

1 **ANÁLISE DE EXTREMOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO SÃO FRANCISCO:**
2 **IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO**

3 **ANALYSIS OF ANNUAL PRECIPITATION EXTREMES IN THE SÃO FRANCISCO BASIN:**
4 **IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION**

5 Priscila da Silva Tavares¹, Nicole Laureanti¹, Chou Sin Chan¹, Daniela Carneiro Rodrigues¹, Roberto Baltazar²

6
7 **RESUMO** – A Região Hidrográfica do São Francisco (RHSF) é uma das principais regiões hidrográficas do
8 Brasil e desempenha papel fundamental em diversos setores socioeconômicos do país, tais como agricultura e
9 energia. Portanto, a identificação e análises de eventos extremos de chuva ou de seca e dos padrões climáticos
10 associados podem contribuir para prognósticos de tais eventos. Sendo assim, o objetivo deste trabalho consistiu
11 na identificação de anos anômalos, a partir de onze fontes observacionais de precipitação, e caracterização dos
12 principais padrões climáticos de grande escala. As diversas fontes contribuíram para minimizar a incerteza na
13 seleção dos anos extremamente secos e chuvosos. Os resultados sugerem grande influência da temperatura da
14 superfície do mar na parte tropical do Oceano Atlântico e na parte leste do Oceano Pacífico.

15 **Palavras-chave:** seca hidrológica; Brasil; bacia do São Francisco; incerteza observacional

16
17 **ABSTRACT** - The São Francisco Hydrographic Region is one of the primary hydrographic regions in Brazil and
18 plays a crucial role in various socioeconomic sectors of the country, including agriculture and energy. Therefore,
19 identifying and analyzing extreme rainfall or drought events and their associated climatic patterns can contribute
20 to predicting such events. Thus, the objective of this study was to identify anomalous years based on eleven
21 observational sources of precipitation and characterize the key large-scale climatic patterns. The inclusion of
22 multiple observational sources helped minimize uncertainty in the selection of extremely dry and wet years. The
23 results suggest a strong influence of sea surface temperature in the tropical Atlantic Ocean and the eastern Pacific
24 Ocean.

25 **Keywords:** hydrological drought; Brazil, São Francisco river basin; observational uncertainty

26
27 **INTRODUÇÃO**

28 A Região Hidrográfica do São Francisco (RHSF) é uma das maiores bacias hidrográficas do Brasil,
29 abrangendo cinco estados e três biomas (Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica), com uma extensão total de
30 aproximadamente 640 mil km². A RHSF desempenha um papel de relevância significativa nas esferas econômica,
31 social e cultural do país. Sua disponibilidade hídrica é crucial para suprir demandas de consumo humano,
32 abastecimento animal, irrigação e geração de energia. Destaca-se ainda como a principal fonte de recursos hídricos
33 para grande parte do Semiárido nordestino, onde a água representa um recurso essencial e escasso, desafiando a
34 gestão adequada.

35 A climatologia do Nordeste brasileiro é caracterizada por uma elevada variabilidade espacial e temporal
36 da precipitação. Essa variável meteorológica está intimamente relacionada a mecanismos climáticos como o
37 fenômeno ENOS (El Niño Oscilação Sul) no oceano Pacífico tropical e o Dipolo do Atlântico (Dantas et al.,
38 2020). A alta irregularidade interanual da precipitação na região tropical, juntamente com a distribuição desigual
39 das chuvas, propicia a ocorrência de anos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas.

40 A identificação das relações entre os extremos de precipitação na área da bacia e os padrões climáticos de
41 grande escala tem um valor potencial significativo para diversas aplicações no planejamento de recursos hídricos
42 em diferentes escalas de tempo (Costa-Cabral et al., 2016).

43 Apesar de existirem estudos que avaliam o impacto dos padrões climáticos de grande escala na ocorrência
44 dos extremos anuais, a inclusão de diferentes fontes de observações na identificação desses eventos ainda é
45 limitada. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar e analisar os extremos de precipitação anual
46 significativos do ponto de vista hidrológico/meteorológico na RHSF. É fundamental destacar que o registro da
47 precipitação não é trivial devido à sua natureza, apresentando limitações em termos de confiabilidade,
48 principalmente devido ao número e cobertura espacial das estações de superfície e aos algoritmos de satélite (Sun
49 et al., 2017). Isso resulta em significativas incertezas associadas aos dados. Portanto, é necessário considerar
50 diferentes fontes de informações para realizar uma análise mais abrangente e precisa.

