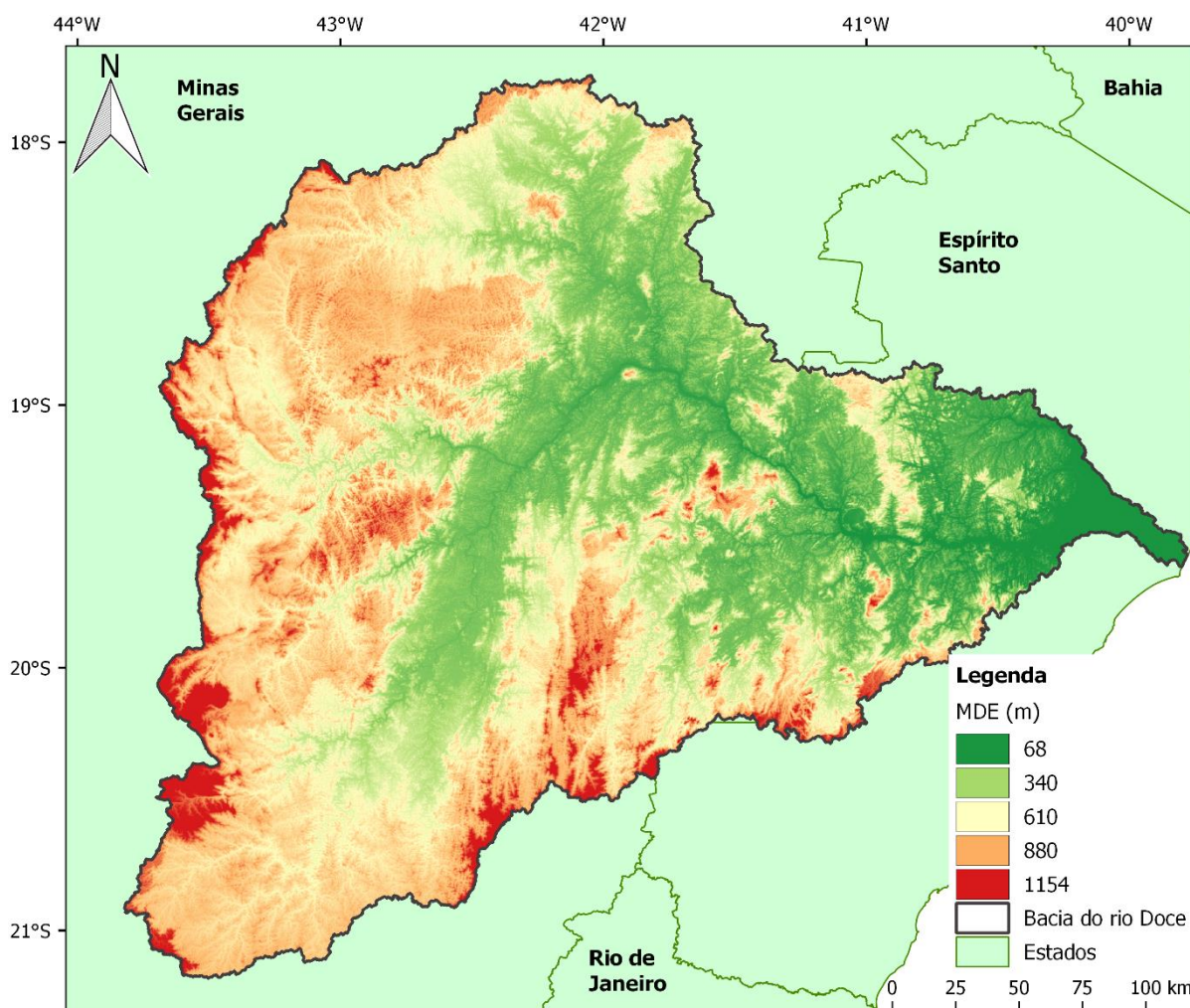


Figura 6: Relevo da bacia hidrográfica do rio Doce.

A primeira etapa da discretização da bacia foi a definição da direção do escoamento, para isso foi necessário a remoção de depressões existentes no MDE através do método MHS – *Modified Heuristic Search* (HOU et al., 2011), pois não deve haver pixel ou grupo de pixels com elevação inferior à de todos os pixels vizinhos. As etapas posteriores consistiram na definição do fluxo acumulado, definição da rede de drenagem, segmentação da rede de drenagem com comprimento uniforme, delimitação da bacia com base na rede de drenagem e delimitação das áreas de contribuição de cada trecho do rio, as minibacias (Figura 7), conforme proposto por Pontes et al. (2015) e Pontes (2016).

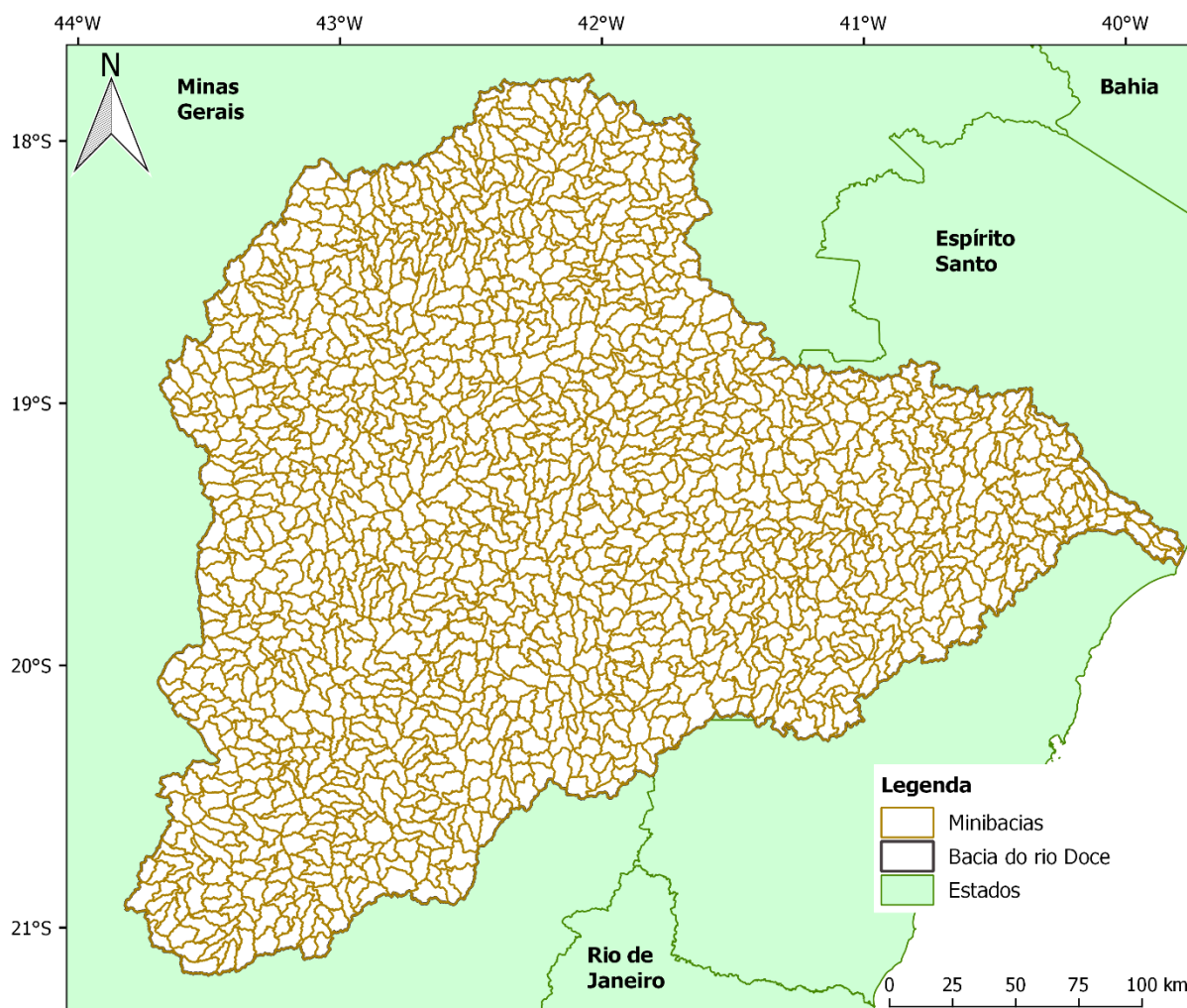


Figura 7: Distribuição das minibacias discretizadas para bacia do rio Doce.

A bacia foi dividida em 60 sub-bacias, que consistem em unidades de área inferior à área da bacia e superior à área das minibacias. Nas sub-bacia são definidos os parâmetros do modelo para cada uma URH. Em cada URH ocorre o balanço de água no solo e os volumes gerados em cada unidade são somados e propagados inicialmente em nível de minibacias, posteriormente na rede de drenagem (FAGUNDES, 2018).

Foi utilizado o mapa de URH desenvolvido por Fan et al. (2015) para toda a América do Sul (Figura 8), o qual ficou composto de nove classes de URH: floresta em solo raso (Flor_Ras), floresta em solo profundo (Flor_Prof), agricultura em solo raso (Agri_Ras), agricultura em solo profundo (Agri_Prof), campo em solo raso (Camp_Ras), campo em solo profundo (Camp_Prof), várzea e florestas inundáveis (Varzea), áreas semi-impermeáveis (ASI) e água.

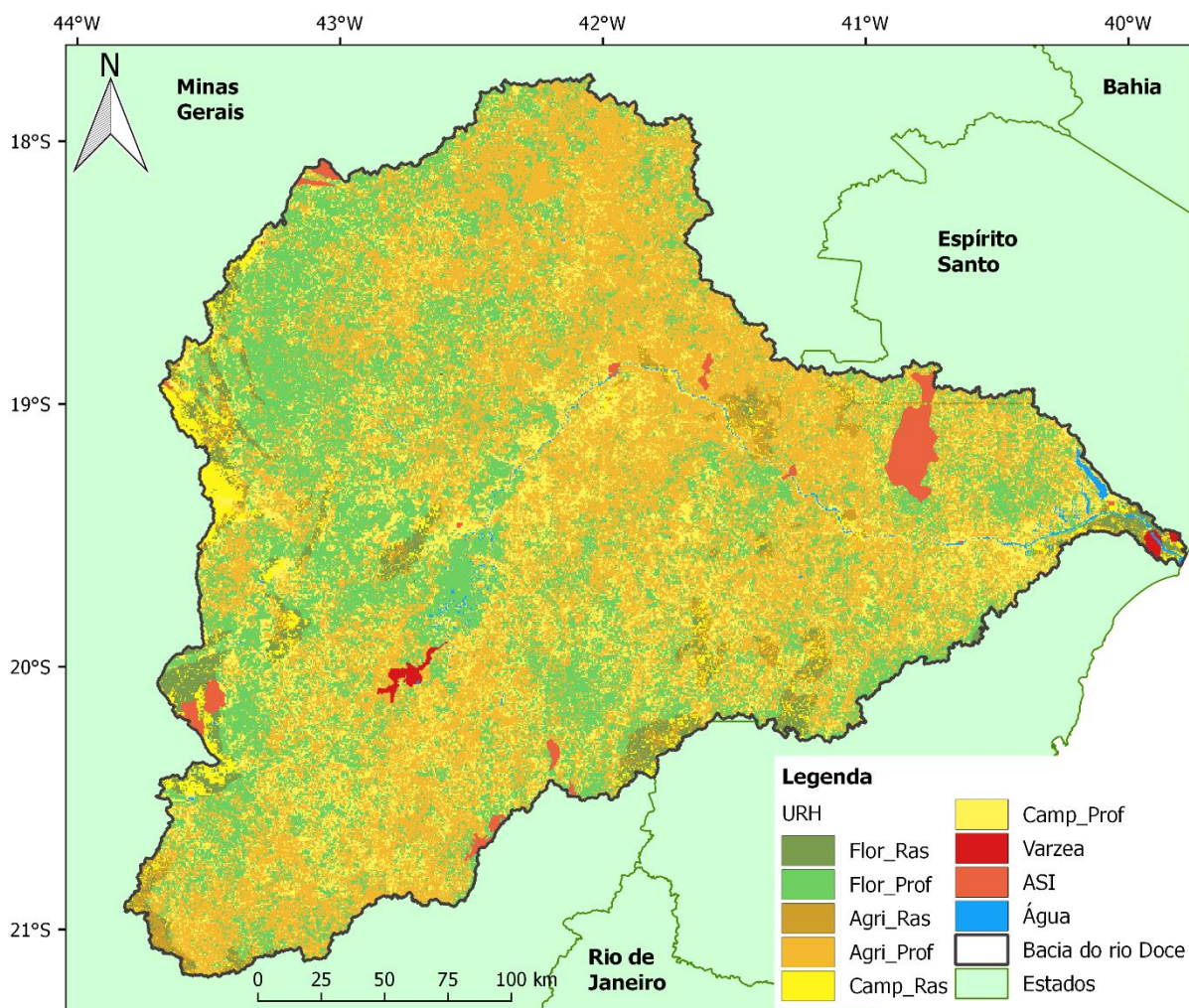


Figura 8: Mapa das 9 URH da bacia do rio Doce.

4.3.3 Calibração e validação do módulo hidrológico

O módulo hidrológico MGB possui parâmetros fixos e calibráveis. Os parâmetros fixos têm valores que podem ser medidos ou que não interferem profundamente nos resultados (COLLISCHONN; TUCCI, 2001), sendo obtidos com base na literatura, aplicações anteriores, sensoriamento remoto, considerando as características da bacia, entre outros. Esses são relacionados às características da vegetação e consistem em índice de área foliar, albedo, resistência superficial e altura do dossel.

Os parâmetros calibráveis são: armazenamento máximo de água no solo (W_m); parâmetros relacionados aos escoamentos subsuperficial (K_{int}) e subterrâneo (K_{bas}); parâmetro de correlação entre armazenamento e saturação (b); parâmetros relacionados ao tempo de propagação dos escoamentos superficial (CS) subsuperficial (CI) e subterrâneo (CB).

As vazões simuladas foram comparadas com as vazões observadas nas estações fluviométricas da ANA utilizando as estatísticas de desempenho coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe – ENS (Equação 4), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos – ENSLog (Equação 5), erro relativo de volume total – PBIAS (Equação 6), erro médio absoluto – MAE (Equação 7), coeficiente de correlação de Pearson – r (Equação 8) e índice de concordância de Willmott – Id (Equação 9).

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad 3$$

$$ENSLog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(C_i) - (\log(O_i)))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(O_i) - (\log(\bar{O})))^2} \quad 4$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - O_i) * 100}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad 5$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |C_i - O_i| \quad 6$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2][\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2]}} \quad 7$$

$$Id = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |C_i - O_i|^2}{\sum_{i=1}^N (|C_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad 8$$

Onde C_i é a variável modelada no intervalo de tempo i , O_i é a variável observada no mesmo intervalo de tempo, N é o número de intervalos de tempo, \bar{C} é a média das variáveis modeladas no intervalo de tempo N , \bar{O} é a média das variáveis observadas no intervalo de tempo N e $\log(\bar{O})$ é o logaritmo da variável média observada no intervalo de tempo N .

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (ENS) mede o quanto o modelo hidrológico é superior a um modelo que prevê a média de longo prazo das vazões (PONTES, 2016). Quando o modelo hidrológico tende à perfeição, o coeficiente de Nash-Sutcliffe tem um valor próximo a 1, já resultados inferiores a 0 indicam que a média das vazões observadas é melhor que a simulação (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016).

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (ENSLog) dos logaritmos das vazões transforma as vazões simuladas e observadas em logaritmos antes dos cálculos estatísticos, favorecendo os ajustes nas vazões menores (WÖHLING; SAMANIEGO; KUMAR, 2013), uma vez que parâmetros estatísticos que usam o logaritmo nas vazões avaliam melhor erros em vazões mínimas (FERREIRA; PAZ; BRAVO, 2020).

O erro relativo do volume total (PBIAS) mede a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores que os dados observados (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999). O valor ideal é 0, valores positivos indicam tendência de superestimação e valores negativos, subestimação por parte do modelo.

O parâmetro estatístico erro médio absoluto (MAE) descreve a diferença absoluta entre as simulações do modelo e as observações nas unidades da variável (LEGATES; MCCABE JUNIOR, 1999), possuindo como valor ideal 0 (WILLMOTT; MATSUURA, 2005). O MAE é sensível à superestimação sistemática da vazão, principalmente em períodos de inundação (FERREIRA; PAZ; BRAVO, 2020).

O coeficiente de correlação de Pearson (r) descreve a relação linear entre dados simulados e observados. O coeficiente de correlação varia de -1 a 1, se r é igual a 0 não há relação linear e se r é igual a 1 ou -1 é porque existe uma perfeita relação linear positiva ou negativa, respectivamente (MORIASI et al., 2007).

O índice de concordância de Willmott (I_d) é uma medida do quanto as previsões de um modelo são livres de erros (WILLMOTT, 1982). Ele varia entre 0 e 1, onde 1 indica concordância perfeita entre as observações e os resultados modelados e 0 indica completa discordância (WILLMOTT, 1981; WILLMOTT, 1982).

Para verificar as modelagens de vazão do módulo hidrológico, considera-se a classificação de Moriasi et al. (2007), no que tange o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (ENS) e o erro de volume total (PBIAS) (Tabela 1). A mesma classificação do ENS foi adotada para o coeficiente ENSLog. Espera-se que os resultados das estatísticas calculadas apresentem valores menores ao simular com passo de tempo diário, uma vez que a classificação de Moriasi et al. (2007) é para simulações com intervalo de tempo mensal.

Tabela 1: Classificação da qualidade dos resultados da modelagem para vazão em função dos valores de ENS e PBIAS.

Classificação	ENS	PBIAS
Muito bom	$0,75 < \text{ENS} \leq 1,00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Bom	$0,65 < \text{ENS} \leq 0,75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < \text{ENS} \leq 0,65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$
Insatisfatório	$\text{ENS} \leq 0,50$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$

Fonte: adaptado de Moriasi et al. (2007).

O período de calibração do módulo hidrológico MGB foi definido de 1990 a 2014 e o período de validação foi de 1970 a 1989, em função da disponibilidade de dados fluviométricos e pluviométricos para a bacia.

4.4 MODELAGEM DE SEDIMENTOS

As simulações foram realizadas com o módulo de sedimentos MGB-SED (BUARQUE, 2015; FÖEGER et al., 2019a). O MGB-SED foi escolhido para ser aplicado neste estudo devido à boa performance para simulações em grandes bacias hidrográficas, como na estimativa da geração e do transporte de sedimentos na bacia do rio Madeira (BUARQUE, 2015; FÖEGER et al., 2019a), na geração de sedimentos da bacia do rio Doce (FAGUNDES et al., 2017), na erosão e no transporte de sedimentos da bacia do rio Doce (FAGUNDES et al., 2017; FAGUNDES et al., 2020) e na estimativa da descarga de sedimentos finos no Lago Guaíba (ROSSONI, FAN e LOPES, 2018).

4.4.1 Dados de sedimentos

Para comparação com as concentrações de sedimentos em suspensão simuladas pelo MGB-SED, foram utilizados dados observados de concentração de sedimentos em suspensão, obtidos a partir de 31 estações da ANA e disponibilizados por meio através do HidroWeb. Essas estações possuem cerca de quatro medições anuais para o período de calibração e validação (1998 - 2014). Dados de concentração de sedimentos em suspensão também foram obtidos a partir da estação Ouro Fino da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), na qual há medição diária durante o período chuvoso e de quatro a dez medições nos meses do período seco. As estações sedimentométricas são apresentadas na Figura 9.

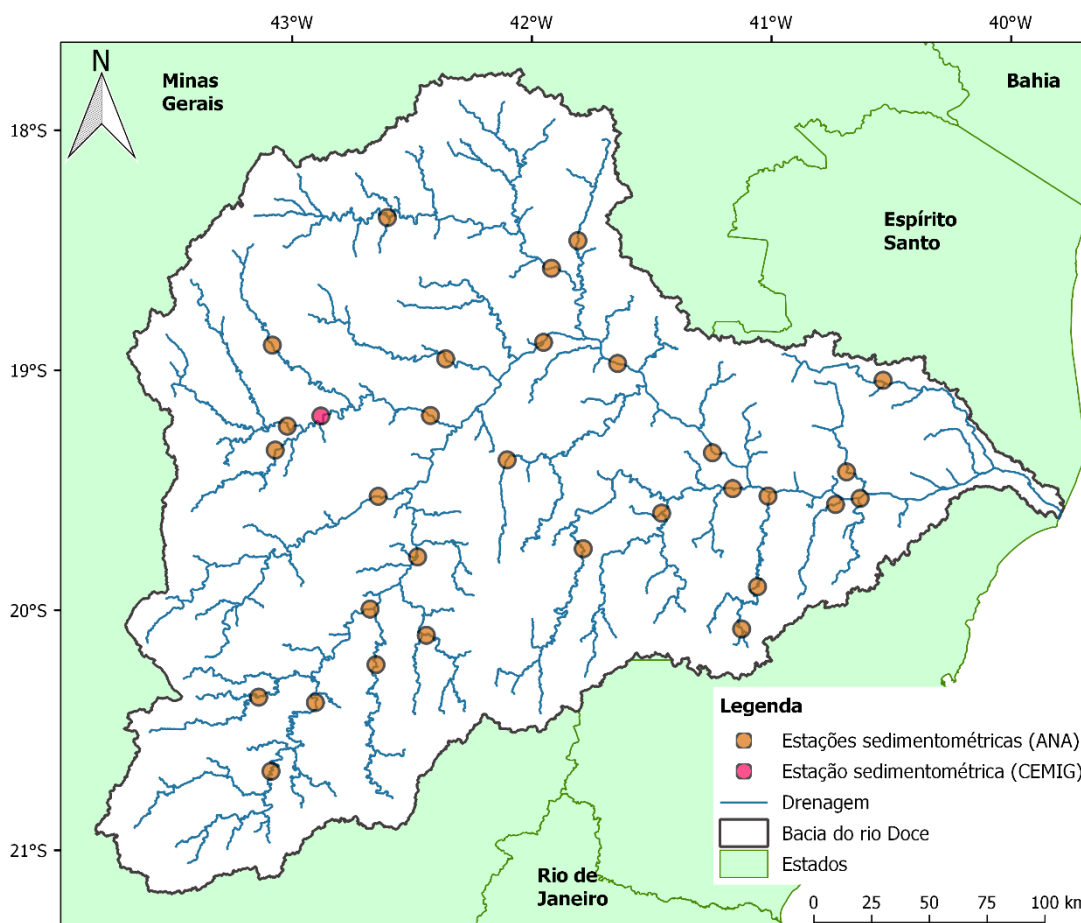


Figura 9: Localização das estações sedimentométricas.

4.4.2 Definição de parâmetros da MUSLE

O MGB-SED (BUARQUE, 2015; FÖEGER et al., 2019a) calcula a geração de sedimento na bacia com a MUSLE (WILLIAMS, 1975) (Equação 2). Na etapa de pré-processamento do modelo de sedimentos definiu-se os parâmetros da MUSLE por URH para cada sub-bacia, exceto o fator LS . A taxa de pico do escoamento superficial (q_{pico}) foi definida em cada pixel através do volume de escoamento superficial uniforme ao longo do dia.

O fator K de erodibilidade do solo foi calculado pelo modelo usando a equação, proposta por Williams (1975), em função da porcentagem de silte, argila, areia e carbono orgânico para cada tipo de solo, disponível no mapa de solo da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (FAO, 1971). O fator C está relacionado à cobertura e ao manejo da terra e foi obtido com base nos valores da literatura (SILVA et al., 2010; RIBEIRO; ALVES, 2007; VÁZQUEZ-FERNÁNDEZ et al., 1996). Já o fator P está relacionado às práticas conservacionistas do solo e, devido à

falta de informação sobre as práticas existentes na bacia e considerando a extensão da mesma, o valor adotado foi igual a 1, ou seja, desconsiderou-se qualquer prática de conservação do solo (WILKINSON et al., 2009; FAGUNDES; FAN; PAIVA, 2019).

O fator LS bidimensional consiste no comprimento da rampa L associado a declividade S. Esse fator é calculado para cada pixel do MDE automaticamente por uma rotina computacional, implementada por Buarque (2015) na etapa de pré-processamento. Na determinação do comprimento L, o valor máximo é limitado ao tamanho do pixel do MDE.

4.4.3 Calibração e validação do modelo de sedimentos

Os parâmetros calibráveis do MGB-SED, segundo a metodologia proposta por Fagundes (2018), são os coeficientes α e β da MUSLE (Equação 2) (WILLIAMS, 1975) e o parâmetro Υ , que consiste no fator de ajuste do tempo de retardo do escoamento superficial (TKS) aplicado ao reservatório linear que gera o aporte de sedimentos que chega ao canal a partir das minibacias. Os coeficientes α e β influenciam na quantidade de sedimentos gerada em cada URH, ao passo que o TKS influenciam no tempo em que os sedimentos alcançam a rede de drenagem (FAGUNDES, 2018). A calibração do módulo de sedimentos MGB-SED foi realizada em cada estação com dados de concentração de sedimentos em suspensão, seguindo a topologia hídrica de montante para jusante.

Para avaliar o desempenho do módulo foram consideradas as estatísticas erro relativo de volume total – PBIAS (Equação 5), coeficiente de correlação de Pearson – r (Equação 7) e o índice de concordância de Willmott – I_d (Equação 8), semelhantes às utilizadas para a modelagem hidrológica. No entanto, diferentemente da simulação hidrológica, as estatísticas foram consideradas na simulação de sedimentos apenas como uma forma de verificar locais da bacia onde a calibração possa estar melhor em relação a outros locais, mas não como uma avaliação da qualidade da calibração. Essa forma de aplicação justifica-se devido a limitação temporal dos dados de concentração de sedimentos, que tem periodicidade média de 4 valores ao longo do ano.

Segundo Moriasi et al. (2007), valores acima de 0,5 podem ser considerados aceitáveis em simulações com passos de tempo mensal para o coeficiente de

correlação de Pearson (r). No entanto, espera-se que os resultados das estatísticas calculadas apresentem valores menores ao usar passo de tempo diário e dados com baixa frequência temporal.

Para o PBIAS, Moriasi et al. (2007) verificaram que valores de até 55% têm sido considerados como satisfatórios em simulações com passos de tempo mensal, com o qual as variabilidades diárias são filtradas. Dessa forma, considerando que o presente estudo realizou simulação com passo de tempo diário, foi assumido o limite de $\pm 60\%$ como um resultado satisfatório e foram adotadas as seguintes faixas de valores para avaliação das simulações:

- Muito Bom: $PBIAS \leq \pm 15$
- Bom: $\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 30$
- Satisfatório: $\pm 30 \leq PBIAS \leq \pm 60$
- Não satisfatório: $\pm 60 \leq PBIAS$

O período de calibração do MGB-SED foi de 2005 a 2014 e o processo de validação de 1998 a 2004.

4.5 DADOS DO MCR Eta

Os dados climáticos futuros diários, utilizados como dados de entrada do MGB-SED para avaliação do impacto das mudanças climáticas na dinâmica de sedimentos do rio Doce, foram obtidos das projeções do MCR Eta forçado pelos MCG BESM (NOBRE et al., 2013), MIROC5 (WATANABE et al., 2010), CanESM2 (ARORA et al., 2011) e HadGEM2-ES (COLLINS et al., 2011; MARTIN et al., 2011) com resolução espacial de 20 km, denominadas neste trabalho como Eta-BESM, Eta-MIROC5, Eta-CanESM2 e Eta-HadGEM2-ES 20 km. Também foram utilizados dados climáticos das projeções do MCR Eta com resolução espacial de 05 km forçado pelo Eta-HadGEM2-ES 20 km, denominadas neste trabalho Eta-HadGEM2-ES 05 km.

As projeções do MCR Eta forçado pelos MCG são baseadas nos cenários de emissões futuras de gases e aerossóis RCP 4.5 e RCP 8.5 do IPCC-AR5 (IPCC, 2014a), expressos em termos de forçantes radiativas. O MGB-SED requer como dados de entrada do MCR Eta a precipitação, além das variáveis climáticas para o cálculo da evapotranspiração: temperatura, radiação solar de onda curta incidente, umidade relativa, velocidade do vento e pressão atmosférica na superfície.

As simulações do MCR Eta, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/CPTEC), tiveram sua performance avaliada em pesquisas, como Almagro et al. (2020), Chou et al. (2014b), Lyra et al. (2017). No Brasil, o MCR Eta tem sido amplamente utilizado em estudos para avaliar o impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos (ADAM; COLLISCHONN, 2013; VIOLA et al., 2014; SANTOS et al., 2019; ANDRADE et al., 2020) e geração de energia hidrelétrica (QUEIROZ et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2017). No entanto, ainda há poucos trabalhos que avaliam o impacto das mudanças climáticas nos sedimentos com base nas projeções do MCR Eta (SANTOS et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2019). Devido à viabilidade da aplicação das projeções do MCR Eta para análise das mudanças climáticas nos sedimentos e a falta de estudos, optou-se neste trabalho empregar as projeções do MCR Eta.

Vale ressaltar que não foram encontradas durante a revisão bibliográfica deste estudo simulações relacionadas à avaliação do impacto das mudanças climáticas em recursos hídricos e sedimentos com base nas projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km.

4.6 MÉTODO DE CORREÇÃO DE VIÉS

As projeções climáticas apresentam vieses dificultando a representação das condições hidrológicas reais (MUERTH et al., 2013) em função de erros sistemáticos dos modelos causados por erros conceituais, discretização, entre outros. Por esse motivo, em muitos estudos são aplicados os métodos de correção de viés no intuito de reduzir as diferenças entre as projeções climáticas e os dados observados de clima (CHRISTENSEN et al., 2008; TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012). No entanto, há questionamentos acerca de como a implementação da correção de viés pode contribuir para a incerteza geral e dos efeitos da correção na estimativa das mudanças climáticas futuras (EHRET et al., 2012; MUERTH et al., 2013). Porém, é imprescindível a correção de viés para modelagem hidrológica, pois vieses da precipitação podem ocasionar vieses ainda maiores na vazão (BRÊDA et al., 2020).

De acordo com Almagro et al. (2020), dados de precipitação do Eta- HadGEM2-ES e do Eta- MIROC5 possuem muitos vieses para o Brasil no período de 1961 a 2005. Em relação às projeções futuras de precipitação, os autores esperam que estejam

presentes esses vieses, comprometendo o uso dos dados sem correção para aplicação hidrológica.

Teutschbein e Seibert (2012) compararam diferentes metodologias de correção de viés disponíveis que podem ser implementados para corrigir vieses de modelos climáticos. Com base nos resultados desse estudo, foi aplicado o escalonamento linear (LENDERINK; BUIHAND; VAN DEURSEN, 2007) para correção de viés das projeções do MCR Eta. O método ajusta os valores médios diários simulados a partir da relação entre as médias mensais observadas e simuladas pelos modelos climáticos no período histórico, gerando um coeficiente de correção para cada mês. Esse fator é utilizado para corrigir na remoção do viés das variáveis climáticas simuladas diárias. A correção da precipitação e das demais variáveis climáticas ocorre de acordo com as Equações 10 e 11, respectivamente.

$$Y_{\text{cor}}(d) = Y_{\text{sim}}(d) \times \left(\frac{\bar{Y}_{\text{his,obs}}(m)}{\bar{Y}_{\text{his,sim}}(m)} \right) \quad 9$$

$$Y_{\text{cor}}(d) = Y_{\text{sim}}(d) + \left(\bar{Y}_{\text{his,obs}}(m) - \bar{Y}_{\text{his,sim}}(m) \right) \quad 10$$

Onde, $Y_{\text{cor}}(d)$ é a variável climática simulada diária corrigida, $Y_{\text{sim}}(d)$ é a variável climática simulada diária sem correção, $\bar{Y}_{\text{his,obs}}(m)$ é a média mensal da variável climática observada para o período histórico, $\bar{Y}_{\text{his,sim}}(m)$ é a média mensal da variável climática simulada para o período histórico.

Para correção da precipitação foram utilizados dados diários observados de 101 estações pluviométricas (Figura 5), pertencentes à base de dados da ANA para o período histórico (1986 - 2005). Para a correção das demais variáveis climáticas foram obtidas médias mensais de 1961 a 1990 do *Climatic Research Unit* - CRU (NEW et al., 2002) com resolução de 10 minutos, disponível em <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/tmc/>. Ademais, utilizou-se dados brutos do MCR Eta para o período de 1986 - 2005 para o cálculo do coeficiente de correção mensal, aplicado no período futuro de 2015 - 2099.

Primeiramente as séries de precipitação observadas e do MCR Eta foram interpoladas para cada minibacia da bacia do rio Doce pelo inverso da distância ao quadrado, então foram estimados os coeficientes de correção em cada minibacia. Para as demais

variáveis climáticas foram procurados para cada ponto de grade do MCR Eta o ponto mais próximo do CRU e, então, calculados os coeficientes de correção.

Diversos trabalhos relacionados aos impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos e na geração de sedimentos fizeram aplicações dos dados de modelos climáticos com correção de viés a partir do escalonamento linear (OLIVEIRA et al., 2017; NILAWAR; WAIKAR, 2019; OLIVEIRA et al., 2019; SANTOS et al., 2019; TIAN et al., 2020; ANDRADE et al., 2020).

4.7 AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA HIDROSSEDIMENTOLÓGICA

Para avaliação dos impactos das mudanças climáticas na dinâmica hidrossedimentológica da bacia do rio Doce, o MGB-SED calibrado e validado foi aplicado com base em projeções futuras do Eta-BESM, Eta-MIROC5, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES 20 km e do Eta-HadGEM2-ES para o período futuro. Então, os resultados das simulações com MGB-SED usando dados observados (1998 - 2014) foram comparados com os períodos futuros 2015 - 2040, 2041 - 2070 e 2071 - 2099, sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5. Essa comparação, foi realizada por meio da análise espacial da variação da vazão e da descarga sólida de sedimentos em suspensão médios anuais para cada período futuro.

Nos principais rios da bacia do rio Doce foi realizada a análise pontual da variação da vazão e da descarga sólida de sedimentos em suspensão médios para os períodos de 2015 - 2040, 2041 - 2070, 2071 - 2099 em relação ao período base (1998 - 2014). A análise pontual avaliação da variação das vazões futuras inclui além da vazão média anual, as vazões de referência $Q_{7,10}$ e Q_{90} para cada período futuro. A vazão anual consiste na média aritmética das vazões anuais para o período de tempo analisado. A vazão de referência $Q_{7,10}$ é a vazão mínima de 7 dias consecutivos com período de retorno de 10, estimada a partir da distribuição de Weibull (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015). A vazão de referência Q_{90} é a vazão igualada ou superada em 90% do período de tempo analisado, respectivamente. As vazões $Q_{7,10}$ e Q_{90} são vazões utilizadas como referência para outorga nos estados do Espírito Santo e Minas Gerais, respectivamente.

Também foi realizada a avaliação da variação do acumulado da precipitação média espacial da bacia nos períodos chuvoso e seco e da temperatura média espacial da bacia anual, no verão, no outono, no inverno e na primavera para os períodos futuros em relação ao período base.

Para avaliação do impacto das mudanças climáticas, neste trabalho não foram consideradas alterações de uso e cobertura da terra, mantendo-se constante durante o período futuro (2015 - 2099), de acordo com o mapa de URH de Fan et al. (2015).

5 RESULTADOS

5.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

5.1.1 MGB

Os resultados da calibração e da validação do módulo hidrológico MGB foram avaliados por meio das estatísticas de desempenho descritas na seção 4.3.3 e hidrogramas de vazões diárias simuladas e observadas. Na Figura 10 estão dispostos os parâmetros estatísticos calculados para o período de calibração (1990 - 2014) nos diversos pontos da bacia, nos quais há estações com dados observados de vazão.

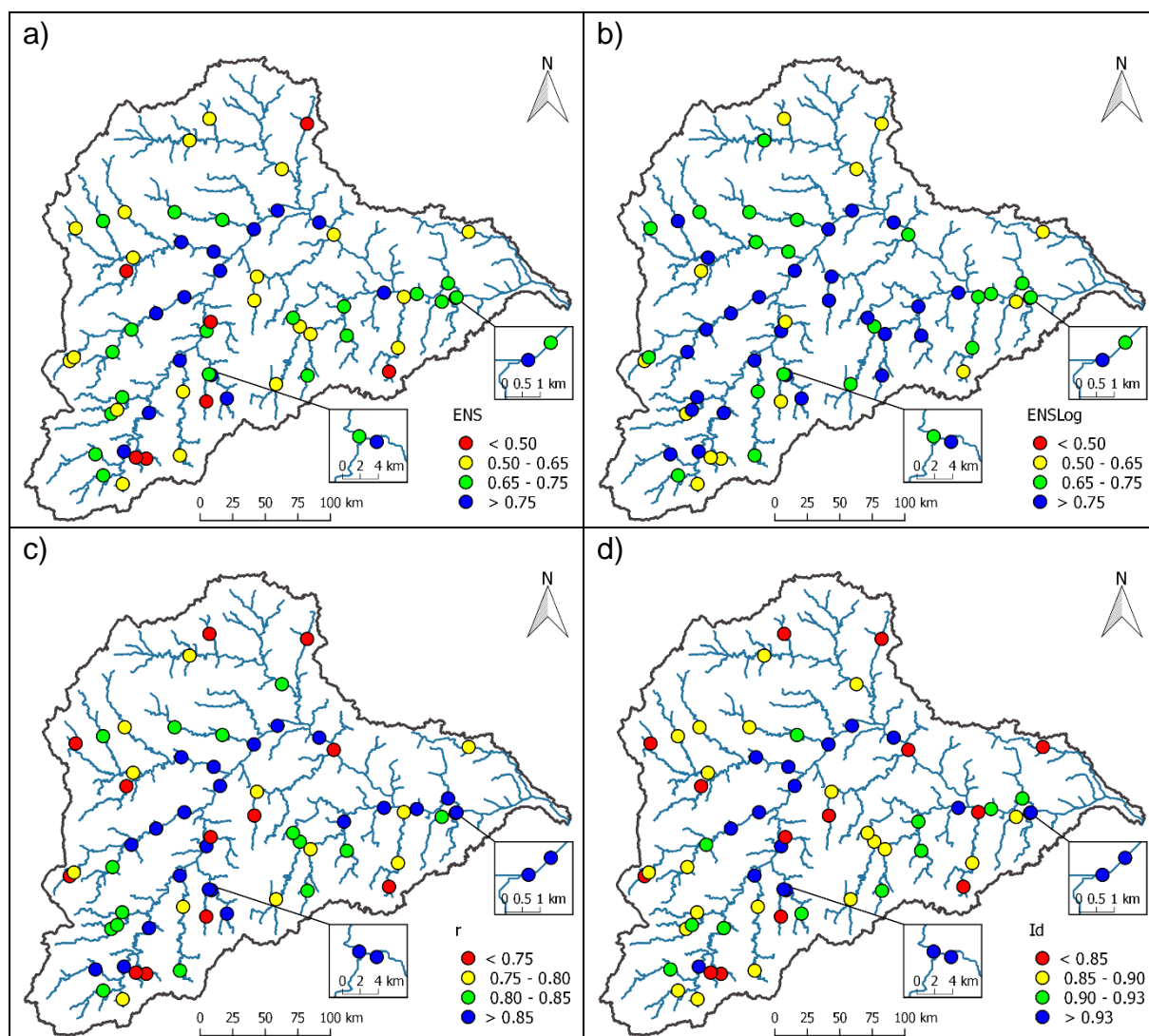


Figura 10: Distribuição espacial das estatísticas de desempenho calculadas para a vazão no período de calibração do módulo hidrológico MGB (1990 - 2014) aplicado à bacia do rio Doce. (Continua)

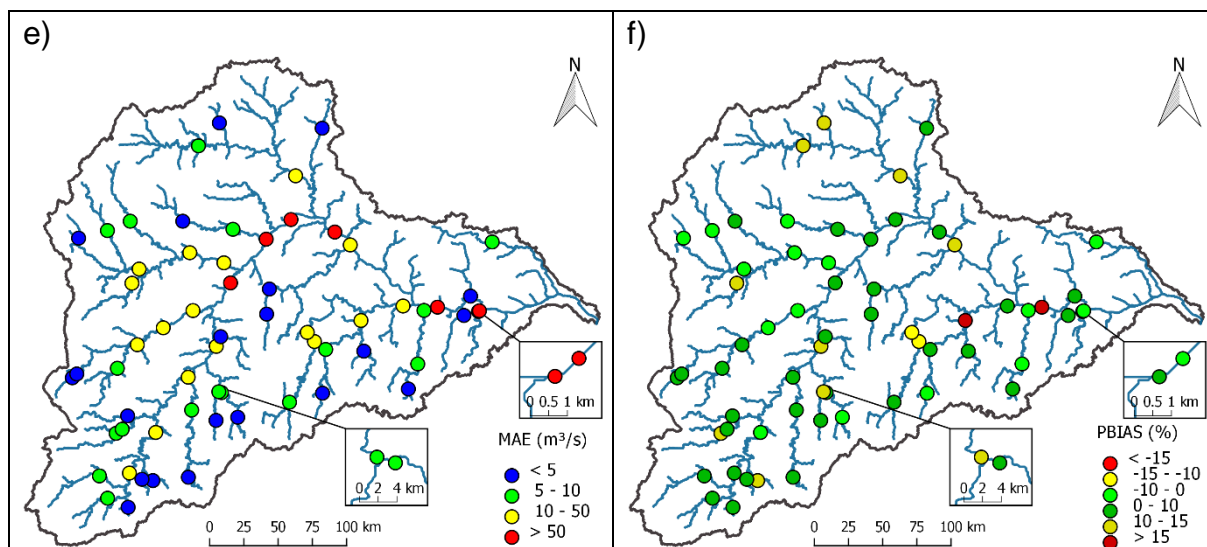


Figura 10: Distribuição espacial das estatísticas de desempenho calculadas para a vazão no período de calibração do módulo hidrológico MGB (1990 - 2014) aplicado à bacia do rio Doce. (Conclusão)

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe - ENS (Figura 10a) apresentou valores superiores a 0,75 e a 0,50 em 24% e 89% das estações, respectivamente. Já o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos - ENSLog (Figura 10b), muito utilizado para ajuste de vazões mínimas (WÖHLING; SAMANIEGO; KUMAR, 2013), apresentou valores maiores que 0,75 e 0,50 em 45% e 100% estações, respectivamente. De acordo com a classificação de Moriasi et al. (2007) (Tabela 1), adotada para ENSLog neste trabalho, valores acima de 0,5 indicam resultados satisfatórios e acima de 0,75 indicam resultados muito bons para a simulação.

