






Artigo

## Avaliação das Parametrizações de Cúmulos do Modelo Climático Regional na Bacia do Rio São Francisco

Pedro Fernandes de Souza Neto<sup>1</sup> , Sandra Isay Saad<sup>1,2</sup> , Jonathan Mota Silva<sup>2</sup> ,  
Ismael Guidson Farias de Freitas<sup>1,2</sup> , Matheus José Arruda Lyra<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>*Departamento de Ciência Atmosférica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.*

<sup>2</sup>*Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.*

Recebido em: 24 de Agosto de 2022 - Aceito em: 27 de Fevereiro de 2023

### Resumo

O uso de modelos climáticos com ênfase na simulação de precipitação é estratégico para estudos climáticos e de recursos hídricos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a precipitação simulada pelo modelo regional climático RegCM na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, conforme a parametrização de cúmulos e o domínio. Nossa avaliação, com uso de diversos índices estatísticos e a combinação desses, mostram que o RegCM apresentou maior destreza em simular os padrões de precipitação quando neste foi prescrito (acionado) nele a parametrização de Emanuel ou de Tiedke. As outras parametrizações avaliadas, Kain-Fritsch e a de Grell, subestimaram consideravelmente a precipitação. Emanuel se destacou pela melhor representação da variabilidade temporal da precipitação, enquanto Tiedke apresentou maior correlação e menores erros médios. O baixo São Francisco foi a região em que o RegCM apresentou a menor destreza em simular a precipitação durante maio a julho (período chuvoso), indicando a dificuldade do modelo em representar o transporte de umidade do oceano para o continente e a ocorrência dos distúrbios ondulatórios de leste. Por fim, o modelo prescrito com um domínio maior simulou melhor os padrões de precipitação provavelmente por contemplar a região de atuação dos sistemas meteorológicos de escalas maiores atuantes na bacia.

**Palavras-chave:** parametrização de cúmulos, downscaling dinâmico, modelo atmosférico regional, RegCM.

## Evaluation of Cumulus Parameterization of the Regional Climate Model in the São Francisco River Basin

### Abstract

The use of climate models with emphasis on precipitation simulation is strategic for climate and water resources studies. The objective of this work was to evaluate the precipitation simulated by the RegCM regional climate model in the São Francisco River basin, according to the cumulus parameterization and the domain. Our evaluation, using several statistical indices and their combination, show that RegCM showed greater performance in simulating precipitation patterns when Emanuel or Tiedke parameterization was prescribed (activated). The other parameterizations evaluated, Kain-Fritsch and Grell, underestimated precipitation considerably. Emanuel stood out for the better representation of the temporal variability of precipitation, while Tiedke presented a higher correlation and lower mean errors. The Low São Francisco was the region in which RegCM showed the lower skill in simulating precipitation from May to July (rainy season), indicating the difficulty of the model in representing the moisture transport from the ocean to the continent and the occurrence of Easterly Waves disturbances. Finally, the model prescribed with a larger domain simulated better the precipitation patterns probably because it contemplates the region where the meteorological systems of larger scales act in the basin.

**Keywords:** cumulus parameterization, dynamic downscaling, regional atmospheric model, RegCM.

## 1. Introdução

A bacia hidrográfica do São Francisco (BHSF) apresenta uma área que representa cerca de 8% de todo território brasileiro (ANA, 2005), além de ser uma das principais bacias para a região Nordeste do Brasil. A bacia detém uma importante função no abastecimento de água tanto para o consumo humano como também para a irrigação, além da produção de energia por meio das usinas hidrelétricas de Paulo Afonso e Sobradinho, como também nas atividades de turismo e pesca (Silveira, 2016). Grande parte da área da BHSF localiza-se na área do Semiárido brasileiro, e conforme Cabral *et al.* (2013), essa região evidencia 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 os estudos que buscam constatar as mudanças dos padrões nessa região são essenciais.

Diversos sistemas meteorológicos de grande escala influenciam o regime pluviométrico da BHSF, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Este sistema é o primordial mecanismo dinâmico causador de precipitações durante o período de novembro a março nas regiões fisiográficas do Alto (da Silva e Brito, 2009; 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 (Ferreira e Melo *et al.*, 2005), 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 (Kousky e Ferreira *et al.*, 1981 e Hounsou-gbo *et al.*, 2015). A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal mecanismo gerador de precipitação 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 atuam entre os estados da Bahia e do Rio Grande do Norte, entre os meses de maio a agosto e influenciam a precipitação no setor do baixo São Francisco, principalmente nos meses de maio a julho (Araújo, 2006).

Além dos sistemas meteorológicos a variabilidade de baixa frequência, em especial, a variabilidade inter-anual, 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, médio e o baixo São Francisco. Os autores verificaram que, em anos de ocorrência de El Niño, acontecem grandes precipitações no alto e médio São Francisco, gerando altas vazões nessas regiões fisiográficas e poucas precipitações no baixo São Francisco. Já em anos de ocorrência de La Niña, transcorre exatamente o contrário, sendo assim, as

poucas precipitações no alto e médio São Francisco e grandes precipitações no baixo São Francisco. De acordo com Assis *et al.* (2018) em anos de ocorrência de El Niño, ocorre uma diminuição no regime de precipitação no sub-médio da bacia do rio São Francisco.

Uma forma de buscar reduzir os impactos provocados pelos eventos extremos é através da previsão das ocorrências por intermédio dos modelos atmosféricos, e assim fazendo-se capaz a realização de ações mitigadoras (Cabral *et al.*, 2013). O entendimento dos fenômenos atmosféricos em geral, das previsões do clima e do tempo, e da estimativa da vazão são algumas das funcionalidades dos modelos atmosféricos. Os modelos regionais utilizam como condições inicial e de contorno os dados do modelo de circulação global da atmosfera, contendo características regionais como topografia, vegetação, solo, contrastes entre continente-oceano, e outros em uma melhor resolução que os modelos globais. Essa técnica com o uso de modelos regionais é conhecida como downscaling dinâmico, que demonstra mais adequadamente o funcionamento na simulação e previsão de disposição de precipitação localizada (Nobre, 2001; Seth, 2005; Sun, 2005; Alves, 2008; Da Silva, 2009). Esses modelos tem sido utilizado para trabalhos de simulação do clima atual, mudança climática, mudança do uso da terra e para experimentos sazonais (Ambrizzi *et al.*, 2019). As simulações do clima atual são importantes já que os modelos apresentam erros sistemáticos e é necessário avaliar as diferenças entre os diversos modelos e parametrizações (Gonçalves *et al.*, 2015; Ambrizzi *et al.*, 2019).

Neste estudo foi utilizado o modelo RegCM, que é amplamente utilizado na comunidade científica, como Reboita *et al.* (2014), Santos e Silva *et al.* (2014), Reboita *et al.* (2018), Freitas *et al.* (2020). Grande parte desses estudos apontam o melhor desempenho da parametrização de cumulus (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), mas apresentam discordâncias entre os estudos. Por exemplo, conforme Reboita *et al.* (2014) a parametrização mista de Grell no continente e Emanuel no oceano foi a que apresentou a melhor simulação para o ciclo anual de precipitação no Nordeste do Brasil.

O estudo realizado por Miranda *et al.* (2017) foi o único que usou o modelo RegCM para estudar a precipitação e o escoamento superficial do rio São Francisco, entretanto somente para a cabeceira do rio São Francisco, e afirma que é essencial analisar os resultados obtidos dos modelos climáticos para a utilização em estudos.

Em razão da importância da BHSF, especialmente para a região Nordeste, este estudo teve o objetivo de avaliar o modelo regional climático RegCM na versão 4.6 a

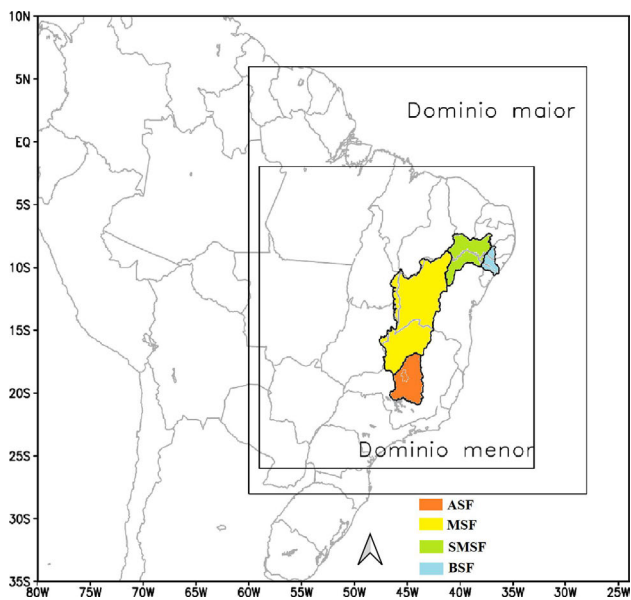
partir de testes de sensibilidades das suas parametrizações de cúmulos e domínio espacial, a fim de explorar o modelo e obter a sua configuração mais adequada para representação da precipitação ao longo da bacia. Os testes de sensibilidade foram realizados para o ano de 2000 para, por fim, as melhores configurações serem analisadas para um período maior, de 10 anos (de 2000 a 2010).

