

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Melquizedek Rafael Duarte da Silva

**Padrões Climáticos Regionais De Precipitação E Temperatura No Clima
Futuro Na Bacia Hidrográfica Do Rio São Francisco**

Campina Grande, dezembro de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PADRÕES CLIMÁTICOS REGIONAIS DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA NO CLIMA FUTURO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

MELQUIZEDEK RAFAEL DUARTE DA SILVA

Campina Grande-PB

Dezembro de 2023

MELQUIZEDEK RAFAEL DUARTE DA SILVA

**PADRÕES CLIMÁTICOS REGIONAIS DE PRECIPITAÇÃO E
TEMPERATURA NO CLIMA FUTURO NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO SÃO FRANCISCO**

Dissertação de Mestrado, para o Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Subárea: Variabilidade de Mudanças Climáticas.

Orientadora: Profa. Sandra Isay Saad

Campina Grande - PB

Dezembro – 2023

S586p

Silva, Melquizedek Rafael Duarte da.

Padrões climáticos regionais de precipitação e temperatura no clima futuro na bacia hidrográfica do rio São Francisco / Melquizedek Rafael Duarte da Silva. – Campina Grande, 2024.

74 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Profa. Dra. Sandra Isay Saad.

Referências.

1. Meteorologia de Meso e Grande Escalas. 2. Variabilidade de Mudanças Climáticas. 3. Downscaling Estatístico. 4. Mudanças Climáticas. 5. Método BCCAQ. 6. CMIP6. I. Saad, Sandra Isay. II. Título.

CDU 551.515.6(043)

MELQUIZEDEK RAFAEL DUARTE DA SILVA

PADRÕES CLIMÁTICOS REGIONAIS DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA
NO CLIMA FUTURO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20/12/2023

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. SANDRA ISAY SAAD
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
 PABLO BORGES DE AMORIM
Data: 21/12/2023 09:37:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. PABLO BORGES DE AMORIM
Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit



Prof. Dr. FABRÍCIO DANIEL DOS SANTOS SILVA
Instituto de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Alagoas

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus sendo esse o maior apoio da minha vida em todos os momentos difíceis.

À minha família, que foi a minha base durante todos esses anos.

Agradecimento especial para a minha orientadora Prof.^a Dra. Sandra Isay Saad e ao Prof. Dr. Jonathan Mota pela paciência, incentivo e ensinamentos compartilhados, além da inspiração que é para seguir a carreira de Meteorologista.

A todos os professores da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande (UACA-UFCG), que foram fundamentais na construção do meu aprendizado e formação.

Aos meus colegas de curso e queridos amigos.

Agradeço a todos que torceram pelo meu sucesso e que estiveram ao meu lado durante toda essa jornada.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, regiões fisiográficas e hidrelétricas da região. Adaptado de Jong et al. (2018).	29
Figura 2. Fluxograma de execução do método de <i>downscaling</i> BCCAQ.....	31
Figura 3. Fluxograma de execução do método de <i>downscaling</i> BCCA.....	33
Figura 4. Fluxograma de execução do método de <i>downscaling</i> BCCI.	34
Figura 5. Climatologia das temperaturas máximas de janeiro (A-E) e julho (F-J) para o MIROC5 (A, B, D, E) e MIROC6 (F, G, H, I) versão original (A, D, F, I), regionalizado (B, E, G, J) e as observações (C e H) na região da BHSF no período de calibração (de 1961 a 2010).	37
Figura 6. Idem à Figura 5, mas para o período de validação de (2011 a 2020).	37
Figura 7. Climatologia das temperaturas mínima de janeiro (A-E) e julho (F-J) para o MIROC5 (A, B, D, E) e MIROC6 (F, G, H, I) versão original (A, D, F, I), regionalizado (B, E, G, J) e as observações (C e H) na região da BHSF no período de calibração (de 1961 a 2010).	38
Figura 8. Idem à Figura 7 mas para o período de validação de (2011 a 2020).	38
Figura 9. Climatologia das precipitações de janeiro (A-E) e julho (F-J) para o MIROC5 (A, B, D, E) e MIROC6 (F, G, H, I) versão original (A, D, F, I), regionalizado (B, E, G, J) e as observações (C e H) na região da BHSF no período de calibração (de 1961 a 2010).	39
Figura 10. Idem à Figura 9, mas para o período de validação de (2011 a 2020).	39
Figura 11. Série temporal e inclinação de temperatura máxima (A-B), mínima (C-D) e precipitação (E-F) para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco de 1961 a 2010 para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita) no período de calibração (1961-2010).	44
Figura 12. Série temporal e inclinação de temperatura máxima para as quatro sub-regiões da bacia: baixo São Francisco (BSF), submédio São Francisco (SMSF), médio São Francisco (MSF) e alto São Francisco (ASF) no período de calibração (1961 a 2010) para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita).	45
Figura 13. Série temporal e inclinação de temperatura mínima para as quatro sub-regiões da bacia: baixo São Francisco (BSF), submédio São Francisco (SMSF), médio São	

Francisco (MSF) e alto São Francisco (ASF) no período de calibração (1961 a 2010) para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita).	46
Figura 14. Série temporal e inclinação de precipitação para as quatro sub-regiões da bacia: baixo São Francisco (BSF), submédio São Francisco (SMSF), médio São Francisco (MSF) e alto São Francisco (ASF) no período de calibração (1961 a 2010) para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita).	47
Figura 15. Série temporal e inclinação de temperatura máxima (A-B), mínima (C-D) e precipitação (D-E) para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco de 1961 a 2010 para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita) no período de validação (2011-2019) para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita).	48
Figura 16. Série temporal e inclinação de temperatura máxima para as quatro sub-regiões da bacia: baixo São Francisco (BSF), submédio São Francisco (SMSF), médio São Francisco (MSF) e alto São Francisco (ASF) no período de validação (2011 a 2019) para MIROC5 (A) e MIROC6 (B).	49
Figura 17. Série temporal e inclinação de temperatura mínima para as quatro sub-regiões da bacia: baixo São Francisco (BSF), submédio São Francisco (SMSF), médio São Francisco (MSF) e alto São Francisco (ASF) no período de validação (2011 a 2019) para MIROC5 (A) e MIROC6 (B).	50
Figura 18. Série temporal e inclinação de precipitação para as quatro sub-regiões da bacia: baixo São Francisco (BSF), submédio São Francisco (SMSF), médio São Francisco (MSF) e alto São Francisco (ASF) no período de validação (2011 a 2019) para MIROC5 (A) e MIROC6 (B).	51
Figura 19. Climatologia das temperaturas máxima de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSF no futuro próximo (2021 – 2046) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).	53
Figura 20. Climatologia das temperaturas máxima de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSF no futuro intermediário (2047 – 2072) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).	54

Figura 21. Climatologia das temperaturas máxima de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSEF no futuro distante (2073 – 2099) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).	55
Figura 22. Climatologia das temperaturas mínima de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSEF no futuro próximo (2021 – 2046) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).	57
Figura 23. Climatologia das temperaturas mínima de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSEF no futuro intermediário (2047 – 2072) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).	58
Figura 24. Climatologia das temperaturas mínima de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSEF no futuro distante (2073 – 2099) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).	59
Figura 25. Climatologia das precipitações de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSEF no futuro próximo (2021 – 2046) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).	61
Figura 26. Climatologia das precipitações de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSEF no futuro intermediário (2047 – 2072) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).	62
Figura 27. Climatologia das precipitações de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha	

3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSF no futuro distante (2073 – 2099) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).....	63
Figura 28. Série temporal e inclinação de temperatura máxima, mínima e precipitação para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco de 2021 a 2099. Linhas verticais na cor laranja indicam o futuro próximo, intermediário e distante para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita).	65
Figura 29. Série temporal e inclinação de temperatura máxima para as quatro sub-regiões da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (Baixo, Submédio, Médio e Alto) de 2021 até 2099, considerando os modelos MIROC5 (coluna A) e MIROC6 (coluna B). Linhas verticais na cor laranja separam o futuro próximo, intermediário e distante.	66
Figura 30. Série temporal e inclinação de temperatura mínima para as quatro sub-regiões da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (Baixo, Submédio, Médio e Alto) de 2021 até 2099, considerando os modelos MIROC5 (coluna A) e MIROC6 (coluna B). Linhas verticais na cor laranja separam o futuro próximo, intermediário e distante.	67
Figura 31. Série temporal e inclinação de precipitação para as quatro sub-regiões da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (Baixo, Submédio, Médio e Alto) de 2021 até 2099, considerando os modelos MIROC5 (coluna A) e MIROC6 (coluna B). Linhas verticais na cor laranja separam o futuro próximo, intermediário e distante.	68

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Principais métodos utilizados para <i>downscaling</i> estatístico.	22
Tabela 2. Índices ME, RMSE, RSD, R ² e PBIAS da temperatura máxima calculados para a aplicação do método BCCAQ e MCG nos períodos de calibração (1961 – 2010) e de validação (2010 – 2020).	41
Tabela 3. Índices ME, RMSE, RSD, R ² e PBIAS da temperatura mínima calculados para a aplicação do método BCCAQ e MCG nos períodos de calibração (1961 – 2010) e de validação (2010 – 2020).	42
Tabela 4. Índices ME, RMSE, RSD, R ² e PBIAS da precipitação calculados para a aplicação do método BCCAQ e MCG nos períodos de calibração (1961 – 2010) e de validação (2010 – 2020).	43

LISTAS DE SÍMBOLOS

ANA: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.

ASF: Alto São Francisco.

BCCA: Análogos construídos com correção de viés (*bias-corrected constructed analogues*).

BCCAQ: Correção de viés construído análogos com reordenação de mapeamento de quantil (*bias correction constructed analogues with quantile mapping reordering*).

BCCI: Impressão climática corrigida por viés (*bias-corrected climate imprint*).

BCSD: Desagregação espacial corrigida por viés (*bias-corrected spatial disaggregation*).

BHSF: Bacia hidrográfica do rio São Francisco.

BSF: Baixo São Francisco.

CA: Análogos construídos (*constructed analogues*).

CDO: Operador de Dados Climáticos (*Climate Data Operator*)

CMIP5: Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado fase 5 (*Coupled Model Intercomparison Project phase 5*).

CMIP6: Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado fase 6 (*Coupled Model Intercomparison Project phase 6*).

ClimDEX – Índices Extremos Climáticos propostos pelo *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI) da Organização Meteorológica Mundial.

CI: Impressão climática (*climate imprint*).

DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica.

DBCCA: Análogos construídos com dupla correção de viés (*Double bias-corrected constructed analogues*).

DECK: *Diagnóstico, Avaliação e Caracterização do Clima* (*Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima*).

ESGF: Federação de Grade do Sistema Terrestre (*Earth System Grid Federation*).

GCM: Modelo de circulação global (*Global circulation model*).

GEE: Gases de efeito estufa.

GRADS: Sistema de Análise e Exibição de Grade (*Grid Analysis and Display System*)

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia.

IPCC: Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*).

MC: Modelos climáticos.

ME: Erro médio porcentagem de viés.

MSF: Médio São Francisco.

PBIAS: Porcentagem de viés.

R²: Coeficiente de determinação.

RCP: Trajetórias de Concentração Representativas (*Representative Concentration Pathways*).

RMSE: Raiz do erro quadrático médio.

SICs: Concentração de gelo marinho (*sea ice concentration*).

SMSF: Submédio São Francisco.

SSP: Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (*Shared Socioeconomic Pathways*).

SSTs: Temperatura da superfície do mar (*sea surface temperature*).

SF: Sistema frontal.

TSM: Temperatura da superfície do mar.

ZCAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul.

ZCIT: Zona de convergência intertropical.

RESUMO

Estudos de mudança climática principalmente na escala de bacias hidrográficas necessitam de melhores resoluções espaciais do que a dos Modelos de Circulação Geral (MCG). Uma maneira de reduzir essa limitação é por meio de *downscaling*, que se refere às técnicas de redução de escala ou regionalização. Essa regionalização, baseada em abordagens físicas ou estatísticas, é aplicada nas variáveis de saída dos MCGs, de modo que estas tenham um melhor sinal do clima na escala espacial de interesse. O objetivo desta pesquisa foi avaliar as mudanças nos padrões climáticos a partir de regionalização estatística aplicada ao MCG *Model for Interdisciplinary Research on Climate* (MIROC), nas versões 5 e 6, na Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF). Essa bacia é essencial para o abastecimento de água das regiões rurais e urbanas do Nordeste brasileiro, especialmente em sua região semiárida. Para realizar a avaliação regional das mudanças climáticas, foi aplicado o método de redução estatística BCCAQ (*Bias Correction Constructed Analogs with Quantile Mapping Reordering*) nas variáveis diárias de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima do MIROC5 e MIROC6. As regionalizações para o clima histórico foram comparadas com as saídas originais do MIROC por meio de medidas de erro médio (ME), erro médio quadrado (RMSE), razão dos desvios padrões (rSD), coeficiente de determinação (R^2) e o viés percentual em relação à média das observações (PBIAS), além da distribuição espacial e séries temporais. Os resultados indicam que a regionalização reduz o viés sistemático para as temperaturas máximas e mínimas, com pequenas correções nos valores máximos e mínimos tanto no período de calibração quanto no de validação. Em relação à precipitação, o BCCAQ corrigiu satisfatoriamente o ciclo anual da precipitação, mas superestimou na região de cabeceira do rio, o Alto São Francisco (ASF). As medidas da regionalização mostraram ME, RMSE, rSD e PIBIAS absolutamente menores em todas as sub-regiões da bacia. No estudo para os cenários futuros, as temperaturas máximas e mínimas aumentam em toda a bacia e sub-regiões, principalmente nos cenários de SSP5-8.5 e RCP 8.5, e uma leve diminuição nas precipitações nas regiões do ASF e médio MSF.

Palavras-chave: *Downscaling* estatístico, mudanças climáticas, método BCCAQ, CMIP6

ABSTRACT

Studies on climate change, especially at the watershed scale, require better spatial resolutions than those of Global Circulation Models (GCMs). One way to address this limitation is through downscaling, which refers to techniques for scaling down or regionalizing. This regionalization, based on physical or statistical approaches, is applied to the output variables of GCMs so that they provide a better signal of climate at the spatial scale of interest. The objective of this research was to evaluate changes in climate patterns through statistical regionalization applied to the Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC), versions 5 and 6, in the São Francisco Watershed (SFW). This watershed is essential for supplying water to rural and urban areas in the Brazilian Northeast, especially in its semiarid region. To assess regional climate changes, the Bias Correction Constructed Analogs with Quantile Mapping Reordering (BCCAQ) statistical reduction method was applied to the daily precipitation, maximum temperature, and minimum temperature variables of MIROC5 and MIROC6. Regionalizations for historical climate were compared with original MIROC outputs using measures of mean error (ME), root mean square error (RMSE), standard deviation ratio (rSD), coefficient of determination (R^2), and percentage bias relative to the mean of observations (PBIAS), as well as spatial distribution and time series. The results indicate that regionalization reduces systematic bias for maximum and minimum temperatures, with small corrections to both maximum and minimum values in both calibration and validation periods. Regarding precipitation, BCCAQ satisfactorily corrected the annual precipitation cycle but overestimated in the headwaters region of the river, the Upper São Francisco (USF). Regionalization measures showed absolutely lower ME, RMSE, rSD, and PBIAS in all sub-regions of the basin. In the study for future scenarios, maximum and minimum temperatures increase throughout the basin and sub-regions, mainly in SSP5-8.5 and RCP 8.5 scenarios, with a slight decrease in precipitation in the USF and Middle SFW regions.

Keywords: Statistical Downscaling, climate change, emission scenarios.

Sumário

1	Introdução.....	17
1.1	Objetivo	19
2	Revisão de Literatura	20
2.1	CMIP	20
2.2	<i>Downscaling</i> estatístico	22
3	Metodologia	28
3.1	Região de Estudo	28
3.2	Fontes de dados	29
3.2.1	Modelos de Circulação Geral	29
3.2.2	Observação em Grade.....	30
3.3	Método de <i>Downscaling</i> : BCCAQ.....	30
3.3.1	Método BCCA.....	32
3.3.2	Método BCCI	33
3.4	Período de Calibração e validação.....	34
3.5	Avaliação do Modelo BCCAQ.....	34
4	Resultados	36
4.1	Validação para o período histórico.....	36
4.2	Análise das projeções futuras	51
5	Conclusão	69
6	Referências bibliográficas	70

1 Introdução

A mudança climática tem gerado uma crescente preocupação devido aos impactos e desastres associados à sociedade como um todo, que afetam tanto a economia quanto a segurança ambiental, além do potencial de geração de energia (NIU et al., 2023; IPCC 2021). Na busca por avaliar esses impactos climáticos, os Modelos de Circulação Geral (MCG) surgem como ferramentas cruciais que fornecem informações para compreender as possíveis mudanças climáticas em diversas regiões do mundo (IPCC, 2021). Entretanto, os MCGs enfrentam desafios quando se trata de simular o clima em pequena escala ou em bacias hidrográficas. Isso ocorre devido à baixa resolução de tais modelos (YANG et al., 2019) que são em média de aproximadamente $1,5^\circ \times 1,0^\circ$, na versão mais recente utilizada para os relatórios do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) (ALMAZROUI et al., 2020; SIAN et al., 2021), ou em áreas de topografia complexa ou de predominância de chuvas convectivas, onde as condições climáticas locais podem dificultar a simulação satisfatória (CALVIN et al., 2023; HEWITSON, 2018; HEWITSON et al., 2014; MARAUN D, 2018; VANO et al., 2018). Além disso, os MCGs utilizados nos relatórios do IPCC, apresentam resolução insuficiente para a realização de estudos de cenários futuros em pequenas regiões (HEWITSON et al., 2014; VANO et al., 2018).

Nas últimas décadas, diversas técnicas de pós-processamento foram desenvolvidas para o refinamento de escala, que combinam dados observados de estações com modelos estatísticos ou utilizam modelos climáticos regionais que aumentam dinamicamente a resolução dos MCGs (SALATHE JR; MOTE; WILEY, 2007). SALATHE et al. (2007) e RANASINGHE, (2023) indicam que os métodos estatísticos são mais viáveis do ponto de vista computacional quando comparados aos métodos dinâmicos principalmente porque permite-se gerar simulações a partir de um conjunto *Multi-model ensemble* (MARAUN et al., 2010; WILBY et al., 2009), e podem apresentar resultados melhores do que os dinâmicos (YANG et al., 2019). Vários autores testaram métodos de redução de escala e análise climática de dados observados e concluíram que esses métodos tornam as saídas dos MCGs mais próximas das reanálises ou dados observados (SOBIE; MURDOCK, 2017, WERNER; CANNON, 2016).

Entre os diversos métodos para melhorar a resolução espacial dos modelos, um método recente tem apresentado bons resultados em relação aos seus antecessores, chamado de *bias correction constructed analogues with quantile mapping reordering*

(BCCAQ) (SOBIE; MURDOCK, 2017a; WERNER; CANNON, 2016; YANG et al., 2019). O método combina as saídas de dois métodos estatísticos (BCCA e BCCI) e tem demonstrado grande habilidade em representar extremos climáticos de temperatura e precipitação e suas correlações espaciais devido à correção de erros sistemáticos que são recorrentes em outros métodos estatísticos e têm sido aplicados satisfatoriamente para bacias hidrográficas (SOBIE; MURDOCK, 2017a; WERNER; CANNON, 2016).

A Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF) representa um dos sistemas hídricos mais importantes do Brasil (LIMA; ALVES, 2009), principalmente para a Região Nordeste e os estados que fazem parte da BHSF, direta ou indiretamente por meio de transposições (PALENZUELA, 2022; DE SOUZA NETO et al., 2023). Além disso, a bacia desempenha um papel significativo na economia, na geração de energia e na navegação. A BHSF comporta cinco hidroelétricas além de contar com produção de energia eólica e solar que também auxiliam na produção de energia nos períodos de estiagem, 1670 km para navegação e aproximadamente 600 hectares disponíveis para pesca. A BHSF abrange sete estados brasileiros no total e está principalmente localizada na região semiárida do Brasil (CABRAL et al., 2013), uma das áreas mais vulneráveis a secas severas e enchentes (DE SOUZA NETO et al., 2023). Estudos tem mostrado a drástica redução da vazão na BHSF nos últimos anos. Por exemplo, De Jong et al. 2018 mostraram que de 2013 a 2017, a precipitação não foi suficiente para que o volume dos reservatórios chegasse a 50% da capacidade total. Em novembro de 2015 e novembro de 2017, o volume da água chegou a 5% de sua capacidade total, o menor nível desde 1994 (ONS, 2018). Para as próximas décadas, estima-se que a redução da produção hidrelétrica pode ser o dobro do declínio previsto na precipitação no Nordeste devido ao declínio já observado na vazão ao longo da BHSF (Jong et al., 2018). Plataformas como *Climate Change Knowledge Portal* fornecem informações e recursos sobre mudanças climáticas na BHSF e assim como a plataforma *IPCC WGI Interactive Atlas* que traz informações com dados regionalizados (BORGES DE AMORIM; CHAFFE, 2019; BRÊDA et al., 2020; MIRANDA et al., 2023), desta forma, a análise das projeções climáticas em alta resolução na BHSF é fundamental para um planejamento estratégico, considerando o padrão de precipitação, sua localização e extensão.

Nesse contexto, devido às atuais limitações de resolução dos MCGs, não é apropriado empregar esses modelos para retratar as características climáticas em pequena escala ou para bacias hidrográficas. Por outro lado, ao adotar métodos de redução de

escala estatística para aprimorar a resolução dos modelos, é possível alcançar uma representação mais satisfatória das condições climáticas atuais e dos cenários de emissões.

1.1 Objetivo

O objetivo desta pesquisa foi avaliar as mudanças nos padrões climáticos a partir de um método de regionalização estatística aplicado ao MCG *Model for Interdisciplinary Research on Climate* (MIROC), nas versões 5 e 6, na Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF). Os objetivos específicos foram:

Objetivos específicos:

- Regionalizar as projeções climáticas do MIROC para regiões fisiográficas da BHSF a partir de uma metodologia estatística, o BCCAQ, aplicada a temperatura mínima e máxima e a precipitação diária, calibrando e validando tais regionalizações;
- Avaliar os padrões climáticos regionalizados do MIROC para a temperatura e precipitação no clima recente na BHSF;
- Avaliar as mudanças climáticas em um futuro próximo (2021-2046), futuro intermediário (2047 – 2072) e distante (2073-2099) na BHSF para os cenários futuros de emissão RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5 (MIROC5) e SSP2-4.5, SSP4-6.0 e SSP5-8.5 (MIROC6).

2 Revisão de Literatura

2.1 CMIP

O projeto CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*) foi iniciado em 1995, com a criação de um grupo de trabalho com o objetivo de entender as mudanças climáticas desde o passado até o futuro, utilizando vários modelos criados por diversos centros de previsão espalhados pelo mundo, e disponibilizá-los de forma pública para a comunidade científica (WCRP, 2022). Ao longo dos anos, foram desenvolvidas novas versões e etapas do CMIP para melhorar a precisão das projeções anteriores de adaptação climática e alterações climáticas (WCRP, 2014). Um exemplo é o CMIP3, desenvolvido entre 2004 e 2009, onde o modelo foi executado para alguns cenários de emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo os principais o A1B, A2 e B1. No contexto destes cenários, A1B indica um cenário de equilíbrio de emissões, A2 de emissões elevadas e B1 de redução nas emissões (MEEHL et al., 2007).

Com o intuito de alinhar a numeração do CMIP aos relatórios de avaliações (AR) do IPCC (EMORI et al., 2016), não ocorreu o CMIP4 e em 2010, teve início a fase 5 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados, agora identificada como CMIP5. Essa fase trouxe melhorias significativas em relação ao CMIP3, especialmente nas resoluções espaciais, na inclusão de novos cenários de emissões e na aprimorada representação dos processos físicos, como caracterização de nuvens e aerossóis.

Além disso, houve mudanças na abordagem dos cenários na versão 5, denominados RCP (Representative Concentration Pathways), que foram divididos em quatro: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5. Esses cenários variam desde o mais otimista, com redução nas emissões de GEE (RCP 2.6), até o mais desafiador, indicando altas emissões contínuas (RCP 8.5) (EMORI et al., 2016).