O coeficiente de correlação de Pearson - r (Figura 10c) apresentou valores superiores a 0,80 em 61% das estações. Valores do coeficiente de correlação de Pearson - r próximos de 1 indicam relação linear positiva entre os dados observados e simulados, ou seja, para valores crescentes de vazões observadas há tendência de crescimento das vazões simuladas e para valores decrescentes de vazões observadas há tendência de decrescimento das vazões simuladas (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Em relação ao índice de concordância de Willmott - I_d (Figura 10d), em 77% das estações foram obtidos valores superiores a 0,85, o que demonstra alta concordância entre as vazões observadas e simuladas, uma vez que valores próximos de 1 indicam tendência de concordância perfeita entre as observações e os resultados simulados (WILLMOTT, 1981; WILLMOTT, 1982). Os resultados do coeficiente de correlação de

Pearson e do índice de concordância de Willmott expressam uma forte relação dos resultados de vazão do MGB em comparação com dados observados de vazão.

O erro médio absoluto (MAE) (Figura 10e) apresentou valores absolutos inferiores a 5 m³/s e a 10 m³/s em 34% e 61% das estações, respectivamente. Apenas 11% das estações apresentaram erro médio absoluto superior a 50 m³/s, porém esses erros estão presentes no rio principal da bacia, cujos valores de erro de volume total - PBIAS são inferiores a $\pm 10\%$, em detrimento das vazões elevadas do rio Doce.

O PBIAS (Figura 10f) indica que as vazões médias foram superestimadas em menos de 10% em 55% das estações, ao passo que foram subestimadas em menos de 10% em 24% das estações. A tendência de superestimação entre as vazões médias simuladas e observadas foi superior a 15% somente em 3% das estações, não havendo subestimação maior que -15%. Em comparação com a classificação de Moriasi et al. (2007) para o PBIAS (Tabela 1), 79% das estações apresentaram resultados considerados muito bons, 97% tiveram resultados considerados bons e 100% das estações resultados satisfatórios.

A Figura 11 apresenta as estatísticas de desempenho estimadas para o período de validação (1970 - 1989) do módulo hidrológico MGB. Quando comparadas com o período de calibração, as estatísticas do período de validação melhoraram em determinadas estações e pioraram para algumas estações. Ainda assim, o MGB apresentou resultados considerados adequados na simulação da vazão da bacia do rio Doce.

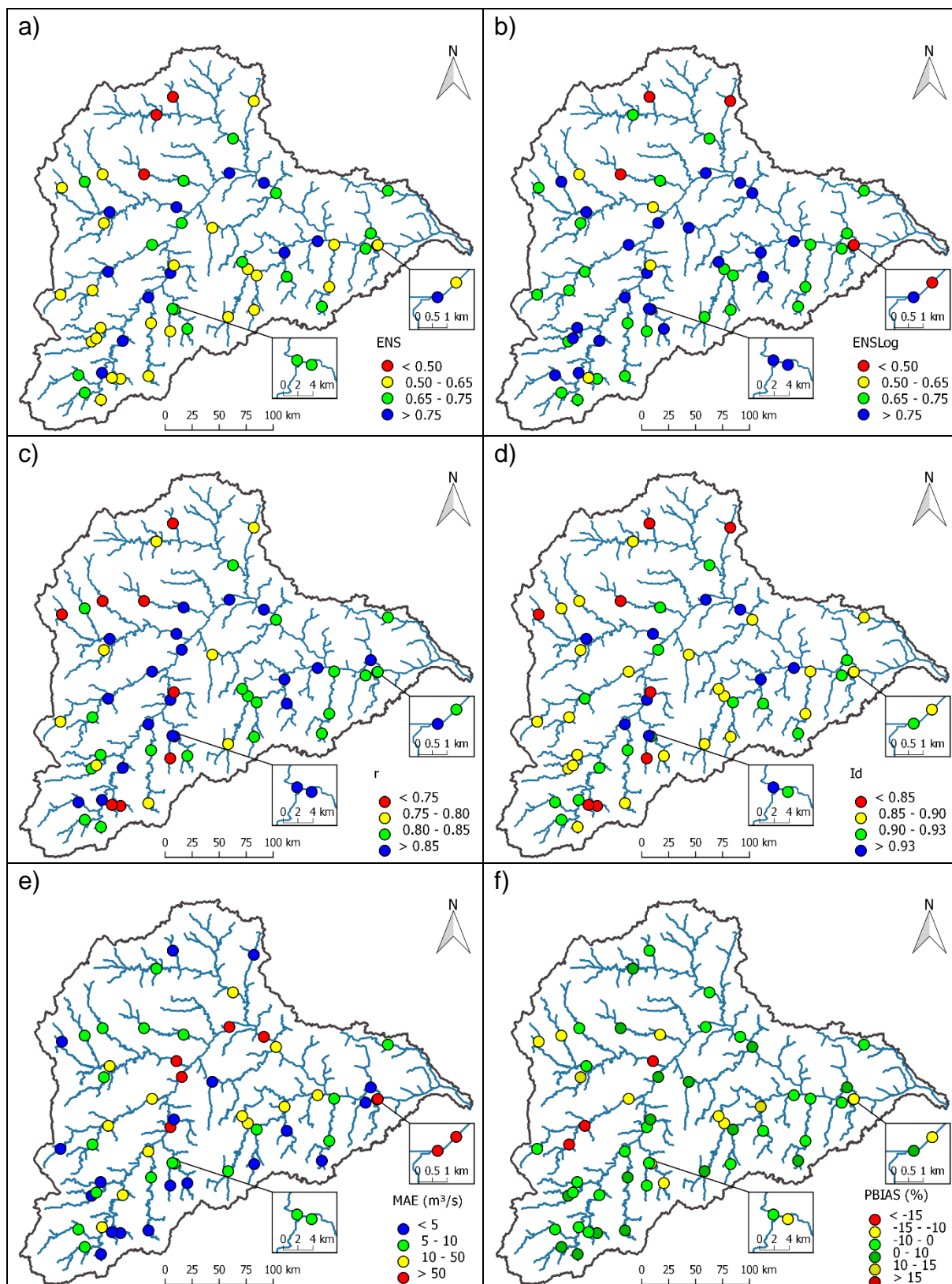


Figura 11: Distribuição espacial das estatísticas de desempenho calculadas para a vazão no período de validação do módulo hidrológico MGB (1970 - 1989) aplicado à bacia do rio Doce.

Para o período de validação, o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe - ENS (Figura 11a) apresentou valores superiores a 0,75 e a 0,5 em 21% e 95% das estações, respectivamente. Parâmetros estatísticos que utilizam o logaritmo nas vazões são melhores para avaliar erros em vazões mínimas (FERREIRA; PAZ; BRAVO, 2020). Os resultados no período de validação mostram que o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos - ENSLog (Figura 11b) possuem valores superiores a 0,75 em 41% das estações e superiores a 0,5 em 93%. Quando comparados com a classificação de Moriasi et al. (2007), ENS e ENSLog apresentaram resultados satisfatórios em mais de 90% das estações.

O coeficiente de correlação de Pearson - r (Figura 11c) foi maior que 0,80 em 71% das estações, mostrando forte relação linear positiva entre as vazões observadas e simuladas pelo MGB. Em 86% das estações, o índice de concordância de Willmott - Id foi superior a 0,85 (Figura 11d).

O erro médio absoluto - MAE (Figura 11e) é inferior a 5 m³/s e a 10 m³/s em 34% e 66% das estações, respectivamente. Em 13% das estações o MAE possui valores superiores a 50 m³/s, porém, em relação ao erro relativo de volume total - PBIAS (Figura 11f), as vazões foram superestimadas em menos 10% em 30% das estações e subestimadas em menos 10% em 43% das estações. Além disso, 93% de todas as estações apresentaram PBIAS inferior a $\pm 15\%$. Em comparação com a classificação de Moriasi et al. (2007), 73% das estações apresentaram resultados muito bons, 93% das estações possui resultados bons e 100% das estações são satisfatórias.

Análogo ao período de calibração, as estatísticas de desempenho ENS, ENSLog, r , Id e PBIAS apresentaram a maior parte dos resultados inferiores nas bacias de cabeceira, ao passo que, em termos de valores absolutos, o MAE é maior no rio principal, no qual também há as maiores vazões. Fagundes (2018) observou a partir do ENS, ENSLog e PBIAS, que há tendência de estações em pequenas áreas de drenagem apresentarem resultados inferiores, comparadas com estações ao longo do rio Doce.

Na Figura 12 são apresentados hidrogramas de vazões observadas e simuladas pelo MGB, em estações presentes nos principais afluentes e no rio principal, escolhidas em função da distribuição espacial e da disponibilidade de dados observados.

Gráficos com vazões observadas favorecem a análise visual do ajuste geral (JACKSON et al., 2019).

Os hidrogramas de vazões observadas possuem picos mais acentuados e valores mais elevados em relação aos hidrogramas simulados. No entanto, as vazões simuladas apresentam sazonalidade expressiva, com picos e vales bem definidos em concordância com as vazões observadas.

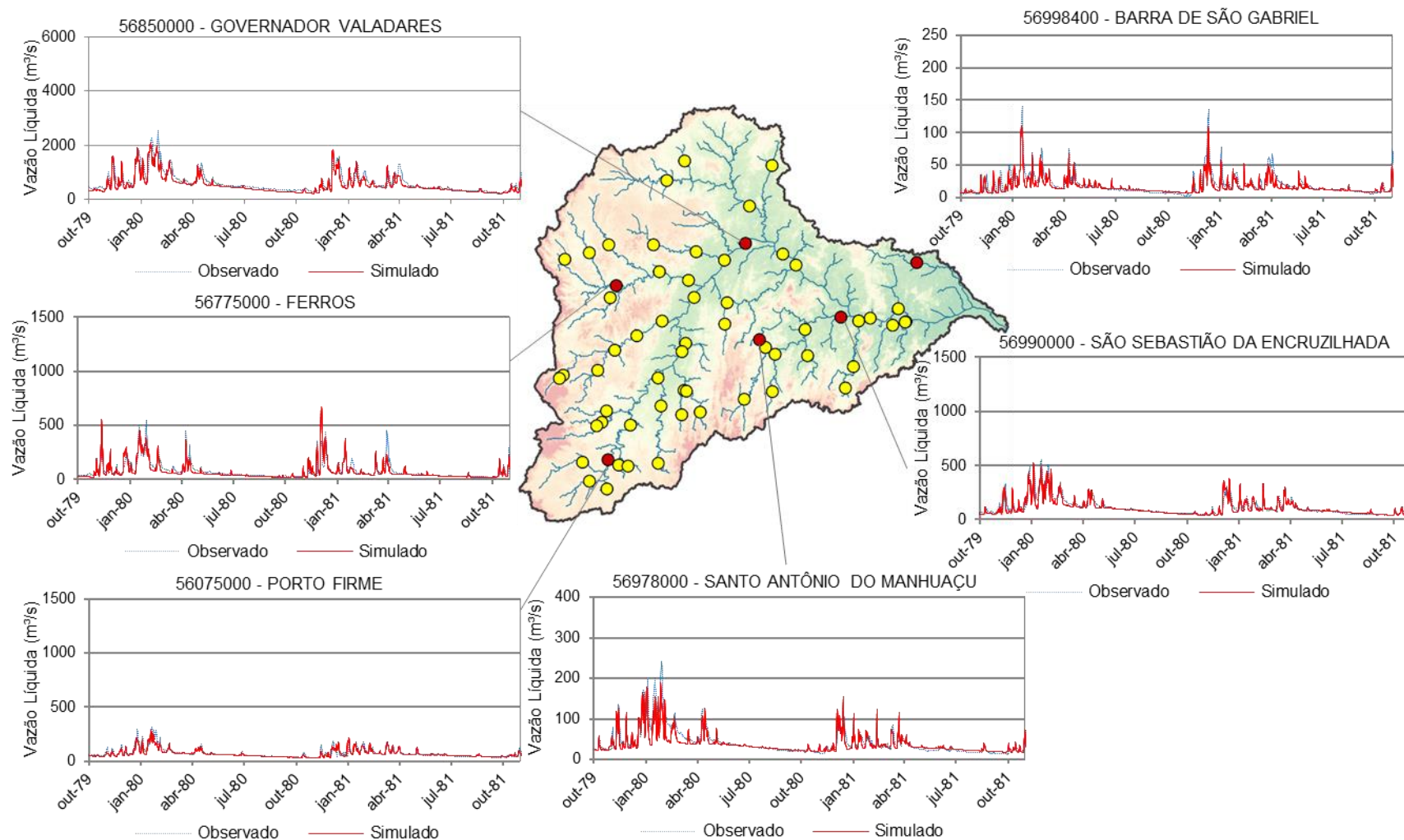


Figura 12: Hidrogramas de vazões observada e simulada para diferentes estações fluviométricas.

5.1.2 MGB-SED

Os resultados referentes a calibração e a validação do MGB-SED foram avaliados por meio das estatísticas de desempenho e de gráficos com as descargas sólidas em suspensão (DSS) simulada e calculada a partir da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e da vazão (Q) observadas. Na Figura 13 estão expostos os parâmetros estatísticos estimados para o período de calibração (2005 - 2014), nos locais onde há dados observados de concentração de sedimentos em suspensão e vazão.

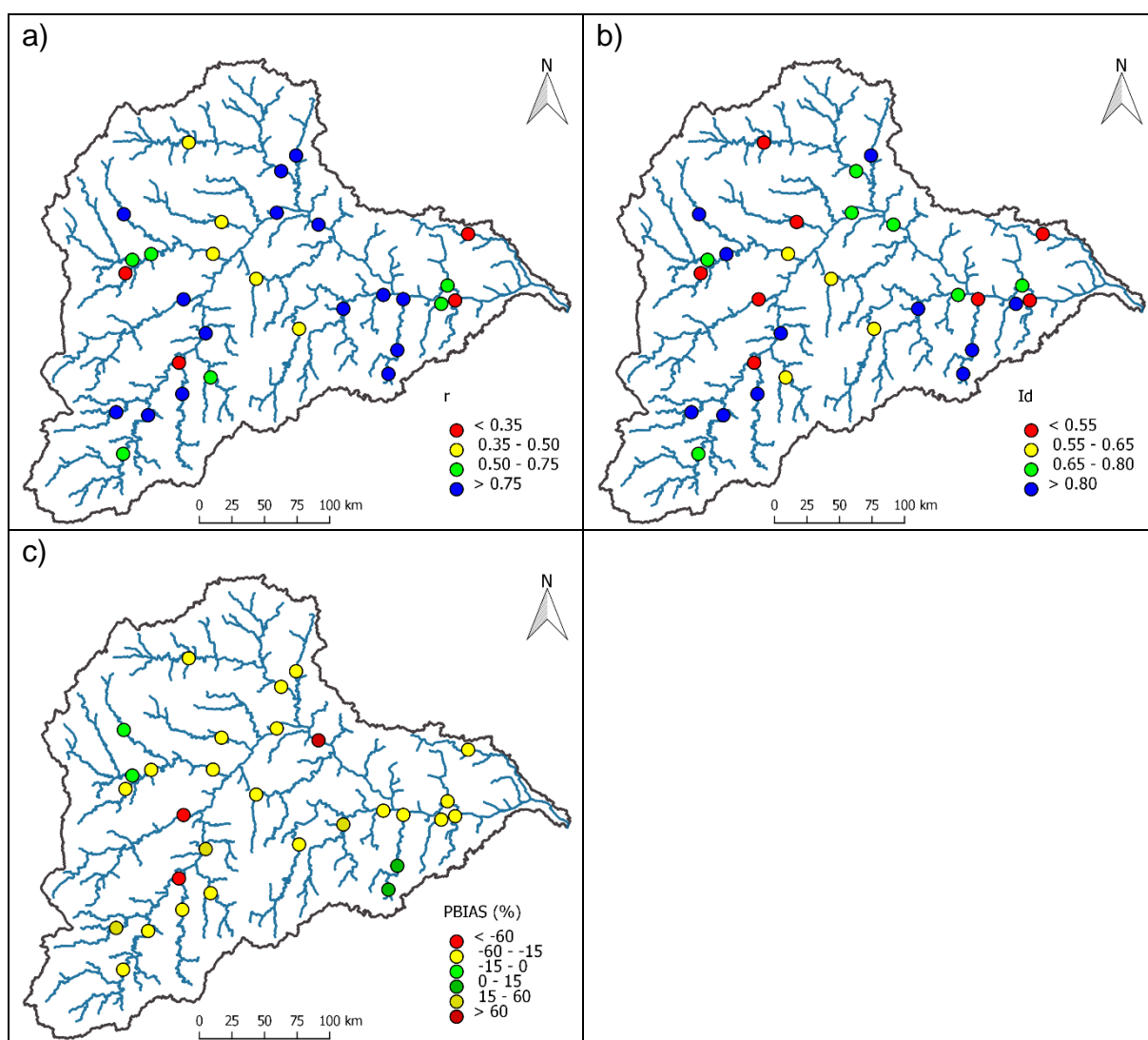


Figura 13: Distribuição espacial das estatísticas de desempenho calculadas para a descarga sólida em suspensão no período de calibração do módulo de sedimentos MGB-SED (2005 - 2014) aplicado à bacia do rio Doce.

O coeficiente de correlação de Pearson - r (Figura 13a) foi superior a 0,75 e a 0,50 em, respectivamente, 53% e 70% das estações sedimentométricas, ou seja, em 53% das estações há resultados muito próximos de uma perfeita relação linear positiva ($r = 1$) entre a descarga sólida em suspensão observada e simulada. Ademais, 70% das estações apresentam resultados aceitáveis de acordo com a classificação de Moriasi et al. (2007). O índice de concordância de Willmott - Id (Figura 13b) foi maior que 0,8 em 40% das estações e maior que 0,55 em 73% das estações, o que mostra boa concordância entre a descarga sólida em suspensão observada e a simulada pelo MGB-SED.

A descarga sólida em suspensão foi subestimada em menos de 60% em 76% das estações sedimentométricas e superestimada em menos de 60% em 19% das estações, de acordo com os resultados do PBIAS (Figura 13c). Para o PBIAS, foram considerados como satisfatórios valores até $\pm 60\%$. Desse modo, 95% das estações apresentaram resultados satisfatórios no período de calibração do MGB-SED.

Na Figura 14 estão presentes as estatísticas de desempenho calculadas para o período de validação (1998 - 2004) do MGB-SED. A partir da validação foi possível verificar que o MGB-SED apresentou resultados considerados aceitáveis na representação da descarga sólida em suspensão.

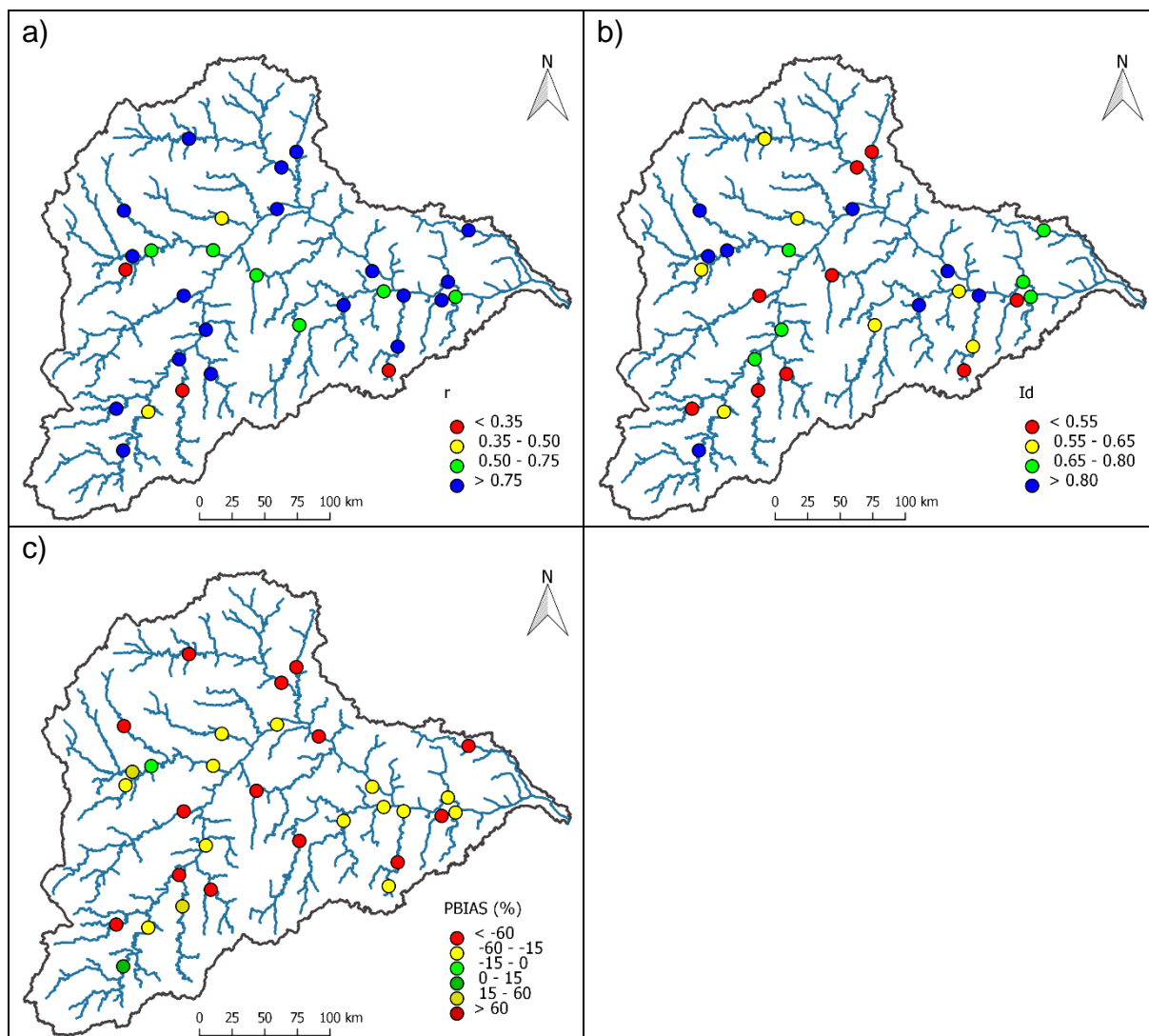


Figura 14: Distribuição espacial das estatísticas de desempenho calculadas para a descarga sólida em suspensão no período de validação do módulo de sedimentos MGB-SED (1998 - 2004) aplicado à bacia do rio Doce.

O coeficiente de correlação de Pearson - r (Figura 14a) foi superior a 0,75 em 63% das estações sedimentométricas e superior a 0,50 em 83% das estações, ou seja, apresentou resultados aceitáveis em 83% das estações, segundo a classificação de Moriasi et al. (2007). O índice de concordância de Willmott (Figura 14b) demonstrou boa concordância entre as descargas sólidas em suspensão observadas e simuladas, com valores acima de 0,80 e 0,55 em 27% e 70% das estações sedimentométricas, respectivamente.

Os resultados do PBIAS (Figura 14c) mostram que a descarga sólida em suspensão foi superestimada em menos de 60% em 10% das estações e subestimada em 60% em 45% das estações. Logo, em 55% das estações de sedimentos apresentam resultados satisfatórios.

A Figura 15 mostra a comparação entre as descargas sólidas simuladas e observadas em diferentes estações sedimentométricas da ANA referentes ao período de validação do MGB-SED. De modo semelhante, a Figura 16 mostra a comparação entre os valores simulados e observados para a estação da CEMIG. De acordo com a Figura 15, as observações tendem a acompanhar as simulações nos picos e nos vales da descarga sólida em suspensão, apesar da pequena quantidade de dados observados, assim como encontrado por Fagundes (2018). É possível observar na Figura 16, na qual há maior disponibilidade de dados observados, que a descarga sólida em suspensão é subestimada nos períodos de seca.

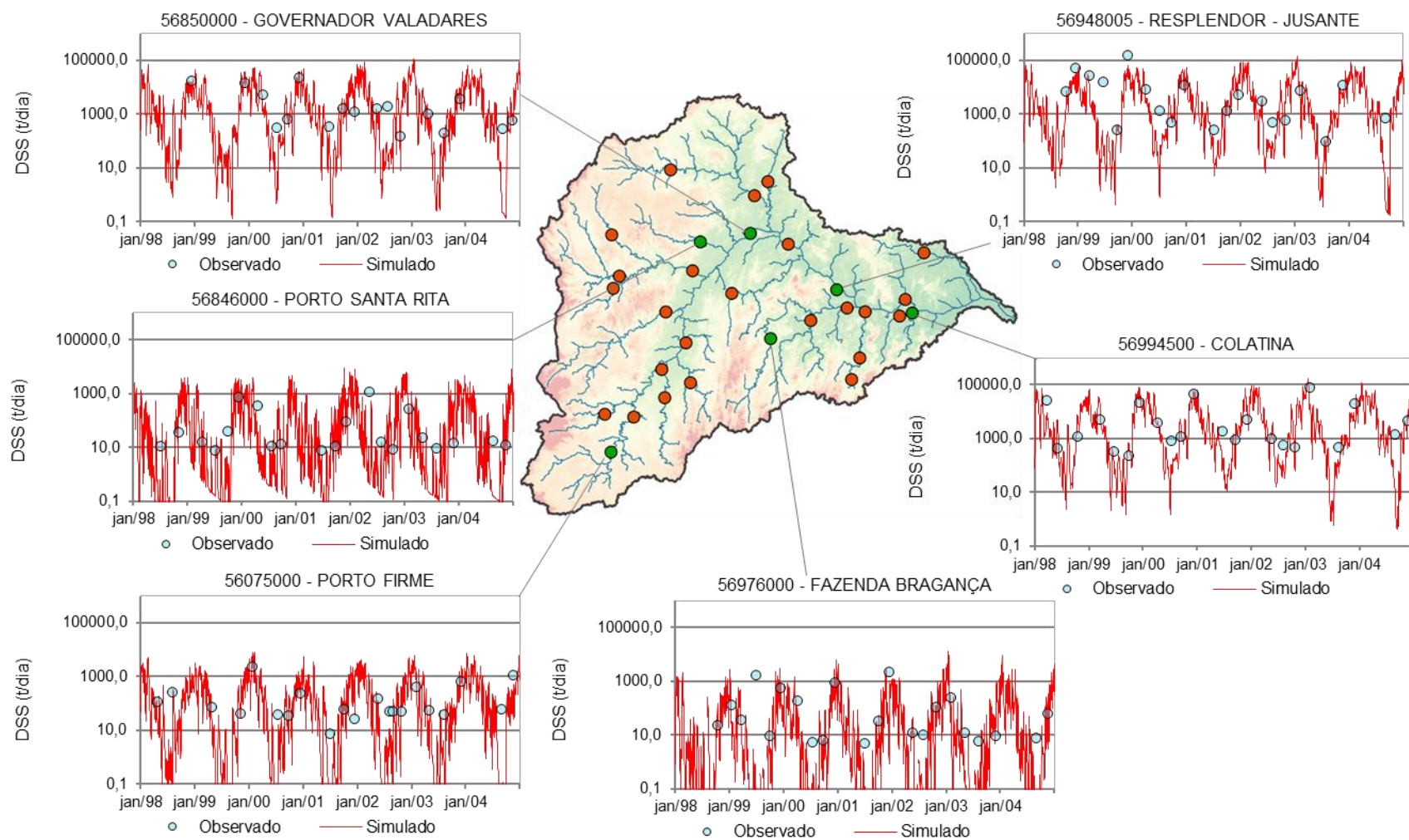


Figura 15: Descargas sólidas em suspensão (DSS) simuladas e observadas para diferentes estações da ANA no período de validação do MGB-SED (1998 - 2004).

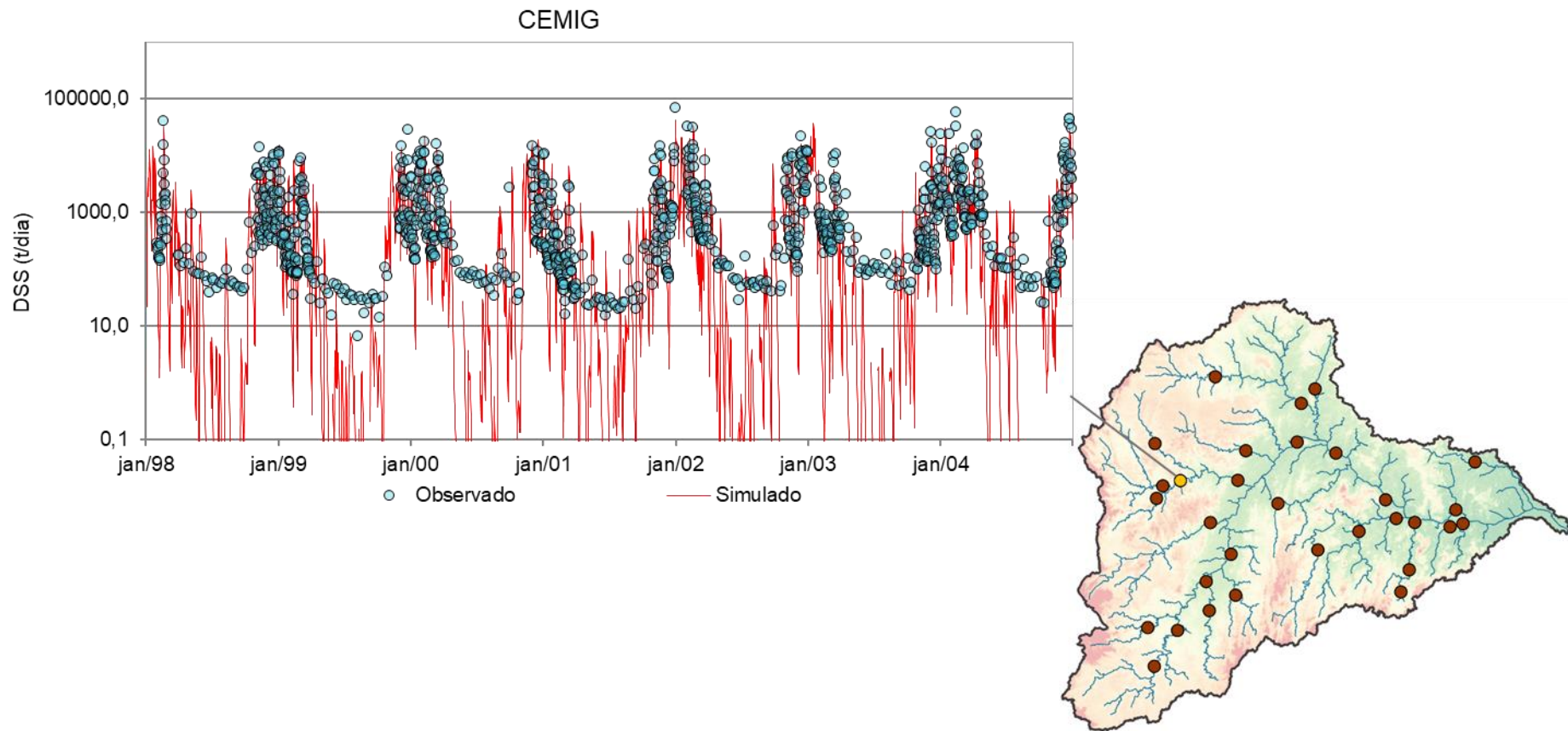


Figura 16: Descargas sólidas em suspensão (DSS) simuladas e observadas na estação da CEMIG no período de validação do MGB-SED (1998 - 2004).

5.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO DOCE

5.2.1 Precipitação

As mudanças no regime de precipitação da bacia do rio Doce, corrigida com escalonamento linear, foram avaliadas a partir da variação da precipitação média nos períodos chuvoso e seco e da variação da precipitação média anual do Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES 20 km e Eta-HadGEM2-ES 05 km nos períodos de 2015 - 2040, 2041 - 2070 e 2071 - 2099 para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Essa comparação foi estabelecida em relação à precipitação observada no período base (1998 - 2014).

O regime de precipitação da bacia do rio Doce possui o período chuvoso entre outubro e março e o período seco entre os meses de abril e setembro (Figura 17), ambos bem definidos, semelhante ao descrito por Cupolillo (2008a). No período base (1998 - 2014), a precipitação média anual da bacia do rio Doce foi de 1214 mm, sendo 86% da precipitação concentrada no período chuvoso (1041 mm), enquanto no período seco há grande redução na precipitação média (173 mm).

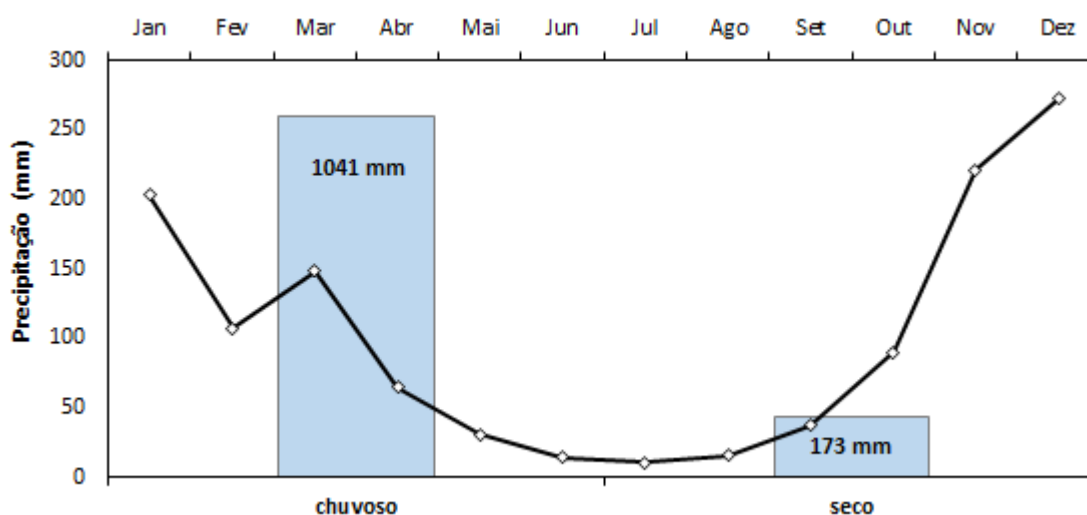


Figura 17: Precipitação observada média nos períodos chuvoso e seco e precipitação observada média mensal para o período base (1998 - 2014).

A precipitação média dos períodos chuvoso e seco da bacia do rio Doce tende a sofrer grandes mudanças no decorrer do século XXI para os cenários RCP 4.5 e o RCP 8.5. Essas mudanças variam de acordo com o modelo climático e o RCP. Para o período de 2015 - 2040, a precipitação média dos períodos chuvoso e seco tende a ser menor

que a precipitação do período base para os cenários RCP 4.5 (Figura 18a) e RCP 8.5 (Figura 18b), de modo que as projeções de todos os modelos apresentam tendência de redução. Para esse período, as variações absoluta e relativa da precipitação é mostrada Figura 18c e Figura 18d sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5, respectivamente. O período chuvoso, no qual está concentrado a maior parte da precipitação média anual do período base (1041 mm), apresenta reduções máximas sob o RCP 8.5 de -698 mm (-67%) para o Eta-HadGEM2-ES 20 km e de -673 mm (-65%) para o Eta-HadGEM2-ES 05 km. No período seco, em que a precipitação média é de 173 mm no período base, a tendência de redução da precipitação é maior sob o RCP 4.5, atingindo -80 mm (-46%) para o Eta-HadGEM2-ES 05 km e -77 mm (-44%) para o Eta-HadGEM2-ES 20 km. As tendências mais otimistas entre 2015 - 2040 no período chuvoso são das projeções de precipitação do Eta-BESM sob o RCP 8.5, com redução de -44 mm (-4%). Em relação ao período seco, as menores reduções são de -17 mm (-10%) para o Eta-BESM sob o RCP 8.5 e cerca de -20 mm (-11%) para o Eta-BESM e o Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5.

Em geral, as tendências de redução mais severas observadas no período chuvoso de 2015 - 2040 são provenientes das projeções futuras do Eta-HadGEM2-ES 20 km e do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o cenário mais pessimista, o RCP 8.5. Por outro lado, as tendências de redução mais amenas no período chuvoso são do Eta-BESM sob o RCP 8.5 e no período seco são do Eta-BESM para ambos os cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5) e do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5.

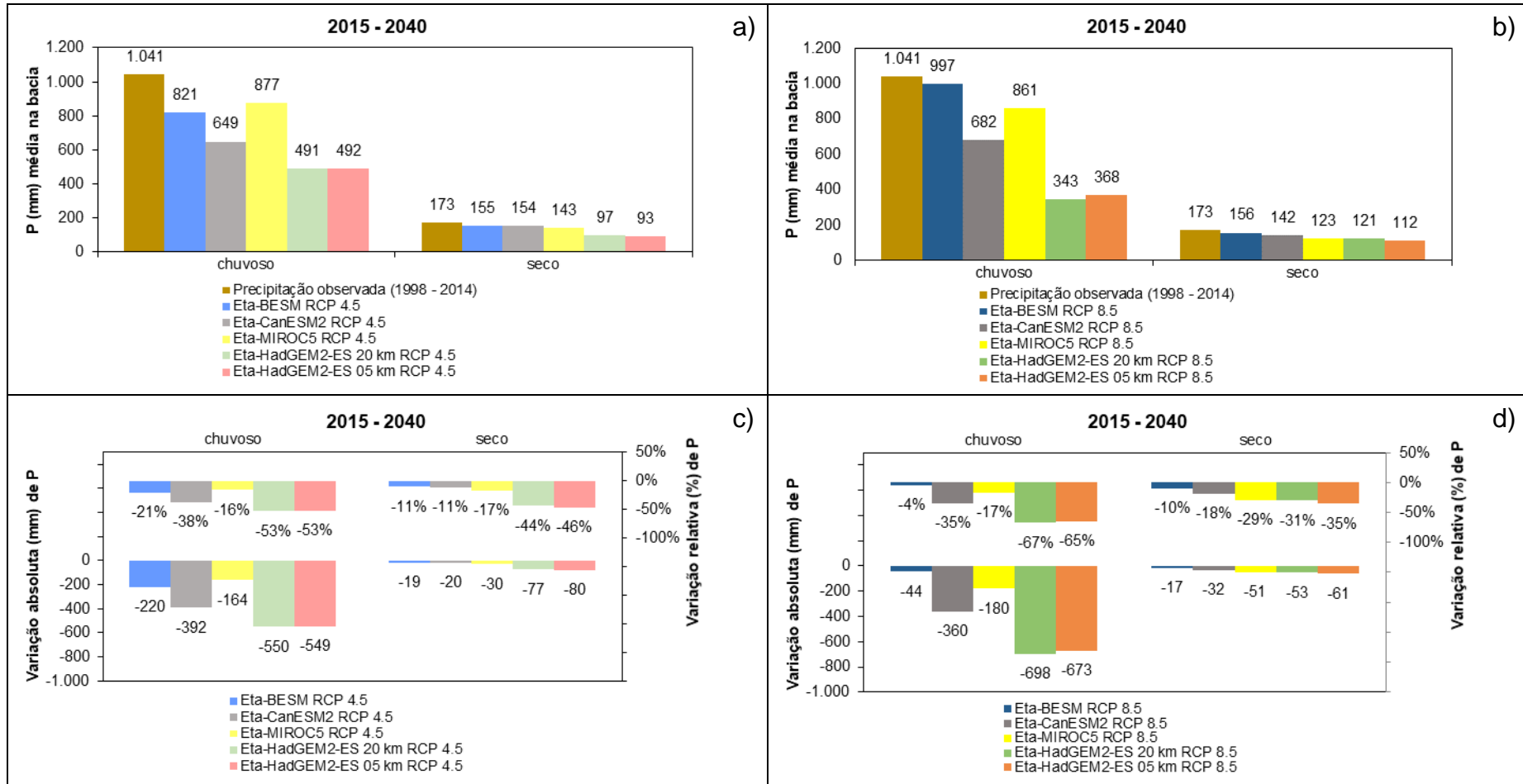


Figura 18: Precipitação média da bacia do rio Doce nos períodos chuvoso e seco sob o RCP 4.5 (a) e o RCP 8.5 (b) e variação relativa e absoluta sob o RCP 4.5 (c) e o RCP 8.5 (d) em relação ao período base (1998 - 2014), no período de 2015 a 2040.

Durante o período 2041 - 2070 a precipitação média do período chuvoso tende a ser menor para todos os modelos sob o RCP 4.5 (Figura 19a) e o RCP 8.5 (Figura 19b), quando comparada com a precipitação do período base, enquanto que no período seco a precipitação tende a aumentar para o Eta-MIROC5 e diminuir para os demais modelos sob ambos os cenários. Para o período de 2041- 2070, a variação absoluta e relativa da precipitação média dos períodos chuvoso e seco é mostrada na Figura 19c (RCP 4.5) e na Figura 19d (RCP 8.5). As reduções mais rigorosas do período chuvoso são provenientes das projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km, do Eta-HadGEM2-ES 05 km e do Eta-CanESM2 sob o RCP 8.5, sendo em torno de -580 mm (-56%), -564 mm (-54%) e -538 mm (-52%), respectivamente. No período seco, as tendências de redução mais severas são de -69 mm (-40%), -63 mm (-37%) e -59 mm (-34%) para o Eta-CanESM2 RCP 8.5 e o Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. O Eta-MIROC5 apresenta as tendências mais otimistas para o período de 2041 - 2070, com redução de -10 mm (-1%) sob o RCP 4.5 e de -18 mm (-2%) sob o RCP 8.5 na estação chuvosa, ao mesmo tempo mostra que a precipitação irá aumentar na estação seca em torno de +15 mm (+9%) para o RCP 4.5 e +4 mm (+2%) para o RCP 8.5.

Assim como em 2015 - 2040, a precipitação da bacia do rio Doce em 2041 - 2070 possui tendências de redução mais rigorosas no período chuvoso sob o RCP 8.5, especialmente para o Eta-HadGEM2-ES 20 km, o Eta-HadGEM2-ES 05 km e o Eta-CanESM2. Já no período seco, as tendências de redução são máximas para o Eta-CanESM2 e o Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 8.5 e para o Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5. Em 2041 - 2070 as tendências mais amenas são sob o RCP 8.5 para o Eta-MIROC5, que apresenta as menores reduções do período chuvoso e tendência de aumento da precipitação média no período seco.

