



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE METEOROLOGIA

Jhonny Clayton Guarda

**Variabilidade do ciclo anual da precipitação em Santa Catarina a partir da
análise de EOFs Cicloestacionárias**

Florianópolis

2026

Jhonny Clayton Guarda

**Variabilidade do ciclo anual da precipitação em Santa Catarina a partir da
análise de EOFs Cicloestacionárias**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Meteorologia do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.

Orientador(a): MSc. Caarem Denise Silva Studzinski.

Florianópolis

2026

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Guarda, Jhonny Clayton

Variabilidade do ciclo anual da precipitação em Santa Catarina a partir da análise de EOFs Cicloestacionárias / Jhonny Clayton Guarda ; orientadora, Caarem Denise Silva Studzinski, 2026.

78 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Meteorologia, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Meteorologia. 2. Precipitação. 3. Climatologia - Santa Catarina. 4. El Niño-Oscilação Sul (ENOS). 5. Funções Ortogonais Empíricas. I. Studzinski, Caarem Denise Silva. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Meteorologia. III. Título.

Jhonny Clayton Guarda

Variabilidade do ciclo anual da precipitação em Santa Catarina a partir da análise de EOFs Cicloestacionárias

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso de Meteorologia.

Local Florianópolis, 25 de fevereiro de 2026.

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Caarem Denise Silva Studzinski, Ma
Orientador(a)

Prof.(a) Mario Francisco Leal de Quadro, Dr.(a)
Instituição Instituto Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Wendell Rondinelli Gomes Farias, Dr.(a)
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2026.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos aqueles que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Jane e Fábio, e aos meus dois irmãos Pablo e Walter, dedico este agradecimento especial. Vocês foram meu alicerce em todos os momentos, oferecendo não apenas suporte material, mas também emocional. Sua crença em meu potencial me deu forças para superar cada obstáculo encontrado no caminho.

Aos meus amigos, particularmente ao Augusto, Camila, Krone, Natacha e à Vanessa, deixo aqui registrado meu reconhecimento e gratidão. Vocês foram meus confidentes, meus apoiadores e, acima de tudo, meus companheiros nesta longa jornada de graduação. As conversas, as risadas e os conselhos de vocês foram essenciais para manter meu ânimo elevado e me permitir seguir apesar das adversidades.

À Aeroespacial, agradeço a oportunidade de crescer profissionalmente enquanto realizava minha formação acadêmica, permitindo que eu aplicasse conhecimentos teóricos em contextos práticos.

À Caarem Studzinski, minha orientadora e chefe, deixo um agradecimento que vai além das palavras. Sua orientação técnica impecável, suas críticas construtivas e seu apoio incondicional foram pilares fundamentais para este trabalho. Agradeço pela confiança depositada em mim e pelo exemplo de excelência profissional que você representa.

RESUMO

O estado de Santa Catarina (SC) apresenta uma climatologia de precipitação intrinsecamente complexa, resultante da interação de múltiplos sistemas meteorológicos e fenômenos de grande escala, com destaque para o El Niño–Oscilação Sul (ENOS). Dada a necessidade premente de dados pluviométricos confiáveis em regiões caracterizadas por baixa densidade de estações de superfície e com um histórico de dados longo, este estudo teve como objetivos centrais a validação do produto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) para o território catarinense, a caracterização detalhada da climatologia de precipitação estadual e a decomposição de sua variabilidade espaço-temporal por meio das Funções Ortogonais Empíricas (EOFs) e Funções Ortogonais Empíricas Cicloestacionárias (CSEOFs). A validação do CHIRPS foi conduzida mediante comparação com dados observacionais de estações de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os resultados demonstraram elevada correlação (coeficientes superiores a 0,80), um viés reduzido e ausência de tendências nas séries, atestando a adequação do CHIRPS para investigações climatológicas em Santa Catarina na escala mensal. A caracterização climatológica, baseada na série histórica de 44 anos (1981-2024), reafirmou a complexidade do regime pluviométrico catarinense. A média anual de 1.721 mm e a ausência de uma estação seca definida foram corroboradas, destacando-se os núcleos de máxima precipitação no Extremo-Oeste (influenciados por Complexos Convectivos de Mesoescala e Jatos de Baixos Níveis) e no Litoral Norte (pela interação entre a circulação marítima e a orografia da Serra do Mar). A análise integrada de EOF demonstra que a variabilidade climática em Santa Catarina é governada por uma hierarquia de padrões. A maior parte da variância anual (79,6%) responde de forma homogênea e anual ao Pacífico (EOF1). No entanto, a decomposição cicloestacionária, quando somados, os 5 modos da CSEOF estes representaram 53% da variabilidade da precipitação no estado. A decomposição cicloestacionária revela que a influência do Oceano Pacífico (índices climáticos) não é constante, sendo fortemente modulada pelas estações do ano, com respostas específicas no verão/inverno (CSEOF1) e um pico agudo em novembro (CSEOF3). Adicionalmente, o estado apresenta uma variabilidade regional significativa, baseada no contraste entre o interior e o litoral, capturada tanto na média anual (EOF2) quanto em sua janela de atividade no outono/inverno (CSEOF2), esta última correlacionada com o SOI. Os modos de menor variância (CSEOF4 e 5) complementam o sistema, detalhando dinâmicas sazonais específicas do verão e transições de fase entre junho e outubro.

Palavras-chave: climatologia; EOFs cicloestacionárias; CHIRPS; ENOS; Santa Catarina; EOF.

ABSTRACT

Santa Catarina (SC), in Southern Brazil region, possesses a highly complex precipitation climatology, shaped by the interplay of various meteorological systems and large-scale phenomena—most notably, the El Niño–Southern Oscillation (ENSO). Given the urgent need for accurate rainfall data in areas with sparse surface stations and extensive historical records, this study primarily aimed to validate the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) product throughout Santa Catarina, deliver a detailed characterization of the state's precipitation climatology, and examine its spatiotemporal variability using Empirical Orthogonal Functions (EOFs) and Cyclostationary Empirical Orthogonal Functions (CSEOFs). CHIRPS was validated by comparing it with INMET surface station observations. Results indicated strong correlations (coefficients above 0.80), low bias, and no evident trends in the series, confirming that CHIRPS is suitable for monthly-scale climatological analysis in Santa Catarina. Using a 44-year data set (1981–2024), the climatological assessment highlighted the region's intricate rainfall patterns. The findings confirmed an annual average precipitation of 1,721 mm and the absence of a distinct dry season, with maximum rainfall centers observed in the Far West, affected by Mesoscale Convective Complexes and Low Level Jets, and on the North Coast, where oceanic circulation interacts with the Serra do Mar's orography. An integrated EOF analysis revealed that Santa Catarina's climate variability is dominated by hierarchical patterns; the leading mode (EOF1) accounts for 79.6% of annual variance and reflects a broad, Pacific-driven response. The CSEOF analysis showed that five cyclostationary modes together explained 53% of precipitation variability. Seasonal decomposition demonstrated that the Pacific Ocean's influence varies, being strongly linked to summer/winter events (CSEOF1), peaking sharply in November (CSEOF3). Moreover, significant regional differences appear between the state's interior and coastal zones, as shown both in annual averages (EOF2) and in autumn/winter activity (CSEOF2), which is associated with the SOI. The lowest-variance modes (CSEOF4 and CSEOF5) further describe summer-specific dynamics and phase changes, occurring from June to October.

