

**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

Pedro Fernandes de Souza Neto

**MODELAGEM REGIONAL HIDROCLIMÁTICA DA BACIA
DO RIO SÃO FRANCISCO**

Campina Grande, Março de 2022

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

MODELAGEM REGIONAL HIDROCLIMÁTICA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Pedro Fernandes de Souza Neto

Campina Grande – Paraíba

2022

PEDRO FERNANDES DE SOUZA NETO

MODELAGEM REGIONAL HIDROCLIMÁTICA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientadora: Prof^ª. Dr. Sandra Isay Saad

Coorientador: Prof. Dr. Jonathan Mota da Silva

Área de concentração: Meteorologia de meso e grande escalas

Sub-áreas: Climatologia e Hidrometeorologia.

Campina Grande – PB

2022

S729m Souza Neto, Pedro Fernandes de.
Modelagem regional hidroclimática da bacia do Rio São Francisco
/ Pedro Fernandes de Souza Neto. - Campina Grande, 2022.
76 f. il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.
"Orientação: Prof^a. Dra. Sandra Isay Saad, Prof. Dr. Jonathan Mota
da Silva."

Referências.

1. Bacia Hidrográfica - Climatologia. 2. Hidroclimatologia. 3.
Modelagem Hidroclimática. 4. Modelo RegCM. I. Saad, Sandra Isay. II.
Silva, Jonathan Mota da. III. Título.

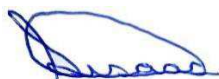
CDU 556.51:551.58 (043)

PEDRO FERNANDES DE SOUZA NETO

MODELAGEM REGIONAL HIDROCLIMÁTICA DA BACIA DO RIO SÃO
FRANCISCO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 03/03/2022

BANCA EXAMINADORA



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



Prof. Dr. JONATHAN MOTA DA SILVA
Centro de Ciências Exatas
Universidade Federal do Rio Grande do Norte



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



Profa. Dra. MARTA PEREIRA LLOPART
Instituto de Pesquisas Meteorológicas
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ter cuidado e me capacitado durante todo esse tempo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro nesses dois anos.

Aos meus orientadores, Prof.^a Dra. Sandra Isay Saad e Prof. Dr. Jonathan Mota da Silva por toda paciência, atenção e colaboração durante esse período.

Aos professores do DCA/UFCG que foram fundamentais durante toda a pós-graduação.

Aos amigos do curso, principalmente os que estiveram comigo durante toda essa caminhada, em especial ao pessoal do grupo “Os aventureiros de CG” e a Ingrid.

Aos meus pastores Rev. Célio Miguel e Rev. Phillippe Almeida e ao grupo “Marca da Promessa”, por suas orações.

A minha família e amigos, que sempre estiveram ao meu lado apoiando, incentivando e dando força. Em especial a minha mãe Sony e meu pai Kemuel, aos meus irmãos Khwesten e Victor, a minha cunhada Izabella, todas as minhas tias, em especial Sandra, Solange, Sonja, Solemar, Silvana e Simone por todo apoio, aos meus primos, em especial Kamila e Diego e por último, aos meus amigos Arthur, Alessandro, Guilherme e Eduardo.

À memória de minha avó Enaura Carvalho e Silva.

À memória do meu avô Pedro Fernandes de Sousa.

RESUMO

A bacia hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) é a principal bacia do sistema hídrico do Nordeste brasileiro devido à sua capilaridade nos sistemas hídricos desta região contribuindo para assegurar a disponibilidade hídrica de diversos estados do Nordeste. Simular os padrões de chuva e escoamento dessa bacia ao longo das suas quatro regiões fisiográficas, divisão espacial ao longo do rio principal, é substancialmente estratégico para a gestão dos recursos hídricos dos Estados que se beneficiam com uso da água desta bacia. Assim, o objetivo deste estudo foi analisar a hidroclimatologia da bacia do Rio São Francisco com uso de modelagem regional climática. Neste sentido, foi utilizado o modelo climático RegCM para as simulações da precipitação, temperatura, evapotranspiração potencial e escoamento na bacia do Rio São Francisco para um período de dez anos (2000 até 2010). O modelo foi integrado utilizando como condição inicial e de fronteira lateral os dados de reanálises do ERA-interim. Testes de sensibilidade das parametrizações de cúmulos no oceano e no continente foram realizados devido à estreita relação da precipitação com o escoamento, e a incerteza na escolha dessa parametrização nas simulações. Nestes testes foi avaliada a parametrização mais adequada na representação dos padrões de precipitação na bacia. Tal avaliação foi conduzida a partir de uma análise objetiva com uso de funções que quantificam a destreza da chuva simulada em relação à chuva observada de três diferentes fontes. A incerteza na definição do domínio de grade utilizado nas simulações motivou a realização de um teste de sensibilidade para avaliar esse aspecto, configurado assim: o primeiro teste, com um domínio maior, e o segundo com um domínio menor, cujos limites possuem uma configuração significativamente afastada e próxima da bacia, respectivamente. De maneira geral, entre as parametrizações avaliadas, a de Emanuel, tanto no oceano quanto no continente, foi a que melhor representou a precipitação na bacia, e com uso de um maior domínio de grade. Quanto à modelagem hidroclimática, o modelo simulou satisfatoriamente os padrões sazonais e anuais da chuva, a evapotranspiração e escoamento da bacia. As sub-bacias do Submédio e Alto São Francisco apresentaram os melhores resultados na simulação da chuva e evapotranspiração potencial. Contudo, embora as simulações representem os padrões hidroclimáticos da bacia, a chuva e a evapotranspiração potencial foram subestimadas, o que implicou em uma superestimativa do escoamento na bacia. A continuidade de estudos de modelagem hidroclimática com o RegCM na BHSF requerem uma análise e prováveis aperfeiçoamentos no módulo de superfície do modelo com a finalidade de ajustar a evapotranspiração simulada, e por conseguinte, ajustar a precipitação e o escoamento na bacia.

ABSTRACT

The São Francisco River basin (BHSF) is the main basin of the Brazilian Northeast water system due to its capillarity in the water systems of this region, contributing to ensure the water availability of several states in the Northeast. Simulating the rainfall and runoff patterns of this basin along its four physiographic regions, spatial division along the main river, is substantially strategic for the management of water resources in the States that benefit from the use of water in this basin. Thus, the objective of this study was to analyze the hydroclimatology of the São Francisco River basin using regional climate modeling. In this sense, the RegCM climate model was used to simulate precipitation, temperature, potential evapotranspiration and runoff in the São Francisco River basin for a period of ten years (2000 to 2010). The model was integrated using ERA-interim reanalysis data as initial and lateral boundary conditions. Sensitivity tests of the cumulus parameterization in the ocean and on the continent were carried out due to the close relationship between precipitation and runoff, and the uncertainty in choosing this parameterization in the simulations. In these tests, the most adequate parameterization in the representation of precipitation patterns in the basin was evaluated. This evaluation was conducted from an objective analysis using functions that quantify the dexterity of the simulated rain in relation to the observed rain from three different sources. The uncertainty in the definition of the grid domain used in the simulations motivated the performance of a sensitivity test to evaluate this aspect, configured as follows: the first test, with a larger domain, and the second with a smaller domain, whose limits have a configuration significantly away from and close to the basin, respectively. In general, among the evaluated parameterizations, Emanuel's, both in the ocean and on the continent, was the one that best represented the precipitation in the basin, and with the use of a greater grid domain. As for hydroclimatic modeling, the model satisfactorily simulated seasonal and annual rainfall patterns, evapotranspiration and basin runoff. The Submédio and Alto São Francisco sub-basins presented the best results in the simulation of rainfall and potential evapotranspiration. However, although the simulations represent the hydroclimatic patterns of the basin, rainfall and potential evapotranspiration were underestimated, which implied an overestimation of runoff in the basin. The continuity of hydroclimatic modeling studies with RegCM at BHSF requires an analysis and probable improvements in the surface modulus of the model in order to adjust the simulated evapotranspiration, and therefore, adjust the precipitation and runoff in the basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da bacia hidrográfica do São Francisco a as sub-bacias. Fonte: Autor (2021).....	23
Figura 2: Representação dos domínios menor e maior.....	26
Figura 3: Precipitação acumulada do ano 2000 (mm) para: (observados) dos bancos de dado (Xavier, CHIRPS e MSWEP); domínio menor e maior, respectivamente, para as cinco parametrizações de cúmulos (Emanuel, Tiedtke, Kain Fritsch, Grell (A & S) e Grell (F & C).....	33
Figura 4: Precipitação mensal (mm) durante o ano de 2000 em cada sub-bacia do rio São Francisco, com o domínio maior.....	34
Figura 5: Precipitação mensal (mm) durante o ano de 2000 em cada sub-bacia do rio São Francisco com o domínio menor.....	35
Figura 6: Acumulado anual de precipitação (mm) em cada sub-bacia da BHSF.....	39
Figura 7: Precipitação média anual (mm) da BHSF.....	40
Figura 8: Precipitação média mensal (mm) durante o período de 2000 a 2010 em cada sub-bacia.....	41
Figura 9: Temperatura média anual (°C) da simulação da sub-bacias do São Francisco e a Temperatura média anual de Xavier (°C).....	42
Figura 10: Temperatura média anual (°C) da simulação e Xavier para toda BHSF.....	43
Figura 11: Temperatura média mensal (°C) durante o período de 2000 até 2010 para cada sub-bacia da BHSF.....	44
Figura 12: Evapotranspiração potencial média anual (mm) da simulação da sub-bacias do São Francisco e a evapotranspiração potencial média anual de Xavier (mm).....	45

Figura 13: Evapotranspiração potencial média anual (mm) da simulação e Xavier para toda BHSF.....	46
Figura 14: Evapotranspiração potencial média mensal (mm) durante o período de 2000 até 2010 para cada sub-bacia da BHSF.....	47
Figura 15: Escoamento médio anual (mm) da simulação e do observado para a área de drenagem da bacia contribuinte de Xingó.....	48
Figura 16: Escoamento médio mensal (mm) da simulação e dos dados observados.....	48
Figura 17: Viés e Corr da simulação da parametrização Emanuel com o domínio menor de grade horizontal de 40km com os dados observados.....	68
Figura 18: Viés e Corr da simulação da parametrização Tiedtke com o domínio menor de grade horizontal de 40km com os dados observados.....	68
Figura 19: Viés e Corr da simulação da parametrização Kain Fritsch com o domínio menor de grade horizontal de 40km com os dados observados.....	69
Figura 20: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Arakawa & Schubert) com o domínio menor de grade horizontal de 40km com os dados observados.....	69
Figura 21: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Fritsch & Chappell) com o domínio menor de grade horizontal de 40km com os dados observados.....	69
Figura 22: Viés e Corr da simulação da parametrização Emanuel com o domínio maior de grade horizontal de 40km com os dados observados.....	70
Figura 23: Viés e Corr da simulação da parametrização Tiedtke com o domínio maior de grade horizontal de 40km com os dados observados.....	70
Figura 24: Viés e Corr da simulação da parametrização Kain Fritsch com o domínio maior de grade horizontal de 40km com os dados observados.....	70
Figura 25: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Arakawa & Schubert) com o domínio maior de grade horizontal de 40 km com os dados observados.....	71
Figura 26: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Fritsch & Chappell) com o domínio maior de grade horizontal de 40km com os dados observados.....	71

Figura 27: Viés e Corr da simulação da parametrização Emanuel com o domínio menor e grade horizontal de 20km com os dados observados.....	71
Figura 28: Viés e Corr da simulação da parametrização Tiedtke com o domínio menor e grade horizontal de 20km com os dados observados.....	72
Figura 29: Viés e Corr da simulação da parametrização Kain Fritsch com o domínio menor e grade horizontal de 20km com os dados observados.....	72
Figura 30: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Arakawa & Schubert) com o domínio menor e grade horizontal de 20km com os dados observados.....	73
Figura 31: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Fritsch & Chappell) com o domínio menor e grade horizontal de 20km com os dados observados.....	73
Figura 32: Viés e Corr da simulação da parametrização Emanuel com o domínio maior e grade horizontal de 20km com os dados observados.....	74
Figura 33: Viés e Corr da simulação da parametrização Tiedtke com o domínio maior e grade horizontal de 20km com os dados observados.....	74
Figura 34: Viés e Corr da simulação da parametrização Kain Fritsch com o domínio maior e grade horizontal de 20km com os dados observados.....	75
Figura 35: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Arakawa & Schubert) com o domínio maior e grade horizontal de 20km com os dados observados.....	75
Figura 36: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Fritsch & Chappell) com o domínio maior e grade horizontal de 20km com os dados observados.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parametrizações e domínios utilizados nos testes de sensibilidade das simulações da precipitação.....	25
Tabela 2: Descrição das variáveis, unidade e arquivo utilizado no modelo RegCM para o presente estudo.....	26
Tabela 3: Índice estatísticos e seus respectivos escores.....	31
Tabela 4: Calculos estatísticos das parametrizações com o domínio maior, realizados para cada banco de dados, e resultados médio obtidos para toda BHSF. Os melhores resultados foram destacados em negrito.....	35
Tabela 5: Calculos estatísticos das parametrizações com o domínio menor, realizados para cada banco de dados, e resultados médio obtidos para toda BHSF. Os melhores resultados foram destacados em negrito.....	36
Tabela 6: Escore das parametrizações da simulação comparado com os bancos de dados para o domínio maior. Os melhores resultados foram destacados em negrito.....	36
Tabela 7: Escore das parametrizações da simulação comparado com os bancos de dados para o domínio menor. Os melhores resultados foram destacados em negrito.....	37
Tabela 8: Comparação dos escores da melhor parametrização para cada domínio. Os melhores resultados foram destacados em negrito.....	37
Tabela 9: Análise estatística da simulação e dos bancos de dados da precipitação. Os melhores resultados foram destacados em negrito.....	38
Tabela 10: Análise estatística para a Temperatura média diária (°C) da simulação da BHSF e a Temperatura média diária de Xavier (°C).....	43

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

4DVAR	Tetradimensional variacional
ANA	Agência Nacional das Águas
BHSF	Bacia Hidrográfica do São Francisco
CFSv2	<i>Climate Forecast System version 2</i>
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations</i>
Corr	Correlação Linear
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ENOS	El Niño e Oscilação Sul
FF	Frentes Frias
Id	Índice de concordância de Willmott
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MAE	Erro Médio Absoluto
MSWEP	<i>Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation</i>
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
OL	Ondas de Leste
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
RegCM	Regional Climate Model
R₆	Razão de desvio padrão
SF	São Francisco
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Climatologia das sub-bacias do rio São Francisco	18
2.2. Estimativa da vazão utilizando o modelo climático	20
2.3. Regional Climate Model (RegCM) e sua utilização no Brasil	21
3. DADOS E METODOLOGIA	23
3.1. Área de estudo	23
3.2. Modelo RegCM	24
3.2.1. Configurações do modelo e dados utilizados	24
3.3. Dados para avaliação das simulações	27
3.3.1. Dados da precipitação, temperatura e evapotranspiração	27
3.3.2. Dados da vazão	29
3.4. Análise estatística	29
3.4.1. Viés	29
3.4.2. Erro médio absoluto	30
3.4.3. Razão do desvio padrão simulado e observado	30
3.4.4. Coeficiente de correlação de Pearson	30
3.4.5. Índice de concordância de Willmott	31
3.4.6. Escore da análise estatística do teste de sensibilidade	31
4. RESULTADOS	32
4.1. Teste de sensibilidade	32
4.2. Simulação da precipitação durante 2000 até 2010	38
4.3. Simulação da temperatura durante o período de 2000 até 2010	41
4.3. Simulação da evapotranspiração durante o período de 2000 até 2010	44
4.4. Simulação do escoamento durante o período de 2000 até 2010	47
5. DISCUSSÕES	50
6. CONCLUSÕES	51
6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS	53
APÊNDICES	67
Apêndice A – Viés e Correlação (corr) da precipitação das parametrizações com o domínio menor de grade horizontal de 40km durante o bimestre Jan/Fev de 2001 para o teste das parametrizações	67
Apêndice B– Viés e Correlação (corr) da precipitação das parametrizações com o domínio maior de grade horizontal de 40km durante o bimestre Jan/Fev de 2001 para o teste das parametrizações....	69

Apêndice C– Viés e Correlação (corr) da precipitação das parametrizações com o domínio menor e grade horizontal de 20km durante o bimestre Jan/Fev de 2001 para o teste das parametrizações.... 72

Apêndice D– Viés e Correlação (corr) da precipitação das parametrizações com o domínio maior e grade horizontal de 20km durante o bimestre Jan/Fev de 2001 para o teste das parametrizações.... 74

1. INTRODUÇÃO

A área da bacia hidrográfica do São Francisco (BHSF) representa cerca de 8% da área de todo território brasileiro (ANA, 2005) e é uma das principais para a região Nordeste do Brasil, detém uma importante função no abastecimento de água tanto para o consumo humano como também para a irrigação, também para a produção de energia por meio das hidrelétricas de Paulo Afonso e Sobradinho, como também nas atividades de turismo e pesca (Silvestre, 2016). A maior parte da área da BHSF localiza-se na área do Semiárido do Brasil, e conforme Cabral *et al.* (2013), essas regiões do semiárido, evidenciam várias mudanças espaciais e temporais de precipitação, e com isso, tem sofrido bastante com os eventos extremos, como as cheias e as secas. Por isso é importante os estudos que busque constatar as mudanças dos padrões nessa região.

De acordo com Cabral *et al.* (2013), uma maneira de tentar diminuir os impactos que os eventos extremos causam é a previsão das ocorrências por intermédio do uso de modelos atmosféricos, e assim possa ser possível realizar ações mitigadoras. O conhecimento dos fenômenos atmosféricos em geral, das previsões do clima e do tempo, e da estimativa da vazão são algumas das aplicações dos modelos atmosféricos. Os modelos regionais são capazes de ficar aninhados de acordo com os dados do modelo de circulação global da atmosfera, englobam particularidades regionais como topografia, vegetação, solo, contrastes entre continente-oceano, etc, em uma melhor resolução que os modelos globais. O nome dado a essa técnica com o uso de modelos regionais é o downscaling dinâmico, que indica mais satisfatoriamente o funcionamento na simulação e previsão de disposição de precipitação localizada (Nobre, 2001; Seth, 2005; Sun, 2005; Alves, 2008; Da Silva, 2008). De acordo com Gonçalves *et al.* (2015), analisar as simulações executadas pelos modelos atmosféricos faz-se essencial, visto que têm potencial para contribuir na preparação às anomalias extremas de precipitação, acontecendo essas anomalias acima da normal climatológica, ou abaixo da normal climatológica.

Com isso, neste trabalho foi utilizado o modelo RegCM, utilizado por diversos autores em estudos realizados no Brasil, como Reboita *et al.* (2014), Santos e Silva *et al.* (2014), Reboita *et al.* (2018), Freitas *et al.* (2020). Muitos desses estudos mostram o melhor desempenho da parametrização de cúmulos (responsável pela simulação de precipitação no modelo) de Emanuel (Emanuel, 1991) (por ex.: Koné *et al.*, 2018, para a região do oeste da África; Reboita *et al.* (2018) para as regiões Nordeste e Sudeste do Brasil; De Araújo *et al.*, 2019, para o Nordeste; Santos e Silva *et al.*, 2014, para o Nordeste). Porém nem todos os estudos

concordam. Por exemplo, para Reboita *et al.* (2014) a parametrização mista de Grell no continente e Emanuel no oceano foi a que melhor simulou o ciclo anual de precipitação no Nordeste do Brasil. Conforme Chiew *et al.* (2006), Fu *et al.* (2007) e Adam *et al.* (2013) as variações da precipitação e temperatura influenciam diretamente no regime da vazão. Dessa forma, o modelo com uma representação eficiente da precipitação e, também uma representação eficiente das características físicas da BHSF, poderá ser capaz de reproduzir boas simulações do escoamento superficial.

Miranda *et al.* (2017) foi o único que utilizou o modelo RegCM para estudar a precipitação e o escoamento superficial do rio São Francisco, porém apenas para a cabeceira do rio São Francisco, e afirma que se faz necessário analisar os resultados obtidos dos modelos climáticos para a utilização em estudos.

Devido a importância a BHSF, principalmente para a região Nordeste, neste estudo, utilizou-se o modelo RegCM versão 4.6, para o período de 2000 até 2010, buscando analisar os resultados obtidos da precipitação, temperatura, evapotranspiração e escoamento superficial do modelo, de modo que possa analisar se o modelo consegue representar bem as variáveis hidroclimatológicas da BHSF.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho foi analisar a hidroclimatologia da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco (BHSF) utilizando um modelo Regional Climático, para isso se cumprem os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o modelo regional climático a partir de testes de sensibilidades das suas parametrizações de cúmulus e domínio espacial, a fim de explorar o modelo e obter a sua configuração mais adequada a hidroclimatologia da bacia;
- Simular e analisar os padrões dos principais componentes do ciclo hidrológico da bacia: chuva, temperatura, evapotranspiração e escoamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Climatologia das sub-bacias do rio São Francisco

Conforme Shelton *et al.* (2009) a hidroclimatologia é uma ciência que une a hidrologia com a climatologia em um sistema, lidando com as interações da hidrologia com o clima. Um dos mais importantes fatores da análise hidroclimática se refere às interações da precipitação, evapotranspiração, armazenamento de umidade do solo, reservatório de água subterrânea e o curso de riachos. Particularmente, a climatologia, entre suas diversas áreas de investigação, pode ser caracterizada pela análise da variabilidade espacial e temporal da precipitação, que é fundamental para regular os processos hidrológicos das bacias hidrográficas e por conseguinte controlar os padrões da vazão dos rios. Neste sentido, é apresentada a seguir uma breve revisão da climatologia com ênfase nos sistemas precipitantes que atuam ao longo da bacia do rio São Francisco.