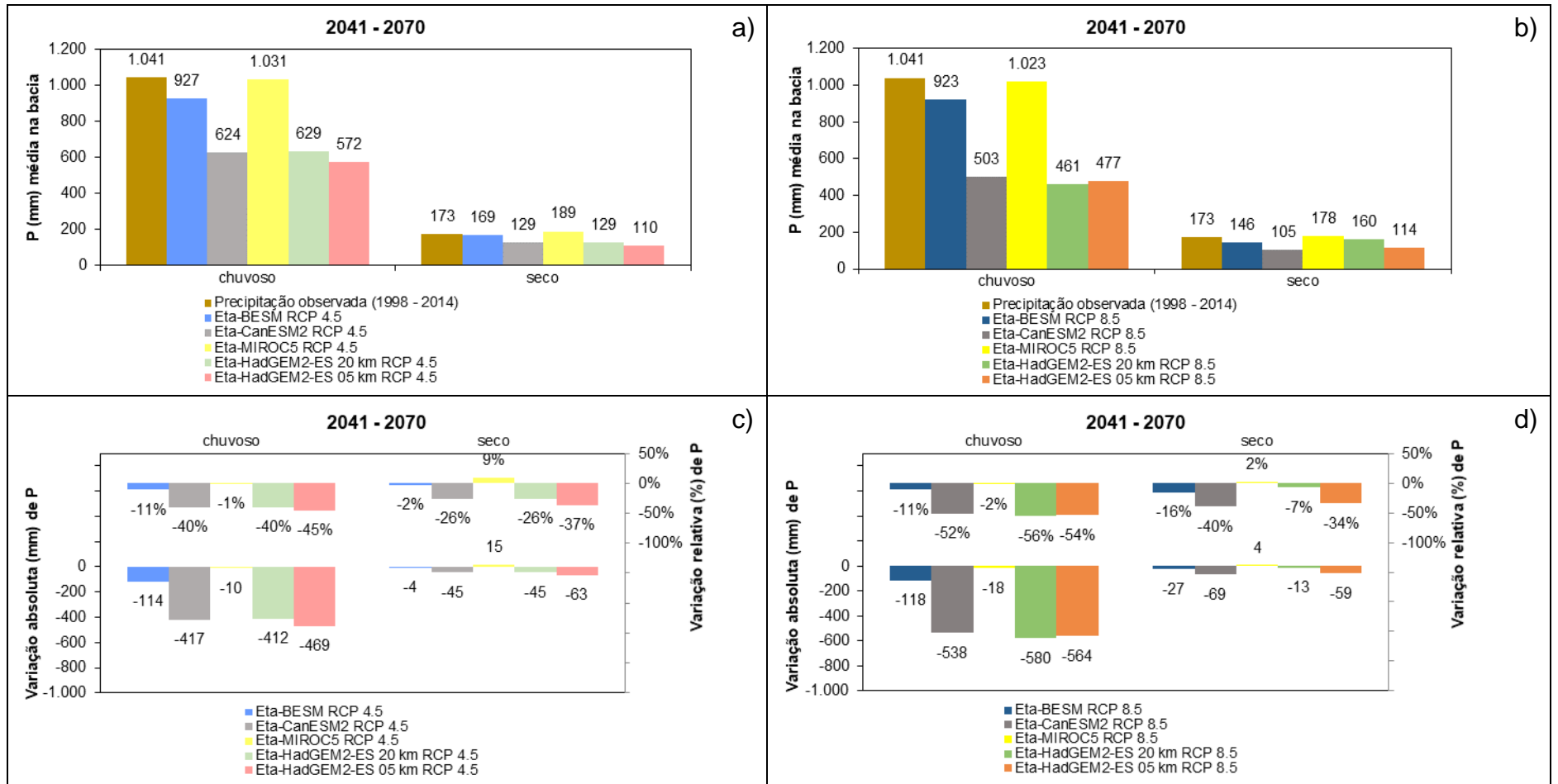


Figura 19: Precipitação média da bacia do rio Doce nos períodos chuvoso e seco sob o RCP 4.5 (a) e o RCP 8.5 (b) e variação relativa e absoluta sob o RCP 4.5 (c) e o RCP 8.5 (d) em relação ao período base (1998 - 2014), no período de 2041 a 2070.

A precipitação média dos períodos chuvoso e seco tende a diminuir no período de 2071 - 2099 sob os dois cenários (Figura 20a e Figura 20b), exceto para as projeções de precipitação do Eta-BESM e do Eta-MIROC5 sob RCP 4.5 no período seco. As variações absoluta e relativa da precipitação média dos períodos chuvoso e seco em 2071 - 2099 são apresentadas na Figura 20c e na Figura 20d sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5, respectivamente. No período chuvoso as reduções atingem -815 mm (-78%) e no período seco -124 mm (-71%) para o Eta-CanESM2 RCP 8.5, sendo essas as tendências de reduções mais rigorosas do século XXI para a bacia do rio Doce. No período chuvoso, o Eta-MIROC5 apresenta as tendências de redução mais amenas de -50 mm (-5%) sob o RCP 4.5 e de -83 mm (-8%) sob o RCP 8.5, enquanto no período seco o Eta-BESM e o Eta-MIROC5 apresentam tendência de aumento em torno de +6 mm (+3%) sob o RCP 4.5.

De modo geral, as projeções do Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES 05 km e do Eta-HadGEM2-ES 20 km para o século XXI indicam que as precipitações dos períodos chuvoso e seco diminuirão na bacia do rio Doce para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, exceto no período seco para as projeções do Eta-MIROC5 em 2041 - 2070, para ambos os cenários, e as projeções do Eta-BESM e do Eta-MIROC5 sob RCP 4.5 em 2071 - 2099. Similar aos resultados da redução da precipitação da bacia do rio Doce, Lyra et al. (2017) mostraram que os ciclos anuais de precipitação sofrerão uma grande redução nos meses mais chuvosos de acordo com as projeções do Eta-HaGEM2-ES 05 km na região metropolitana de Rio de Janeiro e de São Paulo e Santos, que são próximas à bacia do rio Doce.

Chou et al. (2014a), ao avaliar as projeções do Eta-MIROC5 e do Eta-HadGEM2-ES 20 km (2011 - 2099) sobre a América do Sul sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 observaram que a precipitação tende a reduzir em todas as regiões e em todos os meses para o Eta-HadGEM2-ES 20 km, corroborando com os resultados encontrados neste trabalho. Por outro lado, de acordo com Chou et al. (2014a), a precipitação das projeções do Eta-MIROC5 tende a aumentar em setembro, outubro e novembro - SON na região Centro Sul, na qual está inserida a bacia do rio Doce, ao passo que neste trabalho verificou-se que as projeções do Eta-MIROC5 apresentam tendência de aumento da precipitação no período seco (abril a setembro).

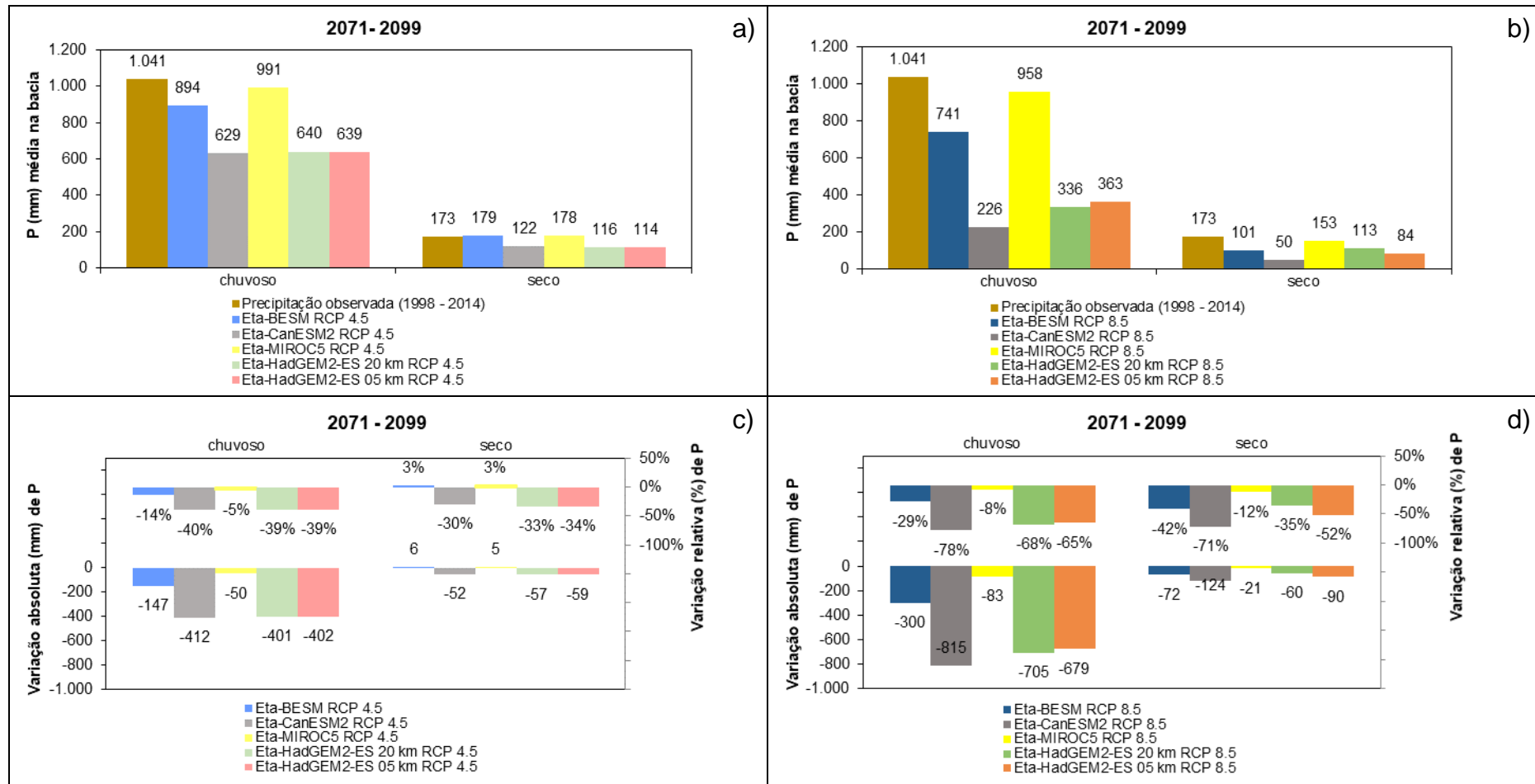


Figura 20: Precipitação média da bacia do rio Doce nos períodos chuvoso e seco sob o RCP 4.5 (a) e o RCP 8.5 (b) e variação relativa e absoluta sob o RCP 4.5 (c) e o RCP 8.5 (d) em relação ao período base (1998 - 2014), no período de 2071 a 2099.

Apesar de haver aumento da precipitação média no período seco em relação à projeção de alguns modelos, apenas a projeção da precipitação média anual do Eta-MIROC5 RCP 4.5 em 2041 - 2070 mostra ligeira tendência de aumento. As demais projeções dos modelos climáticos para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 (Tabela 2) indicam que a precipitação média anual para a bacia do rio Doce tende a diminuir ao longo do século XXI. Há grande diferença entre as tendências de precipitação média anual dos modelos, semelhante ao que ocorre para precipitação média nos períodos chuvoso e seco, evidenciando as incertezas dos modelos climáticos e a necessidade de avaliar diferentes modelos e cenários de clima, assim como observado por Andrade et al. (2020).

Tabela 2: Precipitação média anual da bacia do rio Doce e variação relativa dos períodos de 2015 - 2040, 2041 - 2070 e 2071 - 2099, em relação a precipitação média anual do período de base (1998 - 2014).

Período base (1998 – 2014)							
Precipitação (mm)							
1214							
Cenário	Modelo Climático	2015 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099	
		Precipitação (mm)	Variação	Precipitação (mm)	Variação	Precipitação (mm)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	976	-20%	1096	-10%	1074	-12%
	Eta-CanESM2	803	-34%	753	-38%	751	-38%
	Eta-MIROC5	1021	-16%	1220	0%	1169	-4%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	587	-52%	758	-38%	756	-38%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	585	-52%	682	-44%	753	-38%
RCP 8.5	Eta-BESM	1153	-5%	1070	-12%	843	-31%
	Eta-CanESM2	823	-32%	608	-50%	276	-77%
	Eta-MIROC5	984	-19%	1201	-1%	1111	-9%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	464	-62%	621	-49%	449	-63%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	480	-60%	591	-51%	446	-63%
Legenda de cores da variação relativa		<-70%	-70% a -50%	-50% a -20%	>-20%		

Em comparação com a precipitação observada anual do período base (1214 mm), a precipitação projetada em 2015 - 2040 sofre grandes reduções, atingindo -62% e -60% para o Eta-HadGEM2-ES 20 km e o Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 8.5, respectivamente. Logo, a precipitação anual da bacia pode chegar a, respectivamente, 464 mm e 480 mm nesse período. A projeção do Eta-BESM sob o RCP 8.5 apresenta a tendência mais otimista para o período, de modo que a

precipitação média anual da bacia tende a sofrer redução de -5%, chegando a 1153 mm.

No período de 2041 - 2070, a precipitação média anual da bacia do rio Doce sofre reduções que chegam a -51%, -50% e -49% sob o RCP 8.5 e, conseqüentemente, a precipitação média anual pode atingir valores de 591 mm, 608 mm e 621 mm para o Eta-HadGEM2-ES 05 km, o Eta-CanESM2 e o Eta-HadGEM2-ES 20 km, respectivamente. Em contrapartida, o modelo climático Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 apresenta tendência positiva de +0,4% da precipitação média anual e o Eta-MIROC5 sob o RCP 8.5 apresenta leve tendência de redução de -1%, logo a precipitação da bacia tende a ser, respectivamente, 1220 mm e 1201 mm. Com exceção das projeções do Eta-BESM sob o cenário RCP 8.5 e o Eta-CanESM2 para os dois cenários, as projeções de todos os modelos mostram tendências de redução menores em 2041 - 2070 em relação a 2015 - 2040.

No período de 2071 - 2099, as projeções do Eta-CanESM2 sob o cenário mais pessimista, o RCP 8.5, apontam que a precipitação média anual da bacia do rio Doce tende a sofrer forte redução (-77%), chegando a somente 276 mm. O Eta-HadGEM2-ES 05 km e o Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5 também possuem tendências de grandes reduções, próximas às reduções apresentadas em 2015 - 2040, sendo elas em torno de -63%. Já o Eta-MIROC5 apresenta tendência de redução de -4% sob o RCP 4.5 e de -9% sob o RCP 8.5, de maneira que a precipitação média anual da bacia tende a permanecer em 1169 mm e 1111 mm, respectivamente. Ribeiro Neto et al. (2016) avaliaram o impacto das mudanças climáticas nos processos hidrológicos do território brasileiro em função das projeções do Eta-HadGEM2-ES e do Eta-MIROC5 e também observou redução da precipitação média anual, sendo que em 2071 - 2099 a precipitação pode reduzir entre 300 mm e 800 mm na região Sudeste do Brasil, segundo os autores.

Lyra et al. (2017), também observaram forte redução na precipitação média anual para as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km no fim do século XXI, a qual é maior que -50% para o Rio de Janeiro e entre -40% e -45% para região metropolitana de São Paulo e Santos, com destaque para o cenário RCP 8.5. Porém, neste estudo verifica-se que a precipitação anual da bacia do rio Doce pode sofrer reduções ainda maiores, em torno de -63%, para o Eta-HadGEM2-ES 05 km RCP 8.5 no fim do século XXI.

Essas reduções podem ter impactos negativos na disponibilidade de água da bacia do rio Doce, que é de grande importância no leste mineiro e noroeste do Espírito Santo, devido ao uso da água para agropecuária, complexos industriais e geração de energia elétrica.

5.2.2 Temperatura

As alterações na temperatura média da bacia do rio Doce no decorrer do século XXI foram avaliadas a partir da variação absoluta da temperatura média anual e da temperatura média para o verão (dezembro, janeiro e fevereiro - DJF), o outono (março, abril e maio - MAM), o inverno (junho, julho e agosto - JJA) e a primavera (setembro, outubro e novembro - SON). As temperaturas foram provenientes das projeções dos modelos climáticos Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES 20 km e Eta-HadGEM2-ES 05 km, corrigidas com escalonamento linear, para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. A temperatura média nos períodos de 2015 - 2040, 2041 - 2070 e 2071 - 2099 é comparada com a temperatura média entre 1961 e 1990 do *Climatic Research Unit* - CRU (NEW et al., 2002), em função da disponibilidade de dados. A temperatura média observada da bacia do rio Doce em 1961 - 1990 é maior no verão - DJF, com 24,4°C, e menor no inverno - JJA, com 19,7°C, já no outono - MAM e na primavera - SON a temperatura média é de 22,9°C e 22,3°C, respectivamente (Figura 21).

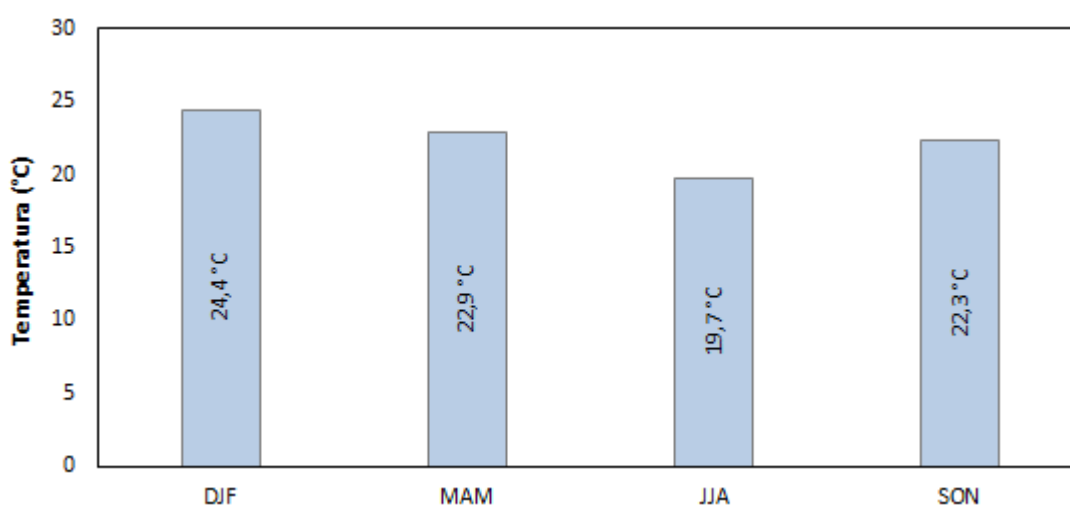


Figura 21: Temperatura observada do CRU média em DJF, MAM, JJA e SON (1961 - 19990).

A temperatura média da bacia do rio Doce para as estações do ano tende a aumentar de acordo com a projeção de todos os modelos climáticos em 2015 - 2040, 2041 - 2070 e 2071 - 2099 para ambos os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. No entanto, há grande diferença entre as projeções da temperatura para cada modelo e RCP (Figura 22 e Figura 23).

As projeções da temperatura média das estações do ano e a variação absoluta em 2015 - 2040 são apresentadas na Figura 22a para o RCP 4.5 e na Figura 22b para o RCP 8.5. Em 2015 - 2040, as menores tendências de aumento da temperatura média para DJF são das projeções do Eta-BESM RCP 8.5 e do Eta-MIROC5 RCP 4.5 ($0,7^{\circ}\text{C}$) e para MAM são do Eta-BESM RCP 8.5 ($0,5^{\circ}\text{C}$) e do Eta-BESM RCP 4.5 ($0,6^{\circ}\text{C}$). Para JJA e SON, o Eta-BESM sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 apresentam as menores tendências de aumento ($0,5^{\circ}\text{C}$).

Em 2015 - 2040, a temperatura média da bacia do rio Doce em DJF pode aumentar, de acordo com as projeções, até $2,3$ e $2,1^{\circ}\text{C}$ para o Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 8.5 e o RCP 4.5, respectivamente. Em MAM, as maiores tendências de aumento da temperatura média são do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 8.5 ($2,9^{\circ}\text{C}$) e do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob RCP 8.5 ($2,4^{\circ}\text{C}$). EM JJA, as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km e Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5 apresentam as maiores tendências de aumento da temperatura média, sendo de $2,6^{\circ}\text{C}$ e $2,3^{\circ}\text{C}$, nessa ordem. Em relação à média de SON, o Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 8.5 e o Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 apresentam as maiores tendências de aumento da temperatura ($2,2^{\circ}\text{C}$).

Em relação a temperatura média das estações em 2015 - 2040, as projeções do Eta-BESM apresentam as menores tendências de aumento das estações, exceto para DJF sob o RCP 4.5, em que o Eta-MIROC5 apresenta a menor tendência de aumento para a temperatura. Em geral, as projeções do Eta-MIROC5 apresentam tendências intermediárias, e o Eta-HadGEM2-ES 05 km, o Eta-HadGEM2-ES 20 km e o Eta-CanESM2 apresentam as maiores tendências de aumento para ambos os cenários.

As projeções da temperatura média das estações do ano e a variação absoluta em 2041 - 2070 são apresentadas na Figura 22c (RCP 4.5) e na Figura 22d (RCP 8.5). No período de 2041 - 2070, as tendências mais otimistas, ou seja, as que apresentam menor aumento da temperatura ocorrem sob o RCP4.5 em DJF para o Eta-BESM

(1,2°C) e o Eta-MIROC5 (1,4°C), em MAM para o Eta-BESM (1,1°C) e o Eta-MIROC5 (1,2°C), em JJA para o Eta-BESM (1,0°C) e o Eta-MIROC5 (1,2°C), assim como em SON para o Eta-BESM (1,2°C) e o Eta-MIROC5 (1,6°C). De modo geral, as projeções do Eta-BESM e do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 apresentam menores de tendências de aumento da temperatura média das estações.

No período de 2041 - 2070, o Eta-HadGEM2-ES 05 km e o Eta-CanESM2 sob o RCP 8.5 apresentam a maior tendência de aumento da temperatura média (3,6°C) para DJF. Em MAM, o aumento da temperatura média pode chegar a 3,8°C e a 3,4°C para o Eta-HadGEM2-ES 05 km e o Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5, nessa ordem. Para JJA, a temperatura média pode ter aumento de até 3,8°C e 3,7°C, de acordo com o Eta-HadGEM2-ES 05 km e o Eta-HadGEM2-ES 20 km sob RCP 8.5. As projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km e do Eta-CanESM2 sob o RCP 8.5 apresentam as maiores tendências de aumento da temperatura média em SON (3,5°C).

As projeções da temperatura média das estações do ano e a variação absoluta para o período de 2071 - 2099 são apresentadas na Figura 23a (RCP 4.5) e na Figura 23b (RCP 8.5). No período de 2071 - 2099, as tendências de menor aumento da temperatura média das estações são sob o cenário RCP 4.5 em DJF para o Eta-BESM (1,6°C) e o Eta-MIROC5 (1,7°C), em MAM para o Eta-BESM (1,3°C) e o Eta-MIROC5 (1,7°C), em JJA para o Eta-BESM (1,3°C) e o Eta-MIROC5 (1,6°C), assim como em SON para o Eta-BESM (1,5°C) e o Eta-MIROC5 (2,0°C). Em termos das tendências de maior aumento da temperatura média, as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km e do Eta-CanESM2 sob RCP 8.5 indicam aumento de 6,1°C e 5,4°C para o verão - DJF, respectivamente. Em MAM, a temperatura média pode aumentar até 6,0°C e 5,2°C, conforme as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km e do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5. Em JJA, as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km e do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5 possuem as tendências de maior aumento da temperatura média, sendo elas de 5,9 °C e 5,5°C. Em SON, as tendências de aumento são maiores para as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km (6,2°C) e do Eta-CanESM2 (5,7°C) sob o RCP 8.5.

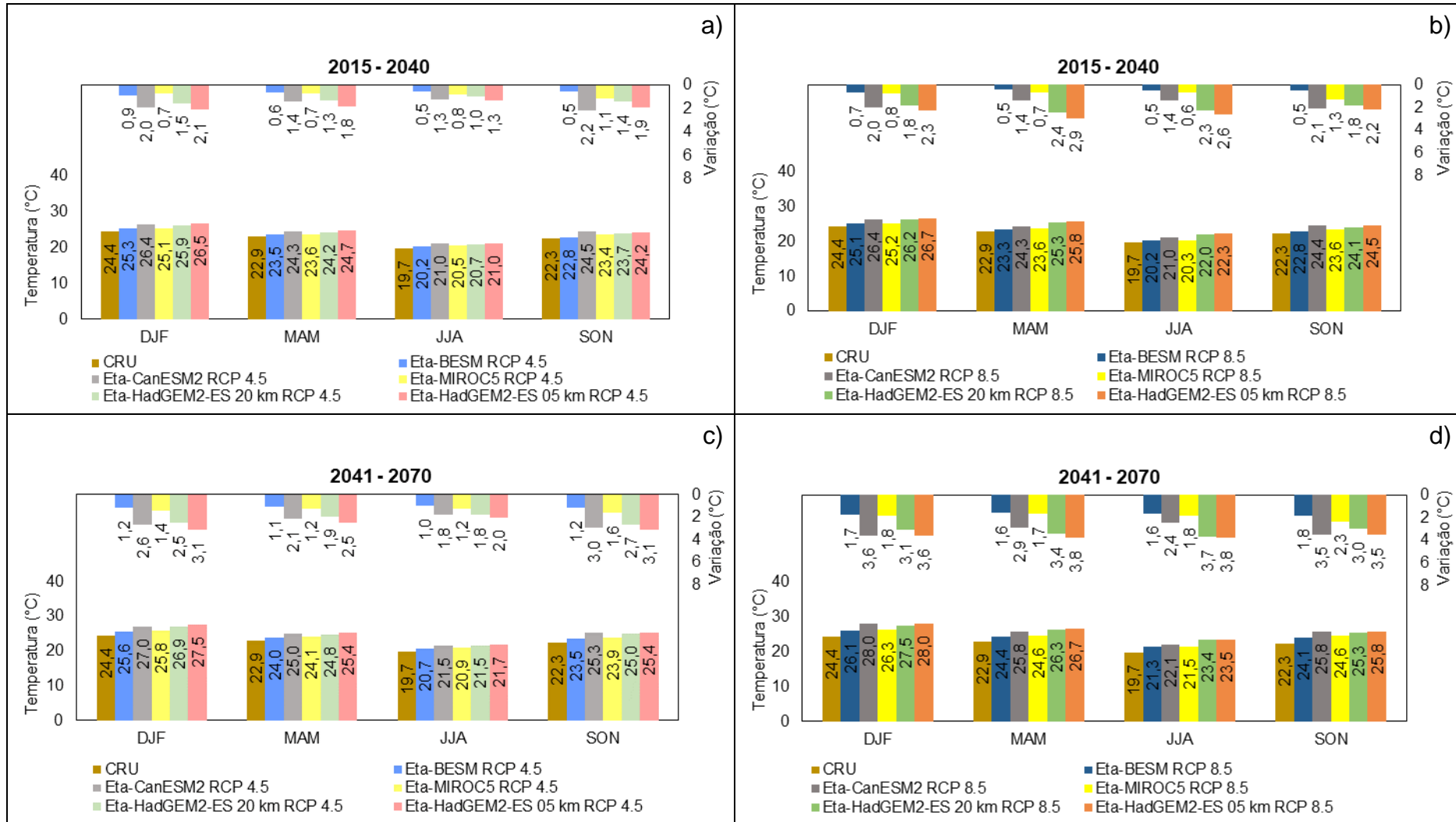


Figura 22: Temperatura média da bacia do rio Doce e a variação absoluta em 2015 - 2040 sob o RCP 4.5 (a) e o RCP 8.5 (b) e temperatura média da bacia do rio Doce e a variação absoluta em 2041 - 2070 sob o RCP 4.5 (c) e o RCP 8.5 (d) em relação aos dados observados do CRU (1961 - 1990).

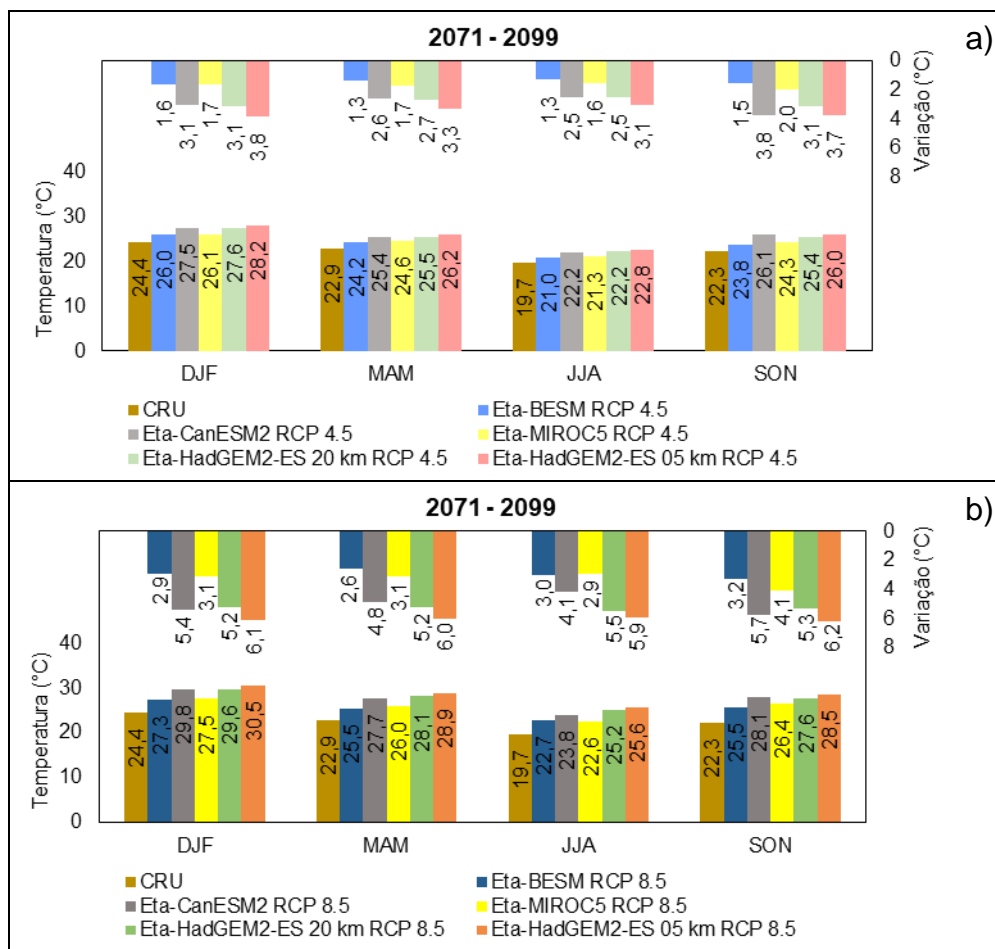


Figura 23: Temperatura média da bacia do rio Doce e a variação absoluta em 2071 - 2099 sob o RCP 4.5 (c) e o RCP 8.5 (d) em relação aos dados observados do CRU (1961 - 1990).

As temperaturas médias anuais da bacia do rio Doce em 2015 - 2040, 2041 - 2070, 2071 - 2099 sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 e as respectivas variações absolutas são apresentadas na Tabela 3.

Em 2015 - 2040, as menores tendências de aumento da temperatura são de 0,6°C para o Eta-BESM sob o RCP 4.5 e RCP 8.5, enquanto as tendências de maior aumento são das projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km (2,1°C) e do Eta-HadGEM2-ES 05 km (2,5°C) sob o RCP 8.5. No período de 2041 - 2070, as tendências mais otimistas são do Eta-BESM (1,1°C) e do Eta-MIROC5 (1,4°C) sob o RCP 4.5, ao passo que as tendências de maior aumento da temperatura média anual são do Eta-HadGEM2-ES 05 km (3,7°C), Eta-HadGEM2-ES 20 km (3,3°C) e do Eta-CanESM2 (3,1°C) sob o RCP 8.5. No período de 2071 - 2099, as tendências de menor aumento da temperatura são do Eta-BESM (1,4°C) e do Eta-MIROC5 (1,7°C) sob o RCP 4.5, ao passo que as tendências de maior aumento da temperatura média anual são do

Eta-HadGEM2-ES 05 km (6,1°C), Eta-HadGEM2-ES 20 km (5,3°C) e do Eta-CanESM2 (5,0°C) sob o RCP 8.5.

É possível observar que a temperatura média de DJF, MAM, JJA e SON e a temperatura média anual tende a aumentar à medida que se avança ao longo do século XXI, de modo que a temperatura projetada mostra a maior tendência de aumento sob o cenário RCP 8.5 em 2071 - 2099, quando comparada com a temperatura média em 2015 - 2040 e 2041 - 2070. Assim, as tendências de aumento da temperatura ao longo do século XXI são máximas para Eta-HadGEM2-ES 05 km, Eta-HadGEM2-ES 20 km e Eta-CanESM2 sob o RCP 8.5. Segundo Chou et al. (2014a), simulações do Eta-HadGEM2-ES 20 km no fim do século XXI, sob RCP 8.5, mostram maior sensibilidade ao aumento do CO₂ e grande aquecimento, especialmente no Centro e Sudeste do Brasil.

Tabela 3: Temperatura média anual da bacia do rio Doce e variação absoluta para 2015 - 2040, 2041 - 2070, 2071 - 2099, em relação a temperatura média anual observada do CRU (1961 - 1990).

Período (1961 – 1990)							
Temperatura (°C)							
22,3							
Cenário	Modelo Climático	2015 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2099	
		Temperatura (°C)	Variação (°C)	Temperatura (°C)	Variação (°C)	Temperatura (°C)	Variação (°C)
RCP 4.5	Eta-BESM	23,0	0,6	23,4	1,1	23,8	1,4
	Eta-CanESM2	24,0	1,7	24,7	2,4	25,3	3,0
	Eta-MIROC5	23,2	0,9	23,7	1,4	24,0	1,7
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	23,6	1,3	24,5	2,2	25,2	2,9
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	24,1	1,8	25,0	2,7	25,8	3,5
RCP 8.5	Eta-BESM	22,9	0,6	24,0	1,7	25,3	2,9
	Eta-CanESM2	24,0	1,7	25,4	3,1	27,3	5,0
	Eta-MIROC5	23,2	0,8	24,2	1,9	25,6	3,3
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	24,4	2,1	25,6	3,3	27,6	5,3
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	24,8	2,5	26,0	3,7	28,4	6,1
Legenda de cores da variação absoluta		< 2°C	2°C a 4°C		4°C a 6°C		> 6°C

Apesar do Eta-HadGEM2-ES 20 km e do Eta-HadGEM2-ES 05 km apresentarem tendência de redução da precipitação semelhantes (Tabela 2), em relação à temperatura, a tendência de aumento do Eta-HadGEM2-ES 05 km é mais pronunciada em comparação com o Eta-HadGEM2-ES 20 km. Segundo Lyra et al. (2017), embora

o Eta-HadGEM2-ES 05 km apresente erros menores em comparação com o clima histórico, ele tende a superestimar a temperatura no período histórico em alguns meses do ano, enquanto o Eta-HadGEM2-ES 20 km tende a subestimar. Além disso, segundo os autores o Eta-HadGEM2-ES 05 km captura melhor valores extremos. Esse comportamento pode justificar a diferença de temperatura no futuro entre os modelos.

De acordo com Salazar, Nobre e Oyama (2007), modelos climáticos globais do IPCC-AR4 e modelos regionais apontam tendência de aumento da temperatura na faixa de 2 a 6°C até 2100 na América do Sul, similar aos resultados da Tabela 3. Para os autores, o aumento da temperatura pode intensificar a evapotranspiração e, conseqüentemente, reduzir a quantidade de água no solo. Logo, pode haver substituição de biomas por outros tipos de vegetação mais adaptadas à menor quantidade de água no solo, como a redução das áreas de cobertura de florestas tropicais e a substituição por savanas. A América do Sul, onde está inserida a bacia do rio Doce, abriga ecossistemas únicos e possui uma das maiores biodiversidades do planeta e uma variedade de gradientes ecoclimáticos (IPCC, 2014b). No entanto, as alterações da cobertura vegetal em função das mudanças climáticas podem impactar negativamente a diversidade ecológica das plantas e animais.

5.3 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA VAZÃO

A partir das projeções dos modelos climáticos utilizados foram simuladas séries futuras de vazão em cada trecho de drenagem da bacia do rio Doce. A avaliação do impacto das mudanças climáticas na bacia do rio Doce foi realizada de forma pontual em locais escolhidos nos principais afluentes da bacia e no rio principal e de forma espacial a partir de mapas.

5.3.1 Avaliação pontual

A avaliação pontual foi realizada com base na variação relativa da vazão média anual em 2015 - 2040, 2041 - 2070 e 2071 - 2099 em relação ao período base (1998 - 2014) em nove pontos presentes nos mais importantes afluentes e no rio principal da bacia do rio Doce (Figura 24), sendo eles no: rio Piranga, rio Casca, rio Piracicaba, rio

Santo Antônio, rio Suaçuí Grande, rio Caratinga, rio Manhuaçu, rio Guandu e no exutório.

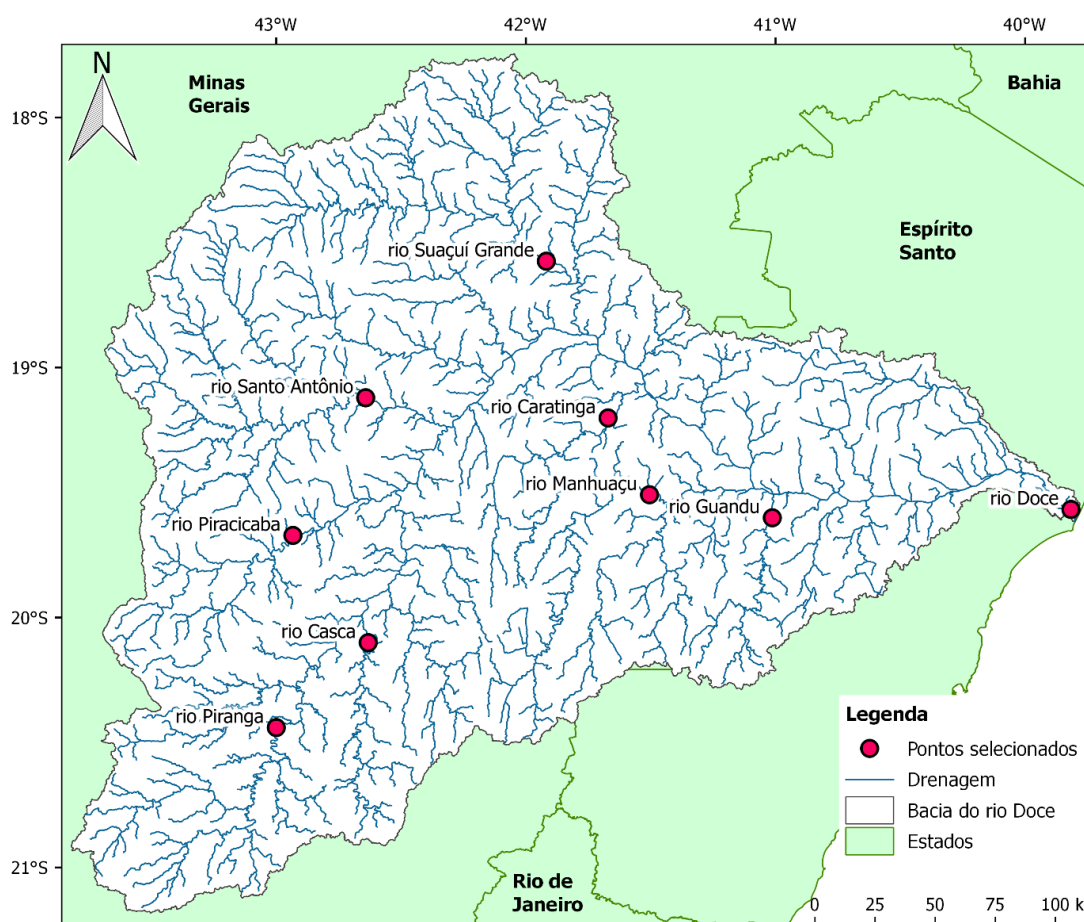


Figura 24: Pontos de interesse na bacia do Doce para análise das vazões futuras.

As tabelas do Apêndice A apresentam os resultados das vazões médias anuais (Q_{med}) e das vazões de referência $Q_{7,10}$ e Q_{90} dos Estados do Espírito Santo e Minas Gerais, respectivamente, e as variações relativas para os pontos de interesse nos períodos de 2015 - 2040, 2041 - 2070 e 2071 - 2099. Os gráficos com a variação relativa da vazão média anual nos locais escolhidos, em relação ao período base (1998 - 2014), são mostrados na Figura 25 (RCP 4.5) e na Figura 26 (RCP 8.5) para o período de 2015 - 2040, na Figura 27 (RCP 4.5) e na Figura 28 (RCP 8.5) para o período de 2041 - 2071 e na Figura 29 (RCP 4.5) e na Figura 30 (RCP 8.5) para o período de 2071 - 2099.

Entre 2015 - 2040, as vazões médias anuais apresentaram tendências de redução, que variam de -5% a -84%, de acordo com todos os modelos. Em todos os pontos de interesse as vazões médias anuais simuladas com as projeções do Eta-BESM sob o RCP 8.5 apresentaram a tendência de redução mais otimista, sendo ela inferior a -

15%, exceto para o rio Piranga em que a redução projetada é de -28%. As maiores reduções da vazão são provenientes das simulações com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km e do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5, sendo superiores a -71% em cada um dos pontos.

As vazões médias anuais nos pontos de interesse resultantes das simulações com base no Eta-BESM sofreram reduções entre -5% (RCP 8.5) e -42% (RCP 4.5), com o Eta-CanESM2 as reduções são entre -36% (RCP 8.5) e -59% (RCP 8.5), com o Eta-MIROC5 as reduções estão entre -19% (RCP 4.5) e -41% (RCP 8.5), enquanto as reduções com o Eta-HadGEM2-ES 20 km são entre -57% (RCP 4.5) e -83% (RCP 8.5) e com base no Eta-HadGEM2-ES 05 km são entre -60% (RCP 4.5) e -84% (RCP 8.5).

