



## Análise espaço-temporal da precipitação na região central do estado de São Paulo utilizando dados CHIRPS

Bruno César dos Santos<sup>1</sup>, Rafael Grecco Sanches<sup>2</sup>, Rodrigo Martins Moreira<sup>3</sup>, Vandoir Bourscheidt<sup>4</sup> e Paulo Henrique de Souza<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Doutorando em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos/SP, Brasil. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8218-6803>, Email: [bruno-unifal@hotmail.com](mailto:bruno-unifal@hotmail.com); <sup>2</sup>Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos/SP, Brasil. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2471-5070>, Email: [rafagsanches@alumni.usp.br](mailto:rafagsanches@alumni.usp.br); <sup>3</sup>Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Ji-Paraná/RO, Brasil. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6794-6026>, Email: [rodrigo.moreira@unir.br](mailto:rodrigo.moreira@unir.br); <sup>4</sup>Doutor em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos-SP, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5419-323X>, Email: [vandoir@ufscar.br](mailto:vandoir@ufscar.br); <sup>5</sup>Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Alfenas/MG, Brasil. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0399-9123>, Email: [phsouza31@hotmail.com](mailto:phsouza31@hotmail.com).

Artigo recebido em 03/02/2022 e aceito em 16/06/2022

### RESUMO

A climatologia tropical e as oscilações das chuvas colidem nas mais diversas regiões dos continentes. Com o avanço das tecnologias, dados pluviométricos vêm sendo utilizados e aplicados para realização de análises ao longo em séries temporais utilizando produtos de sensoriamento remoto orbital. Com isso, o estudo objetivou analisar a distribuição espacial em escala multiespacial e multitemporal de 1981 até 2020, usando com os dados pluviométricos CHIRPS, para a região central do estado de São Paulo. Analisou 40 anos de dados mensais de chuvas, em 31 postos pluviométricos. Utilizou-se da relações entre as estimativas por satélite e os os coletados pelas estações de superfície apenas dos valores observados dentro do recorte temporal. Para isso, foram utilizadas duas análises de erro absoluto médio e erro médio quadrático e aliadas ao coeficiente de determinação. Para análise temporal, aplicou-se o Índice de Precipitação Normalizada (SPI) e tendências por regressão linear. As análises global dos dados evidenciaram que o CHIRPS apresentou-se uma tendência abrupta à subestimar os valores de precipitação (74%), através dos valores médios de ME; valores médios de RMSE variando entre 36,4 mm a 49,3 mm; e a regressão linear de R<sup>2</sup> acerca de 0.81. E, para as tendências com espacialidade uma distribuição de redução para áreas a sudoeste e norte e de aumento para áreas a sudeste. Essa diferença pode estar associada aos efeitos orográficos. Em tempo, o CHIRPS, proporcionalizou-se uma análise completa de dados séries temporalmente e favoreceu-se com o desenvolvimento do comportamento da atmosfera nas diversas porções da superfície terrestre.

Palavras-chaves: Chuvas, Dados de Satélite, Tendência pluviométrica e Topografia;

## Spatiotemporal analysis of precipitation in the central region of the state of Sao Paulo using CHIRPS data

### ABSTRACT

Tropical climatology and rainfall fluctuations collide in the most diverse regions of the continents. With the advancement of technologies, pluviometric data have been used and applied to analyze time series using orbital remote sensing products. Thus, the study aimed to analyze the spatial distribution in multi spatial and multi temporal scale from 1981 to 2020, using CHIRPS rainfall data for the central region of the state of São Paulo. Forty years of monthly rainfall data were analyzed at 31 rainfall stations. The relationships between satellite estimates and rainfall data from surface stations on a global scale were used only for values observed within the time frame. For this, two analyzes of mean absolute error and mean square error were used, together with the coefficient of determination. For temporal analysis, it was applied the Normalized Precipitation Index (SPI) and trends by linear regression. The global analysis of the data showed that the CHIRPS display an abrupt tendency to underestimate the precipitation values (74%), through the mean ME values; mean RMSE values ranging from 36.4 mm to 49.3 mm; and the linear regression of R<sup>2</sup> about 0.81. And, for trends with spatiality, a decreasing distribution for areas to the southwest and north and an increase for areas to the southeast. This difference may be associated with orographic effects. In time, the CHIRPS, enabled a complete analysis of time series data and favored the development of the behavior of the atmosphere in the different portions of the Earth's surface.

Keywords: Rainfall, Satellite Data, Rainfall Trend and Topography;

## Introdução

A variabilidade pluviométrica tem sido um tema constante nas pesquisas científicas, tendo em vista sua importância em escala regional e local, na medida em que as oscilações das chuvas impactam nas mais diversas regiões do planeta. Ainda, com o avanço de modelos insustentáveis de uso e ocupação do solo, principalmente pela conversão de florestas às atividades antrópicas com potencial para afetar o ciclo hidrológico, torna-se imprescindível a análise e monitoramento dos regimes pluviométricos (Ambrizzi et al., 2014; Abreu et al., 2017; Cunha et al., 2014; Filho et al., 2019; Sanches et al., 2020; Zandonadi et al., 2016; e Zilli et al., 2017; Mu et al., 2021; Sales et al., 2021).

Nesse sentido, a necessidade de encontrar longas séries históricas de precipitação se torna, em muitos casos, um grande obstáculo para realização de estudos nessa temática (Madsen et al., 2014; Mekis; Vincent, 2011; e Piccarreta et al., 2004). Dessa forma, é comum encontrar hiatos nos dados em superfície, o que acaba limitando a qualidade das análises estatísticas, como tendências pluviométricas, que auxiliam na compreensão do comportamento climático de uma dada região (Blain, 2013; Carvalho et al., 2004; Teixeira; Satyamurty, 2011; e Zandonadi et al., 2016).

Para suprir essas limitações, com o avanço das tecnologias, diversos satélites meteorológicos vêm sendo desenvolvidos e aplicados para realização de estudos em séries temporais longas por meio dos seus dados, como as missões Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) com dados de 1998 a 2019 e resolução espacial de 0.5°; Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS), com dados de 1981 até o momento da redação deste artigo, com resolução espacial de 0,05°; e a Global Precipitation Measurement Mission (GPM), com dados de 2000 até o momento e com 0.1° de resolução espacial (Pereira;Silva;Cardoso, 2013; Salio et al., 2015; Aires et al., 2016; Dembélé; Zwart, 2016; Castelhana et al., 2017, Nogueira; Moreira; Volpato, 2018, Pereira et al., 2018; Silva et al, 2019; Cavalcante et al., 2020; Sapucci et al., 2022). O avanço e otimização desse recurso tecnológico permitiu significativa alavancagem nos estudos de comportamento climático extremos de secas e inundações (Aksu et al., 2022; Ghizat et al., 2022; Fofana et al., 2022; Filho et al., 2022).

Dentre as missões destacadas, os dados do CHIRPS, além de apresentar mais de três décadas de informações pluviométricas, também dispõem

de escala espacial de cerca de 5 km, aliada a intervalos diários, mensais, trimestrais e anuais (Funk et al., 2015). Dessa forma, traduzem-se em uma ferramenta de grande potencial para análise de séries temporais de chuva para regiões com escassez de dados e informações históricas de estações de superfície, ou ainda como recurso para planejamento hídrico, diante das atividades antrópicas desenvolvidas no espaço geográfico por meio do processo de uso e ocupação do solo. Ainda, tem o potencial para dar suporte a Agenda 2030 e aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, com esforços estratégicos locais e globais direcionados ao monitoramento do ciclo hidrológico e prevenção de mudanças climáticas.

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar a distribuição espacial em escala multitemporal (1981-2020) da precipitação com dados CHIRPS para a região central do estado de São Paulo.

## Materiais e métodos

### Área de estudo

A área de estudo, situa-se na região Sudeste do Brasil, no centro-leste do estado de São Paulo, totalizando uma área de 9.151,7 km<sup>2</sup> e que integra um total de 16 municípios paulistas: Analândia, Brotas, Charqueada, Corumbataí, Descalvado, Dois Córregos, Dourado, Ibaté, Ipeúna, Itirapina, Ribeirão Bonito, Rio Claro, Santa Maria da Serra, São Carlos, São Pedro e Torrinha (Figura 01).

A região passou por uma grande transformação no espaço geográfico nos últimos 35 anos, como pode ser observado no mapa de uso e ocupação do solo de 1985 e 2020 (Figura 01). Essa transformação da paisagem ocorreu devido as características do solo e do clima e, também pela posição estratégica que o território dispõe para as atividades agrícola. A produção de cana-de-açúcar é a cultura agrícola mais expressiva do setor primário em área plantada e produção, com a constatação de que continua em crescimento ao longo das décadas (Sanches, et al. 2019).

Em termos ambientais, possui parcialmente uma parte da sua superfície dentro da Área de Proteção Ambiental (APA) Corumbataí, que visa proteger elementos naturais de importância ecológica paisagista consideradas de grande fragilidade ambiental, ocupadas por vegetação remanescente a serem preservadas e, que, nas últimas décadas, reduziu cerca de 2% de sua área (Corvalan; Garcia, 2011).