Keywords: climatology; cyclostationary EOFs; CHIRPS; ENSO; Santa Catarina; EOF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do estudo.....	22
Figura 2 – Relevo de Santa Catarina obtido através do modelo de elevação digital SRTM com resolução de 30 metros com a posição das estações meteorológicas utilizadas no estudo. Também as mesorregiões geográficas delimitadas.....	23
Figura 3 – Densidade de pontos de grade do CHIRPS utilizados no estudo.	24
Figura 4 – As quatro regiões do fenômeno El Niño.....	27
Figura 5 – Gráficos de dispersão entre a precipitação mensal observada (INMET) e estimada (CHIRPS) para estações representativas das diferentes regiões de Santa Catarina.	42
Figura 6 – Climatologia anual da precipitação no estado de Santa Catarina a partir dos dados do CHIRPS (1981-2024).....	45
Figura 7 – Climatologia anual da precipitação no estado de Santa Catarina extraída do Atlas Climatológico do Estado de Santa Catarina de Pandolfo et. al, 2002.	46
Figura 8 – Climatologia da precipitação no estado de Santa Catarina para os trimestres de DJF, MAM, JJA e SON a partir dos dados do CHIRPS (1981-2024).	48
Figura 9 – Climatologia da precipitação no estado de Santa Catarina para os 12 meses do ciclo anual, a partir dos dados do CHIRPS (1981-2024).	50
Figura 10 – Climatologia da precipitação no estado de Santa Catarina para os 12 meses do ciclo anual, extraída do Atlas Climatológico do Estado de Santa Catarina de Pandolfo et. al, (2002).....	51
Figura 11 – Modo 1 da EOF Anual: 79,6% da variância explicada - Mapa de correlação entre o autovetor e a componentes principal PC1.....	54
Figura 12 – PC1 da EOF anual (79,6%% de variância explicada) e índice climático NINO 1+2 para o trimestre AMJ (Abril-Maio-Junho).....	54
Figura 13 – Modo 2 da EOF Anual com 6,7% da variância explicada - Mapa de correlação entre o autovetor e a componentes principal PC2.	56
Figura 14 – PC2 da EOF anual (6,7% de variância explicada)	56
Figura 15 – Mapa de correlação PC1 x precipitação CHIRPS, com variância explicada de 14,4% para a CSEOF.....	59
Figura 16 – CSEOF PC1 (14,4% de variância explicada) e índice climático NINO 1+2 JFM (Janeiro-Fevereiro-Março).....	60
Figura 17 – Mapa de correlação PC2 x precipitação CHIRPS, com variância explicada de 11,6% para a CSEOF.....	62
Figura 18 – CSEOF PC2 (11,6% de variância explicada) e índice climático SOI.....	63
Figura 19 – Mapa de correlação PC3 x precipitação CHIRPS, com variância de 11,1%	64

Figura 20 – CSEOF PC3 (11,1%)e índice climático NINO 3 JAS (Julho-Agosto-Setembro).....	65
Figura 21 – Mapa de correlação PC4 x precipitação CHIRPS, com variância explicada de 8,3% para a CSEOF.....	66
Figura 22 – CSEOF PC4 (8,3% de variância explicada).....	67
Figura 23 – Mapa de correlação PC5 x precipitação CHIRPS, com variância explicada de 7,6% para a CSEOF.....	68
Figura 24 – CSEOF PC5 (7,6% de variância explicada).....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das informações das estações meteorológicas automáticas utilizadas no estudo.....	25
Tabela 2 - Classificação do MAE e do RMSE.....	29
Tabela 3 – Classificação do grau do grau de associação de R segundo diferentes autores.....	30
Tabela 4 - Métricas estatísticas mensais de desempenho do produto CHIRPS para o estado de Santa Catarina usando a Tabela 2 a Tabela 3 como critérios de referência.....	37
Tabela 5 – Métricas estatísticas da validação do CHIRPS por estação meteorológica. Destaque em laranja para as estações com registro de maior BIAS.....	39
Tabela 6 – Comparativo de Altitude, % de dados válidos, % de meses significativos, métricas de erros das estações com altitude superior a 900 metros.....	41
Tabela 7 - Correlação entre as Componentes Principais da EOF e CSEOF com os índices climáticos analisados	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAO	Oscilação Antártica (Antartic Oscillation)
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation
CM	Circulação Marítima
CSEOF	Função Ortogonal Empírica Cicloestacionária
CSEOFs	Funções Ortogonais Empíricas Cicloestacionárias
EN	El-Niño
ENOS	El Niño–Oscilação Sul
EOF	Função Ortogonal Empírica
EOFs	Funções Ortogonais Empíricas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LA	La-Niña
LI	Linha de Instabilidade
NINO 1+2	Índice de TSM para a região do Pacífico Equatorial Leste (0-10°S, 90°W-80°W)
NINO 3	Índice de TSM para a região do Pacífico Equatorial Central (5°N-5°S, 150°W-90°W)
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
OMJ	Oscilação Madden-Julian
PCs	Componentes Principais
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SF	Sistemas Frontais
SOI	Southern Oscillation Index (Índice de Oscilação Sul)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission (Missão Topográfica de Radar do Ônibus Espacial)
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	VALIDAÇÃO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO PROVENIENTES DE SATÉLITE - CHIRPS	17
2.2	CLIMATOLOGIA DA PRECIPITAÇÃO EM SANTA CATARINA	18
2.3	FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS APLICADAS NA ANÁLISE DE VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO	19
3	METODOLOGIA	21
3.1	DADOS	22
3.1.1	Índices Climáticos	26
3.2	VALIDAÇÃO	27
3.2.1	BIAS	28
3.2.2	Erro Absoluto Médio (MAE)	28
3.2.3	Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)	28
3.2.4	Correlação de Pearson (R)	29
3.3	CLIMATOLOGIA MENSAL E TRIMESTRAL	31
3.4	ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL	31
3.4.1	Pré-processamento: Anomalias e Normalização	31
3.4.2	Funções Ortogonais Empíricas (EOF)	32
3.4.3	Funções Ortogonais Empíricas Cicloestacionárias (CSEOF)	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	VALIDAÇÃO E AJUSTE DE VIÉS	35
4.1.1	Métricas Estatísticas Mensais	35
4.1.2	Métricas Estatísticas por Estação	38
4.2	CLIMATOLOGIA DA PRECIPITAÇÃO EM SANTA CATARINA	43
4.2.1	Climatologia Anual	43
4.2.2	Climatologia Trimestral	46
4.2.3	Climatologia Mensal	48
4.3	ANÁLISE DA EOF ANUAL	51
4.3.1	Modos de Variabilidade da EOF	52
4.3.2	Primeiro Modo de Variabilidade EOF1	52
4.3.3	Segundo Modo de Variabilidade EOF02	55

4.4	ANÁLISE DA EOF CICLOESTACIONÁRIA	57
4.4.1	Primeiro Modo de Variabilidade -CSEOF1	57
4.4.2	Segundo Modo de Variabilidade - CSEOF2.....	60
4.4.3	Terceiro modo de Variabilidade - CSEOF3.....	63
4.4.4	Quarto Modo de Variabilidade – CSEOF4	65
4.4.5	Quinto Modo de Variabilidade – CSEOF5	67
5	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	APÊNDICE A Correlações com Índices Climáticos.....	78

1 INTRODUÇÃO

A análise da variabilidade climática e dos fenômenos associados representa uma ferramenta fundamental no campo da meteorologia e das geociências, proporcionando a compreensão dos processos naturais em determinado local. Ademais, no contexto de alterações do clima, essa análise contribui para o entendimento das forçantes externas, bem como da frequência e intensidade desses eventos.