Atualmente, o CMIP encontra-se em sua sexta fase (CMIP6), que teve início em meados de 2014 com a participação de centros de modelagem e da comunidade que utiliza as saídas dos modelos globais em suas pesquisas. Essas reuniões tiveram como objetivo discutir os acertos e falhas da fase anterior (CMIP5) e tentar incorporar as melhorias propostas no CMIP6 (FERNANDA, 2021). Alguns pontos discutidos foram a documentação dos modelos, os calendários (considerando anos bissextos ou não) e a resolução espacial. Na fase 6, houve progresso significativo na documentação e padronização dos calendários (EYRING et al., 2016).

Em relação às simulações de controle, o CMIP6 introduz um novo conceito para avaliar os modelos atmosféricos, chamado de DECK (*Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima*), que utiliza quatro experimentos atmosféricos para fazer uma análise de controle. Esses diagnósticos incluem: (i) abrupt-4x CO₂ e 1pctCO₂, que caracterizam a sensibilidade climática, feedbacks e fornecem uma resposta rápida às concentrações de CO₂ na atmosfera; (ii) as simulações AMIP com as componentes de SSTs (*sea surface temperature*) e SICs (*sea ice concentration*), que serão atualizadas continuamente à medida que os dados forem observados; e (iii) as simulações de controle piControl ou esm-piControl, que representam o período pré-industrial (WCRP, 2014). Além do DECK, foram gerados dados históricos semelhantes aos do CMIP5, com o objetivo de avaliar a capacidade dos modelos de simular o clima. Esses dados são conhecidos como CMIP6 historical ou esm-hist (Earth System Models) (EYRING et al., 2016).

Diferentemente do CMIP5, o CMIP6 leva em consideração níveis de aquecimento com base em projeções multi-modelos, utilizando cenários de RCPs alternativos chamados de SSPs (Shared Socioeconomic Pathways). Os SSPs não consideram apenas o aumento dos níveis de concentração de gases de efeito estufa, como os RCPs, mas também fatores socioeconômicos da população, como crescimento econômico, desigualdade e desenvolvimento tecnológico, entre outros. Os SSPs fornecem uma análise futura em cinco cenários, nos quais não há interferência de políticas climáticas. Esses cenários são divididos em: cenário de sustentabilidade (SSP1), cenário com a manutenção de padrões históricos (SSP2), cenário de rivalidade entre nações (SSP3), cenário de desigualdade crescente (SSP4) e cenário de crescimento global gerado pelo intenso uso de combustíveis fósseis (SSP5) (O'NEILL et al., 2016). Alguns desses cenários possuem subdivisões que são SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-3.4, SSP4-6.0, SSP5-3.4OS e SSP5-8.5 (CHEN; LIU; CHENG, 2020; GEBRECHORKOS et al., 2023; MELNIKOVA et al., 2021; PENG et al., 2023; TEBALDI et al., 2021) totalizando oito cenários de emissões sendo o SSP1-1.9, SSP5-3.4OS e SSP3-7.0 feitas para preencher lacunas que existiam na versão anterior (TEBALDI et al., 2021). Essa divisão dos cenários também oferece uma visão das possíveis dificuldades que a sociedade enfrentará para mitigar os efeitos das mudanças climáticas no futuro, sendo os cenários SSP1 e SSP2 aqueles com desafios menores em

comparação aos cenários SSP3 e SSP5, que dependem fortemente do uso de combustíveis fósseis (EYRING et al., 2016).

2.2 *Downscaling* estatístico

O *downscaling* estatístico é uma abordagem utilizada para produzir saídas de alta resolução, estabelecendo uma relação entre o clima de duas resoluções espaciais. Geralmente, é empregado para prever ou representar uma variável em um local específico (MAURER; HIDALGO, 2008; GEBRECHORKOS et al., 2023).

Por outro lado, o *downscaling* dinâmico é uma abordagem alternativa que realiza o refinamento da escala por meio de simulações de processos físicos em pequena escala. Essa abordagem gera modelos fisicamente plausíveis usando modelos climáticos regionais de alta resolução em uma área menor (BROWN et al., 2008; HAMLET; SALATHÉ; CARRASCO, 2010). Ao contrário do *downscaling* estatístico, o *downscaling* dinâmico requer um custo computacional elevado, o que pode limitar a realização de estudos abrangendo vários anos ou décadas, assim como diferentes cenários (MAURER; HIDALGO, 2008). Geralmente, é necessário aplicar pós-processamento estatístico para corrigir vieses nos resultados obtidos com o *downscaling* dinâmico (HIDALGO; DETTINGER; CAYAN, 2008).

Os trabalhos detalhados a seguir testaram métodos de *downscaling* estatístico, resumidos na tabela 1 abaixo:

Tabela 1. Principais métodos utilizados para *downscaling* estatístico.

Método	Explicação	Referências
CA (<i>constructed analogues</i>)	Utiliza regressão linear para criar campos históricos análogos ao tempo atual e repete o mesmo padrão para um tempo futuro equivalente ao encontrado e corrigindo por anomalias	HIDALGO; DETTINGER; CAYAN, (2008); SANTOS SILVA et al., (2020);
CI (<i>climate imprint</i>)	Usa a média de 30 anos de dados observados para produzir uma amostra do clima. Essa amostra é usada na interpolação dos dados diários pelo	COSTA et al., (2020); DE OLIVEIRA et al., (2020); DOS

	método de <i>ordinary kriging</i> e combinada com um dia aleatório que tenha características próximas do modelo.	SANTOS SILVA et al., (2020); HUNTER; MEENTEMEYER, (2005); SILVEIRA et al., (2016)
BCSD (<i>bias-corrected spatial disaggregation</i>)	Técnica de redução estatística empírica que usa mapeamento baseado no quantílico das funções de densidade de probabilidade para os dados observados. Também é aplicado para as projeções dos GCMs para obter valores diários são selecionados meses históricos aleatoriamente e cada dia dentro desse mês é redimensionado igualmente.	MAURER; HIDALGO, (2008); SHRESTHA et al., (2014)
BCCA (<i>bias-corrected constructed analogues</i>)	Técnica que corrige o mapeamento quantílico para correção de viés com o método de construção de análogos (CA).	MAURER; HIDALGO, (2008); WERNER; CANNON, (2016)
BCCI (<i>bias-corrected climate imprint</i>)	O BCCI envolve a interpolação de dados de simulação de resolução baixa para resolução alta e, em seguida, realiza a correção das projeções do viés por mapeamento quantílico.	HUNTER; MEENTEMEYER, (2005); WERNER; CANNON, (2016)
BCCAQ (<i>bias correction constructed analogues with quantile mapping reordering</i>)	Método híbrido que corrige as saídas de BCCA com o método de BCCI, reordenando as saídas diárias de BCCI de acordo com as classificações de BCCA.	SOBIE; MURDOCK, (2017a); WERNER; CANNON, (2016); YANG et al., (2019).

Shrestha et al. (2014) analisaram as prováveis mudanças no hidroclima na bacia do Rio da Paz, no Canadá, utilizando MCGs com *downscaling* estatístico BCSD (*bias-corrected spatial disaggregation*) e *downscaling* dinâmico utilizando o modelo regional climático canadense (CRCM). Essas análises foram comparadas com dois modelos hidrológicos presentes no CRCM.

Com o objetivo de identificar melhorias em um conjunto de multimodelos, os autores realizaram uma análise comparativa entre dois conjuntos simples, um utilizando apenas um MCG com o método de *downscaling* estatístico e o outro com *downscaling* dinâmico. Os métodos estatísticos utilizados foram: GCM-BCSD-VIC-Single (GBVS) para um único MCG e GCM-BCSD-VIC-Multiple (GBVM) para um conjunto de oito MCGs do CMIP3 (CCSM3, CGCM3, CSIRO Mk3.0, ECHAM5, GFDL CM2.1, HadCM3, HadGEM1, MIROC3.2). Os resultados demonstraram que o GBVS foi mais consistente com os dados observados em comparação ao método dinâmico, principalmente para precipitação e temperatura. No método dinâmico, foram observados vieses de precipitação seca e temperaturas mais baixas tanto para o passado quanto para o futuro, o que também influenciou o escoamento. Devido ao viés do método dinâmico em relação à baixa precipitação e baixa temperatura, os resultados de água equivalente na forma de neve foram maiores, enquanto a evapotranspiração foi menor em comparação ao GBVS. Em relação ao escoamento, os autores identificaram que o método dinâmico mostrou poucas mudanças no inverno, aumento entre abril e maio, e diminuição em junho, em comparação com o GBVS. Essa alteração pode estar associada aos resultados de SWE, que são influenciados por temperatura e precipitação. Os autores concluem que, na análise simples com apenas um MCG, os resultados do GBVS podem ser considerados aceitáveis, pois caracterizam melhor os resultados observados de temperatura e precipitação, que têm influência direta sobre a água equivalente na forma de neve, evapotranspiração e escoamento.

Comparando os resultados do método dinâmico múltiplo, os autores afirmam que as variações são consistentes e significativas para todas as variáveis, com exceção de SWE. Além disso, eles observaram que as variações nas medianas das cinco rodadas do CRCM estão dentro da faixa interquartil do conjunto (ensemble), indicando que a variabilidade interna não é uma fonte significativa de incerteza para a região de estudo.

Werner e Cannon (2016) compararam diversas reanálises para a bacia do Rio da Paz, no Canadá, com dois conjuntos de dados observados. Eles testaram sete métodos de

downscaling estatístico o BCSD, que utiliza correção de viés por mapeamento quantílico mensal, considerando a média das temperaturas. Também foi utilizado uma variação do BCSD, chamada BCSDX, que utiliza os valores máximo e mínimo de temperatura. Outros dois métodos de *downscaling* estatístico baseados em mapeamento quantílico analógico (BCCA e DBCCA), diferindo do BCSD por realizarem a correção de viés diariamente. BCCA que compara os dados de 30 dias de baixa resolução e aqueles que apresentam maior semelhança com os resultados de alta resolução são selecionados com maior peso. O DBCCA, onde a correção é aplicada nos resultados de escala fina do BCCA para corrigir chuviscos e outros vieses causados pelo BCCA. Os métodos CI e BCCI utilizam a interpolação climática, que consiste em calcular a média de 30 anos de dados de alta resolução para criar um padrão espacial que representa os gradientes ambientais e o método utilizado foi o BCCAQ, que combina os métodos BCCA e BCCI, sendo uma versão pós-processada do BCCA com correção de viés realizada pelo BCCI. Com período de calibração dos métodos estatísticos foi de 1991 a 2005, exceto para ERA40, que abrangeu o período de 1991 a 2001

Os resultados das reanálises processadas pelos métodos de *downscaling* demonstraram que os resultados usando o ERA40 foram superiores às demais reanálises. Esse resultado também sugere que os métodos de *downscaling* terão um bom desempenho quando aplicados a reanálises com tendências semelhantes às do ERA40. Assim, mesmo modelos climáticos globais que possuam viés maiores do que as reanálises podem fornecer resultados consistentes se suas magnitudes e tendências forem semelhantes às do ERA40.

Entre os sete métodos avaliados, o BCCAQ apresentou o melhor desempenho geral, além de ter a melhor correlação de Pearson e o segundo melhor desempenho no teste KS. Utilizando as saídas do ClimDEX, o BCCAQ obteve o terceiro melhor desempenho, ficando atrás apenas do BCCA e BCCI, que são componentes do BCCAQ. O BCCAQ também foi o único método que passou nos dois testes estatísticos em todas as sub-bacias ao fazer o *downscaling* do ERA40 e ERAInt, tanto em comparação com VIC quanto com ANUSPLIN. Além disso, foi superior ao BCCA utilizado por outros autores, que utilizaram o NCEP1 para a mesma região e superou o método BCCI, evitando superestimar eventos extremos, como observado por autores anteriores.

Sobie e Murdock (2017) também realizaram testes para avaliar a eficácia de dois métodos de *downscaling* em simulações diárias do clima, com resoluções de 10 km e 800

m, utilizando dados de climatologia PRISM para o sudoeste do Canadá ao longo de um período de 30 anos e dados de estações meteorológicas. Eles utilizaram dados diários de precipitação e temperatura com resolução de $2,58^\circ$ das reanálises do NCEP para aumentar a resolução para 10 km, utilizando o método BCCAQ e aplicaram o método da impressão climática (CI) presente no método BCCI para aumentar a resolução para 800 m a partir dos resultados do *downscaling* de 10 km.

Ao analisar a diferença entre os valores médios das temperaturas e precipitações dos dados de 10 km e 800 m, para mostrar a variabilidade sazonal dos vieses, Sobie e Murdock, (2017) observaram que, para a temperatura máxima, os resultados são semelhantes para quase todos os meses, exceto no verão e início da primavera, em que há um viés negativo. Para a temperatura mínima, o viés é mais frio na maioria dos meses, e a precipitação se mantém relativamente constante.

Na análise quartil-quartil dos valores diários de 10 km e 800 m, os autores observaram que não houve diferenças substanciais entre os conjuntos de dados, havendo pouca alteração para algumas estações. Na análise do erro normalizado e do RMSE normalizado, os dados de 10 km e 800 m mostraram viés semelhante, com subestimação da precipitação e viés frio. Os autores também identificaram que, quando a diferença entre os resultados de 10 km e 800 m era negativa, os dados de 800 m concordavam com os dados observados das estações, enquanto quando era positiva, os dados de 10 km concordavam com as estações. No geral, houve uma melhoria nos dados de 800 m em comparação com os de 10 km. Eles também demonstraram que as diferenças entre os dados de 800 m e 10 km são pequenas para estações com pouca elevação, e para estações com elevação mais alta, os resultados de 800 m são promissores.

Yang et al. (2019) avaliaram quatro métodos de *downscaling* estatístico (BCSD, BCCI, BCCAQ e CDF-t) utilizando dados históricos de precipitação e temperatura superficial de sete MCGs (CCSM4, CESM1, CMCC, CNRM, EC-EARTH, MIROC5 e MRI) do CMIP5, no período de 1961 a 2005, para a China. Os resultados foram avaliados por meio da redução do erro quadrado médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE) e coeficiente de correlação (CORR) em cada célula da grade. Além disso, foram consideradas seis sub-regiões para análise, utilizando o diagrama de Taylor para avaliação sazonal e nove índices do pacote ClimDEX.

Yang et al. (2019) mostraram que, em escala mensal, o RMSE e o MAE na precipitação são menores para os métodos BCSD, BCCI e BCCAQ. Os ciclos sazonais

também foram melhor representados pelos métodos BCSD, BCCI e BCCAQ em toda a China, enquanto o método CDF-t subestimou esses ciclos. Da mesma forma, na análise da distribuição espacial, os métodos BCSD, BCCI e BCCAQ apresentaram resultados próximos às observações, com RMSE menor e correlação acima de 0.95. Na avaliação diária, utilizando o método quantil-quantil, o método BCSD superou todos os outros métodos, apresentando uma boa correlação com os dados observados. Na avaliação dos extremos de precipitação, todos os métodos mostraram um padrão espacial próximo às observações em toda a China.

No caso das temperaturas, todos os métodos apresentaram bom desempenho na representação da variabilidade sazonal e mensal da temperatura média, produzindo resultados semelhantes. Na análise diária, todos os métodos corrigiram os vieses de temperatura em toda a China. Esse efeito também ocorreu para os extremos de temperatura, com um desempenho ligeiramente melhor para os métodos BCCI, BCCAQ e CDF-t.

Todos os autores destacados indicaram que os métodos de *downscaling* foram superiores às saídas dos MCGs originais para diversas regiões do globo.

3 Metodologia

3.1 Região de Estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do rio São Francisco (BHSF) (Figura 1), que é subdividida em quatro regiões fisiográficas: Baixo, Submédio, Médio e Alto São Francisco. Sua extensão total é de 2.863 quilômetros, abrangendo uma área de drenagem de 639.219 quilômetros quadrados, com nascente na Serra da Canastra, em Minas Gerais (Alto São Francisco) que deságua entre os estados de Alagoas e Sergipe (Baixo São Francisco) abrigando uma população superior a 15 milhões de habitantes (CBHSF, 2023, SILVA et al., 2014). Dentre as quatro regiões da BHSF, a mais povoada e mais importante do ponto de vista de produção de escoamento superficial é a Região do Alto São Francisco (ASF), devido ao maior volume de precipitação pluvial em comparação com as outras regiões da bacia (CBHSF, 2023; PALENZUELA, 2022). A BHSF comporta cinco hidroelétricas (SILVEIRA et al., 2016) além de contar com produção de energia eólica e solar que também auxiliam na produção de energia nos períodos de estiagem, 1670 km para navegação e aproximadamente 600 hectares disponíveis para pesca.

Os sistemas meteorológicos que provocam chuvas nas regiões da BHSF são, principalmente, a zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que atuam principalmente no verão austral entre dezembro e março, sistemas frontais e vórtice ciclônico de altos níveis VCAN que atuam nos meses de dezembro e janeiro. Além disso a temperatura da superfície do mar (TSM) dos oceanos Atlântico e Pacífico modulam a intensidade de atuação desses sistemas (SOUZA NETO et al., 2023; FREITAS, 2022; PALENZUELA, 2022; DA SILVA; IVALDO; BRITO, 2009)

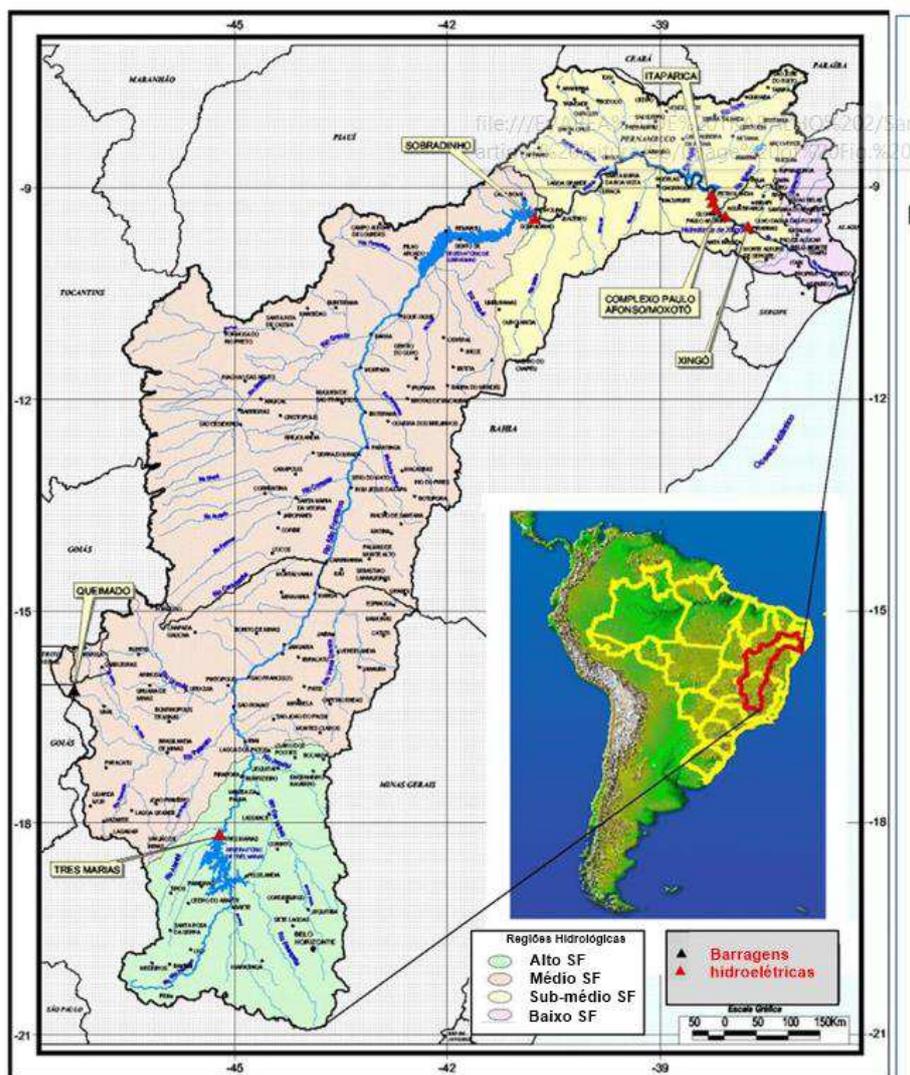


Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, regiões fisiográficas e hidrelétricas da região. Adaptado de Jong et al. (2018).

3.2 Fontes de dados

3.2.1 Modelos de Circulação Geral

Foram utilizadas as saídas diárias de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação do MIROC5 e MIROC6 do CMIP5 e CMIP6, ambos criados pelo instituto de pesquisa atmosférica e oceânica da universidade de Tóquio com resolução de $2,8^{\circ} \times 2,8^{\circ}$ do MIROC5 e $1,4^{\circ} \times 1,4^{\circ}$ do MIROC6 (SIAN et al., 2021; TATEBE et al., 2019), respectivamente disponíveis na base de dados do *Earth System Grid Federation* (ESGF), que obtiveram bom desempenho em demonstrar o clima na América do Sul (AS) de acordo com estudos anteriores que avaliaram o desempenho dos MCGs (por exemplo, FERREIRA et al. 2023, e SILVA et al. 2023). O período histórico considerado foi 1961-

2020 para verificar o desempenho dos modelos em comparação com os dados observados, sendo um período maior com relação aos estudos citados na seção anterior devida a baixa densidade de estações nos anos iniciais dos dados observado, e o período para avaliar as projeções bem como os cenários de emissões de gases de efeito estufa (2022-2099) para avaliar as variações das temperaturas e da precipitação na área de estudo nos cenários de emissões moderadas até o fim do século (RCP/SSP2-4.5), altas emissões (RCP/SSP5-8.5) e um cenário intermediário (RCP/SSP4-6.0) que são cenários comuns no CMIP5 e CMIP6 (IPCC, 2021; (CALVIN et al., 2023).

3.2.2 Observação em Grade

Para que as regionalizações sejam bem-sucedidas e possam representar de forma mais precisa o clima futuro, é necessário contar com uma sólida base de dados observados de alta resolução. Dados observados de alta resolução estão disponíveis para o Brasil, e alguns desses dados abrangem um ou mais períodos climatológicos, como os gerados por Xavier et al. (2016) e Xavier et al. (2022), que utilizam dados observados de estações meteorológicas e a técnica de interpolação dos dados de precipitação.

Os primeiros dados gerados por Xavier et al., 2016 utilizavam a técnica de interpolação para aumentar a resolução horizontal dos dados meteorológicos de temperatura, precipitação, evapotranspiração, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento para $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ de 1980 a 2013 usando dados de estação meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) para o preenchimento de falhas. Uma nova versão dos dados foi gerada, considerando agora, a altitude das estações meteorológicas, tornando as estimativas de temperatura mais exatas acrescentando lapse-rate de $-0,006^\circ$ a cada metro, e aumentando o período de 1961 a 2020, sem alterações estatísticas para as demais variáveis (XAVIER et al., 2022). Diversos estudos têm verificado e utilizado esses dados no Brasil como ALVES et al. (2022); MOREIRA JÚNIOR; COMUNELLO; FIETZ (2020); VEBER et al. (2019). Neste estudo os dados observados foram considerados como confiáveis sem controle de qualidade adicional.

3.3 Método de *Downscaling*: BCCAQ

O método escolhido para a realização do downscaling foi o BCCAQ, o qual ainda não foi aplicado na região da BHSF. Esse método tem o potencial de agregar valor à

construção de cenários de mudança climática, especialmente devido ao tipo de precipitação predominante na maior parte da bacia, que é convectiva e cujo método BCCAQ tem bons resultados. Essa situação muitas vezes diminui a eficácia dos Modelos Climáticos Globais (MCG) originais. Esse método utiliza o método de mapeamento quantílico (BCCA), método que faz a correção realizando combinações lineares buscando as melhores respostas dos dados históricos com o observado, e é corrigido pelo método BCCI, que emprega o método da impressão climática (CI) para corrigir estatisticamente os erros usando observações climáticas anuais ou mensais (HIEBERT et al., 2018; SOBIE; MURDOCK, 2017)). Por ser um método híbrido, o BCCAQ retém o melhor de cada método e produz resultados mais precisos, principalmente corrigindo os baixos níveis de precipitação (garoa) e subestimação de grandes precipitações bem como o paradoxo de Ruth onde o modelo representa de maneira satisfatória o período histórico mas não simula o clima futuro da mesma maneira, e as representações excessivamente suaves das variáveis quando um modelo não é capaz de representar os dados observados, como visto por FAUZI; KUSWANTO; ATOK, (2020); SOBIE; MURDOCK (2017); WERNER; CANNON, (2016); YANG et al., (2019). O primeiro passo para realizar a metodologia BCCAQ é executar as metodologias BCCA e BCCI de forma independente e separada. Depois disso, as medições do BCCI são programadas de acordo com a metodologia BCCA para cada mês (Figura 2. Fluxograma de execução do método de *downscaling* BCCAQ.Figura 2).