A seção 2 descreve o material e método utilizado para a elaboração do artigo, a seção 3 mostra os resultados obtidos e as discussões desses resultados, e, por fim, a seção 4, apresenta as conclusões do presente estudo.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Área de estudo

O rio São Francisco possui grande importância nacional, principalmente para a região Nordeste do Brasil, sendo também um dos maiores rios do Brasil. A bacia Hidrográfica do Rio São Francisco possui uma área de aproximadamente 631.133 km<sup>2</sup> com uma extensão de aproximadamente 2900 km (Santos *et al.*, 2012). 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, entre os estados de Alagoas e Sergipe (CODEVASF *et al.*, 2011). A bacia do São Francisco abrange os estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Sergipe, Alagoas e Pernambuco e o Distrito Federal (ANA, 2004). De acordo com a CODEVASF *et al.* (2011) a bacia do São Francisco possui uma divisão de quatro regiões fisiográficas, conforme a Fig. 1, sendo elas o Alto (ASF), Médio (MSF), Submédio (SMSF) e Baixo (BSF) São



**Figura 1** - Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF), as regiões fisiográficas (Alto, Médio, Submédio e Baixo SF) e domínios utilizados para as simulações: menor e maior.

Francisco que, por sua vez, foi subdividida em 12.821 microbacias, com o intuito de identificar, por trechos, os rios mais importantes da região.

A BHSF possui grande importância no cenário social e econômico do Brasil, em especial no que se refere à agricultura (Lima e Alves, 2009). A área irrigada é de 342.900 hectares, correspondendo a 11% dos 3,1 milhões de hectares irrigados no país. Diversas 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).

### 2.2. Experimento numérico

Foi utilizado o modelo climático regional RegCM, na versão 4.6. O modelo foi desenvolvido pelo National Center for Atmospheric Research (NCAR) e hoje é mantido pelo Abdus Salam International Center for Theoretical Physics (ICTP) (Giorgi *et al.*, 2012; Ambrizzi *et al.*, 2019). O modelo dispõe das seguintes parametrizações de cúmulos, que representam a formação de nuvens convectivas em escala inferior à da grade do modelo (sub-grade) e que simulam o aquecimento e a precipitação (Molinari, 1993): Emanuel, onde a convecção é acionada quando o nível onde o empuxo nulo que é atingido está acima da base das nuvens (Emanuel 1991, Emanuel e Zivkovic-Rothman, 1999); Kain-Fritsch, um esquema de fluxo de massa, baseado no esquema de Fritsch-Chappell (1980), onde a convecção “remove” a energia potencial convectiva e simula a troca de massa de nuvem e o ambiente, preservando a massa e a energia (Kain e Fritsch, 2004); Tiedke, um esquema convectivo de fluxo de massa que procura representar diferentemente a convecção rasa, média e profunda, sendo as duas últimas sustentadas pela convergência de umidade em grande escala e a primeira pelo aporte de umidade derivado da evaporação da superfície (Tiedtke, 1989, Bhatla *et al.*, 2016 e Koné *et al.*, 2018); e Grell, que considera que a convecção é ativada após uma parcela levantada por uma corrente ascendente alcançar o nível de convecção úmida (Giorgi *et al.* 1993b; Giorgi *et al.*, 2012). Para a parametrização de Grell, dois tipos de fechamentos são disponibilizados: um que remove a energia de empuxo a cada passo de tempo (Arakawa e Schubert) e o outro a cada 30 min (Fritsch e Chappell, Pal

*et al.*, 2007). Os testes de sensibilidade avaliados neste trabalho envolveram o uso dessas quatro parametrizações, incluindo com os dois fechamentos no caso da parametrização de Grell.

O modelo foi integrado com o núcleo dinâmico hidrostático (Giorgi *et al.*, 2012) ao sistema de coordenadas sigma com 18 níveis verticais, utilizando o esquema de superfície Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS; Dickinson *et al.*, 1993) e as parametrizações de camada limite modificada de Holtslag *et al.* (1990) e de radiação de Kiehl *et al.* (1996). A umidade do solo é parametrizada a partir do esquema Pal *et al.* (2000) de umidade explícita (SUBEX) e o esquema dos fluxos de calor (sensível e latente) e momento no oceano foi o de Zeng *et al.* (1998). O espaçamento de grade horizontal utilizado foi de 40 km, também utilizados por outros trabalhos recentes (Miranda *et al.*, 2017 e De Araújo *et al.*, 2019). A condição de fronteira lateral utilizada no RegCM foram os dados de reanálise ERA-interim do European Centre for Medium-range Weather Forecasting (ECMWF) com resolução espacial de 0,75° de latitude x 0,75° de longitude.

Para os testes de sensibilidade foram comparados dois domínios diferentes, cada um utilizado em um grupo de simulações distintas: o domínio menor (com 60 pontos de grades em y e 70 em x) com intuito de otimizar o tempo computacional e o domínio maior (com 90 pontos de grades em y e 89 em x) para abranger os sistemas de escalas maiores (sistemas transientes, área de atuação da ZCAS, etc) (Fig. 1), e cinco parametrizações de cúmulos (Tabela 1). As parametrizações foram testadas para cada um dos dois domínios, resultando em 10 testes de sensibilidade. 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). Foi escolhido o ano 2000 para as avaliações dos testes de sensibilidade, por ser um ano cuja precipitação observada na BHSF (1044 mm, 1028 mm e 1056 mm de acordo com as bases de dados de Xavier *et al.*, 2016, CHIRPS e MSWEP, respectivamente) foi próxima da

média anual climatológica, que é de 1.036 mm (Moura, 2006). Além disso, o ano de 2000 foi um ano neutro com relação ao fenômeno ENOS.

Após a escolha das melhores configurações, rodou-se o modelo RegCM para o período de 1999 a 2010, descartando novamente o primeiro ano para estabilização do modelo. Assim a precipitação foi analisada para o período de 2000 a 2010, sendo escolhido esse período em razão de apresentarem variações nas ocorrências de ENOS, com o intuito de verificar se as simulações conseguem acompanhar as variações que ocorrem na precipitação.

### 2.3. Dados

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 do Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP, Beck *et al.*, 2017). Essas três bases de dados são bastante utilizadas para o Brasil, por exemplo, de Xavier *et al.* (2016) por (Veber, 2019; Xavier, 2019; Baratto, 2020), do CHIRPS por (Costa, 2019; Dos Santos, 2019; Silva, 2019) e do MSWEP por (Fagundes, 2017; Moreira e Ruhoff, 2017; Brêda, 2019). Os dados de Xavier *et al.* (2019) são uma base de dados meteorológicos diários para o Brasil, com uma resolução espacial de 0,25° e foram construídos a partir da interpolação dos dados dos pluviômetros e dos dados observados das estações meteorológicas. Os dados de precipitação do CHIRPS têm resolução espacial de 0,05°, por volta de 5 km, perto do Equador, com um domínio que vai de 50° S a 50° N e utiliza como base imagens de satélites, a precipitação do modelo CFSv2 e diversas estações meteorológicas (Funk, 2015 e Costa, 2019). Já os dados do MSWEP apresentam resolução espacial de 0,1° e utilizam também dados de diversos produtos vigentes, incluindo imagens de satélite, reanálises e pluviômetros (Fagundes *et al.*, 2017).

### 2.4. Análise estatística

Para avaliar as simulações de precipitação foram calculados os seguintes índices para cada uma das três fontes de dados observados/reanálises e para cada região fisiográfica, parametrização e domínio: o viés, que considera a diferença entre precipitação diária simulada e a observada Eq. (1); o Erro Médio Absoluto (MAE), semelhante ao viés, mas considera as diferenças absolutas Eq. (2); a razão entre os desvios padrões da precipitação simulada e a observada ( $R\sigma$ ), Eq. (3); o índice de concordância de Wilcott ( $Id$ ), Eq. (4); e o coeficiente de correlação de Pearson (corr), que é uma medida da relação linear entre a precipitação simulada e a observada Eq. (6).

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

Identificação da simulação	Parametrização	Domínio
1	Emanuel	menor
2	Tiedtke	menor
3	Kain Fritsch	menor
4	Grell (Arakawa e Schubert)	menor
5	Grell (Fritsch e Chappell)	menor
6	Emanuel	maior
7	Tiedtke	maior
8	Kain Fritsch	maior
9	Grell (Arakawa e Schubert)	maior
10	Grell (Fritsch e Chappell)	maior

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

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

$$R\sigma = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} \quad (3)$$

$$Id = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (p_{sim_i} - p_{obs_i})^2}{\sum_{i=1}^n (|p_{sim_i} - \bar{p}_{obs}| + |p_{obs_i} - \bar{p}_{obs}|)^2} \quad (4)$$

onde  $p_{sim_i}$  e  $p_{obs_i}$  se referem ao  $i$ -ésimo ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) valor da precipitação simulada e observada, respectivamente, e  $\bar{p}$  se refere às médias aritméticas,  $\sigma$  é o desvio padrão dado pela Eq. (5).

$$\begin{cases} \sigma_{sim} = \sqrt{\left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_{sim_i} - \bar{p}_{sim})^2 \right]} \\ \sigma_{obs} = \sqrt{\left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_{obs_i} - \bar{p}_{obs})^2 \right]} \end{cases} \quad (5)$$

$$corr = \frac{\sum (p_{sim_i} - \bar{p}_{sim})(p_{obs_i} - \bar{p}_{obs})}{\sqrt{\left( \sum (p_{sim_i} - \bar{p}_{sim})^2 \right) \left( \sum (p_{obs_i} - \bar{p}_{obs})^2 \right)}} \quad (6)$$

Para esses índices analisados, valores de viés e MAE próximos a zero indicam baixos erros da simulação em relação à observação, valores de  $R\sigma$  próximos a 1 (um) significam que os valores simulados possuem uma maior semelhança e valores próximos a 1 de  $corr$  mostram uma alta correlação linear da simulação em relação à observação.