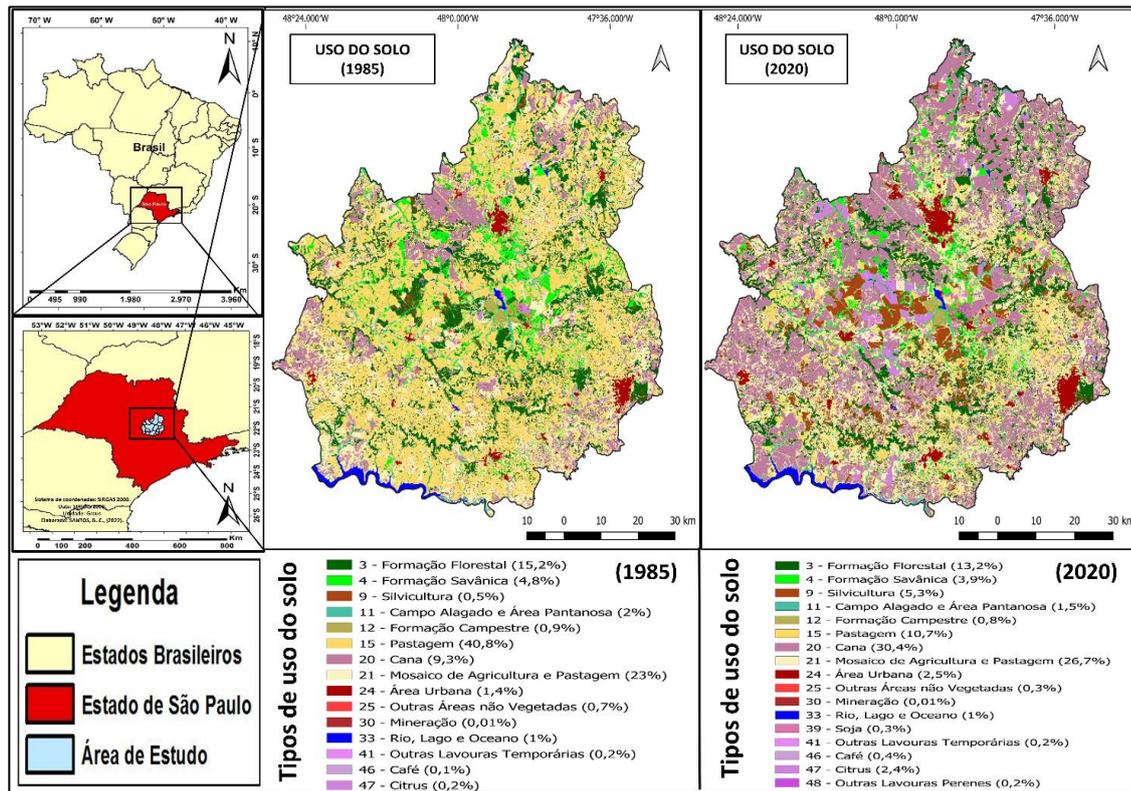


Figura 01.

Localização e transformação do uso e ocupação do solo em 1985 e 2020 para área de estudo.  
 Fonte: MapBiomias1. Maiores detalhes em Souza et al (2020).

O clima nesta localização central do estado paulista enquadra (Figura 02) (b), segundo a classificação de Monteiro (1973), em climas regionais tropicais alternadamente secos (abril a setembro) e úmidos (outubro a março) com predomínio do tipo A2/Vb (Serra de São Carlos). Além disso, de acordo com a classificação de Köppen, a área é classificada como Cwb (Figura 02)-(a), ou seja, clima subtropical de terras altas com invernos secos (Alvares et al., 2013).

Isso representa uma característica importante da distribuição das chuvas, principalmente relacionada ao padrão de circulação atmosférica regional, o que acaba por levar a episódios excepcionais na região (Moruzzi e Oliveira, 2009; Zilli et al., 2017; Sanches et al., 2018; Santos et al., 2017; 2018 e 2020). Também representa um aspecto importante e pontual de variação sazonal da distribuição das chuvas frente ao padrão da circulação atmosférica regional que compõe a área estudada, diante da eventualidade de episódios excepcionais se manifestarem na região (Sanches et al., 2018; 2020; Santos et al., 2017; 2018; 2020; 2021;). Na região central do Estado de

São Paulo, o padrão atmosférico das chuvas está associado com a interação entre sistemas tropicais e extratropicais que, controlados pela dinâmica no avanço de sistemas frontais polares sobre a porção Centro-Sul do Brasil, contribuem na configuração de episódios de ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) e, portanto, gerando condições de instabilidade atmosférica e elevados volumes de chuva (Cavalcanti, 2009; Reboita et al., 2012).

Em termos geomorfológicos (Figura 02) (c), a área encontra-se na transição entre o Planalto Ocidental, formada numa grande zona de relevo suave compostas por colinas, morros baixos e serras, com uma altitude média aproximadamente de 900m e a Depressão Periférica Paulista, apresentando um relevo predominantemente colinoso e suave, além de morros e serras isoladas com níveis de aproximadamente 600m (Figura 02) (d - I e II) (Ross; Moroz, 2011; Pentead, 1976 Pinheiro; Queiroz Neto, 2014). Essa formação possui altos coeficientes de permeabilidade, favorecendo a infiltração que ocorre principalmente na área aflorante caracterizada como região de recarga do Aquífero Guarani.

<sup>1</sup> Projeto MapBiomias - iniciativa multi-institucional para gerar mapas anuais de uso e cobertura da terra por processos de classificação automática aplicada a imagens de satélite. O projeto encontra-se em <http://mapbiomas.org>

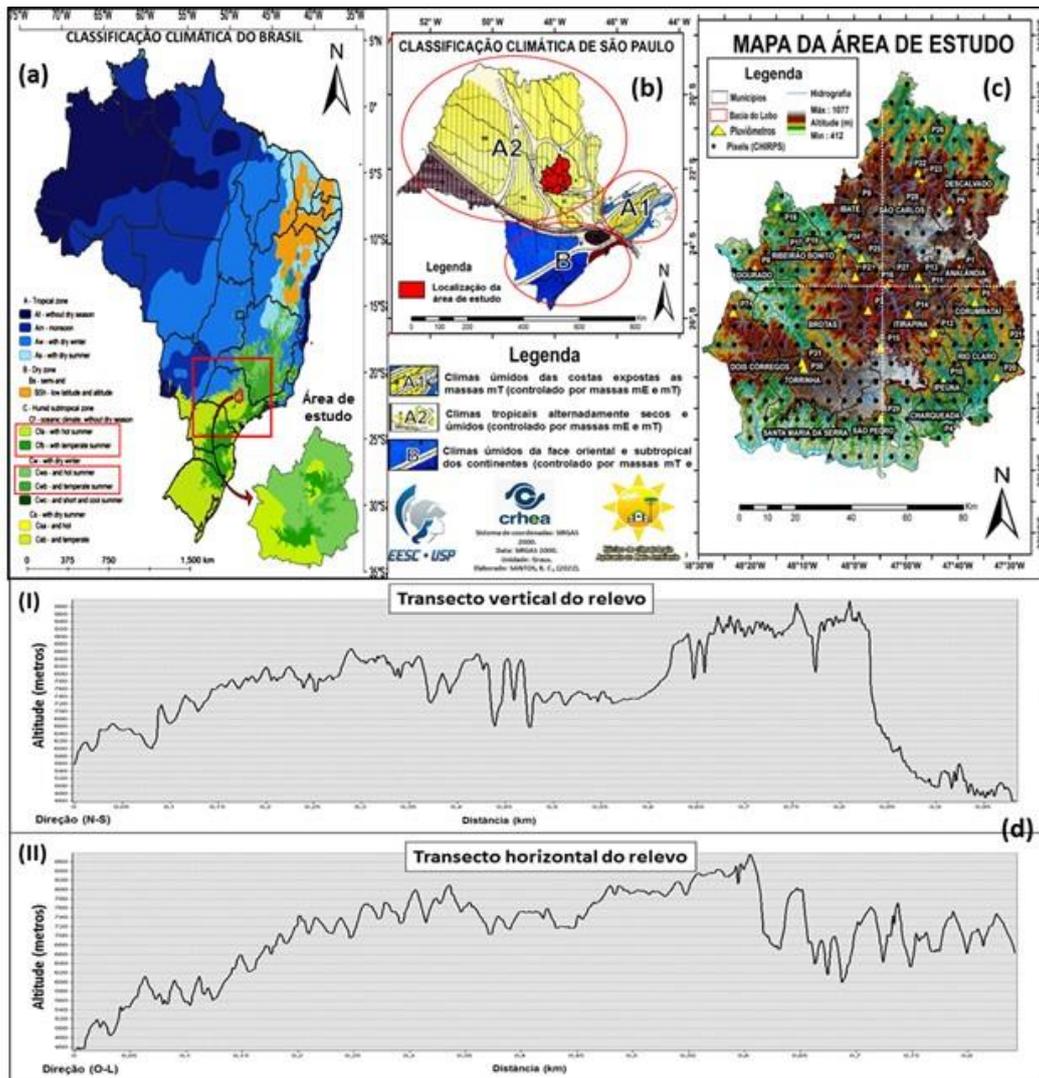


Figura 02: (a) Localização do Estado de São Paulo dentro da classificação climática de Köppen para o Brasil; (b) Localização da área de estudo (vermelho) dentro da classificação climática de São Paulo; (c) Sobre o mapa hipsométrico da área de estudo indica a localização dos postos de superfície representado pelos pontos em amarelo, os pixels do CHIRPS representado em preto e dos transectos (I e II) do relevo representado pelas linhas tracejadas em branco; (d) O transecto (I) representa o perfil vertical do relevo no sentido N-S e o transecto (II) o perfil horizontal do relevo na direção O-L. Fonte: elaborado pelos autores.

Por ser uma região planáltica e, também, na borda das cuestas areníticas da Serra de Itaqueri e de São Carlos, evidencia-se o efeito orográfico nas chuvas, diante da influência que o relevo exerce na circulação do ar na região, devido a orientação das vertentes e da presença da mata natural, principalmente quando está sob a influência dos diferentes tipos de tempos que possam contribuir na formação ou intensificação das chuvas (Monteiro, 1973; Tavares, 1985, Santos et al., 2018; 2020; 2021).