51

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Rodovia Presidente Dutra Km 39, Cachoeira Paulista -SP, Brasil. E-mails: priscila.tavares@inpe.br, nicole.laureanti@inpe.br, chou.inpe@gmail.com, rdanielacarneiro@gmail.com; ²Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). E-mail: balbob97@gmail.com

52 **MATERIAL E MÉTODO**

53 As análises foram realizadas em termos médios anuais para toda RHSF, bem como suas respectivas sub-
54 regiões fisiográficas, conforme delimitações ilustradas na Figura 1. A RHSF é composta por 4 sub-regiões: Alto
55 (ASF), Médio (MSF), Submédio (SMSF) e Baixo (BSF).

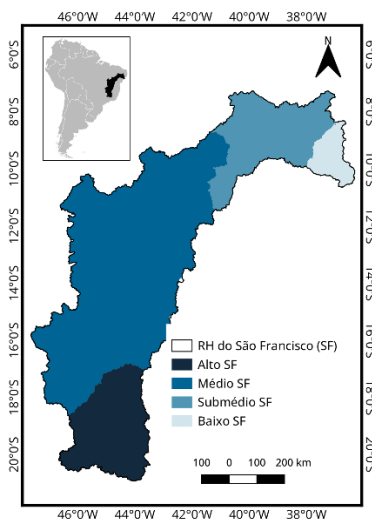


Figura 1. Localização da Região Hidrográfica do rio São Francisco (RHSF) e suas respectivas sub-regiões. Delimitação de acordo com Agência Nacional de Águas (ANA) (ANA, 2018).

56

57 Devido as incertezas em relação aos dados observacionais de precipitação, a identificação dos anos
58 extremos foi realizada através da análise de onze conjuntos de dados, a saber: CHIRPS (Funk et al., 2015), CMAP
59 (Xie et al., 2003; Xie & Arkin, 1997), CPC (Xie et al., 2010), CRU (Harris et al., 2020), GPCP (Adler et al., 2012;
60 Adler et al., 2003), MERGE (Rozante et al., 2010), MSWEP (Beck et al., 2019), PERSIANN (Ashouri et al.,
61 2015; Sorooshian et al., 2014), PREC/L (Chen et al., 2002), Terraclimate (Abatzoglou et al., 2018) e Xavier et al.
62 (2022). Para identificar os anos extremos foi utilizado as anomalias padronizadas da precipitação, o que equivale
63 conceitualmente ao Índice de Precipitação Padronizado (*Standardized Precipitation Index – SPI*; Mckee et al.,
64 1993). Esse índice tecnicamente corresponde ao número de desvios padrão que a precipitação cumulativa
65 observada se afasta da média climatológica. Neste trabalho, anos com anomalias maiores ou iguais a 1 foram
66 classificados como extremamente chuvosos, equivalentes no SPI como moderados (1 a 1,49), severos (1,50 a
67 1,99) e extremos (≥ 2); e menores iguais a -1 foram classificados como extremamente secos, classificados no SPI
68 como moderados (-1 a -1,49), severos (-1,5 a -1,99) e extremos (≤ -2). Com o intuito de minimizar a incerteza na
69 identificação dos anos anômalos, foram considerados como anos extremamente chuvosos ou secos aqueles em
70 que mais de 60% do conjunto de dados apresentou a mesma direção e magnitude da anomalia padronizada. Para
71 compor as análises do padrão climático associado aos eventos selecionados foram utilizados os campos da
72 Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e direção e magnitude do vento nos níveis de 850 hPa e 200 hPa,
73 provenientes das reanálises atmosféricas do conjunto ERA5 (Hersbach et al., 2020). O padrão climático em anos
74 chuvosos e secos foi comparado com o campo climatológico, considerando o período de 2001 a 2022, e a
75 significância estatística foi determinada a partir do teste t de *Student* (Wilks, 2006) para o nível de confiança de
76 99% (ou $\alpha= 1\%$).