Outra análise estatística realizada foi através do Diagrama de Taylor, que conforme Taylor *et al.* (2001) e Freitas *et al.*, (2020) é um método regularmente utilizado para a averiguação da precisão dos modelos numéricos, através das seguintes análises: coeficiente de correlação ( $corr$ ), Eq. (6), desvio padrão ( $\sigma$ ), Eq. (5) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMS), Eq. (7). No diagrama, os eixos  $x$  e  $y$  possuem as medidas do desvio padrão das observações e simulações, respectivamente. A distância radial da origem à posição representando o modelo é o  $\sigma_{sim}$ . O azimute da origem ao modelo é proporcional à correlação. O erro (ou RMS) é proporcional à distância da observação, situada no eixo  $x$ .

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_{obs_i} - p_{sim_i})^2} \quad (7)$$

## 2.5. Ranqueamento das parametrizações

Para melhor expressar a parametrização que obteve um resultado mais eficaz para cada domínio, foram atri-

buidos pontos para ranquear as parametrizações em função dos índices e em cada região fisiográfica. Para cada um dos cinco índices estatísticos, a melhor parametrização recebeu a pontuação 5, a segunda melhor, 4 pontos, e assim sucessivamente, até a parametrização que obteve o pior desempenho, que recebeu pontuação 1. Com isso, a pontuação máxima que pode ser obtida é de 25 pontos (5 parametrizações x 5 índices estatísticos).

Para fazer a análise do melhor domínio, foram comparados os índices estatísticos que obtiveram a melhor pontuação de cada domínio, onde a parametrização que apresentou o melhor resultado recebeu pontuação 5 e a que obteve a menor pontuação, recebeu pontuação 4, e quando ocorreu o empate, ambas receberam pontuação 5.

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1. Comparação das parametrizações

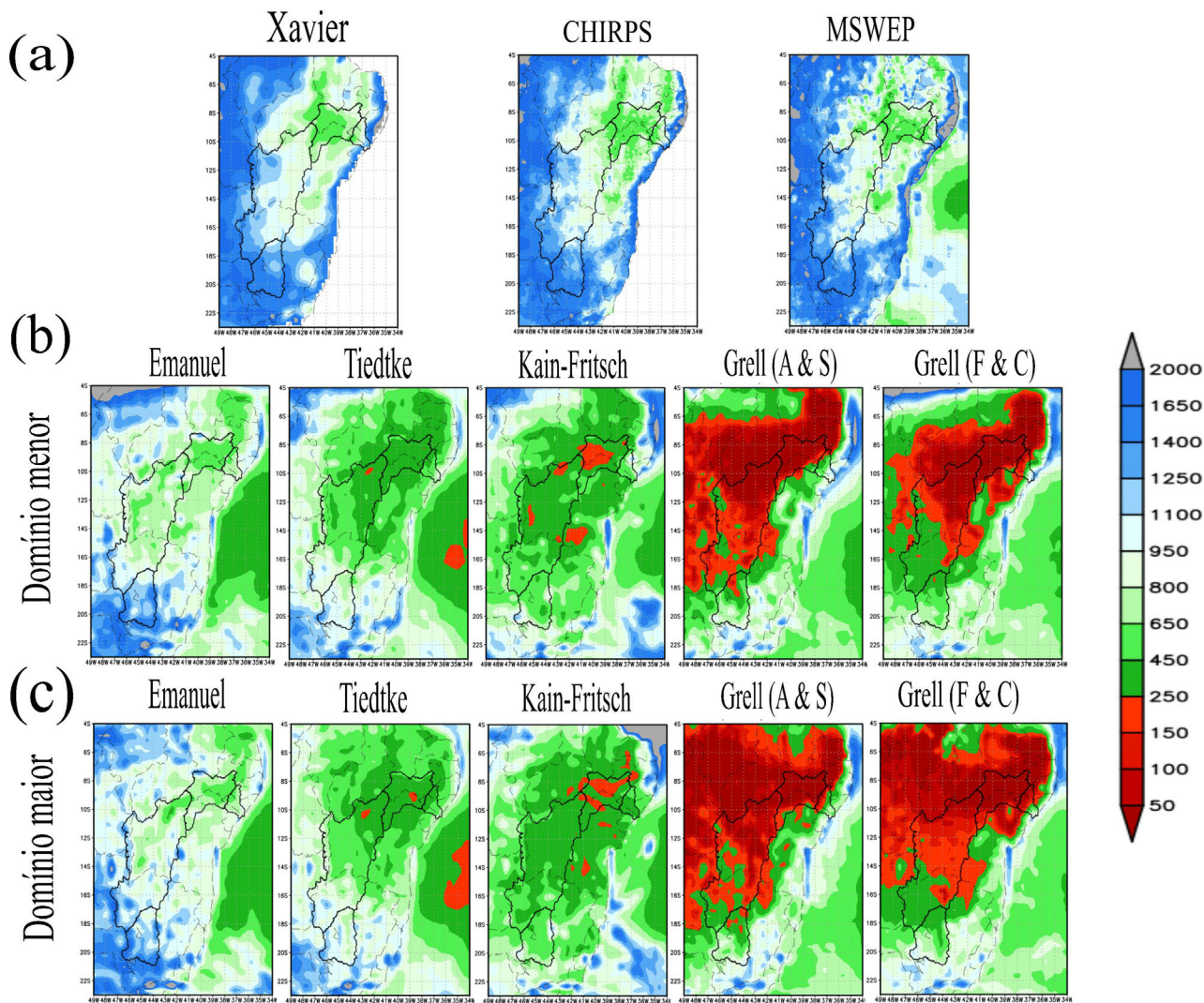
A Fig. 2 mostra a precipitação acumulada durante o ano de 2000 para as três bases de dados utilizados, para as parametrizações e para as duas opções de domínio. Para facilitar a comparação, os limites do domínio maior (Fig. 1) foram reduzidos para coincidir com o do domínio menor (Fig. 2b).

Em comparação com as bases de dados (Fig. 2), a parametrização de Emanuel é a que obteve a precipitação simulada mais próxima das observações, tanto para o domínio menor (Fig. 2b) quanto para o domínio maior (Fig. 2c). 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 com os dois fechamentos, subestimam consideravelmente a precipitação em toda a BHSF.

Ainda é possível observar que o local com a maior diferença da precipitação simulada com a parametrização de Emanuel em relação à das bases de dados é no centro-norte da bacia, para os dois domínios.

As Figs. 3 e 4 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.

Para o domínio maior, a parametrização de Emanuel no ASF apresenta apenas o mês de fevereiro com uma diferença alta em comparação com as três bases de dados, de aproximadamente 100 mm (Fig. 3a). Nos demais meses a diferença é pequena. No MSF, a maior diferença para a parametrização de Emanuel ocorreu no mês de novembro, com uma diferença de aproximadamente 100 mm. Já no SMSF, a maior diferença ocorreu nos meses de setembro onde Emanuel superestimou em aproximadamente 40 mm e em novembro, que subestimou em aproximadamente



**Figura 2** - Precipitação acumulada (mm) no ano 2000 para: (a) as bases de dados observados (Xavier, CHIRPS e MSWP), (b) e (c) domínio menor e maior, respectivamente, para as cinco parametrizações de cúmulos (Emanuel, Tiedtke, Kain Fritsch, Grell (A e S) e Grell (F e C)).

40 mm. Por último, no BSF, Emanuel obteve o pior desempenho nos meses de junho e julho, a diferença chega a ser de aproximadamente 60 mm.

Para o domínio menor, a parametrização de Emanuel também apresentou uma maior diferença de precipitação no ASF durante o mês de fevereiro, de pouco mais de 100 mm (Fig. 4a). Para o MSF, os meses de janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro apresentam uma diferença considerável, sendo maior no mês de janeiro, em aproximadamente 60 mm em janeiro e 100 mm em novembro. No SMSF, a maior diferença ocorre em setembro, quando Emanuel superestima em aproximadamente 40 mm a precipitação. Por último, no BSF, a maior diferença é verificada no mês de junho, com uma diferença de cerca de 70 mm.

Nota-se que o pior desempenho da simulação tanto para o domínio menor quanto para o domínio maior ocorre

no BSF, principalmente durante os meses de maio a julho, que é o período chuvoso dessa região. De acordo com Araújo *et al.*, (2006) durante os meses de maio a julho é o período que as OL estão atuando e formando precipitação no BSF, podendo assim o modelo ter dificuldades de representar o transporte de umidade, como também das OL, gerando assim essa subestimação nessa região.