Andrade et al. (2020) avaliaram o impacto das mudanças climáticas na bacia do rio Mundaú (PE) e encontraram reduções na vazão média anual em 2017 - 2040 entre -37% (RCP 4.5) e -42% (RCP 8.5) com o Eta-MIROC5. No entanto, as vazões simuladas com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km apresentaram reduções máximas de -53% na bacia do rio Mundaú sob o RCP 8.5, ao passo que as reduções nos pontos de interesse da bacia do rio Doce com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km podem chegar a -83% sob o RCP 8.5.

De acordo com Santos et al. (2019), as vazões simuladas com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5, corrigidas com escalonamento linear, podem apresentar reduções de até -90% nos meses mais chuvosos na bacia do rio Paraguaçu (BA) em 2020 - 2040, o que demonstra que a magnitude das reduções nas vazões simuladas com as projeções do Eta-HadGEM2-ES possui grande variabilidade, podendo ser elevadas como as observadas neste estudo para a bacia do rio Doce em 2015 - 2040.

Diferentemente de Santos et al. (2019), ao avaliar o impacto das mudanças climáticas na bacia do rio Lavrinhas (MG), Alvarenga et al. (2016b) obtiveram reduções nas vazões médias mensais entre -50% e -65% em 2011 - 2040 com o Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5. Oliveira et al. (2017) mostraram que a redução na vazão média mensal da bacia do rio Grande em 2007 - 2040 pode variar entre -41% a -56% com base no Eta-HadGEM2-ES 20 km em relação aos dois cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5) e entre -14% e -29% com o Eta-MIROC5 sob o RCP 8.5, sendo essas inferiores as

reduções das vazões médias anuais em 2015 - 2040 verificadas na bacia do rio Doce com base nas projeções do Eta-HadGEM2-ES e o Eta-MIROC5.

Ao contrário dos resultados que apontam tendência de redução severa para bacia do rio Doce, as vazões na bacia hidrográfica da Laguna dos Patos simuladas por Schuster et al. (2020) com as projeções do MCG HadGEM2-ES, apresentam uma maior tendência positiva à vazão futura do conjunto de 20 MCG do CMIP5, com variações entre -13% e +29% sob o RCP 8.5 em 2006 - 2035. Dessa forma, as tendências das vazões futuras podem variar muito no início do século XXI em função dos modelos climáticos utilizados, além da localização da região de estudo, como identificado nos estudos em bacias hidrográficas brasileiras (ALVARENGA et al., 2016b; OLIVEIRA et al., 2017; SANTOS et al., 2019; ANDRADE et al., 2020; SCHUSTER et al., 2020).

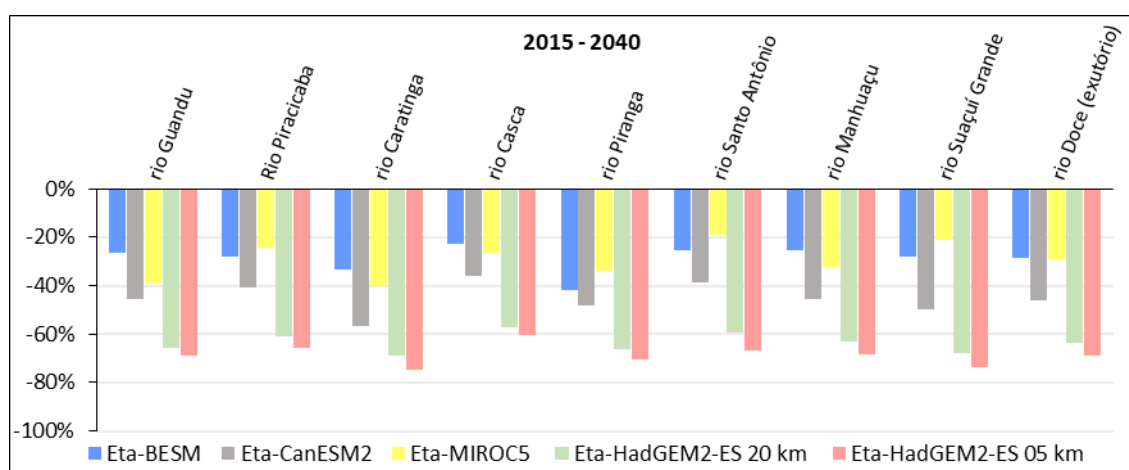


Figura 25: Variação da vazão média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 4.5 em 2015 - 2040 em relação ao período base (1998 - 2014).

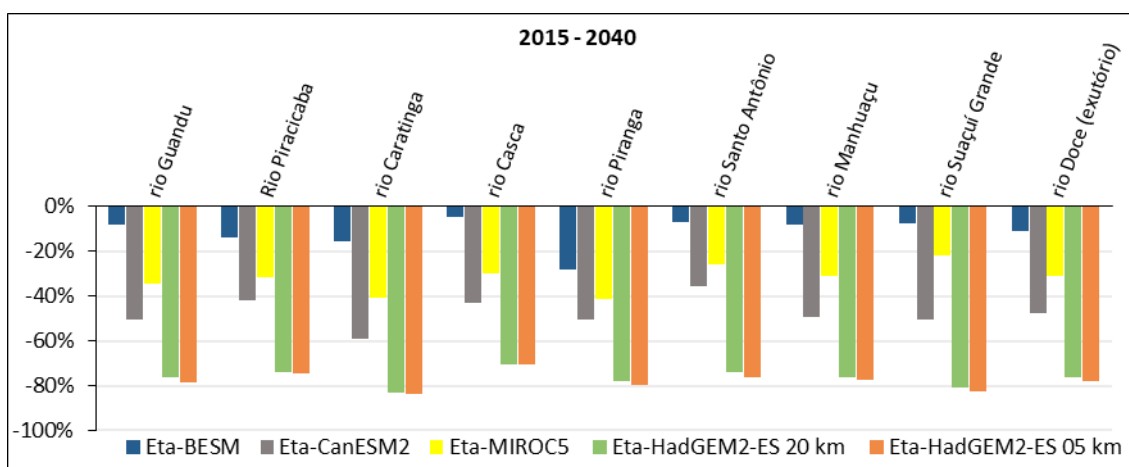


Figura 26: Variação da vazão média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 8.5 em 2015 - 2040 em relação ao período base (1998 - 2014).

No período de 2041 - 2070, as variações da vazão média anual estão entre 0% e -76%, sendo menores que as reduções do período de 2015 - 2040. As vazões futuras simuladas com as projeções do Eta-BESM sob o RCP 4.5 e do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 apresentam as menores tendências de variação nos pontos selecionados e as reduções mínimas em cada ponto são inferiores a -17%. Por outro lado, as simulações com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 8.5 apontaram reduções mais severas das vazões médias anuais nos pontos selecionados, sendo essas reduções maiores que -61% em cada um dos pontos.

As vazões médias anuais simuladas nos pontos de interesse em 2041 - 2070, de acordo com as projeções do Eta-BESM, tendem a reduzir entre -12% (RCP 4.5) e -38% (RCP 8.5), do Eta-CanESM2 podem reduzir de -42% (RCP 4.5) a -69% (RCP 8.5), do Eta-MIROC5 variam entre 0% (RCP 4.5) e -22% (RCP 8.5), do Eta-HadGEM2-ES 20 km tendem a reduzir entre -43% (RCP 4.5) e -73% (RCP 8.5) e do Eta-HadGEM-ES 05 km entre -54% (RCP 4.5) e -76% (RCP 8.5).

Andrade et al. (2020) mostrou que a vazão média anual da bacia do rio Mundaú em 2041 - 2070 pode aumentar entre +155% (RCP 8.5) e +279% (RCP 4.5) de acordo com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km, ao contrário das reduções encontradas na bacia do rio Doce neste estudo. Segundo os autores, esse aumento abrupto pode estar relacionado as incertezas e erros sistemáticos que existem na modelagem das mudanças climáticas, evidenciando a grande divergência entre as tendências da vazão média anual nas bacias hidrográficas brasileiras.

Nóbrega et al. (2011), mostraram que a vazão média anual da bacia do rio Grande (PR) pode sofrer variação de -20% a +18% em 2040 - 2069 usando seis MCG do CMIP3 e um cenário de aquecimento de +2°C, mostrando as diferenças existentes entre as vazões simuladas com as projeções dos modelos climáticos. Alvarenga et al. (2016b), por outro lado, obteve reduções da vazão média mensal de -20% até -68%, no período chuvoso, na bacia do rio Lavrinhas (MG) em 2041 - 2070 com o Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5. Assim, verifica-se que, para meados do século XXI, há grande distinção entre as tendências da vazão nos estudos em bacias hidrográficas brasileiras, sendo a maioria deles utilizando projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km.

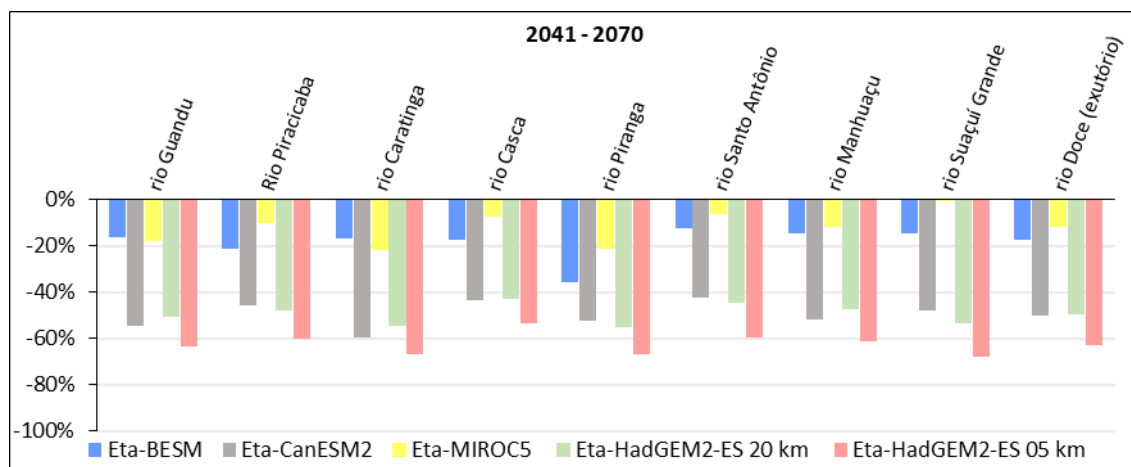


Figura 27: Variação da vazão média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 4.5 em 2041 - 2070 em relação ao período base (1998 - 2014).

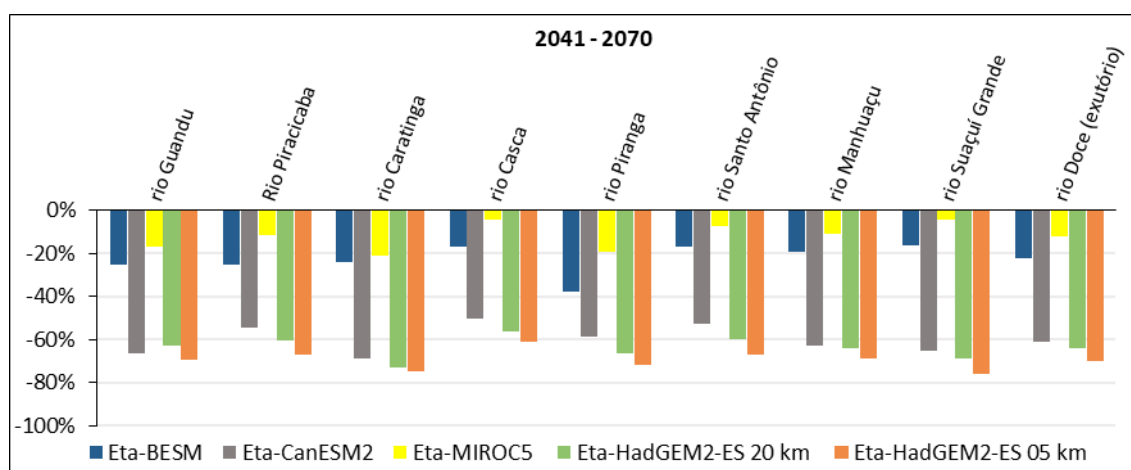


Figura 28: Variação da vazão média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 8.5 em 2041 - 2070 em relação ao período base (1998 - 2014).

As reduções das vazões médias anuais do período de 2071 - 2099 estão entre -2% e -91%, sendo as mais severas do século XXI. As tendências mínimas de reduções são menores que -24% em cada um dos pontos e as vazões simuladas com as projeções do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 apresentaram as reduções mais otimistas na maioria deles. Somente no ponto sobre o rio Piranga as vazões com base no Eta-MIROC5 sob o RCP 8.5 apresentaram as menores reduções (Figura 29). As reduções mais rigorosas em cada ponto são provenientes das simulações com base no Eta-CanESM2 sob o RCP 8.5, sendo maiores que -82% em todos os pontos (Figura 30). As vazões simuladas com projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km e do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 8.5 também possuem altas reduções, maiores que -71% em todos os pontos.

As reduções da vazão média anual em 2071 - 2099 nos pontos de interesse variam de acordo com as projeções do Eta-BESM entre -19% (RCP 4.5) e -55% (RCP 8.5), do Eta-CanESM2 entre -40% (RCP 4.5) e -91% (RCP 8.5), do Eta-MIROC5 entre -2% (RCP 4.5) e -37% (RCP 8.5), do Eta-HadGEM2-ES 20 km entre -36% (RCP 4.5) e -84% (RCP 8.5) e entre -46% (RCP 4.5) e -84% (RCP 8.5) de acordo com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km.

De acordo com Andrade et al. (2020), as reduções da vazão na bacia rios Mundaú podem chegar a -67% sob o Eta-MIROC5 RCP 8.5 e a -28% sob o Eta-HadGEM2-ES RCP 4.5 em 2071 - 2099, em oposição às tendências para bacia do rio Doce, em que as vazões simuladas com as projeções do Eta-MIROC5 são mais otimistas e com o Eta-HadGEM-ES 05 km e 20 km são mais rigorosas.

As tendências da vazão na bacia do rio Doce simulada com as projeções Eta-HadGEM2-ES 20 km mostram reduções mais severas, comparadas com Alvarenga et al. (2016b) para bacia do rio Lavrinhas (MG), cuja vazão média anual pode reduzir até -69% sob o RCP 8.5 no final do século XXI. Oliveira et al. (2017) também encontraram que as tendências de redução mais severas no final do século XXI para a bacia do rio Grande (PR) em relação as projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km, corrigidas com escalonamento linear, sendo elas de -49% a -69% sob o RCP 8.5. As tendências de redução da vazão para o Eta-HadGEM2-ES obtidas na literatura não são tão rigorosas quanto as encontradas na bacia do rio Doce, ainda assim, é grande a severidade das reduções presentes na literatura.

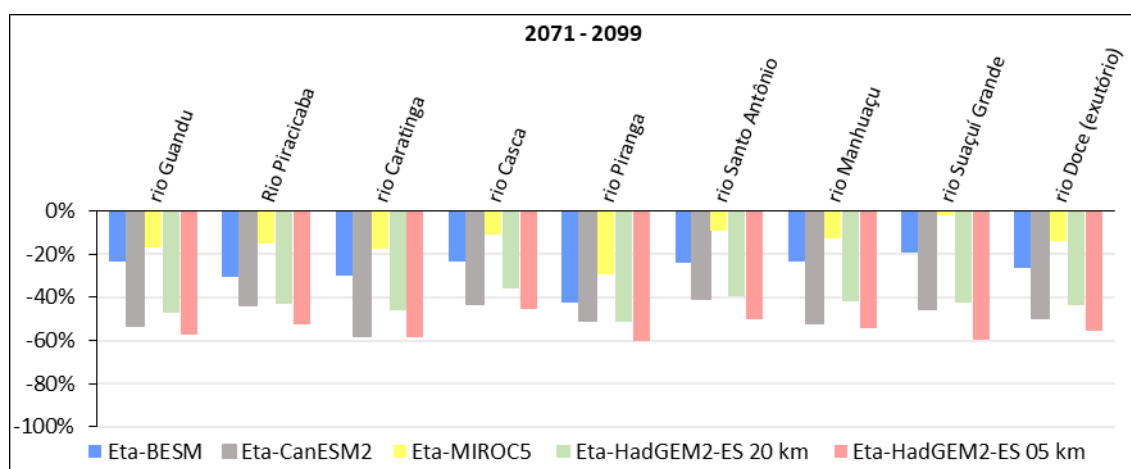


Figura 29: Variação da vazão média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 4.5 em 2071 - 2099 em relação ao período base (1998 - 2014).

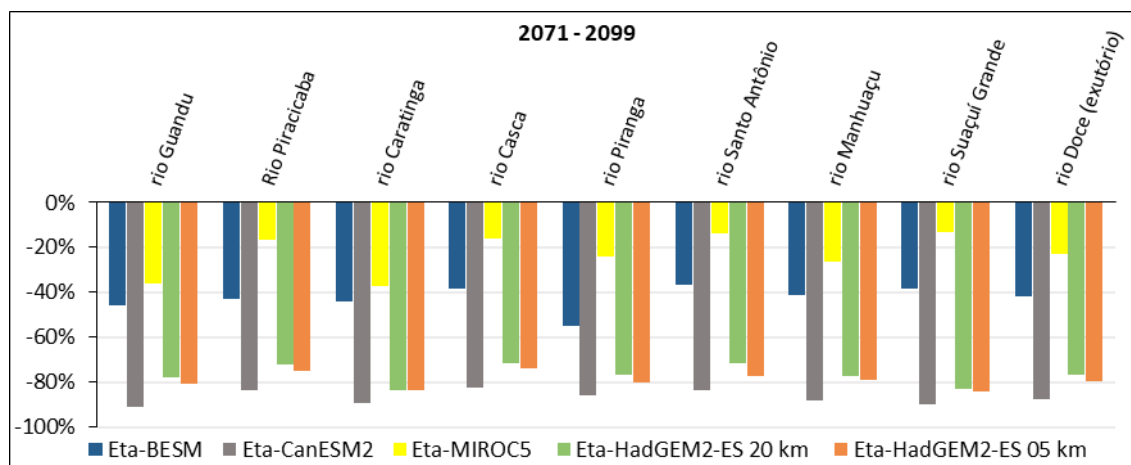


Figura 30: Variação da vazão média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 8.5 em 2071 - 2099 em relação ao período base (1998 - 2014).

De modo geral, as vazões médias anuais geradas com projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km apresentam reduções maiores que o Eta-HadGEM2-ES 20 km, especialmente sob o RCP 4.5. Com exceção dos pontos sobre o rio Caratinga e o rio Casca em 2015 - 2040 e sobre o rio Caratinga em 2071 - 2099 sob o RCP 8.5, nos quais as reduções são iguais para os dois modelos.

As reduções na vazão média anual nos pontos de interesse podem ser justificadas pelas reduções na precipitação (Tabela 2) e no aumento da temperatura (Tabela 3) na bacia do rio Doce. Zhang et al. (2016), em um estudo na bacia do Rio Xin (China), observaram que as mudanças no regime de vazão ocorrem, principalmente, devido às alterações na precipitação. Esses resultados podem fornecer informações sobre possíveis efeitos das mudanças climáticas na vazão dos mais importantes afluentes do rio Doce e do exutório da bacia, apesar das incertezas relacionadas aos modelos climáticos, à metodologia de correção de viés e ao modelo hidrológico.

A análise da redução da vazão média anual nos pontos de interesse também foi realizada com diagramas do tipo *box plot* para os períodos de 2015 - 2040 (Figura 31), 2041 - 2070 (Figura 32) e 2071 - 2099 (Figura 33). Os diagramas *box plot* são muito úteis, pois sintetizam visualmente os dados e permitem uma visão geral do valor central, da dispersão (quartil 25% e quartil 75%), da assimetria, das hastes e de eventuais pontos amostrais discordantes (NAGHETTINI; PINTO, 2007; NETO et al., 2017).

A mediana é uma medida de tendência central que corresponde ao valor que separa a frequência total em duas metades (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Em 2015 - 2040,

as medianas das reduções da vazão média anual foram iguais ou menores que -50% para o RCP 4.5 (Figura 31), sendo mais próximas do quartil superior na maioria dos pontos, assim os valores das reduções são menos dispersos nesse intervalo (LEM et al., 2013). Exceto para o rio Caratinga em que a mediana é maior que -50% e mais próxima do quartil inferior. Em relação ao RCP 8.5, as medianas das reduções estão em torno de -50% em seis dos pontos, já nos pontos sobre o rio Piracicaba, o rio Casca e o rio Santo Antônio as medianas são menores que -50%. Isso significa que metade das projeções dos modelos climáticos possuem redução menor ou em torno de -50% para as vazões futuras simuladas em ambos os cenários.

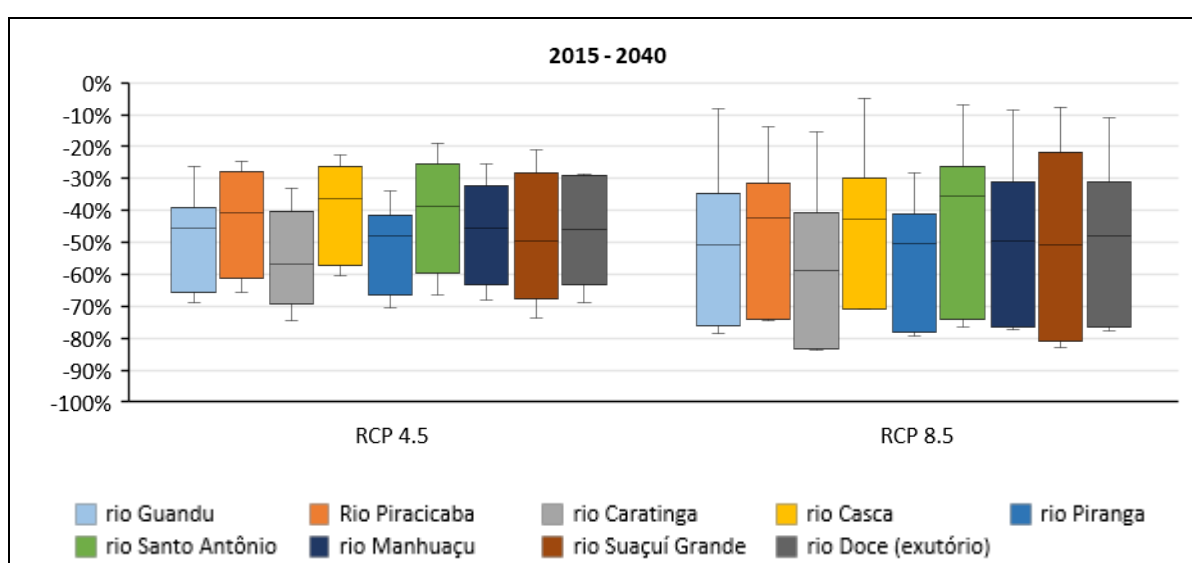


Figura 31: *Box plot* da variação da vazão média anual dos pontos de interesse sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 em 2015 - 2040.

As hastes superiores são maiores sob o RCP 8.5 em comparação com o RCP 4.5, demonstrando que apesar de haver tendências de reduções severas da vazão média anual sob o RCP 8.5 em 2015 - 2040, as menores tendências de redução também ocorrem sob o RCP 8.5. A divergência entre as tendências da vazão média anual provenientes das simulações com as projeções dos modelos climáticos é maior sob o RCP 8.5, devido à grande amplitude interquartil, em comparação com os diagramas *box plot* do RCP 4.5. Esses apresentam menor dispersão das tendências de redução das vazões médias anuais, mostrando melhor concordância entre as vazões simuladas futuras.

No período de 2041 - 2070, sob o RCP 4.5, as medianas das reduções foram menores que -50% em seis dos nove pontos analisados, e ligeiramente maiores que -50% nos pontos sobre o rio Guandu, o rio Caratinga e o rio Piranga (Figura 32). Sob o RCP 8.5,

as medianas foram iguais ou maiores que -60% em seis pontos e em torno de -50% para os pontos sobre o rio Piracicaba, o rio Casca e o rio Santo Antônio. Assim, metade dos modelos climáticos apresentam tendências de redução menores ou em torno de -50% sob o RCP 4.5 e maiores que -60% em grande parte dos pontos, inclusive no exutório da bacia, sob o RCP 8.5.

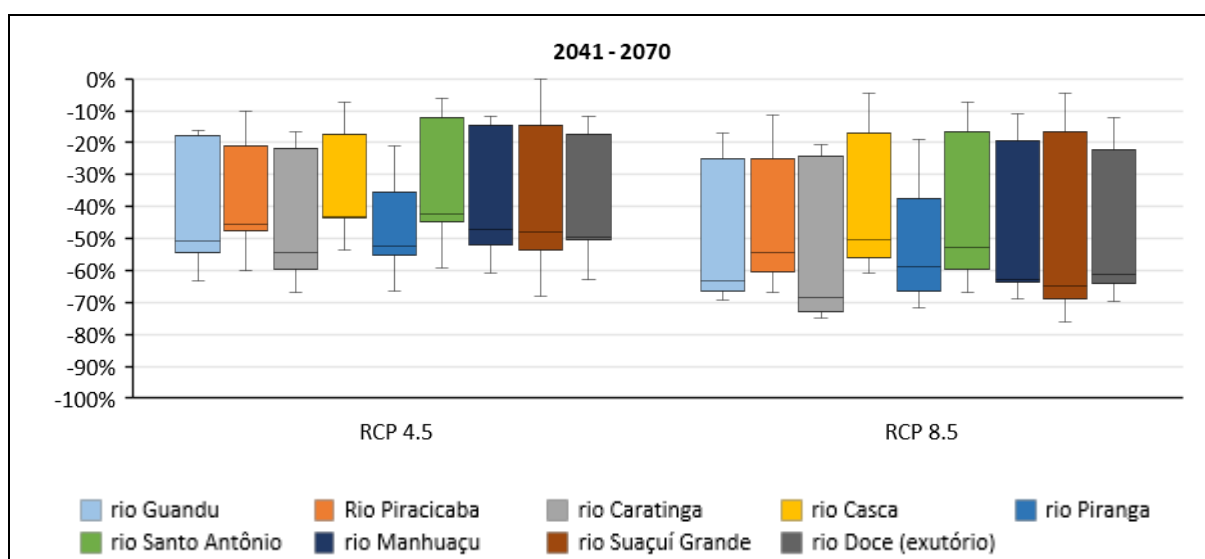


Figura 32: *Box plot* da variação da vazão média anual dos pontos de interesse sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 em 2041 - 2070.

Diferente do período de 2015 - 2040, as medianas estão mais próximas do quartil inferior, o que indica que nesse intervalo as tendências de redução da vazão média anual estão menos dispersas, isto é, há maior concordância entre elas. Assim como no período de 2015 - 2040, a distância entre os quartis é maior sob o RCP 8.5 em comparação com os diagramas de redução sob o RCP 4.5, logo as tendências de redução da vazão média anual são mais divergentes entre os modelos para esse cenário.

No período de 2071 - 2099, as medianas das tendências de redução foram menores que -50% em oito pontos sob o cenário RCP 4.5, somente no ponto sobre o rio Piranga a mediana foi ligeiramente maior que -50% (Figura 33). Porém sob o RCP 8.5, as medianas são maiores que -70%, indicando fortes reduções na vazão média anual no final do século XXI, de acordo com as projeções desse cenário. As medianas em ambos os cenários estão muito próximas do quartil inferior, ou seja, as tendências de redução maiores que os valores da mediana tendem a coincidir.

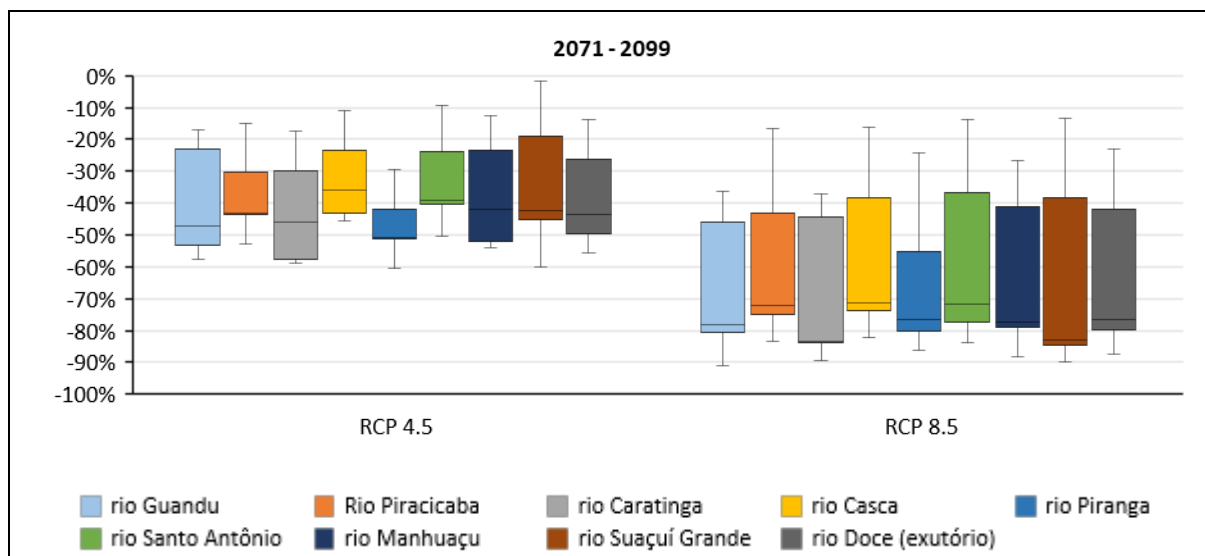


Figura 33: *Box plot* da variação da vazão média anual dos pontos de interesse sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 em 2071 - 2099.

Do mesmo modo que nos demais períodos, os intervalos interquartis são maiores sob o RCP 8.5, confirmando a discordância entre as vazões simuladas futuras. As hastes dos diagramas *box plot* mostram a faixa do conjunto de dados (NUZZO, 2016), ou seja, os valores mínimos e máximos. Em 2071 - 2099, os diagramas possuem hastes superiores longas, revelando que embora as reduções sejam grandes nesse período, as vazões médias anuais simuladas com base em determinados modelos climáticos apresentam tendência de redução bem menores.

Os resultados demonstram diferenças consideráveis nos impactos das mudanças climáticas na vazão média anual em função dos modelos climáticos e dos cenários climáticos (RCP) semelhante ao comportamento apresentado pelas variações da precipitação na bacia do rio Doce. A estimativa dos impactos das mudanças climáticas com base em projeções de modelos climáticos pode apresentar grandes incertezas, pois apesar dos modelos melhorarem na representação dos processos ainda é lenta convergência entre os mesmos (KNUTTI et al., 2012).

5.3.2 Análise espacial

A avaliação da distribuição espacial das tendências da vazão na bacia do rio Doce foi realizada com base na variação relativa da vazão média anual ao longo do século XXI em relação à vazão média anual do período base (1998 - 2014) em cada trecho de rio simulado (Figura 34).

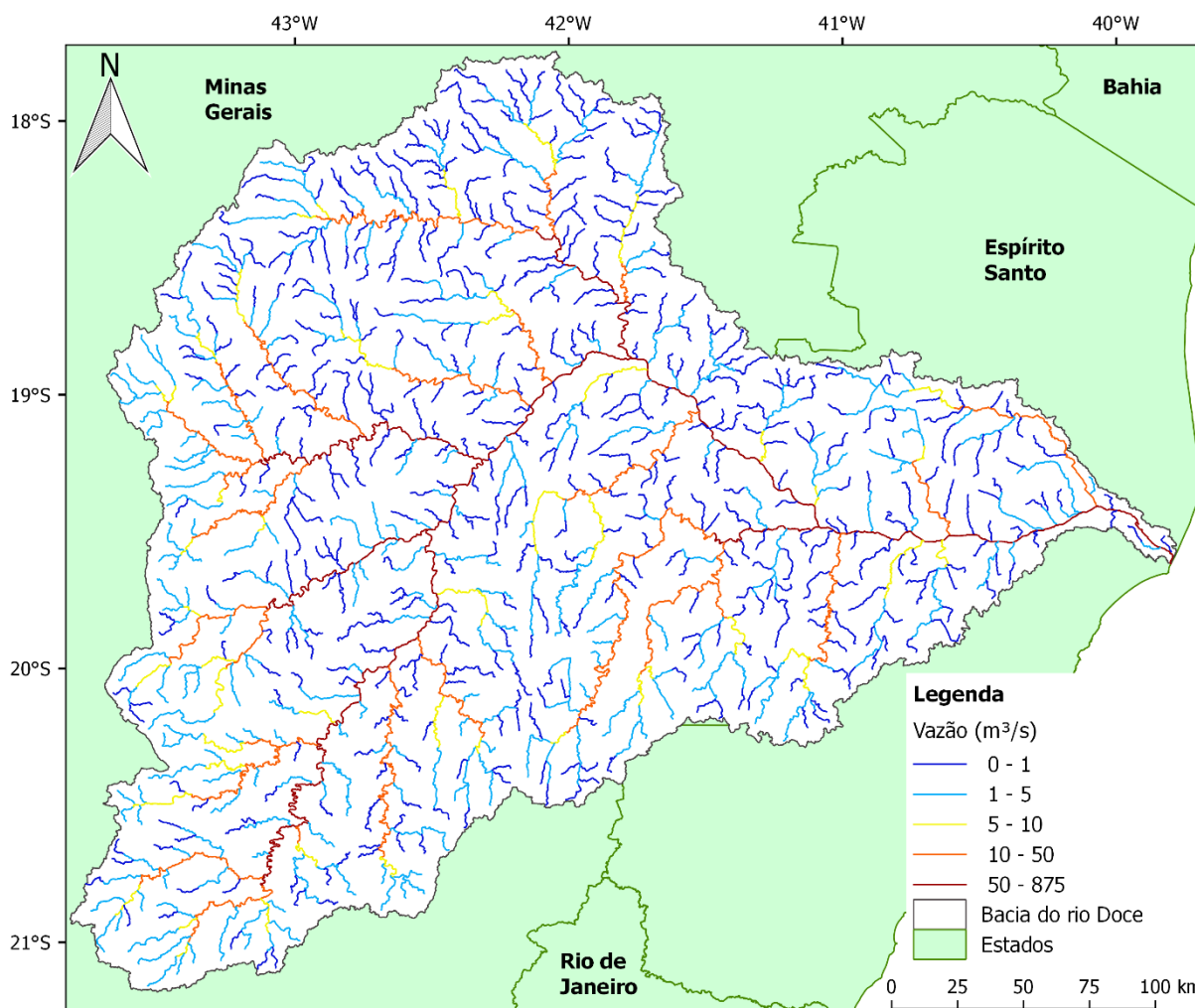


Figura 34: Vazão média anual para o período base (1998 - 2014) em m^3/s .

As variações relativas das vazões simuladas com projeções dos modelos utilizados para os cenários climáticos RCP 4.5 e RCP 8.5 são apresentadas por meio de mapas em 2015 - 2040 (Figura 36 e Figura 37), 2041 - 2070 (Figura 39 e Figura 40) e 2071 - 2099 (Figura 42 e Figura 43). Para complementar a análise da distribuição espacial da variação da vazão média anual nos trechos de rios de cada minibacia da bacia hidrográfica do rio Doce foram confeccionados diagramas *box plot* para os períodos de 2015 - 2040 (Figura 35), 2041 - 2070 (Figura 38) e 2071 - 2099 (Figura 41).

Ao analisar os gráficos *box plot* da Figura 35, é possível observar que as tendências de variação da vazão média anual da bacia do rio Doce para o período de 2015 - 2040 são mais otimistas segundo as vazões geradas com as projeções do Eta-BESM sob o RCP 8.5 (Figura 36b) e mais severas de acordo com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km RCP 8.5 (Figura 37d) e do Eta-HadGEM2-ES 20 km RCP 8.5 (Figura 37b),

assim como observado na análise pontual da variação das vazões nos pontos sobre os principais afluentes e no exutório da bacia.

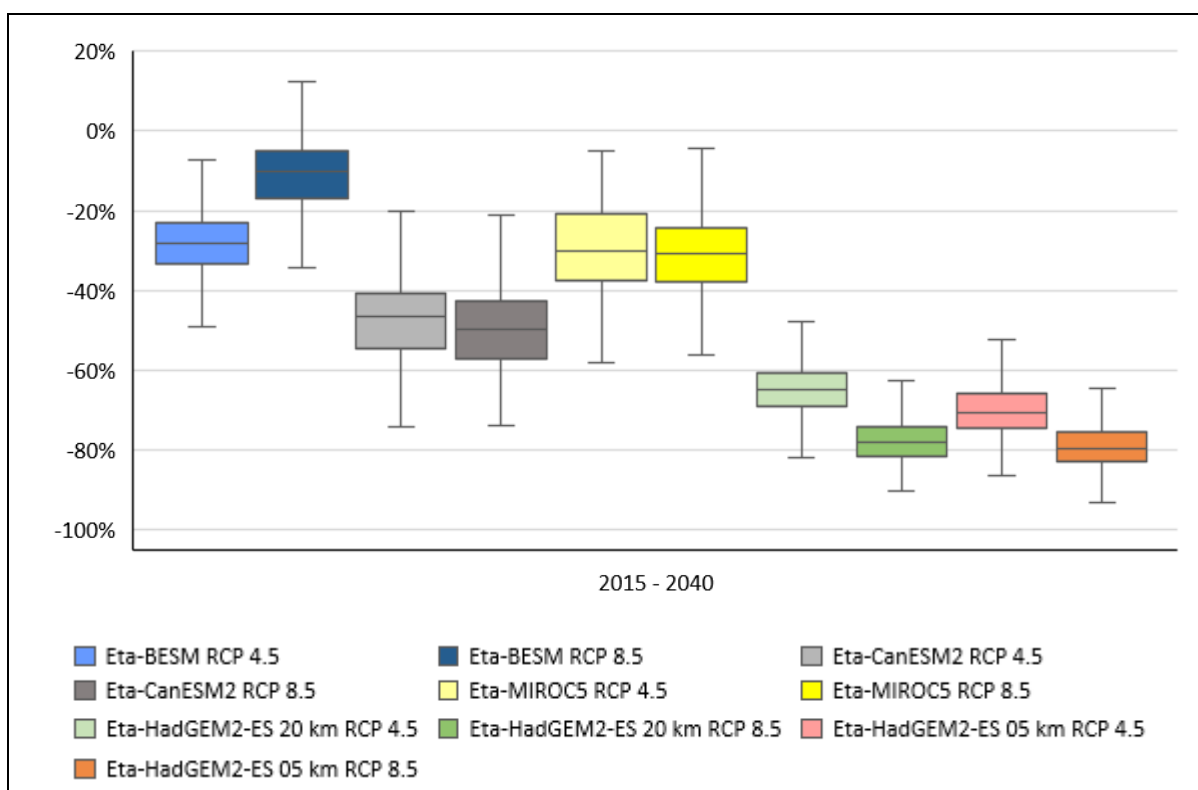


Figura 35: *Box plot* da variação da vazão média anual em todos os trechos de rio sob o RCP 4.5 e RCP 8.5 em 2015 - 2040.

O limite inferior da caixa do diagrama *box plot*, denominado primeiro quartil, é o valor em que 25% dos valores são menores que ele e o terceiro quartil, representado pela linha limite superior da caixa, é onde se localiza 75% dos valores que estão abaixo dele (NETO et al., 2017). Com base no primeiro quartil, em 75% dos trechos de rios as vazões médias anuais simuladas com as projeções do Eta-BESM RCP 8.5 tendem a apresentar reduções menores que -17%, além disso, pode haver aumento em alguns trechos de rios, como o observado na Figura 36b. Já as vazões médias anuais geradas com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km (Figura 37d) e do Eta-HadGEM2-ES 20 km (Figura 37b) sob o RCP 8.5, em 75% dos trechos simulados, com base no terceiro quartil do *box plot*, apresentam reduções maiores que -76% e -74%. Nota-se grande diferença entre os resultados gerados sob o RCP 8.5, uma vez que as tendências mais otimistas e as mais rigorosas de 2015 - 2040 ocorrem nesse cenário.

Na maior parte dos trechos de drenagem, as vazões simuladas com as projeções do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (Figura 36a) apresentam tendência de redução maiores que as tendências apresentadas com o Eta-BESM, sob o cenário climático mais rigoroso, o RCP 8.5 (Figura 36b). Ainda assim, as vazões médias anuais em 75% dos trechos de drenagem tendem a reduzir menos que -33% de acordo com o Eta-BESM sob o RCP 4.5 (Figura 35). Esse comportamento da redução da vazão média anual, segue as tendências de redução da precipitação média anual que são menores com o Eta-BESM sob o RCP 8.5 em comparação com o RCP 4.5 (Tabela 2).

As tendências de redução das vazões médias anuais com base no Eta-CanESM2 são muito similares entre o RCP 4.5 (Figura 36c) e o RCP 8.5 (Figura 36d) em 2015 - 2040, assim como observado no gráfico *box plot* (Figura 35). As tendências de redução em 75% dos trechos de rios simulados, conforme o terceiro quartil do *box plot*, são menores que -54% (RCP 4.5) e -57% (RCP 8.5). No entanto, as hastes inferiores dos diagramas *box plot* mostram que as vazões podem reduzir até -74% em alguns trechos, de acordo com as simulações com esse modelo.

Também são semelhantes as tendências de redução das vazões geradas com as projeções do Eta-MIROC5 entre os cenários climáticos em 2015 - 2040 (Figura 35), ademais, de acordo com o primeiro quartil, em 75% dos trechos de rios as tendências de reduções são menores que -37% sob o RCP 4.5 e menores que -38% sob o RCP 8.5. Em poucos trechos de rios da bacia do rio Doce as vazões futuras podem apresentar reduções maiores que -50%, segundo as simulações com as projeções do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 (Figura 36e) e o RCP 8.5 (Figura 36f).

As tendências de redução da vazão média anual em 75% da rede drenagem, terceiro quartil do *box plot*, são maiores que -61%, conforme as simulações com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km (Figura 37a) e maiores que -66% de acordo com o Eta-HadGEM2-ES 05 km (Figura 37b) sob o RCP 4.5. As tendências de redução apresentam valores mínimos e máximos de -48% a -82% e de -52% a -87% com base no Eta-HadGEM2-ES 20 km e no Eta-HadGEM2-ES 05 km (Figura 35), respectivamente.