77

78 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

79 **Variabilidade anual da precipitação**

80 A Figura 2 ilustra o gráfico da precipitação acumulada anual na RHSF, baseado nos valores médios
81 calculados a partir do conjunto de onze fontes de dados. Adicionalmente, são apresentados os limites de variação
82 desse conjunto, representados pelos valores máximos e mínimos observados, bem como o valor climatológico
83 correspondente do período analisado. O volume anual médio da precipitação na RHSF é da ordem de 900 mm.
84 Verifica-se que os volumes máximo e mínimo da série ocorreram nos anos de 2004 e 2012, com valores de chuva
85 em torno de 1138 mm e 647 mm, respectivamente. De maneira geral, a série temporal é caracterizada por um ciclo
86 de mais alta precipitação na primeira metade (2001-2011) e um ciclo de mais baixa precipitação na segunda
87 metade (2012-2022). Após o ano de 2012, os valores observados voltaram a ser consistentemente superiores à
88 média climatológica somente em 2020. Os dois últimos anos da série, isto é, 2021 e 2022, exibem uma variação
89 significativa entre as diversas fontes observacionais, entretanto, são caracterizados por valores médios acima do
90 valor climatológico.

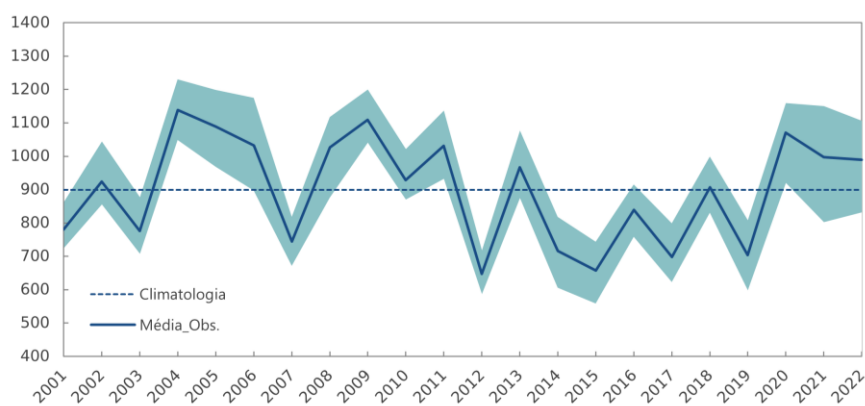


Figura 2. Precipitação acumulada anual na bacia do rio São Francisco. A linha tracejada corresponde à média do período (climatologia) e a linha cheia se refere os valores anuais médios, ambos considerando todo o conjunto de dados observacionais. O intervalo de variação deste conjunto segue representado através do sombreado azul.

91

92

93

94

95

96

97

98

Os resultados supracitados são melhores destacados pelas anomalias padronizadas de precipitação, conforme ilustrado na Figura 3, onde 8 dos 11 iniciais da série apresentam valores positivos e 6 dos 11 anos finais apresentam valores negativos. Os resultados indicam 4 anos extremamente chuvosos (2004, 2005, 2009 e 2020) e 5 anos extremamente secos (2012, 2014, 2015, 2017 e 2019), os quais mais de 60% do conjunto de dados apresentaram mesmo sinal e ordem de magnitude. Os anos identificados como extremos estão de acordo com os trabalhos obtidos por diferentes abordagens para identificação de anos anômalos secos e/ou chuvosos (Freitas et al., 2022; Paredes-Trejo et al., 2021; Cunha et al., 2019).

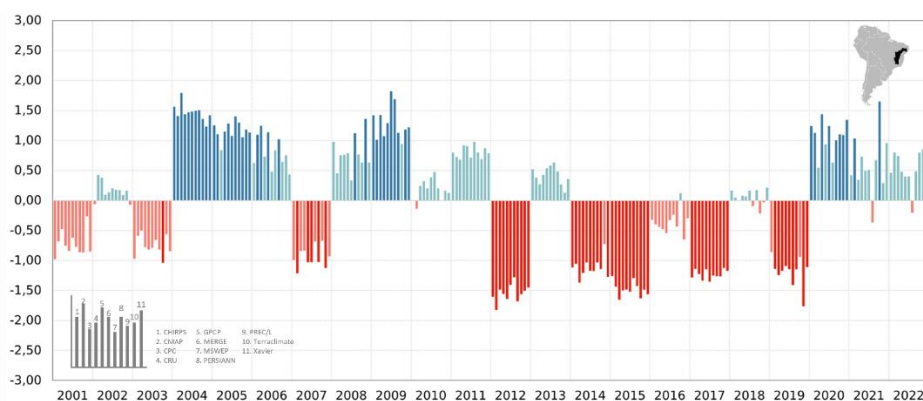


Figura 3. Anomalias padronizadas da precipitação anual extraídas para a Região Hidrográfica do São Francisco, considerando os onze conjuntos de dados observacionais: CHIRPS, CMAP, CPC, CRU, GPCP, MERGE, MSWEP, PERSIANN, PREC/L, TerraClimate e Xavier.