### 3.2. Análise objetiva

As Tabelas 2 e 3 mostram os índices estatísticos para o domínio maior e domínio menor, respectivamente, para a média ponderada em cada região fisiográfica considerando as proporções em relação à área total da bacia: ASF (16%), MSF (63%), SMSF (17%) e o BSF (4%). Os melhores índices foram encontrados para as parametrizações de Emanuel e Tiedtke (Fig. S1). A primeira parametrização foi melhor pelo viés,  $R\sigma$  e Id, enquanto que a segunda foi

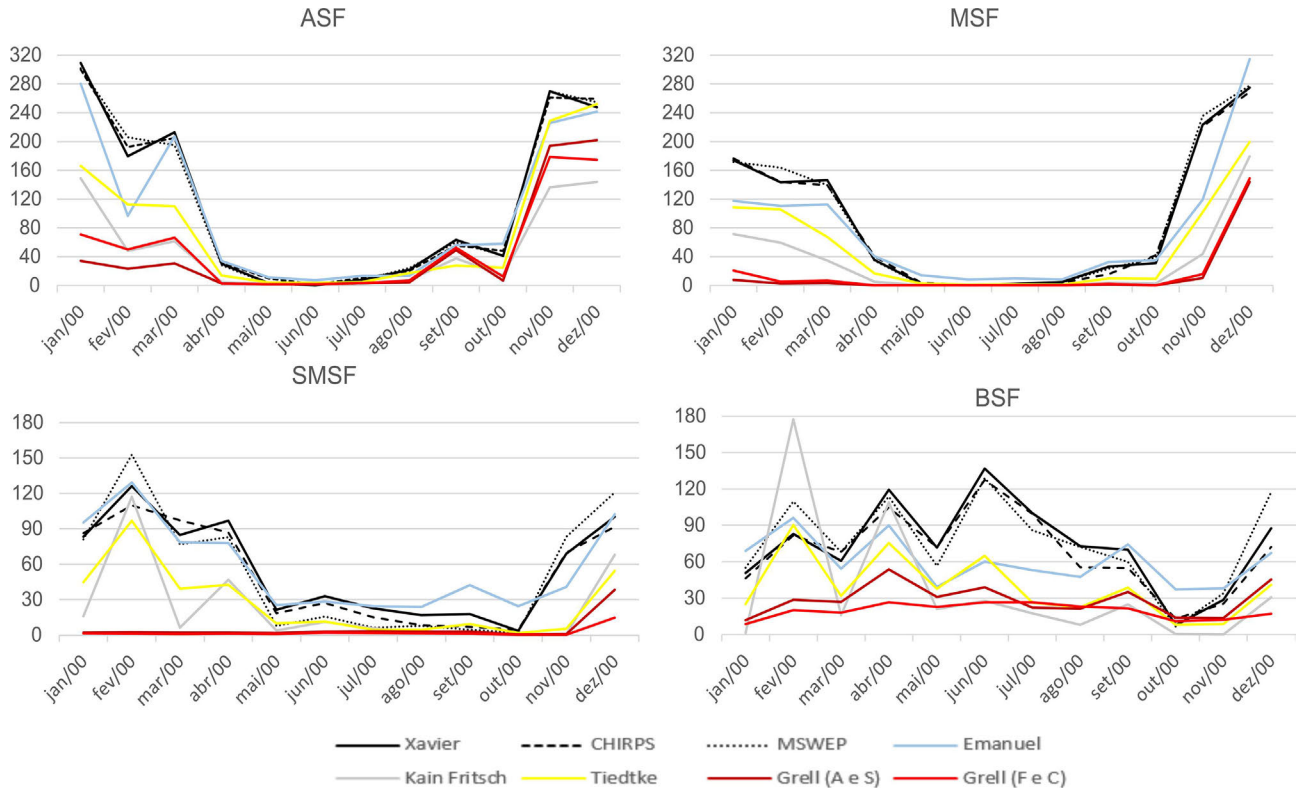


Figura 3 - Precipitação mensal (mm) durante o ano de 2000 em cada região fisiográfica do rio São Francisco observada e simulada com o domínio maior.

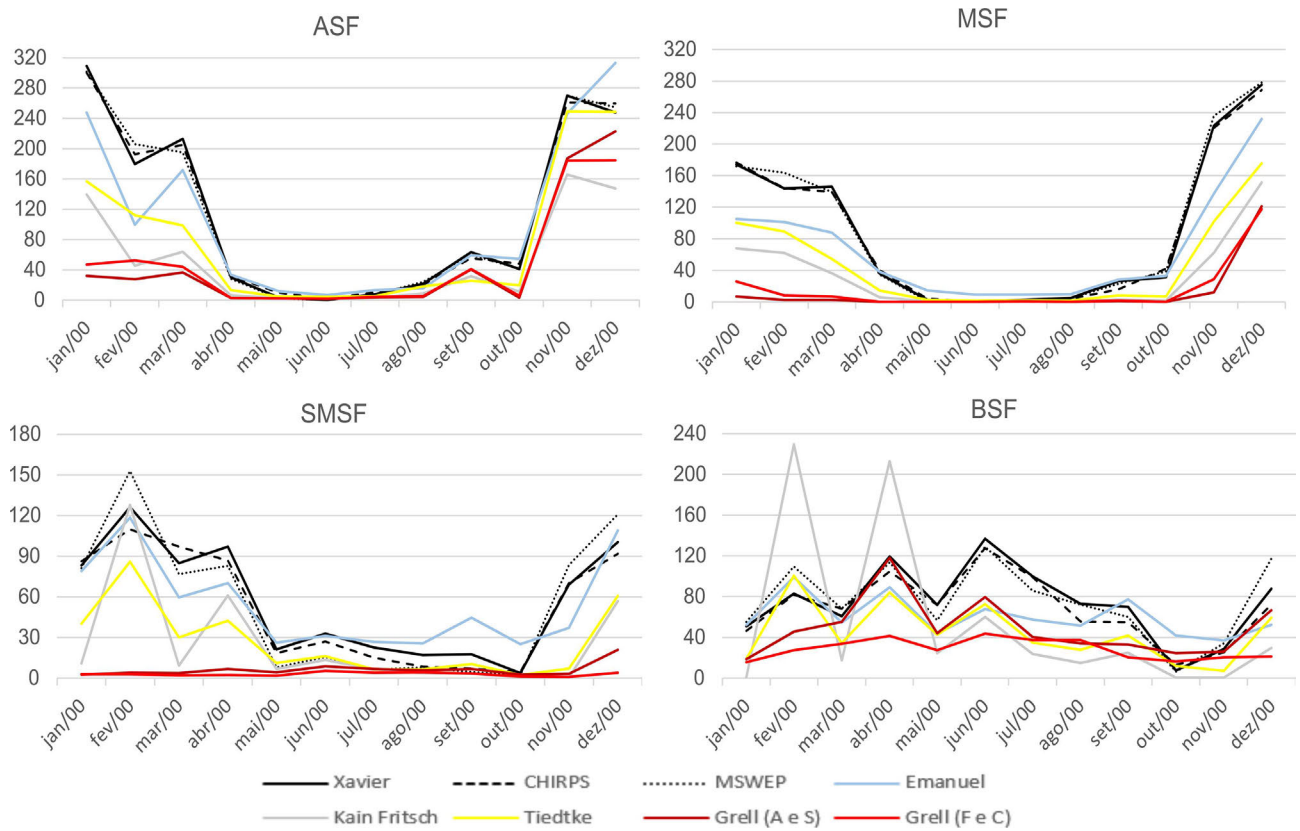


Figura 4 - Precipitação mensal (mm) durante o ano de 2000 em cada região fisiográfica do rio São Francisco observada e simulada com o domínio menor.

melhor para o MAE e correlação. Esse padrão coincidiu para os dois domínios (Tabelas 2 e 3) e para as três bases de dados, cujos desempenhos em relação a essas foram muito semelhantes (Tabelas S1 e S2).

As Tabelas 4 e 5 mostram a pontuação obtida para cada parametrização e para o domínio maior e menor, respectivamente. Como são cinco parametrizações e cinco análises estatísticas realizadas, a pontuação máxima que cada parametrização pode obter é de 25 (5 x 5), sabendo que na ocorrência de empates na avaliação dos índices, as parametrizações tiveram pontuações iguais. Para ambos os casos (Tabela 4 e 5), analisando a pontuação média das três bases de dados, foi possível observar que a parametrização de Emanuel foi a que melhor se aproximou, obtendo assim a melhor pontuação entre todas as parametrizações com o domínio maior e menor. Em segundo lugar ficou a parametrização de Tiedtke.

**Tabela 2** - Viés (V), erro absoluto médio (MAE), desvio padrão ( $R\sigma$ ), correlação linear (corr) e índice de concordância de Willmott (Id) para o domínio maior na BHSF utilizando os dados de Xavier *et al.* (2016). Os melhores resultados foram destacados em negrito.

	Emanuel	Tiedtke	Kain Fritsch	Grell (A e S)	Grell (F e C)
Viés (mm dia <sup>-1</sup> )	<b>-0,32</b>	-1,15	-1,71	-2,25	-2,20
MAE (mm dia <sup>-1</sup> )	1,68	<b>1,53</b>	2,02	2,67	2,50
$R\sigma$	<b>0,89</b>	0,67	0,70	0,68	0,58
corr	0,71	<b>0,80</b>	0,65	0,40	0,47
Id	<b>0,80</b>	0,76	0,75	0,69	0,70

**Tabela 3** - Viés (V), erro absoluto médio (MAE), desvio padrão ( $R\sigma$ ), correlação linear (corr) e índice de concordância de Willmott (Id) para o domínio menor na BHSF utilizando os dados de Xavier *et al.* (2016). Os melhores resultados foram destacados em negrito.