No período de 2015 - 2040, a distância interquartil dos diagramas *box plot*, assim como as hastes inferiores e superiores são menores com base no Eta-HadGEM2-ES 20 km e no Eta-HadGEM2-ES 05 km em comparação com as simulações com os demais

modelos, logo as tendências de redução da vazões médias anuais simuladas com as projeções desses modelos são menos variáveis no decorrer da bacia.

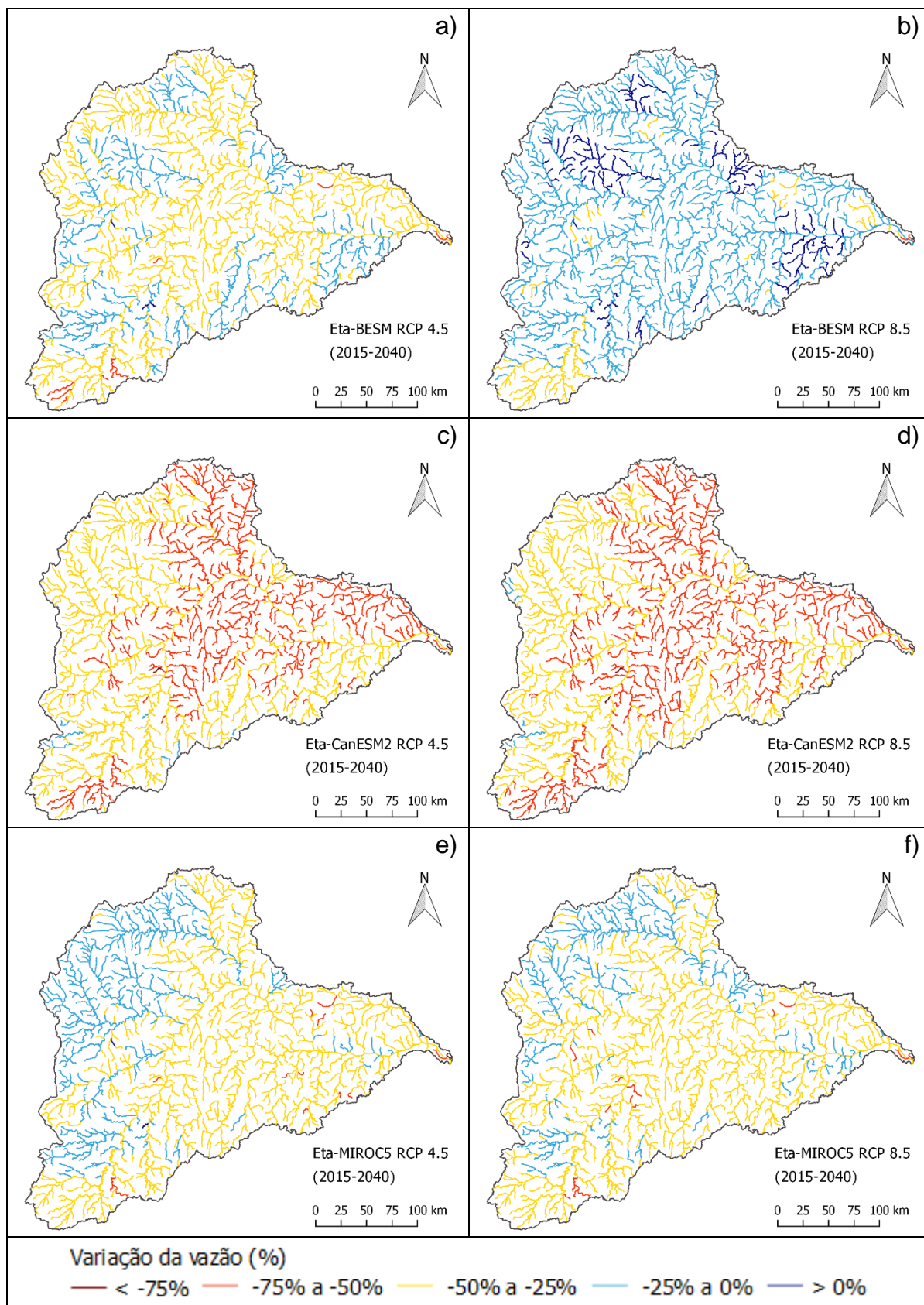


Figura 36: Variação da vazão média anual do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d), do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 (e) e sob o RCP 8.5 (f) em 2015 - 2040 em relação a vazão média anual do período base (1998 - 2014).

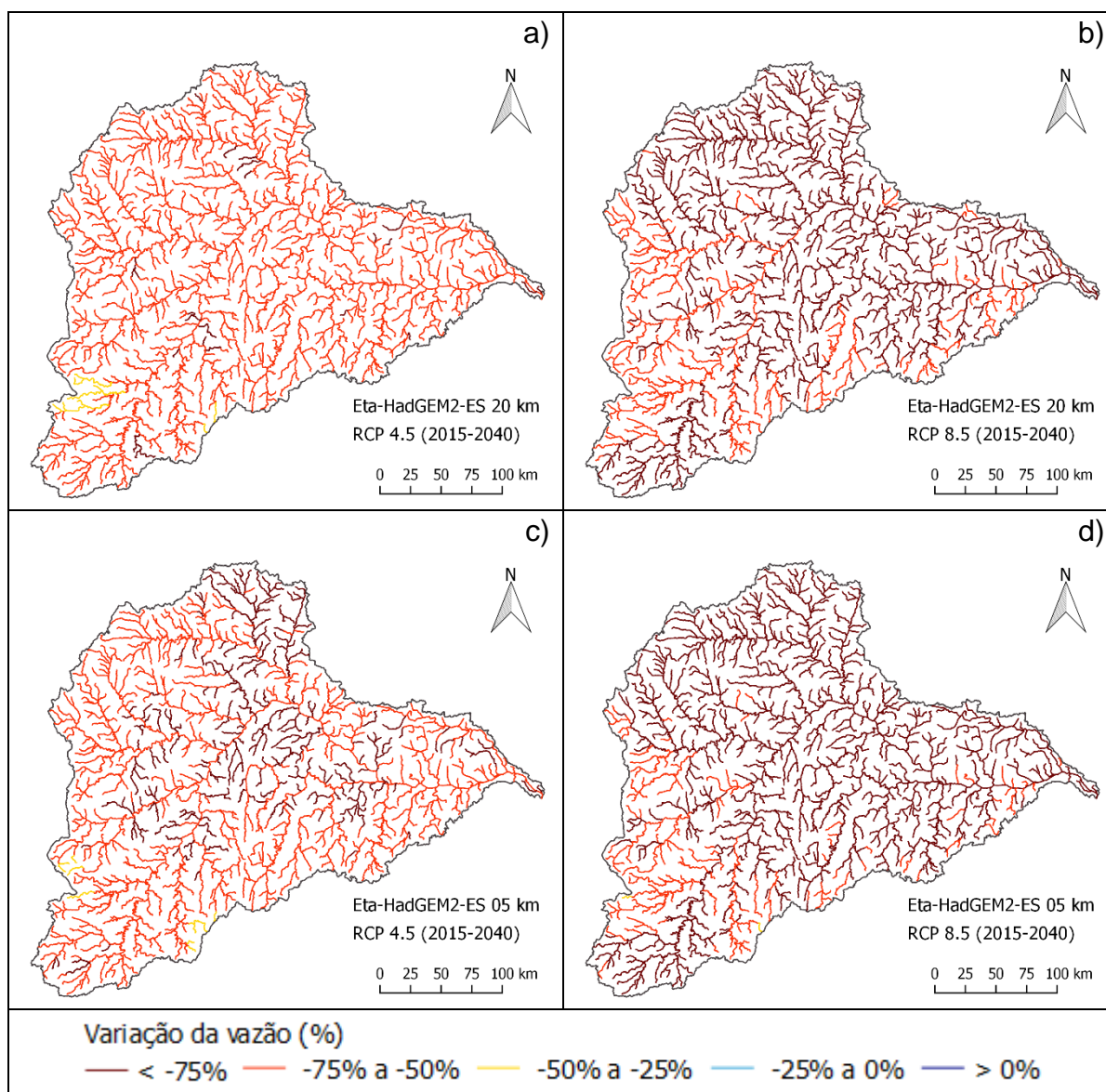


Figura 37: Variação da vazão média anual do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b) e do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d) em 2015 - 2040 em relação a vazão média anual do período base (1998 - 2014).

Ao analisar o gráfico *box plot* (Figura 38) e os mapas mostrados na Figura 39 e na Figura 40, percebe-se que as vazões futuras simuladas com as projeções do Eta-BESM sob o RCP 4.5 e do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 apresentam as menores tendências de redução na bacia do rio Doce em 2041 - 2070, bem como tendência de aumento em alguns trechos de rios. Em contrapartida, as vazões futuras simuladas com as projeções futuras do Eta-CanESM2 e do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob RCP 8.5 e do Eta-HadGEM2-ES 05 km para ambos os cenários possuem as tendências de redução mais rigorosas do período.

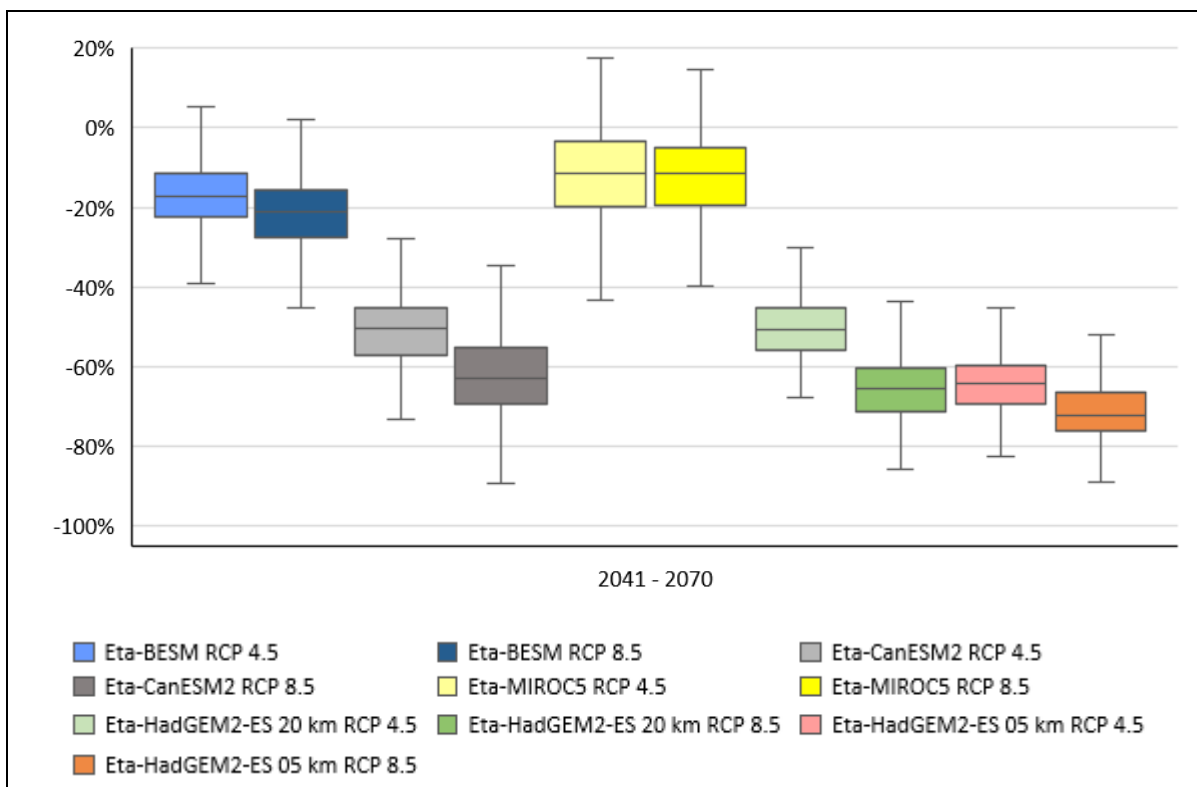


Figura 38: *Box plot* da variação da vazão média anual em todos os trechos de rio sob o RCP 4.5 e RCP 8.5 em 2041 - 2070.

Em 75% dos trechos simulados, as vazões simuladas com as projeções do Eta-BESM RCP 4.5 apresentam tendência de redução menor que -23% sob o RCP 4.5 e -28% sob o RCP 8.5, havendo tendência de aumento de até +5% em alguns trechos de rios (Figura 38). Como observado na Figura 39b, as vazões simuladas com as projeções do Eta-BESM RCP 8.5 apresentam reduções maiores que -25% em mais trechos de rios, quando comparadas com as vazões simuladas com as projeções do Eta-BESM RCP 4.5 (Figura 39a). Ao contrário do que ocorreu no período de 2015 - 2040, em que as vazões simuladas com o Eta-BESM RCP 4.5 apresentaram as maiores reduções em grande parte da bacia.

As vazões simuladas com as projeções do Eta-CanESM2 apresentam tendência de redução em todos os trechos de rios da bacia do rio Doce, sendo mais severas sob o RCP 8.5 (Figura 39-d) em comparação com o RCP 4.5 (Figura 39c). De acordo com o diagrama *box plot*, as reduções são maiores que -45% (RCP 4.5) e -55% (RCP 8.5) na maior parte dos rios da bacia, isto é, em 75% deles (Figura 38). Conforme a haste inferior as reduções dos diagramas as reduções podem chegar a -73% (RCP 4.5) e a -90% (RCP 4.5).

As vazões simuladas com as projeções do Eta-MIROC5 tendem a reduzir menos que -20% sob o RCP 4.5 e -19% sob o RCP 8.5 em 75% dos trechos de rios, com possível aumento de até +18% (Figura 38). As tendências de aumento são mais pronunciadas na região noroeste da bacia sob o RCP 4.5 (Figura 39e), já sob o RCP 8.5 (Figura 39f) pouquíssimos trechos de rio na bacia apresentam tendência de aumento.

As vazões simuladas com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km tendem a reduzir mais de -45% sob o RCP 4.5 e mais de -60% sob o RCP 8.5 em 75% dos trechos de drenagem (Figura 38). De acordo com a haste inferior do diagrama, as reduções podem chegar a -68% (RCP 4.5) e -86% (RCP 8.5) em alguns trechos. Apesar das reduções serem maiores que -45% na maior parte dos trechos de drenagem sob o RCP 4.5, nota-se no mapa da Figura 40a que grande parte dos rios, incluindo o rio principal, apresentam redução de no máximo -50%. Por outro lado, a Figura 40b demonstra que na grande maioria dos trechos de drenagem apresentam reduções mais severas sob o RCP 8.5, isto é, maiores que -50%, corroborando com os resultados do *box plot*, cuja haste superior mostra que as reduções são maiores que -44% em todos os trechos de drenagem.

As reduções nas vazões em função das projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km são maiores que -60% (RCP 4.5) e -67% (RCP 8.5) na maior parte dos trechos de drenagem (75%), como observado nos diagramas *box plot* (Figura 38). Predominam-se as tendências de redução entre -50% e -75% em ambos os cenários climáticos (Figura 40c e Figura 40d). No entanto, sob o RCP 8.5, na região central e norte da bacia, pode haver reduções da vazão superiores a -75% em 2041 - 2070.

O comprimento das hastes superiores e inferiores dos diagramas *box plot* (Figura 38) demonstram a grande diferença na distribuição espacial da variação da vazão no decorrer da bacia do rio Doce em função das simulações com as projeções de cada modelo climático.

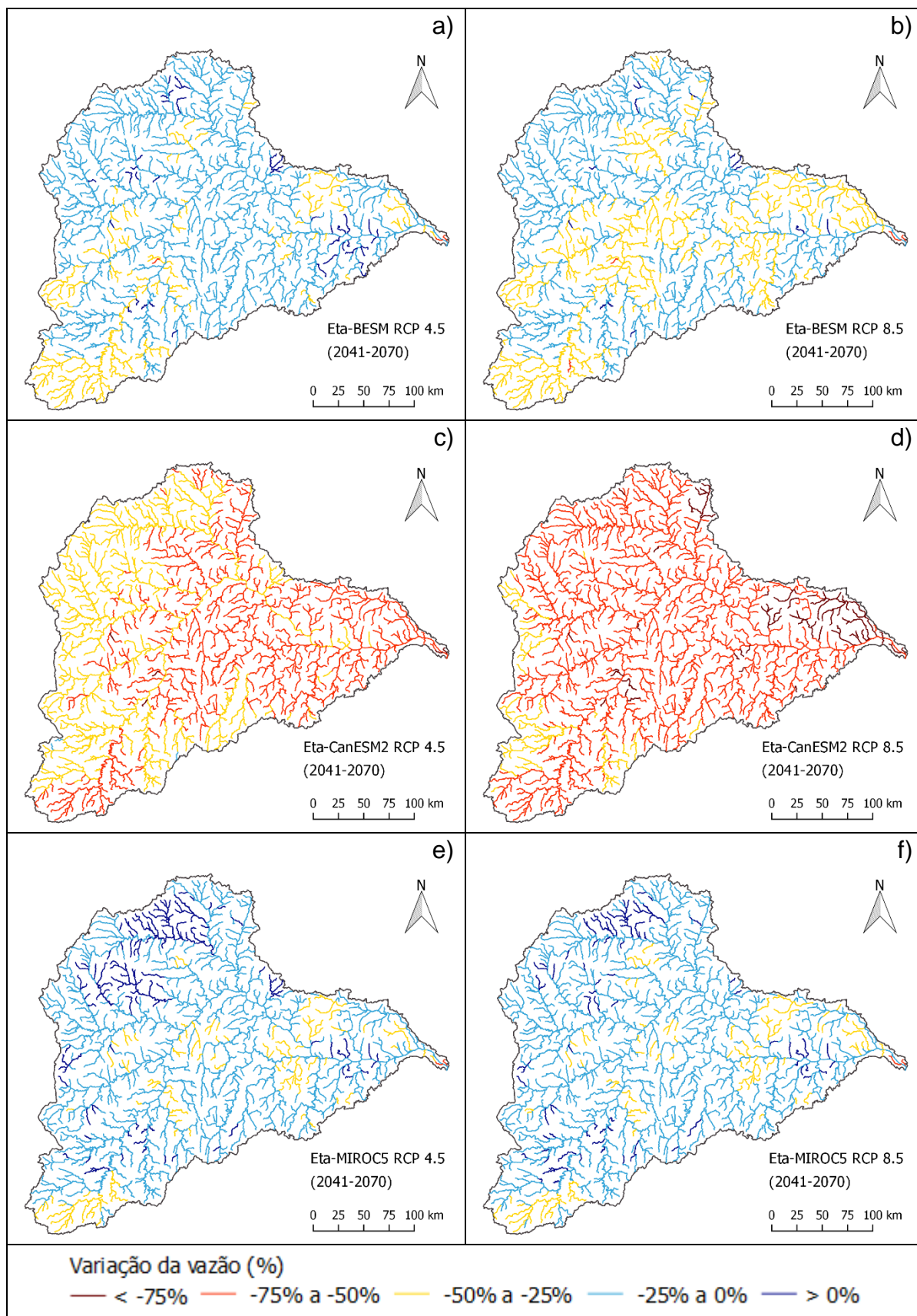


Figura 39: Variação da vazão média anual do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d), do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 (e) e sob o RCP 8.5 (f) em 2041 - 2070 em relação a vazão média anual do período base (1998 - 2014).

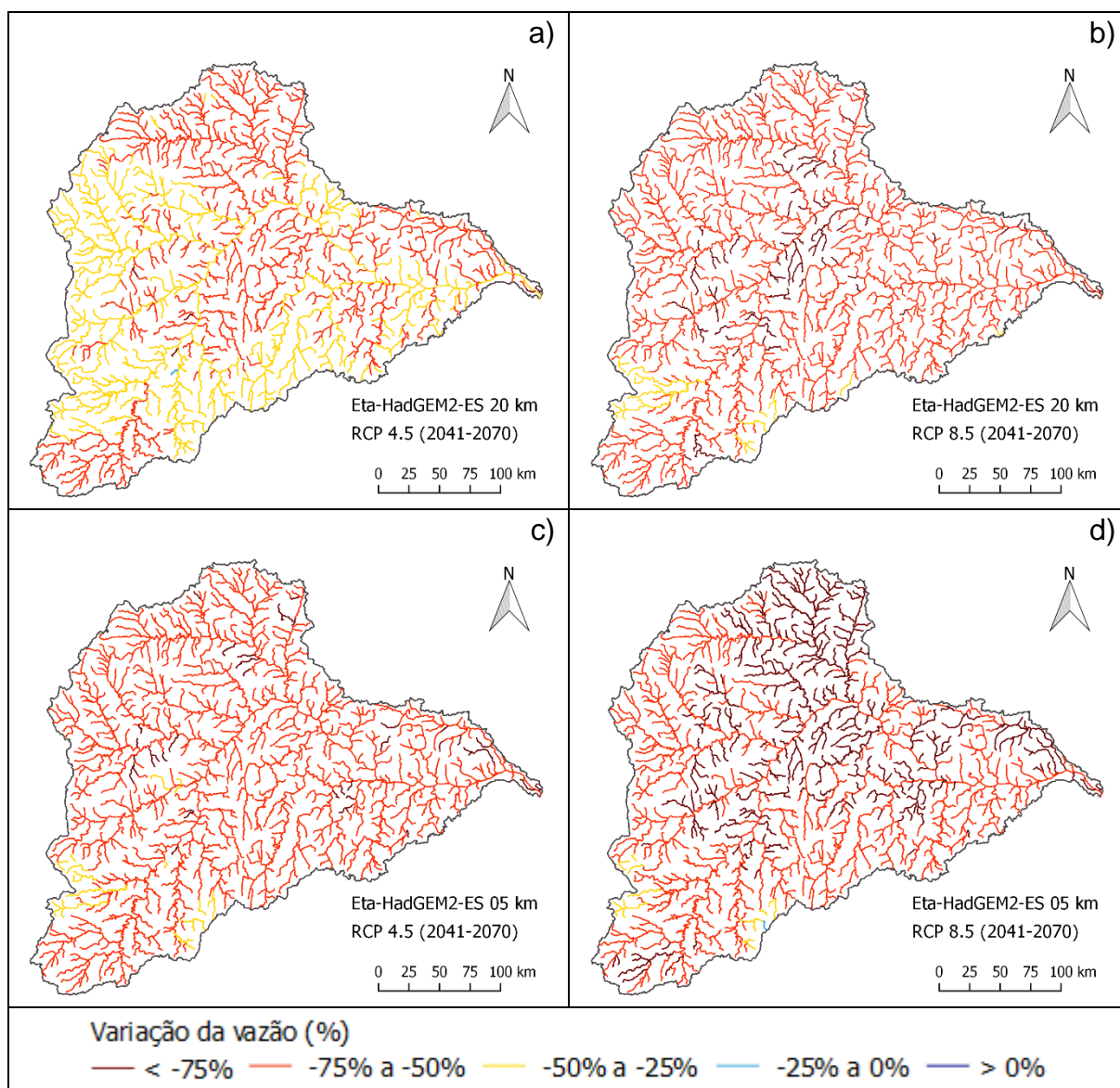


Figura 40: Variação da vazão média anual do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d) em 2041 - 2070 em relação a vazão média anual do período base (1998 - 2014).

Ao avaliar os diagramas *box plot* das variações da vazão em todos os trechos de drenagem da bacia do rio Doce para o período de 2071 - 2099 (Figura 41), observa-se que as vazões simuladas com as projeções do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 apresentam as tendências mais otimistas e as vazões simuladas com as projeções do Eta-CanESM2, do Eta-HadGEM2-ES 20 km e do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 8.5, as tendências mais pessimistas.

Em relação as tendências de redução das vazões futuras geradas com as projeções do Eta-BESM, as reduções são menores que -31% sob o RCP 4.5 e que -46% sob o RCP 8.5 em 75% dos trechos de drenagem da bacia (Figura 41). É possível observar

na Figura 42a, que embora haja reduções menores que -25% em algumas bacias de cabeceira, no rio principal as reduções estão entre -25% e -50% sob o RCP 4.5. Em relação a distribuição espacial da variação da vazão sob o RCP 8.5 (Figura 42b), em quase toda a bacia as reduções estão entre -25% e -50%, com alguns trechos apresentando redução maior que -50%. Esse comportamento está em concordância com o mostrado no *box plot*, cujas hastes superior e inferior são de -24% e -59%, respectivamente.

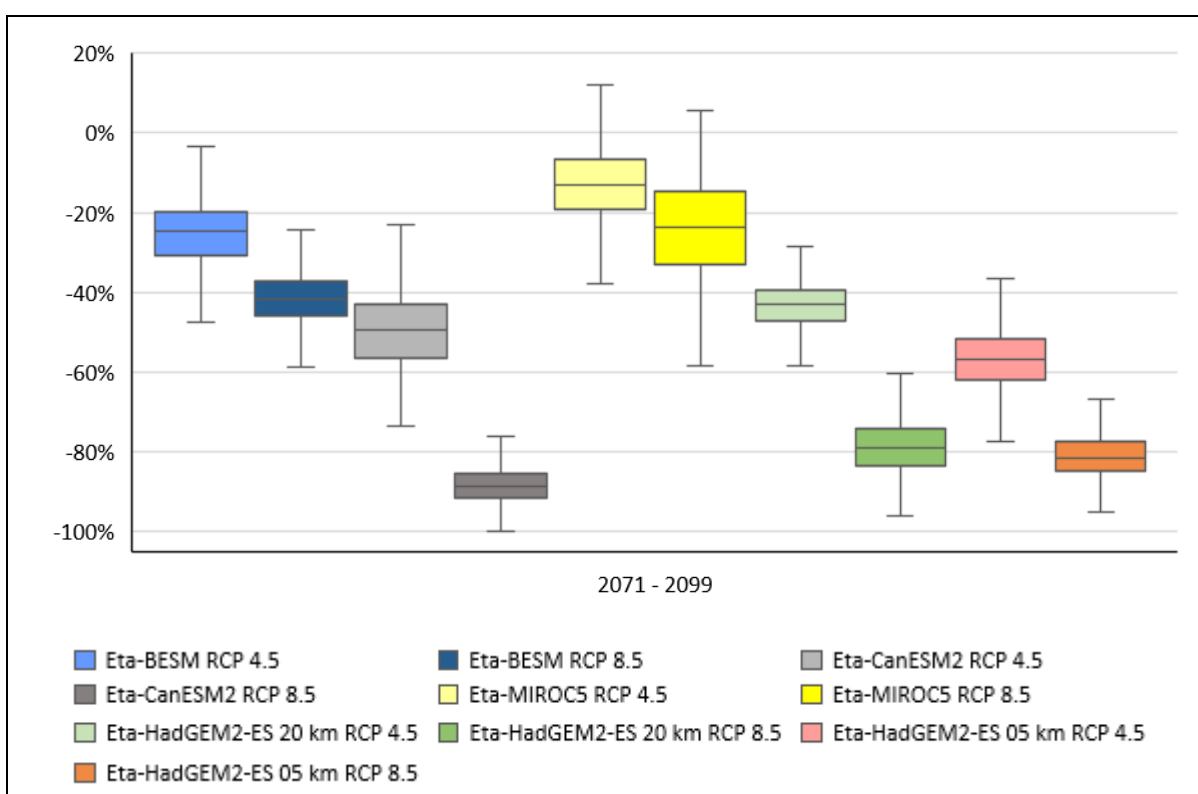


Figura 41: *Box plot* da variação da vazão média anual em todos os trechos de rio sob o RCP 4.5 e RCP 8.5 em 2071 - 2099.

As vazões geradas com as projeções do Eta-CanESM2 apresentam reduções menores que -57% sob o RCP 4.5, conforme o primeiro quartil do *box plot*, em 75% dos trechos de rios. Por outro lado, as reduções das vazões com base no Eta-CanESM2 RCP 8.5 são maiores que -86% sob o RCP 8.5 em 75% dos trechos de rios da bacia, segundo o terceiro quartil do *box plot*, o limite superior da caixa (Figura 41). Ao observar a variação da vazão sob o RCP 4.5, nota-se que nas bacias de cabeceira na região norte e oeste da bacia, bem como no rio principal, as reduções estão entre -25% e -50% (Figura 42c). Destaca-se a grande diferença entre as vazões simuladas com o Eta-CanESM2 em relação aos dois cenários de clima, de modo que sob o RCP

8.5 as vazões possuem tendência de redução maior que -75% em toda a bacia (Figura 42d).

Diferente das vazões simuladas com as projeções dos demais modelos em 2071 - 2099, com o Eta-MIROC5, especialmente sob o RCP 4.5, alguns trechos da rede drenagem apresentam tendência de aumento que podem chegar a +12% (Figura 41). O *box plot* também mostra que as reduções da vazão são menores que -19% (RCP 4.5) e -33% (RCP 8.5) na maior parte dos trechos de drenagem (75%), segundo as simulações com as projeções do Eta-MIROC5.

Em relação as vazões futuras provenientes das projeções do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5, em alguns trechos, especialmente na região noroeste da bacia, há tendência de aumento da vazão. Em contrapartida, no extremo sul da bacia há reduções maiores que -25%, como mostrado também no diagrama *box plot*, no entanto na maior parte da bacia as reduções são de no máximo -25% (Figura 42e). Vale destacar que embora no extremo sul, na parte central e próximo do exutório da bacia haver reduções entre -25% e -50%, no rio principal as reduções são menores que -25% sob o RCP 8.5 (Figura 42f). Esse comportamento pode ser justificado por haver reduções de até -25% nos afluentes das bacias de cabeceira da região oeste da bacia, que apresentam grandes vazões no período base (Figura 34) em comparações aos demais afluentes.

É possível identificar no diagrama *box plot* (Figura 41), assim como observado na Figura 43, que as vazões simuladas com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 apresentam tendências de redução da vazão mais otimistas em comparação com o Eta-HadGEM2-ES 05 km para ambos os cenários. As vazões simuladas apresentam tendência de redução menor que -47% em relação às projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 em 75% dos trechos de drenagem, de acordo com o primeiro quartil, o limite inferior da caixa do *box plot*. Porém as vazões tendem a reduzir mais de -74% para o Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5 em 75% dos trechos de drenagem, de acordo com o terceiro quartil, o limite superior da caixa do *box plot*.

A Figura 43a mostra que a maior parte da bacia possui reduções entre -25% e -50% sob o RCP 4.5 para o Eta-HadGEM2-ES 20 km, exceto no extremo sul da bacia e próximo do exutório em que as reduções estão entre -50% e -75%. As reduções da vazão sob o Eta-HadGEM2-ES 20 km RCP 8.5 mostram tendência de redução maior

que -75% em grande parte da bacia, com alguns trechos no sul e no oeste da bacia apresentando reduções entre -50% e -75%.

As vazões simuladas com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km apresentam tendência de redução maior que -62% sob o RCP 4.5 em 75% dos trechos de drenagem, porém sob o RCP 8.5 as reduções são maiores que -78% na maior parte dos trechos (75%). Isso demonstra a grande diferença entre as projeções desse modelo climático para os cenários de clima utilizados. A distribuição espacial das reduções na bacia do rio Doce mostra que sob o RCP 4.5 as reduções da vazão estão entre -50% e -75%, com exceção de alguns trechos de drenagem no sul e no oeste da bacia que apresentam reduções menores que -50% (Figura 43c). Sob o RCP 8.5, as vazões apresentam reduções maiores que -75% em praticamente toda a bacia, exceto em algumas regiões no oeste e no sul da bacia.

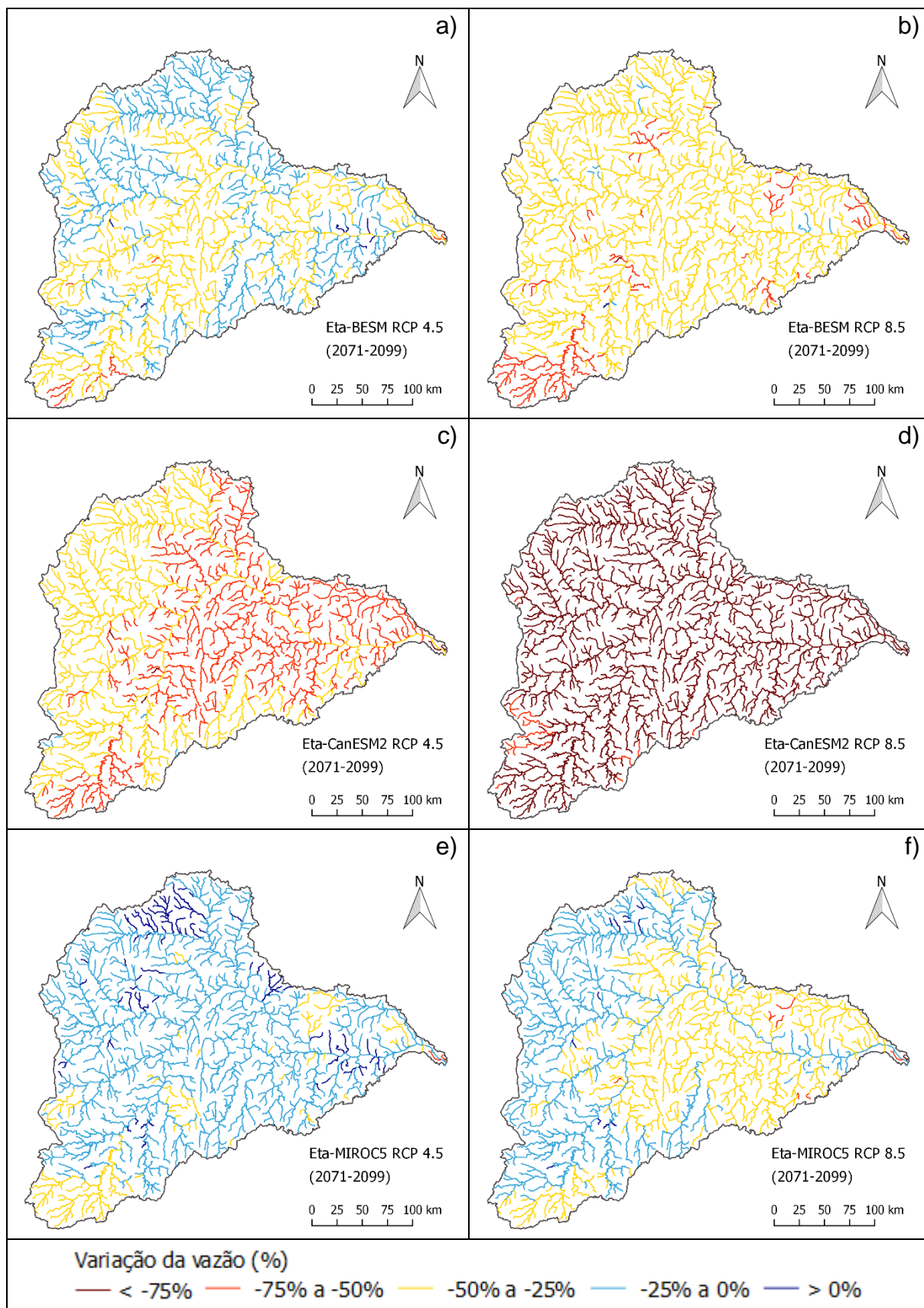


Figura 42: Variação da vazão média anual do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d), do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 (e) e sob o RCP 8.5 (f) em 2071 - 2099 em relação a vazão média anual do período base (1998 - 2014).

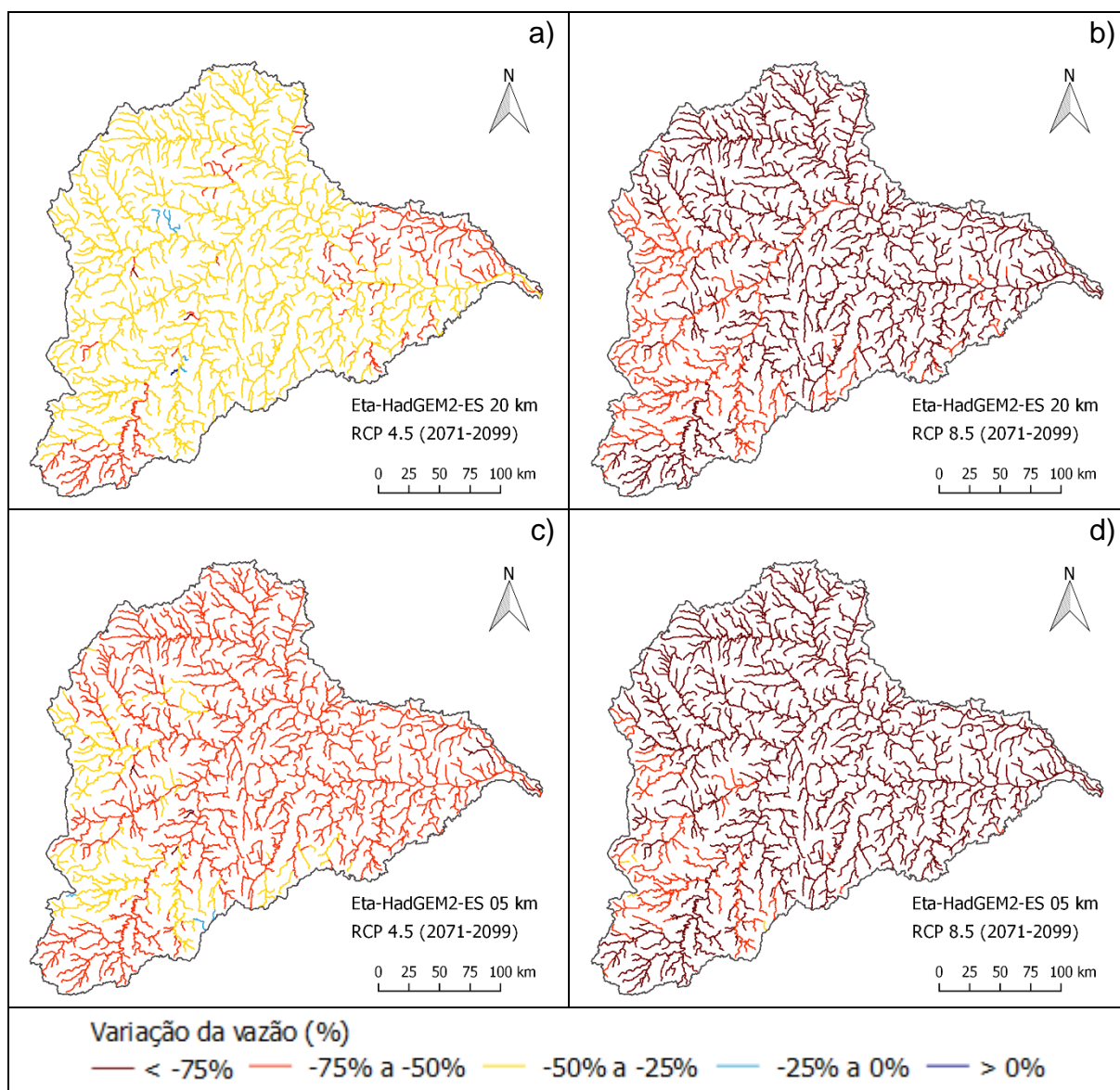


Figura 43: Variação da vazão média anual do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d) em 2071 - 2099 em relação a vazão média anual do período base (1998 - 2014).

O modelo climático global HadGEM2-ES, no qual o modelo climático Eta está acoplado, apresenta grande sensibilidade ao incremento na concentração de CO_2 e combinado com o cenário mais rigoroso, o RCP 8.5, mostra grandes reduções na precipitação no final do século XXI (CHOU et al., 2014a), consequentemente na vazão, assim como observado por Alvarenga et al. (2016b).

As variações nas vazões na bacia do rio Doce se mostraram sensíveis às alterações da precipitação, sendo esperadas reduções significativas de acordo com as projeções de determinados modelos. Assim como Bajracharya et al. (2018), cujo aumento em +26% na precipitação média anual da bacia de Kaligandaki (Nepal) sob o RCP 8.5,

pode ocasionar aumento da vazão média mensal acima de +50%. Além disso, as projeções dos modelos climáticos indicam aumento de temperatura em todos os períodos do século XXI e segundo o IPCC (2007b), mudanças na temperatura afetam a evapotranspiração, e isso pode compensar pequenos aumentos na precipitação e ampliar ainda mais o efeito da diminuição da precipitação nas águas superficiais.

5.4 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

A partir das projeções dos modelos climáticos utilizados foram simuladas séries futuras de descarga sólida em suspensão (DSS) em cada trecho de drenagem da bacia do rio Doce. A avaliação do impacto das mudanças climáticas na DSS na bacia do rio Doce foi realizada de forma pontual em locais escolhidos nos mais importantes afluentes da bacia e no rio principal e de forma espacial a partir de mapas.

5.4.1 Avaliação pontual

Análoga à avaliação das vazões futuras, a análise pontual foi realizada com base na variação relativa da DSS média anual nos períodos 2015 - 2040, 2041 - 2070 e 2071 - 2099 em relação ao período base (1998 - 2014) em nove pontos presentes nos mais importantes afluentes e no rio principal da bacia do rio Doce (Figura 24): rio Piranga, rio Casca, rio Piracicaba, rio Santo Antônio, rio Suaçuí Grande, rio Caratinga, rio Manhuaçu, rio Guandu e no exutório.

Em 2015 - 2040, a DSS média anual apresentou tendência de redução a partir da projeção de todos os modelos climáticos para ambos os cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5), variando entre -5% e -91% nesse período. Assim como para as vazões futuras, as DSS provenientes das simulações com as projeções do Eta-BESM sob o RCP 8.5 apresentam as tendências de redução mais otimistas do período, sendo elas inferiores a -38% nos pontos de interesse, exceto sob o rio Piranga (Figura 44), no qual a tendência de redução é maior. Por outro lado, verifica-se que as DSS provenientes das simulações com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km e do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5 apresentam as maiores reduções que, por sua vez, são superiores a -76% em todos os locais analisados (Figura 45).

As DSS médias anuais, no período de 2015 - 2040, tendem a reduzir nos mais importantes afluentes e no exutório da bacia entre -5% (RCP 8.5) e -54% (RCP 4.5) com as projeções do Eta-BESM, entre -18% (RCP 8.5) e -60% (RCP 4.5) com as do Eta-MIROC5 e entre -45% (RCP 4.5) e -62% (RCP 4.5) com as do Eta-CanESM2. Em relação às projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km espera-se que as DSS reduzam entre -62% (RCP 4.5) e -89% (RCP 8.5) e com o Eta-HadGEM2-ES 05 km entre -65% (RCP 4.5) e -91% (RCP 8.5).