O rio São Francisco possui diferentes climas nas suas sub-bacias, possuindo assim um clima úmido e subúmido no alto São Francisco, já no submédio o clima passa do árido para o semiárido. Em toda a bacia do rio São Francisco, a climatologia regional possui uma considerável variabilidade espaço-temporal, com um regime de precipitação que retrata médias entre 400 a 1500 mm.ano-1 e possuem uma temperatura média anual entre 20°C a 26,5°C (FGV, 1998; Silva e Clarke, 2004; Teixeira, 2010). De acordo com Souza *et al.* (2012) o setor do médio São Francisco possui condições atmosféricas próprias do clima tropical semiárido. Já conforme a CODEVASF *et al.* (2001), na sub-bacia do baixo SF o clima é úmido. Assim, de acordo com Da Silva *et al.* (2011), a climatologia evidencia que a estação chuvosa nas sub-bacias do Alto e Médio São Francisco (Figura 1) acontece no período de novembro até fevereiro. Já no setor sub-médio do São Francisco a estação chuvosa acontece no período de janeiro até abril. E conforme Silva *et al.* (1993) na sub-bacia do Baixo São Francisco a quadra chuvosa vai de abril até julho.

Diversos sistemas atmosféricos de grande escala influenciam o regime pluviométrico da bacia, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), com uma atuação nos meses de novembro a fevereiro. Cabe ressaltar que a ZCAS é um sistema meteorológico presente na América do Sul, principalmente na estação de verão, identificado por uma faixa de nebulosidade bem nítida com uma orientação de noroeste-sudeste, desde a região Amazônica até o sudoeste do Atlântico Sul, e possui uma persistência mínima de 4 dias (Ferreira, 2004; Pesquero, 2010; Nóbile Tomaziello, 2010). Alterações no posicionamento da ZCAS alteram o regime de precipitação em diversas regiões do Brasil onde a ZCAS atua, e sul da região

Nordeste do Brasil (Chaves e Cavalcanti, 2001). Este sistema é o primordial mecanismo dinâmico causador de precipitações durante o período de novembro a março nas sub-bacias do Alto (Dos Santos *et al.*, 2013) e Médio São Francisco (Silva *et al.*, 2001).

Outros sistemas que influenciam o regime de precipitação na bacia são os sistemas frontais ou frentes frias, que são aglomerados de nuvens ordenadas geradas na região de convergência de uma massa de ar frio com uma massa de ar quente (Ferreira e Melo *et al.*, 2005). Estes sistemas causam grandes volumes de precipitação, atuando principalmente nas regiões Centro-oeste, Sudeste e sul da região Nordeste do Brasil, e inclusive nas partes do Alto e Médio da bacia do rio São Francisco. Parte das chuvas que ocorre durante o período chuvoso do Nordeste brasileiro, que corresponde a maior porção da bacia do rio São Francisco, sofre a influência das incursões das frentes frias do setor Sul do oceano Atlântico (Kousky e Ferreira *et al.*, 1981 e Hounsou-gbo *et al.*, 2015).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que se forma em baixos níveis através da convergência dos ventos alísios de nordeste, provenientes do Hemisfério Norte junto com os ventos alísios de sudeste, procedentes do Hemisfério Sul (Asnani, 1993; Glickman, 2000). Esse sistema é o principal mecanismo gerador de chuva no norte do nordeste brasileiro, predominantemente nos meses de fevereiro a maio, sendo um sistema que influencia na precipitação no sub-médio e baixo São Francisco (Lopes, 2014).

Por fim, Ondas de Leste (OL) ou distúrbios ondulatórios de leste, que são perturbações que se deslocam na direção de oeste na região dos ventos alísios, mostrando configurações ondulatórias da pressão e do vento (Berry *et al.*, 1945). Esse sistema é de escala sinótica, e ocorre na baixa troposfera tropical, e no momento em que sua formação ocorre no Oceano Atlântico Sul, evidenciam o aumento do deslocamento para oeste conforme encontra-se próximo à costa leste do Nordeste do Brasil (Chou *et al.*, 1990; Silva *et al.*, 2010 e Machado *et al.*, 2012). As OL atuam a partir do Rio Grande do Norte até a Bahia, entre os meses de maio a agosto (Araújo, 2006) e influenciam a precipitação no setor do baixo São Francisco, principalmente nos meses de maio a julho.

Além dos sistemas meteorológicos a variabilidade de baixa frequência, em especial, a variabilidade interanual, tem significativo controle no regime de precipitação na bacia do rio São Francisco. Segundo Galvêncio *et al.* (2000), existe uma relação direta da precipitação e as anomalias da TSM nas distintas áreas dos ENOS (El Niño Oscilação Sul), revelando as diferenças entre o alto São Francisco, médio São Francisco e baixo São Francisco. Os autores verificara que, em anos de ocorrência de El Niño, acontecem grandes precipitações na sub-

bacia do alto São Francisco, de modo consequente altas vazões e poucas precipitações na sub-bacia do baixo São Francisco. Já em anos de ocorrência de La Niña, transcorre exatamente o contrário, sendo assim, as poucas precipitações na sub-bacia do alto São Francisco e grandes precipitações na sub-bacia do baixo São Francisco. De acordo com Assis *et al.* (2018) em anos de ocorrência de El Niño, ocorre uma diminuição no regime de chuva no submédio da bacia do rio São Francisco. Quando o ENOS encontra-se na fase positiva junto com a Oscilação Decadal Pacífico (ODP), na fase quente, favorecem a diminuição da chuva na região da sub-bacia do submédio do São Francisco, entretanto, quando ambos estão na fase fria, favorecem ao aumento da chuva nessa sub-bacia. Boa parte do regime anual de precipitação da bacia do rio São Francisco apresenta uma relação com o ENOS e a ODP, contudo, essa associação não é perceptível na sub-bacia do Alto São Francisco (Da Silva, 2011).

Além do oceano Pacífico o oceano Atlântico, através do Dipolo do Atlântico e a ZCIT influenciam o regime de precipitação sub-bacia do submédio do São Francisco, em especial quando o Dipolo do Atlântico está na fase positiva, ou seja, a TSM no Atlântico Tropical Norte estiver mais quente, provocando um deslocamento maior da ZCIT para o Norte da linha do equador, por consequência ocorre uma redução da precipitação no Hemisfério Sul e no submédio da bacia do São Francisco (Assis, 2018).

2.2. Estimativa da vazão utilizando o modelo climático

De acordo com o estudo realizado por Galvão *et al.* (2005), foi evidenciado que a previsão climática da precipitação utilizando o mecanismo de downscaling obteve uma eficácia, comprovada estatisticamente, e consequentemente também uma boa representação na previsão de vazão em dois reservatórios da região Nordeste do Brasil, sendo capaz de exibir as variações diárias.

Os modelos climáticos possuem condição de contorno inferior no esquema de troca solo-vegetação-atmosfera, que formam o balanço hídrico nesses modelos, podendo assim realizar a simulação da vazão, em termos de escoamento médio na bacia, utilizando apenas um único modelo integrado (Arora, 2001; Mölders e Rühaak 2002; Kerkhoven e Gan, 2006; Braga, 2008). Diversos autores afirmam que as parametrizações devem conter uma capacidade de reproduzir um escoamento adequado com a realidade, e com isso, a simulação terá maior eficiência. Pois, as particularidades da superfície e a disposição espacial da chuva interferem no desenvolvimento do escoamento (Osborn e Renard, 1970; Yair e Lavee, 1978; Faurès, 1995;

Shah, 1996; Ceballos Schnabel, 1998; Jothityangkoon, 2001; Yair e Kossovsky, 2002; Fekete, 2004; Braga, 2008).

Diversos esquemas solo-vegetação-atmosfera realizam o cálculo do escoamento somente como outra variável, contudo sem efetuar a utilização dela. Outros nem retiram de seus resultados, apesar de teoricamente ela já encontrar-se calculada. A vazão, considerada como escoamento médio da bacia, é capaz de ser lograda através do esquema solo-vegetação-atmosfera que são simulados em cada ponto de grade. Assim, o modelo atmosférico gera a vazão de um modo que proporciona um ganho funcional, dado que a vazão será capaz de ser concedida ao mesmo tempo das previsões da precipitação, e um ganho teórico, pois introduz-se um sistema incorporado que contempla as fases terrestre e atmosférica do ciclo hidrológico sendo prevista por um único modelo (Braga, 2008).

2.3. Regional Climate Model (RegCM) e sua utilização no Brasil

O modelo utilizado nesse estudo foi o modelo RegCM4, que vem sendo bastante utilizado por diversos autores no Brasil (por exemplo, Reboita, 2014; Santos e Silva, 2014; Llopart, 2018) e no mundo (por exemplo, Giorgi, 2012; Coppola, 2012).

Conforme descreve Pal *et al.* (2007), o modelo RegCM corresponde a um código de disponível acesso a pesquisa, elaborado e compartilhado pela *International Center for Theoretical Physics* (ICTP). Corresponde a um modelo de área restringida, em coordenada vertical sigma e grade horizontal de Arakawa-Lamb B, que utiliza equações originária adequado a um fluido compressível e hidrostático (Pal, 2007; De Souza, 2009). De acordo com Dickinson *et al.* (1993), o RegCM utiliza a estrutura solo-superfície-atmosfera. Os processos físicos são parametrizados pelo RegCM dessa interação solo-superfície-atmosfera, camada limite, os procedimentos úmidos e radioativo.

O modelo RegCM é utilizado para diversos objetivos de estudo. Por exemplo, da Rocha *et al.*, (2009) simulou a climatologia de verão dos aspectos mais essenciais relacionados com a chuva, que é a ZCAS nas regiões Centro-Oeste e Sudeste, e também os aspectos mais relevantes relacionados à temperatura do ar. Já Ramos *et al.*, (2022) utilizou o modelo para realizar simulações climáticas regionais para o Nordeste do Brasil. Reboita *et al.*, (2022) realizou simulações dos sistemas de monções da América do Sul utilizando o modelo RegCM4.

Foram investigados por Llopart e Da Rocha *et al.* (2012) a sensibilidade das variáveis meteorológicas e os fluxos de superfície no modelo RegCM4.1 para a região da floresta Amazônica, com a representação da vegetação dinâmica, utilizando duas parametrizações de

convecção de cúmulos, a de Grell e Emanuel. Obtiveram que a parametrização de Emanuel apresentou um melhoramento na representação dos fluxos de superfície, ocasionando assim temperatura e precipitação similar ao observado (ERA-INTERIM) durante o período seco. Em contrapartida a parametrização de Grell obteve o melhor desempenho no decorrer do verão (estação chuvosa da região).

Já Reboita *et al.* (2013) analisou o comportamento dos distintos esquemas de parametrizações de convecção de cúmulos que o RegCM4 possui, com o intuito de prever as condições climáticas sazonais no Brasil no qual, o modelo estiver aninhado às previsões do modelo global do CPTEC e do Climate Forecast System version 2 (CFSv2) do NCEP. Foram obtidos quando a fronteira do modelo foi com o modelo global do CPTEC eventos com fortes viés negativo de chuva por volta do Oeste da Amazônia até o centro-norte de Minas Gerais e mostrou um viés positivo de temperatura do ar para uma ampla parte do Brasil, utilizando todos os esquemas de parametrização de convecção de cúmulos do modelo. Quando foi utilizado como fronteira o CFSv2, apresentou uma resposta contrária ao do modelo global do CPTEC, ou seja, foi favorecido um viés positivo de chuva por volta do Oeste da Amazônia até o centro-norte de Minas Gerais e um viés negativo da temperatura do ar para uma ampla parte do Brasil.

Santos e Silva *et al.* (2014), realizou o trabalho para a região Nordeste do Brasil, que utilizou a reanálise do Era Interim foi usado como fronteira lateral, simulou para a estação de outono dos anos de 1998 e 1999, com o espaçamento horizontal de grade de 50km, com a parametrização de Emanuel superestima as observações, mas representa mais apropriadamente os aspectos regionais da precipitação sobre NEB, especialmente sobre o complexo de topografia no planalto Borborema.

De acordo com De Araújo *et al.* (2019), utilizando a reanálise do Era Interim como condição lateral de fronteira, com o espaçamento de grade horizontal de 40km, comparou a parametrização de Grell e a parametrização de Emanuel para a região Nordeste do Brasil durante o outono Austral, e verificou que ambas subestimam a precipitação observada do TRMM, sendo a melhor parametrização na captação temporal da precipitação a de Emanuel. Para a temperatura, o modelo conseguiu capturar melhores resultados em comparação com a precipitação, e também para a temperatura, a parametrização de Emanuel foi melhor.

3. DADOS E METODOLOGIA

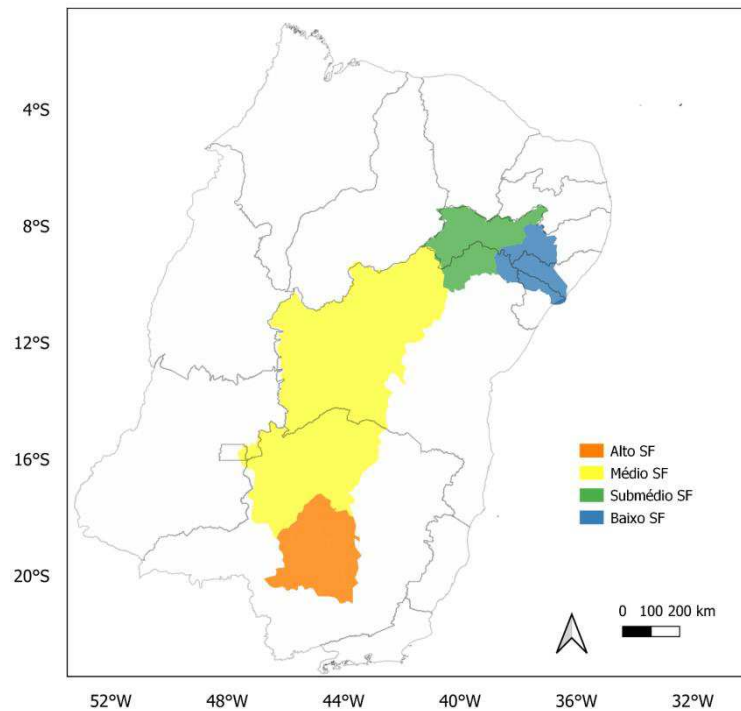
3.1. Área de estudo

O rio São Francisco, representado na Figura 1, é um rio de grande importância, especialmente para a região Nordeste do Brasil, sendo também um dos maiores rios do Brasil. Esta bacia contempla cerca de 631 133 km² de área, que corresponde cerca de 7,5% de toda área do Brasil e distende por aproximadamente 2900 km (Santos *et al.* 2012). Conforme a CODEVASF *et al.* (2011) O curso determinante do rio São Francisco tem a nascente na Serra da Canastra, no estado de Minas Gerais, e a sua foz no Oceano Atlântico, nos estados de Alagoas e Sergipe. A bacia do São Francisco abrange os estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Sergipe, Alagoas e Pernambuco e o Distrito Federal (ANA, 2002).

A Bacia do rio São Francisco; se apresenta de suma importância no cenário social e econômico do Brasil, em particular no que se refere à agricultura. A área irrigada é de 342.900 hectares, correspondendo a 11% dos 3,1 milhões de hectares irrigados no país. Várias atividades têm se destacado, dentro do regime produtivo do rio São Francisco, entre elas: o crescimento da agricultura de sequeiro para produção de soja e milho, da pecuária, com ênfase na bovinocultura e caprinocultura, da pesca e aquicultura, da indústria e agroindústria, das atividades minerais, do turismo e lazer. Sendo assim, estudos que permitam avaliar a sensibilidade da modelagem dinâmica acoplada precipitação-vazão na bacia do São Francisco, são ferramentas de fundamental importância para um melhor planejamento de atividades que necessitam de uso racional da água. Dentro do conceito integrado de bacia hidrográfica, a aplicabilidade de informações meteorológica e hidrológica agregadas é essencial para tomada de decisão, com ênfase no aperfeiçoamento da gestão de recursos hídricos nas diversas escalas de tempo e espaço (Lima e Alves, 2009).

De acordo com a CODEVASF *et al.* (2011) a bacia do São Francisco possui uma divisão de quatro regiões fisiográficas, conforme a Figura 1, sendo elas o Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco que, por sua vez, foi subdividida em sub-bacias, com o intuito de planejamento, e em 12.821 microbacias, com o intuito de identificar, por trechos, os rios mais importantes da região.

Figura 1: Representação da bacia hidrográfica do São Francisco e as sub-bacias. Fonte: Autor (2021).



3.2. Modelo RegCM

De acordo com Giorgi *et al.* (2012) a última versão do modelo RegCM4 foi lançada no em 2012 para a utilização do público. O RegCM4 contém novos esquemas de superfície terrestre, camada limite planetária e fluxos do ar. Também foram atualizados nos esquemas que já existiam de transferência radiativa e o código do modelo passou por uma atualização absoluta com o objetivo de obter maior compreensão, portabilidade e compreensibilidade para o uso do modelo.

Outra modificação foi a inclusão da possibilidade de rodar o modelo de forma hidrostática, permitindo o uso de melhores resoluções como grades de espaçamento de até 10km conforme Qian e Zubair *et al.*, (2010). Além disso, a nova versão permite o uso de diferentes parametrizações de convecção de cúmulos, sobre o oceano e continente (Giorgi, 2012).

3.2.1. Configurações do modelo e dados utilizados

Neste estudo, a condição de fronteira lateral utilizada no RegCM foram os dados de reanálises do ERA-interim. De acordo com Dee *et al.* (2011), O ERA-Interim é uma modernização do antigo ERA-40, passando a ser um agrupamento de dados com informações

climáticas adquiridas mediante um modelo dinâmico do European Centre for Medium-range Weather Forecasting com a utilização do método 4DVAR de assimilação dos dados globais. Os produtos do ERA-Interim normalmente possuem uma grade de $0,75^\circ$ de espaçamento, no entanto, tem disponíveis em variadas resoluções.

O modelo foi integrado ao sistema de coordenadas sigma com 18 níveis verticais, utilizando o esquema de superfície *Biosphere Atmosphere Transfer Scheme* (BATS; Dickinson *et al.*, 1993), a condição de fronteira lateral os dados do ERA-Interim 15, com a parametrização da camada limite Holtslag PBL (Holtslag, 1990), a parametrização no esquema de umidade foi a umidade explícita (SUBEX; Pal *et al.*, 2000), o esquema de fluxo Oceano o Zeng *et al.* (1998).

Para fim de comparação do desempenho da precipitação foram realizados testes de sensibilidade avaliando dois domínios diferentes (Figura 2), o domínio menor com intuito de otimizar o tempo computacional e o domínio maior para abranger os sistemas de escalas maiores (sistemas transientes, área de atuação da ZCAS, etc), e cinco parametrizações de cúmulos para o continente e para o oceano (Tabela 1). Em uma etapa preliminar também comparamos o desempenho de duas opções de espaçamento horizontal de grade (40 e 20 km) e verificamos que a grade mais fina, além de não apresentar melhora significativa, representava um grande aumento do tempo computacional e, portanto, optamos pelo uso da grade de espaçamento de 40 km, também utilizado por outros trabalhos recentes (Miranda *et al.*, 2017) e De Araújo *et al.*, 2019). Os testes de sensibilidade foram feitos para avaliar a precipitação, realizados para os anos de 1999 e 2000, sendo que o ano de 1999 foi descartado para estabilização (spin-up) e o ano 2000 foi utilizado para as análises.

Figura 2: Representação dos domínios menor e maior.

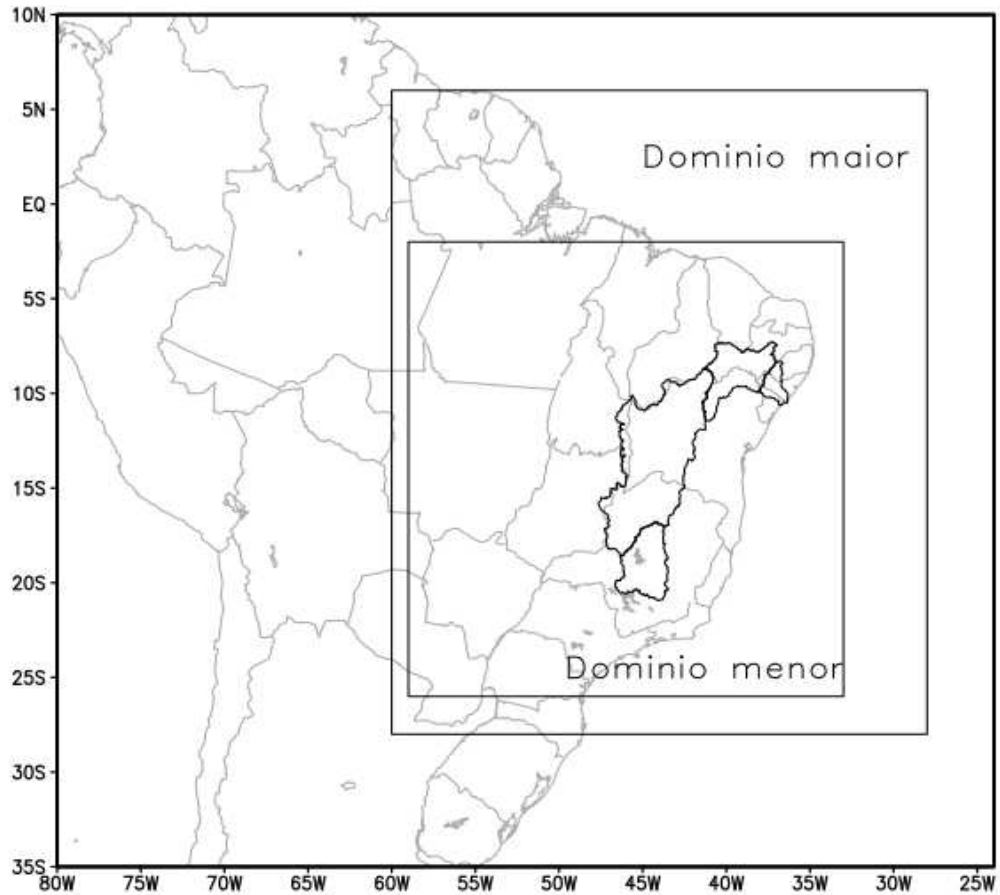


Tabela 1: Parametrizações e domínios utilizados nos testes de sensibilidade das simulações da precipitação.