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

Conforme apresentado na Figura 4, as precipitações acima da média em 2009 foram observadas em toda a RHSF. Já em 2004 foram registradas em três das quatro sub-regiões (Alto, Médio e Submédio). Nos anos de 2005 e 2020, os extremos pluviométricos ocorreram predominantemente na parte média da RHSF. No que diz respeito aos anos extremamente secos, em 2012 e 2015, anos os quais grande parte das fontes de dados apresentaram os valores mais negativos das anomalias padronizadas de toda série temporal, as precipitações abaixo da média ocorreram predominantemente nas sub-regiões Média, Submédio e Baixo. Em 2017, apenas a sub-região Baixo São Francisco não registrou anomalias extremamente secas. Em 2019, apenas a sub-região Média apresentou condições de seca.

Embora algumas sub-regiões da RHSF não tenham apresentado registros de condições secas ou de chuvas anômalas, nota-se que se os extremos ocorrem nas sub-regiões do Alto ou Médio SF, ou em ambas, elas ocasionam um impacto significativo ao longo de toda bacia. Essas sub-regiões são as principais contribuintes para disponibilidade hídrica da RHSF. Estima-se que aproximadamente 70% da vazão do rio é proveniente dessas sub-regiões (Freitas et al, 2022; Amorim et al., 2017).

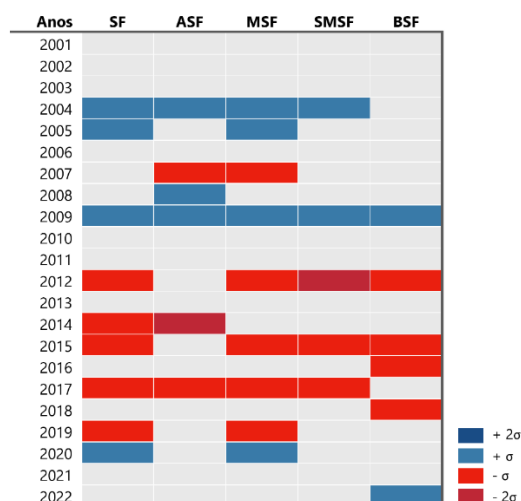


Figura 4. Anomalias padronizadas da precipitação anual extraídas para a Bacia do São Francisco (SF) e suas respectivas sub-bacias: Alto São Francisco (ASF), Médio São Francisco (MSF), Submédio São Francisco (SMSF) e Baixo São Francisco (BSF). As áreas sombreadas em tons de azul representam valores acima de 1 desvio padrão (σ) e 2 desvios padrão, enquanto as áreas sombreadas em vermelho representam valores abaixo de 1 e 2 desvios padrão.

113

114 Padrão climático

115 Os campos anômalos de TSM dispostos na Figura 5 indicam que o Oceano Pacífico e Atlântico Tropical
 116 representam influências para RHSF. Anomalias positivas são encontradas no Oceano Pacífico Leste durante anos
 117 secos, indicando uma possível conexão com o fenômeno ENOS. O padrão La Niña é apresentado durante anos
 118 chuvosos, mas não é significativo. As anomalias mais significativas estão sobre o Atlântico Tropical, onde
 119 predominam anomalias negativas durante anos secos e positivas durante anos chuvosos. O Atlântico Tropical tem
 120 variabilidade afetada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), onde sua posição mais intensa ao sul
 121 apresenta águas mais aquecidas (Utida et al., 2019). Assim, a redução de precipitação RHSF está
 122 significativamente relacionada com o deslocamento da ZCIT, pois anos chuvosos apresentam temperaturas mais
 123 quentes e anos mais secos tem temperatura mais frias. Anomalias significativas também são observadas sobre o
 124 Atlântico Subtropical, registrando aquecimento durante anos chuvosos e aquecimento em anos secos. Tal condição
 125 é também relacionada com fenômenos de extrema convergência no continente. O resfriamento (Figura 5b) pode
 126 estar relacionado ao desenvolvimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e sua contribuição
 127 acoplada com a TSM (Nobre et al., 2012). Além disso, condições de bloqueio como o observado na seca de 2014
 128 também indicaram aquecimento anômalo da TSM sobre a mesma região indicada na Figura 5c (Coelho et al.,
 129 2016).