Embora a classificação climática tradicional utilize a interação entre temperatura e a precipitação para definir os tipos climáticos de uma região (Alvares *et al.*, 2013), o presente estudo foca exclusivamente na precipitação devido à sua elevada variabilidade espaço-temporal. A chuva é considerada uma variável climatológica fundamental para a determinação das condições ambientais e socioeconômicas em escala local, exercendo influência direta na agricultura, na geração de energia renovável, na modulação de estações secas e chuvosas e na conservação de ecossistemas. (Liu *et al.*, 2020).

O estado de Santa Catarina apresenta um clima caracterizado por significativa variabilidade espacial e temporal (Gotado *et al.*, 2018; Pugas *et al.*, 2024). Tal padrão climático resulta da influência conjunta de fenômenos em diferentes escalas, como os globais: El Niño/La Niña (Kane, 1997; Kayano; Andreoli; Ferreira de Souza, 2013; Zhang; Wallace; Battisti, 1997), Oscilação Madden-Julian (Reboita *et al.*, 2021); os de escala sinótica (Seluchi; Beu; Andrade, 2017) frentes frias, ciclones extratropicais e Alta Subtropical do Atlântico Sul (Cavalcanti de Albuquerque *et al.*, 2009), regionais como os sistemas convectivos de mesoescala, linhas de instabilidade e local como a circulação marítima (Lestada) (Laura; Rodrigues, 2015a) e de vale-montanha.

Algumas variáveis meteorológicas exibem padrões periódicos que dependem da escala temporal, refletindo o comportamento cíclico do tempo e do clima. Essa característica gera oscilações na média e correlações entre diferentes variáveis. Por isso, essas variáveis recebem a denominação de periodicamente correlacionadas ou cicloestacionárias (Kim; Hamlington; Na, 2015).

A decomposição de variáveis climáticas feita a partir da técnica matemática chamada Função Ortogonal Empírica (EOF) usando os autovalores e autovetores e a análise das componentes principais (PCs) resultantes, pode fornecer informações

valiosas sobre a distribuição espacial e temporal da precipitação e sua associação com o fenômeno causador. A técnica de EOF possui ampla utilização na meteorologia (Cerón *et al.*, 2020; Sapucci; Mayta; Da Silva Dias, 2025) e é empregada principalmente pela sua capacidade de reduzir e sintetizar a quantidade de informação a ser analisada, e de correlacionar os diversos modos de variação com índices climáticos para investigar possíveis preditores (Studzinski, 1995).

Primeiramente, este trabalho analisa e valida a utilização da fonte satelital de precipitação, o chamado CHIRPS -Climate Hazards Group InfraRed Precipitation, já validado para algumas regiões do Brasil (Paredes-Trejo; Barbosa; Lakshmi Kumar, 2017). Como os totais de precipitação costumam ser localizados e as estações meteorológicas podem estar até 50 km distantes entre si, é vantajoso usar dados obtidos em pontos de grade, que possuem resolução espacial de 0,05° e temporal diária, além de longas séries temporais. Isso agrega valor tanto para pesquisas climáticas quanto para aplicações socioeconômicas. O estudo abrange o período de 1981 a 2024, utilizando dados de precipitação de 33 estações meteorológicas, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia, para validar as estimativas feitas via satélite.

Após a validação do dado de precipitação por satélite é elaborada a climatologia do ciclo anual de precipitação de Santa Catarina para efeitos comparativos com estudos anteriores. Por último, é aplicada a técnica de funções ortogonais empíricas cicloestacionárias, as chamadas CSEOFs (Hamlington *et al.*, 2011), uma versão aprimorada da EOF tradicional para a avaliação do ciclo anual de precipitação e sua potencial relação com o fenômeno ENOS.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem como finalidade validar a utilização dos dados de precipitação obtidos por satélite da fonte CHIRPS (Da Motta Paca *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2020; Uliana *et al.*, 2024) para a região de Santa Catarina. Em seguida, será aplicada a técnica estatística CSEOF (Kim; Wu, 2000) visando analisar a variabilidade

do ciclo anual em Santa Catarina, bem como identificar os principais fenômenos relacionados.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

(i) Avaliar o desempenho das estimativas de precipitação do produto CHIRPS para Santa Catarina, utilizando como referência os dados observados da rede de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);

(ii) Caracterizar a climatologia do ciclo anual de precipitação em Santa Catarina, identificando os padrões sazonais e mensais em diferentes regiões do estado;

(iii) Analisar a variabilidade espaço-temporal do ciclo anual em Santa Catarina através da aplicabilidade de técnica estatística avançada das Funções Ortogonais Empíricas Cicloestacionárias (CSEOF) e relacionar as resultantes aos principais fenômenos causadores da variabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VALIDAÇÃO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO PROVENIENTES DE SATÉLITE - CHIRPS

A utilização de produtos de precipitação por satélite tem se tornado uma alternativa fundamental para suprir a carência de dados observados in situ, especialmente em regiões com baixa densidade de estações meteorológicas. Entre esses produtos, o Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) destaca-se pela sua alta resolução espacial ($0,05^\circ$) e longa série histórica (1981-atual).

O CHIRPS utiliza diversos tipos de dados para estimar a chuva: ele integra informações do CHPCLIM(Harrison *et al.*, 2022), imagens de satélite geoestacionário obtidas no canal infravermelho das fontes da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), estimativas do satélite TRMM, dados pluviométricos gerados pelo modelo Climate Forecast System v. 2 da NOAA, além de medições de estações meteorológicas reais em vários países, pertencentes à Rede Global de Observações da Organização Meteorológica Mundial (GOS).

Diversos estudos no Brasil têm validado o uso do produto em diferentes regiões. Costa et al., (2019) realizaram uma validação abrangente do CHIRPS para o território brasileiro, comparando-o com dados de estações convencionais e de automáticas. Os autores concluíram que o CHIRPS apresenta um desempenho satisfatório na representação da sazonalidade da precipitação no país, embora possa apresentar vieses em regiões de topografia complexa. No Centro-Oeste brasileiro, Oliveira-Júnior et al., (2021) confrontaram o conjunto de dados CHIRPS com estações meteorológicas, para a detecção de estação úmida e seca, evidenciando que o produto é uma ferramenta robusta para o monitoramento hidro climático, apresentando alta correlação com os dados de superfície na identificação de eventos extremos.

Em uma escala mais local, Tórnio; Kede; Silva de Souza, (2024) avaliaram o desempenho do CHIRPS para os municípios de São Gonçalo e Niterói (RJ). O estudo demonstrou que o CHIRPS foi eficaz em fornecer estimativas coerentes de precipitação, sendo capaz de caracterizar a variação espaço-temporal da

precipitação, mesmo em áreas urbanas densas, com erros estatísticos (RMSE e BIAS) dentro de faixas aceitáveis para estudos climatológicos e de gestão de riscos.