Identificação da simulação	Parametrização no Oceano	Parametrização no Continente	Domínio	Espaçamento de grade (km)
1	Emanuel	Emanuel	menor	40
2	Tiedtke	Tiedtke	menor	40
3	Kain Fritsch	Kain Fritsch	menor	40
4	Grell (Arakawa & Schubert)	Grell (Arakawa & Schubert)	menor	40
5	Grell (Fritsch & Chappell)	Grell (Fritsch & Chappell)	menor	40
6	Emanuel	Emanuel	maior	40

7	Tiedtke	Tiedtke	maior	40
8	Kain Fritsch	Kain Fritsch	maior	40
9	Grell (Arakawa & Schubert)	Grell (Arakawa & Schubert)	maior	40
10	Grell (Fritsch & Chappell)	Grell (Fritsch & Chappell)	maior	40

Após a escolha das melhores configurações, rodou-se o modelo RegCM para o período de 1999-2010, descartando novamente o primeiro ano para estabilização do modelo. Nesta etapa, as variáveis utilizadas do modelo RegCM foram além da precipitação, a temperatura, a evapotranspiração e o escoamento superficial (Tabela 2). Ressalta-se que a análise da melhor parametrização da precipitação também influencia no desempenho das demais variáveis simuladas, principalmente o escoamento superficial, que está diretamente ligado com a precipitação.

Tabela 2: Descrição das variáveis, unidade e arquivo utilizado no modelo RegCM do arquivo _SRF.nc para o presente estudo.

Variável	Unidade	Variável do RegCM	Conversão realizada	Unidade final
Precipitação	mm s ⁻¹	pr	Pr*86400	mm/dia
Temperatura	K	S01tas	K-273,15	°C
Evapotranspiração	mm s ⁻¹	EVSPSbl	EVSPSbl*86400	mm/dia
Escoamento superficial	mm s ⁻¹	mrro	Mrro*86400	mm/dia

3.3. Dados para avaliação das simulações

3.3.1. Dados da precipitação, temperatura e evapotranspiração

Para fazer a avaliação das simulações da precipitação do modelo, foram utilizadas três fontes de dados: os dados de Xavier *et al.* (2016), do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS, Sobreiro *et al.* 2017) e *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* (MSWEP, Beck *et al.* 2017). Na avaliação foram calculados o viés (simulação menos o dado observado), a correlação entre a simulação e o as fontes de dados utilizados (CHIRPS, MSWEP e Xavier), e por último a média da precipitação em toda região das sub-

bacias do São Francisco, tanto da simulação, quanto dos dados observados, e foram analisadas todas as simulações realizadas.

Conforme Oliveira Fagundes et al. (2017), os dados MSWEP foi elaborada com o intuito de produzir uma base de dados de chuva abrangendo vários produtos vigentes (satélite, reanálises e pluviômetros) para incrementar os estudos da modelagem hidrológica. Essa aglutinação possibilitou produzir um resultado de alcance global, tendo uma resolução temporal relativamente alta (de 3 horas), durante os anos de 1979-2015. A resolução espacial dos dados observados de MSWEP é de $0,1^\circ$ o que representa aproximadamente 11 km.

Já o CHIRPS é um agrupamento de dados de precipitação elaborado pelo *United States Geological Survey* (USGS) e pelo *Climate Hazards Group at the University of California*, Santa Barbara (UCSB). A estimativa da precipitação de CHIRPS é feita através de várias fontes de conhecimentos, tais como: *The Climate Hazards Group's Precipitation Climatology* (CHPClim); Verificações de satélites com espectro infravermelho termal, satélites geoestacionários aproximadamente globais da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), do CPC (Centro de Previsão Climática) e do NCDC (*National Climatic Data Center Climáticos*); precipitação do CFSv2; diversas estações meteorológicas (Funk, 2015)

Os dados de CHIRPS tem resolução espacial de $0,05^\circ$, por volta de 5 km, perto do Equador, com um domínio que vai de 50°S a 50°N , durante o período de 1981 até hoje em dia, aonde é fornecido dados diários, dados de cinco dias corridos e até dados mensais (COSTA, 2019).

Já conforme Xavier *et al.* (2019), no ano de 2015 foi disponibilizado uma base de dados meteorológicos diário para o Brasil, possuindo uma resolução espacial de $0,25^\circ$. As variáveis disponíveis dessa base de dados são a precipitação, a temperatura máxima e mínima, a umidade relativa, evapotranspiração (que é calculada utilizando o método de Penman Monteith), radiação solar e a velocidade do vento. Esses dados foram construídos a partir da interpolação dos dados dos pluviômetros e dos dados observados das estações meteorológicas, e hoje em dia, os dados de precipitação disponíveis dessa base de dados vai de jan/1980 até dez/2015, já das outras variáveis estende-se de jan/1980 até jul/2017.

Diversos autores utilizam essas três bases de dados para o Brasil e América do Sul, como exemplo do CHIRPS (Costa, 2019; Dos Santos, 2019; Silva, 2019), MSWEP (de Oliveira Fagundes, 2017; Moreira, 2017; Brêda, 2019) e Xavier (Veber, 2019; Xavier, 2019; Baratto, 2020).

3.3.2. Dados da vazão

Além da precipitação, este trabalho avaliou o escoamento superficial simulado pelo modelo em relação às vazões naturais do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2016) em postos cujas as áreas de drenagem se assemelham BHSF.

O ONS dispõe de séries históricas de vazões e possui duas escalas temporais de dados, a média diária e a média mensal da vazão natural. O termo vazão natural é utilizado para determinar a vazão que aconteceria se não existissem as intervenções humanas na bacia, tais como desvios do curso da água, uso da água para irrigação, para abastecimentos de cidades, utilização de indústria, etc. Com isso, é feita uma reconstituição para obter a vazão natural, que contempla fatores como vazão observada sem levar em consideração as consequências geradas pelas ações humanas na bacia (ONS, 2015).

Conforme Fittipaldi *et al.* (2016), a área de drenagem da bacia contribuinte de Xingó é de 608.700 km² e a vazão média é de 2.980 m³/s. Essa área representa aproximadamente 95% de toda área da Bacia hidrográfica do São Francisco.

Como a área de drenagem e a vazão de toda BHSF e da bacia contribuinte de Xingó são parecidas, para o presente estudo, será feita a análise entre o escoamento superficial da simulação gerada pelo modelo RegCM e os dados de vazão da bacia contribuinte de Xingó durante o período de 2000 a 2010.

3.4. Análise estatística

3.4.1. Viés

A avaliação das simulações foi feita através do cálculo do viés (V) (equação 1), que é a subtração da precipitação diária simulada (p_{sim}) e a precipitação de cada um dos bancos de dados (p_{obs}) deste estudo.

Quando o viés atingir valores mais próximos de zero, significa um menor erro existente na simulação em relação aos dados observados. É medido na mesma unidade que as séries.

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_{sim} - p_{obs}) \quad (1)$$

O cálculo do viés da precipitação para o teste de sensibilidade foi realizado para cada sub-bacia, para cada parametrização utilizada, para cada domínio utilizado e com todos os três bancos de dados utilizados, a fim de analisar qual obteve um menor viés, e conseqüentemente um melhor resultado.

3.4.2. Erro médio absoluto

Conforme De Maria *et al.* (2008) no cálculo do Erro Médio Absoluto (MAE), equação 2, os desvios negativos não se anulam com os positivos, ficando assim mais expressivo que o viés. O MAE; só assume valores positivos, e quanto mais próximo de zero for, melhor será o resultado da simulação em relação aos bancos de dados utilizados. É medido na mesma unidade que as séries.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |p_{sim} - p_{obs}| \quad (2)$$

3.4.3. Razão do desvio padrão simulado e observado

O desvio padrão de uma amostra é um parâmetro para verificar a dispersão dos dados em relação à média desses dados. Obtém-se o desvio padrão através da raiz quadrada da variância da amostra. Só assume valores positivos, e quanto maior for o valor do desvio padrão, maior será também a dispersão dos dados (Martins, 2013).

O desvio padrão é calculado conforme a equação 3, sendo calculado o desvio padrão para a simulação, sendo (\bar{p}_{sim}) as médias das séries simuladas. E do mesmo modo, foram calculados os desvios padrão para os bancos de dados, sendo (\bar{p}_{obs}), as médias das séries observadas.

$$\begin{cases} \sigma_{simulada} = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_{sim} - \bar{p}_{sim})^2 \right]} \\ \sigma_{observada} = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_{obs} - \bar{p}_{obs})^2 \right]} \end{cases} \quad (3)$$

Conforme alguns autores, como Pielke *et al.* (2001), Buckley *et al.*, (2004) e De Maria *et al.*, (2008) a semelhança entre os desvios padrões dos dados simulados e observados caracteriza uma estimativa de erro dos dados simulados.

Com isso, foi realizado o cálculo da razão entre o desvio padrão simulado e observado, conforme a equação 4, sendo uma razão adimensional. Encontrando valores mais próximos de 1, significa que os dados possuem uma maior semelhança, já quanto mais próximo de zero, uma menor semelhança.

$$R_G = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} \quad (4)$$

3.4.4. Coeficiente de correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson (corr) é uma medida da relação linear por meio de duas variáveis, que demonstra a relação linear existente entre essas variáveis. O valor do coeficiente pode variar entre os valores de -1 e 1, quando assumir o valor próximo a 1, aponta

para uma alta correlação linear, ou seja, são diretamente proporcionais. Já para valores de r próximo de -1 , indica que as variáveis são inversamente proporcionais. E por último, quanto mais próximo de zero, indica que as variáveis não possuem nenhuma correlação linear (Nascimento Júnior, 2016; Oliveira, 2016).

A equação 5 demonstra como o coeficiente de Pearson é calculado, em que $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ e $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ são valores medidos em ambas as variáveis; \bar{x} e \bar{y} são médias aritméticas de ambas as variáveis.

$$corr = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (5)$$

A correlação linear de Pearson foi feita para verificar a correlação entre a precipitação da simulação com a precipitação do banco de dados utilizado, também da simulação da vazão com os dados de vazão observada e por último a precipitação simulada com a vazão simulada.

3.4.5. Índice de concordância de Willmott

Willmott *et al.* (1981) afirma que o índice de concordância (Id) é um parâmetro descritivo que mostra a exatidão dos valores simulados (Y) em comparação aos valores observados (X). Sendo assim, um método que prontamente demonstra comparações de concordância para modelos distintos, independente das unidades de medida das variáveis.

O índice apresenta valores que variam de 0 a 1, visto que $Id=1$ significa uma concordância excelente dos dados simulados e observados, porém, quando $Id=0$ demonstra uma discordância total entre os dados. O índice de concordância de Willmott, conforme a equação 6, é fundamentado nas somas de quadrados, dado que no numerador têm-se a soma dos quadrados dos erros e no denominador a soma dos valores absoluto de duas diferenças relacionadas a média observada (WILLMOTT, 2012).

Sendo $X_i, i=1,2,\dots, n$, i -ésimo ao valor da variável observada, e $Y_i, i= 1,2,\dots, n$, i -ésimo ao valor da variável simulada, e n é o número de pares de valores.

$$Id = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{X}|)^2} \quad (6)$$

3.4.6. Escore da análise estatística do teste de sensibilidade

Para melhor expressar a parametrização que obteve um resultado mais eficaz para cada domínio, foi atribuído escores: como são cinco parametrizações, em cada cálculo, a melhor

parametrização recebe a pontuação de 5 pontos, a segunda melhor de 4 pontos, e assim até a parametrização que obtém o pior desempenho receberá apenas 1 ponto).

Também foram dados pesos de acordo com o trabalho realizado por De Maria *et al.* (2008). Para o viés, erro absoluto médio e a Razão dos desvios padrão o escore dado é de 1, para o índice de concordância é atribuído o escore 2, e por último, para a correlação linear é atribuído o escore 3, conforme a Tabela 3 representa.

Tabela 3: Índice estatísticos e seus respectivos escores.

Símbolo	Índice	Escore
V_p	Viés estatístico	1
MAE_p	Erro Médio Absoluto	1
R_σ	Razão entre desvios padrão	1
Id	Índice de concordância de Willmott	2
corr	Correlação linear de Pearson	3

Para fazer a análise do melhor domínio, foram comparado os índices estatísticos que obtiveram o melhor escore do domínio maior com o melhor escore do domínio menor. Onde a parametrização que apresentou uma melhor pontuação recebeu 5 pontos e a que tiver um valor menor, receberá 4 pontos, e quando ocorre o empate, ambas receberam pontuação 5 além do peso de cada índice.

4. RESULTADOS

4.1. Teste de sensibilidade

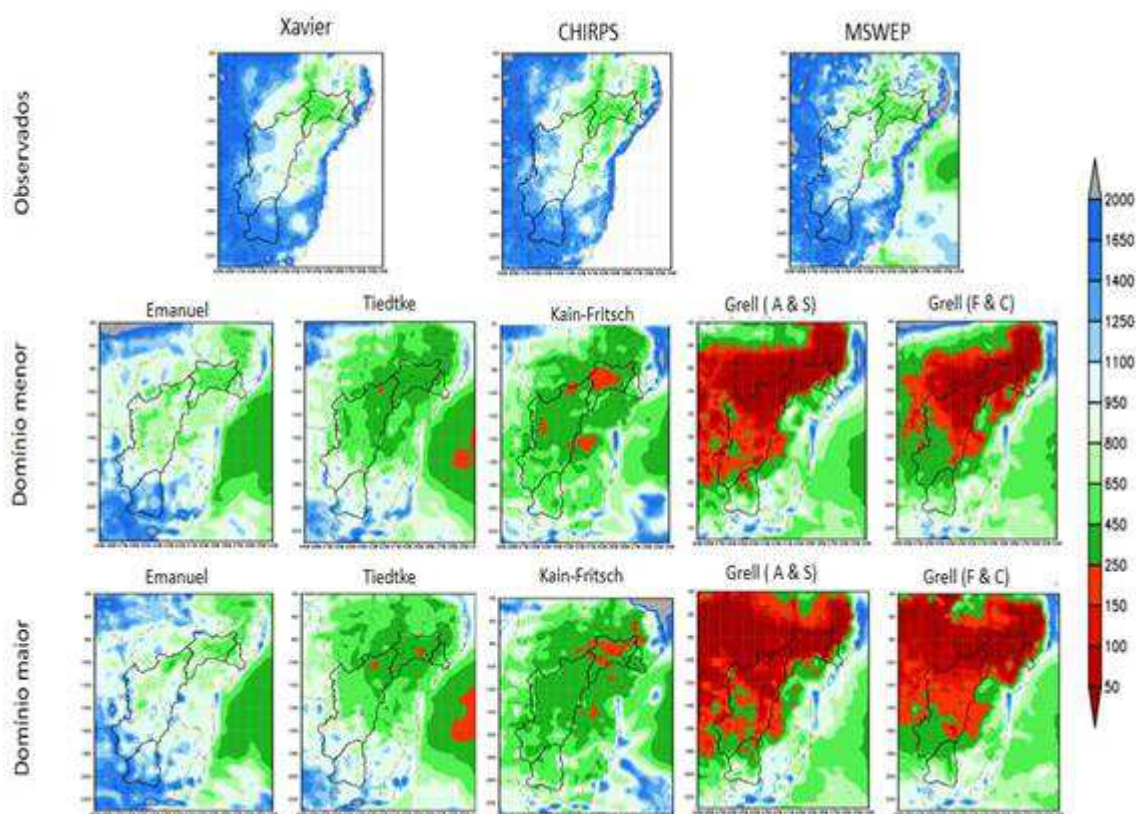
A Figura 3 mostra, a precipitação acumulada durante o ano de 2000, para os três bancos de dados utilizados (a), para as simulações utilizando as cinco possibilidades de parametrizações de cúmulos quando o domínio utilizado foi o menor (b) e também para o domínio maior (c). Para facilitar a comparação, os limites do domínio maior (Figura 2) foram reduzidos (Figura 3c) para coincidir com o do domínio menor (Figura 3b).

Analisando a Figura 3, pode-se verificar quando comparando as parametrizações com os bancos de dados, tanto para o domínio menor quanto para o domínio maior, a parametrização de Emanuel é a que obteve a precipitação acumulada mais próxima com as precipitações dispostas dos três bancos de dados. A segunda parametrização que obtém um resultado mais próximo é a de Tiedtke, para ambos os domínios. Enquanto as parametrizações de Kain Fritsch

e de Grell, esta última independente do fechamento, subestimam consideravelmente a precipitação em toda a BHSF.

Ainda é possível observar que a maior diferença da precipitação quando comparada a dos bancos de dados e a simulada com a parametrização de Emanuel, para os dois domínios, ocorreu no centro-norte da bacia.

Figura 3: Precipitação acumulada do ano 2000 (mm) para: (observados) dos bancos de dados (Xavier, CHIRPS e MSWEP); domínio menor e maior, respectivamente, para as cinco parametrizações de cúmulos (Emanuel, Tiedtke, Kain Fritsch, Grell (A & S) e Grell (F & C)).



As Figuras 4 e 5 mostram a distribuição da precipitação mensal para o ano de 2000, para os domínios maior e menor, respectivamente. Também é possível observar que tanto para o domínio maior quanto para o domínio menor, Emanuel é a parametrização que melhor representa a precipitação em comparação dos bancos de dados em todos os setores da BHSF.

No domínio maior; (Figura 4), Emanuel no ASF apresenta apenas o mês de fevereiro com uma diferença alta em comparação com as três bases de dados, de aproximadamente

100mm; Nos demais meses a diferença é baixa. No MSF, a maior diferença para a parametrização de Emanuel ocorreu no mês de novembro, com uma diferença de aproximadamente 100mm. Já no SMSF, a maior diferença ocorreu nos meses de setembro onde Emanuel superestimou em aproximadamente 40mm e em novembro, que subestimou em aproximadamente 40mm. Por último, no BSF, Emanuel obteve o pior desempenho nos meses de junho e julho, a diferença chega a ser de aproximadamente 60mm.

Para o domínio menor; (Figura 5), a parametrização de Emanuel apresentou uma maior diferença de precipitação no ASF durante o mês de fevereiro, de pouco mais de 100mm. Para o MSF, os meses de janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro apresentam uma diferença considerável, sendo maior no mês de janeiro, em aproximadamente 60mm em janeiro e 100mm em novembro. No SMSF, a maior diferença ocorre em setembro, quando Emanuel superestima em aproximadamente 40mm a precipitação. Por último, no BSF, a maior diferença é verificada no mês de junho, cerca de 70mm.

Figura 4: Precipitação mensal (mm) durante o ano de 2000 em cada sub-bacia do rio São Francisco, com o domínio maior.