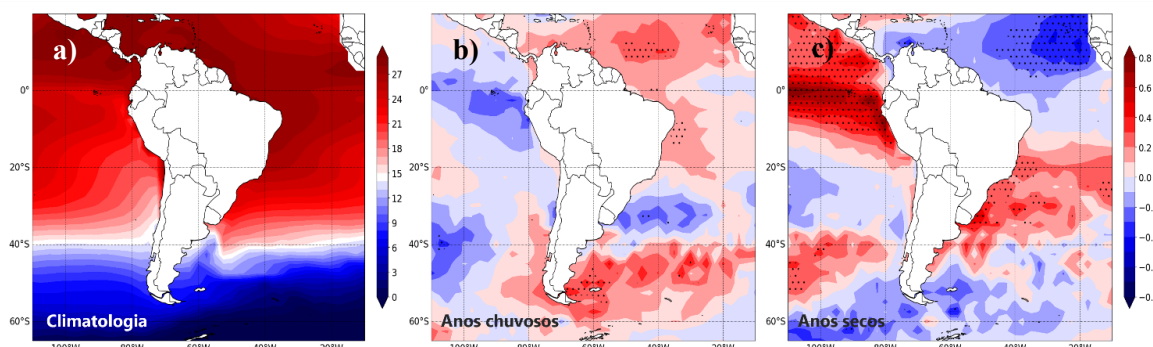


Figura 5. Campos da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) das reanálises atmosféricas do conjunto ERA5: a) climatologia; b) anomalia considerando os anos chuvosos e; d) anomalia para os anos secos. Anos chuvosos e extremos para a bacia do São Francisco considerando o período de 2001 a 2022. Nos campos anômalos, áreas pontilhadas representam valores significativos de acordo com o teste T de Student.

130

131 Variações médias anuais dos padrões de vento em altos e baixos níveis são notados durante os anos secos
 132 e chuvosos na bacia (Figura 6). Em baixos níveis nota-se variação principalmente sobre a porção centro-oeste do
 133 Brasil, local onde são encontrados os padrões climatológicos dos jatos de baixos níveis, contornando a posição
 134 topográfica da Cordilheira dos Andes (Figura 6a). Durante anos chuvosos, os ventos de baixos níveis são de menor

135 intensidade na porção centro-oeste do Brasil (Figura 6b), favorecendo o transporte de umidade entre a Amazônia
 136 e o centro-leste. Já em anos secos (Figura 6c), ventos de baixos níveis são mais intensos nessa região,
 137 redirecionando o transporte de umidade Amazônica para o sul do Brasil. As relações dos padrões de vento dentro
 138 do continente também podem ser relacionadas com a evolução da ZCAS, quando os jatos de baixos níveis são
 139 redirecionados para o continente e convergem com a porção noroeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul
 140 (Kodama, 1992). A intensidade do jato subtropical de altos níveis também tem variação, indicado pelos ventos
 141 mais intensos sobre o sul do continente na Figura 6d. As condições em anos secos indicam maior intensidade nos
 142 jatos subtropicais de altos níveis, favorecendo a presença de ciclogênese no sul do continente (Figura 6f). O oposto
 143 é observado em anos chuvosos, quando o jato se encontra enfraquecido (Figura 6e).