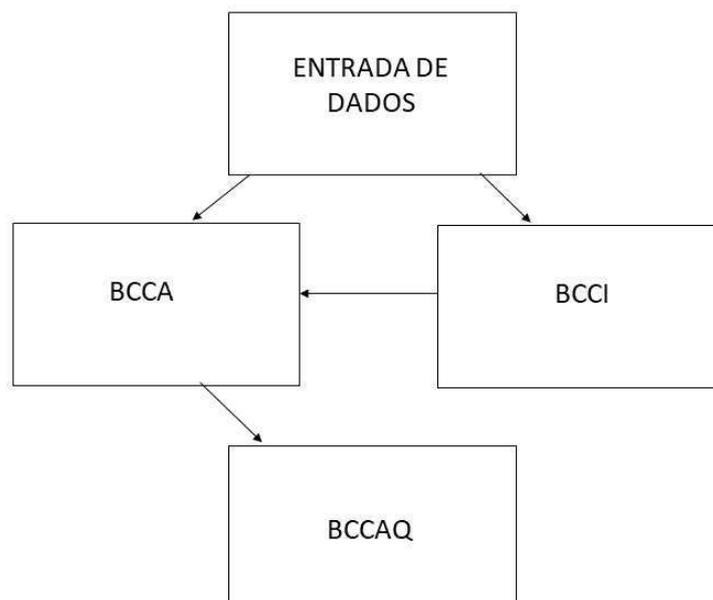


Figura 2. Fluxograma de execução do método de *downscaling* BCCAQ.

3.3.1 Método BCCA

O método BCCA combina os métodos *constructed analogues* CA (HIDALGO; DETTINGER; CAYAN, 2008) e BCSD corrigindo o viés do dado de grande escala por BCSD e posteriormente aplicando o método CA corrigindo os erros principalmente das precipitações inerentes do método CA (Figura 3Figura 3). BCSD é uma técnica de redução estatística empírica que usa mapemamento baseado em quantis das funções de densidade de probabilidade para os dados observados e também é aplicado para as projeções dos MCGs para obter valores diários. Para isso são selecionados meses históricos aleatoriamente e cada dia dentro desse mês é redimensionado igualmente (multiplicados para precipitação e fator de soma nas temperaturas) (HAMLET; SALATHÉ; CARRASCO, 2010; MAURER; HIDALGO, 2008). O Método CA não realiza correção de viés: nesse método é feita uma relação entre variáveis, a relação feita é a de anomalias entre o MCG e o observado. CA busca campos históricos análogos ao tempo atual e tenta repetir o mesmo padrão para um tempo futuro equivalente ao encontrado entre histórico e atual. Van den Dool, (2003) construiu análogos com base em combinações lineares de padrões atmosféricos anteriores (HIDALGO; DETTINGER; CAYAN, 2008) e em CA as variações do clima são determinadas pelas simulações mais representativas do clima. Como CA se baseia em anomalias o viés estaria relacionado a variabilidade espacial e temporal (MAURER; HIDALGO, 2008) e não a áreas de valores elevados. A forma como BCCA executa a correção de viés é igual a BCSD, porém é aplicado valores diários diferentes dos valores mensais em BCSD, ou seja, os resultados de precipitação de um mês de toda a série são agrupados e cada dia desse mês é ordenado como: posição/ (número de dias + 1). Caso, dentro desse mês, o dado de baixa resolução apresente precipitação muito baixa em mais de 90% do tempo e o dado observado mostre 30% do tempo sem precipitação o novo resultado de precipitação no dado bruto será reduzido para zero (sem precipitação) (MAURER; HIDALGO, 2008).

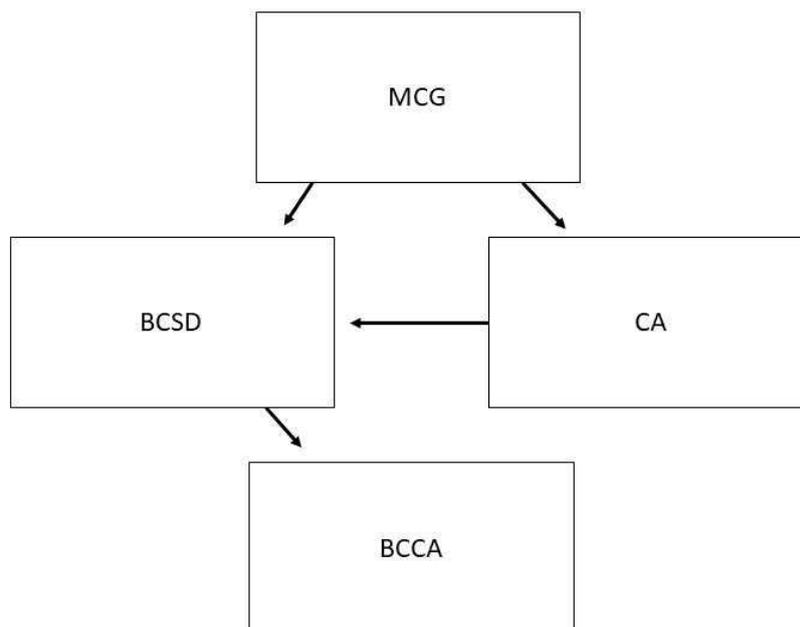


Figura 3. Fluxograma de execução do método de *downscaling* BCCA.

3.3.2 Método BCCI

Assim como o método BCCA, o BCCI utiliza uma combinação de dois métodos de *downscaling*. Os métodos usados em BCCI são: BCSO (descrito no tópico anterior) e CI (*Climate Impress*) (Figura 4). O método CI usa a média de 30 anos dos dados observados para entregar uma amostra do clima. Essa impressão é usada para interpolar os dados diários observados dividindo o valor diário do dado pela média mensal dos 30 anos (HUNTER; MEENTEMEYER, 2005). Posteriormente o método de *ordinary kriging* (calculado como a média pondera dos valores conhecidos ao redor de um ponto) é usado para interpolar uma área no dia que o método e o modelo são parecidos (HUNTER; MEENTEMEYER, 2005). Essa interpolação diária de precipitação é multiplicada pelo valor mensal obtido na impressão climática e para temperatura é calculada a diferença entre o valor diário e o mensal, essa diferença é interpolada pela mesma técnica da precipitação e o resultado diário da saída é resultado da diferença entre a temperatura mensal e a temperatura interpolada (HUNTER; MEENTEMEYER, 2005).

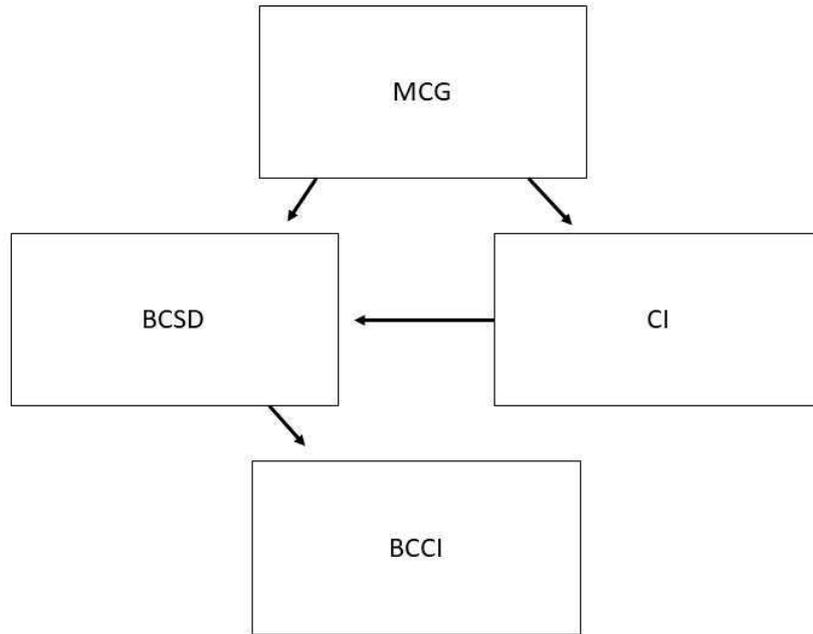


Figura 4. Fluxograma de execução do método de *downscaling* BCCI.

3.4 Período de Calibração e validação

O período de calibração é usado para verificar se os modelos representam, de forma satisfatória, a realidade, e para ajustar os parâmetros estatístico para a região de estudo. Para isso o modelo é comparado com parte dos dados observados e com a parte não utilizada (dados desconhecidos para o modelo) com intuito de verificar a representação da realidade pelo modelo, chamado de período de verificação. Caso o modelo represente satisfatoriamente a realidade isso significa que o período de calibração utilizado na análise foi suficiente. Essa etapa é importante para analisar se a correção de viés é satisfatória para ser aplicada nos resultados de emissões dos modelos globais já que os parâmetros são fixados no período de calibração e não são alterados no período de validação (MARAUN D, 2018; MARAUN; WIDMANN; GUTIÉRREZ, 2019). O período de calibração foi de 1961 a 2010 e período de validação foi estabelecido de 2011 a 2020 com o objetivo de utilizar a maior parte dos dados para a calibração do método. Isso se deve ao fato de que nos anos iniciais desse conjunto de dados há uma baixa densidade de estações, o que reduz a confiabilidade do início da série.

3.5 Avaliação do Modelo BCCAQ

Para avaliar as diferenças entre os MCGs originais e os MCGs regionalizados, foram utilizadas as seguintes métrica de avaliação: erro médio (ME, Equação 1), que é a

média das diferenças entre o modelo e o observado; erro quadrado médio (RMSE, Equação 2), que é a raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças; razão dos desvios padrões (rSD, Equação 3), que representa o desvio padrão em relação à média, expresso em porcentagem; coeficiente de determinação (R^2 , Equação 4), que indica o quanto o modelo representa o observado; e viés percentual em relação à média das observações (PBIAS, Equação 5) (MARAUN et al., 2015).

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N y_i - \hat{y}_i}{N} \quad (\text{eq 1})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (\text{eq 2})$$

$$rSD = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (\text{eq 3})$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_N [\hat{y}_i - \bar{y}]^2}{\sum_N [y_i - \bar{y}]^2} \quad (\text{eq 4})$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{\hat{y}_i} - y_i^{y_i}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^N y_i^{\hat{y}_i}} \quad (\text{eq 5})$$

em que y_i é o valor simulado, \hat{y}_i é o valor observado e \bar{y} é o valor médio e N o número de dados.

4 Resultados

4.1 Validação para o período histórico

Para análise espacial das regionalizações estatísticas e comparação com os modelos originais e com a observação, calculou-se a média de todos os anos para os meses de janeiro e julho (aqui referenciado como climatologia) para os períodos de calibração (1961–2010) e validação (2011–2020), conforme mostra a Figura 5. Nota-se que ambos os modelos originais (Figura 5A-5B) exibiram temperaturas abaixo do observado em janeiro (Figura 5C) nas regiões ASF, MSF e oeste do SMSF, com temperaturas entre 25 e 27°C, enquanto as temperaturas observadas variavam entre 30 e 32°C. Essa discrepância foi corrigida na regionalização (Figura 5B-5E). As temperaturas máximas também foram subestimadas na região do BSF, em aproximadamente 5°C, pelos modelos originais. No mês de julho, o MIROC5 apresentou temperaturas mais baixas do que as observadas, principalmente nas regiões ASF e MSF, com temperaturas entre 22 e 25°C, 4°C abaixo das observações (Figura 5F). Já o MIROC6 (Figura 5I) indicou gradiente de temperatura mais próximo da realidade e superestimou a temperatura máxima na região leste do SMSF e BSF.

Para o período de validação, o MIROC5 original indicou temperaturas máximas menores do que o observado nas regiões ASF, MSF e BSF (Figura 6A), como os parâmetros estatísticos determinados na calibração são mantidos na validação a regionalização ainda subestimada as temperaturas máximas, principalmente no SMSF e BSF (Figura 6B). O MIROC6 superestimou o BSF em cerca de 2°C e subestimou em 3°C no ASF e oeste do MSF (Figura 6B). No período de validação, as saídas do MIROC6 (Figura 6D) se aproximaram mais das observações em comparação com o MIROC5.

Na calibração das temperaturas mínimas para janeiro (Figura 7), os modelos originais superestimam as temperaturas em grande parte da BHSF, indicando valores entre 21 e 23°C em toda a bacia (Figura 7A-7D). Destaca-se a área do ASF, onde a diferença entre o modelo original e a observação é mais evidente, com temperaturas observadas entre 17 e 19°C, sendo essa discrepância corrigida na etapa de regionalização. No caso de julho, os modelos originais conseguem representar adequadamente os gradientes e temperaturas em toda a bacia (Figura 7F-7I). A regionalização ajusta principalmente a área mais ao sul do ASF (Figura 7G-7J), corrigindo uma superestimação

de aproximadamente 13°C para 11°C (observado, figura 7H) e fornecendo detalhes mais precisos na bacia.

No período de validação (Figura 8), as temperaturas em janeiro (Figura 8A-8D) são inicialmente superestimadas, como observado na fase de calibração, e são ajustadas principalmente no ASF, MSF e SMSF, com redução na ordem de 2 a 3°C (Figura 8B-8E). Já no mês de julho, o MIROC5 original (Figura 8F) demonstra uma representação mais precisa das temperaturas em toda a bacia em comparação com o MIROC6 (Figura 8I), que superestima as temperaturas no MSF, SMSF e sul do ASF em aproximadamente 3°C.

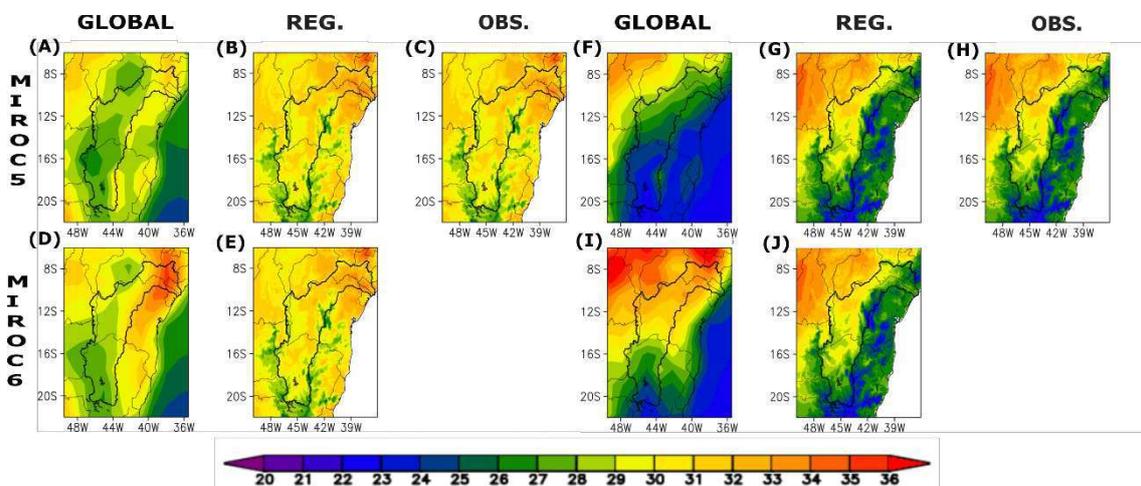


Figura 5. Climatologia das temperaturas máximas de janeiro (A-E) e julho (F-J) para o MIROC5 (A, B, D, E) e MIROC6 (F, G, H, I) versão original (A, D, F, I), regionalizado (B, E, G, J) e as observações (C e H) na região da BHSF no período de calibração (de 1961 a 2010).

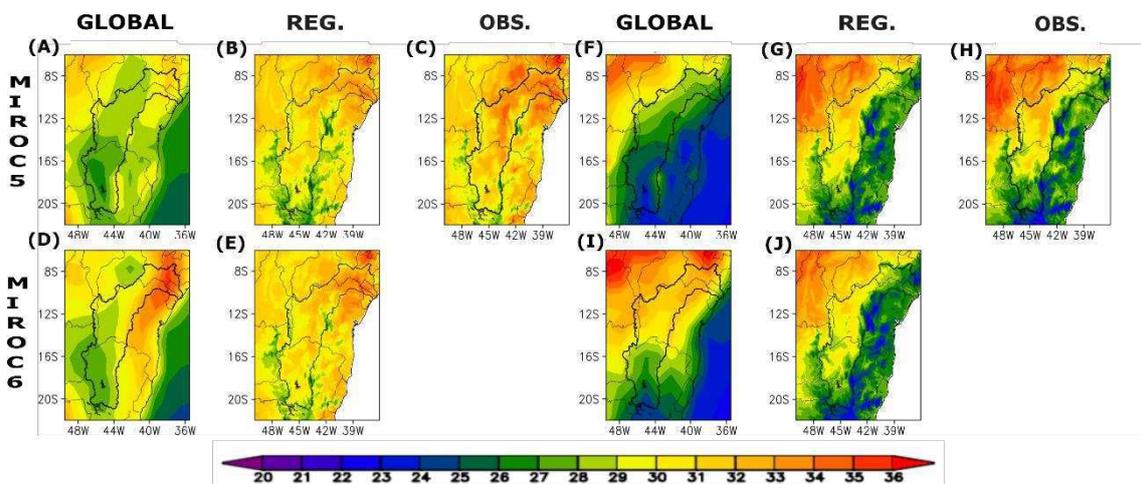


Figura 6. Idem à Figura 5, mas para o período de validação de (2011 a 2020).

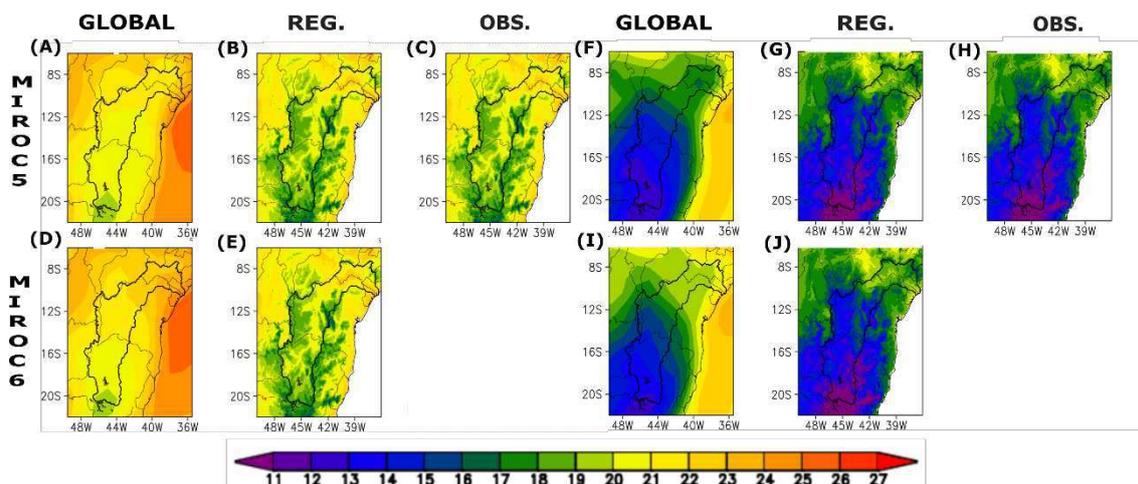


Figura 7. Climatologia das temperaturas mínima de janeiro (A-E) e julho (F-J) para o MIROC5 (A, B, D, E) e MIROC6 (F, G, H, I) versão original (A, D, F, I), regionalizado (B, E, G, J) e as observações (C e H) na região da BHSF no período de calibração (de 1961 a 2010).

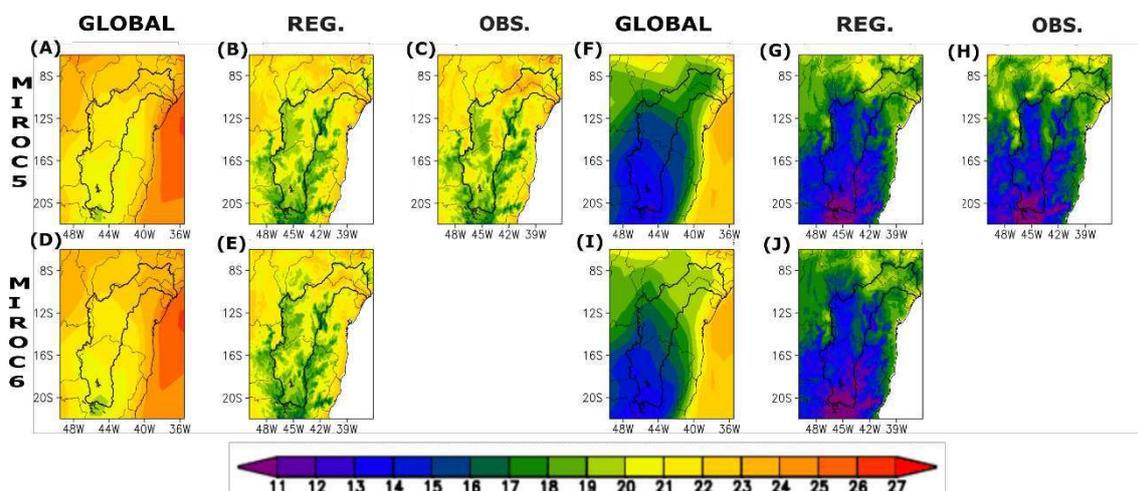


Figura 8. Idem à Figura 7 mas para o período de validação de (2011 a 2020).

Para as precipitações no mês de janeiro, durante o período de calibração (Figura 9), os modelos originais apresentam superestimação de 100 a 200 mm, especialmente nas regiões ASF, MSF e oeste do SMSF (Figura 9A-9D). A regionalização corrige esse viés, aproximando as precipitações nas regiões BSF, SMSF e MSF à realidade (Figura 9B-9E). Entretanto, a região do ASF ainda é superestimada na regionalização do MIROC5 (Figura 9B), especialmente na porção mais ao sul, onde as precipitações variam entre 200 mm e 290 mm. Em julho, as precipitações são muito baixas tanto nos modelos originais (Figura 9F-9I) quanto nas observações (Figura 9H), com pontos de precipitações mais significativa apenas na região leste do BSF, próximo à costa. Nessa região, o MIROC6 original (Figura 9E) subestima as precipitações, sendo corrigido na regionalização.

O mesmo padrão é observado no período de validação (Figura 10), com as precipitações sendo superestimadas em grande parte da bacia (Figura 10B-10E), principalmente no caso do MIROC5 original. Apesar das correções realizadas na regionalização, o MIROC5 (Figura 10B) ainda demonstra precipitações muito acima das observadas (Figura 10C) em toda a região do ASF e sul do MSF, além de subestimar no BSF. A regionalização do MIROC6 (Figura 10E) foi ajustada de forma mais precisa aos dados observados, indicando uma pequena alteração a oeste do ASF, mas representando bem a distribuição espacial das precipitações. Assim como no período de calibração, o mês de julho apresenta baixa precipitação, concentrando-se principalmente próxima ao oceano no BSF.