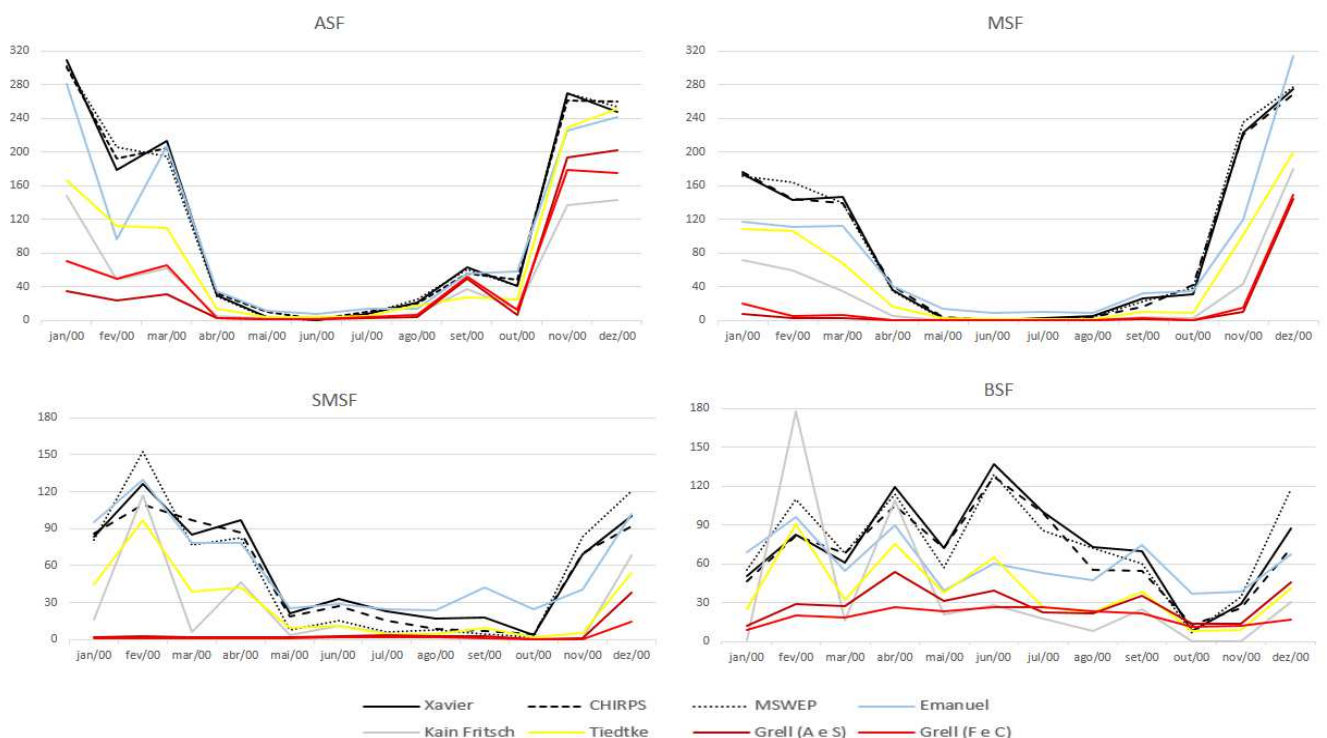
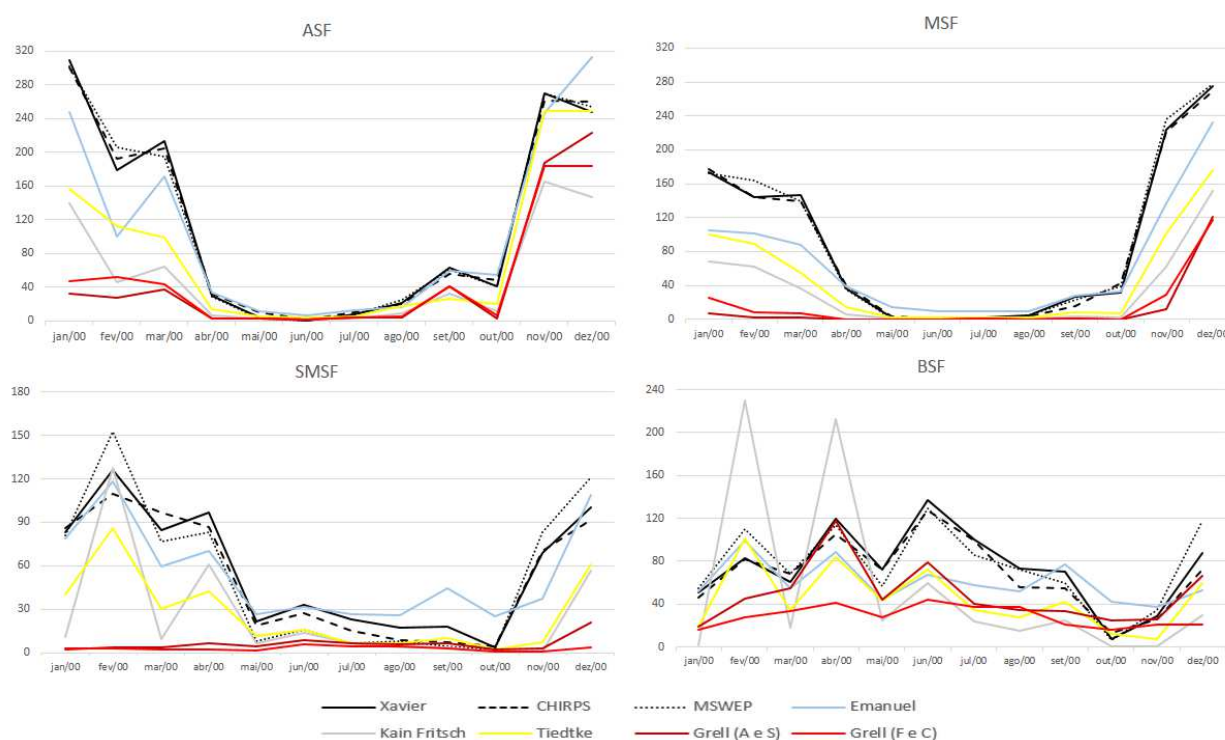


Figura 5: Precipitação mensal (mm) durante o ano de 2000 em cada sub-bacia do rio São Francisco com o domínio menor.



As Tabelas 4 e 5 mostram os seguintes índices estatísticos; para o domínio maior e domínio menor, respectivamente: viés (V), erro absoluto médio (MAE), razão entre os desvios padrões (R_{σ}), correlação linear (corr) e o índice de concordância de Willmott (Id), para cada sub-bacia e para a média ponderada de acordo com a área de cada sub-bacia em relação a área total BSHF (ASF (16%), MSF (63%), SMSF (17%) e o BSF (4%)).

Na Tabela 4, é possível observar que a parametrização de Emanuel é a que obtém o melhor viés, já para o MAE a parametrização de Tiedtke é a que teve o melhor resultado. Para a R_{σ} novamente a parametrização de Emanuel foi a que obteve o melhor resultado, já para a correlação linear, a parametrização de Tiedtke é a que teve uma melhor resposta, e por último, no índice de concordância de Willmott, novamente Emanuel foi a que obteve o melhor desempenho.

O mesmo padrão se reproduziu para o domínio menor (Tabela 5. Porém, comparando a melhor parametrização em cada domínio (Emanuel, em ambos), é possível verificar que o domínio maior obteve o viés, MAE, Razão dos desvios padrões e índice de concordância melhor, sendo apenas a correlação melhor no domínio menor, quando comparado com os índices estatísticos do domínio maior.

Tabela 4: Cálculos estatísticos das parametrizações com o domínio maior, realizados para cada banco de dados, e resultados médio obtidos para toda BHSF. Os melhores resultados foram destacados em negrito.

	Xavier	CHIRPS	MSWEP
	<i>Viés (mm dia - 1) / MAE (mm dia - 1) / R₅ / Corr / Id</i>		
Emanuel	-0,3 / 1,7 / 0,9 / 0,7 / 0,8	-0,3 / 1,9 / 0,8 / 0,7 / 0,8	-0,3 / 1,9 / 0,8 / 0,7 / 0,8
Tiedtke	-1,1 / 1,5 / 0,7 / 0,8 / 0,8	-1,1 / 1,6 / 0,6 / 0,8 / 0,8	-1,2 / 1,6 / 0,6 / 0,8 / 0,8
Kain Fritsch	-1,7 / 2,0 / 0,7 / 0,6 / 0,7	-1,7 / 2,1 / 0,7 / 0,6 / 0,7	-1,7 / 2,1 / 0,6 / 0,6 / 0,8
Grell (A e S)	-2,2 / 2,7 / 0,6 / 0,4 / 0,7	-2,2 / 2,7 / 0,7 / 0,4 / 0,7	-2,3 / 2,8 / 0,6 / 0,3 / 0,7
Grell (F e C)	-2,2 / 2,5 / 0,6 / 0,5 / 0,7	-2,2 / 2,5 / 0,6 / 0,4 / 0,7	-2,2 / 2,6 / 0,5 / 0,4 / 0,7

Tabela 5: Cálculos estatísticos das parametrizações com o domínio menor, realizados para cada banco de dados, e resultados médio obtidos para toda BHSF. Os melhores resultados foram destacados em negrito.

	Xavier	CHIRPS	MSWEP
	<i>Viés (mm dia - 1) / MAE (mm dia - 1) / R₅ / Corr / Id</i>		
Emanuel	-0,5 / 1,7 / 0,8 / 0,7 / 0,8	-0,5 / 1,9 / 0,7 / 0,7 / 0,8	-0,6 / 1,9 / 0,7 / 0,7 / 0,8
Tiedtke	-1,3 / 1,6 / 0,7 / 0,8 / 0,8	-1,2 / 1,7 / 0,6 / 0,8 / 0,7	-1,3 / 1,7 / 0,6 / 0,8 / 0,8
Kain Fritsch	-1,7 / 2,1 / 0,7 / 0,6 / 0,7	-1,6 / 2,1 / 0,7 / 0,6 / 0,7	-1,7 / 2,1 / 0,6 / 0,6 / 0,8
Grell (A e S)	-2,3 / 2,7 / 0,6 / 0,4 / 0,7	-2,2 / 2,7 / 0,6 / 0,3 / 0,7	-2,3 / 2,8 / 0,6 / 0,3 / 0,7
Grell (F e C)	-2,2 / 2,5 / 0,5 / 0,4 / 0,7	-2,2 / 2,5 / 0,5 / 0,4 / 0,7	-2,3 / 2,6 / 0,4 / 0,4 / 0,7

A Tabela 6 e 7 mostram os resultados obtidos dos escores que resume o desempenho considerando todos os índices respectivamente para o domínio maior e menor. Para ambos os casos, pôde-se observar que para as três fontes de dados observados, a parametrização de Emanuel foi a que melhor se aproximou, obtendo assim o melhor escore entre todas as parametrizações com o domínio maior. Em segundo lugar ficou a parametrização de Tiedtke.

Tabela 6: Escore das parametrizações da simulação comparado com os bancos de dados para o domínio maior. Os melhores resultados foram destacados em negrito.

Ano 2000	Domínio maior				
Escore comparado					
com:	Emanuel	Tiedtke	Kain Fritsch	Grell (A e S)	Grell (F e C)
Xavier	36	34	25	10	15
CHIRPS	36	34	25	10	15
MSWEP	36	34	25	11	15
Escore médio	36	34	25	10	15

Tabela 7: Escore das parametrizações da simulação comparado com os bancos de dados para o domínio menor. Os melhores resultados foram destacados em negrito.

Ano 2000	Domínio menor				
Escore comparado					
com:	Emanuel	Tiedtke	Kain Fritsch	Grell (A e S)	Grell (F e C)
Xavier	36	35	25	9	15
CHIRPS	36	35	27	10	15
MSWEP	36	35	27	11	15
Escore médio	36	35	26	10	15

Logo, quando analisado os índices estatísticos comparando a melhor parametrização do domínio maior (Emanuel) com a melhor parametrização do domínio menor (Emanuel), foi analisado o escore entre as duas, para verificar qual o domínio que desempenha uma melhor representação da precipitação, conforme a Tabela 8. Para essa análise, o domínio maior obteve um escore melhor comparado com a melhor parametrização do domínio menor (Emanuel).

Tabela 8: Comparação dos escores da melhor parametrização para cada domínio. Os melhores resultados foram destacados em negrito.

	Domínio maior	Domínio menor
	Emanuel	Emanuel
Xavier	37	35
CHIRPS	37	35
MSWEP	37	36

4.2. Simulação da precipitação durante 2000 até 2010

As simulações para o período de 1999-2010 foram feitas utilizando as melhores configurações determinadas a partir da etapa anterior: a parametrização de cúmulos de Emanuel com domínio maior (Tabela 1, simulação de id 6). A Tabela 9 mostra os resultados dos índices estatísticos para o teste de sensibilidade e em todo o período simulado (Tabela 9).

Sendo possível observar que durante o teste de sensibilidade (ano 2000), a simulação conseguiu obter índices estatísticos melhores quando comparado com a simulação completa, sendo apenas o MAE se manteve praticamente constante. Porém, é possível verificar que na corr e o Id, a variação não é muito grande, já no Viés e R_6 são os dois índices que ocorrem as maiores diferenças.

Tabela 9: Análise estatística da simulação e dos bancos de dados da precipitação. Os melhores resultados foram destacados em negrito.

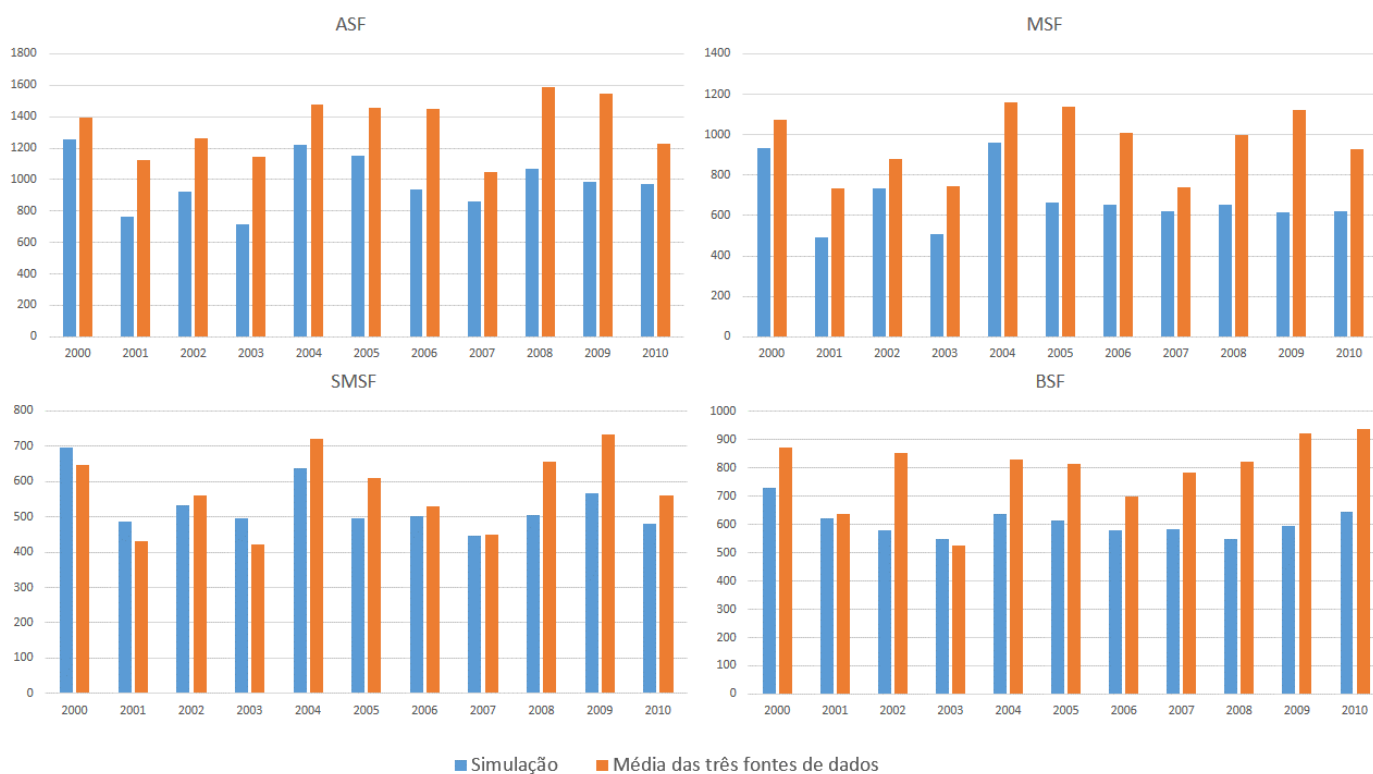
	Índices estatísticos em 2000	Índices estatísticos entre 2000 - 2010
	<i>Viés (mm dia - 1) / MAE (mm dia - 1) / R_6 / Corr / Id</i>	
Xavier	-0,3 / 1,7 / 0,9 / 0,7 / 0,8	-0,6 / 1,7 / 0,7 / 0,7 / 0,7
CHIRPS	-0,3 / 1,9 / 0,8 / 0,7 / 0,8	-0,6 / 1,9 / 0,7 / 0,6 / 0,7
MSWEP	-0,3 / 1,9 / 0,8 / 0,7 / 0,8	-0,7 / 1,9 / 0,6 / 0,6 / 0,7

Para facilitar as análises, foi feita uma média dos dados de Xavier *et al.* (2015), CHIRPS e MSWEP para a precipitação anual para cada sub-bacia do São Francisco, conforme a Figura 6. É possível observar que no Alto SF e Médio SF em todos os anos o modelo

subestimou a precipitação, sendo os anos de 2001 e 2003 os dois anos que a precipitação foi menor na simulação.

Já no Sub-médio SF, os anos 2000, 2001 e 2003 foram os únicos anos em que o modelo superestimou a precipitação, nos demais anos ele subestimou, porém é a sub-bacia que mais conseguiu se aproximar das precipitações observadas. Já no Baixo SF, apenas o ano de 2003 o modelo conseguiu superestimar a precipitação, nos demais anos, subestimou a precipitação, mas, ainda assim, conseguiu representar melhor a precipitação quando comparado com as sub-bacias do Alto e Médio SF.

Figura 6: Acumulado anual de precipitação (mm) em cada sub-bacia da BHSF.

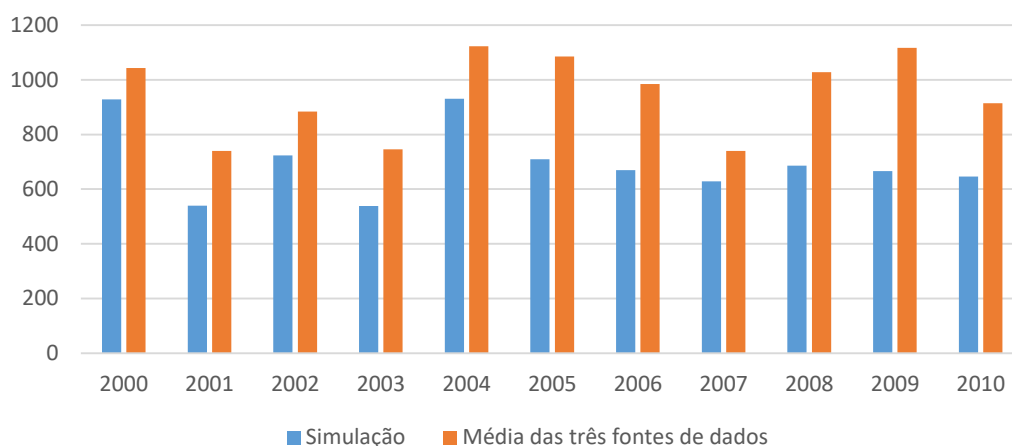


A precipitação média anual (mm) (Figura 7) em toda a BHSF. Sabendo que a precipitação média anual na área é de 1036 mm. Na simulação, coerentemente com o viés negativo obtido (Tabela 9), em todos os anos ocorreu a subestimação da precipitação, porém, o ano de 2001, 2003 e 2007 foram os anos em que ocorreram as menores precipitações, tanto simulada como também da média das três bases de dados. Já os anos de 2000 e 2004 foram os anos que ocorreram as maiores precipitações simuladas.

Durante os anos de 2000 e 2007 foram os anos em que a simulação mais se aproximou das bases de dados, tendo uma subestimação de aproximadamente 110 mm. A precipitação

média simulada durante o período de 200 até 2010 foi de 697 mm, já para as bases de dados, a média de aproximadamente 946 mm, chegando assim a ter uma subestimação médio anual de aproximadamente 249 mm.

Figura 7: Precipitação média anual (mm) da BHSF.



Também foi apresentada a média mensal da precipitação durante o período de estudo (Figura 8), onde é possível observar que o Alto, Médio e Submédio SF têm boa representação da variação sazonal da precipitação. Já o Baixo SF uma maior diferença com as comparação dos três bases de dados.

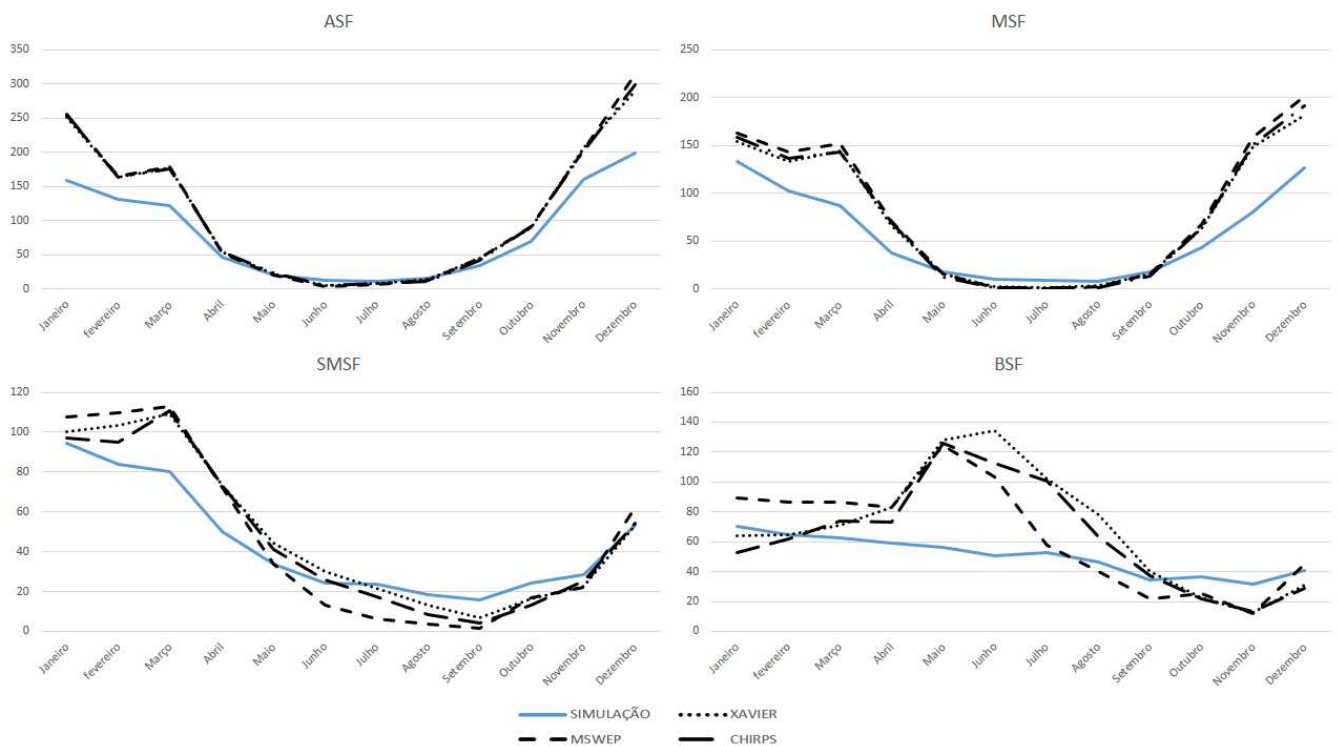
No Alto SF, os meses de abril a outubro foram os que tiveram maior semelhança com as bases de dados. Já o trimestre dezembro, janeiro e fevereiro, foi o que teve maior diferença de precipitação. No Médio SF o período de abril a setembro foram os meses que a simulação melhor representou a precipitação. Já o período de novembro a março apresentou um desempenho pior.