**Banco de dados**

O estudo utilizou 31 postos pluviométricos, com dados diários e séries históricas de 40 anos (1981-2020), com o mínimo possível de falhas. Para o acesso aos dados de chuva, foram consultadas: a plataforma online hidroweb, pertencente a Agência Nacional de Águas (ANA), o site do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e site o Centro Integrado de Informações agrometeorológicas (CIIAGRO), pertencente à Secretaria de Agricultura e Abastecimento. A Tabela 01 mostra as informações dos postos pluviométricos escolhidos para a área de estudo.

Tabela 01: Informações sobre os postos pluviométricos selecionados dentro da área de estudo.

CÓDIGO DO POSTO	NOME DO POSTO	ÓRGÃO RESPONSÁVEL	MUNICÍPIO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE (Metros)	FALHAS (%)
2247004	ANALÂNDIA	DAEE-SP	ANALÂNDIA	-22 7 48.000	-47 40 12.000	660	0,4%
2247185	FAZENDA CAMPO ALEGRE	ANA	BROTAS	-22 9 0.000	-48 0 0.000	733	8,1%
2247197	EST. FERROVIÁRIA CAMPO ALEGRE	ANA	BROTAS	-22 14 24.000	-47 57 36.000	747	4,4%
2247208	RECREIO	DAEE-SP	CHARQUEADA	-22 35 1.000	-47 41 47.000	530	0%
2247010	CORUMBATAI	DAEE-SP	CORUMBAÍ	-22 13 12.000	-47 37 12.000	600	0,4%
2147043	FAZENDA SANTA RITA	DAEE-SP	DESCALVADO	-21 58 12.000	-47 42 0.000	780	0,2%
2248116	GUARAPUA	DAEE-SP	DOIS CORREGOS	-22 14 46.000	-48 23 18.000	719	13,8%
2248009	DOURADO	DAEE-SP	DOURADO	-22 7 48.000	-48 19 12.000	700	0,6%
2148164	IBATÉ	ANA	IBATÉ	-21 57 0.000	-48 0 0.000	-	7%
2247021	IPEUNA	DAEE-SP	IPEUNA	-22 25 48.000	-47 43 12.000	630	7%
2247198	FAZENDA PEQUENA HOLANDA	ANA	ITIRAPINA	-22 10 48.000	-47 46 48.000	780	2,7%
2247015	GRAUNA	DAEE-SP	ITIRAPINA	-22 18 0.000	-47 45 0.000	610	4,4%
2247006	VISCONDE DE RIO CLARO	DAEE-SP	ITIRAPINA	-22 9 0.000	-47 48 0.000	740	11,5%
2247180	ITIRAPINA	ANA	ITIRAPINA	-22 15 0.000	-47 49 48.000	739	10,4%
2247184	ITAQUERI DA SERRA	ANA	ITIRAPINA	-22 20 24.000	-47 55 12.000	894	2,7%
2247196	CRHEA-BROA	ANA	ITIRAPINA	-22 10 12.000	-47 54 0.000	732	0%
2248005	RIBEIRÃO BONITO	DAEE-SP	RIBEIRÃO BONITO	-22 4 48.000	-48 10 48.000	590	7%
2148168	GUARAPIRANGA	ANA	RIBEIRÃO BONITO	-21 57 36.000	-48 15 0.000	-	7,2%
2248110	RIBEIRÃO BONITO 2	ANA	RIBEIRÃO BONITO	-22 4 48.000	-48 10 48.000	486	6,4%
2247020	RIO CLARO	ANA	RIO CLARO	-22 25 12.000	-47 33 0.000	600	2,1%
2247018	FAZENDA SÃO JOSÉ	DAEE-SP	RIO CLARO	-22 19 48.000	-47 28 48.000	600	5,5%
2147059	USINA CAPÃO PRETO	DAEE-SP	SÃO CARLOS	-21 52 12.000	-47 48 0.000	610	8,3%
2247060	FAZENDA DA BARRA	DAEE-SP	SÃO CARLOS	-21 53 8.000	-47 47 9.000	610	0,2%
2247109	FAZENDA AGUA BRANCA	DAEE-SP	SÃO CARLOS	-22 4 3.000	-48 2 46.000	598	2,1%
2247206	FAZENDA SANTA BÁRBARA	DAEE-SP	SÃO CARLOS	-22 6 0.000	-47 58 48.000	780	1,4%
2147031	SANTA EUDOXIA	DAEE-SP	SÃO CARLOS	-21 46 48.000	-47 46 48.000	620	1,2%
2247182	RIBEIRÃO DO FEIJÃO	ANA	SÃO CARLOS	-22 9 0.000	-47 53 24.000	676	4,4%
83726	INMET/UFSCar	INMET	SÃO CARLOS	-21 57 37.723	-47 51 37.650	856	3,2%
2247025	SÃO PEDRO	DAEE-SP	SÃO PEDRO	-22 31 48.000	-47 55 12.000	600	1,4%
D5-006	SITIO BOA VISTA	DAEE-SP	TORRINHA	-22 23 45.000	-48 9 50.000	783	1,7%

Fonte: Hidroweb-ANA (2019).

Além dos dados de superfície, também foram utilizados dados orbitais (Figura 02) (c), na escala mensal, da plataforma CHIRPS (Climate Hazards Group Infra-Red Precipitation with

Station), no mesmo recorte temporal (1981 a 2020). A estimativa e validação dos dados passa por uma série de etapas, que ajudam garantir a qualidade de informações, além de fornecer

parâmetros de controle de qualidade que os usuários do CHIRPS podem considerar úteis. As etapas no processo de preparação e validação dos

valores estimados pelo produto CHIRPS podem ser vistas na Figura 03 a seguir.

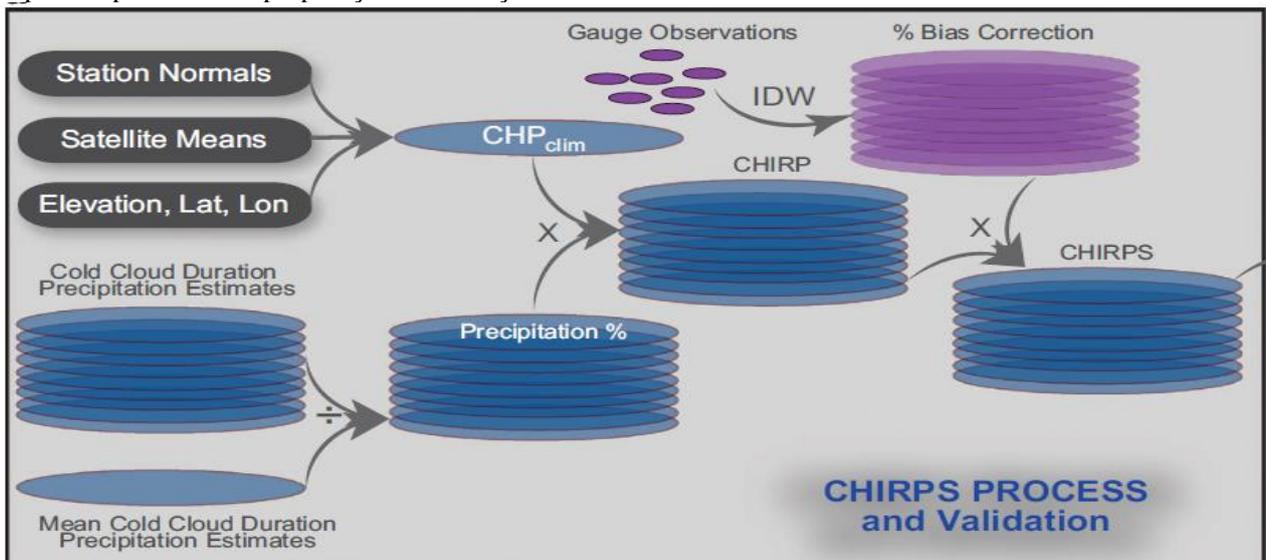


Figura 03: Etapas realizadas na estimativa e procedimento da validação dos dados de precipitação do produto CHIRPS. Fonte: Funk et al., (2015).

Diante disso, as estimativas do CHIRPS vêm sendo validadas em diversos trabalhos, por meio de sua comparação com dados de superfície, buscando demonstrar a qualidade das suas informações, servindo como uma base de dados alternativa dentro do território brasileiro (Costa et al. 2019; Santos; Cunha; Ribeiro-Neto, 2019; Silva et al, 2019; Pereira et al, 2018; Castelhan; Pinehiro; Roseghini, 2017).

### Procedimentos e análise dos dados

A partir dos dados obtidos, buscou-se inicialmente avaliar a relação entre as estimativas por satélite e os dados pluviométricos das estações de superfície, de forma similar aos estudos mencionados anteriormente.

Para tal, foram levantados dados mensais de ambas as fontes (superfície e orbital), sendo que para o satélite foram selecionados os valores dos pontos de grade (pixels) equivalentes ou mais próximos a localização dos 31 postos de superfície.

A partir desses dados, procedeu-se com a verificação e validação cruzada dos dados para a região, que foram feitas por meio de métodos estatísticos, certificando a equivalência entre os dados no período de 40 anos (1981-2020) e, também, em lugares onde não se dispõe de informações de precipitação.

Visando avaliar a utilização dos dados orbitais como alternativa para análise da variabilidade das chuvas em séries históricas, realizou-se uma análise comparativa na escala

global apenas dos valores observados (sem falhas) pelos postos de superfície e os valores estimados pelo satélite, dentro do recorte temporal (1981 a 2020).

Para isso, foram utilizadas duas análises de erro – erro absoluto médio e erro médio quadrático – aliadas ao coeficiente de determinação (ajuste linear). As técnicas são descritas em detalhe a seguir.