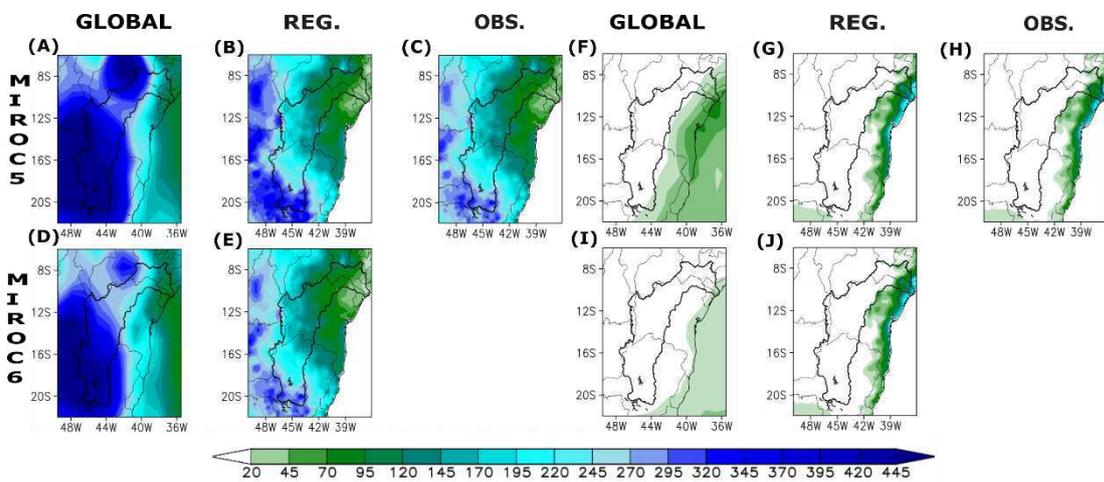


Figura 9. Climatologia das precipitações de janeiro (A-E) e julho (F-J) para o MIROC5 (A, B, D, E) e MIROC6 (F, G, H, I) versão original (A, D, F, I), regionalizado (B, E, G, J) e as observações (C e H) na região da BHSF no período de calibração (de 1961 a 2010).

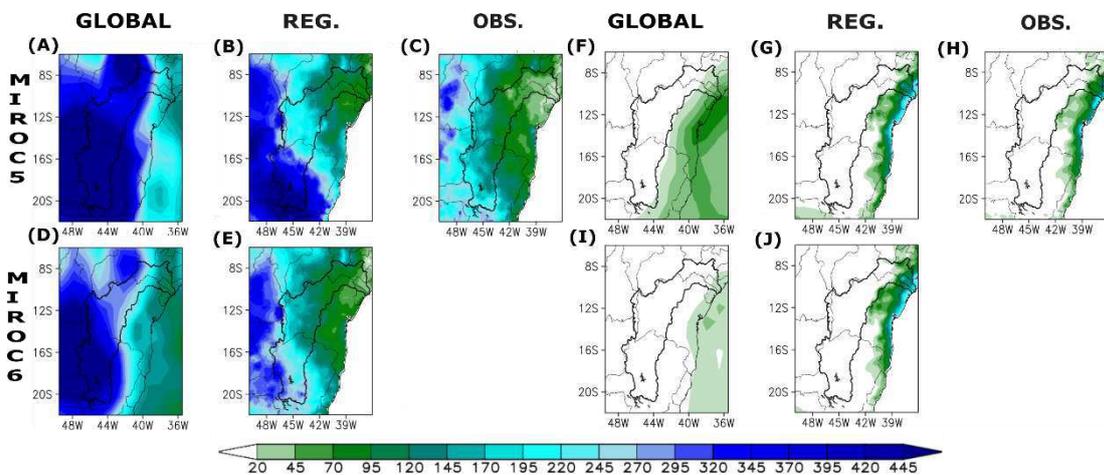


Figura 10. Idem à Figura 9, mas para o período de validação de (2011 a 2020).

As tabelas 2, 3 e 4 apresentam métricas para os períodos de calibração e validação, comparando os resultados dos modelos originais e regionalizados com os valores observados para temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação, respectivamente. Os resultados da temperatura máxima mostram que, tanto na fase de calibração quanto na de validação, os erros médios (ME), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e o PBIAS são significativamente menores para os modelos regionalizados. Isso sugere uma redução dos erros no *downscaling* durante o uso a longo prazo em toda a BHSF e sub-regiões. A regionalização do MIROC6 supera a do MIROC5. Os resultados apontam para um PBIAS% e ME menores durante o período de validação em todas as regiões, com ambos os modelos exibindo ME inferior a 1°C e PBIAS% inferior a 2, com exceção das regiões BSF e SF. Os valores de rSD também foram menores nas regionalizações, sendo os resultados mais destacados no MIROC5, com ênfase no ASF, que registra um rSD de 0,89 nessa região. Alguns resultados de R² foram melhores nos modelos regionalizados. Isso pode se dar pela similaridade dos dados originais com os observados.

Para a temperatura mínima (Tabela 4), as regionalizações superam as saídas dos modelos originais em todas as sub-regiões durante o período de calibração. Apresentam menores erros e viés para ASF, MSF e SF, com ME inferiores a 2°C (exceto para BSF). No período de validação, o MIROC6 regionalizado destaca-se com ME e RMSE abaixo de 2, enquanto o MIROC5 regionalizado exhibe PBIAS% inferiores no ASF, MSF, SMSF e SF. Em contraste com a temperatura máxima, o modelo original do MIROC6 revela erros e viés menores que o MIROC5 na maioria das regiões da BHSF. A maioria dos PBIAS% originais, inicialmente superior a 10, após a regionalização, reduz-se a valores inferiores a 2,5, indicando uma melhoria significativa em relação ao modelo original.

Assim como nas temperaturas máximas, os valores de rSD são superiores tanto na calibração quanto na validação, evidenciando que a regionalização representa de forma mais precisa os dados observados. Em relação ao R², observa-se predominantemente um desempenho superior nas regionalizações, semelhante ao caso das temperaturas máximas.

As saídas de precipitação (Tabela 5) demonstram uma melhoria significativa em todas as regiões da BHSF nos períodos de calibração e validação para ambos os modelos regionalizados, com melhorias principalmente no ME e RMSE. Apesar dessa melhoria, os valores de PBIAS% das saídas do BCCAQ do MIROC6 se mostram elevados, especialmente ao serem comparados com as saídas do MIROC5, com PBIAS% de 932,2

e 930,0 para ASF e BSF, e superior a 500 no SMSF no MIROC6, enquanto no MIROC5 são, respectivamente, 823,4, 264 e 270. Os valores de ME e RMSE do MIROC5 são inferiores aos apresentados pelo MIROC6, mesmo que o modelo original do MIROC6 tenha resultados melhores, indicando que, na análise dos cenários, o MIROC5 pode fornecer melhores resultados. Resultados de rSD seguem tendo resultados melhores nas regionalizações de todas as subáreas da BHSF. Isso concorda com outros autores como GEBRECHORKOS et al. (2023); GEBRECHORKOS; HÜLSMANN; BERNHOFER, (2019); RETTIE et al. (2023); WILBY; DAWSON (2013) que indicaram redução nos erros com relação ao modelo original.

As diferenças entre os modelos originais e regionalizados são notáveis, com os resultados da regionalização mais próximos do observado em todas as variáveis, indicando que o período de calibração foi suficiente para representar adequadamente o período de validação e indicar cenários com menos incertezas.

Tabela 2. Índices ME, RMSE, RSD, R² e PBIAS da temperatura máxima calculados para a aplicação do método BCCAQ e para o MCG nos períodos de calibração (1961 – 2010) e de validação (2011 – 2020).

	Global Miroc5 1961-2010					Regionalizado Miroc5 Calibração (1961-2010)				
	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF
ME	-0.96	-1.59	-0.51	-1.4	-1.59	-0.05	0.26	0.46	0.07	-0.06
RMSE	2.82	2.98	2.25	2.29	2.8	2.03	1.99	2.04	2.18	1.83
rSD	1.49	1.61	1.53	1.36	1.51	1.03	1.04	1.45	1.7	1.06
R ²	0.07	0.05	0.14	0.25	0.08	0.09	0.02	0.2	0.25	0.08
PBIAS %	-3.4	-5.3	-1.7	-4.7	-5.3	-0.2	0.9	1.5	0.2	-0.2
	2011-2020					Validação (2011-2020)				
	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF
ME	-1.28	-2.38	-1.43	-2.25	-2.39	-0.46	-0.63	-0.51	-0.83	-0.96
RMSE	3.85	4.3	3.49	3.44	4.11	2.85	2.7	2.91	3.04	2.73
rSD	1.4	1.75	1.55	1.23	1.6	0.89	1.06	1.39	1.51	1.03
R ²	0.12	0.17	0.09	0.03	0.15	0.1	0.15	0.05	0.02	0.13
PBIAS %	-4.4	-7.6	-4.6	-7.2	-7.7	-1.6	-2	-1.7	-2.7	-3.1
	Miroc6 1961-2010					Miroc6 Calibração (1961-2010)				
	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF
ME	0.34	1.42	4.16	2.81	1.53	-0.01	0.3	0.53	0.15	-0.01
RMSE	2.63	3.9	5.86	4.27	3.63	1.6	1.6	1.99	2.25	1.46
rSD	1.66	2.63	2.99	2.41	2.43	0.98	1.02	1.46	1.68	1.02
R ²	0.17	0.13	0.13	0.18	0.16	0.3	0.2	0.24	0.2	0.27
PBIAS %	1.2	4.7	13.9	9.4	5.1	0	1	1.8	0.5	0
	2011-2020					Validação (2011-2020)				
	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF
ME	0.8	0.6	3	1.59	0.63	-0.21	-0.32	-0.24	-0.75	-0.68
RMSE	3.16	4.27	5.31	3.6	3.89	2.16	2.21	2.24	2.43	2.1
rSD	1.78	2.9	3.1	2.39	2.68	1.1	1.43	1.67	1.71	1.35
R ²	0.11	0.09	0.14	0.22	0.12	0.14	0.12	0.25	0.23	0.18
PBIAS %	0.3	1.9	9.6	5.1	2	-0.7	-1	-0.8	-2.4	-2.2

Tabela 3. Índices ME, RMSE, RSD, R² e PBIAS da temperatura mínima calculados para a aplicação do método BCCAQ e para o MCG nos períodos de calibração (1961 – 2010) e de validação (2011 – 2020).

Global Miroc5 1961-2010						Regionalizado Miroc5 Calibração (1961-2010)					
	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF		Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF
ME	1.78	0.86	2.36	3.53	1.09	ME	-0.08	-0.14	1.78	2.17	-0.08
RMSE	2.93	2.2	2.83	3.77	2.18	RMSE	2.41	1.93	2.37	2.6	1.83
rSD	0.98	1.22	0.9	0.75	1.15	rSD	1.03	1.06	0.75	0.73	1.04
R ²	0.42	0.34	0.43	0.54	0.37	R ²	0.42	0.3	0.38	0.47	0.34
PBIAS %	11.3	4.8	13.1	19.5	6	PBIAS %	-0.5	-0.8	9.8	12	-0.4
2011-2020						Validação (2011-2020)					
	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF		Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF
ME	1.48	0.54	1.92	3.1	0.75	ME	-0.4	-0.47	1.34	1.72	-0.43
RMSE	4.47	3.52	3.49	4	3.41	RMSE	4.29	3.28	3	3.01	3.19
rSD	1.06	1.35	1.02	0.8	1.27	rSD	1.1	1.18	0.84	0.75	1.15
R ²	0.05	0.09	0.07	0.03	0.08	R ²	0.04	0.12	0.08	0.03	0.09
PBIAS %	9	2.9	10.2	16.4	4	PBIAS %	-2.4	-2.5	7.1	9.1	-2.3
Miroc6 1961-2010						Miroc6 Calibração (1961-2010)					
	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF		Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF
ME	2.25	1.9	4.14	4.61	2.18	ME	0	-0.05	1.84	2.23	0
RMSE	2.54	2.3	4.43	4.8	2.5	RMSE	1.17	1.13	2.28	2.69	1.07
rSD	0.9	1.14	0.96	0.78	1.08	rSD	1.01	1.03	0.75	0.72	1.01
R ²	0.83	0.67	0.45	0.54	0.68	R ²	0.84	0.71	0.53	0.42	0.73
PBIAS %	14.3	10.5	22.9	25.5	12	PBIAS %	0	-0.3	10.2	12.4	0
2011-2020						Validação (2011-2020)					
	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF		Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF
ME	1.84	1.46	3.61	4.06	1.71	ME	-0.45	-0.52	1.36	1.67	-0.47
RMSE	2.23	2.07	3.94	4.24	2.18	RMSE	1.34	1.39	1.9	2.19	1.28
rSD	1	1.34	1.11	0.86	1.26	rSD	1.12	1.25	0.91	0.81	1.2
R ²	0.78	0.64	0.45	0.56	0.65	R ²	0.81	0.68	0.5	0.42	0.7
PBIAS %	11.1	7.7	19.1	21.5	9.1	PBIAS %	-2.7	-2.7	7.2	8.9	-2.5

Tabela 4. Índices ME, RMSE, RSD, R² e PBIAS da precipitação calculados para a aplicação do método BCCAQ e para o MCG nos períodos de calibração (1961 – 2010) e de validação (2011 – 2020).

	Global					Regionalizado				
	Miroc5					Miroc5				
	1961-2010					Calibração (1961-2010)				
	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF
ME	5.8	4.4	3.12	2.42	3.71	1.99	0.57	0.22	0.06	0.59
RMSE	8.45	6.83	4.68	3.41	5.75	3.29	1.68	0.62	0.15	1.82
rSD	15.06	5.5	14.58	54.76	3.94	6.54	1.63	2.42	3.09	1.47
R ²	0.25	0.23	0.11	0.01	0.26	0.16	0.39	0.26	0	0.17
PBIAS %	1590.9	506.8	1740.7	5522	315.6	546.2	66.1	123.9	129.9	49.8
	2011-2020					Validação 2011-2020				
	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF
ME	7.04	5.46	3.5	2.64	4.68	2.56	0.92	0.33	0.09	1.02
RMSE	10.7	8.84	5.42	3.81	7.65	4.35	2.36	0.77	0.19	2.65
rSD	21.81	7.35	23.11	91.95	5.37	9.51	2.1	3.74	5.32	1.97
R ²	0.01	0	0	0.02	0	0.01	0	0	0.02	0
PBIAS %	2287	759.4	2829.6	8108.2	483.6	832.4	128.7	270	264.5	105.6
	Miroc6					Miroc6				
	1961-2010					Calibração (1961-2010)				
	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF
ME	5.16	3.89	2.88	2.34	3.27	2.64	1.13	0.56	0.23	1
RMSE	7.55	5.97	4.43	3.57	5	3.99	2.13	1.1	0.43	1.94
rSD	13.74	5.03	14.32	61.54	3.66	7.73	2.2	4.16	8.45	1.75
R ²	0.49	0.45	0.27	0.07	0.49	0.45	0.39	0.16	0.02	0.43
PBIAS %	1415.5	448.2	1605.6	5322.5	278	724	129.9	314	524.2	85.5
	2011-2020					Validação 2011-2020				
	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF	Alto	Médio	Submédio	Baixo	SF
ME	5.58	4.41	3.19	2.74	3.81	2.87	1.46	0.73	0.3	1.39
RMSE	8.51	7.04	5.05	4.62	6.05	4.52	2.76	1.35	0.58	2.61
rSD	17.81	6.27	22.34	124.61	4.67	9.86	2.81	6.73	16.81	2.29
R ²	0.25	0.28	0.26	0.04	0.32	0.25	0.23	0.16	0.02	0.27
PBIAS %	1811.7	614	2578.3	8401.5	394.1	932.6	203.5	587.3	930.9	144.1

Examinando as variáveis como séries temporais (Figura 11) para o período de calibração em toda a bacia, tornou-se evidente que, as temperaturas máximas têm valores maiores no modelo original do que os observados em toda a série no MIROC6 (Figura 11B) e inferiores no MIROC5 (Figura 11A). Esse viés é corrigido com a regionalização, quando os valores se aproximam mais das observações, e os padrões da regionalização seguem o formato do modelo original em toda a série.

Com relação às temperaturas mínimas, o efeito é semelhante à variável anterior (Figura 11C-D), com valores entre 17 e 18 °C nos dados observados e superiores a 19 °C nos modelos originais. Na regionalização, as temperaturas são reduzidas e se aproximam mais dos dados observados, mas também apresentam variações semelhantes ao modelo original.

No caso das precipitações (Figura 11 E-F), os modelos originais indicam valores superiores às observações em até 5 mm/dia em toda a série, indicando valores mais

elevados entre 1970 e 1980 no MIROC5, que também indica inclinação de queda em toda série, e entre 1980 e 1990 no MIROC6. Embora haja melhorias no viés das altas precipitações com a regionalização, os valores ainda são absolutamente maiores do que os observados, com diferenças superiores a 1 mm/dia em ambos os modelos.

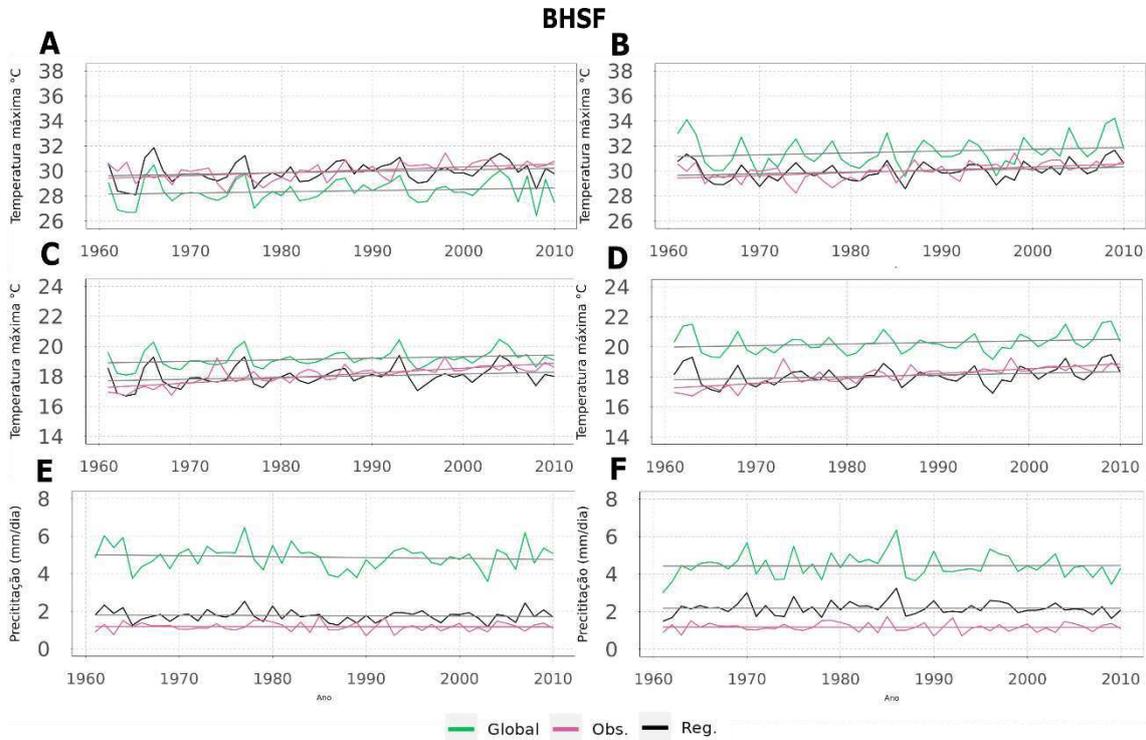


Figura 11. Série temporal e inclinação de temperatura máxima (A-B), mínima (C-D) e precipitação (E-F) para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco de 1961 a 2010 para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita) no período de calibração (1961-2010).

Analisando as temperaturas máximas por subárea (Figura 12), verifica-se que as regiões do BSF e SMSF apresentam as temperaturas mais elevadas, com o maior viés nos modelos originais no MIROC6, registrando valores médios próximos a 32 °C e 34 °C nessas áreas. O MIROC5 já apresentava temperaturas mais próximas dos valores observados, principalmente na região do SMSF e ASF. Em todas as quatro sub-regiões, os vieses são ajustados para valores próximos aos observados, reduzindo o viés do MIROC6 no BSF e SMSF e aumentando o MIROC5 no BSF e MSF ao longo de toda a série. Na região dos ASF, os modelos originais representavam bem os valores e características da área, indicando um melhor ajuste para essa região na regionalização.

No que diz respeito às temperaturas mínimas (Figura 13), os modelos originais superestimam as temperaturas em até 2 °C em ambas as sub-regiões da bacia, ao longo de todo o período, com médias entre 22 °C no BSF e SMSF (MIROC6) e 19 e 18 no MSF

e ASF, quando foram observados valores próximos a 20 °C no BSF e SMSF e 17 e 15 no MSF e ASF.

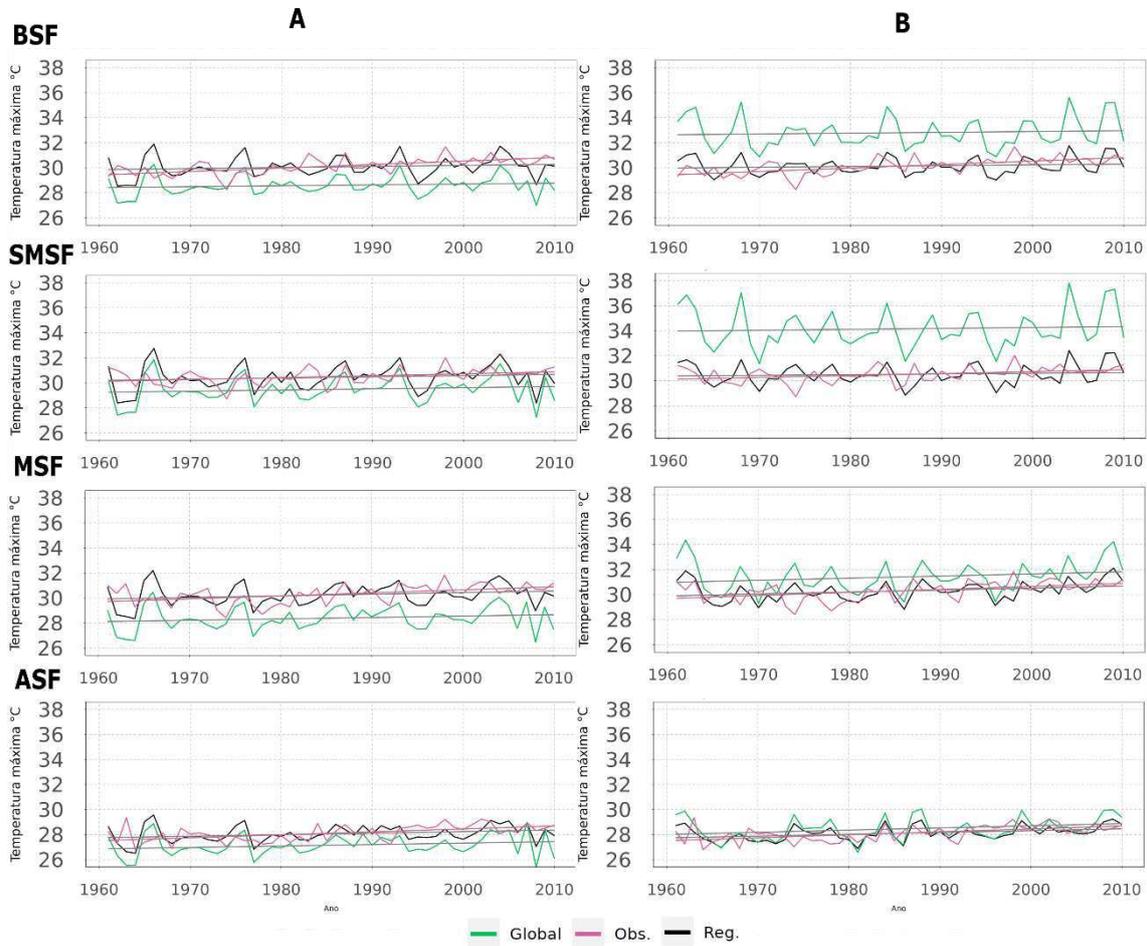


Figura 12. Série temporal e inclinação de temperatura máxima para as quatro sub-regiões da bacia: baixo São Francisco (BSF), submédio São Francisco (SMSF), médio São Francisco (MSF) e alto São Francisco (ASF) no período de calibração (1961 a 2010) para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita).