Os resultados das DSS médias anuais futuras estão em concordância com Oliveira et al. (2019), que avaliando o impacto das mudanças climáticas na geração anual de sedimentos da bacia do Alto rio Parnaíba em 2007 - 2040, mostraram que as simulações com o Eta-BESM RCP 8.5 possuem as tendências de redução mais otimistas do período. Vale ressaltar que o impacto das mudanças climáticas na DSS média anual na bacia do rio Doce mostrou-se mais sensível, em comparação com a geração anual de sedimentos na bacia do Alto rio Parnaíba, de acordo com os resultados de Oliveira et al. (2019).

Zuo et al. (2016) mostram que os efeitos das mudanças climáticas podem causar reduções de até -81% na produção de sedimentos da bacia do rio Huangfuchuan na China. Por outro lado, estudos como o de Zhou et al. (2017) na bacia do rio Yinma (China) mostram que a produção de sedimentos pode aumentar +237% sob o RCP 4.5 e +133% sob o RCP 8.5, principalmente devido ao aumento na precipitação em 2021 - 2050.

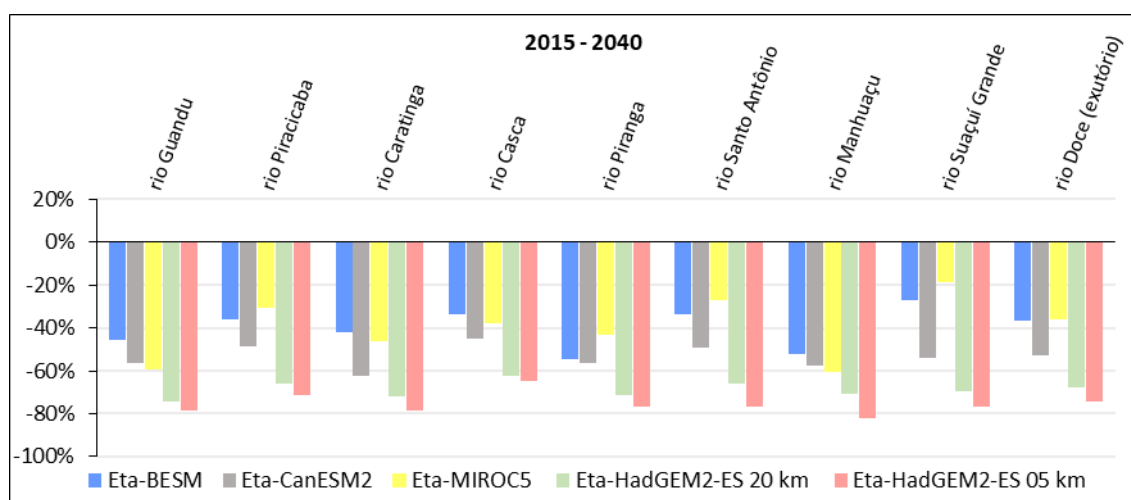


Figura 44: Variação da DSS média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 4.5 em 2015 - 2040 em relação ao período base (1998 - 2014).

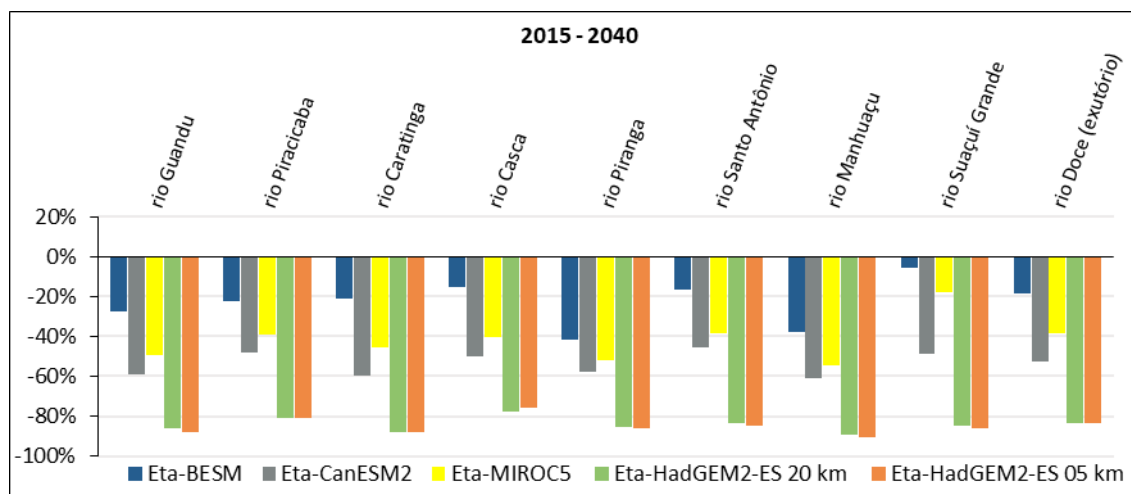


Figura 45: Variação da DSS média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 8.5 em 2015 - 2040 em relação ao período base (1998 - 2014).

Diferentemente do comportamento apresentado pela vazão média anual, que tende a permanecer constante sob o RCP 4.5 (Figura 27) ou diminuir levemente sob o RCP 8.5 (Figura 28) com as projeções do Eta-MIROC5, espera-se um aumento da DSS média anual na bacia do rio Suaçuí Grande (Figura 24) no período de 2041 - 2070, em ambos os cenários (Figura 46 e Figura 47). Segundo Shrestha et al. (2016), as alterações na geração de sedimentos em função das mudanças climáticas nem sempre acontecem na mesma direção, sugerindo que as projeções da produção de sedimentos e, conseqüentemente, da descarga sólida em suspensão nos rios são mais sensíveis às mudanças de temperatura e de precipitação, comparadas com a vazão, assim como observado nas simulações com o Eta-MIROC5 na bacia do rio Suaçuí Grande.

As DSS médias anuais geradas com as projeções do Eta-BESM sob o RCP 4.5 e do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 mostram tendências mais otimistas para o período de 2041 - 2070. As tendências de redução mínimas em cada ponto de interesse são inferiores a -31% de acordo com as projeções dos modelos climáticos utilizados. Além disso, no ponto sobre o rio Suaçuí Grande espera-se que a DSS aumente em até +9% com base no Eta-MIROC5. Em contrapartida, espera-se que a DSS nos afluentes e no exutório da bacia reduza mais de -65% de acordo com as simulações projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 8.5.

Em 2041 - 2070, as DSS médias anuais nos pontos de interesse podem variar com base no Eta-BESM entre -5% (RCP 4.5) e -48% (RCP 8.5), no Eta-CanESM2 de -42% (RCP 4.5) a -70% (RCP 8.5), no Eta-HadGEM2-ES 20 km de -48% (RCP 4.5) a -78%

(RCP 8.5) e de -58% (RCP 4.5) a -82% (RCP 8.5) com as projeções do Eta-HaGEM2-ES 05 km. Diferentemente das demais, a DSS média anual simulada com as projeções do Eta-MIROC5 pode variar de um aumento de +9% (RCP 4.5) a uma redução de -40% (RCP 4.5).

Oliveira et al. (2019) também verificaram tendências de aumento para a geração anual de sedimentos, segundo as projeções do Eta-MIROC5 sob o RCP 8.5 na bacia do Alto rio Parnaíba em 2041 - 2070, localizada na região centro-oeste de Minas Gerais. Estudos como Shrestha et al. (2016), evidenciam o quanto a produção de sedimentos varia em função dos modelos e dos cenários climáticos, verificando aumento de até +147% ou redução de -27% para a bacia do rio Mekong no período de 2041 - 2070.

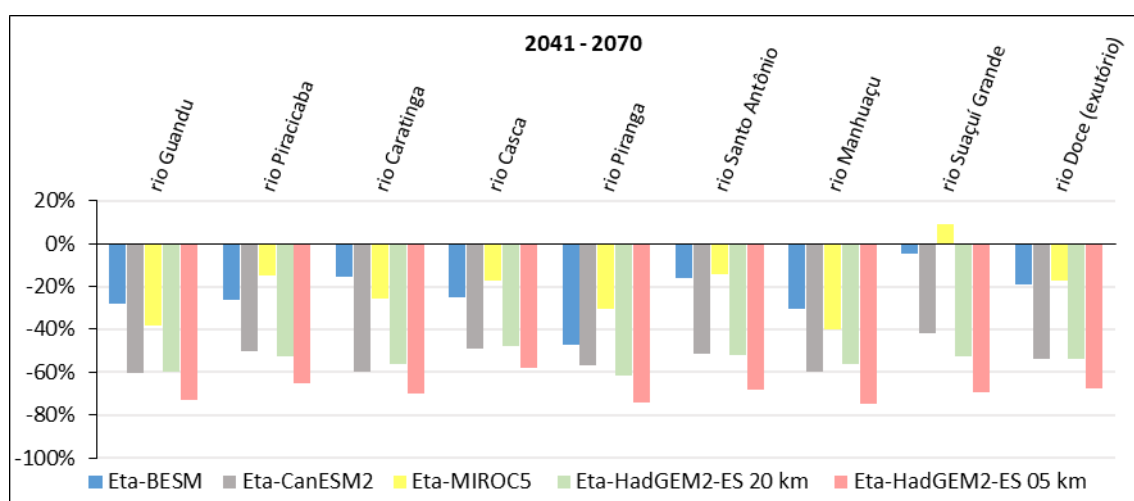


Figura 46: Variação da DSS média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 4.5 em 2041 - 2070 em relação ao período base (1998 - 2014).

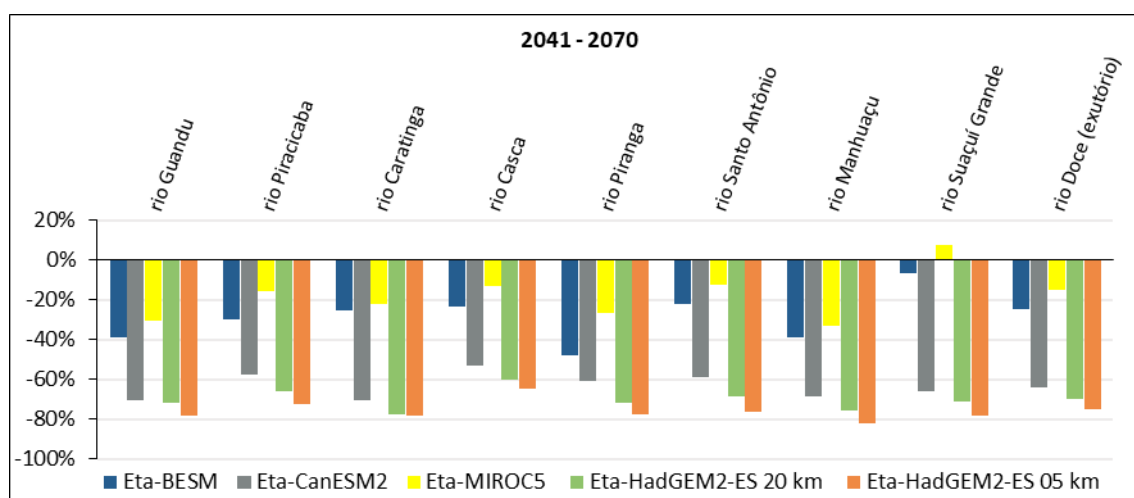


Figura 47: Variação da DSS média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 8.5 em 2041 - 2070 em relação ao período base (1998 - 2014).

Em 2071 - 2099, a DSS média anual pode variar de +12% a -93% em função das simulações com as projeções dos modelos climáticos aplicados. Do mesmo modo que em 2041 - 2070, a DSS média anual pode aumentar no ponto sobre o rio Suaçuí Grande em virtude das projeções do Eta-MIROC5 para ambos os cenários no período de 2071 - 2099 (Figura 48 e Figura 49). Oliveira et al. (2019) também obtiveram tendências de aumento para a geração anual de sedimentos, segundo as projeções do Eta-MIROC5 para ambos os cenários na bacia do Alto rio Parnaíba em 2071 - 2099.

As DSS médias anuais nesse período possuem as tendências mais otimistas segundo as simulações com as projeções do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5, exceto no ponto sobre o rio Piranga, no qual a tendência mais otimista acontece nas simulações com o Eta-MIROC5 sob o RCP 8.5. As tendências de redução mais otimistas em cada um dos pontos de interesse sobre os rios e o exutório da bacia (Figura 24) são inferiores a -28%. Entretanto, espera-se que as DSS médias anuais possam sofrer reduções maiores que -83%, segundo as simulações com as projeções do Eta-CanESM2 sob o RCP 8.5, sendo as tendências mais rigorosas do século XXI. As DSS médias anuais geradas com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km e do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 8.5 também mostram altas reduções, que são superiores a -74% em todos os nove pontos de interesse.

No período de 2071 - 2099, as DSS médias anuais nos principais afluentes e no exutório da bacia do rio Doce tendem a reduzir de -12% (RCP 4.5) a -61% (RCP 8.5) de acordo com as projeções do Eta-BESM, de -33% (RCP 4.5) a -93% (RCP 8.5) com as do Eta-CanESM2, de -29% (RCP 4.5) a -86% (RCP 8.5) com as do Eta-HadGEM2-ES 20 km e de -49% (RCP 4.5) a -87% (RCP 4.5) com as do Eta-HadGEM2-ES 05 km. Já as DSS médias anuais geradas com as projeções do Eta-MIROC5 variam de +12% (RCP 4.5) a -48% (RCP 8.5) nos pontos de interesse. Assim como para as DSS médias anuais, Oliveira et al. (2019) também observaram grande redução na geração anual de sedimentos em 2071 - 2099 na bacia do Alto rio Parnaíba segundo as projeções do Eta-CanESM2 sob o RCP 8.5, sendo essas as maiores do século XXI.

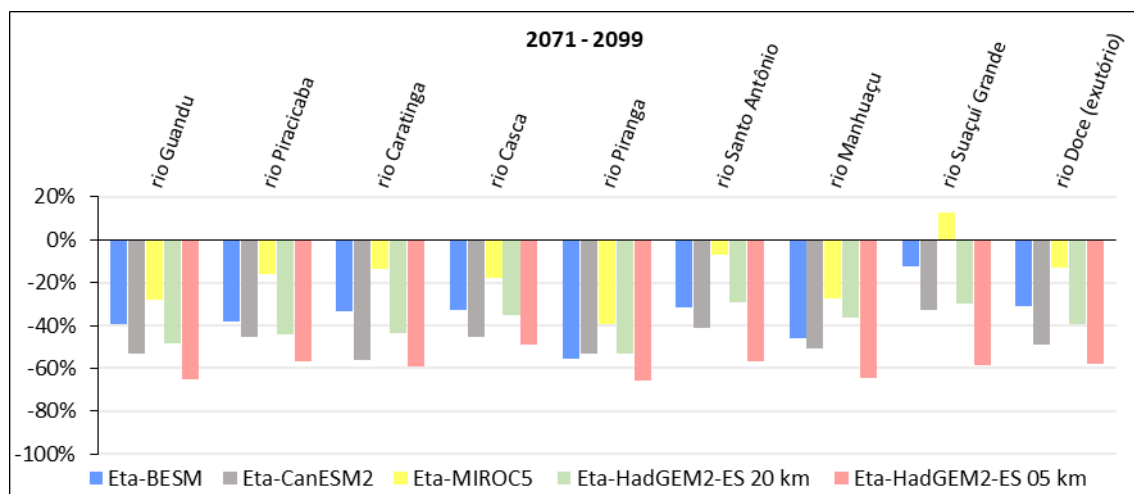


Figura 48: Variação da DSS média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 4.5 em 2071 - 2099 em relação ao período base (1998 - 2014).

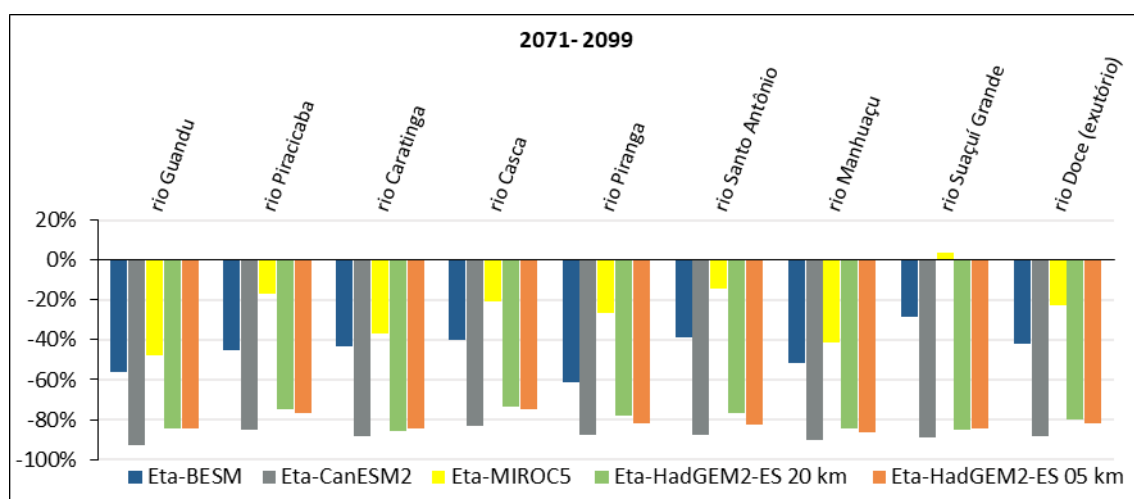


Figura 49: Variação da DSS média anual nos pontos de interesse da bacia do rio Doce sob o RCP 8.5 em 2071 - 2099 em relação ao período base (1998 - 2014).

Para auxiliar na avaliação do impacto das mudanças climáticas nos pontos de interesse sobre os principais afluentes e o exutório da bacia também foram confeccionados diagramas *box plot* da variação da DSS médias anuais.

Na Figura 50 são mostrados os diagramas *box plot* sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 para o período de 2015 - 2040. Nela é possível observar que a mediana das reduções sob o RCP 4.5 é igual ou menor que -60% em todos os pontos, exceto sobre o rio Caratinga, no qual a mediana é de -62%. Isso significa que as DSS médias anuais oriundas das projeções de metade dos modelos climáticos possuem reduções menores que -62%. Com base no primeiro quartil a maior parte dos modelos climáticos (75%) indicam que as tendências de redução são menores que -74% sob o RCP 4.5.

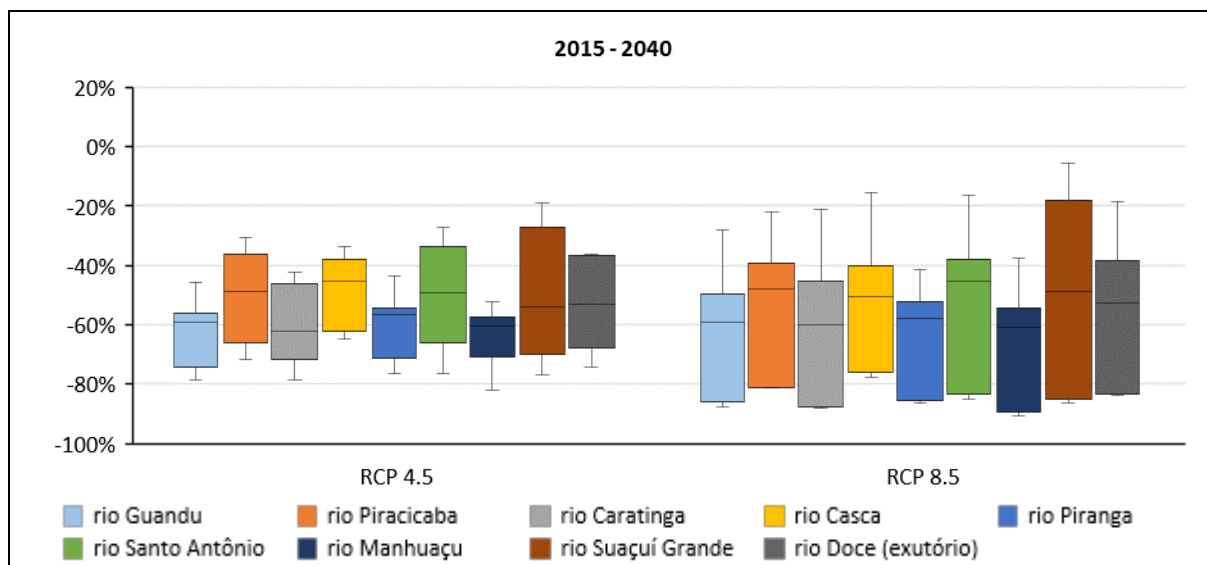


Figura 50: *Box plot* da variação da DSS média anual dos pontos de interesse sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 em 2015 - 2040.

Sob o RCP 8.5, a mediana das reduções é menor que -60% em oito pontos, já no ponto sobre o rio Manhuaçu é igual a -61% no período de 2015 - 2040 (Figura 50). Em relação ao primeiro quartil, nota-se que para 75% dos modelos climáticos as tendências de redução são inferiores a -89%. Em comparação com o RCP 4.5, os quartis e as hastes inferiores indicam que as tendências de redução mais rigorosas são sob o RCP 8.5 no período de 2015 - 2040 (Figura 50). Porém, as hastes superiores mostram que as tendências mais otimistas também são sob o RCP 8.5. As amplitudes interquartis, ou seja, o tamanho da caixa do diagrama *box plot* mostram que a discordância entre os modelos é maior sob o RCP 8.5, em relação ao RCP 4.5. Esse comportamento é semelhante ao observado pela variação das vazões futuras nos pontos de interesse nesse período.

Os diagramas *box plot* da variação da DSS médias anuais do período de 2041 - 2070 (Figura 51) mostram que, de acordo com as medianas, para metade dos modelos climáticos as reduções são menores que -60% sob o RCP 4.5 e -70% sob o RCP 8.5 nos pontos de interesse. Em relação ao primeiro quartil, o limite inferior do diagrama *box plot*, a maioria dos modelos mostram reduções menores que -61% (RCP 4.5) e -78% (RCP 8.5).

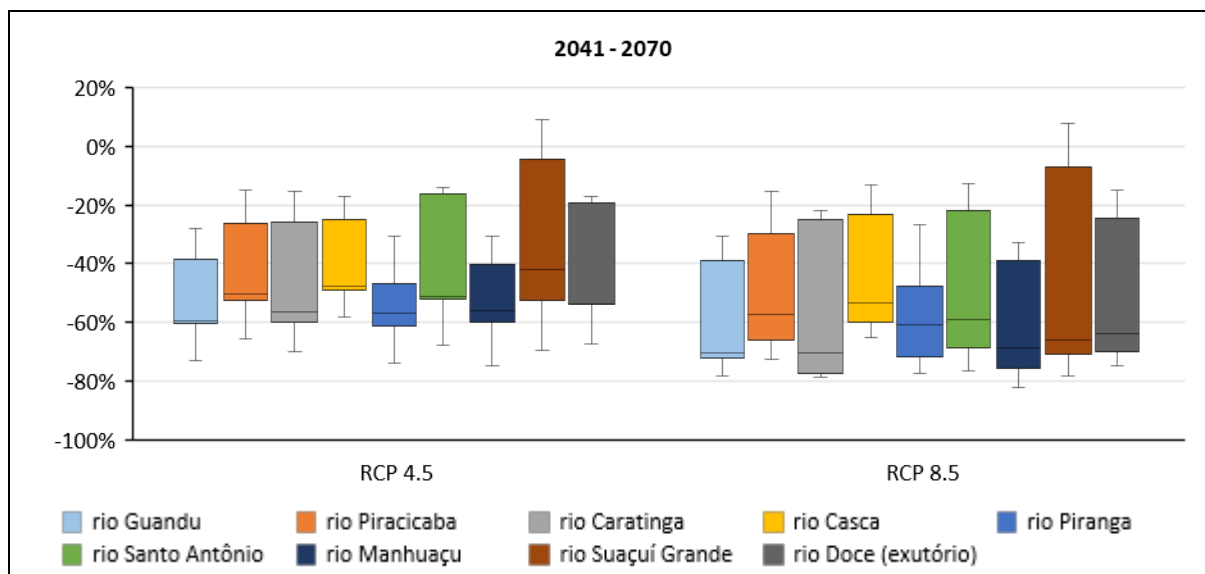


Figura 51: *Box plot* da variação da DSS média anual dos pontos de interesse sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 em 2041 - 2070.

Embora o primeiro quartil mostre que as DSS médias anuais reduzam menos de -61% sob o RCP 4.5, para maioria dos modelos climáticos as hastes inferiores são muito alongadas, indicando que para esse cenário as reduções esperadas podem chegar a -75%. Assim como em 2015 - 2040, no período de 2041 - 2070 é maior a amplitude interquartil dos diagramas *box plot* da variação das DSS médias anuais sob o RCP 8.5, mostrando novamente que para esse cenário há menor convergência das projeções. As hastes superiores mostram que no ponto sobre o rio Suaçuí Grande pode haver tendência de aumento da DSS média anual para ambos os cenários de clima em 2041 - 2070, assim como visto na Figura 46 e na Figura 47.

No período de 2071 - 2099, as medianas das tendências de variação das DSS médias anuais mostram reduções menores que -53% sob o RCP 4.5 e -85% sob o RCP 8.5 (Figura 52). Em relação ao primeiro quartil dos diagramas *box plot*, as tendências de redução são menores que -56% (RCP 4.5) e que -87% (RCP 8.5) para a maioria (75%) dos modelos climáticos. As medianas e os primeiros quartis apresentam valores muito próximos para o RCP 4.5. Isso significa que há maior concordância entre as tendências de redução referentes ao intervalo entre a mediana e ao primeiro quartil.

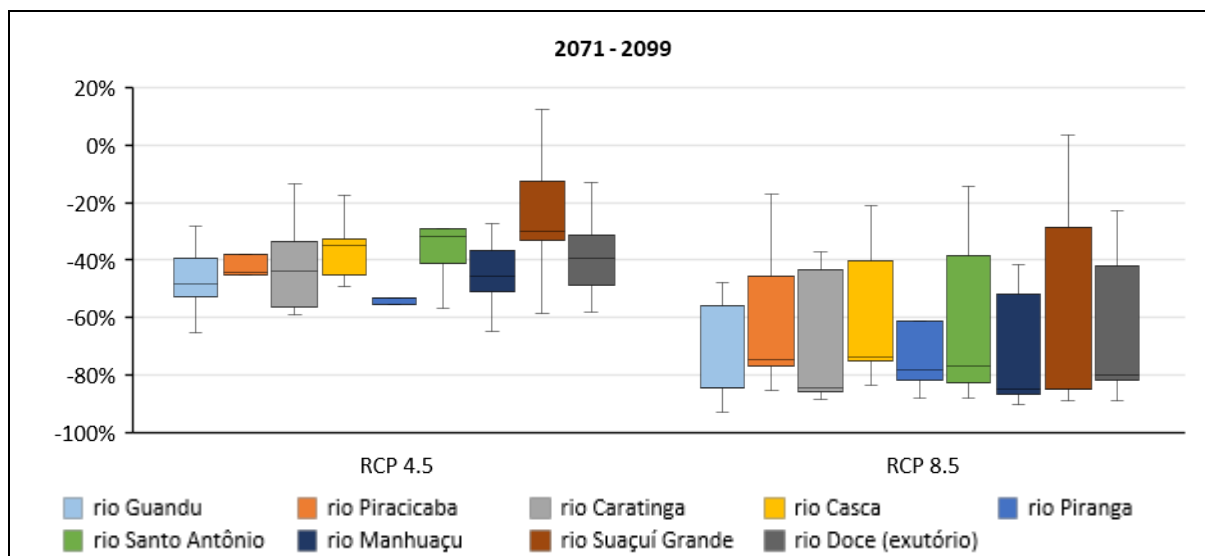


Figura 52: *Box plot* da variação da DSS média anual dos pontos de interesse sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 em 2071 - 2099.

A amplitude interquartil é maior sob o RCP 8.5 em comparação com o RCP 4.5 no período de 2071 - 2099, assim como nos demais períodos do século XXI. Indicando que as DSS médias anuais simuladas com as projeções dos modelos climáticos segundo o cenário mais rigoroso, o RCP 8.5, apresentam tendências de redução muito divergentes entre si. As hastes superiores mostram que no ponto sobre o rio Suaçuí Grande pode haver tendência de aumento da DSS média anual para ambos os cenários de clima em 2071 - 2099, assim como o observado na Figura 48 e na Figura 49.

Os impactos das mudanças climáticas sobre as DSS médias anuais nos principais afluentes e no exutório da bacia variam consideravelmente em função das projeções dos modelos climáticos. Tais variações se devem às incertezas dos modelos climáticos, as quais devem ser consideradas no gerenciamento de sedimentos e na adaptação frente às mudanças climáticas (Li et al., 2011).

5.4.2 Análise espacial

A avaliação da distribuição espacial das tendências da DSS na bacia do rio Doce foi realizada com base na variação relativa da DSS média anual ao longo do século XXI em relação à DSS do período base (1998 - 2014) em cada trecho de rio simulado (Figura 53).

A distribuição espacial das variações relativas das DSS médias anuais simuladas com projeções dos modelos climáticos utilizados para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 são apresentadas por meio de mapas nos períodos 2015 - 2040 (Figura 55 e Figura 56), 2041 - 2070 (Figura 58 e Figura 59) e 2071 - 2099 (Figura 61 e Figura 62).

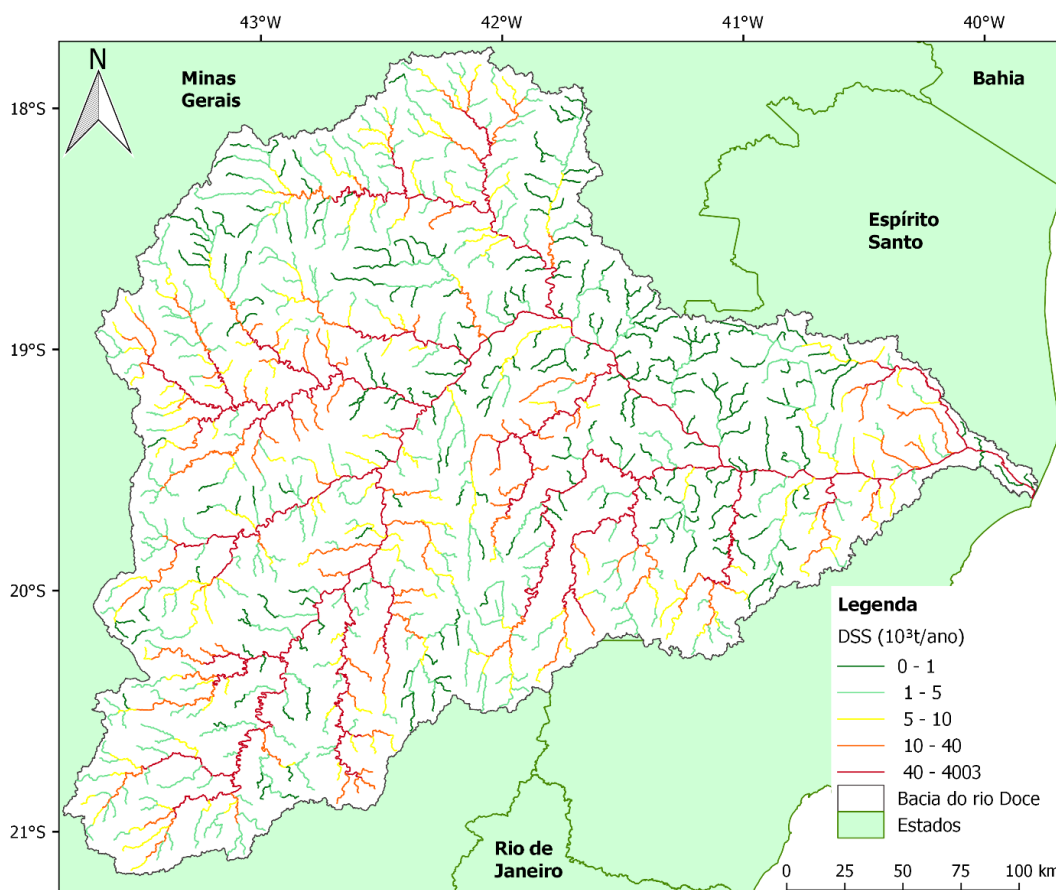


Figura 53: Descarga sólida em suspensão (DSS) média anual para o período base (1998 - 2014) em 10^3t/ano .

Para auxiliar na análise da distribuição espacial da variação da DSS média anual nos trechos de rios de cada minibacia da bacia do rio Doce foram preparados diagramas *box plot* para os períodos de 2015 - 2040 (Figura 54), 2041 - 2070 (Figura 57) e 2071 - 2099 (Figura 60).

Os diagramas *box plot* (Figura 54) e os mapas da Figura 55 e da Figura 56 mostram que as tendências de variação da DSS média anual são mais otimistas no período de 2015 - 2040 de acordo com simulações com as projeções do Eta-BESM sob o RCP 8.5 (Figura 55b) e mais rigorosas com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km (Figura 56b) e do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5 (Figura 56d), semelhante ao comportamento da vazão nesse período.

Baseado no primeiro quartil, em 75% dos trechos de drenagem as DSS médias anuais simuladas com as projeções do Eta-BESM demonstram tendências de redução menores que -48% sob o RCP 4.5 e que -33% sob o RCP 8.5, além de mostrarem tendência de aumento de até +18%, como indicam as hastes superiores do *box plot* (Figura 54).

Na maioria dos trechos de drenagem as tendências das DSS médias anuais são mais rigorosas em função das simulações com as projeções do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (Figura 55a) em comparação com as tendências sob o RCP 8.5 (Figura 55b). É possível observar na Figura 55a, que sob o RCP 4.5, é predominante as tendências de redução entre -50% e -25% na bacia. Entretanto, sob o RCP 8.5 (Figura 55b) predomina-se tendências de -25% a 0%, com alguns trechos, especialmente na parte superior da bacia, apresentando tendências de aumento, assim como observado no *box plot*. Vale destacar que nenhum dos nove pontos sobre os afluentes e o exutório da bacia apresentam tendência de aumento de acordo com o Eta-BESM RCP 8.5 (Figura 45), uma vez que não estão localizados nos trechos de rios em que se espera haver aumento da DSS.

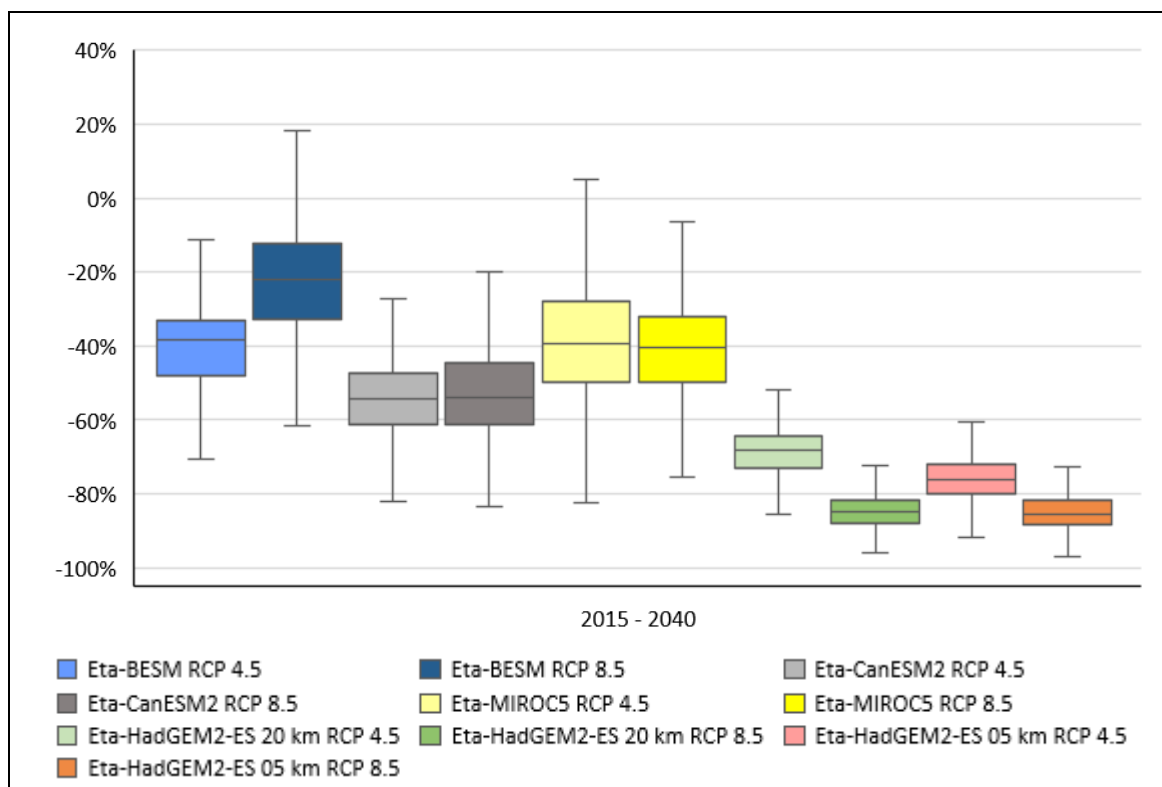


Figura 54: *Box plot* da variação da DSS média anual em todos os trechos de rio sob o RCP 4.5 e RCP 8.5 em 2015 - 2040.

Já as DSS médias anuais simuladas com as projeções do Eta-CanESM2 indicam tendências de redução menores que -61% para ambos os cenários em 75% dos trechos de drenagem, conforme o primeiro quartil do *box plot* (Figura 54). As tendências de redução entre -50% e -75% prevalecem nos trechos de rios da bacia para os cenários RCP 4.5 (Figura 55c) e RCP 8.5 (Figura 55d), de acordo com o Eta-CanESM2. Também há trechos na bacia em que as tendências de redução são entre -25% e -50%, de acordo com esse modelo. Nota-se certa similaridade entre as reduções das DSS médias anuais futuras simuladas com esse modelo climático no período de 2015 - 2040, sob ambos os cenários de clima.

Com as projeções do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5, verifica-se que as DSS médias anuais apresentam tendências de redução menores que -50%, na maior parte dos trechos de rios, isto é, em 75% deles, de acordo com o primeiro quartil do *box plot* (Figura 54). Para ambos os cenários, espera-se que haja aumento da DSS média anual na parte norte da bacia em 2015 - 2040 (Figura 55e, Figura 55f). No entanto, sob o RCP 8.5 não é possível afirmar que há aumento das DSS médias anuais no diagrama *box plot*, considerando que esses aumentos representam pontos de *outlier*, ou seja, valores acima de uma vez e meia (1,5) o intervalo interquartil (NETO et al., 2017). Além disso, percebe-se que o intervalo interquartil e o comprimento das hastes superiores e inferiores são grandes, indicando que as tendências das DSS médias anuais são muito variáveis ao longo da bacia, assim como observado nos mapas da Figura 55e (RCP 4.5) e da Figura 55f (RCP 8.5).

No período de 2015 - 2040, as DSS médias anuais simuladas com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km apresentam tendência de redução maiores que -64% (RCP 4.5) e -82% (RCP 8.5) na maior parte da rede drenagem, isto é, em 75% delas de acordo com o terceiro quartil, o limite superior da caixa do *box plot* (Figura 54). A distância interquartil e o comprimento das hastes superior e inferior são pequenos para os diagramas *box plot* desse modelo, o que indica que as tendências são menos variáveis ao longo da bacia. Para o Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5, percebe-se na Figura 56a que as tendências de redução entre -50% e -75% prevalecem na bacia do rio Doce. Assim como o observado no *box plot*, a Figura 56b mostra que as tendências de redução são maiores que -75% em quase todos os trechos de rios, segundo o Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5.

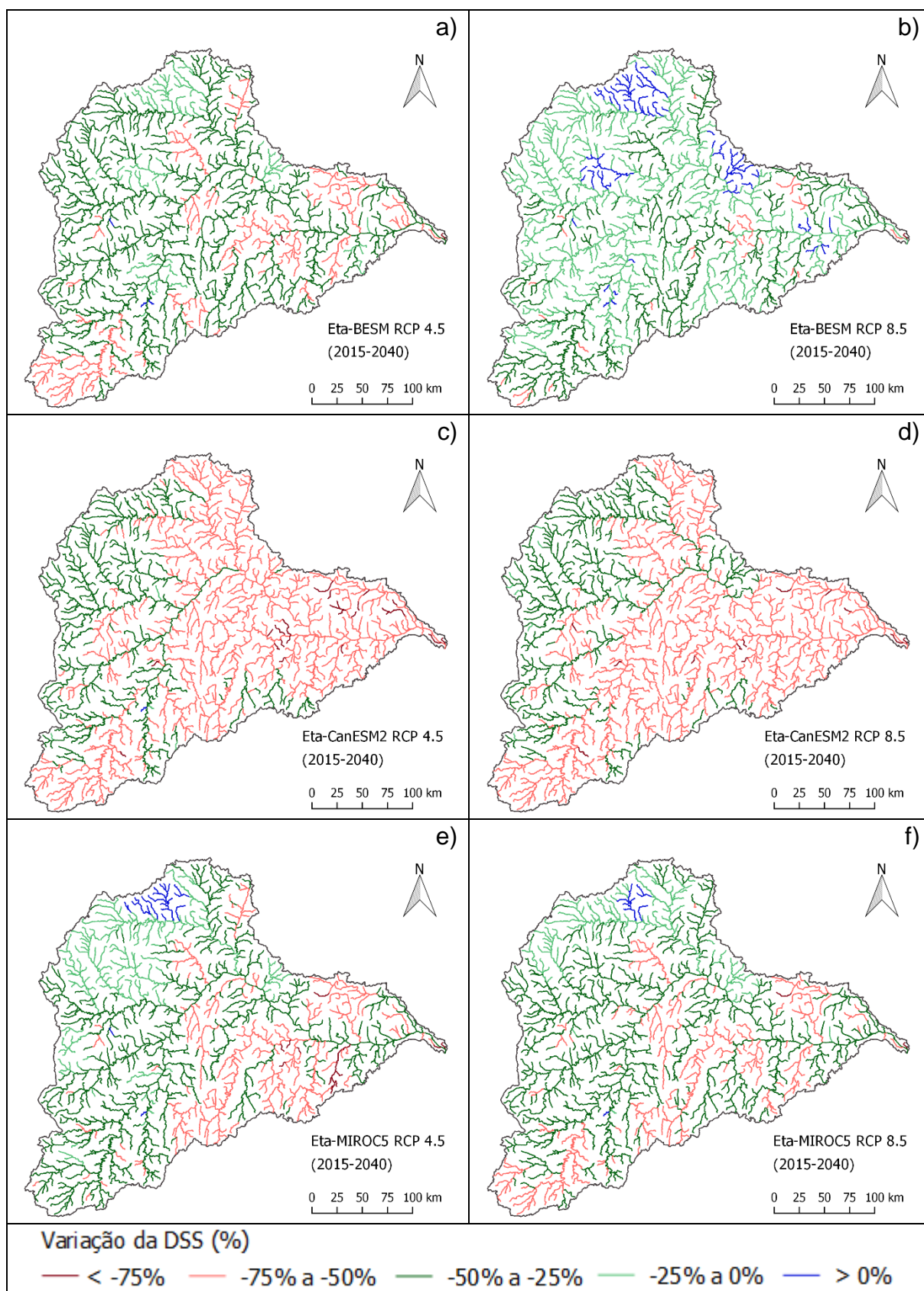


Figura 55: Variação da DSS média anual do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d), do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 (e) e sob o RCP 8.5 (f) em 2015 - 2041 em relação a DSS média anual do período base (1998 - 2014).