### Erro médio (ME)

O ME (Equação 1), que demonstra a diferença entre o valor observado no posto de superfície e o valor estimado pelo satélite.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |\hat{y}_t - y_t| \quad (1)$$

Onde:

- $n$ : número de amostras
- $t$ : período
- $\hat{y}_t$ : valor estimado pelo satélite no período  $t$
- $Y_t$ : valor observado no posto de superfície no período  $t$

O ME calcula a oscilação no erro de um conjunto de dados em relação a outro por meio da amplitude das diferenças entre eles, não levando em consideração a subestimação ou superestimação do erro (Montgomery et al., 2008). Para Hallak e Filho (2011), o ideal valor é aquele

próximo de zero, apontando melhor representação de um conjunto de dados.

### **Raiz do erro médio quadrático (RMSE)**

O RMSE (Equação 2) é a medida média dos erros estimados, sendo os menores erros/melhores ajustes encontrados quanto mais próximo de zero for esse valor.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [\hat{y}_t - y_t]^2}$$

(2)

Onde:

- n: número de amostras
- t: período
- $y_t$ : valor observado no posto de superfície no período t
- $\hat{y}_t$ : valor estimado pelo satélite no período t

O RMSE determina a variabilidade no erro de duas séries temporais. Para isso, somam-se os erros obtidos a partir do quadrado da diferença entre o valor observado nos postos pluviométricos e os dados estimados pelo satélite (Montgomery et al., 2008). Segundo Hallak e Filho (2011), esse critério estatístico é normalmente utilizado para expressar a acurácia dos resultados numéricos, com a vantagem de que esse parâmetro apresenta valores de erro na mesma dimensão da variável analisada.

### **Coefficiente de determinação ( $R^2$ )**

O  $R^2$  (Equação 3) é uma medida de ajustamento estatístico que visa estimar os valores de Y em função do valor de X.

$$R^2 = \frac{[\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})(\hat{y}_t - \bar{\hat{y}})]^2}{\sum_{t=1}^n [y_t - \bar{y}]^2 \sum_{t=1}^n [\hat{y}_t - \bar{\hat{y}}]^2}$$

(3)

Onde:

- n: número de amostras
- t: período
- $y_t$ : valor observado no posto de superfície no período t
- $\bar{y}$ : média dos valores observados
- $\hat{y}_t$ : valor observado pelo satélite no período t
- $\bar{\hat{y}}$ : média dos valores estimado

O  $R^2$  linear avalia o ajuste dos dados CHIRPS em relação ao conjunto de dados observados nos postos pluviométricos. Isto é, a proporção da variação das estimativas por satélite CHIRPS que pode ser explicada pela variação total dos dados observados (Montgomery et al., 2008). Morettin e Bussab (2010) complementam que esse critério varia entre 0 e 1, de modo que quanto maior o valor de  $R^2$  linear, melhor a qualidade de ajuste do conjunto de dados de análise aos valores observados nas estações meteorológicas.

Os cálculos e a sistematização dos dados foram realizados no programa RStudio (RStudio Team, 2021), onde também foram elaborados tabelas e gráficos dos resultados obtidos por meio dos métodos aplicados.

### **Análise da série histórica dos dados CHIRPS**

Para análise histórica dados pluviométricos foram utilizadas ferramentas de classificação e de tendência das chuvas. Os métodos foram aplicados pixel a pixel, para um total de 278 pixels dentro da área de estudo delimitada.

Os dados CHIRPS foram obtidos no formato matricial com extensão Tagged Image File (TIF), incluindo a precipitação anual de 1981 a 2020, num total de 40 imagens, que foram ajustadas ao Sistema de Referência Geodésico SIRGAS 2000. Para o processamento dos dados espaciais, foram utilizados os programas livres e gratuitos RStudio (RStudio Team, 2021) e o QGIS (QGIS Development Team, 2021).

Para o cálculo do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) e para a Inclinação de Tendência (slope) da regressão linear, foram realizadas no programa RStudio análises pixel a pixel, onde, os cálculos foram realizados em cada pixel do arquivo matricial. Os métodos das análises são descritos a seguir.

### **Índice de Precipitação Normalizada (SPI-12)**

O *Standardized Precipitation Index* (SPI), ou Índice Padronizado de Precipitação, foi criado por McKee et al. (1993) permitindo a análise de períodos de seca e períodos chuvosos. É possível, ainda, explorar o banco de dados quanto sua intensidade em diferentes escalas temporais, variando entre 3, 6, 9, 12, 24 e 48 meses. Para este trabalho foi usado o SPI-12, indicando uma escala temporal de doze meses. O SPI é recomendado e aplicado amplamente, pois requer como variável de

entrada apenas dados de precipitação (Royer et al., 2021; Silva et al., 2021).

O SPI é elaborado baseando-se na função de densidade e probabilidade gama, onde  $\alpha$  é parâmetro de forma ( $\alpha > 0$ ),  $\beta$  parâmetro de escala ( $\beta > 0$ ) e  $x$  é a quantidade de chuva. Maior detalhamento sobre os princípios matemáticos e estatísticos da elaboração do SPI podem ser encontrados em McKee et al. (1993). De modo geral, o índice pode ser obtido a partir da função gama, expressa por:

$$g(x) = \frac{X^{\alpha-1} \times e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \text{ para } X > 0$$

Sendo,  $\alpha > 0$  parâmetro de forma;  $\beta > 0$  parâmetro de escala;  $x > 0$ , a quantidade de precipitação (mm) e  $\Gamma(\alpha)$  a função gama completa.

Para estimativa dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da distribuição gama aplica-se:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) e \hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

Onde o  $\bar{x}$  representa a precipitação média.

A distribuição cumulativa é transformada em distribuição de probabilidade normal com média igual a zero e desvio padrão igual a um utilizando o logaritmo natural:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

Após isso, a probabilidade acumulada de ocorrência de cada valor mensal é estimada. Para a padronização, o valor de  $Z$  é obtido por meio da subtração do valor da precipitação  $i$  pela média de precipitação do período e é dividida pelo desvio padrão.

$$SPI = Z_i = \frac{(P_i - \bar{P}_i)}{\sigma_i}$$

Os valores do SPI podem ser classificados em períodos secos e chuvosos (Tabela 02). Ainda, por padronizar os dados, o SPI permite comparar regiões com características distintas.

Tabela 02: Intervalos de classificação do SPI

Índice de precipitação padronizada (SPI)		
Classificação	Padrões Pluviométricos	Desvio (+) ou (-)
Anos Chuvosos	Extremamente úmido	$\geq +2,00$
	Muito úmido	+1,50 a +1,99
	Moderadamente úmido	+1,00 a +1,49
Anos Normais	Próximo ao Normal	+0,99 a -0,99
	Moderadamente seco	-1,00 a -1,49
	Muito seco	-1,50 a 1,99
Anos Secos	Extremamente Seco	$\leq -2,00$

### Regressão linear pixel a pixel

A regressão linear pixel a pixel utilizada neste trabalho foi desenvolvida no programa RStudio (RStudio Team, 2021). Foram usados arquivos matriciais com a soma da precipitação anual por pixel de cada ano. A partir de sua aplicação, foi possível modelar a variável contínua precipitação (Y) como uma função matemática do tempo (X), permitindo usar esse modelo de regressão para prever o quanto Y foi alterado ao longo de X anos. Assim, este método indica a tendência do regime de precipitação (mm/ano) em aumentar ou diminuir, durante o período de 40 anos (01/01/1981 a 31/12/2020). A equação matemática aplicada pode ser expressa da seguinte forma:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X + \epsilon$$

Onde,  $\beta_1$  é o intercepto e  $\beta_2$  é a inclinação de tendência.  $\epsilon$  representa o erro, a parte de Y que

o modelo não permite explicar. Para todos os testes, foi utilizado alfa igual a 0,05.

### Resultados e discussão

#### Análise global das séries temporais (1981-2020)

A Tabela 03 apresenta uma análise conjunta dos resultados médios dos métodos estatísticos, descritos anteriormente, aplicados sobre toda a informação existente (sem as falhas) para cada posto dentro do recorte temporal adotado. Os resultados obtidos sugerem um desempenho semelhante entre as variáveis comparadas.

Para o ME, os erros calculados oscilaram entre -14,7mm (P20) e 10,7mm (P4) dentre os pontos analisados, demonstrando que a diferença média não ultrapassou mais 25,4 mm para toda as 31 séries temporais. Entre os postos, cerca de 74%

subestimaram os valores, e apenas 9,6% destes superestimaram os valores de precipitação. Cerca de 16% dos postos obtiveram valor ótimo, com valores de ME igual a zero. Estes resultados são reforçados pela análise da inclinação da reta, para a qual todos os valores ficaram abaixo de um, reforçando a tendência de subestimação para as estimativas de precipitação por satélite.

Esta condição (subestimação de baixa taxa de chuva e superestimação de alta taxa de chuva) já foi relatada por outros autores (por exemplo, Toté et al., 2015; Paredes-Trejo et al 2017; Torres-Batló, J., Martí-Cardona, 2020).

Já os resultados do RMSE indicaram erros variando entre 36,4mm (P22) e 49,3mm (P25), com uma média de amplitude de 12,9mm. Considerando

que se trata de valores obtidos a partir de acumulados mensais (que chegam aproximadamente 550 mm), pode-se afirmar que os erros são relativamente baixos.

Por último, os resultados de  $R^2$  apresentam a qualidade do ajuste de cada um dos pontos. Segundo Morettin e Bussab (2010), quanto mais próximo de 1,0 a estatística  $R^2$  estiver, melhor é a qualidade do ajuste. Diante disso, nota-se que na grande maioria dos pontos os valores de  $R^2$  indicam um ótimo ajuste, variando entre 0,64 (P4) e 0,87 (P6 e P22). De forma mais específica, para cerca de 80% das estações, os valores ficaram acima de 0,80, e para os demais 20% esses valores ainda podem ser considerados satisfatórios ( $>0,6$ ).