No que diz respeito às precipitações (figura 14), observa-se um viés de alta nos modelos originais, tanto para o MIROC5 quanto para o MIROC6, com valores próximos a 5 mm/dia no MSF e 6 mm/dia no ASF. Na regionalização, o viés de precipitação é reduzido e se aproxima dos dados observados em todas as sub-regiões da BHSF nos dois modelos, destacando-se o MSF no MIROC5 e 6, onde não apenas o viés foi corrigido, mas também o padrão de variação se tornou mais próximo da observação. Para as demais regiões, os padrões de variação dos dados originais foram mantidos na regionalização. A região onde os modelos originais apresentavam menor desvio em relação aos dados observados foi a do BSF, com viés inferior a 2 mm em toda a série. De maneira geral, o viés de precipitação dos modelos originais é superior a 2 mm.

Para as três variáveis analisadas, a correção da regionalização direcionou-se mais para a correção do viés, mantendo os padrões e variações do modelo original. O modelo original do MIROC5 exibiu representações mais próximas do observado nas temperaturas máximas (BSF, SMSF e ASF) e mínimas (BSF, SMSF e MSF) quando comparado ao MIROC6. Isso não limitou o ajuste das reanálises do MIROC6, obtendo valores próximos ao observado em todas as regiões.

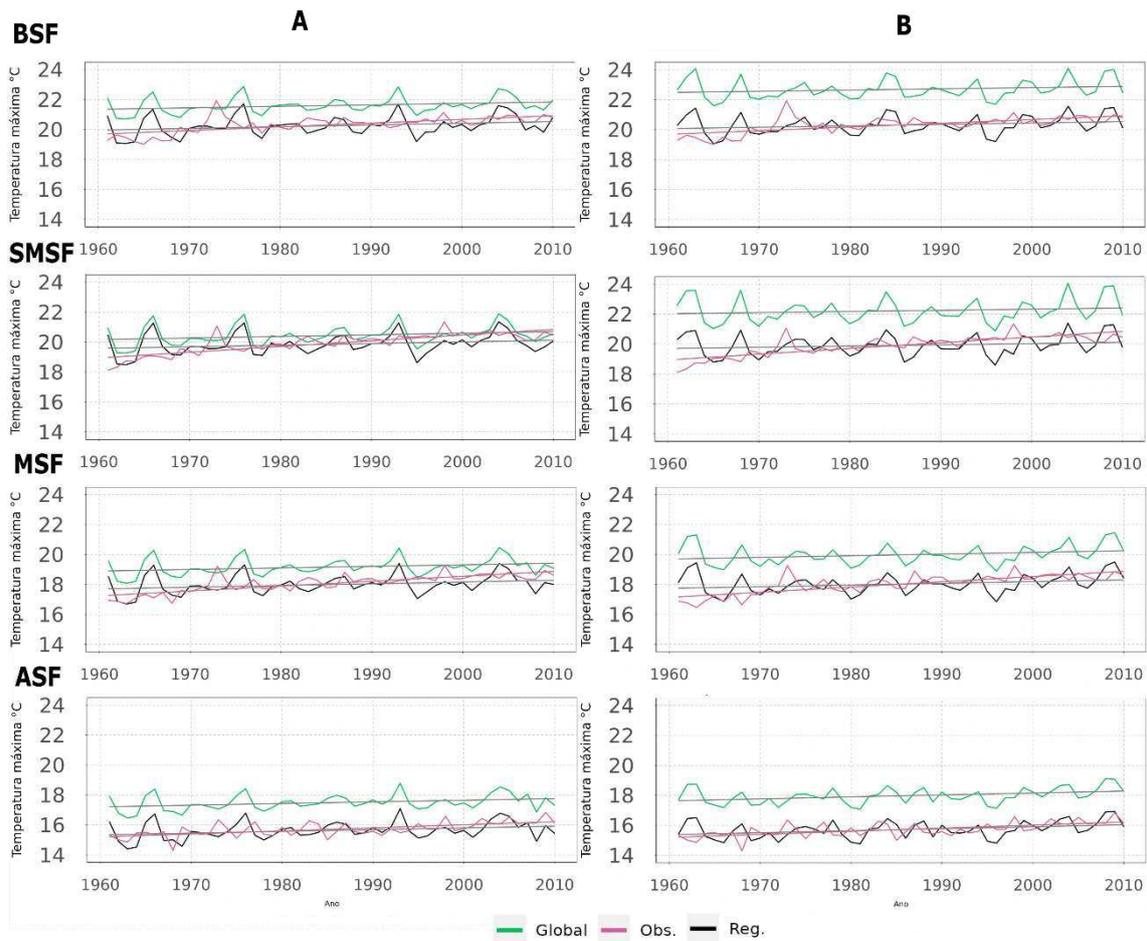


Figura 13. Série temporal e inclinação de temperatura mínima para as quatro sub-regiões da bacia: baixo São Francisco (BSF), submédio São Francisco (SMSF), médio São Francisco (MSF) e alto São Francisco (ASF) no período de calibração (1961 a 2010) para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita).

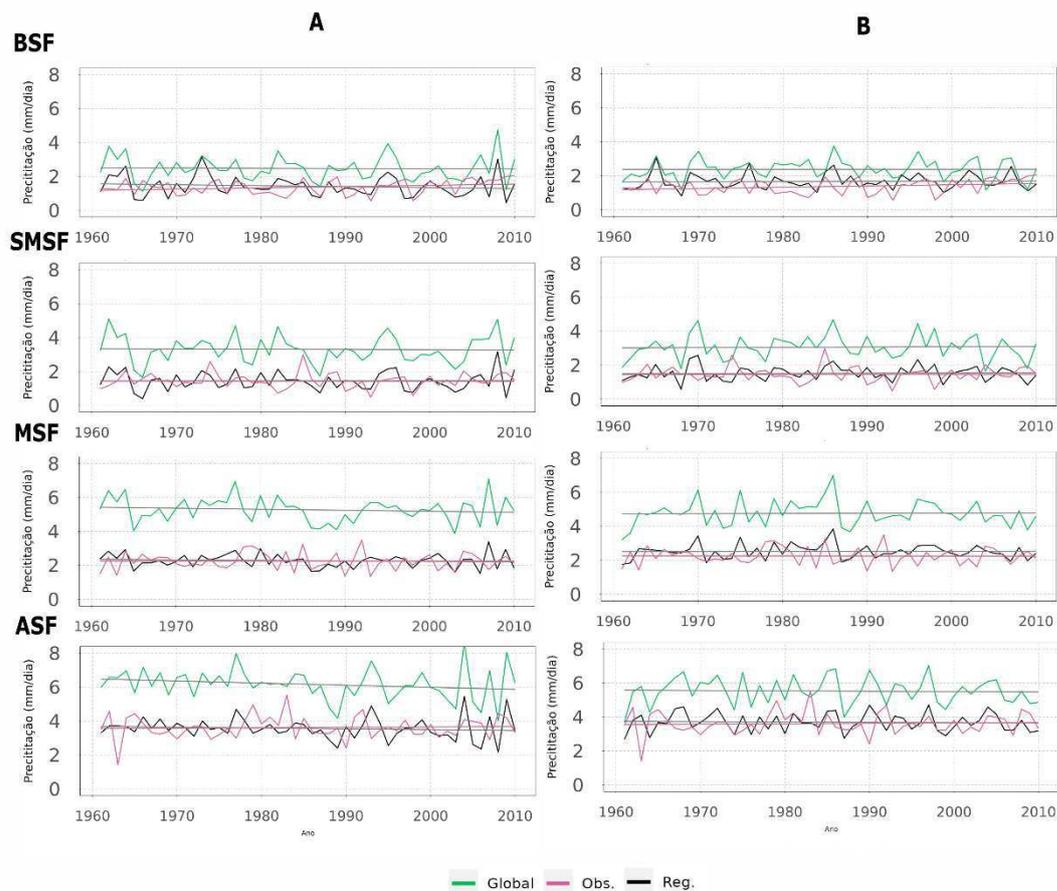


Figura 14. Série temporal e inclinação de precipitação para as quatro sub-regiões da bacia: baixo São Francisco (BSF), submédio São Francisco (SMSF), médio São Francisco (MSF) e alto São Francisco (ASF) no período de calibração (1961 a 2010) para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita).

Para o período de validação em toda a bacia (Figura 15), as temperaturas máximas são subestimadas pelo MIROC5 original e regionalizado (Figura 15A) durante todo o período, enquanto são superestimadas entre 2012 e 2014 no MIROC6 (Figura 15B) e subestimadas entre 2014 e 2018. Nas temperaturas mínimas, ambos os modelos originais superestimam as temperaturas ao longo da série, principalmente o MIROC6 (Figura 5D) entre 2012-2014 e em 2018. A regionalização do MIROC5 nas mínimas (Figura 5C) se aproxima das observadas, sendo subestimadas entre 1 e 2°C a partir de 2015.

Quanto às precipitações, os modelos originais continuam com um viés positivo em ambos os modelos, sendo reduzidos em 4 mm/dia, mas ainda superestimam em 1 mm/dia em relação ao observado.

Na análise por sub-região das temperaturas máximas (Figura 16), as originais do MIROC5 são inferiores às observadas, com as regionalizações tornando-se levemente inferiores, principalmente no MSF e SMSF. Ao contrário do MIROC5, o MIROC6 indica

temperaturas maiores do que as observadas, principalmente entre 2012 e 2014 em todas as sub-regiões, com temperaturas superiores entre 4 e 5°C nessas áreas.

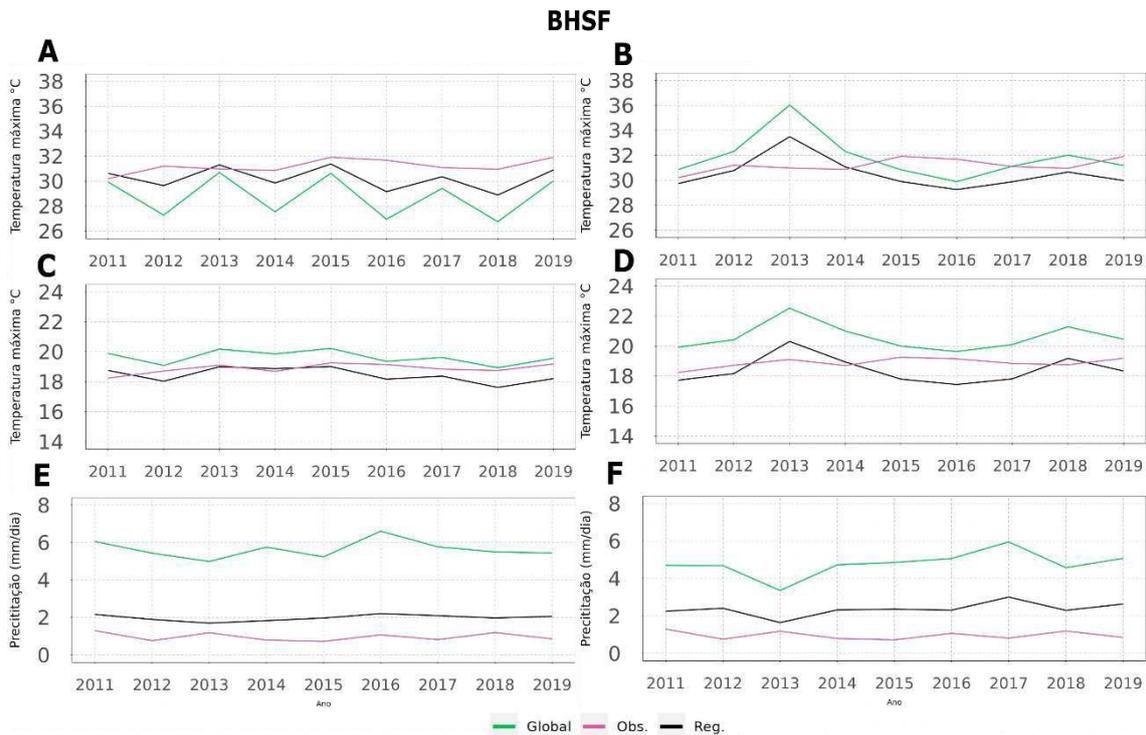


Figura 15. Série temporal e inclinação de temperatura máxima (A-B), mínima (C-D) e precipitação (D-E) para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco de 1961 a 2010 para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita) no período de validação (2011-2019) para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita).

Nas temperaturas mínimas (Figura 17) nas regiões do SMSF e MSF, a regionalização apresenta valores e padrões bem ajustados à observação no MIROC5, com diferenças inferiores a 1°C nessas regiões. As regionalizações do MIROC6 seguem os padrões do modelo original e têm características semelhantes às vistas nas temperaturas máximas, com superestimação entre 2012 e 2014 e subestimação de 2015 a 2018 em todas as sub-regiões.

No período de calibração, as precipitações (Figura 18) exibem superestimação de até 4 mm nos modelos originais, principalmente na região do ASF e MSF. Contudo, na regionalização, as precipitações se aproximam das observações, mas mantendo as

características dos modelos originais indicando diferenças de até 2 mm em principalmente em 2014 e 2017 no MIROC6.

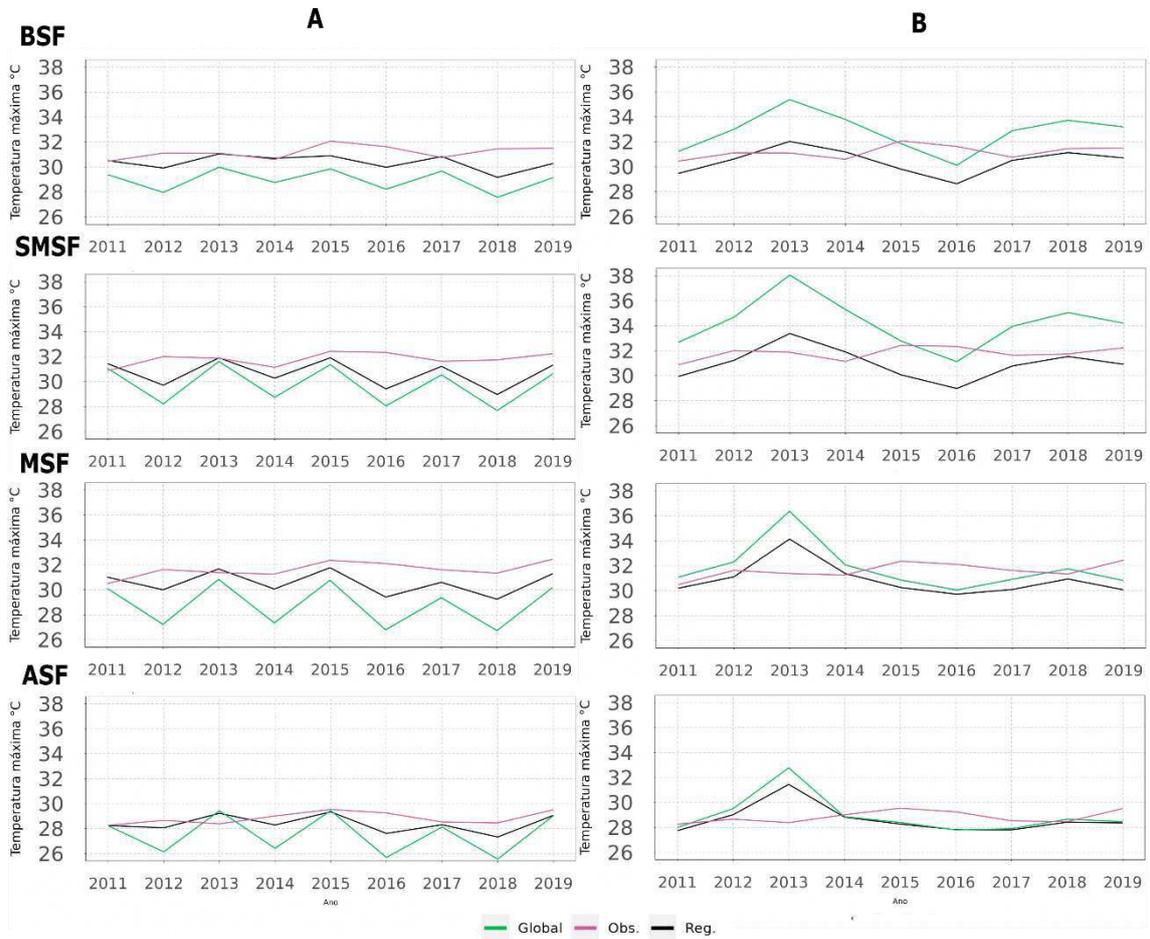


Figura 16. Série temporal e inclinação de temperatura máxima para as quatro sub-regiões da bacia: baixo São Francisco (BSF), submédio São Francisco (SMSF), médio São Francisco (MSF) e alto São Francisco (ASF) no período de validação (2011 a 2019) para MIROC5 (A) e MIROC6 (B).

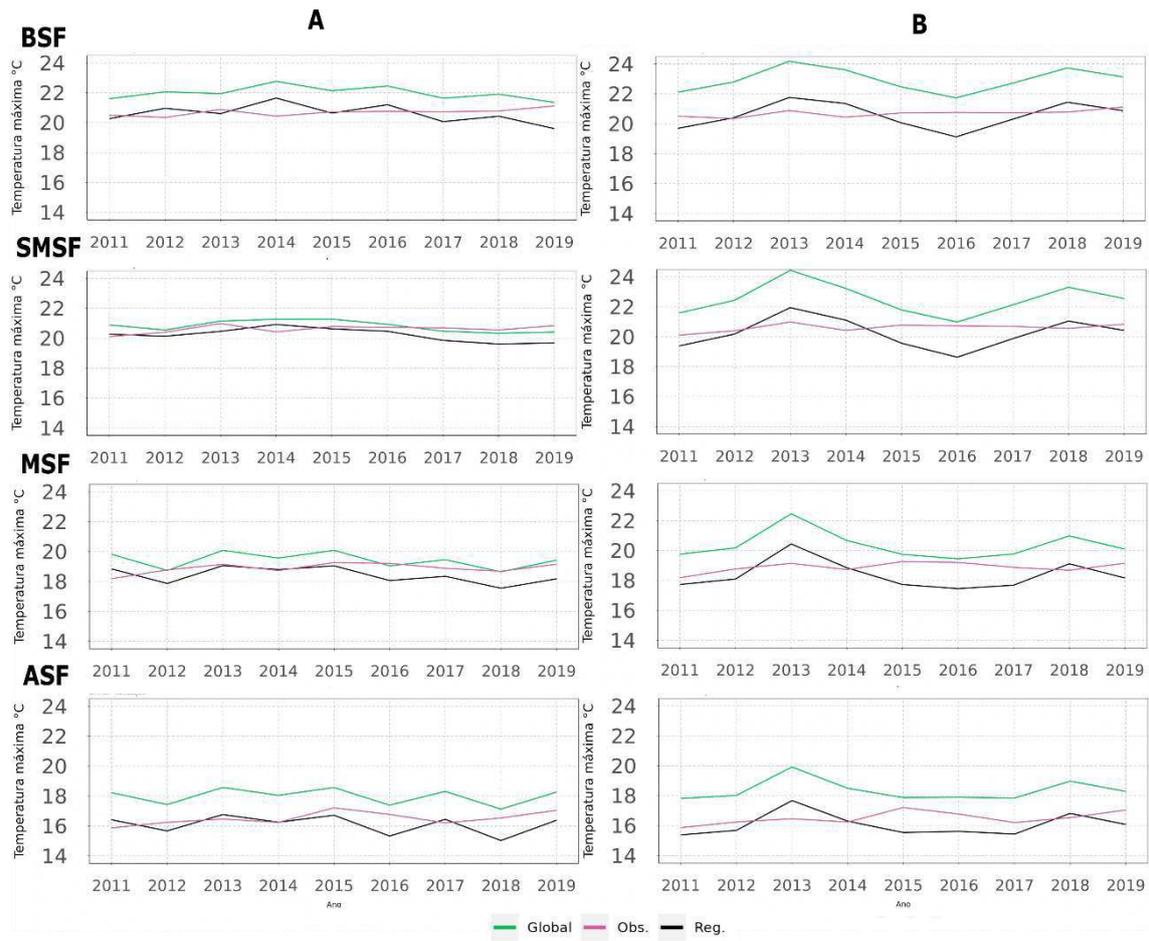


Figura 17. Série temporal e inclinação de temperatura mínima para as quatro sub-regiões da bacia: baixo São Francisco (BSF), submédio São Francisco (SMSF), médio São Francisco (MSF) e alto São Francisco (ASF) no período de validação (2011 a 2019) para MIROC5 (A) e MIROC6 (B).

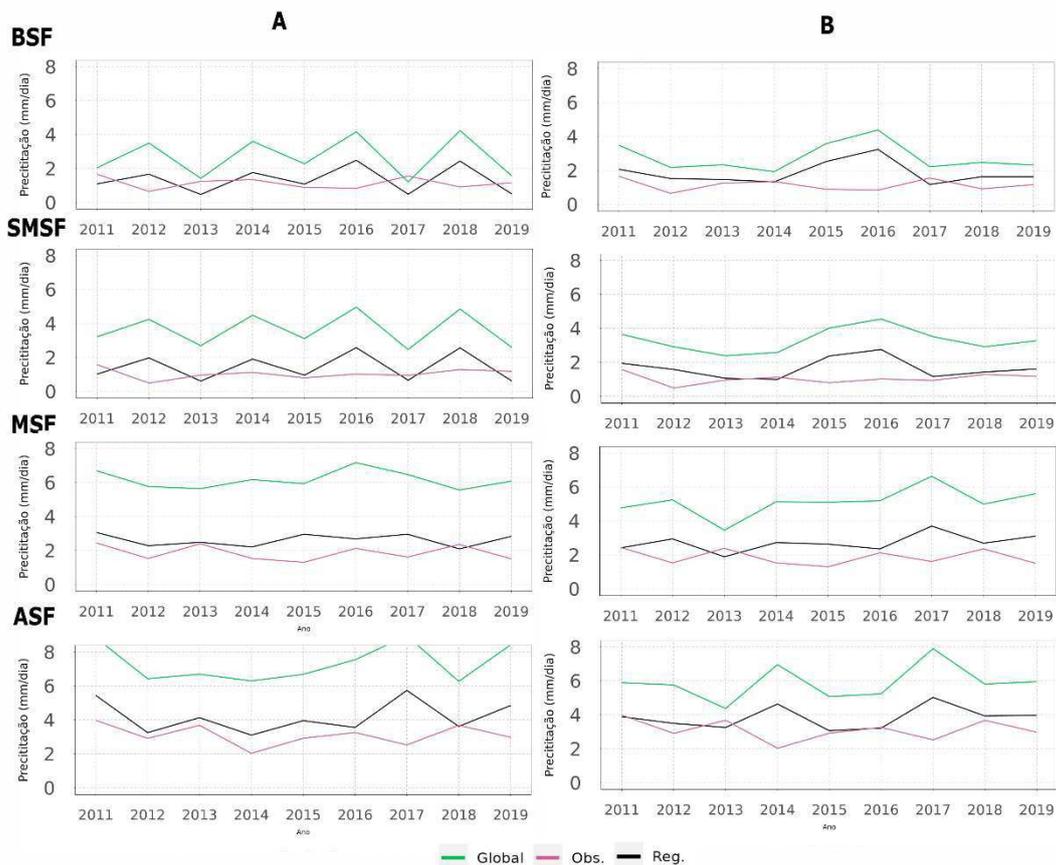


Figura 18. Série temporal e inclinação de precipitação para as quatro sub-regiões da bacia: baixo São Francisco (BSF), submédio São Francisco (SMSF), médio São Francisco (MSF) e alto São Francisco (ASF) no período de validação (2011 a 2019) para MIROC5 (A) e MIROC6 (B).

4.2 Análise das projeções futuras

Após a análise histórica, das métricas e identificação das regiões onde os modelos regionalizados melhor simulam o clima, foi realizada uma análise dos cenários de emissões para ambos os modelos em três períodos diferentes tanto original quanto regionalizado.

Para o futuro próximo (2021 - 2046), as temperaturas máximas em janeiro (Figura 15) no MIROC5 mostraram valores entre 26° e 28° na região central da bacia e ASF nos três cenários, conforme observado na análise de calibração. Na regionalização, essas temperaturas aumentam, variando entre 30 e 33°C. No MIROC6 original, observam-se resultados elevados de temperaturas, especialmente para SSP5-8.5, abrangendo todo o leste da Bahia com temperaturas entre 36 e 35°C. Essas temperaturas foram reduzidas na regionalização, variando entre 2 e 3°C, resultando em uma média de aproximadamente

32°C nessa região. Na parte sul do MSF e em grande parte do ASF, as temperaturas giram em torno de 27 e 28°C, aumentando para mais de 30°C na regionalização.