2.2 CLIMATOLOGIA DA PRECIPITAÇÃO EM SANTA CATARINA

A climatologia de Santa Catarina é marcada por uma transição entre climas temperados e subtropicais, com precipitação bem distribuída ao longo do ano, influenciada por uma topografia acidentada e pela proximidade com o Oceano Atlântico. O trabalho de referência para a caracterização climática do estado é o Atlas Climatológico do Estado de Santa Catarina, publicado pela Epagri/Ciram (Pandolfo *et al.*, 2002). Esse estudo estabelece as bases da distribuição espacial da chuva, destacando os núcleos de máxima precipitação no Oeste e no Litoral Sul, associados à dinâmica de sistemas frontais e complexos convectivos.

A complexidade orográfica do estado, com a presença da Serra Geral e do Planalto, atua como uma barreira física que modula a entrada de umidade e a formação de chuvas orográficas. Conforme destacado por Vianna; Massignan, (2018), essa heterogeneidade espacial exige redes de monitoramento densas para capturar gradientes de precipitação que variam significativamente em curtas distâncias, especialmente entre a planície costeira e as regiões de maior altitude.

Recentemente, Oliveira e Quadro, (2024a) avançaram na regionalização da precipitação e temperatura para Santa Catarina, utilizando dados de estações meteorológicas. Os autores identificaram padrões de variabilidade que reforçam a necessidade de estudos que considerem a escala local para o planejamento agrícola e de defesa civil, evidenciando que a variabilidade interanual é fortemente influenciada por modos de variabilidade climática de larga escala.

Complementando essa análise, Pugas *et al.*, (2024) investigaram a variabilidade temporal da precipitação em Santa Catarina, utilizando séries históricas para identificar tendências em eventos extremos. O estudo revelou que, embora a precipitação total apresente certa estabilidade em algumas regiões, há uma tendência de aumento na intensidade dos eventos diários extremos (acima do percentil de 95) em áreas do Litoral e do Planalto. Segundo os autores, essa mudança nos padrões de intensidade, muitas vezes dissociada de um aumento no volume anual total, impõe

novos desafios para o gerenciamento de riscos de desastres naturais, como inundações e deslizamentos, que são recorrentes no território catarinense.

Além disso, a interação entre sistemas de mesoescala e a circulação de grande escala, como o ENOS, promove ora períodos de excesso hídrico ora de estiagens prolongadas. A análise de Pugas et al., (2024) reforça que a variabilidade espacial das anomalias de precipitação em Santa Catarina é altamente dependente da geomorfologia local, onde a proximidade com o oceano e a altitude das serras potencializam a instabilidade atmosférica, resultando em padrões de chuva que divergem significativamente entre o interior e a faixa leste do estado.

2.3 FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS APLICADAS NA ANÁLISE DE VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO

O uso de Funções Ortogonais Empíricas (EOF, do inglês Empirical Orthogonal Function) para análise de dados em meteorologia e na oceanografia se iniciou na década de 1950, com a publicação de (Lorenz, 1956), quando introduziu a análise de autovetores para compreender a dinâmica de campos atmosféricos variáveis no tempo e no espaço. Tal técnica permitiu a representação, de forma compacta, da variabilidade contida em grandes conjuntos de dados, utilizando modos ortogonais de variação espacial e suas séries temporais associadas. Assim, não se torna necessário analisar cada ponto de dado individualmente, pois a variabilidade do conjunto estará descrita por meio dos autovalores e dos autovetores.

A análise por EOF passou a ser amplamente utilizada a partir da década de 1980. Em meteorologia, EOF têm sido aplicada na análise de variáveis como precipitação, temperatura, temperatura da superfície do mar (TSM), dentre outras (Cerón *et al.*, 2024; Diaz; Studzinski; Mechoso, 1998; Hannachi, 2004; Richman, 1986). Seu uso permite extrair informações complexas, através da decomposição em modos de variabilidade, representados por um pequeno conjunto de padrões ortogonais e suas correspondentes séries temporais. Da mesma forma que a análise de Fourier e a análise Wavelet (ondeleta), na análise EOF, também se projetam os dados climáticos originais numa base ortogonal.

Um dos resultados importantes da análise EOF, foi a descoberta de várias oscilações no sistema climático, como a Oscilação Decadal do Pacífico e a Oscilação do Ártico (Barnett *et al.*, 1999; Zhang; Wallace; Battisti, 1997).

Estudos utilizando EOF e CSEOF, têm demonstrado uma boa relação entre os primeiros modos de variabilidade da precipitação e a TSM, sobretudo, na análise da correlação com eventos de El-Niño (EN) e La Niña(LN), como encontrado por (Cerón *et al.*, 2020; Cheon *et al.*, 2021; Kayano *et al.*, 2022).

A CSEOF se diferencia da EOF tradicional por permitir considerar padrões que se repetem de forma cíclica no tempo (Kim; North; Huang, 1996), o que é especialmente útil na análise de variáveis que variam sazonalmente, como a precipitação. Segundo (Kim; Wu, 2000), a técnica de CSEOF é a mais apropriada para estudar variabilidades que são moduladas por um ciclo periódico, como o ciclo anual.

A maioria dos trabalhos encontrados sobre a climatologia da precipitação em Santa Catarina, estudam suas características a partir de dados não dispersos, como em Pugas *et al.*, (2024).

Além do Atlas Climatológico do Estado de Santa Catarina (Pandolfo *et al.*, 2002), a literatura disponível até o presente momento, conta com trabalhos que utilizam dados de precipitação de estações meteorológicas (Gonçalves, 2017; Laura; Rodrigues, 2015a; Oliveira; Quadro, 2024) e indicadores estatísticos descritivos. A aplicação de técnicas como a CSEOF com dados igualmente espaçados, em uma malha fina, com enfoque em Santa Catarina, é inédita na literatura.