Tabela 03: Análise pluviométrica da média histórica (1981-2020) entre os postos de superfície e os pixels do satélite.

POSTOS	PIXELS	ME	RMSE	$R^2$	Inclinação da reta
P1	4044	-4,13311	40,3	0,84	0,93
P2	4038	-0,95508	43,7	0,82	0,9
P3	4273	-6,76819	44,4	0,83	0,88
P4	5163	10,73955	54,3	0,64	0,94
P5	4279	-6,25113	38,8	0,86	0,9
P6	3701	-8,88635	41,1	0,87	0,88
P7	4264	-6,87057	46,9	0,79	0,87
P8	4031	-4,14777	41,1	0,83	0,9
P9	3582	-2,18016	45,1	0,81	0,93
P10	4761	-0,69003	48,4	0,77	0,9
P11	4159	2,59729	43,2	0,81	0,95
P12	4395	-3,68003	46,8	0,8	0,9
P13	4042	0,524411	44,4	0,8	0,93
P14	4275	-1,99849	43,3	0,82	0,92
P15	4511	-9,38659	54,9	0,76	0,84
P16	4157	-3,96127	40,5	0,84	0,92
P17	3920	-5,41411	43,8	0,82	0,88
P18	3690	-2,40371	37,2	0,86	0,92
P19	3920	5,364088	40,3	0,81	0,98
P20	4765	-14,7095	50,2	0,8	0,82
P21	4520	-1,50023	37,1	0,86	0,93
P22	3473	-2,04671	36,4	0,87	0,93
P23	3473	-3,77778	38,3	0,86	0,92
P24	3923	-0,57946	47,8	0,78	0,9
P25	3924	-9,31754	49,3	0,8	0,86
P26	3252	-0,68536	43,7	0,82	0,93
P27	4040	-3,18885	38,3	0,86	0,92
P28	3697	-2,17065	39,2	0,86	0,93
P29	5023	-3,33415	48,6	0,75	0,89
P30	4628	-12,4873	45,8	0,83	0,85
P31	4628	-12,4873	45,8	0,83	0,85

Para ilustrar de forma mais clara esse ajuste, a Figura 04 apresenta um diagrama de dispersão entre os dados observados (superfície) e

estimados (satélite). O valor de  $R^2$  para este caso foi de 0,8, indicando uma ótima qualidade para todos os 31 pontos analisados.

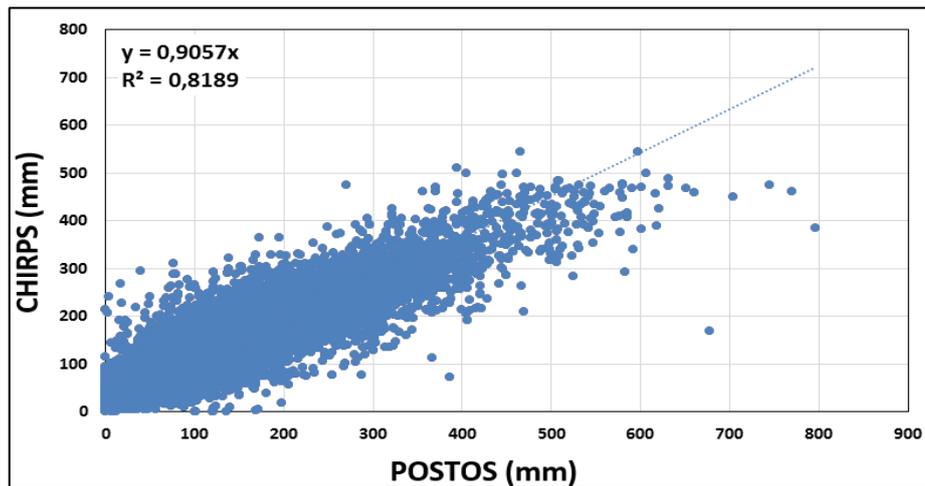


Figura 04: Gráfico de dispersão dos dados pluviométricos de superfície e satélite.

Entretanto, é possível notar (Figura 04) que registros de precipitações acima de 500mm tendem a apresentar uma saturação para o caso do CHIRPS. Enquanto para os valores de chuvas registrados em superfície é possível observar momentos que os postos de superfície registraram precipitações superiores a 600mm (chegando a ultrapassar 800mm em alguns momentos), para os dados estimados esses valores não ultrapassam o limite de 600mm.

Isso demonstra que o comportamento mensal para ambos os dados (satélite e superfície), é semelhante para valores de até 500mm. Porém, para valores mensais superiores a 500mm (podendo até considerar como valores extremos de precipitação), com diferenças crescentes entre os dados estimados e observados a partir desse limiar, sugerindo limitações das estimativas por satélite para acumulados de precipitação mais elevados.

#### **Análise da distribuição espacial da variabilidade anual das chuvas do CHIRPS no período de 1981-2020**

A Figura 5 demonstra a distribuição da variabilidade e classificação das chuvas ao longo de 1981 a 2020. Segundo Peixoto (1987, p.15), “a variabilidade climática refere-se a intervalos de tempo a que se pode associar uma causa definida menor e incluir os valores extremos e as diferenças entre valores médios anuais, sazonais, mensais”.

O gráfico na Figura 5 (a), demonstra a variabilidade nas chuvas por meio do índice SPI entre o período de 1981 a 2020, para toda a área de estudo. Nota-se no gráfico uma flutuação nos dados pluviométricos, ou seja, momentos na série que as chuvas foram acima do padrão médio pluviométrico (em azul) e, outros momentos, abaixo do padrão (em vermelho).

Entre as quatro décadas de registros,

podemos destacar o ano de 1983 como excepcionalmente chuvoso (>2500mm) e o ano de 2014 como excepcionalmente seco (<1000mm).

Segundo Santos et al (2020), a circulação atmosférica foi, nitidamente, distinta em ambos os anos, sobretudo durante o primeiro semestre, reproduzindo numa dinâmica hidroclimática discrepante e denotando um processo que resultou em chuvas intensas no verão do ano de 1983 e, em uma acentuada e prolongada, estiagem no ano de 2014 para a região central do estado de São Paulo.

Ainda foi possível notar que, nos últimos anos, os valores de SPI vem apresentando uma classificação contínua de anos secos, ou seja, as chuvas estão se distanciando do padrão habitual para a área de estudo. Esse aumento no padrão de anos secos também foi evidenciado na região por Santos et al. (2020 e 2021).

Na Figura 5 (b), é possível observar a distribuição espacial dos valores pluviométricos anuais por meio de mapas ao longo do período de 1981 até 2020. Entre os mapas, nota-se algumas regiões que apresentaram anos classificados como úmido (azul) ou seco (vermelho), como por exemplo 1982, 1983, 2009 e 2012, como os mais úmidos e, os anos de 1984, 2008, 2014 e 2020, como os mais secos. Além disso, os resultados evidenciaram ao longo dos anos que as chuvas se concentram em regiões onde a orografia é marcante, contribuindo nos volumes pluviométricos mais elevados por efeito orográfico em comparação com áreas onde o relevo é mais plano.