	Emanuel	Tiedtke	Kain Fritsch	Grell (A e S)	Grell (F e C)
Viés (mm dia <sup>-1</sup> )	<b>-0,53</b>	-1,27	-1,70	-2,26	-2,22
MAE (mm dia <sup>-1</sup> )	1,72	<b>1,65</b>	2,06	2,67	2,49
$R\sigma$	<b>0,76</b>	0,67	0,71	0,60	0,48
corr	0,74	<b>0,79</b>	0,65	0,36	0,44
Id	<b>0,81</b>	0,77	0,75	0,69	0,70

**Tabela 4** - Pontuação das parametrizações de precipitação para o ano de 2000 para o domínio maior. Os melhores resultados foram destacados em negrito.

	Domínio maior				
	Emanuel	Tiedtke	Kain Fritsch	Grell (A e S)	Grell (F e C)
Xavier	<b>23</b>	<b>23</b>	16	9	11
CHIRPS	<b>23</b>	21	16	12	11
MSWEP	<b>23</b>	<b>23</b>	18	9	9
Pontuação média	<b>23,0</b>	22,3	16,7	10,0	10,3

**Tabela 5** - Pontuação das parametrizações de precipitação para o ano de 2000 para o domínio menor. Os melhores resultados foram destacados em negrito.

	Domínio menor				
	Emanuel	Tiedtke	Kain Fritsch	Grell (A e S)	Grell (F e C)
Xavier	<b>23</b>	<b>23</b>	16	10	10
CHIRPS	<b>23</b>	21	18	12	11
MSWEP	<b>23</b>	<b>23</b>	18	10	9
Pontuação média	<b>23,0</b>	22,3	17,3	10,7	10,0

Finalmente, para comparar os dois domínios utilizando a melhor parametrização para cada domínio, que foi a parametrização de Emanuel, foi comparado os índices estatísticos entre essas parametrizações em cada dois domínios, conforme a Tabela 6. A pontuação máxima é de 16 (4 (análises estatísticas) x 4 (pontos para o melhor índice estatístico entre os dois)), já a pontuação mínima é de 12 pontos (4 (análises estatísticas) x 3 (pontuação do segundo melhor índice estatístico entre os dois)). Para essa análise, o domínio maior obteve uma melhor pontuação comparado com a melhor parametrização do domínio menor.

Esses resultados estão 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 com relação aos dados observados. De Araújo *et al.* (2019) também obtiveram resultados semelhantes para a região Nordeste. Já 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.

### 3.3. Análise das regiões fisiográficas

A Fig. 5 apresenta o diagrama de Taylor para as quatro regiões fisiográficas considerando o domínio maior. De maneira geral, percebe-se que o RegCM apresentou a maior destreza em simular a precipitação com o uso das parametrizações de Tiedtke e Emanuel. A correlação das respectivas simulações apresentou as maiores magnitudes, bem como os menores erros (RMS) e os desvios padrões

**Tabela 6** - Comparação das pontuações utilizando Emanuel, a melhor parametrização de cúmulos, para cada domínio. Os melhores resultados foram destacados em negrito.

	Domínio maior	Domínio menor
Xavier	<b>25</b>	23
CHIRPS	<b>25</b>	23
MSWEP	<b>25</b>	23



mais próximos do desvio padrão da precipitação observada. Nas simulações com Tiedtke a correlação foi levemente superior, variando entre 0,6 a 0,85, e o erro (RMS) foi menor, variando entre 2,7 a 5,0 mm dia<sup>-1</sup>. Por outro lado, as simulações com Emanuel apresentaram uma melhor variabilidade temporal da precipitação, com o desvio padrão mais próximo das observações do que Tiedtke, variado entre 1,7 a 3,9 mm dia<sup>-1</sup>. De modo geral, esse padrão é observado em toda a bacia hidrográfica, exceto no Baixo São Francisco (BSF), onde as simulações com Emanuel tiveram um RSM e um desvio padrão levemente menores do que as simulações com Tiedtke (Fig. 5).

Para a grade menor (Fig. 6), a destreza das simulações de precipitação é semelhante à da grade maior (Fig. 5). Nota-se que as distribuições espaciais dos pontos nos diagramas dessas simulações são semelhantes. Para as simulações com de maior destreza, Emanuel e Tiedtke, os

intervalos de variação da correlação, o RSM e o desvio padrão são os mesmos para os diagramas de Taylor de ambas as grades exceto para a região do MSF, onde a simulação com Emanuel apresentou uma correlação levemente superior (0,8) e um RMS levemente menor (3 mm dia<sup>-1</sup>) nas simulações com a grade menor. Para essa grade, também a parametrização de Tiedtke apresentou maior correlação e menor erro (MAE), enquanto Emanuel a melhor variabilidade temporal da precipitação (Tabela 3).

O diagrama de Taylor reforça os resultados encontrados anteriormente para toda a BHSF (Tabela 2), mostrando também a superioridade do desempenho das simulações com as parametrizações de Emanuel e a de Tiedtke. As simulações com essa parametrização apresentaram um erro absoluto médio (MAE) e uma correlação (corr) levemente melhor do que a de Emanuel (Tabelas 2 e 3), que por sua vez, foi moderadamente melhor em simular a va-