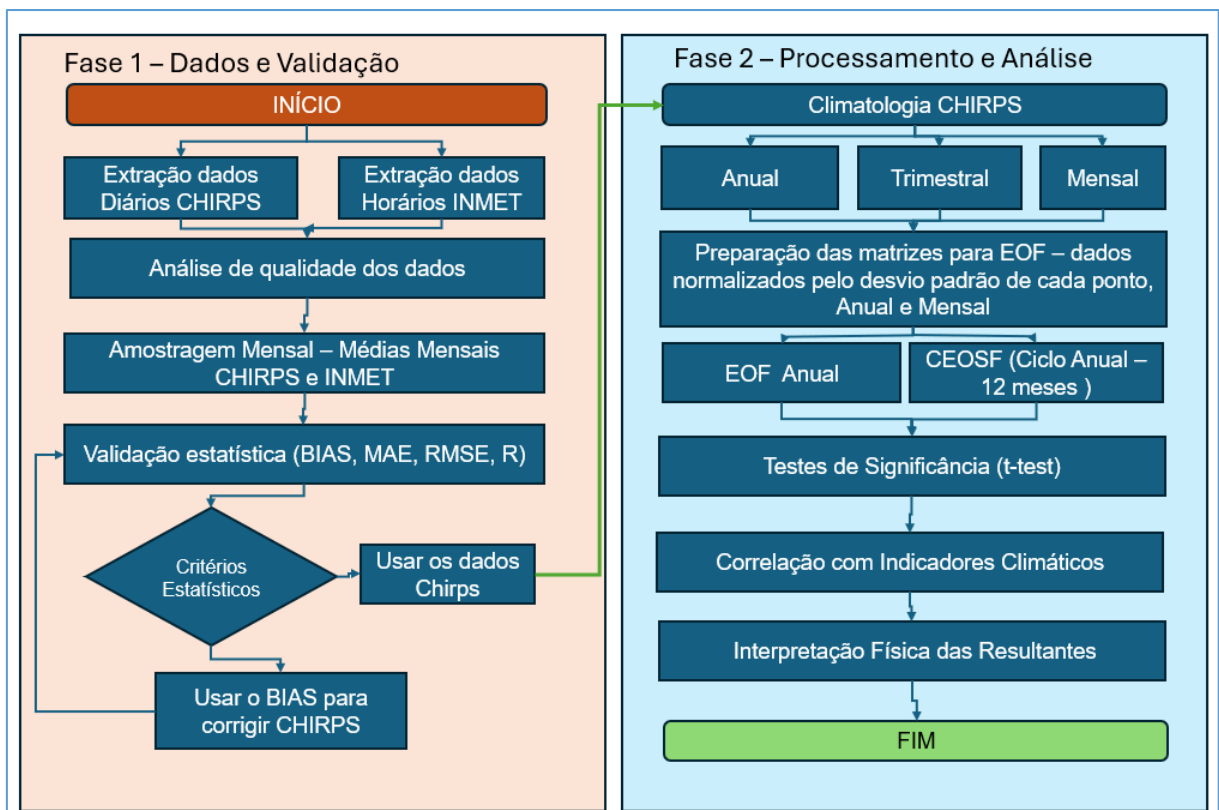
3 METODOLOGIA

O fluxograma a seguir detalha o procedimento adotado neste estudo, estruturado em duas fases distintas. Na primeira fase, realiza-se a coleta de dados, análise da qualidade, exclusão de informações inválidas e validação estatística. Após isto, é calculado os totais mensais de precipitação para cada ponto para uso nas métricas estatísticas de aceitação ou rejeição dos dados CHIRPS. Tais métricas são: o viés (*BIAS*), o erro absoluto médio (MAE, do inglês *Mean Absolute Error*), a raiz do erro médio quadrático (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*) e o coeficiente de Correlação (R). Caso o dado CHIRPS seja rejeitado pelas métricas estatísticas, procede-se com as seguintes alternativas: a) eliminação da estação por critérios de período de dados, percentual de dados válidos e complexidade do terreno; b) aplicação do BIAS, para correção do dado no ponto de grade e retorna-se à validação estatística. Todas essas etapas estão compreendidas na primeira fase do processo (Fase 1, na figura).

Uma vez aceitos os dados de satélite, inicia-se a Fase 2, que corresponde, primeiramente, ao processamento das climatologias, tendo como objetivo inicial a validação dos resultados obtidos em comparação com trabalhos prévios, notadamente o Atlas de Santa Catarina, considerando a climatologia anual e mensal da precipitação (Pandolfo *et al.*, 2002). As matrizes climatológicas resultantes são utilizadas para compor a matriz de desvios para a análise EOF, por meio da obtenção de uma matriz de anomalias (diferença entre o dado e a média) normalizadas pelo desvio padrão, em cada ponto de grade, ou seja, $[(\text{dado} - \text{média})/\text{desvio padrão}]$. Como exemplo, a matriz de desvios anuais apresenta a anomalia de precipitação expressa em múltiplos do desvio padrão anual, para cada ponto considerado. Esse procedimento permite equalizar a representatividade dos desvios de precipitação, evitando que locais com precipitação mais volumosa exerçam influência maior do que os de menor intensidade. Uma vez construída a matriz normalizada pelo desvio padrão de 44 anos de dados, a matriz fica com 44 linhas versus N colunas (número de pontos do CHIRPS). A seguir é calculada a matriz de covariância e o processamento da EOF é elaborado. Como resultantes tem-se os autovalores (que representam a variância explicada), os autovetores (padrões espaciais); e, as componentes principais (série

temporal) para cada espaço de tempo usado (anual, mensal, sazonal). Um teste de significância é aplicado às correlações, no caso de 95% ($\alpha = 0,05$) de significância. Os padrões espaciais e temporais significantes são analisados com a correlação entre eles e os indicadores climáticos globais¹. Passar-se-á então ao último passo que é a interpretação física das correlações obtidas.

Figura 1 – Fluxograma do estudo.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.1 DADOS

Os dados do CHIRPS (Costa *et al.*, 2019) utilizados se estendem de 01 de janeiro de 1981 a 31 de dezembro de 2024, totalizando 44 anos completos e possuem resolução espacial de 0,05° (aproximadamente 5X5 km) e resolução temporal diária.

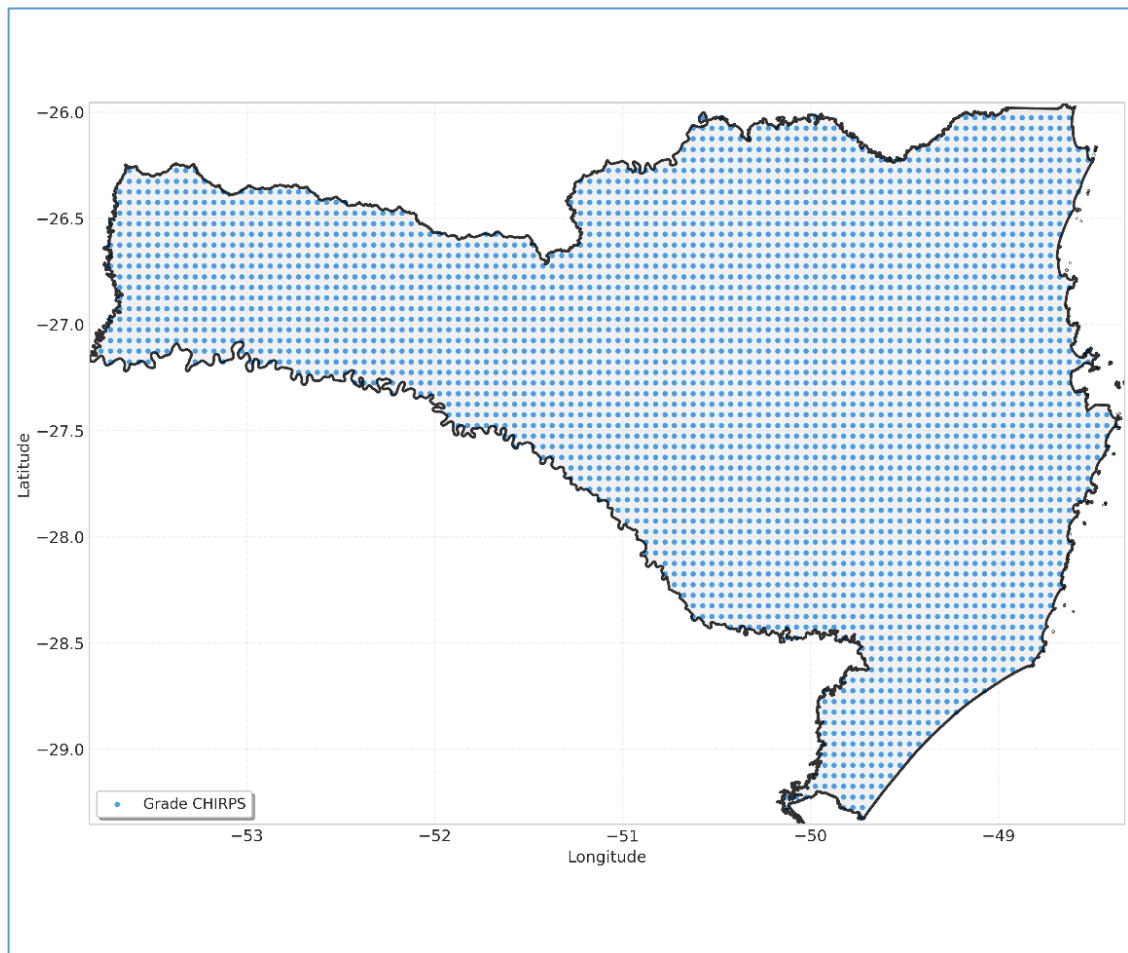
¹ <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>