No mês de julho, ocorrem subestimações em quase toda a bacia, sendo mais pronunciadas na regionalização, principalmente na região central do ASF, MSF e SMSF para ambos os modelos. O MIROC6 original (Figura 15) foi o modelo que apresentou as maiores temperaturas, principalmente no norte da bacia, afetando principalmente o SMSF e BSF.

Quanto ao delta, resultado da diferença entre os cenários e o dado observado, em geral, há aumento nas temperaturas na região central e sul da bacia e diminuição no BSF, com variações de 1 a 2°C tanto para janeiro quanto para julho.

No futuro intermediário (2047 – 2072), as temperaturas máximas (Figura 16) já apresentam resultados mais elevados em comparação com o futuro próximo nos modelos originais em janeiro, principalmente o MIROC5 na região central da bacia em RCP 4.5 e RCP 8.5. As temperaturas das regionalizações são mais altas na região do BSF, SMSF e MSF em comparação com os modelos originais, destacando-se em RCP 8.5 e SSP4-6.0. No mês de julho, os maiores aumentos ocorrem na região norte do SMSF e em toda a região do BSF, principalmente no MIROC6 original nos cenários de SSP4-6.0 e SSP5-8.5. Nas regionalizações, as temperaturas são reduzidas em todo o BSF e leste do SMSF. As áreas do ASF e MSF apresentam temperaturas mais altas na regionalização de julho em todos os cenários e modelos.

Em relação ao delta, foi possível observar variações superiores a 2°C na região do SMSF, principalmente no cenário de SSP5-8.5 para o mês de julho e entre 1 e 2 para janeiro na maior parte da bacia (Figura 16).

Para o futuro distante (2073 - 2099) (Figura 17), as regionalizações das temperaturas máximas de janeiro são significativamente mais altas para toda a bacia nos cenários RCP 6.0 e 8.5 no MIROC5 e SSP4-6.0 e SSP5-8.5 no MIROC6, com temperaturas superiores a 35°C em todo BSF, SMSF, MSF e grande parte do ASF. O delta desse período para os cenários de grandes emissões é superior a 3°C em toda a bacia, com valores próximos a 6°C no norte do BSF em SSP5-8.5 e norte do SMSF em RCP 8.5. Em julho, as regionalizações também indicam um intenso aumento na região oeste do SMSF e norte do MSF. Como nos futuros analisados anteriormente, o MIROC6 original mostra um grande aumento de temperatura na região do BSF no mês de julho,

que é reduzido na regionalização de todos os cenários. Os valores de delta também são superiores a 3°C em grande parte da bacia para os cenários de grandes emissões, com temperaturas entre 22 e 27°C no sul da ASF.

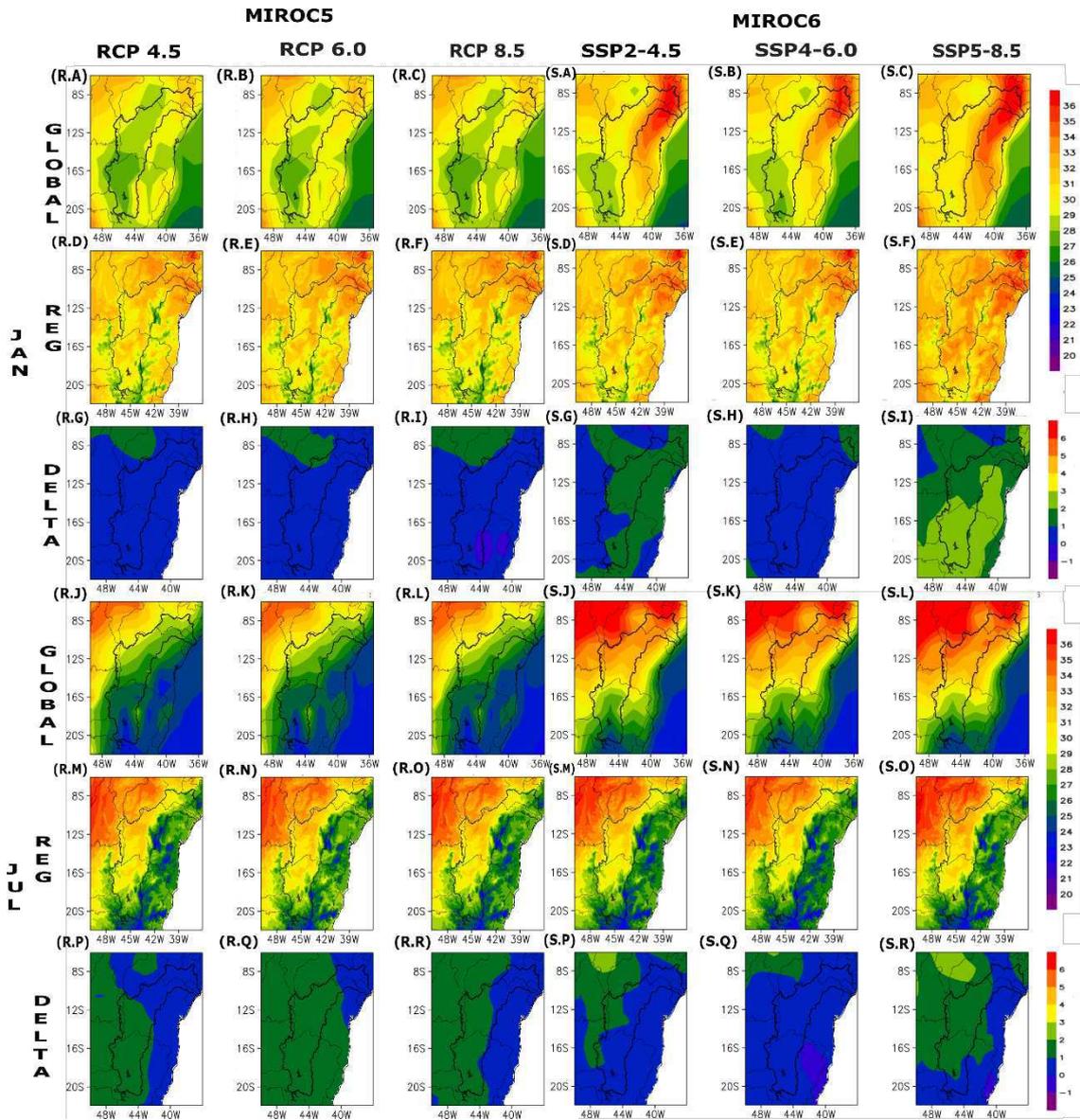


Figura 19. Climatologia das temperaturas máxima de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSF no futuro próximo (2021 – 2046) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).

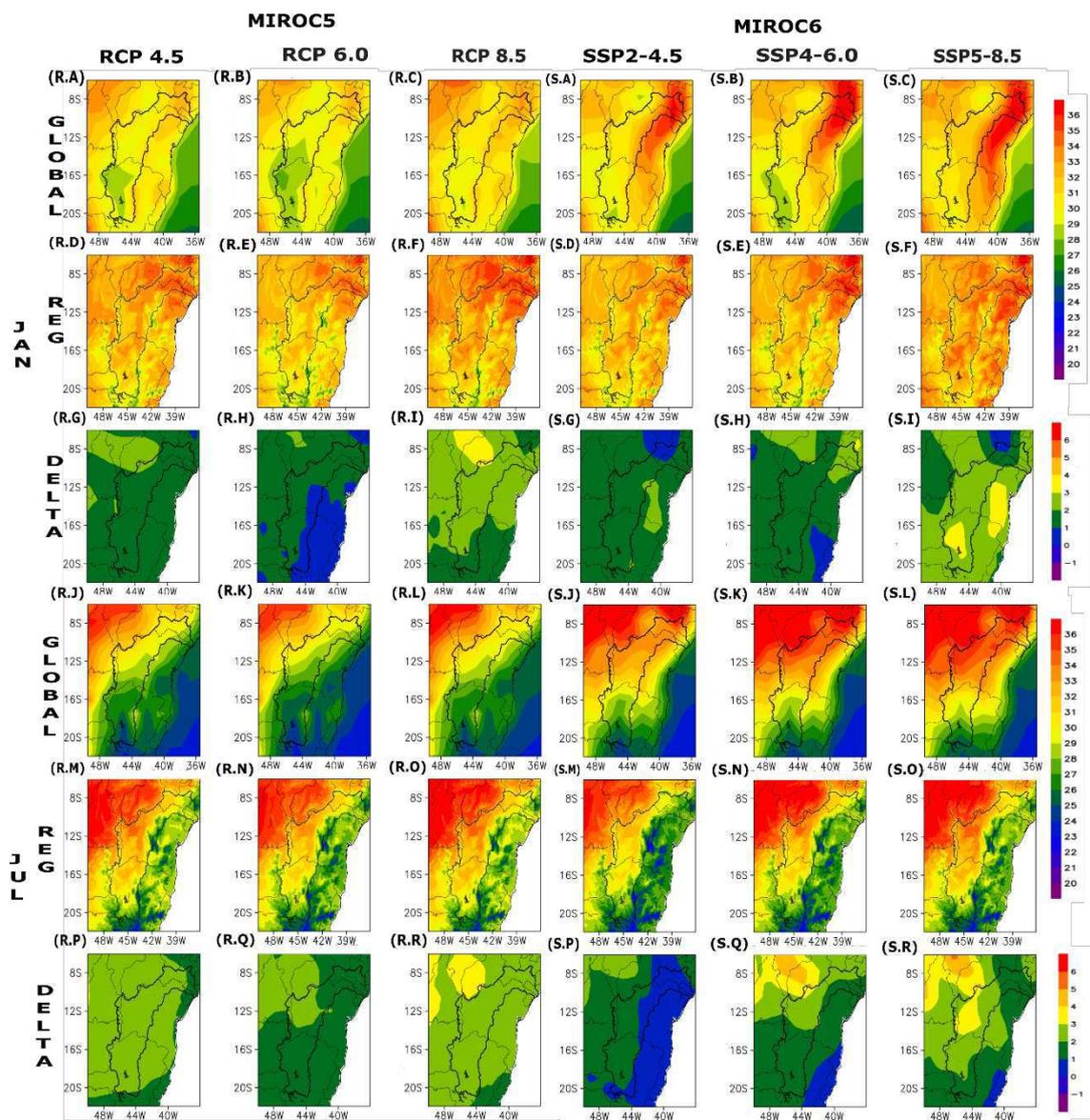


Figura 20. Climatologia das temperaturas máxima de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSF no futuro intermediário (2047 – 2072) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).

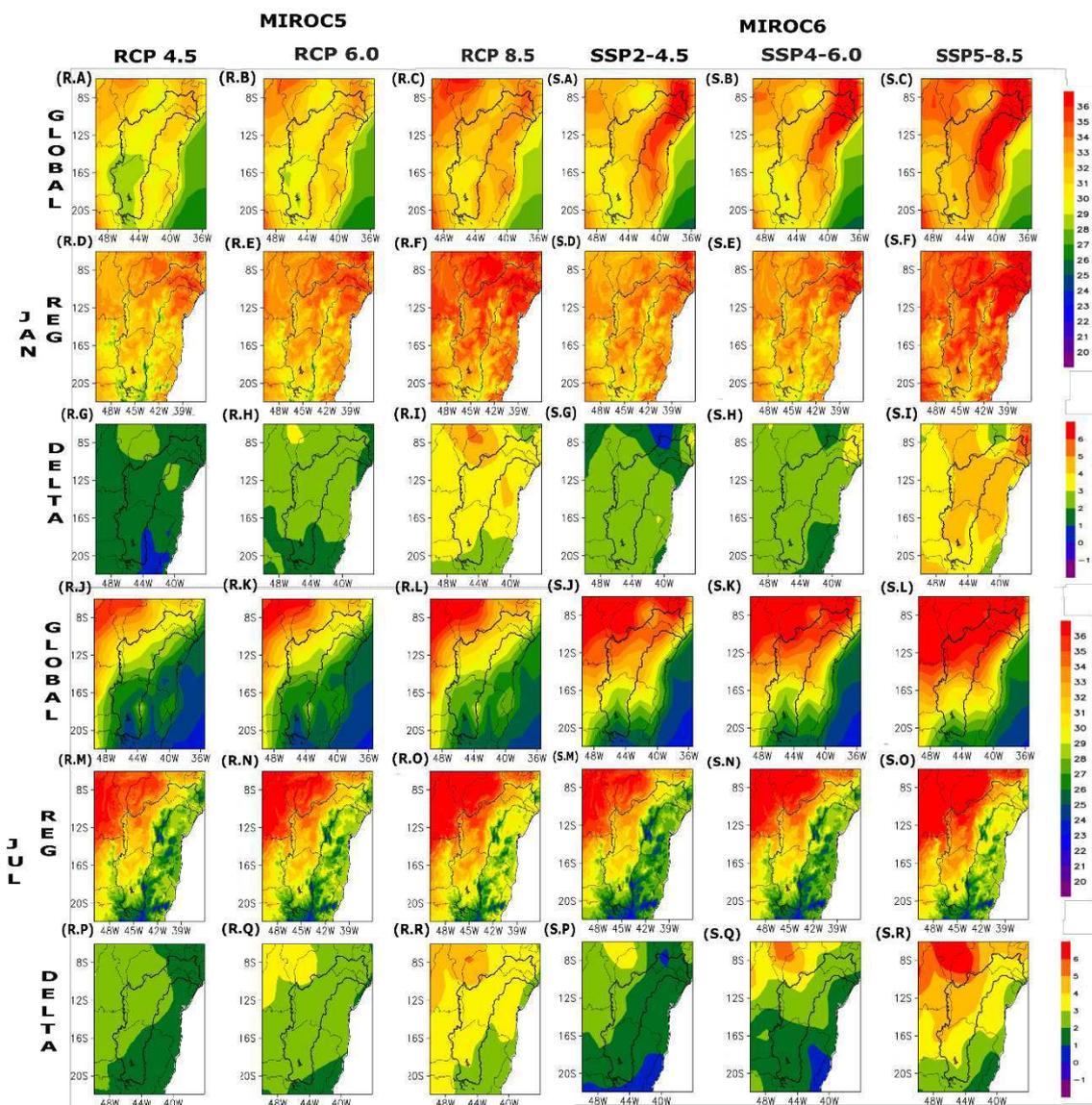


Figura 21. Climatologia das temperaturas máximas de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSF no futuro distante (2073 – 2099) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).

Nas temperaturas mínimas para o futuro próximo (Figura 18), observa-se uma redução nas temperaturas em todas as regiões da bacia, a qual é reduzida nas regionalizações em janeiro, tanto nos modelos originais quanto nos regionais. Destaca-se ASF e MSF, que apresentam temperaturas entre 17 e 20 °C nas regionalizações. Conforme observado na calibração e validação, os modelos originais refletem as temperaturas mínimas espacialmente próximas às observações. Portanto, nos cenários do futuro próximo, as mudanças entre o modelo original e o regionalizado são pequenas, com destaque para o sul da ASF, onde as temperaturas se aproximam de 11°C na

regionalização. O delta aqui apresenta pouca variação, chegando a até 1°C nos dois meses estudados em todos os cenários.

Na Figura 19, os valores das temperaturas nos modelos originais são elevados na região central e sul da bacia, mas são reduzidos nas regionalizações, seguindo o padrão observado nas temperaturas máximas. Anteriormente, essas temperaturas variavam entre 22 e 24°C no ASF e MSF, passando a ser de 16 a 20°C nessas regiões em todos os cenários. Todos os cenários reduzem as temperaturas de maneira semelhante.

No mês de julho, os modelos originais indicam aumento nas temperaturas no BSF e SMSF em comparação com o futuro próximo, mantendo as temperaturas próximas nas demais regiões. A regionalização reduz essas temperaturas para valores entre 18 e 19°C (2°C a menos do que o global) no BSF e SMSF em todos os cenários. As temperaturas no sul do ASF continuam sendo próximas a 11°C na regionalização, como observado no futuro próximo. Os resultados de delta ainda indicam variação entre 1 e 2°C nos meses de janeiro e julho em todos os cenários.

Para o futuro distante (Figura 20), os valores de temperatura mínima são novamente reduzidos nas regionalizações em toda a bacia, com parte do ASF e MSF apresentando temperaturas entre 18 e 19°C nos cenários de RCP 4.5, RCP 6.0, SSP2-4.5 e SSP4-6.0. Os cenários de maiores emissões demonstram um aumento significativo no BSF e na região central (conforme visto nas temperaturas máximas). Para o mês de julho, as variações entre os cenários são pequenas, com destaque para o aumento no BSF e na região do MSF nos cenários de emissões elevadas. As maiores variações no delta ocorrem nos cenários de SSP5-8.5 e RCP 8.5, resultando em valores entre 3 e 4°C em janeiro e julho em toda a BHSF.

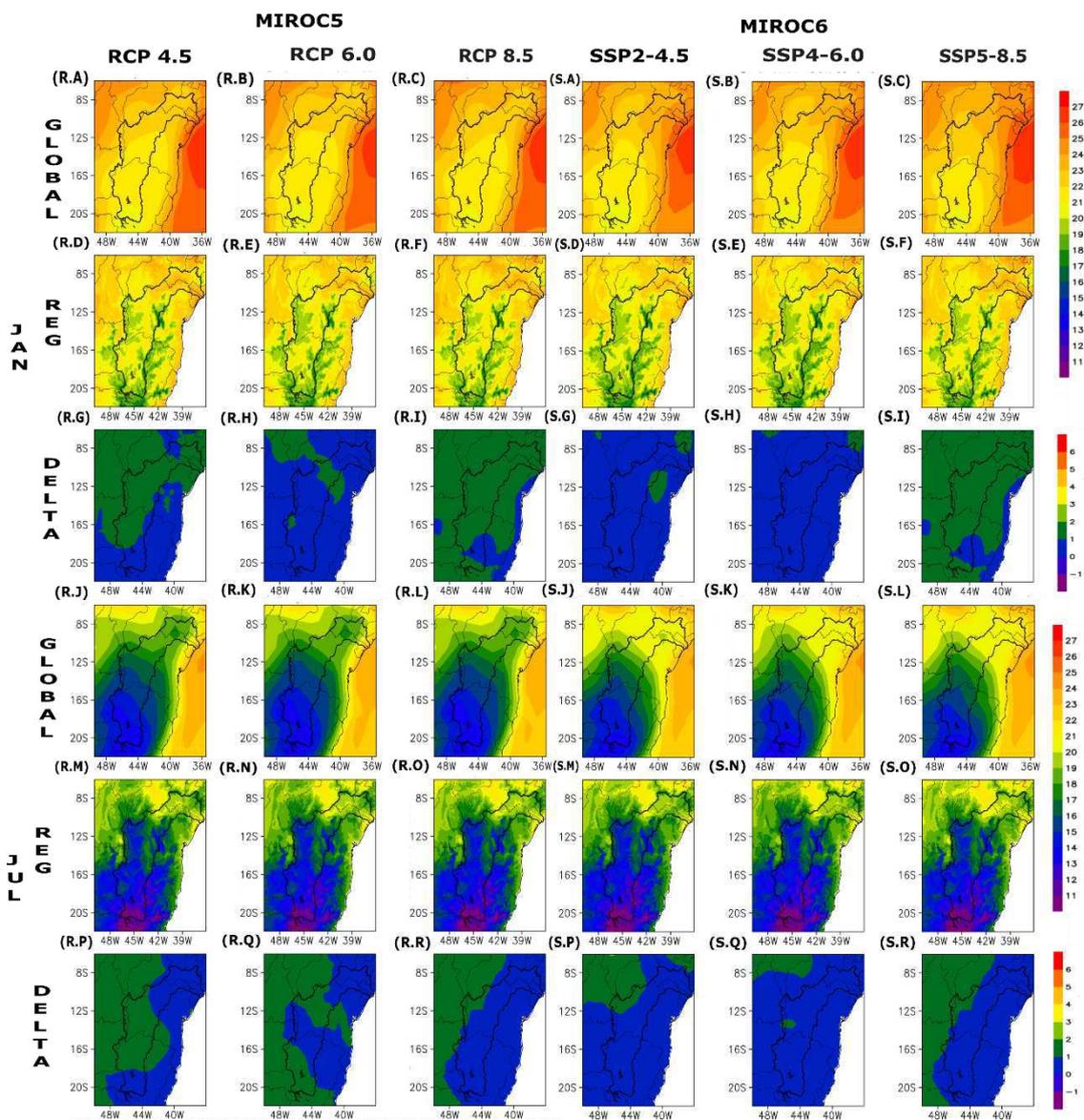


Figura 22. Climatologia das temperaturas mínima de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSF no futuro próximo (2021 – 2046) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).

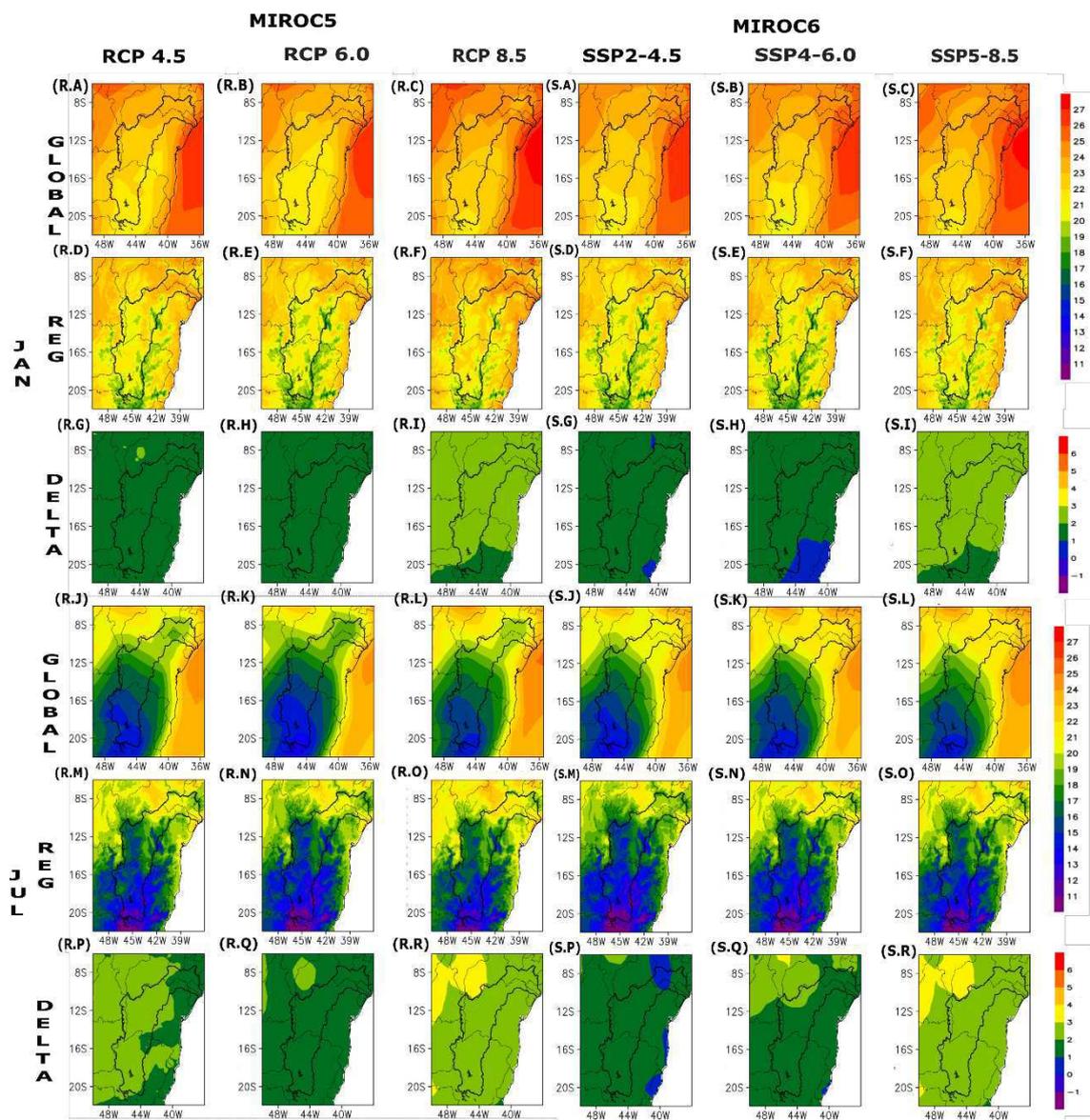


Figura 23. Climatologia das temperaturas mínima de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSF no futuro intermediário (2047 – 2072) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).