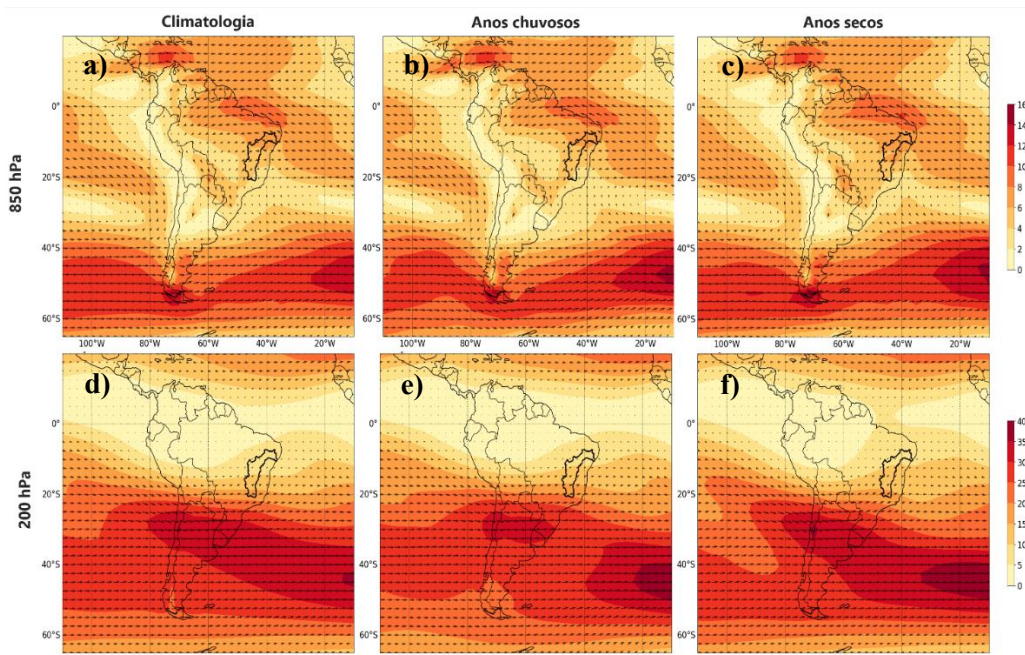


Figura 6. Campos da direção e magnitude do vento ($m.s^{-1}$) em 850 e 200 hPa das reanálises atmosféricas do conjunto ERA5: a) climatologia; b) anos chuvosos e; d) anos secos. Anos chuvosos e extremos para a Região Hidrográfica do São Francisco (RHSF) considerando o período de 2001 a 2022.

144

145 CONCLUSÕES

146 As variações nos volumes observados de precipitação na RHSF podem ser explicadas por padrões
 147 climatológicos, indicados nesse trabalho por anomalias de TSM e variações nos padrões de vento em altos e baixos
 148 níveis. De acordo as variações de TSM, as relações mais significativas são observadas sobre o Atlântico Tropical,
 149 onde o deslocamento da ZCIT ao sul proporciona aumento da precipitação. Anomalias de TSM sobre o Atlântico
 150 Subtropical também indicam a contribuição da ZCAS para a variabilidade da precipitação na bacia. Os padrões
 151 de vento indicam a contribuição da distribuição de umidade no continente e dos fenômenos de ciclogênese.

152

153 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 154 Abatzoglou JT, et al. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance
 155 from 1958–2015. *Scientific data*, 5, 170191. DOI: 10.1038/sdata.2017.191
- 156 Adler, R. F., et al. (2003). The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) Monthly precipitation analysis
 157 (1979–present). *Journal of hydrometeorology*, 4(6), 1147-1167. DOI: 10.1175/1525-
 158 7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2
- 159 Adler, R. F., Gu, G., Huffman, G. J. (2012). Estimating climatological bias errors for the Global Precipitation Climatology
 160 Project (GPCP). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(1), 84-99. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-052.1
- 161 Amorim, R.S.; De Souza, S.A.; Reis, D.S., Jr. Autocorrelation and Multiple Testing Procedures in Trend Detection Analysis:
 162 The Case Study of Hydrologic Extremes in São Francisco River Basin, Brazil. In *Proceedings of the World Environmental
 163 and Water Resources Congress, Sacramento, CA, USA, 21–25 May 2017*; pp. 134–148.