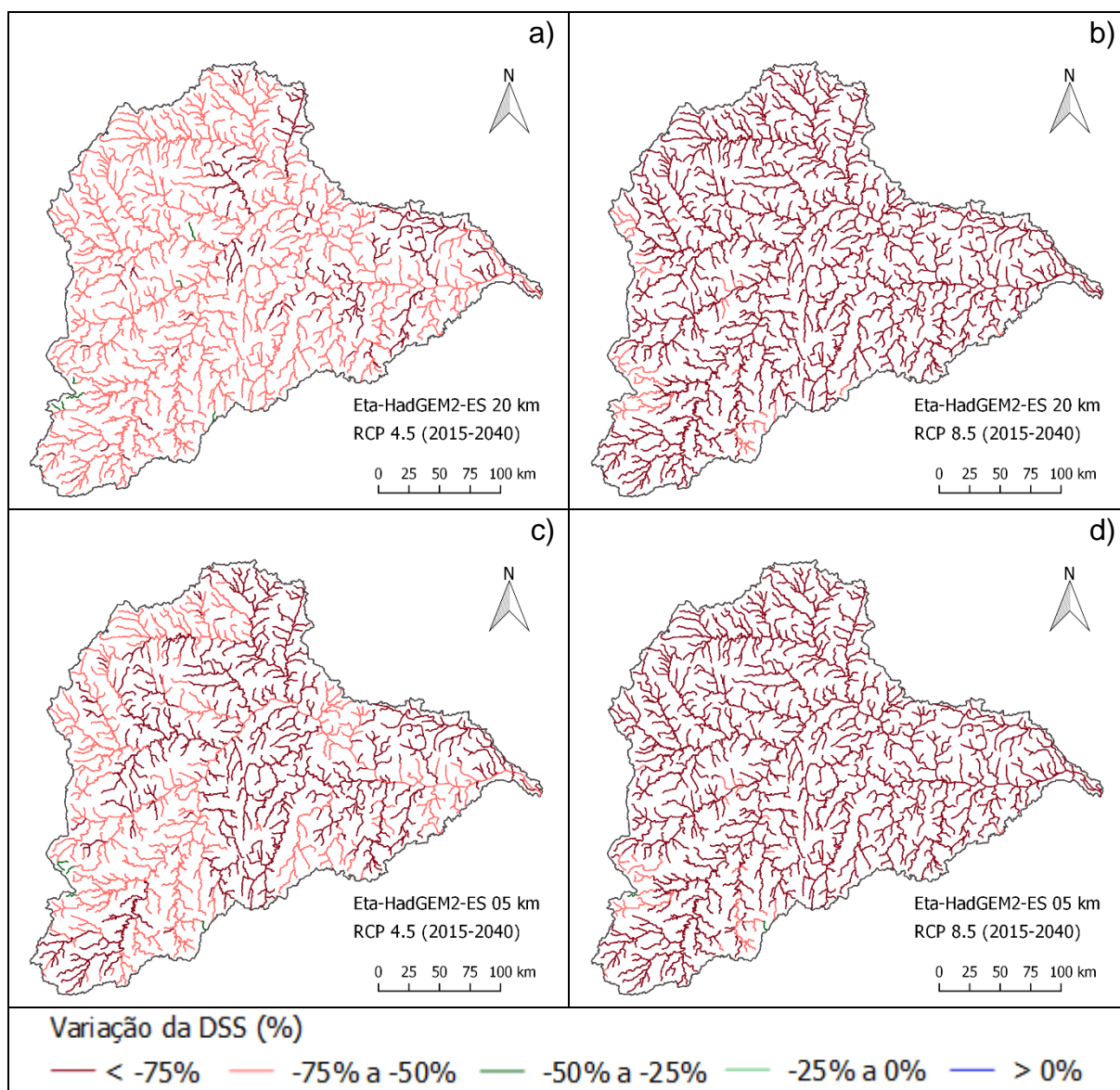


Figura 56: Variação da DSS média anual do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d) em 2015 - 2040 em relação a DSS média anual do período base (1998 - 2014).

No período 2015 - 2040 (Figura 54), as DSS médias anuais em função das projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km apresentam tendências de redução maiores que -72% (RCP 4.5) e -82% (RCP 8.5), conforme o terceiro quartil do *box plot*, em 75% da rede de drenagem. Ainda assim, é possível observar na Figura 56c que muitos trechos da bacia apresentam reduções das DSS entre -50% e -75% sob o RCP 4.5. Já para o RCP 8.5 são predominantes as reduções superiores a -75% nos rios da bacia do rio Doce, como mostrado na Figura 56d. São muito semelhantes as tendências de redução oriundas do Eta-HadGEM2-ES 20 km e 05 km sob o RCP 8.5, porém o Eta-HadGEM2-ES 05 km, para o cenário climático RCP 4.5, apresenta tendências de redução mais rigorosas no período de 2015 - 2040.

Ao analisar os diagramas *box plot* (Figura 57) e os mapas da Figura 58 e da Figura 59, observa-se que as DSS médias anuais simuladas com o Eta-BESM sob o RCP 4.5 e com o Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 e o RCP 8.5 apresentam as tendências mais otimistas para o período de 2041 - 2070, incluindo possíveis aumentos das DSS em alguns trechos de rios. No entanto, as DSS simuladas com as projeções futuras do Eta-CanESM2 e do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob RCP 8.5 e do Eta-HadGEM2-ES 05 km em ambos os cenários possuem as tendências de redução mais rigorosas para o período.

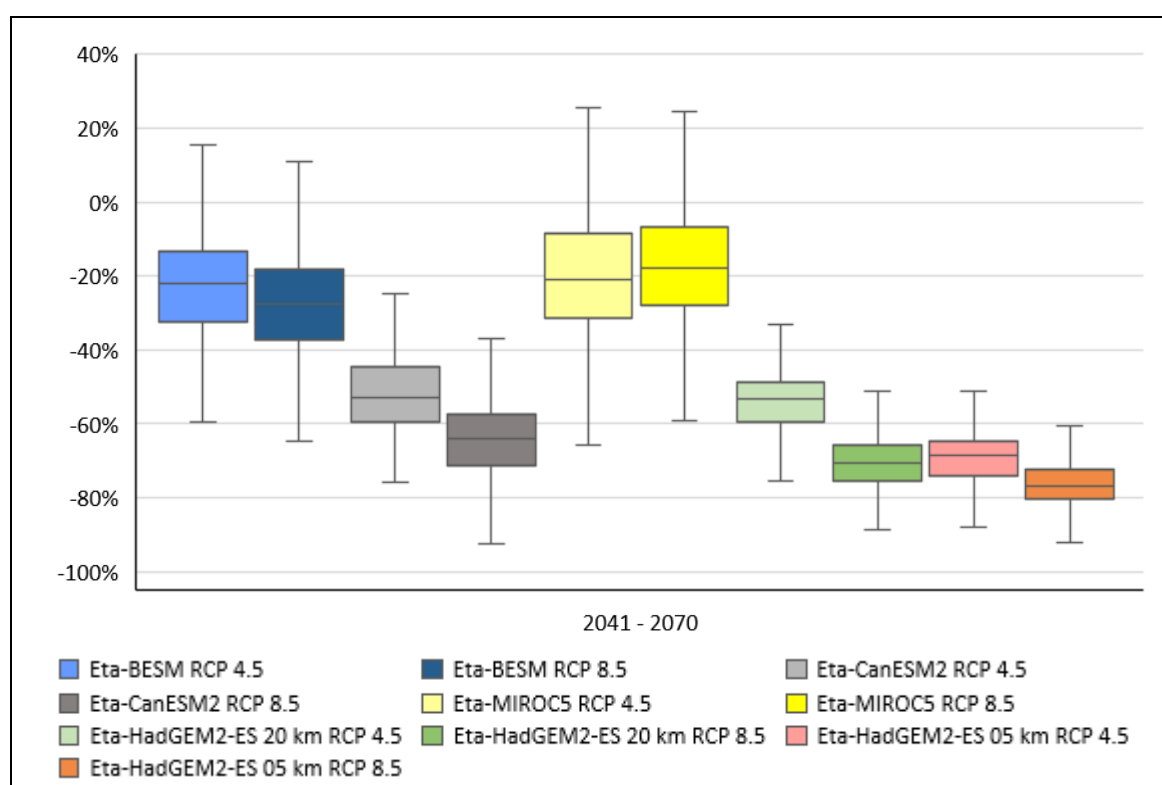


Figura 57: *Box plot* da variação da DSS média anual em todos os trechos de rio sob o RCP 4.5 e RCP 8.5 em 2041 - 2070.

Em 75% dos trechos as DSS médias anuais simuladas com as projeções do Eta-BESM apresentam tendência de redução menores que -32% sob o RCP 4.5 e -37% sob o RCP 8.5 (Figura 57). De acordo com esse modelo climático, em alguns trechos de rios pode haver aumentos de até +16%, conforme as hastes superiores do *box plot*. Porém, em determinados trechos as reduções são maiores que -50%, de acordo com as hastes inferiores dos diagramas *box plot*. Percebe-se na Figura 58a que as tendências de redução são muito variáveis ao longo da bacia de acordo com o Eta-BESM RCP 4.5, no entanto predomina-se as tendências de redução entre 0% e -25%. Já na Figura 58b é possível observar que as tendências de redução da DSS médias

anuais são predominantes entre -25% e -50% para as simulações com o Eta-BESM sob o RCP 8.5.

As DSS médias anuais simuladas com as projeções do Eta-CanESM2 mostram reduções maiores que -45% sob o RCP 4.5 e que -57% sob o RCP 8.5 na maior parte dos trechos de drenagem (75%), conforme o terceiro quartil do *box plot* (Figura 57). A maioria dos trechos de rios mostram tendências de redução entre -50% e -75% sob o RCP 4.5 (Figura 58c) e o RCP 8.5 (Figura 58d). No entanto, na região norte e noroeste da bacia as possíveis reduções da DSS médias anuais são mais otimistas, sendo entre -25% e -50% com base no Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5, como mostrado na Figura 58c.

A partir do *box-plot* da (Figura 57), verifica-se que em 75% dos trechos de drenagem há reduções da DSS média anual menores que -32% sob o RCP 4.5 e -28% sob o RCP 8.5 com as projeções do Eta-MIROC5. Além disso, conforme as hastes superiores dos diagramas *box plot* em determinados trechos as DSS médias anuais podem aumentar até +25%. Essa tendência de aumento é observada na região norte da bacia sob o RCP 4.5 (Figura 58e) e o RCP 8.5 (Figura 58f). Assim como os diagramas *box plot*, os mapas da Figura 58e e da Figura 58f mostram que as tendências das DSS médias anuais ao longo dos rios da bacia segundo as simulações com o Eta-MIROC5 são muito variáveis.

As DSS médias anuais geradas com base no Eta-HadGEM2-ES 20 km tendem a reduzir mais de -49% sob o RCP 4.5 e de -66% sob o RCP 8.5 em 75% dos trechos de rios em 2041 - 2070 (Figura 57). A distribuição espacial dos trechos de rios da Figura 59a e da Figura 59b mostra que na maioria deles, espera-se reduções da DSS média anual entre -50% e -75%, de acordo com o Eta-HadGEM2-ES 20 km para ambos os cenários. Porém, para esse modelo climático, em alguns trechos de rios da bacia espera-se reduções entre -25% e -50% sob o RCP 4.5 (Figura 59a) e maiores que -75% sob o RCP 8.5 (Figura 59b).

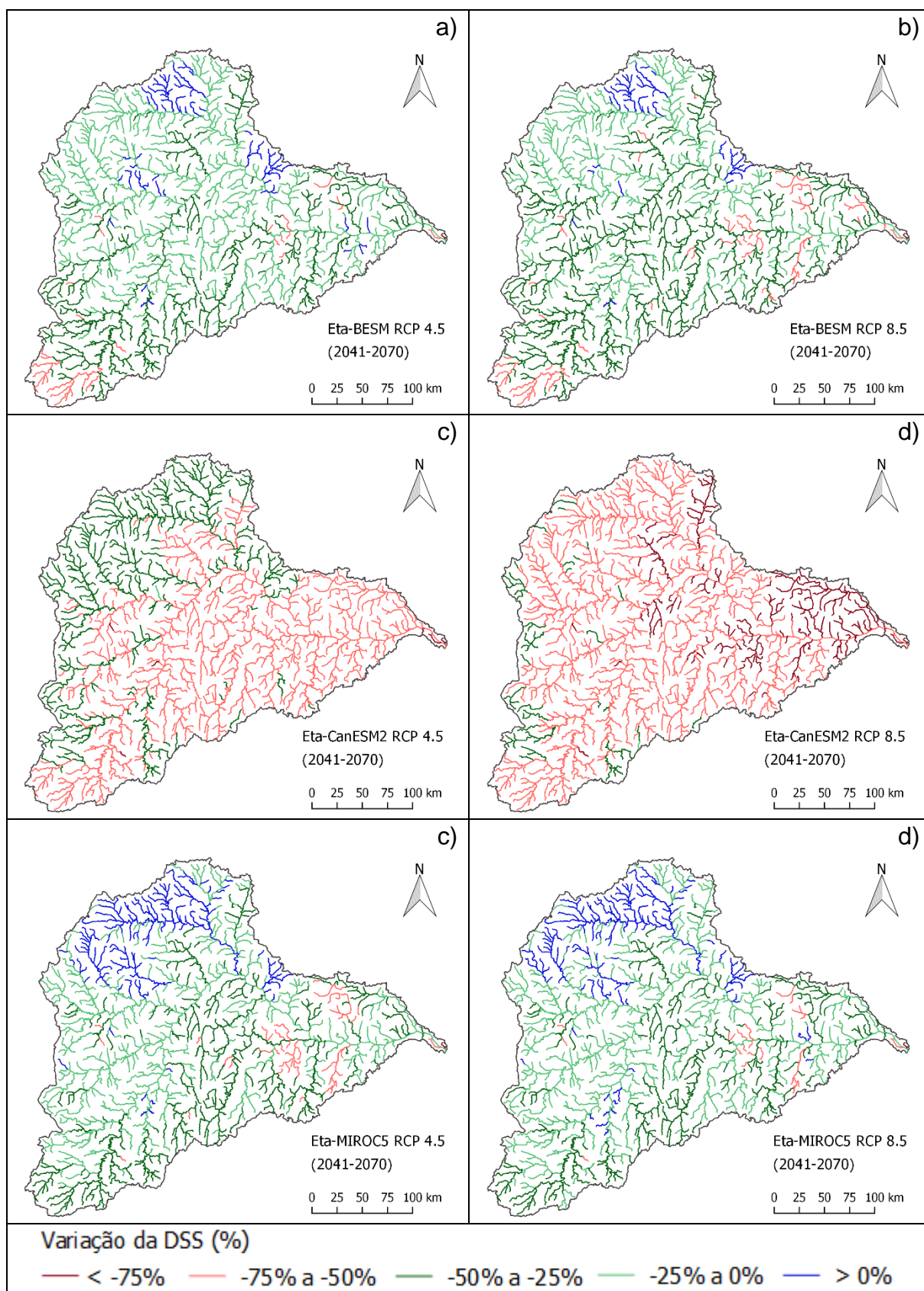


Figura 58: Variação da DSS média anual do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d), do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 (e) e sob o RCP 8.5 (f) em 2041 - 2070 em relação a DSS média anual do período base (1998 - 2014).

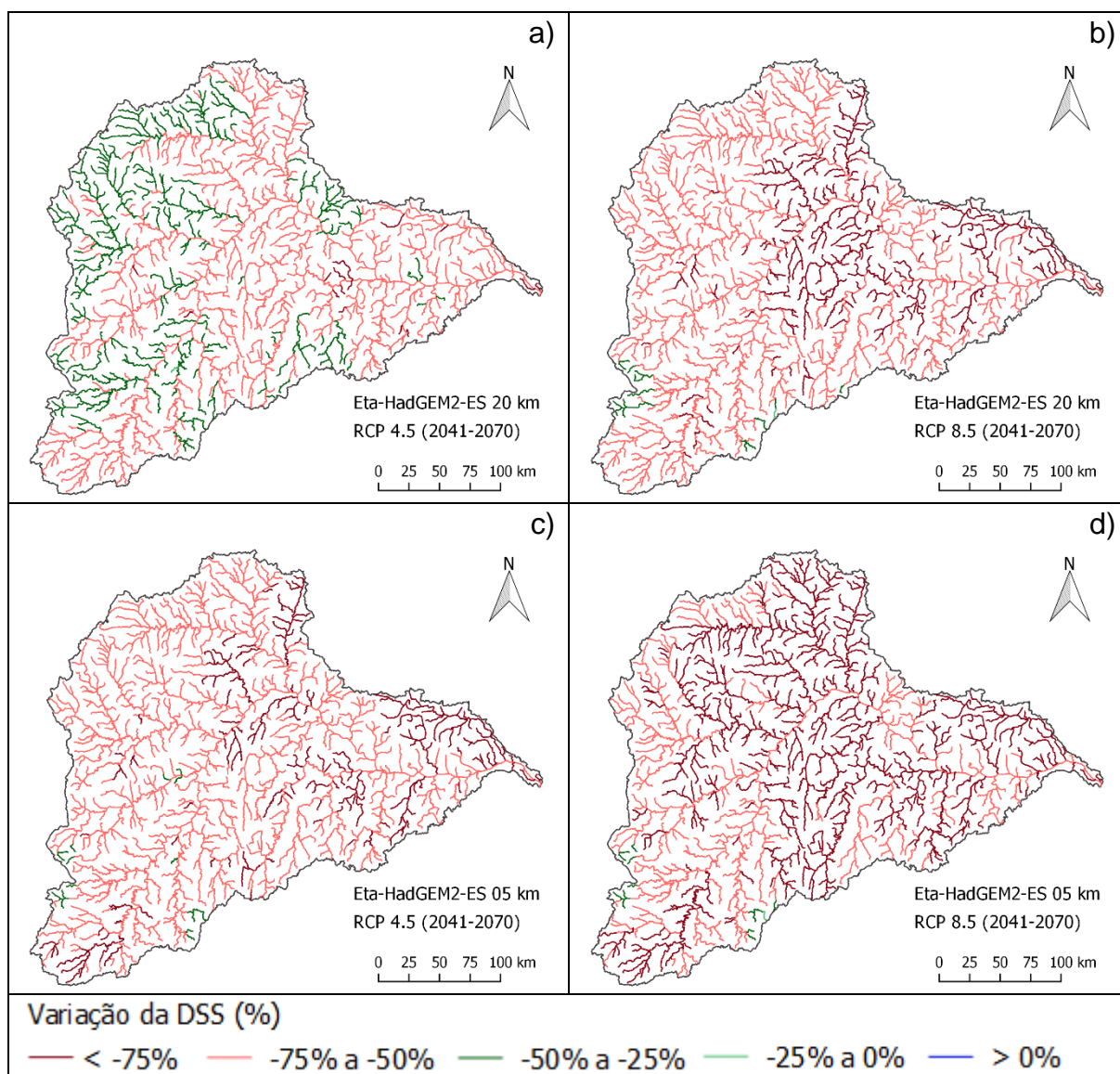


Figura 59: Variação da DSS média anual do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d) em 2041 - 2070 em relação a DSS média anual do período base (1998 - 2014).

As DSS médias anuais simuladas com o Eta-HadGEM2-ES 05 km apresentam reduções maiores que -65% sob o RCP 4.5 e -72% sob o RCP 8.5 na maior parte dos trechos de drenagem (75%), de acordo com o terceiro quartil do diagrama *box plot* (Figura 57). Como visto na Figura 59c, predominam-se as tendências de redução da DSS no período de 2041 - 2070 entre -50% e -75% para o RCP 4.5. Na Figura 59d observa-se que as reduções prevaletentes para o RCP 8.5 são maiores que -75% nos afluentes do médio e nos principais afluentes do baixo rio Doce, em função do Eta-HadGEM2-ES 05 km.

Nota-se por meio do comprimento das hastes superiores e inferiores e do intervalo interquartil que a diferença entre as taxas de redução de cada cenário ao longo da

bacia segundo as simulações com o Eta-HadGEM2-ES 20 km e o Eta-HadGEM2-ES 05 km no período de 2041 - 2070 é pequena. Também é possível observar que as simulações com o Eta-HadGEM2-ES 05 km tende a apresentar reduções mais rigorosas para as DSS médias anuais em comparação com as simulações com o Eta-HadGEM2-ES 20 km.

Os diagramas *box plot* (Figura 60) e os mapas da Figura 61 e da Figura 62 mostram que no período de 2071 - 2099 as tendências mais otimistas para as DSS médias anuais são decorrentes das simulações com o Eta-MIROC5 para ambos os cenários e as mais pessimistas são provenientes das simulações com o Eta-CanESM2 sob o RCP 8.5.

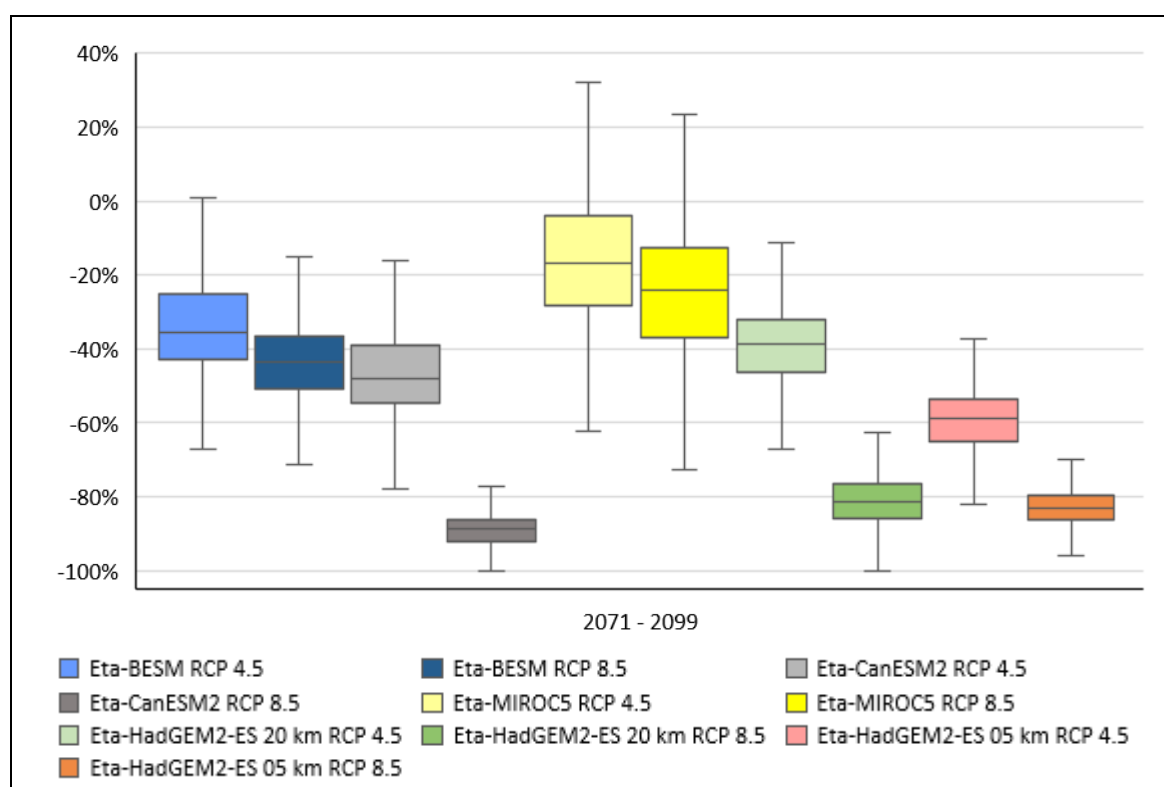


Figura 60: *Box plot* da variação da DSS média anual em todos os trechos de rio sob o RCP 4.5 e RCP 8.5 em 2071 - 2099.

Com relação às tendências das DSS simuladas com as projeções do Eta-BESM, as reduções são menores que -43% sob o RCP 4.5 e -51% sob o RCP 8.5 em 75% dos trechos de rios da bacia, conforme o primeiro quartil do diagrama *box plot* (Figura 60). Sendo predominante tendências de redução das DSS médias anuais nos rios da bacia entre -25% e -50% para ambos os cenários de acordo com o Eta-BESM (Figura 61a e Figura 61b). No entanto, segundo as simulações com as projeções do Eta-BESM

sob o RCP 4.5 há possíveis aumentos das DSS em alguns rios na região norte da bacia (Figura 61a).

As DSS geradas com as projeções do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 mostram tendências de redução menores que -55% na maior parte dos rios, isto é, em 75% deles, de acordo com o primeiro quartil do *box plot* (Figura 60). Já as DSS simuladas com as projeções do Eta-CanESM2 sob o RCP 8.5 mostram reduções maiores que -86% em 75% dos trechos de rios da bacia, segundo terceiro quartil do *box plot*. Ao analisar a Figura 61c, nota-se que em alguns trechos de rios as tendências de redução das DSS são maiores que -50%, no entanto as tendências são entre -25% e -50% no rio principal e na maioria dos afluentes da margem esquerda. Vale ressaltar, a grande diferença das DSS entre os cenários climáticos, visto que para o RCP 8.5 em todos os trechos de rios as tendências de redução são maiores que -75% (Figura 61d).

Em relação às DSS médias anuais provenientes das simulações com o Eta-MIROC5, em 75% dos trechos de rios as tendências de redução são menores que -28% sob o RCP 4.5 e -37% sob o RCP 8.5 em 2071- 2099 (Figura 60). Espera-se que em determinados trechos rios possa haver tendência de aumento de até +32% para o RCP 4.5 e +24% para o RCP 8.5, como indica a haste superior do *box plot*. Como observado no *box plot* e na Figura 61c e na Figura 62d, embora possa haver tendências de redução maiores que -25% em alguns trechos da bacia, no rio principal as tendências são entre -25% e 0%.

É possível observar no diagrama *box plot* (Figura 60) e nos mapas da Figura 62, que especialmente sob o RCP 4.5, as tendências de redução das DSS são menores para as simulações com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 20 km em relação ao Eta-HadGEM2-ES 05 km. Para o Eta-HadGEM2-ES 20 km, as DSS médias anuais tendem a reduzir menos de -46% sob o RCP 4.5 em 75% dos rios, conforme o primeiro quartil do *box plot* (Figura 60). No entanto, as simulações com o Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 8.5 as tendências de redução das DSS são maiores que -77% na maioria dos trechos de rios (75%), conforme o terceiro quartil. Assim como os diagramas *box plot*, a Figura 62a e a Figura 62b mostram que, com as projeções desse modelo climático, são grandes as diferenças das DSS entre os cenários de clima no decorrer da bacia, sendo predominantes as tendências de redução entre -25% e -50% para o RCP 4.5 e maiores que -75% para o RCP 8.5.

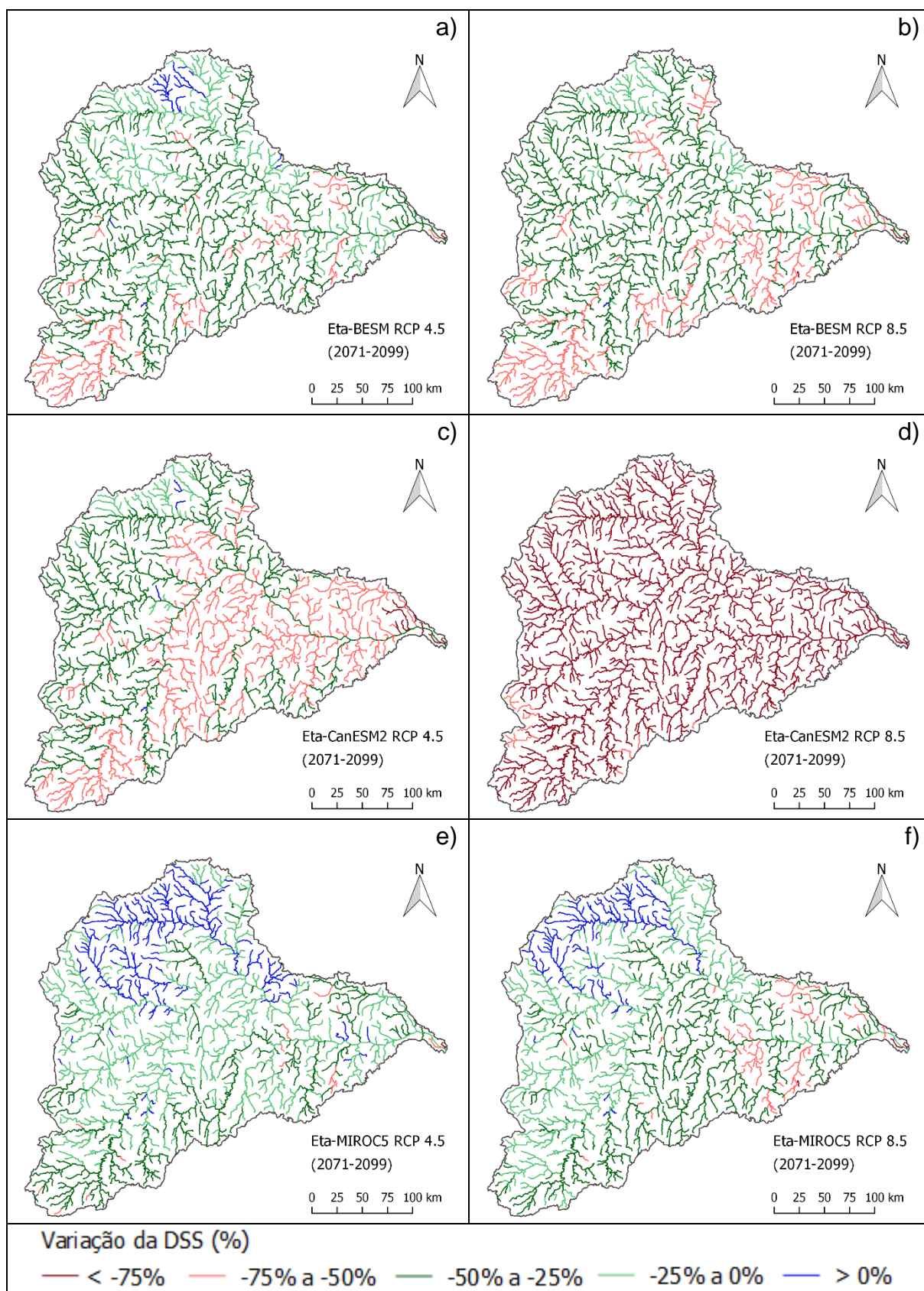


Figura 61: Variação da DSS média anual do Eta-BESM sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-CanESM2 sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d), do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 (e) e sob o RCP 8.5 (f) em 2041 - 2070 em relação a DSS média anual do período base (1998 - 2014).

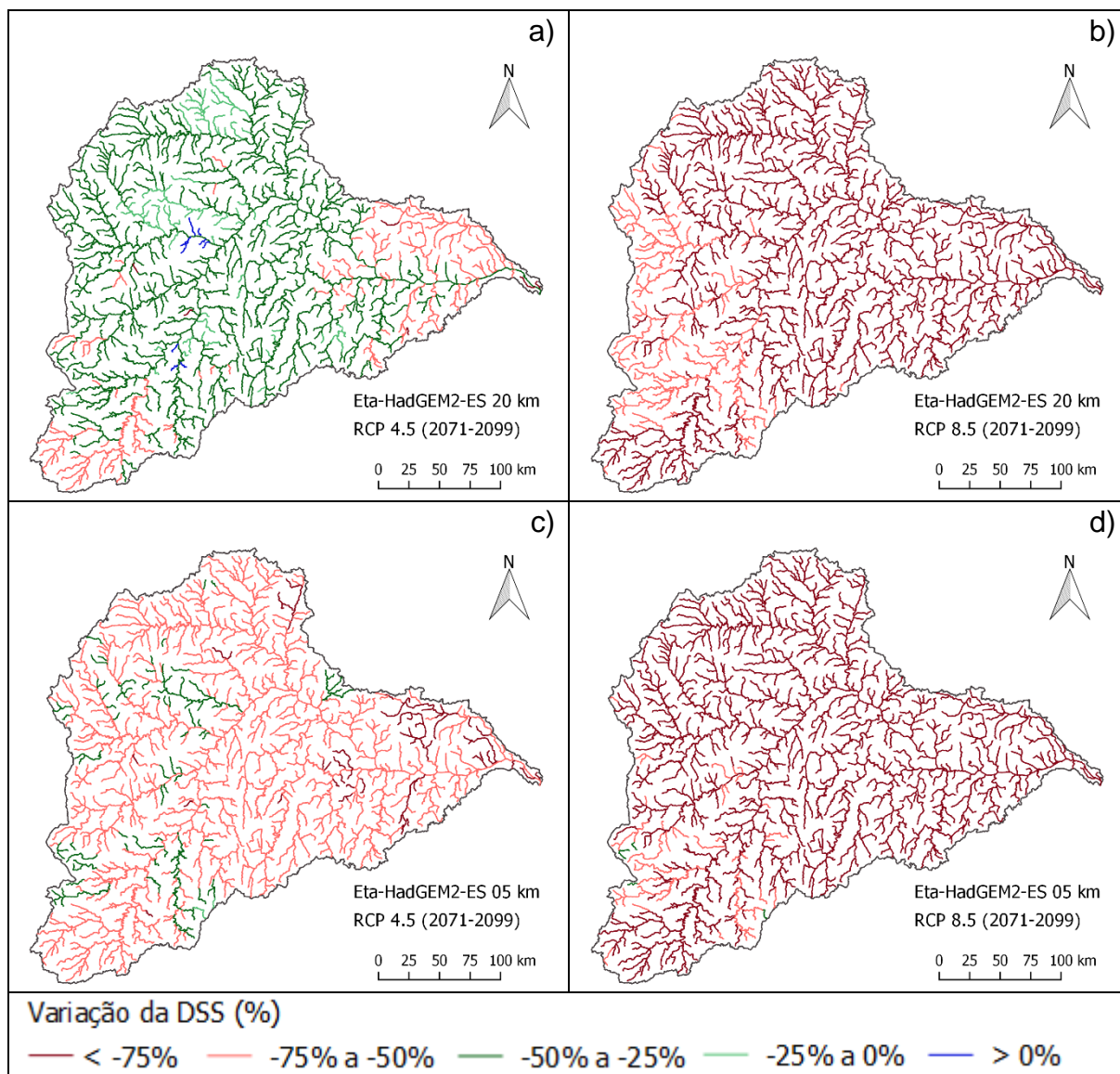


Figura 62: Variação da DSS média anual do Eta-HadGEM2-ES 20 km sob o RCP 4.5 (a) e sob o RCP 8.5 (b), do Eta-HadGEM2-ES 05 km sob o RCP 4.5 (c) e sob o RCP 8.5 (d) em 2071 - 2099 em relação a DSS média anual do período base (1998 - 2014).

Em relação às DSS simuladas com as projeções do Eta-HadGEM2-ES 05 km, espera-se que as reduções sejam menores que -65% para o RCP 4.5 em 75% dos trechos de rios (Figura 60 e Figura 62c). No entanto, para o RCP 8.5 as tendências de redução são maiores que -80% em 75% dos trechos de rios, como mostrado pelo terceiro quartil do diagrama *box plot* (Figura 60 e Figura 62d). É muito evidente que sob o RCP 8.5 são maiores os impactos das mudanças climáticas em 2071 - 2099, em relação ao RCP 4.5. Assim como observado para as vazões, as tendências das DSS são muito rigorosas sob o RCP 8.5, o que pode estar associado ao fato das projeções do Eta-HadGEM2-ES serem muito sensíveis ao aumento dos gases de efeito estufa para esse cenário de clima no final do século XXI (CHOU et al., 2014a).

As tendências de redução das DSS médias anuais nos rios da bacia do rio Doce são muito variáveis em função dos modelos climáticos e dos cenários de clima. No entanto, são predominantes as tendências de redução da descarga sólida em suspensão ao longo do século XXI. A foz do rio Doce está localizada no município de Linhares, região do litoral do Espírito Santo, e diversos estudos evidenciam uma grande redução do aporte de sedimentos dos rios nas zonas costeiras em virtude de mudanças climáticas (PRASKIEVICZ et al., 2014; DARBY et al., 2015; DUNN et al., 2019; RANASINGHE et al., 2019).

Liu et al. (2014), por exemplo, observou que no delta do Rio das Pérolas (China) que mudanças nas cargas de sedimentos podem causar problemas ambientais, como a erosão do canal, queda nos níveis de água e a intrusão de salinidade, sendo eles desafios para a gestão dos recursos hídricos e o desenvolvimento socioeconômico. Para Praskiewicz et al. (2014), mudanças na vazão e no transporte de sedimentos em suspensão em três rios no noroeste do Pacífico podem ter impactos significativos no abastecimento de água, na qualidade da água, na geomorfologia fluvial e no habitat das espécies, sendo esses muito relevantes para o gerenciamento de rios por valores sociais e ecológicos.

6 CONCLUSÕES

Os modelos climáticos e os cenários de clima futuros indicam diferenças significativas entre eles nas tendências de variação da precipitação média anual da bacia do rio Doce, assim como na precipitação média nos períodos chuvoso e seco. No entanto, a maioria deles indica que a bacia poderá sofrer graves problemas com reduções significativas da precipitação média anual futura ao longo do século XXI, exceto com as projeções do Eta-MIROC5 sob o RCP 4.5 no período de 2041 - 2070. As temperaturas médias anuais e nas estações do ano (DJF, MAM, JJA, SON) da bacia do rio Doce tendem a aumentar consideravelmente no futuro à medida que se avança nos três períodos futuros analisados, especialmente sob o RCP 8.5 no final do século XXI.

Os resultados desse estudo mostram que a bacia do rio Doce poder ter problemas relacionados à redução das vazões e das descargas sólidas em suspensão (DSS) nos três períodos futuros analisados. Apesar das simulações com as projeções dos modelos climáticos regionais mostrarem diferentes magnitudes de redução, ainda assim a redução é considerável. As simulações com o Eta-HadGEM2-ES 20 km e o Eta-HadGEM2-ES 05 km apresentam reduções significativas na bacia no século XXI, porém é possível observar que sob o RCP 4.5 as simulações com o Eta-HadGEM2-ES 20 km tendem a ser mais otimistas em comparação com as simulações com o Eta-HadGEM2-ES 05 km. Por outro lado, em alguns cursos d'água pode haver aumento das vazões e das DSS médias anuais geradas a partir das simulações com o Eta-BESM e do Eta-MIROC5, especialmente a região mais ao norte da área de estudo.

Este estudo mostrou que existe variação significativa entre as projeções dos modelos climáticos, reforçando a importância de utilizar diferentes modelos e cenários climáticos para analisar os efeitos das mudanças climáticas.

A foz do rio Doce está localizada na região costeira do estado do Espírito Santo e reduções nos sedimentos fluviais podem ocasionar erosão das zonas costeiras, logo as comunidades e o desenvolvimento dessa região podem ser afetados negativamente, de acordo com as projeções dos MCR. Reduções na vazão podem comprometer o abastecimento de água para consumo humano e a disponibilidade de água para agropecuária, indústria, geração de energia elétrica, que são importantes para o leste mineiro e o noroeste do Espírito Santo.

Desse modo, os resultados deste estudo podem auxiliar no desenvolvimento de planos de gerenciamento dos recursos hídricos na bacia do rio Doce. Além disso, podem oferecer informações relevantes relacionadas à elaboração de ações de adaptação e mitigação aos impactos ocasionados pelas mudanças climáticas na bacia.

Embora este estudo não considere possíveis alterações de uso e cobertura do solo nos cenários futuros, elas podem afetar significativamente a vazão e o transporte de sedimentos em suspensão na bacia do rio Doce.

7 RECOMENDAÇÕES

Usos da terra e mudanças em sua cobertura podem ocasionar impactos significativos na erosão (IPCC, 2014b; ROUTSCHEK; SCHMIDT; KREIENKAMP, 2014). Em virtude do alto grau de degradação da vegetação nativa e do mau uso da terra da bacia do rio Doce, recomenda-se avaliar os impactos do uso e cobertura da terra na geração e no transporte de sedimentos e nas vazões mínimas, médias e máximas, com cenários que representem práticas conservacionistas de uso da terra.

Salazar, Nobre e Oyama (2007) apontam que em consequência das alterações climáticas pode haver substituição das florestas tropicais por savanas na América do Sul, diante disso sugere-se avaliar o impacto das mudanças na cobertura da vegetação nativa na produção de sedimentos na bacia.

Os resultados das simulações hidrossedimentológicas são sensíveis às variáveis climáticas utilizadas como dados de entrada, desse modo sugere-se realizar diferentes metodologias de correção de viés como mapeamento quantil-quantil e delta change (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012).

Os cenários futuros (RCP) utilizados neste trabalho foram aplicados para desenvolver as projeções climáticas do CMIP5, porém esse está entrando na sexta fase, o CMIP6. Então, sugere-se considerar projeções dos MCG e os cenários futuros do CMIP6.