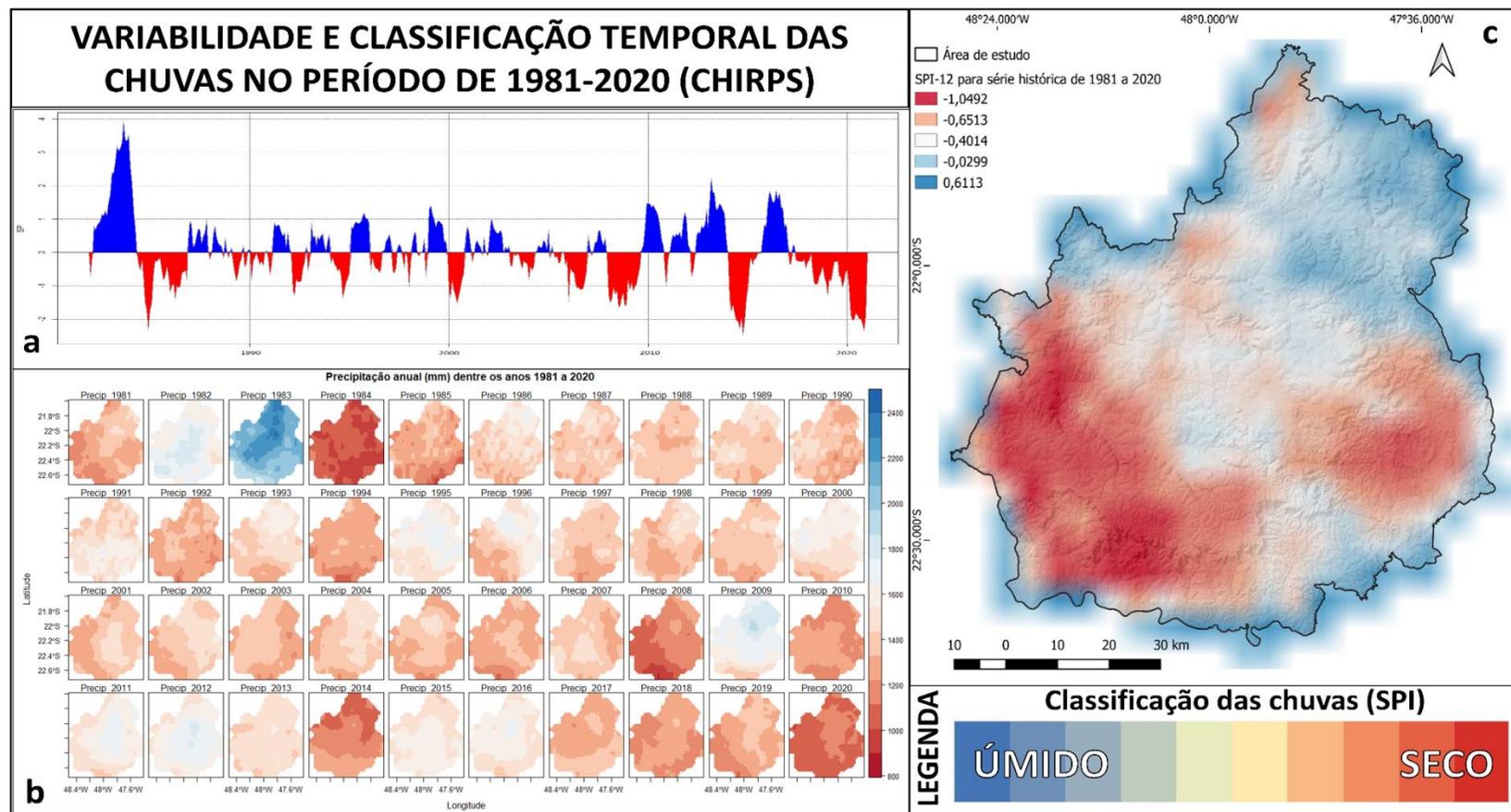


Figura 05 – (a) Gráfico da variabilidade temporal das chuvas anual entre o recorte de 1981 a 2020; (b) Mapas da classificação histórica da distribuição espaço-temporal da precipitação anual; (c) Classificação da precipitação dos últimos doze meses para o período de 1981 a 2020.

Esse efeito do relevo, também pode ser observado na Figura 5 (c), que apresenta a classificação histórica das chuvas anuais para área de estudo. Nota-se que algumas áreas a sudoeste no mapa evidenciaram momentos escassez hídrica (vermelho) e outras demonstraram um excedente hídrico (azul), como áreas nas regiões centro e nordeste do mapa. Além dos efeitos orográficos intrínsecos da geomorfologia da região, diferentes eventos atmosféricos atuantes sobre a área de estudo também podem contribuir na distribuição dos volumes (aumento ou redução) pluviométricos em certas regiões da superfície (Roe, 2005).

#### ***Análise da distribuição espacial das tendências das chuvas***

De forma similar à análise anterior, a Figura 6 apresenta a distribuição temporal na tendência das chuvas ao longo dos 40 anos. O gráfico na Figura 6 (a) demonstra a variabilidade mensal das chuvas acumuladas ao longo do recorte temporal para toda a área de estudo. Foi possível identificar momentos que registraram elevados volumes de chuva, próximos aos 500mm, e outros, com ausência de chuvas (0 mm), como o gráfico de dispersão demonstrado na Figura 4, anteriormente.

Esse padrão apresentado nos dados pluviométricos demonstra a sazonalidade que clima tropical apresenta na área. Essa periodicidade das chuvas é determinada pelo padrão da dinâmica das

massas de ar e sistemas atmosféricos que atuam durante os trezentos e sessenta e cinco dias do ano. Diante disso, essa dinâmica atmosférica caracteriza um padrão no ritmo pluviométrico com uma estação úmida (outubro-março) e outra seca (abril-setembro), como é possível observar na Figura 6 (b).

A dinâmica sazonal das chuvas na região se reafirma, diante da atuação de massas de ar equatoriais, tropicais e polares, que se associam à diversidade dos tipos de tempo sazonal, onde, no verão ocorrem os máximos de chuvas vinculados a atuação da ZCAS, e no inverno, os mínimos de precipitação estão associados a atuação semi-permanente de bloqueios atmosféricos, como por exemplo a atuação da ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul) (Reboita et al, 2010).

O gráfico da Figura 6 (c) apresenta a tendência média das chuvas ao longo da série histórica para a região estudada. Nota-se, ao longo do tempo, uma flutuação que apresenta uma tendência de aumento no início da série, posteriormente passando por alguns períodos de transições e, nos últimos anos, tendências de redução.

Esse padrão de tendências negativas também foi observado na região por Sanches et al. (2020), que apontaram redução das chuvas para o município de São Carlos-SP. Em outro estudo em uma área maior (bacia do Paraná), Rafee et al (2021) encontraram tendências negativas gerais para a precipitação anual na porção norte da bacia, onde inclui a região deste estudo.

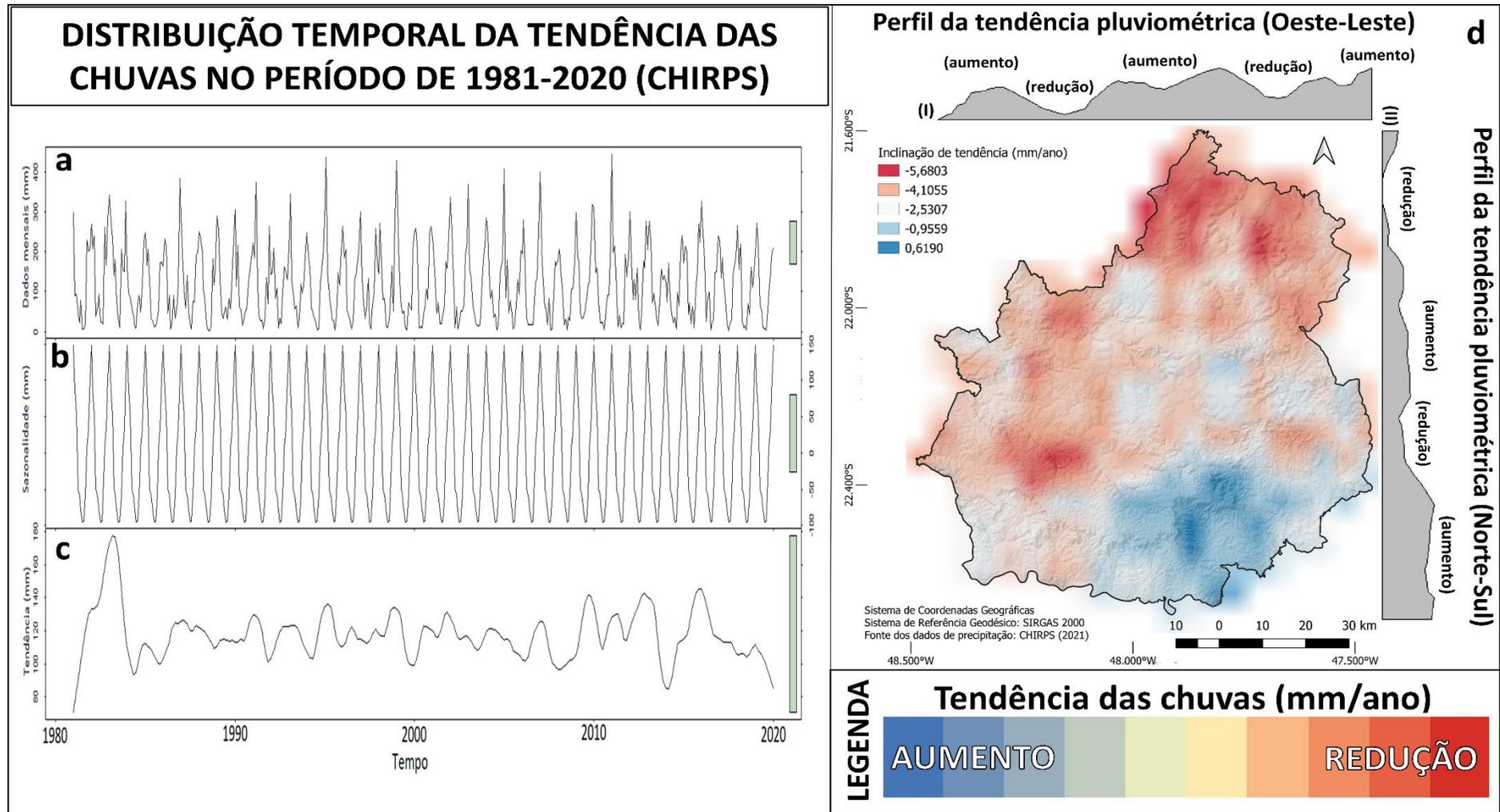


Figura 06 – (a) Gráfico da distribuição temporal das chuvas mensais (mm) entre 1981 a 2020; (b) Gráfico da distribuição sazonal das chuvas (mm); (c) Distribuição espaço-temporal da tendência das chuvas anuais entre o recorte de 1981 a 2020; (d) Tendência das chuvas anuais (aumento e redução) para a área de estudo.

Dentre as principais justificativas para tal variabilidade, destacam-se as influências oceânicas por meio das teleconexões, em que as chuvas se mostraram com grande variabilidade interanual, que coincide com fases positivas e negativas (aquecimento e resfriamento, respectivamente) nos oceanos, também conhecidas como El Niño e La Niña, respectivamente, e que integram as chamadas Oscilação Sul (ENSO – El Niño South Oscillation) e Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) (Vásquez P. et al., 2018).

O período de 1981-1984 se mostrou com as mais significativas flutuações, com o aumento exponencial das chuvas, seguido da mudança abrupta para tendente à diminuição. Tal período representou, com isso, grande variabilidade no volume das chuvas e, no ano de 1983, notou-se o maior valor observado interanualmente, como foi mostrado na Figura 5 (b), sendo um período em que as chuvas se intensificaram no sudeste do Brasil devido ao El Niño (fase positiva da ENSO), em função do aumento da temperatura de superfície do pacífico (Vásquez P. et al., 2018 e Zilli et al., 2017).