Sabendo que o ASF e MSF sofrem influência direta da ZCAS no regime de precipitação dessas sub-bacias, e de acordo com Reboita *et al.* (2022), o modelo subestima a precipitação nas regiões de ocorrências das ZCAS, podemos assim verificar resultados semelhantes, sendo nos meses de atuação da ZCAS a simulação subestimou a precipitação quando comparada com as três bases de dados.

No Submédio SF, apenas os meses de fevereiro e março apresentaram diferenças maiores das médias de precipitações. Os demais meses tiveram uma boa representação, chegando até a superestimar a precipitação no período de agosto a outubro. Sendo assim a sub-bacia do Submédio SF foi a que melhor simulou a precipitação quando comparada com as bases de dados de precipitação (Xavier *et al.* (2015), CHIRPS, MSWEP).

O Baixo SF foi a sub-bacia que apresentou as maiores diferenças entre as precipitações média mensais simulada e das bases de dados. Sendo o período que conseguiu melhor representar durante julho a setembro, e de dezembro a fevereiro. Porém, durante maio e junho a simulação subestima quando comparado com a precipitação de Xavier *et al.* (2015), em aproximadamente 70mm e 80mm, respectivamente.

Figura 8: Precipitação média mensal (mm) durante o período de 2000 a 2010 em cada sub-bacia.



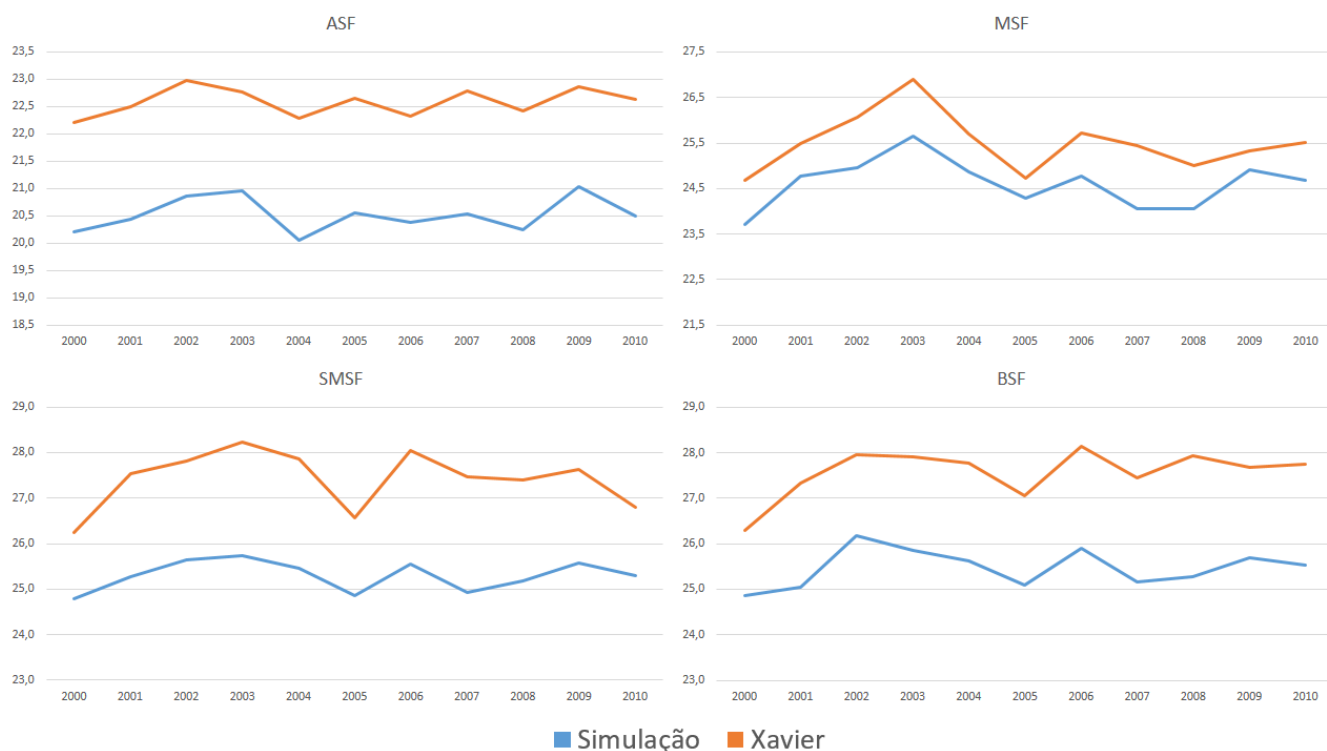
4.3. Simulação da temperatura durante o período de 2000 até 2010

Analisando a simulação da temperatura da BHSF e para cada sub-bacia, fazendo a comparação com o dado de Xavier *et al.* (2015) de temperatura. De acordo com a Figura 9, é possível observar que a temperatura média anual das sub-bacias, simulada é sempre menor que a temperatura observada, durante todos os anos desse estudo, e em todas as sub-bacias.

Conforme a Figura 9, o Médio SF é o que apresenta a temperatura média mais próxima da observada, sendo os melhores resultados obtidos em 2005, quando apresenta um viés de apenas $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, e em 2001, onde apresenta um viés de $-0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Já o Alto, Submédio e Baixo SF apresentam temperaturas simuladas com um viés negativo grande em comparação com a observada, sendo a maior diferença para o Alto SF de $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ em 2007. No Submédio SF a maior

diferença foi no ano também em 2007, quando subestimou em 2,6 °C. Para o Baixo SF, a maior diferença ocorreu em 2008, de -2,6 °C.

Figura 9: Temperatura média anual (°C) da simulação da sub-bacias do São Francisco e a Temperatura média anual de Xavier (°C).



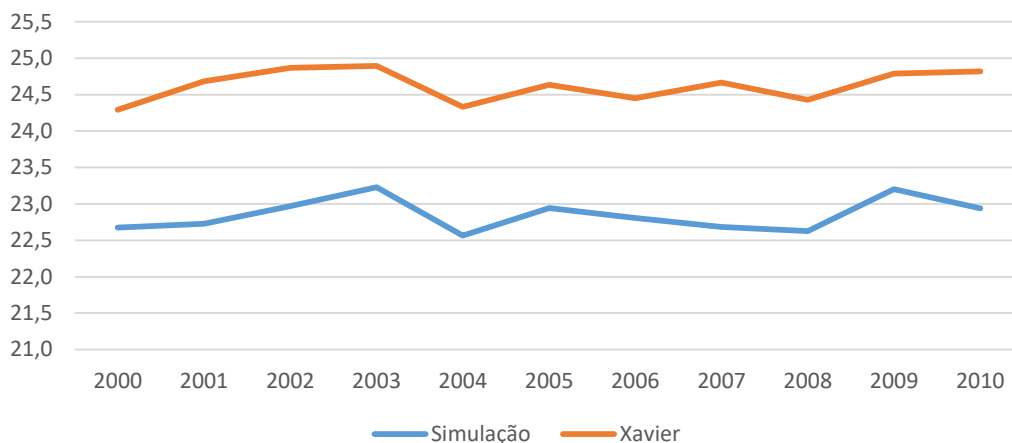
Para a bacia como um todo, a Figura 10 mostra a temperatura média anual (°C), sendo possível observar que a simulação apresenta um viés negativo elevado quando comparada com a temperatura de Xavier *et al.* (2015), sendo o ano de 2004 o que teve a menor temperatura simulada, com uma temperatura média anual de 22,6°C, e o de maior temperatura simulada foi no ano de 2003 e 2009, com a temperatura média anual de 23,2 °C. As maiores diferenças entre a simulação e os dados de Xavier *et al.* (2015), ocorreram nos anos de 2001, 2002, 2007 e 2010, que a simulação subestima em aproximadamente 2°C em relação a Xavier *et al.* (2015).

Já para Xavier, a menor temperatura média anual foi de aproximadamente 24,4 °C, durante os anos de 2000, 2004, 2006, 2008. Já para a maior temperatura, ocorreu durante os anos 2002, 2003, 2009 e 2010, com uma temperatura de aproximadamente 24,9 °C.

A temperatura simulada mantém uma variação interanual média em torno de 0,2 °C, ocorrendo a maior variação entre o ano de 2003 para 2004, uma variação de 0,6 °C, e de 2008 para 2009 a variação também de 0,6 °C. Para Xavier *et al.* (2015), a maior variação de

temperatura média ocorre também durante o ano 2003 para 2004 de também 0,6 °C, e de 2008 para 2009 de 0,4 °C.

Figura 10: Temperatura média anual (°C) da simulação e Xavier para toda BHSF.



Apesar de subestimar a temperatura nas sub-bacias, é possível observar que o modelo captura a variabilidade interanual da simulação de forma semelhante aos dados observados, apresentando assim, conforme a Tabela 10, o viés negativo diário de $-1,77^{\circ}\text{C}$, e a correlação linear alta de 0,89, ou seja, no ano que a temperatura aumenta ou diminui no dado de Xavier *et al.* (2015), a simulação captura o mesmo sinal e varia semelhante.

Tabela 10: Análise estatística para a Temperatura média diária (°C) da simulação da BHSF e a Temperatura média diária de Xavier *et al.* (2015) (°C).

	<i>Viés (°C dia - 1) / MAE (°C dia - 1) / R₆ / Corr / Id</i>
Temperatura	-1,8 / 1,8 / 1,0 / 0,9 / 0,5

Após a análise anual, foi realizada a média mensal durante os anos de 2000 a 2010, conforme a Figura 11, sendo possível verificar em todas as sub-bacias da BHSF, que as menores temperaturas ocorrem no trimestre de junho-julho-agosto, durante o inverno. Já para as maiores temperaturas, é possível observar durante os meses de novembro até fevereiro.

A variabilidade mensal é bem semelhante entre a simulação e os dados de Xavier *et al.* (2015), sendo a maior diferença obtida durante o inverno nas sub-bacias do Alto SF e Médio SF, e a maior proximidade ocorre durante os meses de novembro até fevereiro. Já para o Submédio SF e Baixo SF ocorre exatamente o contrário, as maiores diferenças ocorrem do mês

de novembro até fevereiro, enquanto no inverno é que ocorre a maior proximidade entre a simulação e Xavier *et al.* (2015) nessas duas sub-bacias.

Figura 11: Temperatura média mensal (°C) durante o período de 2000 até 2010 para cada sub-bacia da BHSF.



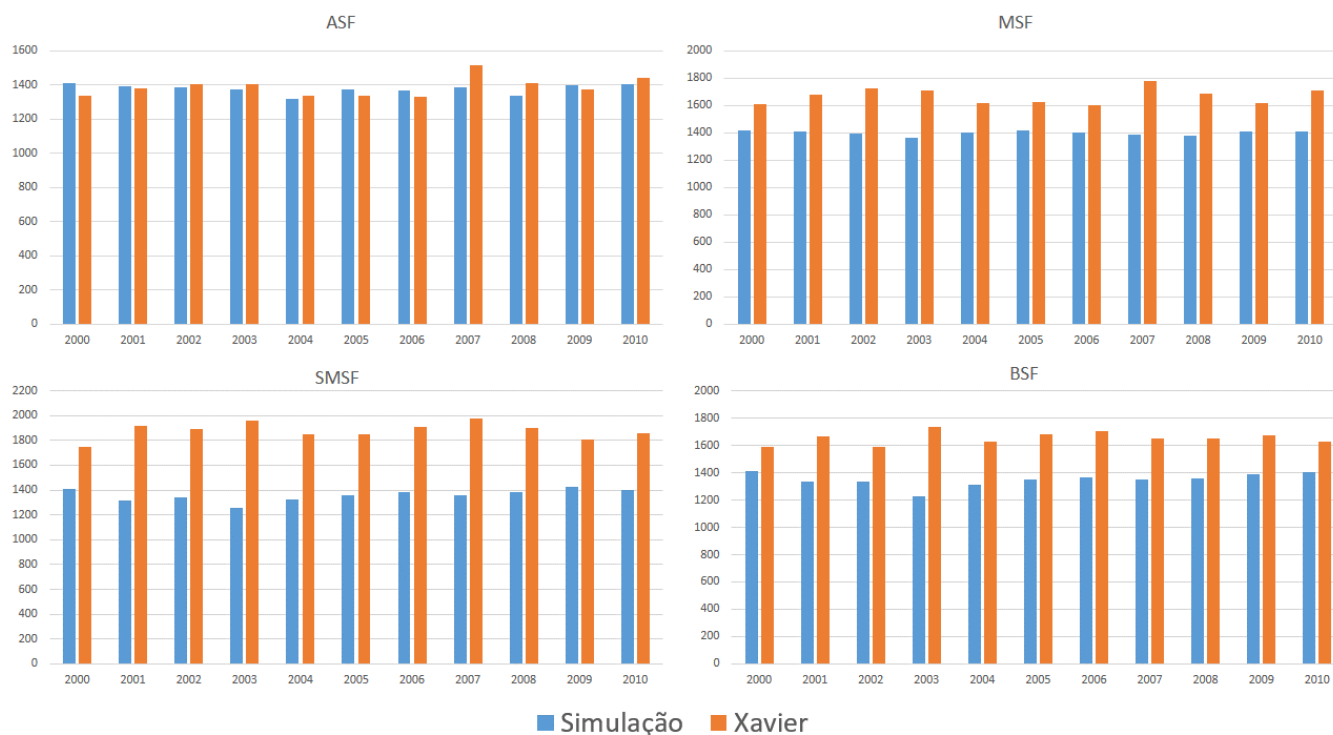
4.3. Simulação da evapotranspiração durante o período de 2000 até 2010

A Figura 12 mostra a evapotranspiração potencial média anual simulada e a de Xavier *et al.* (2015), para cada sub-bacia, sendo possível observar que no Alto SF a simulação tem um resultado bastante próximo a observação durante todos os anos, apenas o ano de 2007 apresentou uma maior diferença entre eles. O Médio SF e o Baixo SF obtiveram um resultado semelhante entre a simulação e os dados observados. Já o Submédio SF é o que apresenta o pior resultado quando comparado a simulação com os dados de Xavier *et al.* (2015).

A simulação no Alto SF ficou com valores próximos aos dados observados comparados no presente estudo. Já o Médio SF, todos os anos a evapotranspiração potencial simulada ficou abaixo dos dados de Xavier *et al.* (2015). No Submédio SF a simulação teve uma subestimação grande com relação à Xavier *et al.* (2015), chegando a subestimar aproximadamente 700 mm em 2003. Por último, o Baixo SF também em todos os anos

subestimou os dados de Xavier *et al.* (2015), chegando a subestimar em aproximadamente 500 mm quando comparado a Xavier *et al.* (2015) no ano de 2003.

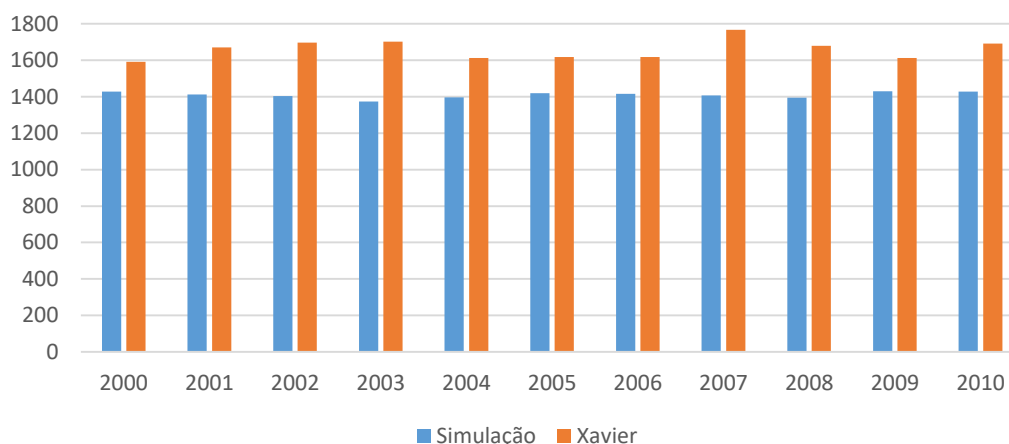
Figura 12: Evapotranspiração potencial média anual (mm) da simulação da sub-bacias do São Francisco e a evapotranspiração potencial média anual de Xavier *et al.* (2015) (mm).



A evapotranspiração potencial anual para toda BHSF (mm), conforme a Figura 13, subestimou em todos os anos quando comparado com a evapotranspiração potencial de Xavier *et al.* (2015). Sendo os anos de 2000, 2009 e 2010 as maiores evapotranspirações potenciais simuladas anuais, de aproximadamente 1430 mm. Já o ano de menor evapotranspiração potencial foi o ano de 2003, com a evapotranspiração potencial de 1373 mm. Para o dado observado, a maior evapotranspiração potencial ocorreu no ano de 2007, em foi de 1767,6 mm. A menor evapotranspiração potencial observada ocorreu no ano de 2000, que foi de 1591,5 mm.

A simulação teve uma variação interanual pequena em relação à base de dados climatológicos, cujo maior variação interanual ocorrendo entre o ano 2006 e 2007 de aproximadamente 150 mm.

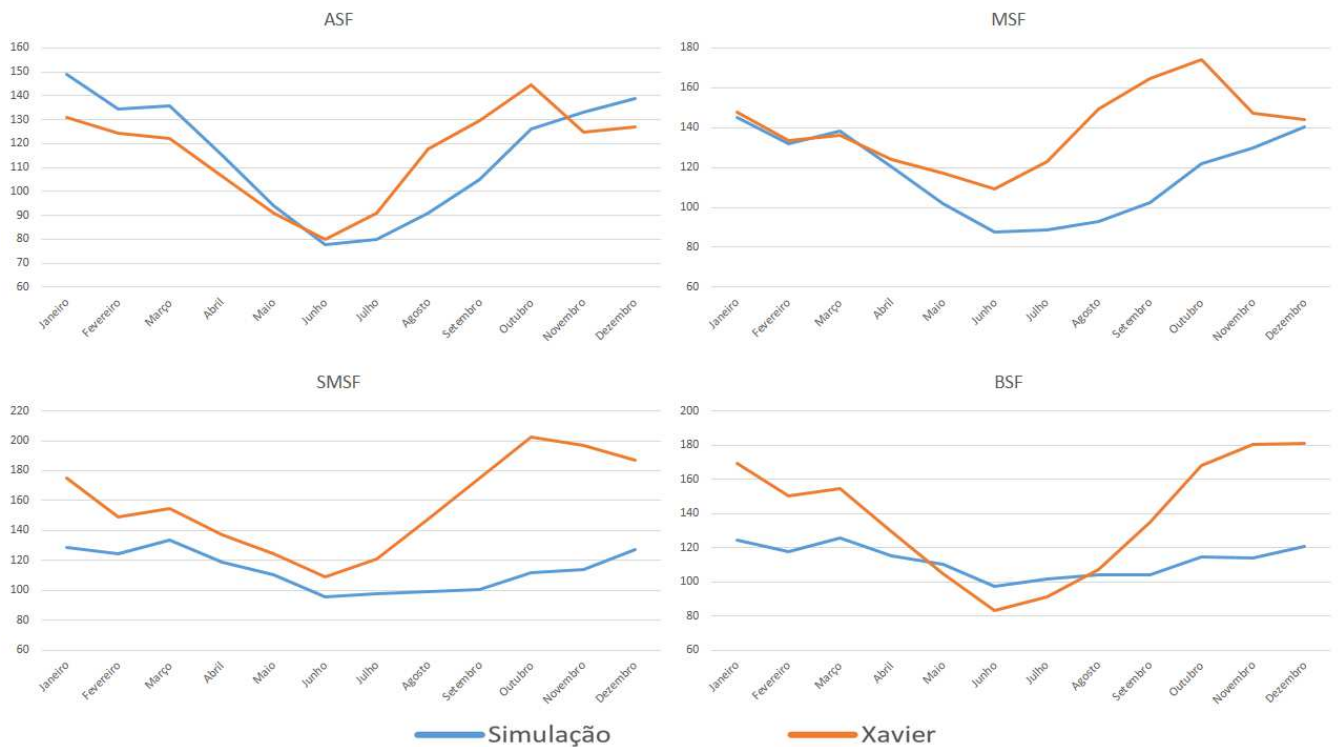
Figura 13: Evapotranspiração potencial média anual (mm) da simulação e de Xavier *et al.* (2015) para toda BHSF.



A Figura 14 mostra a evapotranspiração potencial média mensal durante o período deste estudo. Coerentemente com os dados observados, o modelo mostra a redução da evapotranspiração no meio do ano, correspondente ao período mais frio em todas as regiões hidrográficas (Figura 11) e também mais seco exceto no baixo SF (Figura 8).

No Alto SF, é possível verificar que a simulação superestima os dados de Xavier *et al.* (2015) durante o período de novembro até abril, e subestima durante os meses de julho a outubro. Já no Médio SF, durante Dezembro até abril, a simulação e o observado tem aproximadamente os mesmos valores, porém de maio até novembro o modelo subestima bastante, chegando a subestimar aproximadamente 60mm no mês de setembro. No Submédio SF sempre o modelo subestima em relação ao observado, chegando a uma diferença de 90mm em outubro. No Baixo SF, o modelo superestima apenas os meses de junho e julho, e nos demais meses subestima, chegando a aproximadamente 60mm em dezembro.

Figura 14: Evapotranspiração potencial média mensal (mm) durante o período de 2000 até 2010 para cada sub-bacia da BHSF.