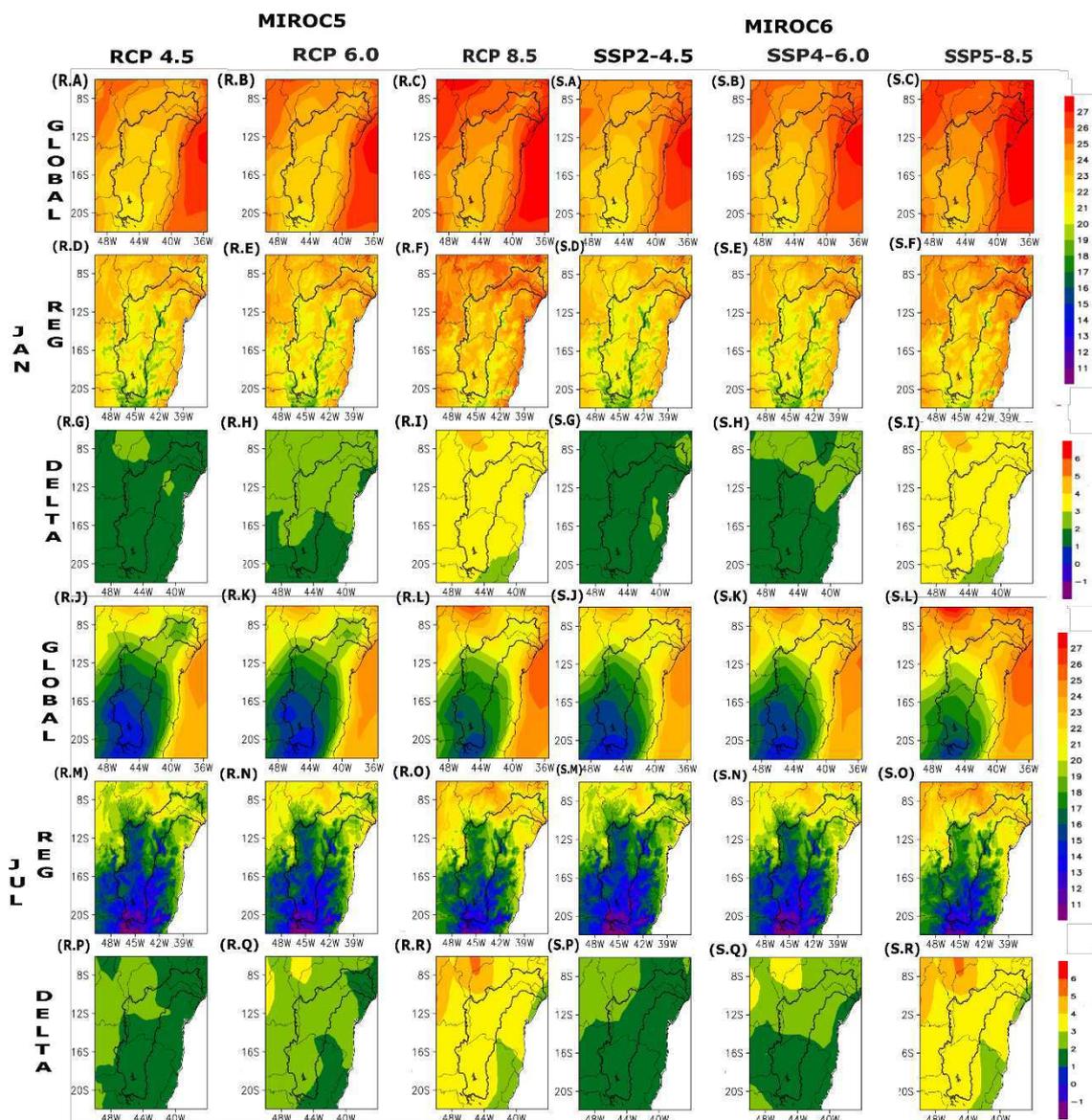


Figura 24. Climatologia das temperaturas mínima de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSF no futuro distante (2073 – 2099) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).

No futuro próximo das precipitações (Figura 21), os modelos originais continuam apresentando um grande volume de precipitação em grande parte da bacia, especialmente no ASF e MSF, em todos os cenários dos dois modelos estudados. Na regionalização, o volume de precipitação é drasticamente reduzido em toda a bacia, principalmente nos cenários de emissões do MIROC6, quando se observavam valores próximos ou superiores a 400 mm no modelo original. Na regionalização, esses valores passam a ser inferiores a 290 mm, indicando uma grande variação no delta do mês de janeiro em todos os cenários. Algo similar ocorreu nas análises das calibrações e validação, onde os modelos originais superestimaram as precipitações (Figura 10 e Figura 11) e tiveram seus valores reduzidos

na regionalização, tornando-se mais próximos do observado. Assim, é possível afirmar que as precipitações das regionalizações devem ser mais acertadas. No mês de julho, as precipitações são muito baixas em grande parte da bacia, com mudanças entre o original e o regionalizado ocorrendo apenas na região leste do BSF, refletindo na pequena variação do delta.

Para o futuro intermediário (Figura 22), o acumulado de precipitação dos modelos originais aumentou em relação ao futuro anterior, enquanto a regionalização indica precipitações menores tanto em relação aos modelos originais quanto à regionalização do futuro próximo. Isso sugere que deve haver uma diminuição das precipitações com o tempo em todas as regiões da bacia, com destaque para a região do BSF e SMSF, onde as precipitações variam entre 50 e 115 mm. O mês de julho segue o padrão do futuro anterior, com precipitação apenas no leste do BSF. Os resultados de delta também são similares aos vistos no futuro próximo, tanto nos meses de janeiro quanto julho.

Por último, no futuro distante (Figura 23), os padrões espaciais de acumulado de precipitação são parecidos com os vistos nos futuros próximos e intermediários nos modelos originais e regionalizados, com destaque para a redução dos acumulados em grande parte da bacia (entre 50 e 110 mm) no cenário de SSP2-4.5 no mês de janeiro. Os demais cenários regionalizados continuam indicando precipitações superiores a 330 mm no mês de janeiro no sul do ASF. Resultados de delta nos meses de janeiro e julho, além do acumulado de precipitação em julho, seguem os padrões vistos anteriormente.

Devido ao alto valor de viés dos modelos, mesmo após a regionalização, e as incertezas que esse viés traz, os resultados de precipitação podem ter sua confiabilidade reduzida. É preciso considerar o viés das regionalizações para a análise das precipitações. Os resultados espaciais de alguns cenários indicam que as precipitações não devem

diminuir com o tempo, mas quando considerado o viés da validação, é possível que a precipitação seja reduzida em relação ao período histórico.

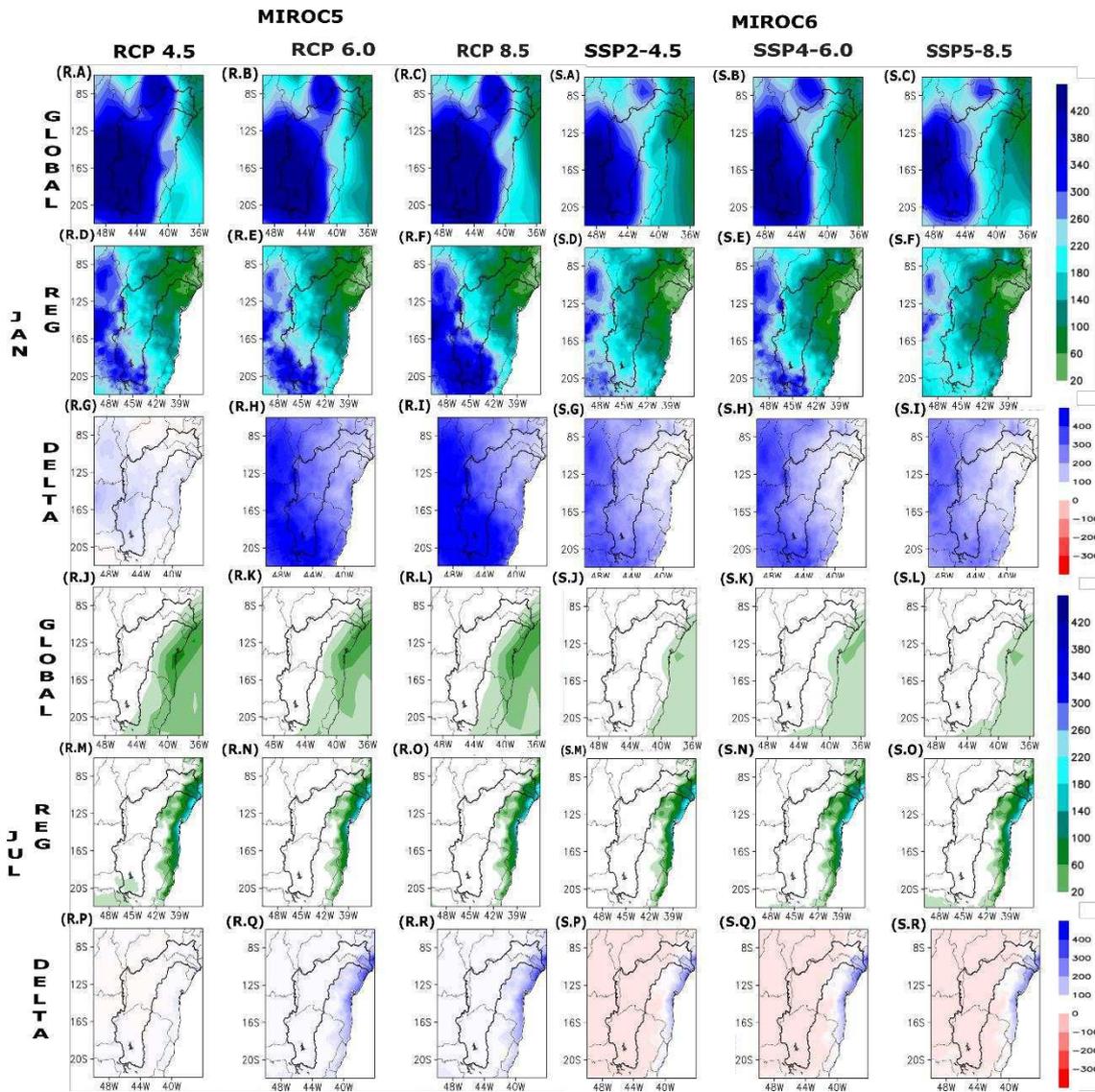


Figura 25. Climatologia das precipitações de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSF no futuro próximo (2021 – 2046) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).

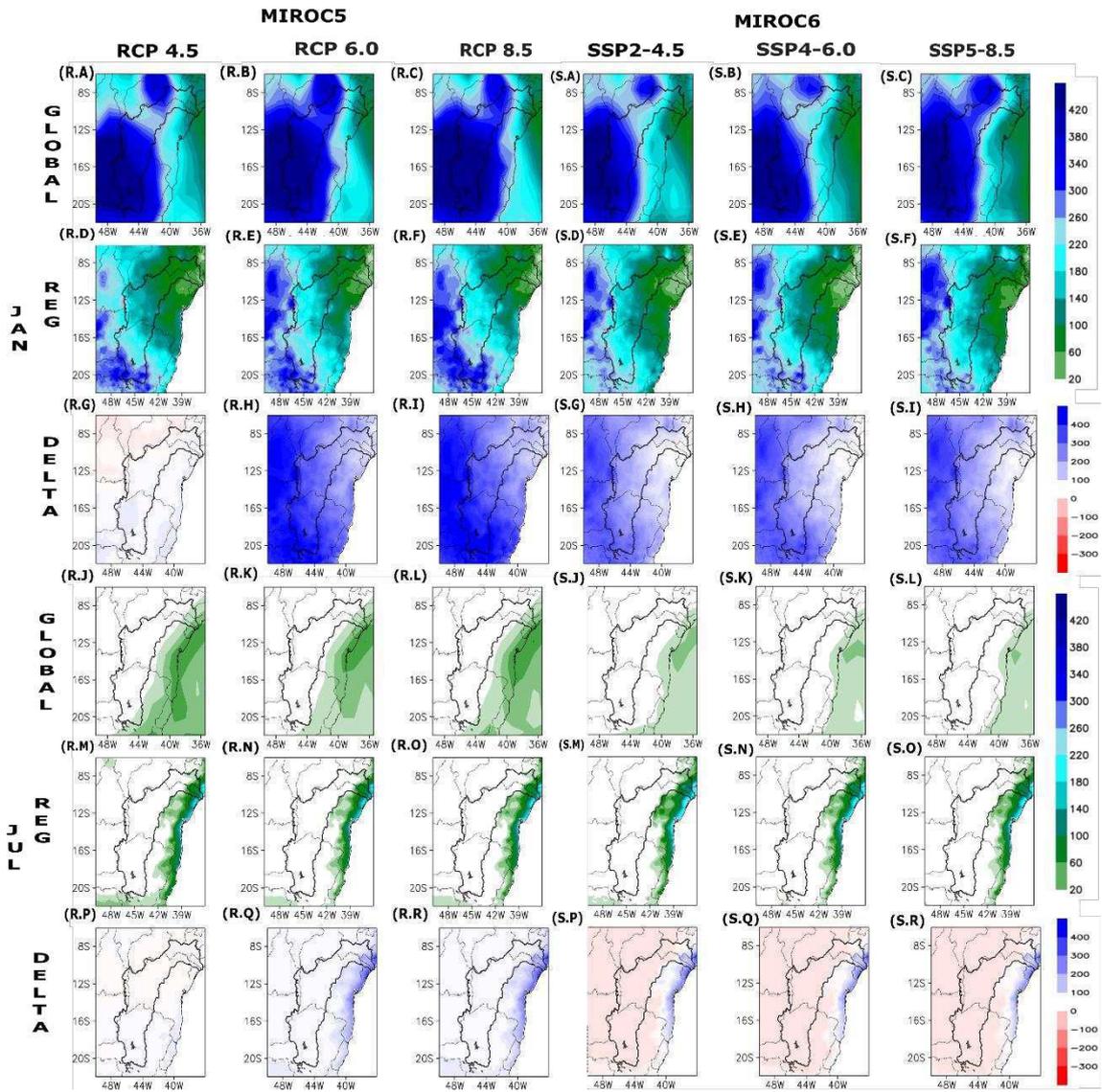


Figura 26. Climatologia das precipitações de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSF no futuro intermediário (2047 – 2072) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).

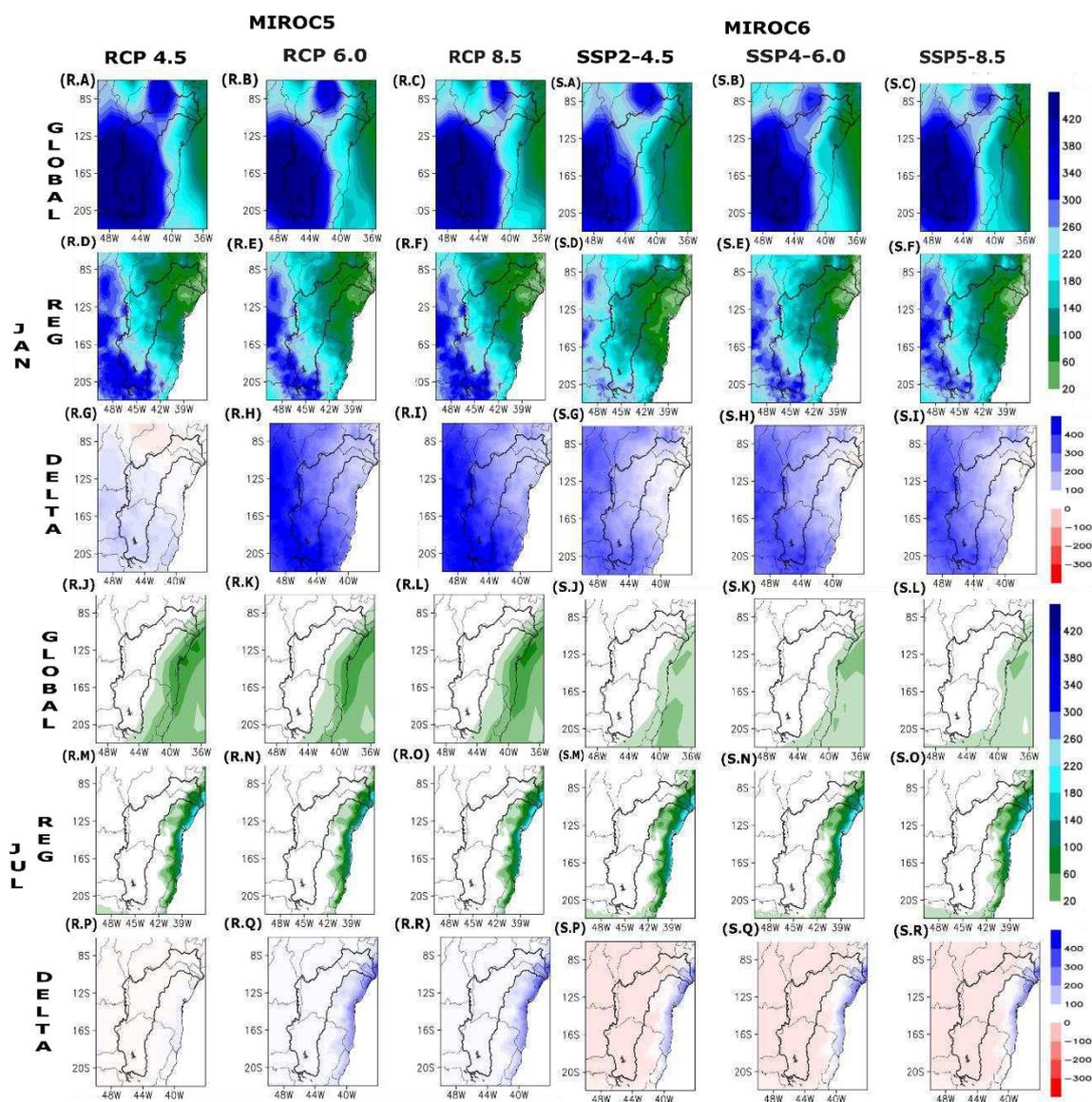


Figura 27. Climatologia das precipitações de janeiro e julho do modelo original (linhas 1 e 4), regionalizado (linha 2 e 5) e diferença com relação ao período histórico (delta, linha 3 e 6) para MIROC5 (R.A – R.R) e MIROC6 (S.A – S.R) na região da BHSF no futuro distante (2073 – 2099) para RCP/SSP2. 4.5 (A/B.1), RCP/SSP4. 6.0 (A/B.2) e RCP/SSP5. 8.5 (A/B.3).

Analisando as séries temporais dos cenários de emissões para toda a BHSF (conforme apresentado na figura 24), nota-se uma inclinação de aumento nas temperaturas máximas e mínimas nos três cenários de RCP/SSPs estudados, com os maiores aumentos ocorrendo no cenário de SSP5-8.5, intensificando-se a partir da metade do futuro intermediário, tanto para o MIROC5 quanto para o MIROC6. As temperaturas máximas projetadas pelo MIROC6 são ligeiramente mais elevadas em comparação com o MIROC5 para o futuro distante. Em relação às precipitações diárias, o MIROC5 aponta para uma inclinação de estabilidade nas precipitações até o final do século, enquanto o

MIROC6 sugere uma leve diminuição. O SSP2-4.5, por sua vez, exibe um pico de precipitação no início do futuro intermediário e uma redução no final do século.

No que diz respeito às sub-regiões da BHSF, a Figura 25 ilustra as temperaturas máximas para o BSF, SMSF, MSF e ASF, indicando que todas essas áreas devem experimentar um aumento nas temperaturas em todos os cenários. As regiões MSF e SMSF apontam as maiores temperaturas em ambos os modelos, com um aumento de cerca de 2°C até o final do século. É relevante destacar o aumento mais acentuado das temperaturas máximas em SSP5-8.5 a partir do início do futuro intermediário no MSF. O BSF, por outro lado, é a região com a menor propensão ao aumento, prevendo elevações inferiores a 1°C até o final do século.

Nas sub-regiões da bacia, as temperaturas mínimas (ilustrado na Figura 26) também indicam um aumento significativo até o final do século em todos os cenários, com acréscimos superiores a 2°C, especialmente para RCP 8.5 e SSP5-8.5 nas regiões MSF e SMSF. No ASF, as temperaturas entre os cenários apresentam pouca diferença absoluta, sendo que RCP 8.5 (MIROC5) mostra um aumento mais intenso entre o final do futuro intermediário e o início do futuro distante, enquanto o MIROC6 indica um aumento abrupto das temperaturas mínimas na metade do futuro distante, destacando que o aumento das mínimas será mais pronunciado do que o das máximas. Esse aumento das temperaturas mínimas pode contribuir para o estresse térmico, impactando negativamente na agricultura e na saúde humana, entre outros (MORA et al., 2017).

Da mesma forma que observado na média da BSHF, as precipitações por região (Figura 27) apontam uma leve redução em todas as sub-regiões, com inclinações bastante similares entre os cenários. A região do BSF registra as menores médias de precipitação, enquanto a região do ASF apresenta a maior propensão à diminuição no cenário de RCP 8.5. Essa redução nas precipitações na região está em concordância com os resultados de estudos anteriores, como os de ASSIS (2016) e ASSIS; SOBRAL; SOUZA (2012).

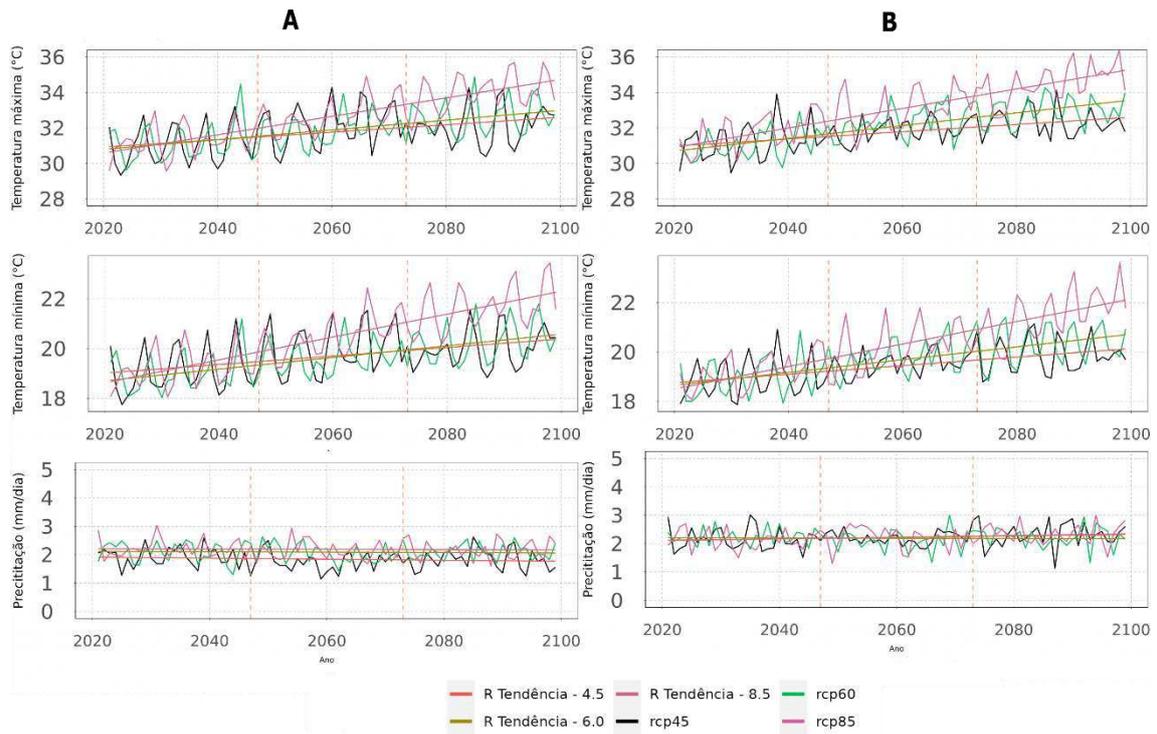


Figura 28. Série temporal e inclinação de temperatura máxima, mínima e precipitação para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco de 2021 a 2099. Linhas verticais na cor laranja indicam o futuro próximo, intermediário e distante para MIROC5 (esquerda) e MIROC6 (direita).