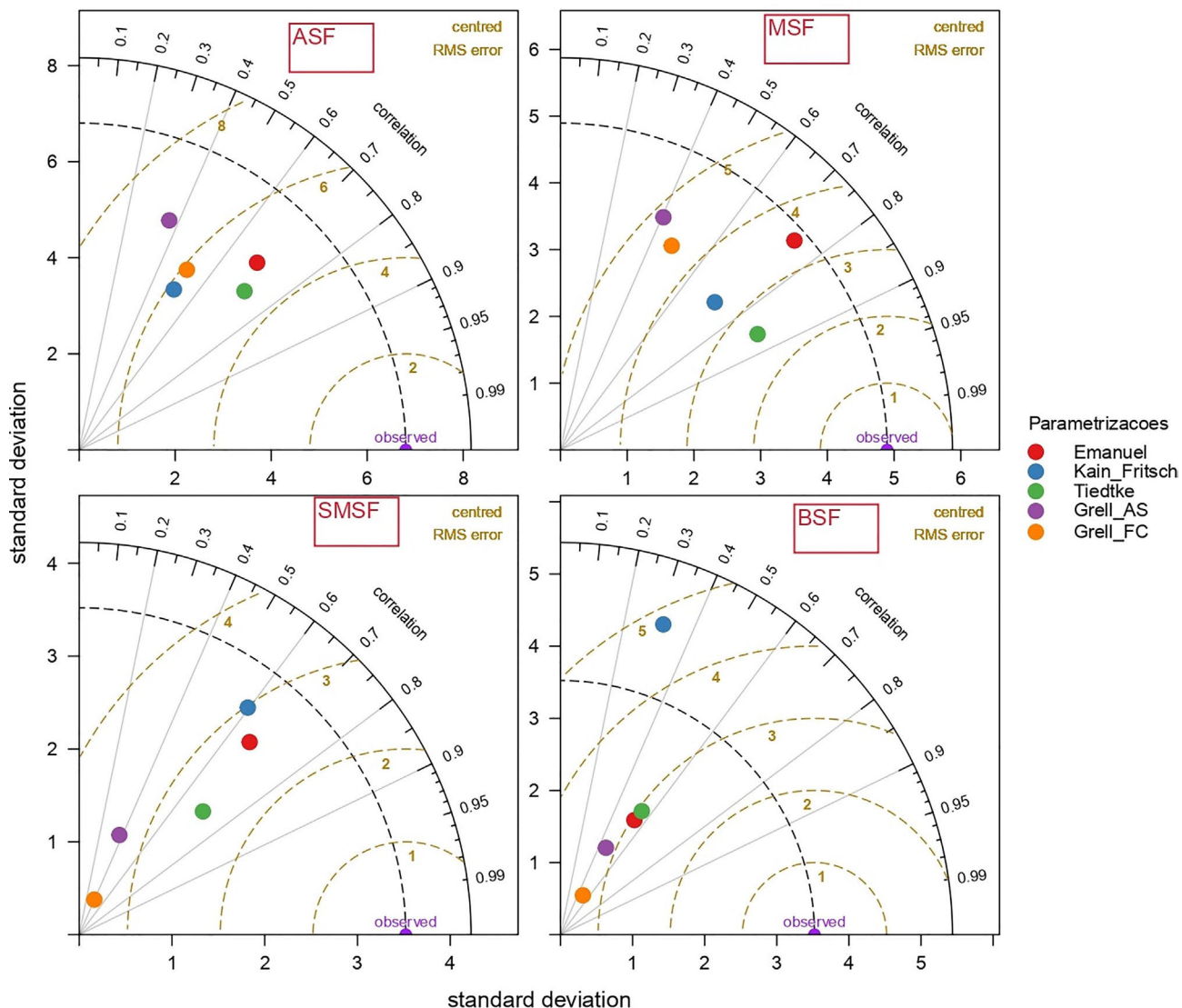
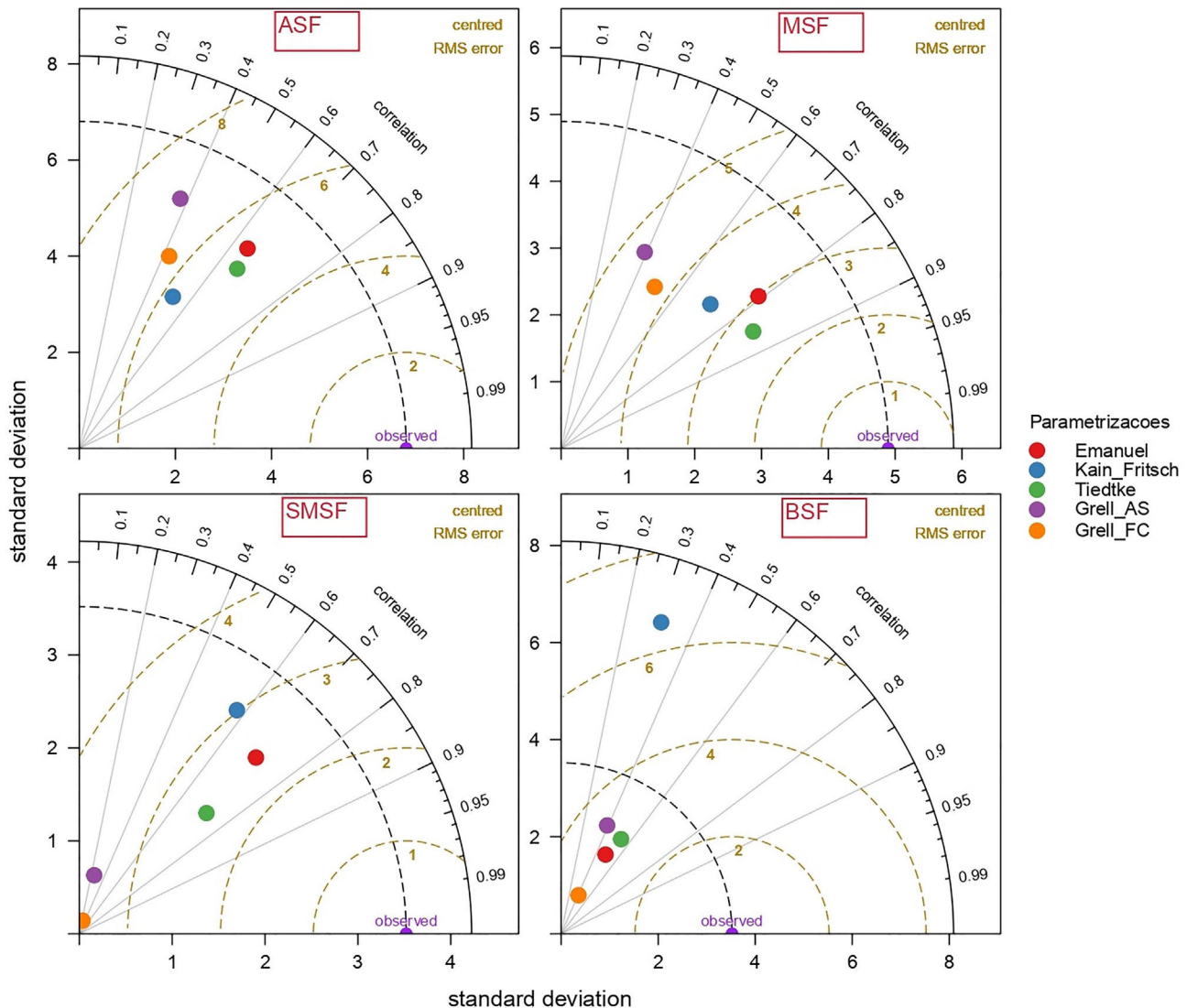


Figura 5 - Diagrama de Taylor para avaliação das parametrizações nas regiões fisiográficas do SF para o domínio maior, utilizando os dados de Xavier.



**Figura 6** - Diagrama de Taylor para avaliação das parametrizações nas regiões fisiográficas do SF para o domínio menor, utilizando os dados de Xavier.

riabilidade temporal da precipitação, onde a razão dos desvios padrões da precipitação ( $R\sigma$ ) foi  $0,9 \text{ mm dia}^{-1}$  (Tabelas 2 e 3).

### 3.4. Variabilidade interanual e sazonal

A simulação para o período de 2000 a 2010 foi feita com a parametrização de Emanuel, uma das duas melhores classificadas de acordo com as análises por região fisiográfica e ligeiramente melhor pela análise dos pontos, e com a grade maior, também ligeiramente melhor. A Tabela 7 mostra a comparação dos índices das simulações realizadas com a parametrização de Emanuel e domínio maior para os dois períodos: o ano de 2000, que foi utilizado para os testes de sensibilidade, e o período de 2000 até 2010. Com isso, foi possível observar que durante o teste de sensibilidade (ano 2000), a simulação conseguiu obter índices estatísticos um pouco melhores quando com-

parado com a simulação completa. O viés foi o índice que apresentou as maiores diferenças entre os dois períodos enquanto para os demais índices, a diferença foi muito pequena. Os valores obtidos foram muito semelhantes para as três bases de dados (Tabelas S3 e S4).

A Fig. 7 mostra a precipitação anual para os anos de 2000 a 2010 para a simulação e para a média das três bases de dados. No ASF e MSF em todos os anos o modelo subestimou a precipitação. Já no SMSF, 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 região fisiográfica que mais conseguiu se aproximar das precipitações observadas. Já no BSF, apenas o ano de 2003 o modelo superestimou a precipitação, nos demais anos subestimou a precipitação.

Para a média da precipitação em toda a BHSF (Fig. 8), coerentemente com o viés negativo obtido (Ta-

bela 7), em todos os anos ocorreu a subestimativa da precipitação. Nos anos de 2001, 2003 e 2007 ocorreu baixa precipitação, tanto simulada como também observada. Já os anos de 2000 e 2004 foram os anos que ocorreram as maiores precipitações simuladas. Em 2000 e 2007 as simulações foram razoáveis, porém, subestimadas em 110 mm em relação a base de dados. A precipitação média anual simulada entre 2000-2010 foi de aproximadamente 700 mm, com uma subestimativa de até 246 mm em relação às observações.

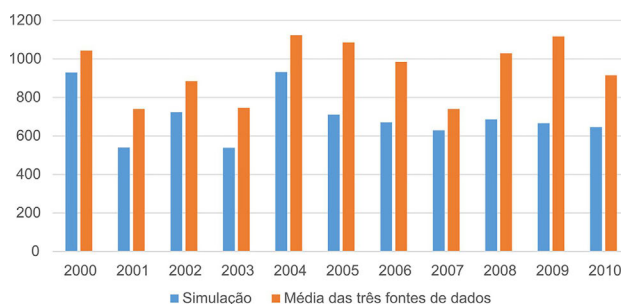
Também foi apresentada a média mensal da precipitação durante o período de estudo (Fig. 9), onde é possível observar que o ASF, MSF e SMSF têm boa representação da variação sazonal da precipitação. Já o BSF uma maior diferença é verificada com relação às bases de dados. Nessa região, o modelo tem dificuldade de representar a

**Tabela 7** - Análise estatística da simulação comparativa entre o ano de 2000 e o período de 2000-2010 utilizando os dados de *Xavier et al. (2016)*. Os altos índices estatísticos foram destacados em negrito.

	Período: 2000	Período: 2000-2010
Viés (mm dia <sup>-1</sup> )	<b>-0,32</b>	-0,64
MAE (mm dia <sup>-1</sup> )	<b>1,68</b>	1,68
Rσ	<b>0,89</b>	0,72
corr	<b>0,71</b>	0,66
Id	<b>0,80</b>	0,75

precipitação principalmente nos meses de maio e junho, período de atuação das OL, quando a simulação subestima a precipitação de *Xavier et al. (2016)* em aproximadamente 70 mm e 80 mm, respectivamente.