A Figura 2 apresenta o relevo de Santa Catarina obtido através do modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 30 metros, as estações meteorológicas utilizadas, marcadas com x, e, as regiões geográficas, aqui delimitadas de forma análoga ao proposto pelo Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia (EPAGRI/CIRAM).

A orografia do estado é marcada por baixas altitudes nas regiões litorâneas, com uma elevação abrupta em direção ao centro e oeste do estado. As maiores cotas de elevação ocorrem na região do Planalto Sul, superando os 1.700 metros pontualmente, enquanto nas regiões Planalto Norte, Meio-Oeste, Oeste e Extremo-Oeste, predominam cotas entre 600 e 1.000 metros de altitude.

A Figura 3 a seguir, ilustra a densidade dos marcadores da grade CHIRPS utilizada no estudo. Os dados se distribuem de forma regular com resolução espacial de $0,05^\circ$, totalizando 3.479 pontos.

Figura 3 – Densidade de pontos de grade do CHIRPS utilizados no estudo.



Fonte: elaborado pelo autor, dados CHIRPS.

As principais informações das estações INMET são mostrados na Tabela 1. O percentual de dados válidos na maioria das estações é superior a 75%, com exceção da estação A864 (Major Vieira). Além disso, 29 das 33 estações possuem período de dados superior a 10 anos.

Tabela 1 - Resumo das informações das estações meteorológicas automáticas utilizadas no estudo

ID da estação	Localidade	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Data Inicial de Medição	Período (anos)	% Dados válidos
A806	Florianópolis	-27,60250	-48,62000	4,87	17/03/2003	21,79	92,30
A814	Urussanga	-28,53250	-49,31528	40,56	29/05/2008	16,59	89,93
A815	São Joaquim	-28,27556	-49,93472	1.400,06	12/04/2008	16,72	96,10
A816	Novo Horizonte	-26,40639	-52,85028	943,57	31/10/2008	16,17	81,11
A817	Indaial	-26,91361	-49,26806	72,24	02/07/2006	18,50	88,11
A828	Erechim	-27,65778	-52,30583	777,08	27/11/2006	18,09	85,93
A829	São José dos Ausentes	-28,74861	-50,05778	1228,59	26/10/2006	18,18	90,48
A841	Joaçaba	-27,16917	-51,55889	767,63	16/10/2007	17,21	93,20
A844	Lagoa Vermelha	-28,22238	-51,51285	833,83	02/03/2007	17,83	95,99
A845	Bom Jardim da Serra	-28,12694	-49,47972	1790,38	18/06/2007	17,54	79,77
A848	Dionísio Cerqueira	-26,28656	-53,63311	807,54	31/05/2008	16,59	87,40
A851	Itapoá	-26,08139	-48,64167	6,18	14/06/2007	17,55	80,98
A854	Frederico Westphalen	-27,39556	-53,42944	489,42	14/12/2007	17,05	96,49
A857	São Miguel do Oeste	-26,78639	-53,51417	647,00	13/03/2008	16,80	76,82
A858	Xanxerê	-26,93861	-52,39806	878,74	16/03/2008	16,79	92,33
A859	Caçador	-26,81917	-50,98556	944,26	19/03/2008	16,79	86,20
A860	Curitibanos	-27,28861	-50,60417	978,10	29/02/2008	16,84	92,34
A861	Rio do Campo	-26,93750	-50,14556	591,67	11/03/2008	16,81	80,23
A862	Rio Negrinho	-26,24861	-49,57417	856,00	24/03/2008	16,77	91,14
A863	Ituporanga	-27,41833	-49,64694	479,79	05/03/2008	16,82	91,18
A864	Major Vieira	-26,39361	-50,36333	799,58	10/02/2009	15,89	68,50
A865	Lages	-27,80222	-50,33556	952,70	10/11/2014	10,14	80,63
A866	Laguna	-28,60444	-48,81333	34,36	02/06/2008	16,58	83,75
A867	Araranguá	-28,93135	-49,49792	2,00	29/09/2008	16,25	93,34
A868	Itajaí	-26,95083	-48,76194	9,76	25/06/2010	14,52	89,34
A870	Rancho	-27,67861	-49,04194	881,00	03/06/2016	8,58	86,25

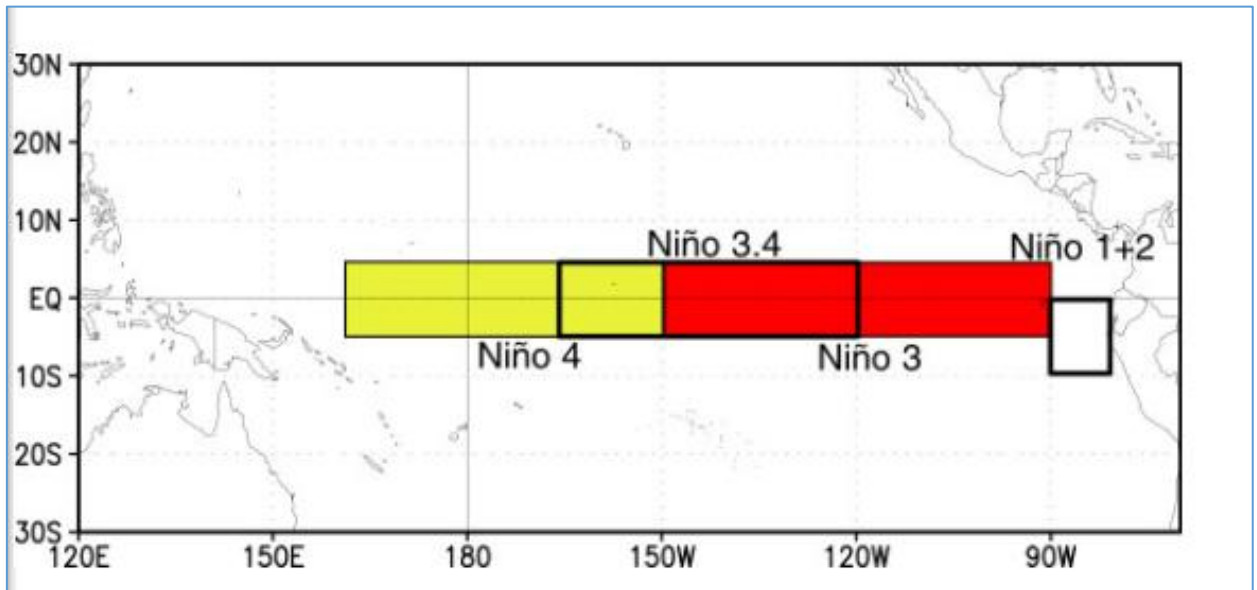
ID da estação	Localidade	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Data Inicial de Medição	Período (anos)	% Dados válidos
	Queimado						
A874	São Mateus do Sul	-25,83556	-50,36889	780,21	18/04/2011	13,71	84,50
A875	General Carneiro	-26,39861	-51,35361	1009,01	30/04/2008	16,67	86,54
A876	Clevelândia	-26,41722	-52,34861	966,06	16/05/2008	16,63	80,81
A880	Vacaria	-28,51361	-50,88278	969,89	26/04/2008	16,68	95,44
A895	Chapecó	-27,08531	-52,63571	679,00	19/02/2019	5,86	95,35
A897	Cambará do Sul	-29,04917	-50,14972	1017,00	25/11/2016	8,10	95,70
A898	Campos Novos	-27,38861	-51,21583	963,00	15/02/2019	5,88	95,86