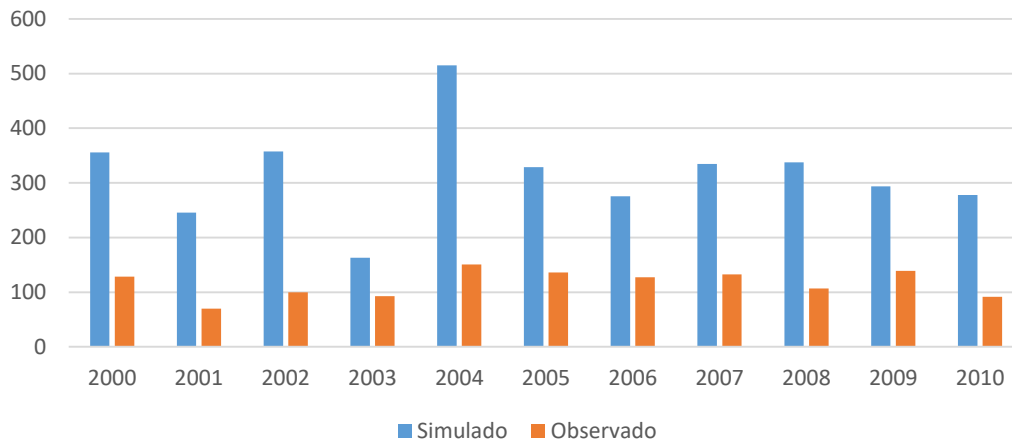
4.4. Simulação do escoamento durante o período de 2000 até 2010

A Figura 15 mostra o escoamento médio de cada ano, tanto da simulação quanto também para os dados observados. É possível observar que em todos os anos o escoamento simulado foi maior que o observado. Os dois menores escoamentos médio anual simulado foram registrado no ano em que o Alto SF e Médio SF obtiveram as menores precipitações anuais (Figura 6): no ano de 2001, com um o escoamento total anual de 245 mm, e em 2003, que obteve o escoamento total de aproximadamente 163 mm (Figuras 6 e 15).

Comparando a simulação com os dados observados, ocorre uma superestimação grande, acima de 200 mm em relação aos dados observados nos anos de 2000, 2002, 2007 e 2008. Sendo vista as maiores superestimações nos anos de 2004, em que apresentou um viés positivo de aproximadamente 365 mm, e 2002, em que apresentou um viés positivo de aproximadamente 258 mm.

O ano de 2003 foi o que apresentou o menor viés, sendo a superestimação de aproximadamente 70 mm. O ano de 2001 foi o que apresentou a menor vazão dos dados observados, tendo um escoamento total anual de aproximadamente 70 mm.

Figura 15: Escoamento total anual (mm) da simulação e do observado para a área de drenagem da bacia contribuinte de Xingó.

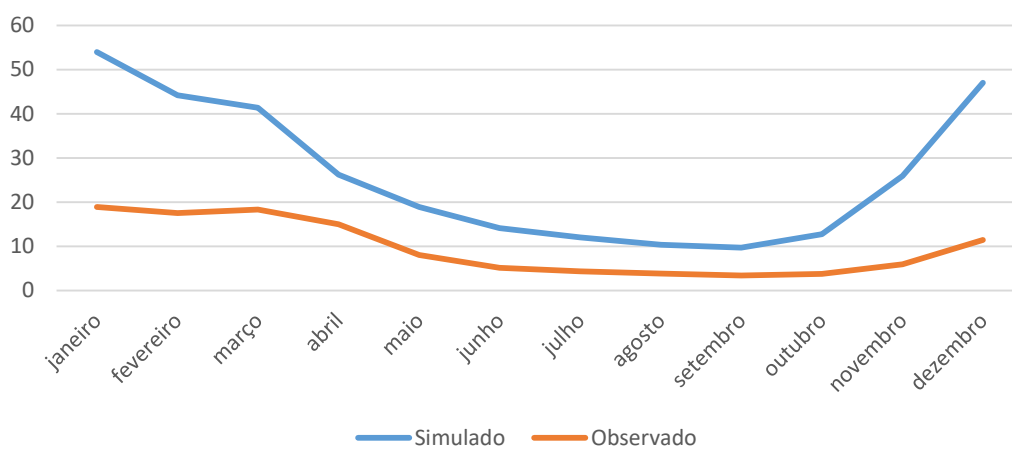


Fazendo a análise do escoamento médio mensal, conforme a Figura 16, é possível observar que a simulação superestima todos os meses em relação aos dados observados. O mês de maior escoamento superficial médio simulado foi janeiro, com uma simulação média mensal de aproximadamente 54 mm. Já o mês de menor escoamento superficial foi setembro, com o escoamento médio de aproximadamente 10 mm.

De acordo com De Almeida *et al.* (2014), as sub-bacias do Alto SF e Médio SF são responsáveis por quase 97% da vazão da BHSF. Sabendo que a estação chuvosa do Alto SF e Médio SF vai de novembro até fevereiro, é possível ver que no exato momento que o modelo simula o período chuvoso, tem uma resposta imediata para o escoamento, sendo um processo mais rápido que o natural, que tem o tempo de reposta da Bacia, para que o escoamento aconteça (Figura 16). Além disso, no final do período chuvoso do Alto e Médio SF ocorre uma queda brusca em relação ao escoamento simulado, chegando a níveis baixos de escoamento durante o trimestre julho-agosto-setembro, semelhante modo ocorre com a precipitação simulada, que apresentam os menores valores nesse trimestre.

Já para o dado observado, o maior escoamento ocorre durante os meses janeiro até abril. Em janeiro, mês que apresenta maior escoamento registrado em Xingó, a diferença entre o escoamento simulado e o observado, chega a superestimar aproximadamente 35 mm.

Figura 16: Escoamento médio mensal (mm) da simulação e dos dados observados.



5. DISCUSSÕES

A parametrização de cúmulos que obteve o melhor resultado para a precipitação na BHSF, foi a de Emanuel, inclusive para todas as regiões hidrográficas da bacia. A parametrização de Tiedtke foi a segunda melhor para toda a BHSF, e as demais, Kain Fritsch e Grell com os fechamentos, apresentaram um desempenho bastante inferior, subestimando a precipitação média anual de 2000 na BHSF em aproximadamente 600 mm e 800 mm respectivamente. Esse resultado está coerente com outros estudos. Por exemplo, Reboita *et al.* (2018) avaliaram as mesmas parametrizações e indicaram a parametrização de Emanuel como a melhor para a precipitação na região Nordeste e Sudeste. Os autores também obtiveram uma subestimativa da precipitação e temperatura com relação aos dados observados. De Araújo *et al.* (2019) também obtiveram resultados semelhantes para a região Nordeste.

Santos e Silva *et al.* (2014), também verificaram que a parametrização de Emanuel foi a que melhor representou a precipitação na região Nordeste do Brasil. Porém, a simulação superestimou os dados observados, resultado diferente aos obtidos no presente estudo, em que a simulação subestimou.

O baixo SF, que é o setor da BHSF que se localiza mais próxima do oceano, foi a sub-bacia que teve mais dificuldade em simular a precipitação. De acordo com estudo realizado por De Araújo *et al.* (2019), o autor afirma que a costa do Nordeste, setor próximo do oceano, devido à grande influência da confluência dos ventos alísios, pode ser a grande influenciadora para a subestimação da precipitação nesse setor da região.

6. CONCLUSÕES

O espaçamento de grade horizontal de 40km apresentou um resultado mais satisfatório da precipitação na BHSF do que o espaçamento de grade horizontal de 20km. O domínio maior também foi o que apresentou um resultado mais satisfatório da simulação da precipitação quando comparado com o domínio menor.

A parametrização de Emanuel tanto para o oceano como para o continente foi a que melhor representou a precipitação em todas as sub-bacias da BHSF. Porém, a parametrização de Emanuel sempre subestimou a precipitação no Alto SF, Médio SF e Baixo SF em relação as bases de dados utilizados. O Submédio SF foi a sub-bacia que conseguiu melhor simular a precipitação, chegando até a superestimar em três anos.

A temperatura simulada foi subestimada em todas as sub-bacias, mas o Médio SF foi a que melhor resultado obteve da simulação em comparação com os dados observados. Os resultados simulados mais desiguais ocorreram no ASF e SMSF.

A evapotranspiração potencial sempre subestimou os dados de Xavier nas sub-bacias do Médio SF, Submédio SF e Baixo SF, sendo esta última sub-bacia a que obteve o resultado mais distante dos dados comparados. Já o Alto SF foi o que apresentou o melhor resultado, sempre próximo aos dados observados.

O escoamento total simulado pelo modelo apresentou padrão sazonal semelhante aos dados estimados a partir da vazão naturalizada no Xingó, porém com uma queda mais acelerada do escoamento, ocorrendo já no mês seguinte ao período de chuva das sub-bacias do Alto e Médio SF. Já os dados observados mostram uma queda mais suave, ocorrendo a partir de abril, dois meses após o término da estação chuvosa do Alto e Médio SF. O escoamento foi superestimado em toda BHSF como reflexo da subestimativa da evapotranspiração potencial, embora a precipitação tenha sido subestimada pelo modelo. Acredita-se que a evapotranspiração real simulada tenha sido subestimada o que gerou o excesso de umidade do solo e, por conseguinte a superestimativa do escoamento.

A continuidade de estudos de modelagem hidroclimática com RegCM na BHSF requerem aperfeiçoamentos no módulo de superfície do modelo (BATS OU CLM) com a finalidade de ajustar a evapotranspiração simulada, e por conseguinte, ajustar a precipitação e o escoamento na bacia.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste estudo, sugere-se:

- Analisar e possivelmente ajustar os parâmetros do módulo de superfície (BATS) para melhor representação dos fluxos de calor latente (e evapotranspiração) e sensível e conseqüentemente o escoamento superficial;
- Realizar simulações com o módulo de superfície CLM e verificar se possui melhor desempenho para a região do que o utilizado nesse estudo (BATS);
- Realizar análises dos campos de vento e fluxo de umidade, para uma análise mais aprofundada do balanço hídrico;
- Realizar simulações com diferentes condições iniciais e de fronteira e testar diferentes modelos de fluxo de energia de transferência radiativa, a fim de verificar seus impactos nos fluxos de calor latente e sensível.

REFERÊNCIAS

ADAM, K. N; COLLISCHONN, W. Análise dos Impactos de Mudanças Climáticas nos Regimes de Precipitação e Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 69-79, 2013.

ANA/GEF/PNUMA/OEA. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Brasília-DF, 128p., 2004.

ANA. Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – PBHSF (2004-2013): Síntese Executiva com Apreciação das Deliberações do CBHSF Aprovadas na **III Reunião Plenária** de 28 a 31 de Julho de 2004. Brasília, 152 p., 2005.

ALVES, J. M. B.; CAMPOS, J. N. B.; NASCIMENTO, L.S. V. A sensibilidade intrasazonal de um downscaling dinâmico de precipitação (1971-2000): Uma análise na bacia hidrográfica do Açude Castanhão-CE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.23, n.1, p.73-87. 2008.

ARAÚJO, L. E. Análise estatística de chuvas intensas da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 2, p. 162-169, 2008.

ARORA, V. K., BOER, G. J. The effects of simulated climate change on the hydrology of major river basins. **Journal of Geophysical Research**. Vol. 106, n. D4, p. 3335-3348, 2001.

ASNANI, G.C. Tropical Meteorology. **Pune, Nobel Printers**, 603p. 1993.

ASSIS, J. M. O.; SOUZA, W. M.; SOBRAL, M. C. Análise climática da precipitação no submédio da bacia do rio São Francisco a partir do índice de anomalia de chuva. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 36, p. 115-127, jun. 2015.

ASSIS J.M.O.; Souza W.M.S.; Koch H.; Sobral M.C.M. Influência dos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais sobre os índices climáticos da precipitação na bacia do submédio São Francisco. **Revista Brasileira de Climatologia**, V. 23, p. 411–433, 2018.

BANCO MUNDIAL. **Relatório sobre o desenvolvimento mundial de 2010**: desenvolvimento e mudança climática. São Paulo, 2010.

BARATTO, P. F. B. **Espacialização de elementos meteorológicos diários em bacias hidrográficas do Sul do Espírito Santo**. Orientador: Roberto Avelino Cecílio. 2020. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Meteorologia Aplicada, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2020.

BECK, H. E., VAN DIJK, A. I.J.M., LEVIZZANI, V., SCHELLEKENS, J., MIRALLES, D. G., MARTENS, B. "MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data". **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 1, p. 589–615, 2017.

BERRY, F. A.; BOLLAY, E.; BEERS, N. R. **Handbook of Meteorology**. New York: McGraw-Hill Book, 1068p. 1945.

BRAGA, A. C. F. M. **Geração e propagação da vazão a partir de simulações com o modelo atmosférico BRAMS em bacias hidrográficas no Nordeste do Brasil**. Tese (doutorado em Recursos Naturais) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande: UFCG, 2008

BRÊDA, J. P. L. F., PAIVA, R. C. D. D., COLLISCHONN, W., SIQUEIRA, V. A.; BRAVO, J. M. Efeito das mudanças climáticas nos recursos hídricos da América do Sul. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., Foz do Iguaçu, 2019). **Anais** [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRH, 2019.

CABRAL, S. L.; CAMPOS, J. N. B.; DA SILVA SILVEIRA, C.; LEMOS, W. E. D.; PORTO¹, V. C. Análise da modelagem dinâmica da precipitação em uma bacia hidrográfica no semiárido. *In*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., Bento Gonçalves, 2013. **Anais** [recurso eletrônico].

CEBALLOS, A.; SCHNABEL, S. Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa landuse system (Extremadura, SW Spain). **Journal of Hydrology**. Vol. 210, p. 146-160, 1998.

CHAVES, R. R.; CAVALCANTI, I. F. A. Atmospheric circulation features associated with rainfall variability over southern Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v.129, n.10, p.2614-2626, 2001.

CHOU, S. C. Análise de distúrbios ondulatórios de leste sobre o Oceano Atlântico Equatorial Sul. São José dos Campos, **INPE**. 1990.

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco - **Caracterização da Bacia**. Disponível: <<http://www.codevasf.gov.br/osvales/vale-dosao-francisco/identificacao>>. Acesso em 10 de abril de 2021.

COLLISCHONN, Walter. **Simulações hidrológica em Grandes bacias**. Tese (doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto alegre: UFRGS, 2001.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. Módulo I – Resumo Executivo. Versão final aprovada pelo Plenário do CBHSF. Salvador, 2004. Disponível em: <http://www.cbhsaofrancisco.org.br>> Acesso em: 10 jun. 2021.

COSTA J.; PEREIRA G.; SIQUEIRA M.E.; CARDOZO F.; SILVA V.V. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**. V. 24, n. 2, p. 228-243, 2019.

DA SILVA, D. F., BRITO, J. B. Variabilidade do vento na bacia hidrográfica do rio São Francisco durante a ocorrência da ZCAS. **Ambiência**. v. 4, n. 2, p. 221-235, 2009.

DA SILVA D.F.; Galvíncio J.D.; de Carvalho Almeida H.R. Variabilidade da qualidade de água na bacia hidrográfica do Rio São Francisco e atividades antrópicas relacionadas. **Qualitas Revista Eletrônica**. v. 9, p. 1-17, 2010.

DA SILVA, D. F.; Galvincto, J.D.; Nóbrega R.S. Influência da variabilidade climática e da associação de fenômenos climáticos sobre sub-bacias do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**. v. 19, p. 46-56, 2011.

DE ALMEIDA¹, T. F. S.; DA SILVA JUNIOR, M. A. B.; DE MELO, R.; ALCOFORADO, G.; DE AZEVEDO, J. R. G. Análise das precipitações totais anuais no alto e médio São Francisco e sua correlação com a vazão natural. In: Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 1., 2014, Petrolina –PE e Juazeiro - BA. Anais [recurso eletrônico].

DE ANGELIS, C. F. Análise dos sistemas precipitantes no Brasil a partir de dados processados em um integrador de informações adquiridas por pluviômetros, satélites, rede de relâmpagos e radares meteorológicos-PRECIBRA. Projeto de Pesquisa. **CPTEC-INPE**.2005.

DE ARAÚJO, G. R. G.; SILVA, C. M. S. E.; DA SILVA, A. G. Avaliação das Parametrizações Cumulos Emanuel e Grell do Modelo Climático Regional RegCM4: Simulando a Precipitação e Temperatura a Superfície sobre o Nordeste Brasileiro durante o Outono Austral. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 231-240, 2019.

DEE, D.P.; UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M.A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A.C.M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A.J.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S.B.; HERSBACH, H.; HÓLM, E.V.; ISAKSEN, L.; KALLBERG, P.; KOHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A.P.; MONGE-SANZ, B.M.; MORCRETTE, J.J.; PARK, B.-K.; PEUBEY, C.; ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J.N. & VITART, F. The ERA-Interim Reanalysis: ConFiguRation and Performance of the Data Assimilation System. **Royal Meteorological Society**, v.137, n.656, p. 553-597, 2011.

DE MARIA, P. H. S.; COSTA, A. A.; SOMBRA, S. S. Modelagem Numérica em Alta Resolução para Previsão de Geração de Energia Eólica no Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n 4, p. 477-489, 2008.

DE SOUZA MARTINS, L.; CAVALCANTI, D. L. O.; DAS CHAGAS, R. L. Análise dos índices de disponibilidade e demanda de água na sub-região do alto São Francisco, na bacia do rio São Francisco. **Sustentare**, v.2, n. 3, p. 93-106, 2018.

DE OLIVEIRA FAGUNDES, H. Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo MSWEP para a bacia Amazônica. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2017, Santos. Anais [recurso eletrônico]. São José dos Campos: SP, P. 2027-2034.

DIAZ, H.F; BRADLEY, R.S. The Hadley Circulation: Present, Past and Future: **Kluwer Academic Publishers**, v. 21, p. 121-152, 2004.

DOS SANTOS, E. P. dos; CORREIA, M. F.; ARAGAO, M.R.S.; ARAUJO, L. E.; SILVA, F.D.S. Padrão Mensal de Anomalias de Precipitação: Uma Análise Estatística de Eventos Hidrológicos Extremos nas Sub-Bacias do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 6, n. 5, p. 1193-1207, 2013.

DOS SANTOS, S. R. Q.; CUNHA, A. P. M. A.; RIBEIRO NETO, G. G. Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p. 80-100, 2019.

FREITAS, I. G. F. D.; Gomes, H. B.; Mariano, G. L.; Silva, M. C. L. D.; Lyra, M. J. A.; Nova, T. S. V.; Oliveira, C. P. D. Downscaling Dinâmico através do Modelo RegCM para Diferentes Inicializações Utilizando Dados do CFSv2. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 813-821, 2020

FARIAS, R. F. L.; NÓBREGA, R. S. Tendência Espacial e Temporal da Precipitação Pluviométrica em Pernambuco. *In*: GALVÍNCIO, J. D (org). **Mudanças climáticas e Impactos ambientais**. Ed. Universitária, UFPE, Recife-PE, Capítulo 15, p. 251-264, 2010.

FAURÈS, J. M., GOODRICH, D. C., WOOLHISER, D. A., SOROOSHIAN, S. Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling. **Journal of Hydrology**. Vol. 173, p. 309-323, 1995.

FEKETE, B. M., VOROSMARTY, C. J., ROADS, J. O., WILLMOTT, C. J. Uncertainties in precipitation and their impacts on runoff estimates. **Journal of Climate**. Vol. 17, p. 294-304, 2004.

FERREIRA, N.J.; SANCHES, M.; SILVA DIAS, M.A.F. Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Períodos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.1, 89-98, 2004.

FERREIRA, A. G.; Mello N. G. S. Principais Sistemas Atmosféricos Atuantes Sobre a Região Nordeste do Brasil e a Influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no Clima da Região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.1, p. 14-22, 2005.

FGV – Fundação Getúlio Vargas. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**– Recursos Hídricos na Bacia do Rio São Francisco. (1ª edição). v. 4 168p. 1998.

FITTIPALDI, A. D. **Modelo de integração de sistemas de gestão: uma aplicação na usina hidrelétrica de Xingó, bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife: UFPE, 2016.

SILVEIRA, C. D. S., SOUZA FILHO, F. D. A. D., MARTINS, E. S. P. R., OLIVEIRA, J. L., Costa, A. C., NOBREGA, M. T.; SILVA, R. F. V. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.21, p.416-428, 2016.

FUNK, C. PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, v. 2, p. 150066, 2015.

GALVÃO, C. O., NOBRE, P. BRAGA, A. C. F. M., OLIVEIRA, K. F., MARQUES, R., SILVA, S. R., GOMES FILHO, M. F., SANTOS, C. A. G., LACERDA, F., MONCUNILL, D. Climatic predictability, hydrology and water resources over Nordeste Brazil. In: *Regional*

Hydrological Impacts of Climatic Change — Impact Assessment and Decision Making.
Wallingford: IAHS Press. p. 211-220. IAHS Publ. 295. 2005.

GALVÍNCIO, J. D.; SOUZA, F. A. S. Relação Entre o Fenômeno El Niño e os Totais Mensais Precipitados na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 7, n. 4, 113-119, Dez, 2002.

GIORGI, F.; MARANUCCI, M. R. Validation of a regional atmospheric model over Europe: Sensivity of wintertime and summertime simulations tom selected physics parameterizations and lower boundary conditions. **Quarterly Royal Journal of Meteorological Society**, Londres, v.117, p.1171-1207. 1991.

GIORGI, F.; COPPOLA, E.; SOLMON, F.; MARIOTTI, L.; SYLLA, M.; BI, X.; ELGUINDI, N.; DIRO, G.; NAIR, V.; GIULIANI, G. RegCM4: Model description and preliminar tests over multiple CORDEX domains. **Climate Research**, v. 52, p. 7-29, 2012.

GLICKMAN, T.S. Glossary of Meteorology. 2nd ed. **American Meteorological Society**, Boston. p. 855, 2000.

GRIMM, A. 2009. Variabilidade interanual do clima no Brasil. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; DIAS, M.A.F. & JUSTI, M.G.A. (Orgs.). **Tempo e Clima no Brasil**. ed. São Paulo: Oficina de textos, 1, 353-374.