- 164 Ashouri, H., et al. (2015). PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for
165 hydrological and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(1): 69-83. DOI: 10.1175/BAMS-D-
166 13-00068.1
- 167 Beck, H, et al. (2017). MSWEP V2 global 3-hourly 0.1° precipitation: methodology and quantitative appraisal. In AGU Fall
168 Meeting Abstracts (Vol. 2017, pp. H21E-1501).
- 169 Chen, M.; Xie, P.; Janowiak, J. E. (2002). Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations.
170 *Journal of Hydrometeorology*, 3, 249–266. DOI: 10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2
- 171 COELHO, C. A., et al. (2016). The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and
172 teleconnections. *Climate Dynamics*, Springer Verlag, v. 46, n. 11-12, p. 3737–3752, DOI: 10.1007/s00382-015-2800-1
- 173 Costa-Cabral, M., et al. (2016). Projecting and Forecasting Winter Precipitation Extremes and Meteorological Drought in
174 California Using the North Pacific High Sea Level Pressure Anomaly. *J. Climate*, 29, 5009–5026, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-
175 0525.1.
- 176 Cunha, A. P. M. et al. (2019). Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, 10(11), 642. DOI:
177 10.3390/atmos10110642
- 178 Dantas, L. G., Santos, C. A. C., Olinda, R. A., Brito, J. I. B., Santos, C. A. G., Martins, E. S. P. R., Oliveira, G., Brunzell, N.
179 A. (2020). Rainfall prediction in the state of Paraíba, Northeastern Brazil using generalized additive models. *Water*, 12, 1-
180 26. DOI: 10.3390/w12092478
- 181 Freitas, A. A., et al. (2022). Drought assessment in São Francisco river basin, Brazil: characterization through SPI and
182 associated anomalous climate patterns. *Atmosphere*, 13(1), 41. DOI: 10.3390/atmos13010041
- 183 Funk, C., et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for
184 monitoring extremes. *Scientific data*, 2(1): 1-21. DOI: 10.1038/sdata.2015.66
- 185 Harris, I., et al. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific*
186 *data*, 7(1): 1-18. DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3
- 187 Hersbach, H.; et al. (2020) The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, John Wiley
188 and Sons, Ltd, 146(7): 1999–2049. ISSN 1477-870X
- 189 Kodama, Y., 1992. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the baiu frontal zone, the spcz, and the
190 SACZ part i: Characteristics of subtropical frontal zones. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II 70, 813–
191 836. DOI:10.2151/jmsj1965.70.4_813.
- 192 McKee, T. B.; Doesken, N. J.; Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In
193 *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Vol. 17, No. 22, pp. 179-183.
- 194 Nobre, P.; De Almeida, R. A.; Malagutti, M.; Giarolla, E. (2012). Coupled ocean–atmosphere variations over the South
195 Atlantic Ocean. *Journal of Climate*, 25(18), 6349-6358. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00444.1
- 196 Paredes-Trejo, F., et al. (2021). Drought assessment in the São Francisco River Basin using satellite-based and ground-
197 based indices. *Remote Sensing*, 13(19), 3921. DOI: 10.3390/rs13193921
- 198 Rozante, J. R., et al. (2010) Combining TRMM and surface observations of precipitation: Technique and validation over
199 South America. *Weather and forecasting*, 25(3), 885-894. DOI: 10.1175/2010WAF2222325.1
- 200 Sorooshian, S., Hsu, K., Braithwaite, D., Ashouri, H. (2014). NOAA CDR Program. NOAA Climate Data Record (CDR) of
201 Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN-CDR), 1.
202 NOAA National Centers for Environmental Information.
- 203 Sun, Q., et al. (2018). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews*
204 *of Geophysics*, 56(1), 79-107. DOI: 10.1002/2017RG000574
- 205 Utida, G., et al. (2019). Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement
206 during the past 2300 years. *Scientific Reports*, 9(1), 1698. DOI: 10.1038/s41598-018-38003-6
- 207 Wilks, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3^a ed. International Geophysics Series, 2006.
- 208 Xavier, A. C., et al. (2022). New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of*
209 *Climatology*, 42(16), 8390– 8404. DOI: 10.1002/joc.7731
- 210 Xie, P.; Arkin, P. A. (1997). Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite
211 estimates, and numerical model outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2539–2558. DOI:
212 10.1175/1520-0477(1997)078<2539:GPAYMA>2.0.CO;2
- 213 Xie, P. P., et al. (2003). GPCP Pentad precipitation analyses: An experimental dataset based on gauge observations and
214 satellite estimates. *Journal of Climate*, 16(13), 2197–2214. DOI: 10.1175/2769.1
- 215 Xie, P., Chen, M., Shi, W. (2010). CPC unified gauge-based analysis of global daily precipitation. In *Preprints, 24th Conf.*
216 *on Hydrology*, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc (Vol. 2).