Fonte: elaborado pelo autor, dados: INMET

3.1.1 ÍNDICES CLIMÁTICOS

Para investigar a conexão meteorológica entre os modos de variabilidade da precipitação e os padrões climáticos de grande escala, foram utilizados dados de índices climáticos disponibilizados pelo Laboratório de Ciências Físicas (PSL) da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA). Especificamente, foram empregados: a) os índices mensais de anomalia de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nas regiões do El Niño no Pacífico tropical; b) o Índice de Oscilação Sul (SOI); e, c) a Oscilação Decadal do Pacífico (PDO). Esses índices foram correlacionados com os modos de EOF de forma a identificar forçantes climáticas de grande escala associadas aos principais modos de variabilidade da precipitação.

Figura 4 – As quatro regiões do fenômeno El Niño.



Fonte: extraído de NOAA/Climate Prediction Center³

3.2 VALIDAÇÃO

Para assegurar a confiabilidade das estimativas de precipitação do CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) para Santa Catarina, foi realizado procedimento de validação estatística, a exemplo de estudos anteriores citados, comparando os dados da fonte satélite com dados de referência, que são os registros de precipitação das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Vale notar que o comparativo é elaborado com totais mensais das duas fontes.

Um dos principais aspectos dessa abordagem é que, embora a precipitação seja descontínua por natureza, ela pode ser considerada uma variável contínua. Isso ocorre porque qualquer quantidade específica, em um dado momento com frequência de ocorrência suficiente, pode representar um registro contínuo do fenômeno (Yuan *et al.*, 2019). Neste estudo, a validação realizada com totais mensais é fundamental para garantir esse tratamento como variável contínua.

Os dados CHIRPS foram comparados com a precipitação registrada das estações do INMET, seguindo uma metodologia estatística similar à empregada por Tórnio; Kede; Silva de Souza, (2024)

³ https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/nino_regions.shtml

Para a avaliação, foram utilizadas as seguintes métricas estatísticas:

3.2.1 BIAS

O BIAS que representa a média do erro sistemático, indicando tendências de superestimativa ou subestimativa, definido como a média das diferenças entre a precipitação observada e a estimada:

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{obs,i} - P_{est,i}) \quad (1)$$

Onde P_{obs} representa a precipitação observada (INMET), P_{est} a precipitação estimada pelo CHIRPS e n o número de observações consideradas.

Santos et al., (2017) ao analisar diferentes produtos de estimativas de chuva, considerou que valores de BIAS entre 0 e 25 mm (positivos ou negativos) são considerados baixos (“Excelente”), enquanto valores acima de 25 mm já se tornam mais expressivos na escala mensal (Não Aceito).

3.2.2 ERRO ABSOLUTO MÉDIO (MAE)

O MAE é utilizado para quantificar a magnitude média dos desvios absolutos, independente da direção do erro, e é definido por:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_{obs,i} - P_{est,i}| \quad (2)$$

3.2.3 RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (RMSE)

O RMSE é usado para quantificar a magnitude dos erros atribuindo maior peso a erros mais elevados, isto é, o RMSE é mais sensível a outliers do que o MAE, sendo expressa por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{obs,i} - P_{est,i})^2} \quad (3)$$

Tórnio et al. (2024) validaram o CHIRPS para o Rio de Janeiro e encontraram que um RMSE próximo a 30 mm como variando de “satisfatório” a “eficaz” e um MAE < 30 mm como “bom desempenho”. Em resumo, quanto ao MAE e ao RMSE, Oliveira-Junior et al. (2021) e Tórnio et al. (2024) tem os seguintes critérios de aceitabilidade:

Tabela 2 - Classificação do MAE e do RMSE.

MAE	RMSE	Classificação
<20 mm	< 25 mm	Excelente
< 30 mm	<35 mm	Bom
<40 mm	< 45 mm	Aceitável
≥ 40 mm	≥ 45 mm	Ruim

Fonte: elaborado pelo autor com base nos limiares propostos por Oliveira-Junior et al. (2021) e Tórnio et al. (2024).

3.2.4 CORRELAÇÃO DE PEARSON (R)

Como os dados analisados são totais mensais cuja distribuição de frequência dos mesmos é normal, o coeficiente de correlação de Pearson é satisfatório para avaliar a força e a direção da relação linear (Schober; Schwarte, 2018) entre as séries de precipitação observada e estimada.

De acordo com Dancey e Reidy, (2006), quanto mais próximo de 1, mais forte será a associação. É expressa por:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{est,i} - \overline{P_{est}})^2 * (P_{obs,i} - \overline{P_{obs}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{est,i} - \overline{P_{est}})^2 * \sum_{i=1}^n (P_{obs,i} - \overline{P_{obs}})^2}} \quad (4)$$

Dancey; Reidy, (2006) classificou os graus positivos de correlação de Pearson da seguinte forma: entre 0,1 e 0,3 tem-se uma associação fraca, entre 0,4 e 0,6, moderada e entre 0,7 e 1 a associação é considerada forte.

Hopkins, (2009) apud Oliveira-Junior et al., (2021) classificou os graus de correlação de forma um pouco distinta. Para ele, entre 0 e 0,1 a associação é

baixíssima; entre 0,1 e 0,3 é baixa; entre 0,3 e 0,5 moderada; entre 0,5 e 0,7 é alta; entre 0,7 e 0,9 é altíssima; e, entre 0,9 e 1 é considerada quase perfeita. Silva et al., (2020) considera que valores de correlação acima de 0,47 já são significativos e relativamente bem correlacionados.

Tabela 3 – Classificação do grau do grau de associação de R segundo diferentes autores.

Grau de Associação	Dancey e Reidy (2006)	Hopkins (2009)	Silva et al. (2020)
baixíssima		0,0-0,1	
baixa/fraca	0,1-0,3	0,1-0,3	
moderada	0,4-0,6	0,3-0,5	
alta		0,5-0,7	>0,47
altíssima/forte	0,7-1,0	0,7-0,9	
quase perfeita		0,9-1,0	

Fonte: elaborado pelo autor com base nos limiares propostos por Dancey e Reidy (2006), Hopkins (2009) apud Oliveira-Junior et al. (2021) e Silva et al. (2020).