HOUNSOU-GBO, G.A. **Dinâmica do Atlântico tropical e seus impactos sobre o clima ao longo da costa do Nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Ciências Oceanográficas) – Programa de Pós Graduação em Oceanografia. Universidade Federal de Pernambuco. Recife – PE, 2015.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. United Kingdom and New York, p.1535, 2013.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: The physical science basis**. Cambridge, p.18, 2007a.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge, p.23 , 2007b.

JOTHITYANGKOON, C., SIVAPALAN, M., FARMER, D. L. Process controls of water balance variability in a large semi-arid catchment: downward approach to hydrological model development. **Journal of Hydrology**. v. 254, p. 174-198, 2001.

KERKHOVEN, E., GAN, T. Y. A modified ISBA surface scheme for modeling the hydrology of Athabasca River Basin with GCM-scale data. **Advances in Water Resources**. v. 29, n. 6, p. 808-826, 2006.

KOUSKY, V. E., FERREIRA, N. J., 1981. Interdiurnal surface pressure variations in Brazil: their spatial distributions, origins and effects. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 9, 1999-2008.

LIMA. J.P.R.; ALVES. J.M.B. Um estudo de downscaling dinâmico de precipitação intrasazonal acoplado a modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica altomédio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.3, 323-338, 2009.

LLOPART M.; DA ROCHA, R.P. CLM coupled in the RegCM4.1 Model: Sensitivity to the Cumulus Convective Schemes over the Amazon Rainforest. *In: EGU General Assembly Conference Abstracts*. [S.l.: s.n.], v.14, p. 6386, 2012.

LOPES, Z. F. **Detecção de mudança hidroclimática na bacia hidrográfica do Rio São Francisco**. Tese (doutorado em geografia) – Programa de Pós Graduação em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2014.

MACHADO, C.C.C., NÓBREGA, R.S, OLIVEIRA, T.H., ALVES, K.M.A.S. Distúrbio Ondulatório de Leste como Condicionante a Eventos Extremos de Precipitação em Pernambuco. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 11, n. 8, p. 146-188, 2012.

MANTUA, N. J.; HARE, S.R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J.M.; FRANCIS, R.C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin American Meteorology Society**, v, 78, p, 1069-1079, 1997.

MARTINS, G. E. Desvio padrão amostral. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. **Revista de Ciência Elementar**. v. 1, p. 01. Lisboa, 2013.

McCULLOCH, J. S. G.; ROBINSON, M. History of forest hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 150, p. 189-216, 1993.

MILLER, N. L.; KIM, J.; HARTMAN, R. K.; FARRARA, J. Downscaling climate on stream flow study on Southwestern on Unite States. **Journal American Water Resources Association**, 35, p.1525-1537. 1999.

MÖLDERS, N., RÜHAAK, W. On the impact of explicit predicted runoff on the simulated atmospheric reponse to small-scale land-use changes – an integrated modeling approach. **Atmospheric Research**. v. 63 p. 3-38, 2002.

MOREIRA, A. A., & RUHOFF, A. L. Análise do balanço hídrico na América do Sul por sensoriamento remoto. *In*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22., 2017, Florianópolis. **Anais** [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRH, 2017.

NASCIMENTO JÚNIOR, L.; SANT'ANNA NETO, J.L. Contribuição aos estudos da precipitação no estado do Paraná: a oscilação decadal do Pacífico - ODP. **RA'E GA: o Espaço Geográfico em Análise**, v.35, n.2, p.314-343, 2016.

NÓBILE TOMAZIELLO, A. C. **Influências da temperatura da superfície do mar e da umidade do solo na precipitação associada à Zona de Convergência do Atlântico Sul**. 166 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Relatório anual de avaliação das previsões de vazões: 2015**. Brasília, 2015. Disponível em: <

<http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/2015-ONS-RelatorioAnual.pdf>. Acesso em: 10 julho 2021.
<http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/2015-ONS-RelatorioAnual.pdf>

OSBORNE, H. B., RENARD, K. G. Thunderstorm runoff on the Walnut Gulch experimental watershed, Arozina, USA. In: The Results of Research on Representative and Experimental Basins. (Proc. IAHS-UNESCO Symposium, Wellington, New Zealand) Vol. 1, p. 455-464. IAHS Publ. 96. 1970.

PALLOTTA, M.; NAKAZATO, R. Y. Caracterização de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Zona de Convergência de umidade (ZCOU) em janeiro e fevereiro de 2010. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 16., 2010, Belém. **Anais** [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2010.

PBMC. Sumário Executivo do Volume 1 - Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o 1º Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Brasil, Volume Especial para a Rio+20, 34p, 2012.

PESQUERO, J. F.; NOBRE, C. A.; MARENGO, J. Um sistema simples de identificação da Zona de Convergência do Atlântico Sul em rodadas longas de mudanças climáticas. XVI **Congresso de Meteorologia**, 2010.

RAMOS, Humberto Martins. **Projeções climáticas regionais em alta resolução: tendências no vento e potencial eólico no nordeste do Brasil**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2022.

REBOITA, M.S.; DIAS, C. G.; DUTRA, L.M.M.; ROCHA, R. P.; LLOPART, R. Previsão climática sazonal para o Brasil obtida através de modelos climáticos globais e regional. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.33, n.2 , p. 207-224, 2018b.

REBOITA, M. S.; FERNANDEZ, J. P. R.; LLOPART, M.; ROCHA, R. P.; PAMPUCH, L. A.; CRUZ, F. T. Assesment of RegCM4.3 over the CORDEX South America domain: sensitivity analysis for physical parametrization schemes. **Climate Research**, v.60, p.215-234, 2014.

Reboita, M. S., Teodoro, T. A., de Souza Ferreira, G. W., & de Souza, C. A. Ciclo de vida do sistema de monção da América do Sul: clima presente e futuro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(01), 343-358. 2022.

SANTOS, S.A.; CORREIA, M.F.; BRAGA, C. C.; ARAGÃO, M. G.S. Análise estatística de chuvas intensas e inundações no semiárido da Bacia do Rio São Francisco: a cheia de 1985. **Revista de Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 7, n. 3, p. 278-290, Jul/Set, 2010.

SALATI, T.; SCHINDLER, W.; VICTORIA, D.C.; SALATI, E.; SOUZA, J.C.S.; NOVA, N.A.V. Economia das Mudanças Climáticas no Brasil. Estimativas da Oferta de Recursos Hídricos no Brasil em Cenários Futuros de Clima. **Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável**, p80 ,2008.

SANTOS, G.B. Marcação e recaptura da curimatápioa (*Prochilodus costatus*) em um afluente do rio São Francisco e avaliação da necessidade de transposição de peixes na UHE Gafanhoto. In J.M. Lopes e F.O.Silva(Org.). **Transposição de peixes**. Belo Horizonte, p.35-58, 2012.

SCHNEIDER, T; BISCHOFF, T; HAUNG, G.H. Migrations and dynamics of the Intertropical Convergence Zone. **Nature Geoscience**, v. 51, p. 45-53, 2014.

SECTMA – SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE. **Atlas de bacias hidrográficas de Pernambuco**. Recife, 104 p. 2006.

SHAH, S. M. S., O'CONNELL, P. E., HOSKING, J. R. M. Modelling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response. 2. **Experiments with distributed and lumped models**. *Journal of Hydrology*. Vol. 175, p. 89-111, 1996.

SILVA, B. C.; Clarke, R. T. Análise estatística de chuvas intensas na Bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, p.265-272, 2004.

SILVA, A. M.; BRITO, J. I. B.; UVO, C. R. B. ; NOBRE, C. A. Previsibilidade da estação chuvosa do leste do Nordeste. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 45., 1993, Recife. **Anais [recurso eletrônico]**. v.1, 681 p. UFPE, 1993.

SILVA, V.P. **Distúrbios Ondulatórios de Leste: estudo de casos que afetaram a costa leste do NEB**. 2010. 77p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

Silva, Neilon Duarte. **Estimativa, Análise Espacial e Temporal da Evapotranspiração de Referência (ET_o) na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. Brasil. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos) - Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2017.

Silva, C. B., Silva, M. E. S., Ambrizzi, T., Tommaselli, J. T. G., Patucci, N. N., Mataveli, G. A. V., ... & Correa, W. C. Precipitação na América do Sul—dados obtidos por estações meteorológicas automáticas e por sistemas orbitais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p. 54-79, 2019.

SILVEIRA, C. da S.; SOUZA FILHO, F.A.; MARTINS, E.S.P.R., OLIVEIRA, J.L.; COSTA, A.C.; NOBREGA, M.T.; SOUZA, S.A.; SILVA, R.F.V. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, p. 416–428, 2016.

SOBRAL, M. C; ASSIS, J. M. O.; OLIVEIRA, C. R.; SILVA, G. M. N.; MORAIS, M. CARVALHO, R. M. C. Impacto das Mudanças Climáticas nos recursos hídricos no Submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco – Brasil. **Revista Eletrônica do Prodemá – REDE**, v 12, n. 03, 2018.

SOBREIRO, J. F. F.; Streher, A. S.; Silva, T. S. F. Análise comparativa de produtos geoespaciais para monitoramento de precipitação em uma região montanhosa tropical. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 2487-2491, 2017.

SOUZA, L. R. **Simulação hidrológica e aplicação de uma análise multivariada no estudo de chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

TEIXEIRA, A.H.C. Informações Agrometeorológicas do Polo Petrolina, PE/Juazeiro, BA - 1963 a 2009. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – **Embrapa seminário** / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Petrolina, 2010.

VEBER, P. M.; NETA, M. C. C.; MANKE, E. B.; GANDRA, C. F. A. T.; DAMÉ, R. D. C. F. Análise de consistência entre dados interpolados e observados de precipitação do município de Pelotas/RS/Analysis of consistency between interpolated and observed precipitation data of the municipality of Pelotas/RS. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 6, p. 5993-6000, 2019.

VERA, C.; HIGGINS, W.; AMADOR, J.; AMBRIZZI, T.; GARREAUD, R.; GOCHIS, D.; GUTZLER, D.; LETTENMAIER, D.; MARENGO, J.; MECHOSO, R.; NOGUES-PAEGLE, J.; SILVA DIAS, P.; ZHANG, C. Toward a unified view of the American mon- soon systems. **J. Climate**, v. 19, n. 20, p.4977-5000, 2006.

WALISER, D.E. Intertropical Convergence Zone (ITCZ). In: Tropical Meteorology, Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Edited by J. Holton, J. Pyle, J. Curry. **Academic Press**. p. 1-10, 2002.

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, May 2016.

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

XAVIER, A.; KING, C.; SCANLON, B. An update of xavier, king and scanlon (2016) daily precipitation gridded data set for the Brazil: Sbsr. In: INPE (Ed.). **Anais** [recurso eletrônico]. XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE. v. 1, n. 1, p. 8, 2017.

XAVIER, A. C. ESTUDO DA RELAÇÃO DA TEMPERATURA MÁXIMA COM A ALTITUDE NO BRASIL. *In: Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 19., 2019, Santos. **Anais** [recurso eletrônico]. 2019. v. 1, n. 1, p. 995.

YAIR, A.; LAVEE, H. Runoff generative processes and runoff yield from arid talus mantled slopes. **Earth Surface Processes**. v. 1, p. 235-247, 1978.

YAIR, A.; KOSSOVSKY, A. Climate and surface properties: hydrological response of small arid and semi-arid watersheds. **Geomorphology**. Vol. 42, p. 43-57, 2002.

APÊNDICES

Apêndice A – Viés e Correlação (corr) da precipitação das parametrizações com o domínio menor de grade horizontal de 40km durante o bimestre Jan/Fev de 2001 para o teste das parametrizações

Figura 18: Viés e Corr da simulação da parametrização Emanuel com o domínio menor de grade horizontal de 40km com os dados observados.

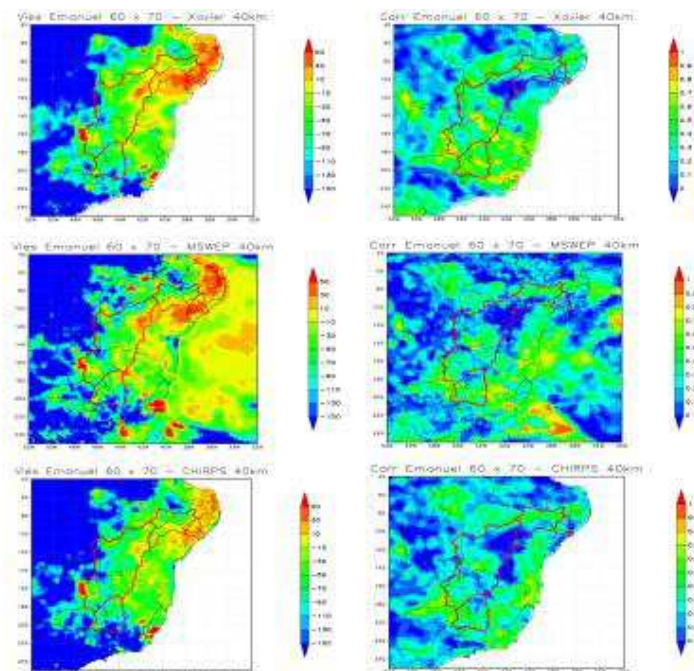


Figura 19: Viés e Corr da simulação da parametrização Tiedtke com o domínio menor de grade horizontal de 40km com os dados observados.

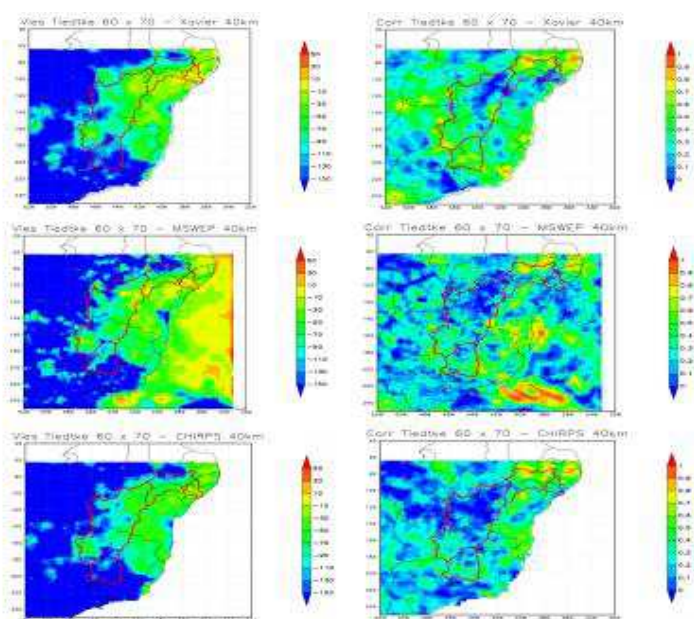


Figura 20: Viés e Corr da simulação da parametrização Kain Fritsch com o domínio menor de grade horizontal de 40km com os dados observados.

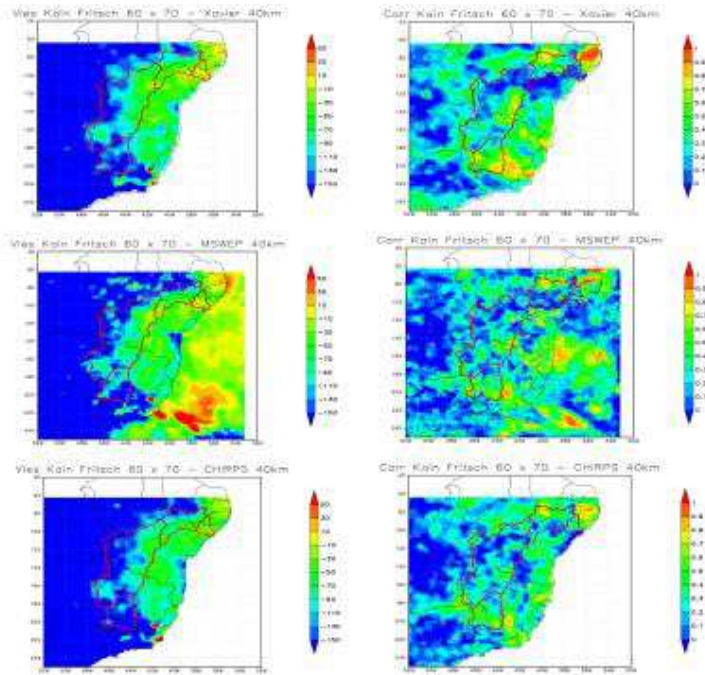


Figura 21: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Arakawa & Schubert) com o domínio menor de grade horizontal de 40km com os dados observados.

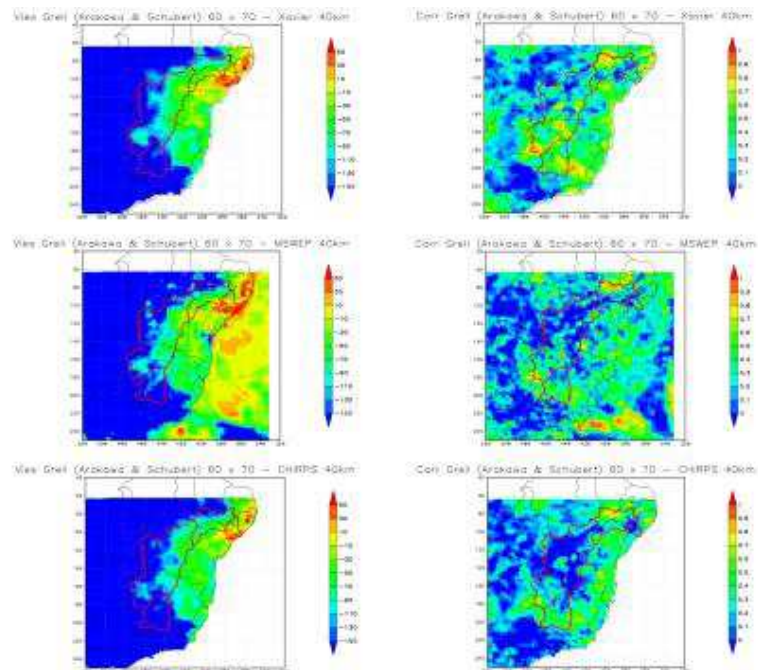
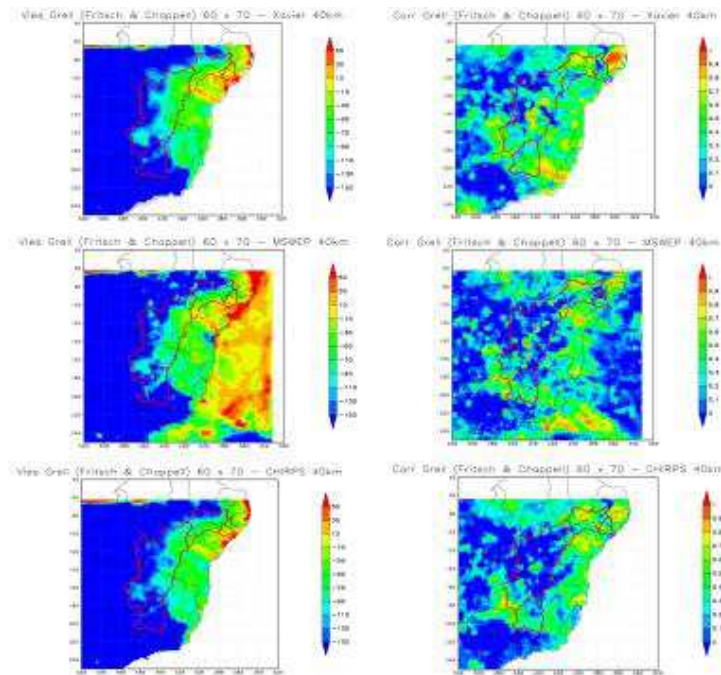


Figura 22: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Fritsch & Chappell) com o domínio menor de grade horizontal de 40km com os dados observados.



Apêndice B– Viés e Correlação (corr) da precipitação das parametrizações com o domínio maior de grade horizontal de 40km durante o bimestre Jan/Fev de 2001 para o teste das parametrizações

Figura 23: Viés e Corr da simulação da parametrização Emanuel com o domínio maior de grade horizontal de 40km com os dados observados.

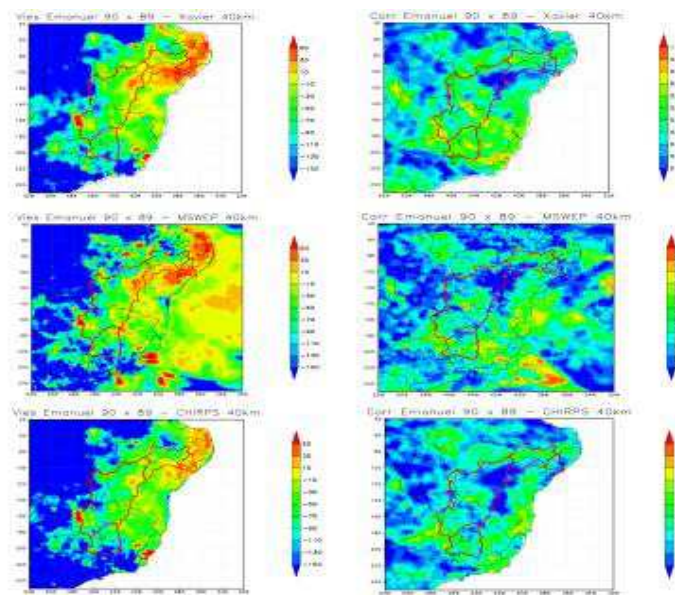


Figura 24: Viés e Corr da simulação da parametrização Tiedtke com o domínio maior de grade horizontal de 40km com os dados observados.