Nas três demais regiões, de modo geral, o modelo apresenta melhor desempenho fora do período das ZCAS, sistema que o modelo tem dificuldade em representar (*Reboita et al., 2022*) e os melhores resultados foram encontrados entre os meses de abril e outubro no ASF e de abril a setembro no MSF. Já no SMSF, apenas os meses de fevereiro e março apresentaram diferenças maiores das médias de precipitações, enquanto os demais meses tiveram uma boa representação. No período de maior influência das ZCAS, entre novembro e março, o modelo



**Figura 8** - Precipitação acumulada anual (mm) simulada e observada na BHSF.



**Figura 7** - Precipitação acumulada anual (mm) simulada e observada em cada região fisiográfica da BHSF.

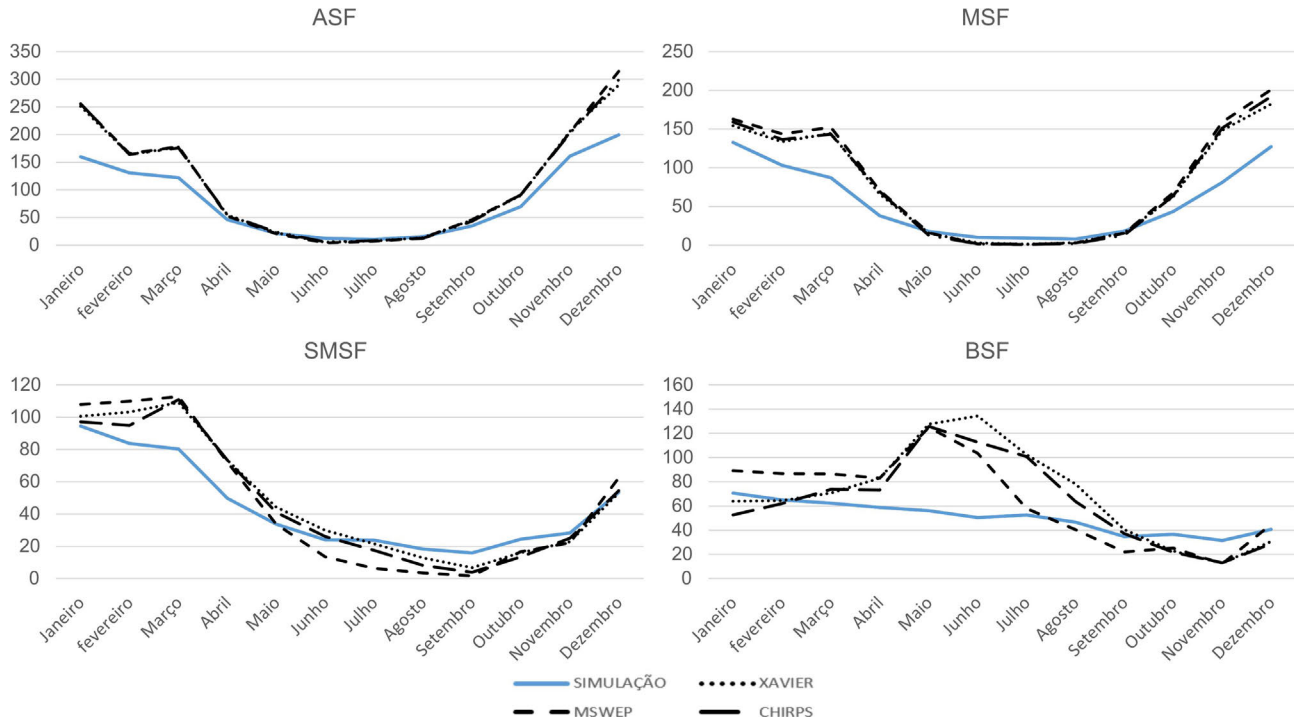


Figura 9 - Precipitação média mensal (mm) durante o período de 2000 a 2010 em cada região fisiográfica.

subestimou a precipitação no ASF e MSF, problema que também foi reportado por Reboita *et al.* (2022) para as áreas de influência do sistema meteorológico.

#### 4. Conclusões

A análise realizada na precipitação simulada conforme a parametrização de cúmulos ativada no modelo regional climático, RegCM, mostrou que as parametrizações de Emanuel e Tiedke obtiveram os melhores resultados na simulação da precipitação na bacia hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF). Segundo o emprego de um conjunto dos índices estatísticos utilizados na avaliação, a parametrização de Emanuel foi ligeiramente melhor classificada do que Tiedke no teste de sensibilidade realizado para o ano de 2000. De modo geral, Emanuel se destacou pela melhor representação da variabilidade temporal da precipitação, enquanto Tiedke apresentou maior correlação e menores erros médios. Esse padrão foi semelhante para as três regiões fisiográficas da bacia hidrográfica do Rio São Francisco (ASF, MSF e SMSF), com uma leve diferença para o baixo São Francisco (BSF), onde a variabilidade temporal foi um pouco melhor representada pela Tiedtke em comparação com Emanuel. O baixo São Francisco (BSF) foi a região que o RegCM apresentou a menor destreza em simular a precipitação durante maio a julho (período chuvoso do BSF). Essa limitação pode estar associada com uma moderada representação do RegCM em simular o transporte de umidade do oceano para o continente, assim como a ocorrência dos distúrbios ondulató-

rios de leste, que ocorrem com maior intensidade durante esses meses. As demais parametrizações avaliadas, Kain Fritsch e Grell (com os dois fechamentos) apresentaram uma destreza inferior em relação às outras duas parametrizações avaliadas (Emanuel e Tiedke), subestimando a precipitação na BHSF, notadamente durante o ano de 2000, onde a precipitação anual foi subestimada em 600 e 800 mm, respectivamente.

Na análise dos domínios, ambos com o espaçamento de grade de 40 km, observamos que a precipitação simulada com o modelo configurado com o domínio maior obteve resultados mais próximos da chuva observada nas três bases de dados utilizados, onde o viés foi menor. Um domínio maior possui uma área maior de abrangência, contemplando assim a região de atuação dos sistemas meteorológicos de escalas maiores, que por conseguinte melhoram a simulação da precipitação na bacia hidrográfica do Rio São Francisco. É comum configurar os modelos atmosféricos com um domínio menor, seja para ganhar tempo de processamento e/ou otimizar o espaço computacional. Contudo, mostramos que este aspecto influencia os resultados das simulações de precipitação, precisando então ser avaliado, para assim prescrever o domínio mais apropriado no modelo.

Por fim, o destaque da parametrização de Emanuel pode estar associado com uma oportuna característica deste esquema, que é ter um limiar de autoconversão de toda água da nuvem em precipitação, que depende da temperatura, e assim contabiliza os processos de gelo, pelo menos grosseiramente (Emanuel 1997; Emanuel e Zivko-

vic-Rothman 1999). A forma com este esquema representa o transporte de calor e água na coluna atmosférica, além da sua otimização ter sido realizada para convecção tropical, favorece que o esquema de Emanuel tenha uma participação mais realista da precipitação convectiva e estratiforme, bem como uma melhor distribuição espacial da precipitação convectiva (Davis *et al.*, 2009). O esquema de Emanuel pode levar a melhores resultados em regiões com convecção significativa (Gianotti, 2012), e acreditamos que esta deve ter sido a razão principal para o este esquema ter se sobressaído entre os demais esquemas de convecção avaliados.

Este estudo contribui para uma melhor compreensão da destreza do modelo regional climático, RegCM, em simular a precipitação na bacia hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF). Essa bacia é estratégica para a manutenção da biodiversidade e dos recursos hídricos do nordeste brasileiro. A segurança hídrica dessa região depende da produção de água dessa bacia, especialmente aqueles Estados (PE, PB, RN e CE) que estão integrados com a BHSF para assim receber as suas águas. Conhecer qual a parametrização de cúmulos possui a maior destreza e qual domínio espacial é mais indicado para a realização de simulações climáticas, certamente, será útil para o desenvolvimento de novas pesquisas na área de modelagem climática e de recursos hídricos. Isso deve aumentar as chances de sucesso de realização e aplicação dessas, em diversos setores da sociedade, dada a transversalidade do clima, em especial a precipitação com as diversas áreas do conhecimento.

## Agradecimentos

Agradecemos aos professores Marta Llopart e Enilson Palmeira Cavalcanti pelas sugestões e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processos 438271/2018-1 e 131566/2020-2) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ-PB, termo 268/2020 e Edital de Bolsas N° 16/2022) pelo apoio financeiro.

## Referências

- AMBRIZZI, T.; REBOITA, M.S.; DA ROCHA, R.P.; LLOPART, M. The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1436, n. 1, p. 98-120, 2019. doi
- ANA. **Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco. Sub-Projeto 4.5 C: Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco (2004-2013)**. Brasília, PBHSF, 28 p., 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, PBHSF, 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*, v. 23, n. 1, p. 73-87, 2008. doi
- BARATTO, P.F.B. **Espacialização de Elementos Meteorológicos Diários em Bacias Hidrográficas do Sul do Espírito Santo**. Dissertação de Mestrado, UFV, Viçosa, 2020.
- BECK, H.E.; VAN DIJK, A.I.J.M.; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D.G.; *et al.* 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. doi
- 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: **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Foz do Iguaçu, 2019. Disponível em <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/211711>.
- BHATLA, R.; GHOSH, S.; MANDAL, B.; MALL, R.K.; SHARMA, K. Simulation of Indian summer monsoon onset with different parameterization convection schemes of RegCM-4.3. *Atmospheric Research*, v. 176, p. 10-18, 2016. doi
- CABRAL, S.L.; CAMPOS, J.N.B.; DA SILVA SILVEIRA, C.; LEMOS, W.E.D.; PORTO, V.C. Análise da modelagem dinâmica da precipitação em uma bacia hidrográfica no semiárido. In: **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves, 8 p., 2013. Disponível em <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=962>.
- CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco - Caracterização da Bacia. Disponível em <https://www.codevasf.gov.br/linhas-de-negocio/projeto-sao-francisco/caracterizacao-da-bacia>, acesso em 10 de abril de 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. doi
- 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.
- DAVIS, N.; BOWDEN J.; SEMAZZI F.; XIE L.O.; NOL, B. Customization of RegCM3 regional climate model for eastern Africa and a tropical Indian Ocean domain. *Journal of Climate*, v. 22, n. 13, p. 3595-3616, 2009. doi
- DE ALMEIDA DANTAS, V.; SILVA FILHO, V.P.; SANTOS, E.B.; GANDU, A.W. Testando diferentes esquemas da parametrização cumulus do modelo WRF, para a região norte Nordeste do Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 3, p. 754-767, 2019. doi
- 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. doi