Recomenda-se considerar nas simulações hidrossedimentológicas os reservatórios presentes na bacia do rio Doce, como o reservatório da UHE de Aimorés, importante na geração de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- ADAM, K.; COLLISCHONN, W. Análise dos Impactos de Mudanças Climáticas nos Regimes de Precipitação e Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 69-79, 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Encarte especial sobre a bacia do rio Doce: Rompimento da barragem em Mariana/MG**. 2016. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce_22_03_2016v2.pdf>. Acesso em: 01 nov 2019.
- ALBINO, Jacqueline; SUGUIO, Kenitiro. Sedimentation processes and beach morphodynamics active at the Doce River mouth, Espírito Santo State, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 82, n. 4, p. 1031-1044, dez. 2010.
- ALMAGRO, A. et al. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, v. 244, p. 105053, 2020.
- ALVARENGA, L. A. et al. Assessment of land cover change on the hydrology of a Brazilian headwater watershed using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. **Catena**, v. 143, p. 7-17, 2016a.
- ALVARENGA, L. A. et al. Hydrological responses to climate changes in a headwater watershed. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 6, p. 647-657, 2016b.
- ANDRADE, C. W. L. et al. Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: a case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. **International Journal Of Climatology**, p. 1-17, 2020.
- ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal Of The American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.
- ARORA, V. K. et al. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 5, p. 1-6, 2011.

AZIM, F. et al. Impact of climate change on sediment yield for Naran watershed, Pakistan. **International Journal Of Sediment Research**, v. 31, n. 3, p. 212-219, 2016.

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.

BRÊDA, J. P. L. F. et al. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. **Climatic Change**, v. 159, n. 4, p. 503-522, 2020.

BRIGHENTI, T.; BONUMÁ, N.; CHAFFE, P. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 53-64, 2016.

BUARQUE, D. C. **Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: Estudo de caso do rio Madeira**. 2015. 181 f. Tese (Doutorado) – Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BUSSI, G. et al. Modelling the future impacts of climate and land-use change on suspended sediment transport in the River Thames (UK). **Journal Of Hydrology**, v. 542, p. 357-372, 2016.

CABRAL, S. L. et al. O Intervalo de Tempo para uma Máxima Previsibilidade da Precipitação sobre o Semiarido Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 105-113, 2016.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2°. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CHANSON, H. **The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction**. 2. Ed. Elsevier, 2004.

CHRISTENSEN, J. H. et al. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 20, p. 1-6, 2008.

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, n. 5, p. 512-525, 2014a.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of the eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 438, 2014b.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1988.

COELHO, A. L. Nascentes. Bacia hidrográfica do Rio Doce (MG/ES): uma análise socioambiental integrada. **Revista Geografares**, v. 7, p. 131-146, 2009.

COELHO, A. L. N. **Alterações hidrogeomorfológicas no Médio-Baixo Rio Doce/ES**. 2007. 227 f. Tese (Doutorado) – Curso de Geografia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

COELHO, A. L. N. Situação hídrico-geomorfológica da bacia do rio Doce com base nos dados da série histórica de vazões da estação de Colatina - ES. **Caminhos de Geografia**, v. 6, n. 19, p. 56-79, 2006.

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

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. 2º. ed. Porto Alegre: **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, 2015.

COLLISCHONN, W. et al. Previsão sazonal de vazão na bacia do rio Uruguai 2: Previsão climática-hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 61-72, 2005.

COLLISCHONN, W. et al. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001.

CUPOLILLO, F. **Diagnóstico Hidroclimatológico da Bacia do Rio Doce**. 2008. 155 f. Tese (Doutorado) – Curso de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008a.

CUPOLILLO, F.; DE ABREU, Magda Luzimar; VIANELLO, Rubens Leite. Climatologia da Bacia do Rio Doce e sua relação com a topografia local. **Revista Geografias**, v. 4, n. 1, p. 45-60, 2008b.

DARBY, S. E. et al. A first look at the influence of anthropogenic climate change on the future delivery of fluvial sediment to the Ganges–Brahmaputra–Meghna delta. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 17, n. 9, p. 1587-1600, 2015.

DELA COSTA, F. P. et al. Impacto das mudanças climáticas na vazão e descarga sólida em suspensão na bacia do rio Doce. In: Encontro nacional de engenharia de sedimentos, 14, 2020, Campinas. **Anais...** Campinas: ABRH, 2020.

DUNN, F. et al. Projections of declining fluvial sediment delivery to major deltas worldwide in response to climate change and anthropogenic stress. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 8, p. 084034, 2019.

EHRET, U. et al. HESS Opinions "Should we apply bias correction to global and regional climate model data?". **Hydrology And Earth System Sciences**, v. 16, p. 3391-3404, 2012.

FAGUNDES, H. O. et al. Sediment modeling of a large-scale basin supported by remote sensing and in-situ observations. **Catena**, v. 190, p. 104535, 2020.

FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. Automatic calibration of a large-scale sediment model using suspended sediment concentration, water quality, and remote sensing data. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, p. 1-18, 2019.

FAGUNDES, H. O. **Modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias com apoio de dados in situ e sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

FAGUNDES, H. O. et al. Simulação hidrossedimentológica preliminar na Bacia do Rio Doce com o Modelo MGB-SED. In: Congresso internacional de hidrossedimentologia, 2, 2017, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2017.

FAN, F.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 243-254, 2014.

FAN, F. M. et al. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 21, 2015, Brasília, **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2015.

FERREIRA, P. M. L.; PAZ, A. R.; BRAVO, J. M. Objective functions used as performance metrics for hydrological models. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, p. 1-15, 2020.

FLEISCHMANN, A. S.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R. C. D. Estimating design hydrographs at the basin scale: from event-based to continuous hydrological simulation. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, p. 1-10, 2019.

FÖEGER, L. B. et al. Modelagem hidrossedimentológica com propagação inercial de vazões. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 23, 2019, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2019a.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Soil Map of the world: Volume IV South America**. Paris, 1971.

FRAGOSO JR, C. R.; FERREIRA, T. F.; DA MOTTA, D. M. **Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos**. São Paulo: Oficina de textos, 2009.

GUO, Y. et al. Identifying how future climate and land use/cover changes impact streamflow in Xinanjiang Basin, East China. **Science Of The Total Environment**, v. 710, p. 136275-136276, 2020.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal Of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

HIPT, F. O. et al. Modeling the impact of climate change on water resources and soil erosion in a tropical catchment in Burkina Faso, West Africa. **Catena**, v. 163, p. 63-77, 2018.

HOU, K. et al. Automatic Extraction of Drainage Networks from DEMs Base on Heuristic Search. **Journal Of Software**, v. 6, n. 8, p. 1611-1618, 2011.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DO BRASIL**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 03 mai. 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p., 2014a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Central and South America. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, p. 1499-1566, 2014b.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (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 University Press, Cambridge, UK, p. 1535, 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change and Water**: Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat, Geneva, 210 p., 2008.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p., 2007a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007**: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the

Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 976 p., 2007b.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **IPCC Special Report: Emissions Scenarios**. IPCC, 27 p., 2000.

JACKSON, E. K. et al. Introductory overview: error metrics for hydrologic modelling - a review of common practices and an open source library to facilitate use and adoption. **Environmental Modelling & Software**, v. 119, p. 32-48, 2019.

JIMÉNEZ, K. Q. **Modelagem hidrológica com uso da estimativa de chuva por sensoriamento remoto**. 2011. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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.

KNUTTI, R. et al. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 4, p. 369-373, 2012.

LAPRISE, R. et al. Challenging some tenets of Regional Climate Modelling. **Meteorology And Atmospheric Physics**, v. 100, n. 1-4, p. 3-22, 2008.

LEGATES, D. R.; MCCABE JUNIOR, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LEM, S. et al. The heuristic interpretation of box plots. **Learning And Instruction**, v. 26, p. 22-35, 2013.

LENDERINK, G.; BUIHAND, A.; VAN DEURSEN, W. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology And Earth System Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1145-1159, 2007.

LI, Y. et al. Effects of temperature change on water discharge, and sediment and nutrient loading in the lower Pearl River basin based on SWAT modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 56, n. 1, p. 68-83, 2011.

LIMA, J. E. F. W. et al. Suspended sediment fluxes in the large river basins of Brazil. **Sediment Budgets I (Proc. 7th IAHS Scientific Assembly)**, v. 1, p. 355-363, 2005.

LIU, Feng et al. Hydrological responses to the combined influence of diverse human activities in the Pearl River delta, China. **Catena**, v. 113, p. 41-55, 2014.

LOPES, V. A. R. et al. A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes. **Journal Of Hydrology**, v. 565, p. 177-196, 2018.

LUCAS-BORJA, M. E. et al. Impacts of land-use and climate changes on surface runoff in a tropical forest watershed (Brazil). **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 11, p. 1956-1973, 2020.

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, n. 1-2, p. 663-682, 2017.

MARENGO, J. A. et al. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTec/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9-10, p. 1829-1848, 2011.

MARTA-ALMEIDA, M. et al. Fundão Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. **Marine Pollution Bulletin**, v. 112, n. 1-2, p. 359-364, 2016.

MARTIN, G. M. et al. The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 723-757, 2011.

MEDEIROS, G. C. S.; MAIA, A. G.; MEDEIROS, Joana D. F.. Seca hidrológica: uma abordagem sob a perspectiva da demanda hídrica. In: Simpósio de recursos hídricos do Nordeste, 13, 2016, Aracaju. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2016.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, n. 8-9, p. 761-799, 2003.

MESINGER, F. A. blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, v. 44, p. 195-202, 1984.

MESINGER, F. et al. The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, v. 116, n. 7, p. 1493-1518, 1988.

MESINGER, F. et al. An upgraded version of the Eta model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, n. 3-4, p. 63-79, 2012.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions Of The Asabe**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

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

MUERTH, M. J. et al. On the need for bias correction in regional climate scenarios to assess climate change impacts on river runoff. **Hydrology And Earth System Sciences**, v. 17, n. 3, p. 1189-1204, 2013.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2007.

NEARING, M. A.; PRUSKI, F. F.; O'NEAL, M. R. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. **Journal of soil and water conservation**, v. 59, n. 1, p. 43-50, 2004.

NETO, J. V. et al. Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. **Revista Odontológica do Brasil Central**, v. 26, n. 76, 2017.

NEW, M. et al. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, v. 21, p. 1-25, 2002.

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, p. 2685-2696, 2019.

NI, S. et al. Sediment transport capacity in erodible beds with reconstituted soils of different textures. **Catena**, v. 183, p. 1-11, 2019.

NOBRE, P. et al. Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal Of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6716-6732, 2013.

NÓBREGA, M. T. et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrology And Earth System Sciences**, v. 15, n. 2, p. 585-595, 2011.

NUZZO, R. L. The Box Plots Alternative for Visualizing Quantitative Data. **PM&R**, v. 8, n. 3, p. 268-272, 2016.

OLIVEIRA, V. A. et al. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 20-31, 2019.

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

OLIVEIRA, K. S. S.; QUARESMA, V. S. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. **Journal Of South American Earth Sciences**, v. 78, p.101-115, 2017.

PANDEY, A. et al. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. **Catena**, v. 147, p. 595-620, 2016.

PAIVA, R. C. D. et al. Using TRMM rainfall estimates in hydrological and hydrodynamic modelling of the Amazon Basin. **IAHSAISH Publication**, v. 343, p. 72-77, 2011.

PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias estudo de caso: bacia do rio Solimões**. 2009. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PAZ, A. R. et al. The influence of vertical water balance on modelling Pantanal (Brazil) spatio-temporal inundation dynamics. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 10, p. 3539-3553, 2013.

PETROVIC, František. Hydrological Impacts of Climate Change and Land Use. **Water** **2021**, [s. l.], v. 799, n. 13, p. 1-3, 2021.

PINTO, W. P.; LIMA, G. B.; ZANETTI, J. B. Análise comparativa de modelos de séries temporais para modelagem e previsão de regimes de vazões médias mensais do rio Doce, Colatina - Espírito Santo. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 3, p. 1-11, 2015.

PIRH-BACIA DO RIO DOCE. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce – PIRH Bacia do Rio Doce – Volume I**. Consorcio Ecoplan–Lume. 2010. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/wpcontent/uploads/2014/10/PIRH_Doce_Volume_I.pdf>. Acesso em: 31 out. 2019.

PRASKIEVICZ, S. et al. Impacts of Projected Climate Changes on Streamflow and Sediment Transport for Three Snowmelt-Dominated Rivers in the Interior Pacific Northwest. **River Research And Applications**, v. 32, n. 1, p. 4-17, 2014.

PONTES, P. R. M. et al. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, v. 94, p. 1-20, 2017.

PONTES, P. R. M. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia do rio da Prata**. 2016. 209 f. Tese (Doutorado) - Curso de em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PONTES, P. R. M. et al. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015.

QUEIROZ, A. R. et al. Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system. **Renewable Energy**, v. 99, p. 379-389, 2016.

QIN, P. et al. Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation. **Journal Of Hydrology**, v. 580, p. 1-13, 2020.

RANASINGHE, R. et al. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on fluvial sediment supply to the coast by the world's large rivers: pearl river basin, china. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1-10, 2019.

RIBEIRO NETO, A.; PAZ, A. R.; MARENGO, J. A.; CHOU, S. C. Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil. **Journal Of Water Resource And Protection**, v. 8, n. 12, p. 1103-1127, 2016.

RIBEIRO, L. S.; ALVES, M. G. Quantificação de Perda de Solo por Erosão no município de Campos dos Goytacazes/RJ através de Técnicas de Geoprocessamento. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007.

ROSSONI, R. B.; FAN, F. M.; LOPES, V. A. Estimativa da descarga sólida de sedimentos em suspensão para o Lago Guaíba/RS através da modelagem hidrossedimentológica de grande escala. In: Encontro nacional de engenharia de sedimentos, 13, 2018, Vitória. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2018.

ROUSCHEK, A.; SCHMIDT, J.; KREIENKAMP, F. Impact of climate change on soil erosion – A high-resolution projection on catchment scale until 2100 in Saxony/Germany. **Catena**, v. 121, p. 99-109, 2014.

SALAZAR, L. F.; NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 9, p. 1-6, 2007.

SANTOS, C. et al. Using a Hydrologic Model to Assess the Performance of Regional Climate Models in a Semi-Arid Watershed in Brazil. **Water**, v. 11, n. 1, p. 1-17, 2019.

SANTOS, J. Y. G. et al. Land cover and climate change effects on streamflow and sediment yield: a case study of Tapacurá River basin, Brazil. **Proceedings Of The International Association Of Hydrological Sciences**, v. 371, p. 189-193, 2015.

SANTOS, J. Y. G. et al. Assessment of land-use change on streamflow using GIS, remote sensing and a physically-based model, SWAT. **Proceedings Of The International Association Of Hydrological Sciences**, v. 364, p. 38-43, 2014.

SHRESTHA, N. K.; WANG, J.. Predicting sediment yield and transport dynamics of a cold climate region watershed in changing climate. **Science Of The Total Environment**, v. 625, p. 1030-1045, 2018.

SHRESTHA, B. et al. Uncertainty in flow and sediment projections due to future climate scenarios for the 3S Rivers in the Mekong Basin. **Journal Of Hydrology**, v. 540, p. 1088-1104, 2016.

SCHUSTER, R. C. et al. Scenarios of climate change effects in water availability within the Patos Lagoon's Basin. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, p. 1-15, 2020.

SCHUSTER, R. C.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Cenários de mudanças climáticas na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica transfronteiriça da Laguna dos Patos com base no CMIP5. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 23., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2019.

SILVA, F. G. B. et al. Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim - SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 141-148, 2010.

SIQUEIRA, V. A. et al. Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. **Hydrology And Earth System Sciences**, v. 22, n. 9, p. 4815-4842, 2018.

SIQUEIRA, V. A. et al. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 274-287, 2016.

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

SOUZA, W. F. L.; KNOPPERS, B. Fluxos de água e sedimentos a costa leste do Brasil: relações entre a tipologia e as pressões antrópicas. **Geochimica Brasiliensis**, v. 17, n. 1, p. 57-74, 2003.

TAN, M. L. et al. Impacts and uncertainties of climate change on streamflow of the Johor River Basin, Malaysia using a CMIP5 General Circulation Model ensemble. **Journal Of Water And Climate Change**, v. 5, n. 4, p. 676-695, 2014.

TIAN, P. et al. Large decrease in streamflow and sediment load of Qinghai–Tibetan Plateau driven by future climate change: a case study in lhasa river basin. **Catena**, v. 187, p. 104340, 2020.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal Of Hydrology**, v. 456-457, p. 12-29, 2012.

TODINI, E. Hydrological catchment modelling: past, present and future. **Hydrology And Earth System Sciences**, v. 11, n. 1, p. 468-482, 2007.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: ABRH, 1998.

VAN VUUREN, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p. 5-31, 2011.

VÁZQUEZ-FERNÁNDEZ, G. A. et al. Determinação de sequências culturais em microbacia hidrográfica para caracterização do Fator C da EUPS, utilizando fotografia aérea. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8, 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: INPE, 1996.

VINEY, N. R.; SIVAPALAN, M. A conceptual model of sediment transport: application to the Avon River Basin in Western Australia. **Hydrological Processes**, v. 13, n. 5, p. 727-743, 1999.

VIOLA, M. R. et al. Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. **International Journal Of Climatology**, v. 35, n. 6, p. 1054-1068, 2014.

WATANABE, M. et al. Improved Climate Simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal Of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010.

WILKINSON, S. N. et al. Modelling and testing spatially distributed sediment budgets to relate erosion processes to sediment yields. **Environmental Modelling & Software**, v. 24, n. 4, p. 489-501, 2009.

WILLIAMS, J. R. **Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor**. In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. US Department of Agriculture: Washington, p. 244-252, 1975.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of the model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 2, p. 1309-1313, 1982.

WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, p. 79-82, 2005.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. **Agriculture Handbook N° 282**. USDA-ARS, 1965.

WISCHMEIER, W. H.; Smith, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. **Agriculture Handbook N° 537**. U.S. Gov. Print. Office, 1978.

WÖHLING, T.; SAMANIEGO, L.; KUMAR, R. Evaluating multiple performance criteria to calibrate the distributed hydrological model of the upper Neckar catchment. **Environmental Earth Sciences**, v. 69, n. 2, p. 453-468, 2013.

XU, R. et al. Projected climate change impacts on future streamflow of the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra River. **Global And Planetary Change**, v. 175, p. 144-159, 2019.

ZABALETA, A. et al. Simulation Climate Change Impact on Runoff and Sediment Yield in a Small Watershed in the Basque Country, Northern Spain. **Journal Of Environment Quality**, v. 43, n. 1, p. 235-245, 2014.

ZHANG, S. et al. Assessment of Climate Change and Associated Vegetation Cover Change on Watershed-Scale Runoff and Sediment Yield. **Water**, v. 11, n. 7, p. 1373-1393, 2019.

ZHANG, L. et al. Analysis of streamflow responses to climate variability and land use change in the Loess Plateau region of China. **Catena**, v. 154, p. 1-11, 2017.

ZHANG, Y. et al. Impacts of climate change on streamflows under RCP scenarios: a case study in xin river basin, china. **Atmospheric Research**, v. 178-179, p. 521-534, 2016.

ZHAO, P. et al. Impacts of climate change on hydrological droughts at basin scale: A case study of the Weihe River Basin, China. **Quaternary International**, v. 513, p. 37-46, 2019.

ZHOU, Y. et al. Climate change impacts on flow and suspended sediment yield in headwaters of high-latitude regions — A case study in China's far northeast. **Water**, v. 9, n. 12, p. 1-17, 2017.

ZUO, D. et al. Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China. **Science Of The Total Environment**, v. 544, p. 238-250, 2016.

APÊNDICE A

Tabela 4: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Guandu.

Período base (1998 - 2014)		$Q_{média}$ (m ³ /s)	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)			
		19,7	9,0	6,2			
2015 - 2040							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	14,5	-26%	4,2	-54%	2,0	-68%
	Eta-CanESM2	10,7	-46%	3,7	-59%	2,2	-65%
	Eta-MIROC5	12,0	-39%	4,9	-46%	2,9	-54%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	6,8	-66%	1,5	-83%	0,3	-95%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	6,2	-69%	1,7	-81%	0,6	-90%
RCP 8.5	Eta-BESM	18,1	-8%	7,6	-16%	4,8	-23%
	Eta-CanESM2	9,7	-51%	2,9	-68%	1,5	-76%
	Eta-MIROC5	12,9	-35%	4,2	-53%	2,0	-67%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	4,7	-76%	1,2	-87%	0,7	-90%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	4,2	-79%	1,2	-87%	0,6	-90%
2041 - 2070							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	16,5	-16%	5,5	-39%	3,5	-45%
	Eta-CanESM2	9,0	-54%	2,4	-74%	0,9	-86%
	Eta-MIROC5	16,2	-18%	7,5	-17%	5,2	-16%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	9,7	-51%	1,9	-79%	0,5	-92%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	7,3	-63%	1,7	-81%	0,8	-88%
RCP 8.5	Eta-BESM	14,8	-25%	4,4	-51%	2,1	-66%
	Eta-CanESM2	6,6	-66%	0,9	-90%	0,1	-98%
	Eta-MIROC5	16,4	-17%	5,8	-35%	3,2	-49%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	7,3	-63%	2,0	-78%	0,8	-87%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	6,1	-69%	1,6	-83%	0,7	-90%
2071 - 2099							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	15,2	-23%	6,0	-33%	3,3	-47%
	Eta-CanESM2	9,2	-53%	2,0	-78%	-	-
	Eta-MIROC5	16,4	-17%	4,9	-46%	3,2	-49%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	10,4	-47%	1,9	-79%	0,6	-90%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	8,4	-58%	2,1	-77%	1,1	-83%
RCP 8.5	Eta-BESM	10,6	-46%	2,4	-74%	0,9	-85%
	Eta-CanESM2	1,8	-91%	0,2	-98%	-	-
	Eta-MIROC5	12,6	-36%	3,9	-57%	1,9	-70%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	4,3	-78%	1,2	-87%	0,5	-92%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	3,8	-81%	0,8	-91%	0,2	-97%
Legenda de cores		<-70%	-70% a -50%	-50% a -20%	>-20%		

Tabela 5: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Piracicaba.

Período base (1998 - 2014)		$Q_{média}$ (m ³ /s)	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)			
		61,8	24,6	17,9			
2015 - 2040							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	44,6	-28%	12,6	-49%	7,6	-58%
	Eta-CanESM2	36,6	-41%	12,1	-51%	7,8	-56%
	Eta-MIROC5	46,7	-24%	16,5	-33%	10,2	-43%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	24,1	-61%	5,1	-79%	1,4	-92%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	21,3	-66%	5,5	-78%	2,4	-87%
RCP 8.5	Eta-BESM	53,4	-14%	21,4	-13%	14,0	-22%
	Eta-CanESM2	35,8	-42%	11,9	-51%	7,0	-61%
	Eta-MIROC5	42,4	-31%	16,1	-34%	9,7	-46%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	16,1	-74%	3,5	-86%	1,7	-90%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	15,7	-75%	4,5	-82%	2,4	-87%
2041 - 2070							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	48,7	-21%	17,1	-30%	10,5	-41%
	Eta-CanESM2	33,6	-46%	8,7	-65%	4,5	-75%
	Eta-MIROC5	55,5	-10%	23,6	-4%	16,4	-8%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	32,4	-48%	5,8	-76%	1,7	-91%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	24,7	-60%	5,9	-76%	2,3	-87%
RCP 8.5	Eta-BESM	46,4	-25%	14,5	-41%	7,9	-56%
	Eta-CanESM2	28,2	-54%	3,7	-85%	1,2	-93%
	Eta-MIROC5	54,8	-11%	20,3	-17%	12,8	-28%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	24,6	-60%	6,8	-72%	3,1	-83%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	20,6	-67%	6,0	-76%	2,7	-85%
2071 - 2099							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	43,1	-30%	16,9	-31%	10,6	-41%
	Eta-CanESM2	34,9	-44%	8,3	-66%	3,7	-80%
	Eta-MIROC5	52,6	-15%	16,8	-31%	10,0	-44%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	35,2	-43%	6,3	-75%	2,9	-84%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	29,2	-53%	7,0	-71%	3,9	-78%
RCP 8.5	Eta-BESM	35,1	-43%	7,3	-70%	2,5	-86%
	Eta-CanESM2	10,3	-83%	1,5	-94%	0,2	-99%
	Eta-MIROC5	51,5	-17%	15,4	-37%	8,6	-52%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	17,2	-72%	3,8	-85%	1,7	-91%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	15,5	-75%	3,3	-87%	1,4	-92%
Legenda de cores		<-70%	-70% a -50%	-50% a -20%	>-20%		

Tabela 6: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Caratinga.

Período base (1998 - 2014)		$Q_{média}$ (m ³ /s)	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)			
		26,7	8,2	4,7			
2015 - 2040							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM E.L.	17,8	-33%	2,9	-64%	1,5	-69%
	Eta-CanESM2 E.L.	11,5	-57%	2,8	-66%	1,4	-70%
	Eta-MIROC5 E.L.	15,9	-40%	4,0	-52%	1,9	-60%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km E.L.	8,2	-69%	1,1	-87%	0,0	-99%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km E.L.	6,8	-75%	1,3	-84%	0,3	-93%
RCP 8.5	Eta-BESM E.L.	22,5	-15%	6,1	-26%	3,3	-29%
	Eta-CanESM2 E.L.	10,9	-59%	2,5	-69%	1,2	-73%
	Eta-MIROC5 E.L.	15,8	-41%	3,6	-56%	1,5	-67%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km E.L.	4,4	-83%	0,8	-90%	0,4	-91%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km E.L.	4,3	-84%	0,9	-89%	0,5	-90%
2041 - 2070							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM E.L.	22,3	-17%	4,2	-49%	2,2	-53%
	Eta-CanESM2 E.L.	10,8	-60%	1,9	-77%	0,6	-88%
	Eta-MIROC5 E.L.	20,9	-22%	6,5	-21%	4,2	-11%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km E.L.	12,1	-55%	1,3	-85%	-	-
	Eta-HadGEM2-ES 05 km E.L.	8,8	-67%	1,4	-83%	0,5	-90%
RCP 8.5	Eta-BESM E.L.	20,2	-24%	3,5	-58%	1,3	-72%
	Eta-CanESM2 E.L.	8,4	-69%	0,8	-90%	0,2	-97%
	Eta-MIROC5 E.L.	21,1	-21%	5,0	-40%	2,5	-46%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km E.L.	7,2	-73%	1,6	-81%	0,6	-88%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km E.L.	6,7	-75%	1,4	-83%	0,5	-89%
2071 - 2099							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM E.L.	18,6	-30%	4,4	-47%	1,8	-62%
	Eta-CanESM2 E.L.	11,3	-58%	1,5	-81%	-	-
	Eta-MIROC5 E.L.	22,0	-18%	4,2	-49%	2,3	-52%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km E.L.	14,4	-46%	1,1	-86%	0,1	-99%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km E.L.	11,0	-59%	1,5	-82%	0,6	-86%
RCP 8.5	Eta-BESM E.L.	14,9	-44%	1,7	-79%	0,2	-96%
	Eta-CanESM2 E.L.	2,9	-89%	0,2	-97%	-	-
	Eta-MIROC5 E.L.	16,8	-37%	3,1	-63%	1,2	-75%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km E.L.	4,3	-84%	0,8	-91%	0,3	-95%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km E.L.	4,4	-83%	0,7	-92%	0,1	-97%
Legenda de cores		<-70%	-70% a -50%	-50% a -20%	>-20%		

Tabela 7: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Casca.

Período base (1998 - 2014)		$Q_{média}$ (m ³ /s)	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)			
		29,2	12,5	8,8			
2015 - 2040							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	22,6	-23%	6,7	-46%	3,9	-56%
	Eta-CanESM2	18,6	-36%	7,1	-43%	4,9	-44%
	Eta-MIROC5	21,5	-26%	8,9	-29%	5,7	-34%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	12,5	-57%	3,0	-76%	1,0	-89%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	11,6	-60%	3,4	-73%	1,6	-82%
RCP 8.5	Eta-BESM	27,7	-5%	12,3	-1%	8,6	-2%
	Eta-CanESM2	16,7	-43%	6,4	-49%	4,0	-54%
	Eta-MIROC5	20,5	-30%	8,6	-31%	5,5	-38%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	8,5	-71%	2,2	-83%	1,2	-86%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	8,5	-71%	2,7	-78%	1,7	-81%
2041 - 2070							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	24,1	-17%	9,2	-26%	5,9	-33%
	Eta-CanESM2	16,5	-43%	4,9	-61%	2,7	-70%
	Eta-MIROC5	27,0	-7%	13,3	7%	9,7	11%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	16,6	-43%	3,2	-74%	1,0	-89%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	13,6	-54%	3,6	-71%	1,7	-81%
RCP 8.5	Eta-BESM	24,2	-17%	7,8	-38%	4,5	-48%
	Eta-CanESM2	14,5	-50%	2,4	-81%	0,9	-89%
	Eta-MIROC5	27,8	-5%	11,4	-9%	7,4	-15%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	12,9	-56%	3,9	-69%	1,9	-79%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	11,4	-61%	3,8	-70%	1,9	-78%
2071 - 2099							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	22,3	-23%	9,7	-23%	6,2	-29%
	Eta-CanESM2	16,6	-43%	4,7	-63%	2,3	-73%
	Eta-MIROC5	26,0	-11%	9,3	-26%	6,2	-29%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	18,7	-36%	3,6	-71%	1,6	-82%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	15,9	-46%	4,3	-65%	2,4	-72%
RCP 8.5	Eta-BESM	18,0	-38%	4,3	-66%	2,0	-77%
	Eta-CanESM2	5,2	-82%	1,0	-92%	0,3	-97%
	Eta-MIROC5	24,4	-16%	8,1	-35%	4,8	-45%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	8,4	-71%	2,1	-83%	0,9	-89%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	7,7	-74%	2,1	-83%	1,1	-87%
Legenda de cores		<-70%	-70% a -50%	-50% a -20%	>-20%		

Tabela 8: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Piranga.

Período base (1998 - 2014)		$Q_{média}$ (m ³ /s)	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)			
		89,9	38,6	25,2			
2015 - 2040							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	52,4	-42%	14,6	-62%	7,6	-70%
	Eta-CanESM2	46,7	-48%	16,1	-58%	9,2	-63%
	Eta-MIROC5	59,4	-34%	21,9	-43%	12,7	-50%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	30,2	-66%	6,2	-84%	1,4	-94%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	26,7	-70%	6,4	-84%	2,1	-92%
RCP 8.5	Eta-BESM	64,4	-28%	24,9	-36%	15,0	-40%
	Eta-CanESM2	44,5	-51%	16,2	-58%	9,5	-62%
	Eta-MIROC5	53,0	-41%	20,5	-47%	12,6	-50%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	19,6	-78%	4,9	-87%	2,3	-91%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	18,5	-79%	5,4	-86%	3,0	-88%
2041 - 2070							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	57,9	-36%	20,8	-46%	11,7	-54%
	Eta-CanESM2	42,9	-52%	10,9	-72%	5,2	-79%
	Eta-MIROC5	71,0	-21%	30,1	-22%	20,4	-19%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	40,3	-55%	7,3	-81%	1,8	-93%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	30,1	-66%	7,4	-81%	2,8	-89%
RCP 8.5	Eta-BESM	56,1	-38%	16,1	-58%	8,3	-67%
	Eta-CanESM2	37,0	-59%	5,3	-86%	1,1	-96%
	Eta-MIROC5	72,8	-19%	27,5	-29%	17,0	-33%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	30,2	-66%	8,3	-79%	3,3	-87%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	25,3	-72%	7,3	-81%	2,9	-88%
2071 - 2099							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	52,0	-42%	20,5	-47%	12,5	-50%
	Eta-CanESM2	44,1	-51%	11,1	-71%	4,6	-82%
	Eta-MIROC5	63,3	-30%	22,4	-42%	13,3	-47%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	43,8	-51%	8,4	-78%	3,9	-84%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	35,6	-60%	8,5	-78%	5,0	-80%
RCP 8.5	Eta-BESM	40,4	-55%	8,5	-78%	2,7	-89%
	Eta-CanESM2	12,4	-86%	2,1	-95%	0,4	-99%
	Eta-MIROC5	68,1	-24%	22,4	-42%	12,2	-52%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	21,0	-77%	4,3	-89%	1,8	-93%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	18,0	-80%	4,1	-89%	1,5	-94%
Legenda de cores		<-70%	-70% a -50%	-50% a -20%	>-20%		

Tabela 9: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Santo Antônio.

Período base (1998 - 2014)		$Q_{média}$ (m ³ /s)	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)			
		124,1	31,7	19,4			
2015 - 2040							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	92,7	-25%	18,4	-42%	8,7	-55%
	Eta-CanESM2	76,1	-39%	16,5	-48%	8,7	-55%
	Eta-MIROC5	100,5	-19%	21,6	-32%	11,6	-40%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	50,2	-60%	6,5	-80%	1,3	-93%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	41,5	-67%	7,4	-77%	2,9	-85%
RCP 8.5	Eta-BESM	115,3	-7%	28,8	-9%	15,7	-19%
	Eta-CanESM2	80,0	-36%	17,4	-45%	9,0	-54%
	Eta-MIROC5	91,7	-26%	19,5	-38%	9,5	-51%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	32,2	-74%	4,6	-86%	2,5	-87%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	29,2	-76%	5,6	-82%	2,6	-87%
2041 - 2070							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	109,0	-12%	22,2	-30%	10,7	-45%
	Eta-CanESM2	71,6	-42%	11,3	-64%	4,1	-79%
	Eta-MIROC5	116,5	-6%	30,6	-3%	18,8	-3%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	68,7	-45%	8,4	-73%	2,4	-87%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	50,5	-59%	8,1	-75%	3,0	-85%
RCP 8.5	Eta-BESM	103,3	-17%	19,6	-38%	8,8	-55%
	Eta-CanESM2	58,5	-53%	5,1	-84%	0,6	-97%
	Eta-MIROC5	115,1	-7%	26,3	-17%	13,3	-31%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	50,3	-60%	9,1	-71%	2,3	-88%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	40,9	-67%	7,5	-76%	2,9	-85%
2071 - 2099							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	94,5	-24%	22,6	-29%	11,7	-40%
	Eta-CanESM2	74,0	-40%	10,2	-68%	2,9	-85%
	Eta-MIROC5	112,7	-9%	23,0	-27%	10,9	-44%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	75,4	-39%	7,7	-76%	2,9	-85%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	61,7	-50%	8,7	-72%	4,5	-77%
RCP 8.5	Eta-BESM	78,7	-37%	9,4	-70%	2,3	-88%
	Eta-CanESM2	20,3	-84%	1,8	-94%	0,3	-99%
	Eta-MIROC5	106,8	-14%	19,1	-40%	8,3	-57%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	35,1	-72%	4,8	-85%	1,8	-91%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	28,0	-77%	4,0	-87%	1,4	-93%
Legenda de cores		<-70%	-70% a -50%	-50% a -20%	>-20%		

Tabela 10: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Manhuaçu.

Período base (1998 - 2014)		$Q_{média}$ (m ³ /s)	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)			
		45,0	17,5	11,8			
2015 - 2040							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	33,5	-25%	9,0	-48%	5,3	-56%
	Eta-CanESM2	24,6	-45%	8,7	-50%	5,6	-53%
	Eta-MIROC5	30,5	-32%	11,5	-34%	7,1	-40%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	16,5	-63%	3,7	-79%	1,0	-92%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	14,3	-68%	4,1	-77%	1,9	-84%
RCP 8.5	Eta-BESM	41,2	-8%	15,9	-9%	10,5	-11%
	Eta-CanESM2	22,7	-50%	7,7	-56%	4,4	-63%
	Eta-MIROC5	30,9	-31%	10,5	-40%	6,1	-48%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	10,6	-77%	2,7	-85%	1,5	-87%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	10,1	-77%	3,1	-82%	1,8	-84%
2041 - 2070							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	38,5	-14%	11,9	-32%	7,5	-36%
	Eta-CanESM2	21,6	-52%	5,8	-67%	2,9	-75%
	Eta-MIROC5	39,6	-12%	17,0	-3%	12,2	3%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	23,7	-47%	4,3	-75%	1,6	-86%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	17,6	-61%	4,5	-74%	2,2	-81%
RCP 8.5	Eta-BESM	36,3	-19%	9,9	-43%	5,3	-55%
	Eta-CanESM2	16,8	-63%	2,5	-86%	0,8	-93%
	Eta-MIROC5	40,0	-11%	14,1	-20%	8,4	-29%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	16,3	-64%	4,7	-73%	2,2	-81%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	14,1	-69%	4,2	-76%	2,0	-83%
2071 - 2099							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	34,3	-24%	12,4	-29%	7,5	-37%
	Eta-CanESM2	21,6	-52%	4,9	-72%	1,8	-85%
	Eta-MIROC5	39,2	-13%	11,7	-33%	7,5	-37%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	26,2	-42%	4,5	-74%	2,1	-82%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	20,6	-54%	4,9	-72%	2,9	-76%
RCP 8.5	Eta-BESM	26,4	-41%	5,2	-70%	2,1	-82%
	Eta-CanESM2	5,4	-88%	0,8	-96%	0,1	-99%
	Eta-MIROC5	33,0	-27%	9,8	-44%	5,5	-54%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	10,2	-77%	2,6	-85%	1,2	-90%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	9,4	-79%	2,3	-87%	0,9	-92%
Legenda de cores		<-70%	-70% a -50%	-50% a -20%	>-20%		

Tabela 11: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Suaçuí Grande.

Período base (1998 - 2014)		$Q_{média}$ (m ³ /s)	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)			
		60,8	19,3	10,7			
2015 - 2040							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	43,6	-28%	7,3	-62%	2,7	-75%
	Eta-CanESM2	30,6	-50%	7,1	-63%	2,8	-74%
	Eta-MIROC5	47,9	-21%	9,7	-50%	3,9	-63%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	19,6	-68%	2,6	-86%	0,2	-98%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	15,9	-74%	2,8	-86%	0,8	-93%
RCP 8.5	Eta-BESM	56,2	-8%	13,0	-32%	5,4	-49%
	Eta-CanESM2	30,1	-51%	6,3	-67%	2,6	-76%
	Eta-MIROC5	47,5	-22%	7,9	-59%	2,5	-77%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	11,6	-81%	2,2	-89%	1,1	-90%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	10,5	-83%	2,3	-88%	1,2	-89%
2041 - 2070							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	52,0	-14%	9,2	-52%	3,4	-68%
	Eta-CanESM2	31,7	-48%	4,2	-78%	1,0	-90%
	Eta-MIROC5	60,8	0%	16,1	-16%	8,9	-16%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	28,3	-53%	3,3	-83%	0,8	-92%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	19,5	-68%	3,0	-85%	0,9	-92%
RCP 8.5	Eta-BESM	50,8	-16%	7,4	-61%	1,5	-86%
	Eta-CanESM2	21,3	-65%	1,6	-91%	-	-
	Eta-MIROC5	58,2	-4%	11,5	-40%	4,8	-55%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	18,9	-69%	3,6	-81%	0,5	-96%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	14,6	-76%	2,6	-87%	0,7	-94%
2071 - 2099							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	49,2	-19%	9,1	-53%	1,7	-84%
	Eta-CanESM2	33,3	-45%	3,6	-81%	23,9	124%
	Eta-MIROC5	59,8	-2%	10,7	-45%	3,9	-63%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	35,1	-42%	2,7	-86%	-	-
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	24,4	-60%	3,3	-83%	1,5	-86%
RCP 8.5	Eta-BESM	37,5	-38%	3,5	-82%	-	-
	Eta-CanESM2	6,3	-90%	0,5	-97%	0,1	-99%
	Eta-MIROC5	52,7	-13%	7,1	-63%	1,3	-88%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	10,4	-83%	1,7	-91%	0,7	-94%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	9,4	-84%	1,2	-94%	0,2	-98%
Legenda de cores		<-70%	"-70% a -50%"	"-50% a -20%"	>-20%		

Tabela 12: Q_{med} , $Q_{90\%}$ e $Q_{7,10}$ no ponto sobre o rio Doce.

Período base (1998 - 2014)		$Q_{média}$ (m ³ /s)	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)			
		874,8	356,7	245,8			
2015 - 2040							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	625,6	-28%	172,1	-52%	95,0	-61%
	Eta-CanESM2	472,0	-46%	156,8	-56%	93,5	-62%
	Eta-MIROC5	621,9	-29%	215,5	-40%	130,7	-47%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	320,7	-63%	70,1	-80%	19,6	-92%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	274,0	-69%	74,0	-79%	32,5	-87%
RCP 8.5	Eta-BESM	778,2	-11%	288,7	-19%	182,0	-26%
	Eta-CanESM2	456,7	-48%	152,8	-57%	87,0	-65%
	Eta-MIROC5	602,3	-31%	198,5	-44%	111,3	-55%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	205,3	-77%	55,7	-84%	30,4	-88%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	194,3	-78%	59,2	-83%	34,5	-86%
2041 - 2070							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	722,8	-17%	225,3	-37%	132,5	-46%
	Eta-CanESM2	434,8	-50%	107,9	-70%	50,8	-79%
	Eta-MIROC5	770,7	-12%	322,9	-9%	220,3	-10%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	442,4	-49%	79,9	-78%	29,9	-88%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	326,0	-63%	80,2	-78%	35,9	-85%
RCP 8.5	Eta-BESM	682,0	-22%	182,2	-49%	94,4	-62%
	Eta-CanESM2	340,4	-61%	48,6	-86%	11,8	-95%
	Eta-MIROC5	768,3	-12%	263,7	-26%	159,0	-35%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	315,2	-64%	90,7	-75%	39,2	-84%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	264,6	-70%	76,4	-79%	35,6	-86%
2071 - 2099							
Cenário	Modelo Climático	$Q_{média}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{90\%}$ (m ³ /s)	Variação	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	Variação
RCP 4.5	Eta-BESM	646,7	-26%	226,0	-37%	130,0	-47%
	Eta-CanESM2	441,9	-49%	99,7	-72%	24,8	-90%
	Eta-MIROC5	754,0	-14%	217,7	-39%	130,5	-47%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	493,4	-44%	81,2	-77%	33,8	-86%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	387,8	-56%	87,6	-75%	47,1	-81%
RCP 8.5	Eta-BESM	507,6	-42%	98,6	-72%	34,4	-86%
	Eta-CanESM2	109,7	-87%	18,1	-95%	4,6	-98%
	Eta-MIROC5	672,4	-23%	191,2	-46%	95,5	-61%
	Eta-HadGEM2-ES 20 km	203,8	-77%	50,1	-86%	25,8	-90%
	Eta-HadGEM2-ES 05 km	178,0	-80%	42,8	-88%	16,8	-93%