Nota-se também que, no período 1984-1985, as chuvas apresentaram certa redução, o que coincide com o período de La Niña, fase negativa da ENSO (Vásquez p. et al., 2018; Zilli et al., 2017). A partir da década de 1990, vale ressaltar que as tendências tiveram um ligeiro aumento até 2000, e depois houve um declínio na tendência das chuvas até 2009. Entre o período de 2009 e 2013, houve um aumento das tendências e, no período de 2013 e 2014, evidenciou-se a tendência decrescente mais expressiva da série.

Após a retomada positiva das chuvas em 2015, o padrão das tendências até 2020 apresentou uma profunda redução nos volumes. Essas reduções estão associadas novamente às teleconexões, uma vez que, apesar da fase neutra do Pacífico, a ODP passava por uma mudança entre fases (negativa para positiva), o que contribuiu para a diminuição do volume de chuvas na região (Sanches, 2019).

Por último, o mapa na Figura 6 (d) demonstra a tendência da distribuição das chuvas para a área de estudo. Notam-se no mapa regiões que evidenciaram uma redução

(vermelho) e outras um aumento (azul) no volume (mm) de chuvas ao longo do ano. Entre as áreas, a porção sudeste demonstrou um aumento no volume de chuvas anuais, ao passo que as porções sudoeste e norte evidenciaram uma redução no volume das chuvas.

É possível observar mais uma vez que a orografia influencia no padrão regional da distribuição das chuvas na área de estudo. Observa-se a sudeste no mapa uma tendência de concentração de chuvas em áreas mais planas próximas da borda de transição para áreas de relevo mais acentuado. Porém, notou-se que uma redução nos volumes de chuvas na região sudoeste e norte do mapa e, acredita-se que essa diminuição possa estar associada as características topográficas que áreas conservam.

Nesse sentido, o perfil pluviométrico (II) ao lado direito do mapa demonstra que as chuvas estão aumentando na direção de norte a sul e concentrando seus volumes em áreas mais ao centro-sul. No topo do mapa, o perfil pluviométrico (I) mostra que a evolução das chuvas vem aumentando no sentido de oeste a leste, principalmente nas áreas a centro-leste, que apresentaram maiores volumes de chuva. A intensificação das chuvas ocorridas, mesmo sob influência do relevo, tende a se concentrar durante o período primavera-verão (outubro-março), onde a passagem de sistemas atmosféricos desencadeia a instabilidade e contribui para a ocorrência de eventos extremos de precipitação em escalas de tempo mais curtas.

Ressalta-se, ainda, que eventos de precipitação intensas e longas são comuns na divisão topográfica. Segundo Houze (2012), a precipitação orográfica é intrinsecamente um fenômeno transitório e tende a ocorrer durante a passagem de um distúrbio meteorológico preexistente, e as taxas de precipitação podem variar substancialmente durante o curso de uma única tempestade conforme as condições sinóticas atuantes mudam ao longo do dia.

Diante disso, a característica do relevo como uma barreira natural ao sul pode contribuir para que os principais sistemas atmosféricos produtores de chuva que

passam sobre essa região não precipitem, depositando os volumes pluviométricos com mais frequências nas áreas mais a centro-leste do mapa.

Portanto, a presença marcante de regiões orográficas também pode influenciar nos valores de chuvas (Dinku et al., 2011, Rahman et al., 2009, Toté et al., 2015) e, com isso, resultar em um comportamento pluviométrico distinto por efeito orográfico em relação a outras áreas onde o relevo é mais plano (Santos et al. 2020; 2021).

### Conclusões

Em geral, os resultados obtidos com os métodos estatísticos aplicados para comparar as estimativas de precipitação do produto CHIRPS com as medidas em superfície de 31 estações localizadas na região central do Estado de São Paulo, se mostraram satisfatórios. As análises globais revelaram que o CHIRPS apresenta uma tendência a subestimar os valores de precipitação na maioria dos casos (74%), conforme observado através dos valores médios de ME; valores médios de RMSE variando entre 36,4 mm e 49,3 mm; e bom ajuste para o modelo de regressão linear ( $R^2$  médio de 0.81).

Entre as análises de classificação e de tendências realizadas nos dados históricos de precipitação foi observado uma flutuação nos volumes de chuvas ao longo dos 40 anos de registros da plataforma CHIRPS. Entre os anos, classificou-se o de 1983 como o mais úmido, e o de 2014 como o mais seco.

Além disso, notou-se pelo SPI-12 uma predominância da condição seca mais recorrente em áreas a sudoeste da região nos últimos anos. De forma similar, para as tendências, evidenciou espacialmente uma concentração na distribuição de redução em áreas O-N e, de aumento em áreas L-S, no volume de chuvas para a região. Essa diferença pode estar associada aos efeitos orográficos, dada a complexidade do terreno que algumas áreas apresentam, bem como relacionada a redução das chuvas com a influência oceânica (teleconexão) em determinado período do recorte temporal analisado nesse estudo.

Diante desse cenário, as chuvas na região central do estado de São Paulo vêm demonstrando tendência de redução no

volume anual acumulado. Portanto, para os municípios que compõem a área de estudo, é necessária uma atenção pública de segurança hídrica sobre a situação climática no regime pluviométrico, para que esse cenário de redução não afete a economia e a sociedade.

Além disso, pode se afirmar que as informações registradas pelos postos em superfície apresentam uma boa relação com as estimativas por satélite, o que legitima o uso desses dados para análises pluviométricas, principalmente para áreas que não apresentam disponibilidade de dados, uma vez que não há solução para a grave falha que muitos postos de coleta possuem ao não catalogarem de forma contínua e permanente os dados climatológicos que se presumia serem coletados.

Portanto, o uso dessas tecnologias/recursos permite suprir essas falhas, proporcionando uma análise completa de suas séries e, assim, contribuindo sobremaneira com o desenvolvimento das pesquisas e no entendimento do comportamento da atmosfera nas diversas porções da superfície terrestre, sobretudo nas áreas onde as carências humanas e financeira dificultam a coleta de dados de forma contínua e longa.

### Referências

- Abreu, F. G. de; Sobrinha, L. A.; Brandão, J. L. B. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22, 239–250, 2017.
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, et al (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Aires, U. R. V.; Neto, J. O. N.; Mello, C. R. Estimativas de precipitação derivadas do satélite TRMM para a bacia hidrográfica do rio Paraopeba, MG. *Revista Scientia Agrária*, 17, Curitiba, abril/maio 2016, p. 57-66.
- Ambrizzi, T.; Sacco, M. A. L.; Ferraz, S. E. T. A importância das teleconexões para a previsão sazonal. *Ciência e Natura*, 36 2014.

- Aksu, H., Cavus, Y., Aksoy, H. et al. Spatiotemporal analysis of drought by CHIRPS precipitation estimates. *Theor Appl Climatol* 148, 517–529, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-03960-6>
- Blain, G. C. Seasonal variability of maximum daily rainfall in Campinas, state of Sao Paulo, Brazil: trends, periodicities, and associated probabilities. *Acta Scientiarum Technology*, 35, 557-, 2013.
- Cavalcante, R. B. L. et al.: Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia, *Atmospheric Research*, Volume 238, 2020.
- Cavalcanti, I. R. A.; Ferreira, N. J.; Silva, M. G. A.; Dias, M. A. F. S. (Orgs.) *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- Carvalho, L. M. V.; Jones, C.; Liebmann, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. *Journal of Climate*, 17. 88–108, 2004.
- Castelhamo, F. J.; Pinehiro, G. M.; Roseghini, W. F. F. *Correlação entre precipitação estimada por satélite e dados de superfície para aplicação em estudos climatológicos*. Geosul, Florianópolis, 32, 179-192, mai./ago. 2017.
- Costa, J.; Pereira, G.; Siqueira, M. E.; Cardozo, F.; DA Silva, V. V. Validação dos dados de precipitação estimados pelo chirps para o brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, Ano 15 – Vol. 24 – jan/jun 2019.
- Cunha, A. C. DA; Vilhena, J. E. D. S.; Santos, E. S. D.; et al. Evento extremo de chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio Araguari, Amapá, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29, p. 95–110, 2014.
- Dembélé, M.; Zwart, S.J. Avaliação e comparação de produtos pluviométricos baseados em satélite em Burkina Faso, África Ocidental. *International Journal of Remote Sensing*, 37 (17), pp. 3995 - 4014, 2016.
- Dinku, T.; Ceccato, P.; Connor, S. J. Challenges of satellite rainfall estimation over mountainous and arid parts of east Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 32, 5965–5979, 2011. Taylor & Francis.
- Filho, D. F. F.; Bezerra, P. E. S.; Silva, M. de N. A. DA; Rodrigues, R. S. S.; Figueiredo, N. de M. Aplicação de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas da rede hidrográfica: estudo de caso calha norte – PA. *Revista Brasileira de Climatologia*, 24, 2019.
- Filho, G. M. R.; Coelho, V. H. R.; Freitas, E. S.; Xuan, Y.; Brocca, L.; Almeida, C. N.; Regional-scale evaluation of 14 satellite-based precipitation products in characterising extreme events and delineating rainfall thresholds for flood hazards, *Atmospheric Research*, 276, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106259>.
- Fofana, M.; Adoukpe, J.; Larbi, I.; Hounkpe, J.; Toure, H. K. A.; Bokar, H.; Dotse, S.; Limantol, A. M.; Urban flash flood and extreme rainfall events trend analysis in Bamako, Mali, *Environmental Challenges*, Volume 6, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100449>.
- 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.
- Ghozat, A., Sharafati, A. & Hosseini, SA Monitoramento por satélite da seca meteorológica em diferentes regiões do Irã: aplicação do produto de precipitação CHIRPS. *Environ Sci Pollut Res* 29, 36115-36132, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18773-3>
- Hallak, R.; Filho, A. J. P. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. *Revista Brasileira*