- DICKINSON, R.E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P.J. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model. **NCAR Technical Note**, v. 72, 1993.
- 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. doi
- EMANUEL, K.A. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 48, n. 21, p. 2313-2329, 1991. doi
- EMANUEL, K.A. The problem of convective moistening. In: **The Physics and Parameterization of Moist Atmospheric Convection**. Dordrecht: Springer, p. 447-461, 1997. doi
- EMANUEL, K.A.; ZIVKOVIC-ROTHMAN, M. Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 56, p. 1766-1782, 1999. doi
- FAGUNDES, H.O.; PAIVA, R.C.D.; FAN, F.M. Sedimentos em suspensão observados com imagens LANDSAT para modelagem de grandes bacias. In: **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, 2017. Disponível em <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=2153>.
- FREITAS, I.G.F.D.; GOMES, H.B.; MARIANO, G.L.; SILVA, M.C.L.D.; LYRA, M.J.A.; *et al.* Downscaling dinâmico através do modelo RegCM para diferentes inicializações utilizando dados do CFSv2. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 813-821, 2020. doi
- FRITSCH, J.M.; CHAPPELL, C.F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 37, n. 8, p. 1722-1733, 1980. doi
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations. A new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 150066, 2015. doi
- GIANOTTI, R.L.; ZHANG, D.; ELTAHIR, E.A.B. Assessment of the regional climate model version 3 over the maritime continent using different cumulus parameterization and land surface schemes. **Journal of Climate**, v. 25, n. 2, p. 638-656, 2012. doi
- GIORGI, F.; COPPOLA, E.; SOLMON, F.; MARIOTTI, L.; SYLLA, M.B.; *et al.* RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. **Clim. Res.**, v. 52, p. 7-29, 2012. doi
- GONÇALVES, J.S. **Avaliação da Previsão Numérica Sazonal de Precipitação Para o Rio Grande do Sul**. Dissertação de mestrado, UFSM, Santa Maria, 2015.
- HOLTSLAG, A.A.M.; DE BRUIJN, E.I.F.; PAN, H.L. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. **Monthly Weather Review**, v. 118, n. 8, p. 1561-1575, 1990. doi
- KAIN, J.S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. **J. Appl. Meteor.**, v. 43, p. 170-181, 2004. doi
- KIEHL, J.; HACK, J.; BONAN, G.; BOVILLE, B.; BREIGLEB, B.; *et al.* Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3). **National Center for Atmospheric Research**, v. 152, p. 1-159, 1996. doi
- KONÉ, B.; DIEDHIOU, A.; TOURÉ, N.E.; SYLLA, M.B.; GIORGI, F.; *et al.* Sensitivity study of the regional climate model RegCM4 to different convective schemes over West Africa. **Earth System Dynamics**, v. 9, n. 4, p. 1261-1278, 2018. doi
- LOPES, J.E.G.; BARROS, M.T.L.; BRANDÃO, J.L.B. **Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco - Subprojeto 4.4: Determinação de Subsídios Para Procedimentos Operacionais dos Principais Reservatórios da Bacia do São Francisco**. Brasília: ANA, 2002.
- LIMA, J.P.R.; ALVES, J.M.B. Um estudo de downscaling dinâmico de precipitação intrasazonal acoplado a modelo precipitação-vazão na bacia hidrográfica altomédio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 323-338, 2009. doi
- MARTINS, E.G.M. Desvio padrão populacional. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. **Revista de Ciência Elementar**, v. 3, n. 3, p. 173, 2015. doi
- MIRANDA, N.M.; CATALDI, M.; DA SILVA, F.D.N.R. Simulação do regime hidrológico da cabeceira do rio São Francisco a partir da utilização dos modelos SMAP e RegCM. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 40, n. 3, p. 328-339, 2017. doi
- MOLINARI, J. An Overview of cumulus parameterization in mesoscale models. In: **The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models. Meteorological Monographs**. Boston: American Meteorological Society, p. 155-158, 1993. doi
- MOREIRA, A.A.; RUHOFF, A.L. Análise do balanço hídrico na América do Sul por sensoriamento remoto. In: **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, 2017. Disponível em <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=2526>.
- 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. doi
- NOBRE, P.; MELO, A.D. Variabilidade climática intrasazonal sobre o Nordeste do Brasil em 1998-2000. **Revista Climatológica**, v. 16, n. 12, p. 1-15, 2001. Disponível em <http://mtcm16b.sid.inpe.br/rep/x6e6X3pFwXQZ3DUS8rS5/yDRFy>.
- OLIVEIRA, E.A.D. **Métodos Para Análise de Concordância: Estudo de Simulação e Aplicação a Dados de Evapotranspiração**. Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2016.
- PAL, J.S.; SMALL, E.E.; ELTAHIR, E.A.B. Simulation of regional scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 105, n. D24, p. 29579-29594, 2000. doi
- PAL, J.S.; GIORGI, F.; BI, X.; ELGUINDI, N.; *et al.* Regional climate modeling for the developing world: the ICTPRegCM3 and RegCM3. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 88, n. 9, p. 1395-1409, 2007. doi

- PEREIRA, D.P.; LIMA, J.S.D.S.; XAVIER, A.C.; PASSOS, R.R.; FIEDLER, N.C. Aplicação do diagrama de Taylor para avaliação de interpoladores espaciais em atributos de solo em cultivo com eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 5, p. 899-905, 2014. [doi](#)
- REBOITA, M.S.; FERNANDEZ, J.P.R.; LLOPART, M.; ROCHA, R.P.; PAMPUCH, L.A.; *et al.* Assessment of RegCM4.3 over the CORDEX South America domain: sensitivity analysis for physical parametrization schemes. **Climate Research**, v. 60, n. 3, p. 215-234, 2014. [doi](#)
- REBOITA, M.S.; DIAS, C.G.; DUTRA, L.M.M.; ROCHA, R.P.; LLOPART, M. 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, 2018. [doi](#)
- 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: CEMIG, p. 35-58, 2012.
- SANTOS E SILVA, C.M.; SILVA, A.; OLIVEIRA, P.; LIMA, K.C. Dynamical downscaling of the precipitation in Northeast Brazil with a regional climate model during contrasting years. **Atmospheric Science Letters**, v. 15, n. 1, p. 50-57, 2014. [doi](#)
- SETH, N.; DESHMUKH, S.G.; VRAT, P. Service quality models: A review. **International Journal of Quality e Reliability Management**, v. 22, n. 9, p. 913-949, 2005. [doi](#)
- SILVEIRA, C.D.S.; SOUZA FILHO, F.D.A.D.; MARTINS, E.S.P.R.; OLIVEIRA, J.L.; COSTA, A.C.; *et al.* Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **RBRH**, v. 21, n. 2, p. 416-428, 2016. [doi](#)
- 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. [doi](#)
- SUN, J. Convective scale assimilation of radar data: progress and challenges. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A Journal of the Atmospheric Sciences, Applied Meteorology and Physical Oceanography**, v. 131, n. 613, p. 3439-3463, 2005. [doi](#)
- TAYLOR, K.E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, p. 7183-7192, 2001. [doi](#)
- TIEDTKE, M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 1779-1800, 1989. [doi](#)
- 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. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 6, p. 5993-6000, 2019. [doi](#)
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981. [doi](#)
- WILLMOTT, C.J.; ROBESON, S.M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 13, p. 2088-2094, 2012. [doi](#)
- XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016. [doi](#)
- XAVIER, A.C. Estudo da relação da temperatura máxima com a altitude no Brasil. In: **XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Santos, p. 995-998, 2019.
- ZENG, X.; ZHAO, M.; DICKINSON, R.E. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data. **Journal of Climate**, v. 11, n. 10, p. 2628-2644, 1998. [doi](#)

## Material Suplementar

Tabela S1 - Viés (V), erro absoluto médio (MAE), desvio padrão ( $R\epsilon$ ), correlação linear (corr) e índice de concordância de Willmott (Id) para os domínios maior e médio, utilizando dados de BHSF e CHIRPS. Os altos índices estatísticos foram destacados em negrito.

Tabela S2 - Viés (V), erro absoluto médio (MAE), desvio padrão ( $R\epsilon$ ), correlação linear (corr) e índice de concordância de Willmott (Id) para os domínios maior e médio, utilizando dados de BHSF e MSWEP. Os altos índices estatísticos foram destacados em negrito.

Tabela S3 - Análise estatística da simulação comparativa entre o ano de 2000 e o período de 2000-2010 utilizando os dados do CHIRPS. Os altos índices estatísticos foram destacados em negrito.

Tabela S4 - Análise estatística da simulação comparativa entre o ano de 2000 e o período de 2000-2010 utilizando os dados do MSWEP. Os altos índices estatísticos foram destacados em negrito.

Figura S1 - Diagrama de Taylor para a BHSF para o domínio: (a) maior e (b) menor, utilizando os dados de [Xavier et al. \(2016\)](#).



License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.