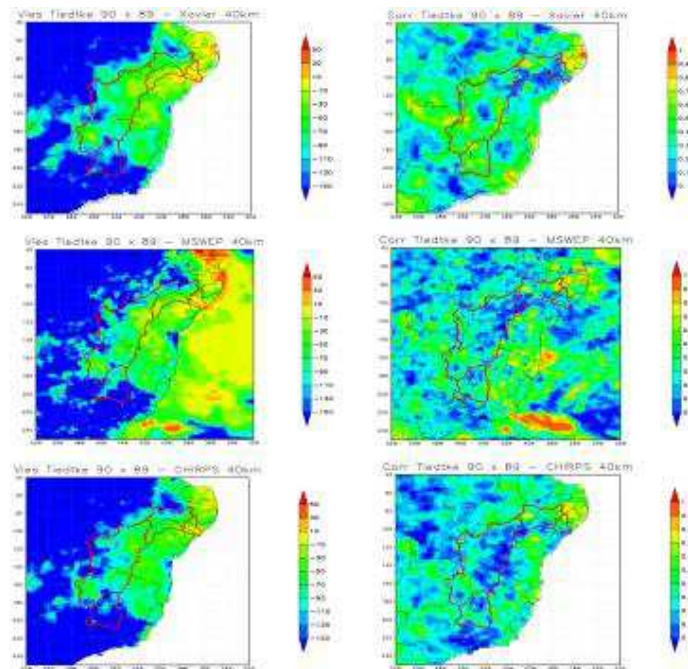


Figura 25: Viés e Corr da simulação da parametrização Kain Fritsch com o domínio maior de grade horizontal de 40km com os dados observados.

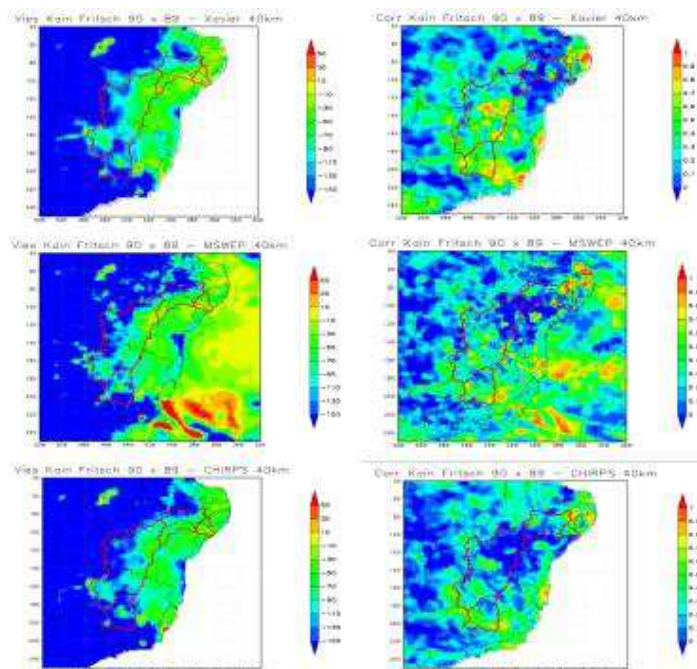


Figura 26: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Arakawa & Schubert) com o domínio maior de grade horizontal de 40 km com os dados observados.

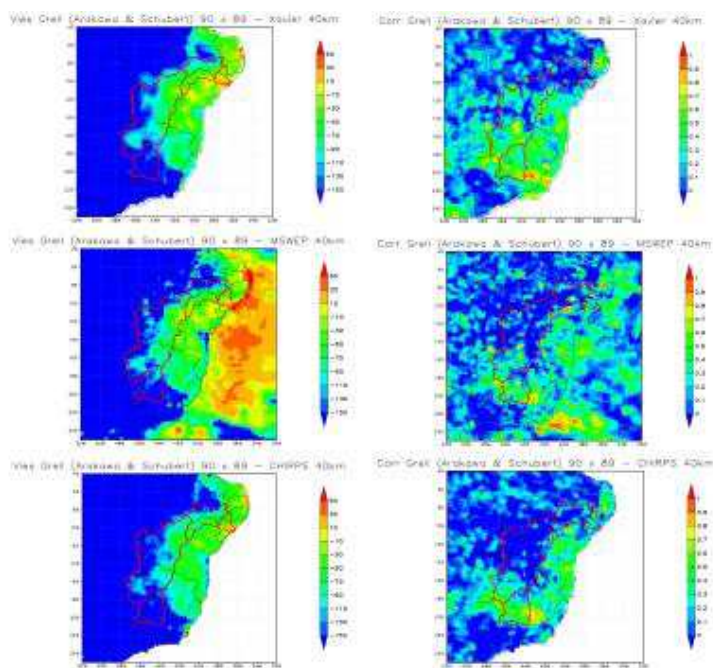
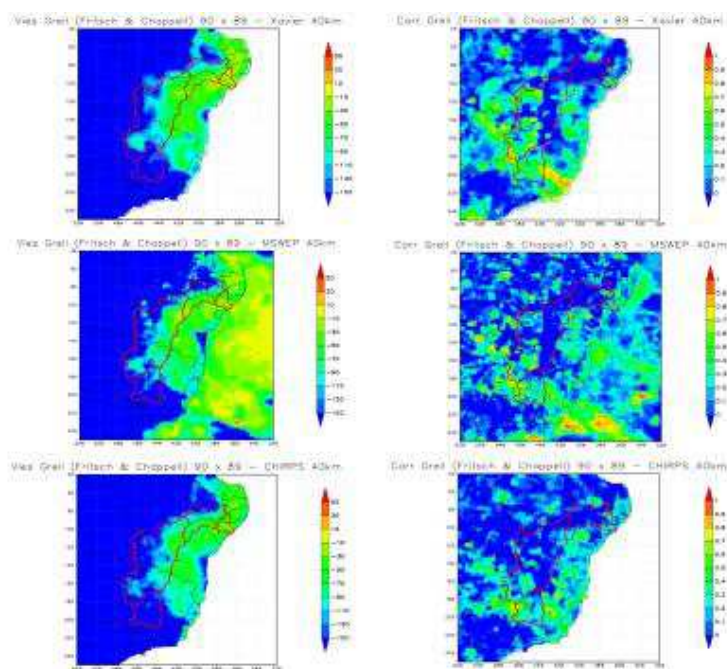


Figura 27: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Fritsch & Chappell) com o domínio maior de grade horizontal de 40km com os dados observados.



Apêndice C– Viés e Correlação (corr) da precipitação das parametrizações com o domínio menor e grade horizontal de 20km durante o bimestre Jan/Fev de 2001 para o teste das parametrizações

Figura 28: Viés e Corr da simulação da parametrização Emanuel com o domínio menor e grade horizontal de 20km com os dados observados.

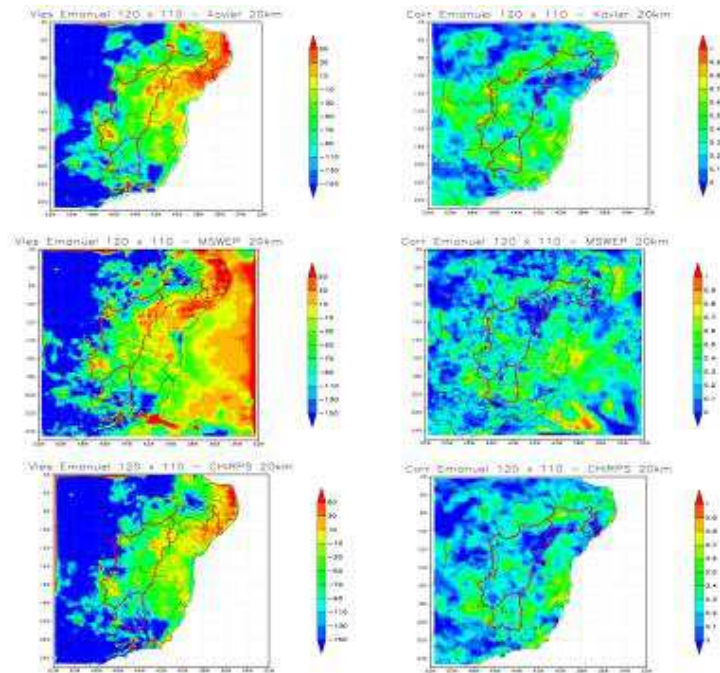


Figura 29: Viés e Corr da simulação da parametrização Tiedtke com o domínio menor e grade horizontal de 20km com os dados observados.

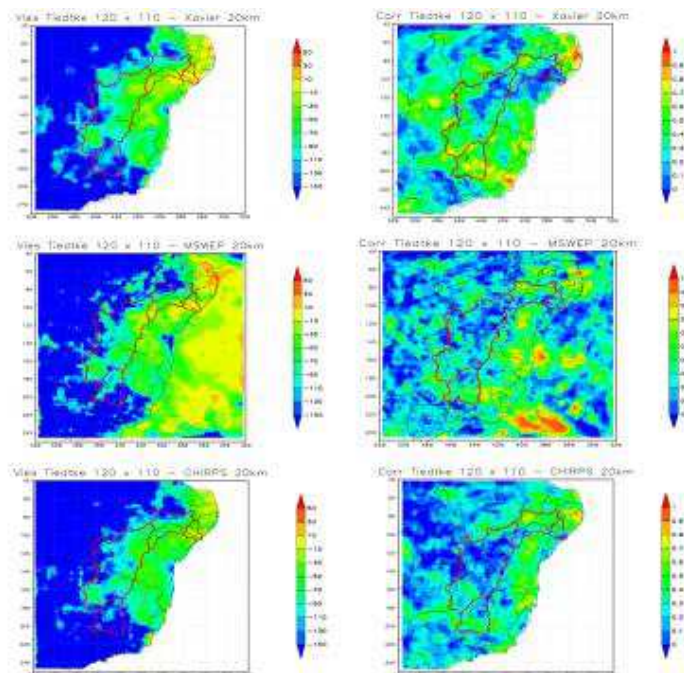


Figura 30: Viés e Corr da simulação da parametrização Kain Fritsch com o domínio menor e grade horizontal de 20km com os dados observados.

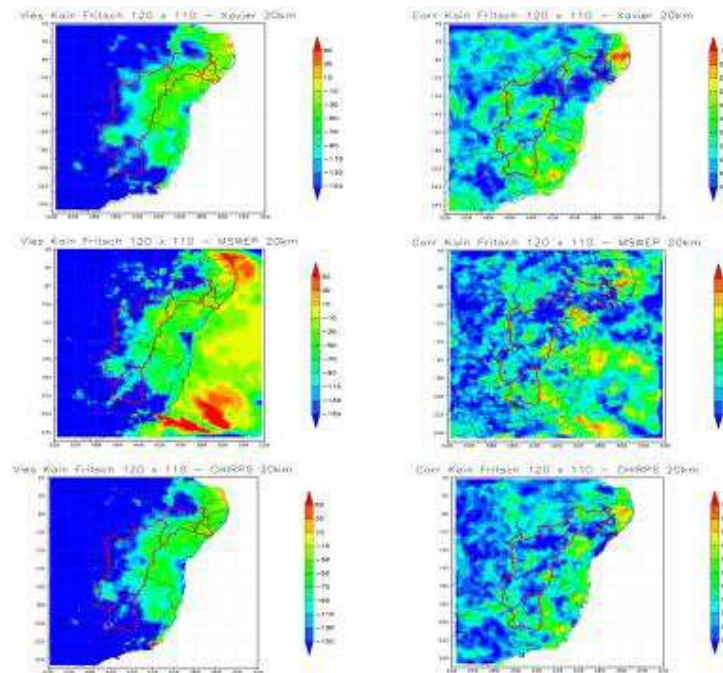


Figura 31: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Arakawa & Schubert) com o domínio menor e grade horizontal de 20km com os dados observados.

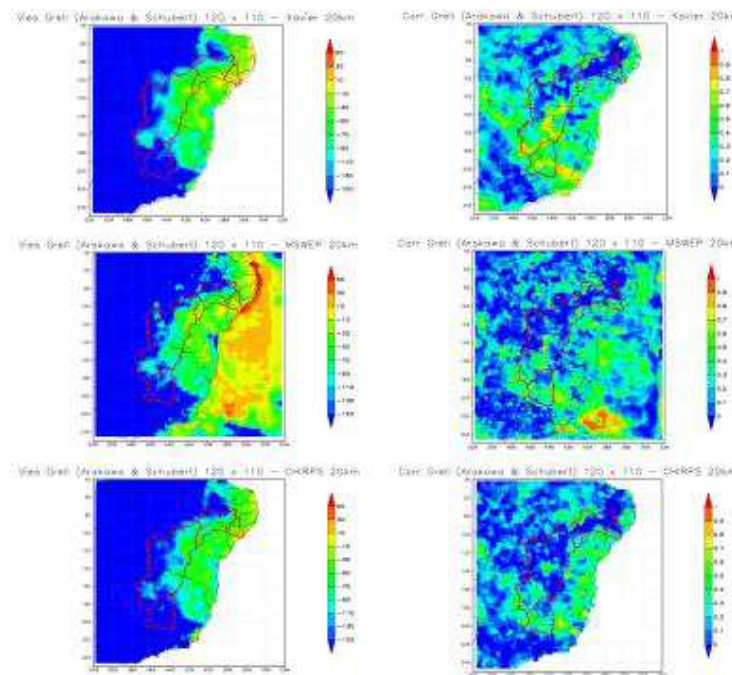
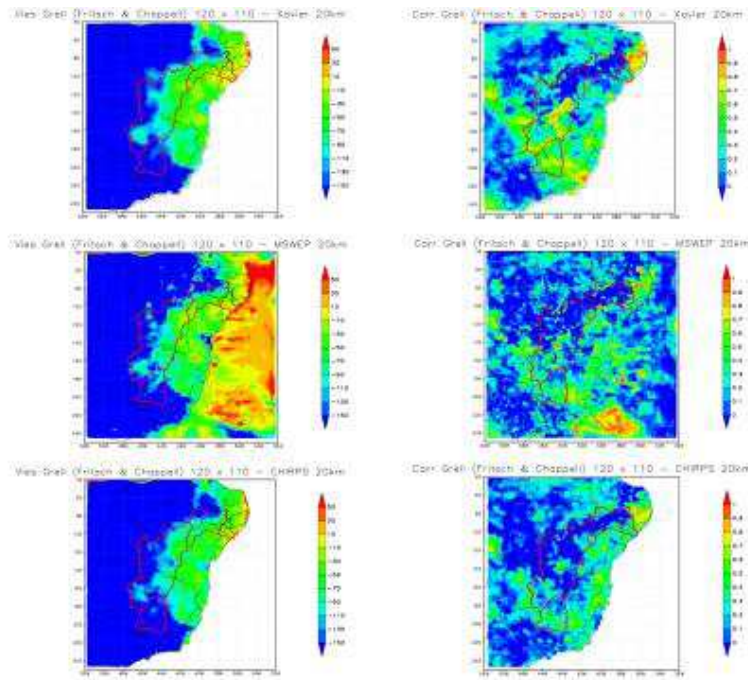


Figura 32: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Fritsch & Chappell) com o domínio menor e grade horizontal de 20km com os dados observados.



Apêndice D– Viés e Correlação (corr) da precipitação das parametrizações com o domínio maior e grade horizontal de 20km durante o bimestre Jan/Fev de 2001 para o teste das parametrizações

Figura 33: Viés e Corr da simulação da parametrização Emanuel com o domínio maior e grade horizontal de 20km com os dados observados.

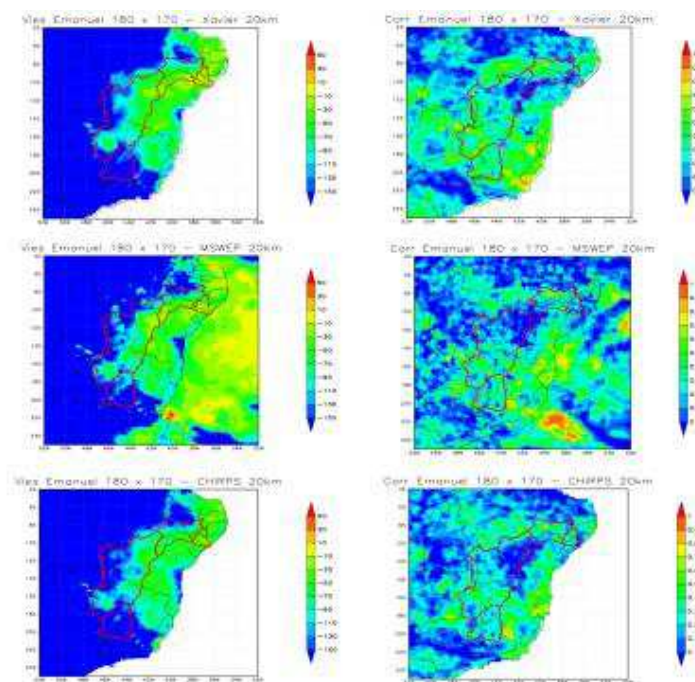


Figura 34: Viés e Corr da simulação da parametrização Tiedtke com o domínio maior e grade horizontal de 20km com os dados observados.

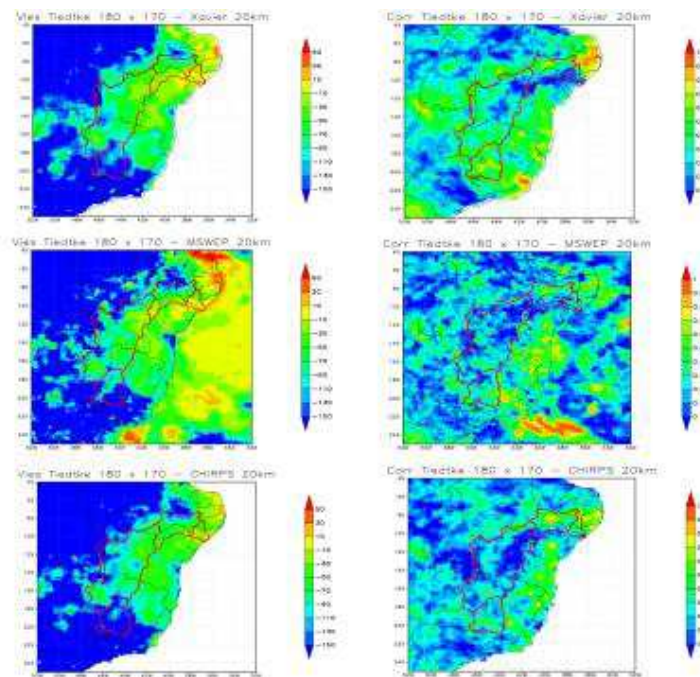


Figura 35: Viés e Corr da simulação da parametrização Kain Fritsch com o domínio maior e grade horizontal de 20km com os dados observados.

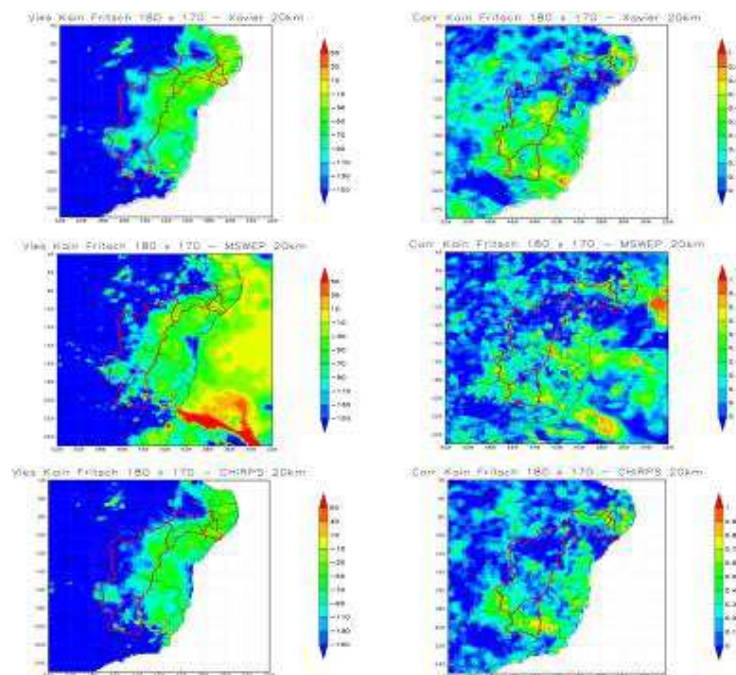


Figura 36: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Arakawa & Schubert) com o domínio maior e grade horizontal de 20km com os dados observados.

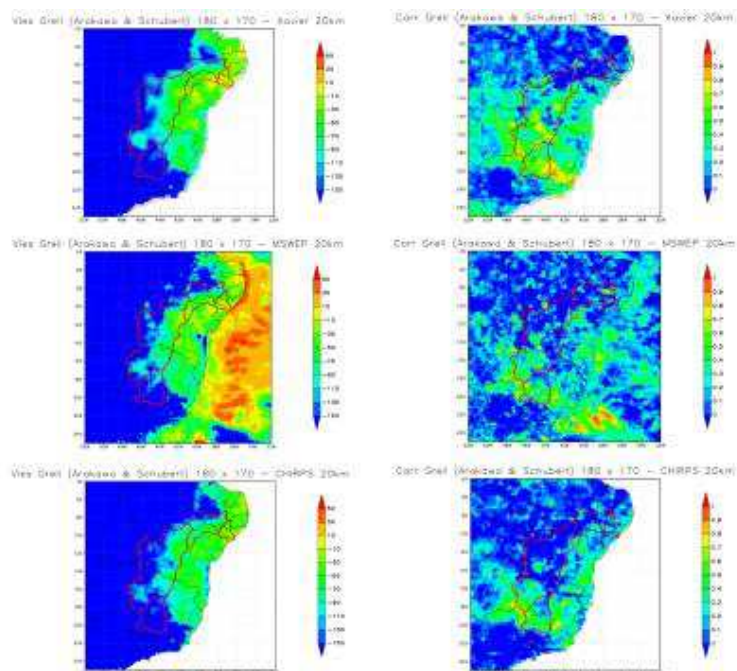


Figura 37: Viés e Corr da simulação da parametrização Grell (Fritsch & Chappell) com o domínio maior e grade horizontal de 20km com os dados observados.