- de Meteorologia, São José dos Campos, 26, 591-608, 2011.
- Houze, R. A. Orographic effects on precipitating clouds. *Reviews Geophysics*, 50, RG1001, 2012.
- Madsen, H.; Lawrence, D.; Lang, M.; Martinkova, M.; Kjeldsen, T. R. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519, 3634–3650, 2014.
- Mckee, Thomas B. et al. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. 1993. p. 179-183.
- Mekis, É.; Vincent, L. A. An Overview of the Second Generation Adjusted Daily Precipitation Dataset for Trend Analysis in Canada. *Atmosphere-Ocean*, 49, 163–177, 2011.
- Montgomery, D. C.; Jennings, C. L.; Kulahci, M. *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting*. 2ª ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 469 p., 2008.
- Monteiro, C.A.F. *A Dinâmica Climática e as Chuvas no Estado de São Paulo: estudo geográfico sob a forma de atlas*. São Paulo: USP/IG, 1973.
- Morettin, P. A.; Bussab, W. O. *Estatística Básica*. 6ª ed. São Paulo: Editora Saraiva, 210 p., 2010.
- Moruzzi, R.B.; Oliveira, S.C. *Relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas em Rio Claro, SP: métodos e aplicação*. Teoria e Prática na Engenharia Civil, 59-68, 2009.
- Mu, Ye; BIGGS, Trent; SHEN, Samuel S.P. Satellite-based precipitation estimates using a dense rain gauge network over the Southwestern Brazilian Amazon: Implication for identifying trends in dry season rainfall. *Atmospheric Research*, 261, 2021.
- Nogueira, S.M.C.; Moreira, M.A.; Volpato, M.M.L. Avaliando Estimativas de Precipitação a partir de Dados Eta, TRMM e CHRIPS na Região Sul-Sudeste do Estado de Minas Gerais — Brasil. *Remote Sensing*, 10, 313, 2018.
- Paredes-Trejo F.J., Barbosa H.A., Lakshmi Kumar T.V.; Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *Journal of Arid Environments* 139:26–40, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.009>
- Penteado, M.M. *Geomorfologia do Setor Centro-Ocidental da Depressão Periférica Paulista (Tese de Doutorado)*. São Paulo: Instituto de Geografia-USP, 1976.
- Pereira et al.: ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS (1981-2017). *Revista Brasileira de Climatologia*, Ano 14 – Edição Especial Dossiê Climatologia de Minas Gerais – NOV 2018.
- Pereira, G.; Silva, M. E. S.; Cardozo, F. S. Avaliação dos dados de precipitação estimados por satélite TRMM para o Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 18, jul/set, p. 139- 148, 2013.
- Piccarreta, M.; Capolongo, D.; Boenzi, F. Trend analysis of precipitation and drought in Basilicata from 1923 to 2000 within a southern Italy context. *International Journal of Climatology*, 24, 907–922, 2004.
- Pinheiro, M.R.; Queiroz Neto, J.P. Reflexões sobre a gênese da Serra Geral e da Depressão Periférica Paulista: O exemplo da região da Serra de São Pedro e do Baixo Piracicaba, SP. *Revista do Instituto Geológico*, 35, 47-59, 2014.
- QGIS Development Team (2021). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- Peixoto, J. P.: *As Variações do clima e o ambiente - o homem, o clima e o ambiente II*. Lisboa: Secretaria de Estado do Ambiente e dos Recursos Naturais, 1987.
- Rafee SAA, Freitas ED, Martins JA, et al Spatial Trends of Extreme Precipitation Events in the Paraná River Basin. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 59:443–454, 2020. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0181.1>
- Rahman, S. H.; Sengupta, D.; Ravichandran, M. Variability of Indian summer monsoon rainfall in daily data from gauge and satellite. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114, 2009.

- Disponível em:  
<<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2008JD011694>>.  
Acesso em: 12/8/2021.
- RStudio Team (2021). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Reboita, M. S.; Krusche, N.; Ambrizzi, T.; Rocha, R. P. DA. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. *Terrae Didactica*, 8, 34–50, 2012.
- Roe, G.H. Orographic precipitation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 645-671, 2005.
- Ross, J.L.S.; Moroz, I.C. Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. *Revista do Departamento de Geografia*, 10, 41-58, 2011.
- Royer, Ana Caroline et al. Tendências de mudança na precipitação e na susceptibilidade à seca avaliada pelo Índice de Precipitação Normalizada (SPI) no nordeste de Portugal. *Territorium*, n. 28 (II), p. 13-26, 2021.
- Sales, Fernando De et al. Impacts of Protected Area Deforestation on Dry-Season Regional Climate in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 125, n. 16, p. e2020JD033048, 27 ago. 2020. Disponível em:<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020JD033048>>. Acesso em: 13 set. 2021
- Salio, P.; Hobouchian, M.P.; Skabar, Y.G.; Vila, D. Avaliação de estimativas de precipitação de satélite de alta resolução sobre o sul da América do Sul usando uma densa rede pluviométrica. *Atmospheric Research*, 163 , pp. 146 - 161, 2015.
- Sanches, R. G.; Neves, G. Z. de F.; Santos, B. C. dos; et al. Intense Rainfall in São Carlos/SP: Determination of Threshold Values Using Climate Indices and Their Spatio-Temporal Repercussion. *American Journal of Climate Change*, 07, 388, 2018.
- Sanches, R. G. Análise das chuvas diárias na região de São Carlos/SP por meio de índices climáticos e das tendências pluviométricas, 28. jun. 2019. text, Universidade de São Paulo. Disponível em:  
<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-20082019-093802/>>.  
Acesso em: 1/12/2020.
- Sanches, R. G.; Santos, B. C.; Neves, G. Z. F.; Silva, M. S. D.; Souza, P. H.; Tech, A. R. B. A influência da variabilidade climática na produção canavieira na microrregião de São Carlos/SP no período de 1994 a 2014. *Revista Brasileira de Climatologia*, 25, 95-514, 2019.
- Sanches, R. G.; Santos, B. C. D.; Miani, R. S.; et al. Analysis of Daily Rainfall in São Carlos/SP, Brazil over 1979-2017 Using Laplace Trend Test. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8, 104–125, 2020.
- Santos, B. C. dos; Souza, P. H. de; Vecchia, F. A. da S. A caracterização da precipitação do ano hidrológico de 2013-2014 na região de São Carlos/SP e sua repercussão no espaço geográfico. *Revista Brasileira de Climatologia*, 21, 2017.
- Santos, B.C.; Sanches, R.G.; Silva, M.S.D.; Kayano, T.Y.K.; Souza, P.H.; Tech, A.R.B. Análise do efeito orográfico por meio da interpolação de índices climáticos. *Revista de Geografia-PPGEO-UFJF*, 8, 114-132, 2018.
- Santos, B. C., Fontão, P. A. B., & Souza, P. H. O efeito do relevo nas chuvas na porção central do Estado de São Paulo em anos padrão extremos. *Revista Do Departamento De Geografia*, 40, 132-147, 2020.
- Santos, B. C.; Souza, P. H.; Sanches, R. G.; Bolleli, T. M.; Tech, A. R. B.: O efeito do Planalto Ocidental Paulista na Variabilidade e nos Anos Extremos das Chuvas no período de 1979-2019. *Caderno de geografia*, v. 31, Número Especial 2, p. 168-186, 2021.
- 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*, Ano 15 – Vol. 25 – JUL/DEZ, 2019.
- Sapucci, C.R., Mayta, V.C. & da Silva Dias, P.L. Evaluation of diverse-based precipitation data over the Amazon

- Region. *Theor Appl Climatol*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04087-4>.
- Silva, C. B.; Silva, M. E. S.; Ambrizzi, T. et al.: Precipitação na América do Sul – dados obtidos em estações meteorológicas automáticas e sistemas orbitais. *Revista Brasileira de Climatologia*, ano 25, 25, Jul/Dez 2019.
- Silva, Greicy Kelly da et al. Análise da Variabilidade Espaço-Temporal do SPI: Um Estudo de Caso para a Sub-Bacia Choró, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2021.
- Souza et al. (2020) - Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine - *Remote Sensing*, Volume 12, Issue 17, 10.3390/rs12172735
- Tavares, A.C.; Reynaldo, N.A.; Donatto, M.C.B.D.C.; Cruz, M. P. O Uso da Análise Episódica na Caracterização de Aspectos Topoclimáticos da Serra de Itaquari-SP. *Boletim de Geografia - UEM*, 3, 84-108, 1985.
- Teixeira, M. DA S.; Satyamurty, P. Trends in the Frequency of Intense Precipitation Events in Southern and Southeastern Brazil during 1960–2004. *Journal of Climate*, 24, 1913–1921, 2011.
- Torres-Batló, J., & Martí-Cardona, B.; Precipitation trends over the southern Andean Altiplano from 1981 to 2018. *Journal of Hydrology*, 590, 125485, 2020.
- Toté, C.; Patricio, D.; Boogaard, H.; et al. Evaluation of Satellite Rainfall Estimates for Drought and Flood Monitoring in Mozambique. *Remote Sensing*, v. 7, n. 2, p. 1758–1776, 2015. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Vásquez P., I. L.; de Araujo, L. M. N.; Molion, L. C. B.; et al. Historical analysis of interannual rainfall variability and trends in southeastern Brazil based on observational and remotely sensed data. *Climate Dynamics*, 50, 801–824, 2018.
- Zandonadi, L.; Acquaotta, F.; Fratianni, S.; Zavattini, J. A. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River Basin). *Theoretical and Applied Climatology*, 123, 741–756, 2016.
- Zilli, M. T.; Carvalho, L. M. V.; Liebmann, B.; Silva Dias, M. A. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. *International Journal of Climatology*, 37, 2269–2279, 2017.