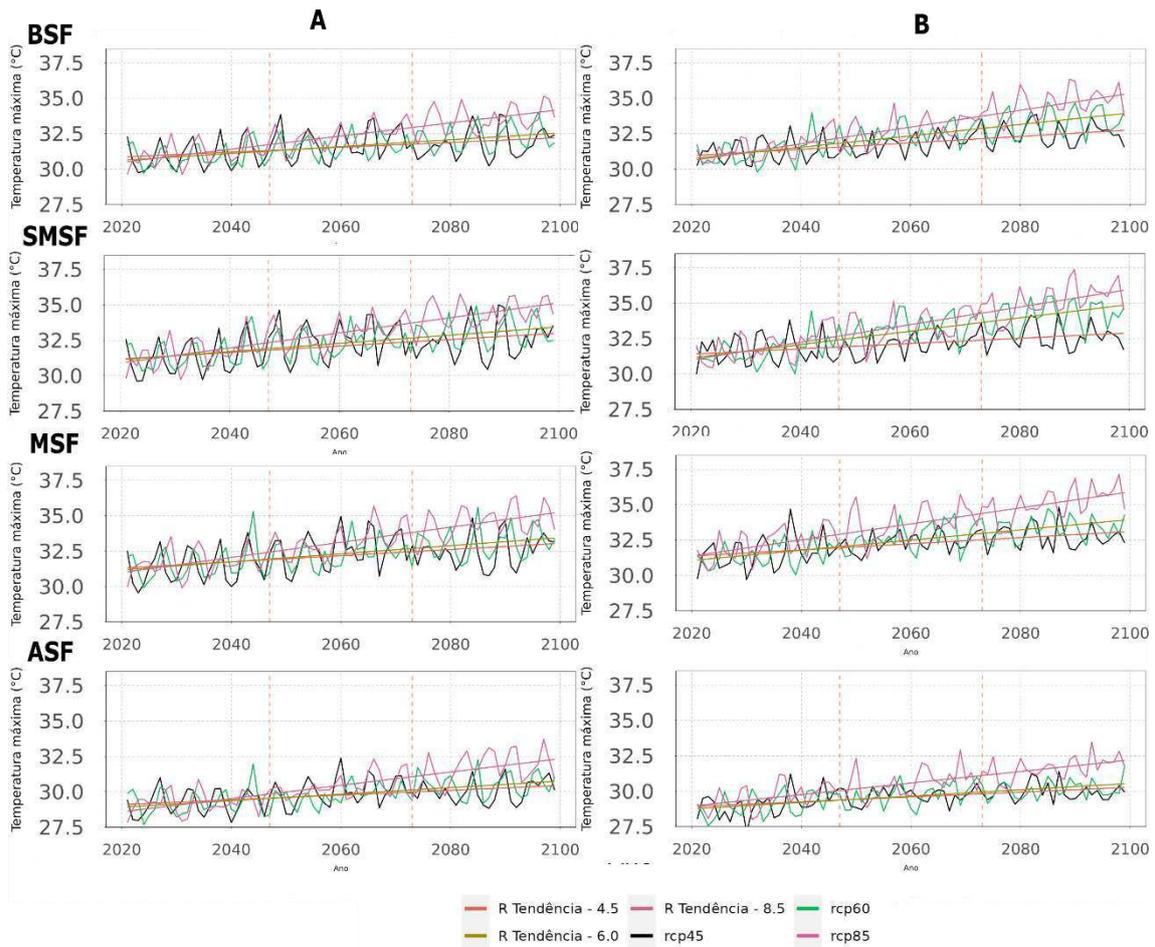


Figura 29. Série temporal e inclinação de temperatura máxima para as quatro sub-regiões da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (Baixo, Submédio, Médio e Alto) de 2021 até 2099, considerando os modelos MIROC5 (coluna A) e MIROC6 (coluna B). Linhas verticais na cor laranja separam o futuro próximo, intermediário e distante.

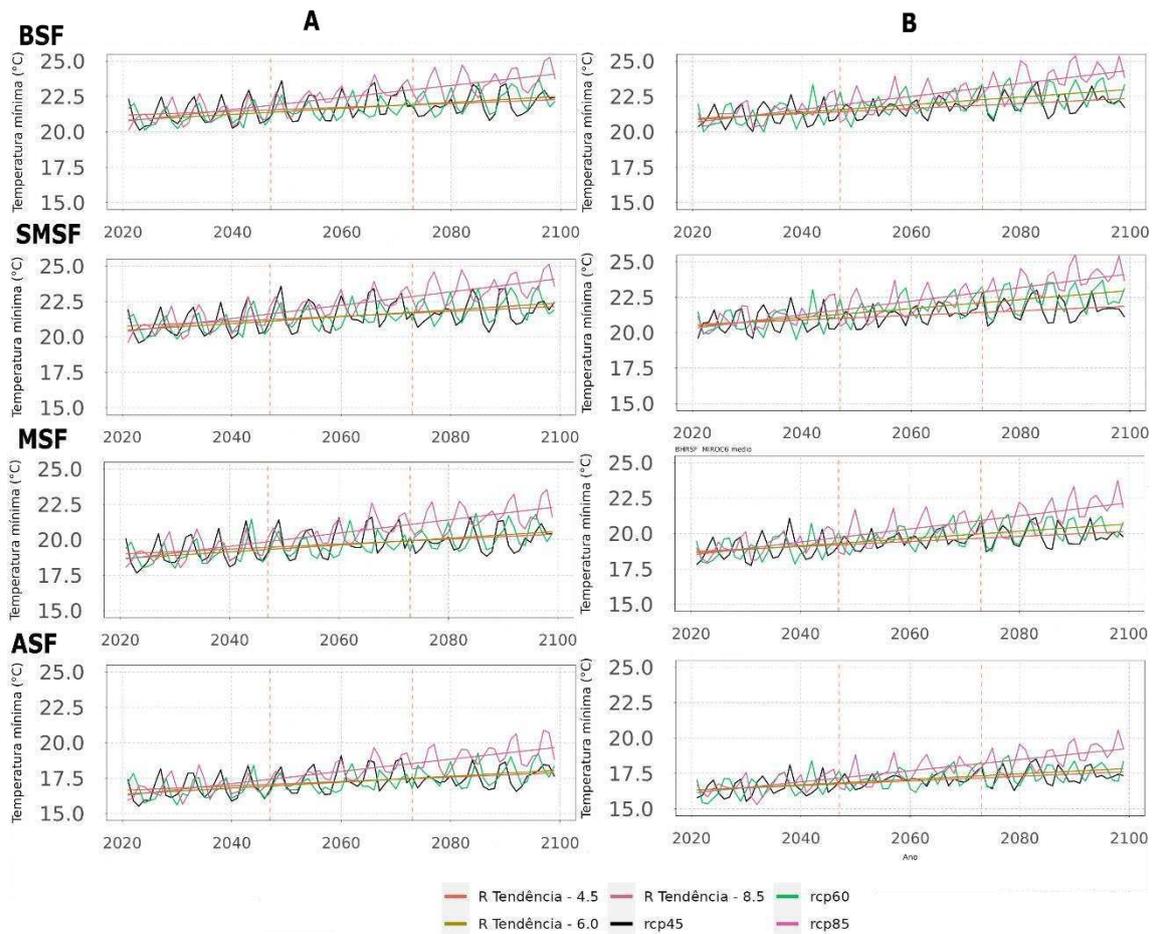


Figura 30. Série temporal e inclinação de temperatura mínima para as quatro sub-regiões da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (Baixa, Submédica, Médica e Alta) de 2021 até 2099, considerando os modelos MIROC5 (coluna A) e MIROC6 (coluna B). Linhas verticais na cor laranja separam o futuro próximo, intermediário e distante.

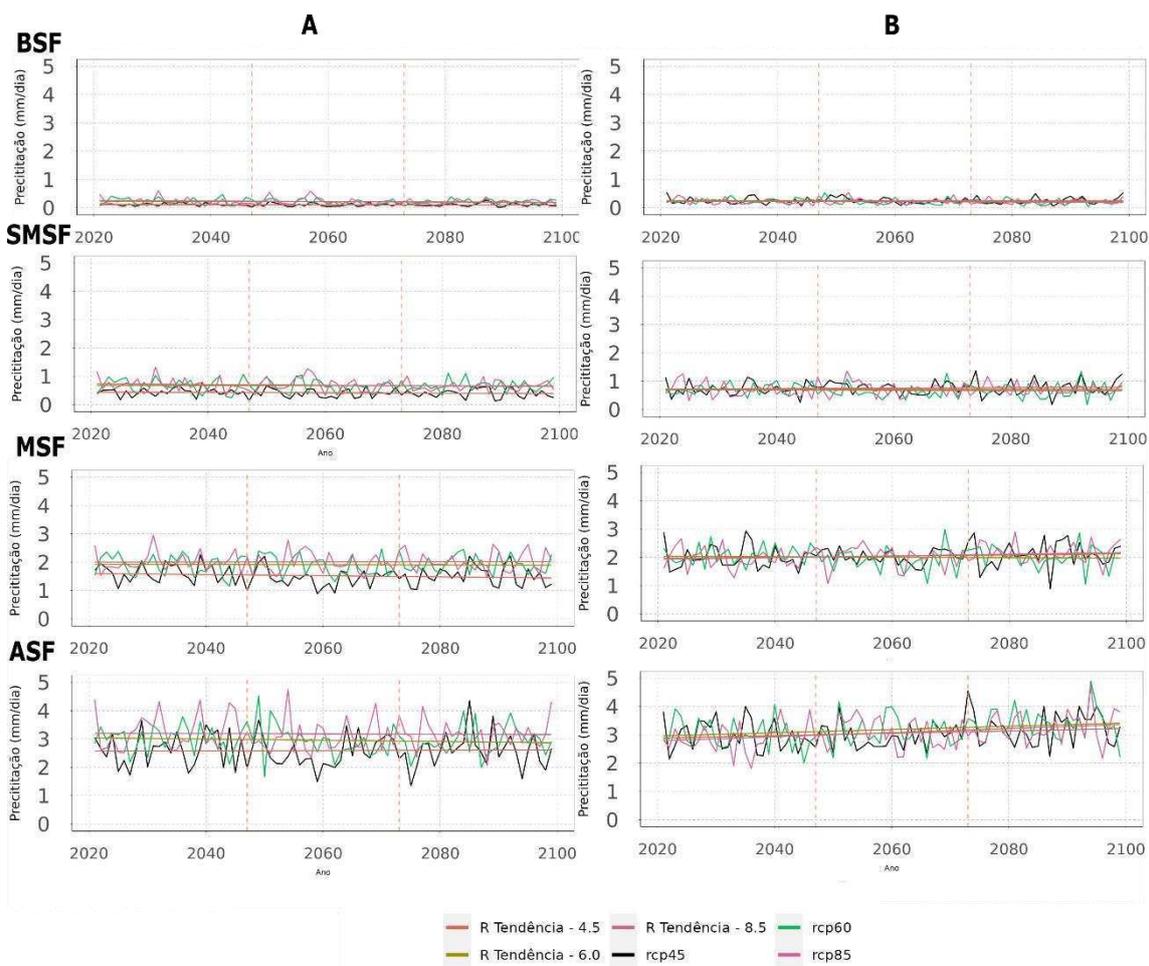


Figura 31. Série temporal e inclinação de precipitação para as quatro sub-regiões da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (Baixo, Submédio, Médio e Alto) de 2021 até 2099, considerando os modelos MIROC5 (coluna A) e MIROC6 (coluna B). Linhas verticais na cor laranja separam o futuro próximo, intermediário e distante.

5 Conclusão

O método BCCAQ, proposto neste projeto para realizar o *downscaling* estatístico na Bacia do Rio São Francisco, mostrou-se satisfatório para os parâmetros analisados (temperatura máxima, mínima e precipitação) no período histórico dos modelos MIROC5 e MIROC6. Ao compararmos as métricas, observamos uma melhoria do *downscaling* com BCCAQ em relação aos MCGs. O viés de precipitação após o BCCAQ foi reduzido em comparação com os modelos originais.

Para os cenários futuros, projeta-se um aumento nas temperaturas mínimas e máximas em todas as regiões da bacia, especialmente no BSF, SMSF e MSF. Essas últimas estão predominantemente concentradas na região do semiárido brasileiro, com aumentos de até 1°C (RCP 4.5), 2°C (RCP 6.0) e 5°C (RCP 8.5) para o modelo MIROC5. Para o modelo MIROC6, espera-se um aumento de 2°C (SSP2-4.5), 3°C (SSP4-6.0) e mais de 6°C (SSP5-8.5), com SMSF e MSF atingindo temperaturas superiores a 36°C no cenário SSP5-8.5, sendo o ASF a região com os menores aumentos, com valores em torno de ~2°C em RCP/SSP 4.5, RCP/SSP 6.0 e até 4°C em RCP/SSP 8.5.

As temperaturas mínimas também apontam para valores superiores a 5°C nos cenários de altas emissões e 2°C para RCP/SSP 4.5, RCP/SSP 6.0, nas quatro sub-regiões. Em relação às precipitações, apenas a região do MSF e ASF indicam aumento de até 2 mm/dia na regionalização do MIROC5, enquanto que para regionalização do MIROC6, prevê-se aumentos inferiores a 1mm/dia para os três cenários. No BSF e MSF, ambos os modelos regionalizados indicam um cenário estável de baixa precipitação.

O MIROC6 apresentou melhores resultados nas métricas e nas análises do período de calibração e validação. Em sua regionalização, o MIROC6 mostra-se mais eficiente, sendo preferível para análises de outros parâmetros e variáveis para essa região.

Considerando os resultados satisfatórios para a Bacia do São Francisco, o método pode ser aplicado para outras regiões do Brasil, utilizando também os dados fornecidos por Xavier et al. (2022).

O uso de apenas dois MCGs traz algumas limitações quanto a destreza do *downscaling* estatístico para projeções futuras, assim, para estudos futuros faz-se necessário adotar uma abordagem utilizando um conjunto *Multi-model ensemble* já que essa é uma das principais vantagens para o uso de modelos de *downscaling* como o BCCAQ usado.

6 Referências bibliográficas

ALMAZROUI, M. et al. Future Changes in Climate over the Arabian Peninsula based on CMIP6 Multimodel Simulations. **Earth Systems and Environment**, v. 4, n. 4, p. 611–630, 1 dez. 2020.

ALVES, J. et al. PRECIPITAÇÃO PLUVIAL MENSAL EM UBERLÂNDIA-MG OBTIDA POR DIFERENTES FONTES DE DADOS. **Revista brasileira de climatologia**, v. 31, p. 26–48, 2022.

ASSIS, J. M. O. DE. **Variabilidade do Clima e Cenários Futuros de Mudanças Climáticas no Trecho Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, nov. 2016.

ASSIS, J.; SOBRAL, M.; SOUZA, W. Análise de Detecção de Variabilidades Climáticas com Base na Precipitação nas Bacias Hidrográficas do Sertão de Pernambuco (Analysis of Climate Variability Detection Based on Watershed Precipitation in the Sertão of Pernambuco). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, p. 630, 5 nov. 2012.

BORGES DE AMORIM, P.; CHAFFE, P. B. Towards a comprehensive characterization of evidence in synthesis assessments: the climate change impacts on the Brazilian water resources. **Climatic Change**, v. 155, n. 1, p. 37–57, 2019.

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.

BROWN, C. et al. REVIEW OF DOWNSCALING METHODOLOGIES FOR AFRICA CLIMATE APPLICATIONS. **International Research Institute for Climate and Society**, 2008.

CABRAL, S. L. et al. Análise da modelagem dinâmica da precipitação em uma bacia hidrográfica no semiárido. **XX simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 8, 2013.

CALVIN, K. et al. **IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. [s.l: s.n.].**

CHEN, Y.; LIU, A.; CHENG, X. Quantifying economic impacts of climate change under nine future emission scenarios within CMIP6. **Science of The Total Environment**, v. 703, p. 134950, 10 fev. 2020.

COSTA, R. L. et al. Cenários de Mudanças Climáticas para a Região Nordeste do Brasil por meio da Técnica de Downscaling Estatístico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. spe, p. 785–801, 2020.

COSTA, R. L. et al. Analysis of future climate scenarios for northeastern Brazil and implications for human thermal comfort. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, n. 1, p. 1–23, 2021.

DA SILVA, F.; IVALDO, J.; BRITO, B. Variabilidade do vento na bacia hidrográfica do rio São Francisco durante a ocorrência da ZCAS. **Ambiência**, v. 4, p. 228–243, 2009.

DE JONG, P. et al. Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. **Science of The Total Environment**, v. 634, p. 1540–1553, 2018.

DE OLIVEIRA, L. P. M. et al. Impact of climate change on sugarcane yield in Maceió. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. Special Issue, p. 969–980, 1 out. 2020.

DE SOUZA NETO, P. F. et al. Evaluation of Cumulus Parameterization of the Regional Climate Model in the São Francisco River Basin. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 38, 2023.

DOS SANTOS SILVA, F. D. et al. Climate scenarios and cotton yield in northeast Brazil. part ii: Simulation for 2020 to 2080. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. Special Issue, p. 913–929, 1 out. 2020.

FAUZI, F.; KUSWANTO, H.; ATOK, R. M. **Bias correction and statistical downscaling of earth system models using quantile delta mapping (QDM) and bias correction constructed analogues with quantile mapping reordering (BCCAQ)**. Journal of Physics: Conference Series. **Anais...**Institute of Physics Publishing, 19 jun. 2020.

FREITAS, A. A. **Avaliando os padrões atmosféricos e oceânicos durante eventos de seca no Brasil: o estudo de caso das bacias do São Francisco e Paraná**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2022.

GEBRECHORKOS, S. et al. A high-resolution daily global dataset of statistically downscaled CMIP6 models for climate impact analyses. **Scientific Data**, v. 10, n. 1, 1 dez. 2023.

HAMLET, A. F.; SALATHÉ, E. P.; CARRASCO, P. Statistical Downscaling Techniques for Global Climate Model Simulations of Temperature and Precipitation with Application to Water Resources Planning Studies. 2010.

HEWITSON, B. , A. C. J. T. R. C. F. G. R. G. J. W.-T. K. L. O. M. E. L. F. S. AND M. VAN A. **Regional context. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge: [s.n.].

HEWITSON, B. C. et al. Interrogating empirical-statistical downscaling. **Climatic Change**, v. 122, n. 4, p. 539–554, 1 fev. 2014.

HIDALGO, H.; DETTINGER, M. D.; CAYAN, D. R. Downscaling with Constructed Analogues: Daily precipitation and temperature fields over the United States. **Public Interest Energy Research**, 2008.

HIEBERT, J. et al. ClimDown: Climate Downscaling in R. **The Journal of Open Source Software**, v. 3, n. 22, p. 360, 28 fev. 2018.

HUNTER, R. D.; MEENTEMEYER, R. K. Climatologically Aided Mapping of Daily Precipitation and Temperature. **JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY**, v. 44, 27 abr. 2005.

LIMA, JOSÉ PEDRO REBÉS; ALVES, JOSÉ MARIA BRABO. Um estudo de downscaling dinâmico de precipitação intrasazonal acoplado a modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica alto-médio são Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 323–338, 2009.

MARAUN, D. et al. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 3, p. 1–34, 2010.

MARAUN, D. et al. VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. **Earth's Future**, v. 3, n. 1, p. 1–14, 1 jan. 2015.

MARAUN D, W. M. DEDICATION. Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research. Em: MARAUN, D.; WIDMANN, M. (Eds.). **Cambridge University Press**. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. p. v–vi.

MARAUN, D.; WIDMANN, M.; GUTIÉRREZ, J. M. Statistical downscaling skill under present climate conditions: A synthesis of the VALUE perfect predictor experiment. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 9, p. 3692–3703, 1 jul. 2019.

MAURER, E. P.; HIDALGO, H. G. Hydrology and Earth System Sciences Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 12, p. 551–563, 2008.

MEEHL, G. A. et al. THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 88, n. 9, p. 1383–1394, 2007.

MELNIKOVA, I. et al. Carbon Cycle Response to Temperature Overshoot Beyond 2°C: An Analysis of CMIP6 Models. **Earth's Future**, v. 9, n. 5, 1 maio 2021.

MIRANDA, P. T. et al. River discharge in South America: agreement and contradictions between recent alteration and projected changes. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 28, 2023.

MOREIRA JÚNIOR, O.; COMUNELLO, E.; FIETZ, C. R. Qualidade da radiação solar global de diferentes bases digitais para Mato Grosso do Sul. **Agrometeoros**, v. 28, 6 abr. 2020.

NIU, J. et al. Projection of future carbon benefits by photovoltaic power potential in China using CMIP6 statistical downscaling data. **Environmental Research Letters**, v. 18, n. 9, 1 set. 2023.

O'NEILL, B. C. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 28 set. 2016.

PALENZUELA, Y. GUANCHE. **Estudo de Mecanismos Dinâmicos Responsáveis pela Ocorrência de Chuvas Extremas na Bacia Hidrográfica do Alto São Francisco**. Campina grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2022.

PENG, S. et al. Climate change multi-model projections in CMIP6 scenarios in Central Hokkaido, Japan. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, 1 dez. 2023.

RANASINGHE, R. , A. C. R. R. V. N. A. E. C. F. A. C. S. D. A. S. I. M. R. D. R. C. J. S. M. B. S. C. T. W. W. AND R. Z. Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. Em: **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis**. [s.l.] Cambridge University Press, 2023. p. 1767–1926.

SALATHE JR, E. P.; MOTE, P. W.; WILEY, M. W. Review of scenario selection and downscaling methods for the assessment of climate change impacts on hydrology in the United States pacific northwest. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 12, p. 1611–1621, 2007.

SHRESTHA, R. R. et al. Evaluating hydroclimatic change signals from statistically and dynamically downscaled GCMs and hydrologic models. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 2, p. 844–860, 2014.

SIAN, K. T. C. L. K. et al. Multi-decadal variability and future changes in precipitation over Southern Africa. **Atmosphere**, v. 12, n. 6, 1 jun. 2021.

SILVA, C. M. et al. Dynamical downscaling of the precipitation in Northeast Brazil with a regional climate model during contrasting years. **Atmospheric Science Letters**, v. 15, n. 1, p. 50–57, 2014.

SILVEIRA, C. DA S. et al. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 416–428, 2016.

SOBIE, S. R.; MURDOCK, T. High-Resolution Statistical Downscaling in Southwestern British Columbia. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 56, p. 1625–1641, 2017.

TATEBE, H. et al. Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 7, p. 2727–2765, 8 jul. 2019.

TEBALDI, C. et al. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. **Earth System Dynamics**, v. 12, n. 1, p. 253–293, 1 mar. 2021.

VANO, J. A. et al. **DOs and DON'Ts for using climate change information for water resource planning and management: guidelines for study design**. **Climate Services** Elsevier B.V., , 1 dez. 2018.

VEBER, P. M. et al. Análise de consistência entre dados interpolados e observados de precipitação do município de Pelotas/RS. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 6, p. 5993–6000, 2019.

WERNER, A. T.; CANNON, A. J. Hydrologic extremes - An intercomparison of multiple gridded statistical downscaling methods. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 4, p. 1483–1508, 19 abr. 2016.

WILBY, R. L. et al. A review of climate risk information for adaptation and development planning. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 9, p. 1193–1215, 2009.

XAVIER, A. C. et al. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390–8404, 2022.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

YANG, Y. et al. An intercomparison of multiple statistical downscaling methods for daily precipitation and temperature over China: present climate evaluations. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 7–8, p. 4629–4649, 1 out. 2019.