A significância estatística das correlações de Pearson (R) foi avaliada por meio do teste de *Student*, o chamado *t-test* (Al-Achi, 2019; Brown, 2008; Chicco; Sichenze; Jurman, 2025), adotando-se o nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). A hipótese nula (H_0) de que a correlação é nula foi testada confrontando-se o valor de t calculado com o valor crítico para $n - 2$ graus de liberdade. Correlações cujos valores- p resultaram inferiores a 0,05 foram consideradas estatisticamente significativas, garantindo que as associações entre as estimativas do CHIRPS e as observações do INMET não ocorrem ao acaso. A equação utilizada é mostrada abaixo:

$$t = \frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} \quad (6)$$

Onde R é o coeficiente de Pearson e n é o número de pares de dados de cada amostra analisada.

3.3 CLIMATOLOGIA MENSAL E TRIMESTRAL

Após o processo de validação dos dados do CHIRPS, passa-se a caracterização da climatologia de precipitação para o estado de Santa Catarina. Para isso, serão calculadas as médias climatológicas mensais e sazonais utilizando a série histórica completa (1981-2024). A análise sazonal será segmentada nos trimestres padrões, ou seja: Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF - Verão), Março-Abril-Maio (MAM - Outono), Junho-Julho-Agosto (JJA - Inverno) e Setembro-Outubro-Novembro (SON - Primavera).

A distribuição espacial da precipitação é analisada por meio da elaboração de mapas temáticos, permitindo identificar padrões regionais e gradientes pluviométricos ao longo do território catarinense. Os resultados serão comparados ao Atlas Climatológico do Estado de Santa Catarina (Pandolfo *et al.*, 2002) e a climatologia obtida por Oliveira e Quadro, (2024a).

3.4 ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL

A análise da variabilidade da precipitação em Santa Catarina é realizada em três etapas sequenciais: o pré-processamento dos dados (cálculo de anomalias e normalização pelo desvio padrão), a aplicação das Funções Ortogonais Empíricas (EOF) e a decomposição em Funções Ortogonais Empíricas Cicloestacionárias (CSEOF).

3.4.1 PRÉ-PROCESSAMENTO: ANOMALIAS E NORMALIZAÇÃO

As anomalias normalizadas necessárias para a aplicação da EOF anual e da CSEOF serão calculadas conforme explicado por Wilks, (2006). O cálculo da anomalia permite remover o ciclo médio, evidenciando as flutuações.

Para a análise de EOF anual, inicialmente serão calculados os totais anuais de precipitação a partir dos acumulados mensais. Em seguida, será removida a climatologia média anual de cada ponto de grade, definida como a média dos totais anuais no período de 1981 a 2024. A anomalia anual $A_a(s, t)$ será dada por:

$$A_a(s, t) = P_a(s, t) - \bar{P}_a(s) \quad (7)$$

Onde $P_a(s, t)$ representa o total anual no ponto s e ano t , e $\bar{P}_a(s)$ é a média climatológica anual no ponto s .

As anomalias serão ainda normalizadas pelo desvio padrão local σ_s , ou seja, o desvio padrão calculado para cada ponto de grade do CHIRPS. Este procedimento recomendado por Hannachi; Jolliffe; Stephenson, (2007a), garante que todos os pontos da grade tenham o mesmo peso estatístico na análise de autovalores, evitando que áreas de alta variância dominem artificialmente os modos de variabilidade. A anomalia normalizada $Z(s, t)$ é expressa por Hannachi, (2004).

$$Z(s, t) = \frac{A(s, t)}{\sigma_s} \quad (8)$$

Processo análogo é realizado para o cálculo das anomalias normalizadas mensais, necessárias para aplicação na CSEOF, onde são calculadas as anomalias $A_m(s, t)$ de cada mês, separadamente, e normalizadas pelo desvio padrão $\sigma_{m,s}$, do respectivo mês.

3.4.2 FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS (EOF)

A técnica de EOF (Monahan *et al.*, 2009) será aplicada para identificar os padrões espaciais dominantes. O campo de anomalias normalizadas é decomposto em uma combinação linear de funções espaciais ortogonais ($EOF_n(s)$) e coeficientes temporais variantes ($PC_n(t)$):

$$Z(s, t) = PC_n(t) \cdot EOF_n(s) \quad (9)$$

Os padrões espaciais são obtidos através da resolução do problema de autovalores da matriz de covariância dos dados. Os autovalores (λ_n) indicam a porcentagem da variância total explicada por cada modo. Embora a EOF seja eficiente para reduzir a dimensionalidade, ela assume que os padrões espaciais são fixos no

tempo, o que limita a representação de fenômenos que evoluem sazonalmente (Hannachi; Jolliffe; Stephenson, 2007; Wilks, 2006).

3.4.3 FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS CICLOESTACIONÁRIAS (CSEOF)

Para capturar a evolução temporal dos padrões espaciais dentro do ciclo anual, será utilizada a técnica de CSEOF, conforme proposto por (Kim; North; Huang, 1996). Diferente da EOF clássica, a CSEOF assume que as estatísticas do sistema são cicloestacionárias, ou seja, a função de covariância é periódica no tempo:

Aplica-se a decomposição CSEOF aos dados normalizados pela média, usando a equação 10 mostrada abaixo:

$$X(\vec{r},t) = \sum_{n=1}^N PC_n(t) \cdot BV_n(\vec{r},t) \quad (10)$$

Onde $X(\vec{r},t)$ é o campo de anomalia de precipitação; \vec{r} é o vetor posicional (latitude, longitude); t representa o tempo; $PC_n(t)$ é a componente principal do modo n ; e, $BV_n(\vec{r},t)$ representa o vetor base ciclostacionário.

A decomposição é realizada por meio da resolução de autovalores da matriz de covariância dos dados. Seja \mathbf{X} a matriz dos dados ciclostacionários, a matriz de covariância será dada por:

$$C = \frac{1}{T} \mathbf{X}\mathbf{X}^T \quad (11)$$

Resolve-se a equação de autovalores:

$$C\mathbf{e}_i = \lambda_i\mathbf{e}_i \quad (12)$$

Onde λ_i são os autovalores, representando a variância explicada por cada modo; \mathbf{e}_i são os autovetores associados, que formam os vetores base BV_n .

As componentes principais $PC_n(t)$ são obtidas por projeção dos dados sobre os vetores base:

$$PC_n(t) = \langle X(\vec{r}, t), BV_n(\vec{r}, t) \rangle \quad (13)$$

Estas manipulações serão efetuadas via modelagem computacional usando a linguagem de programação Python, tal abordagem é amplamente adotada em estudos da área, e baseia-se no código descrito por Smith, (2002).

Com as PCs prontas, procede-se a análise de cada PC individualmente, de modo a identificar os padrões da variabilidade associadas a um percentual de variância explicada.

O cálculo do coeficiente de correlação entre cada componente e a variável estudada (neste caso, precipitação), permite avaliar o quanto cada componente reflete de fato o comportamento da precipitação em cada região do domínio estudado. Correlações positivas indicam que o sinal positivo da PC está associado a maior precipitação, enquanto, correlações negativas indicam menor precipitação em relação à média. A magnitude da PC indica o quão acima ou abaixo da referência variável ela se encontra (Hannachi; Jolliffe; Stephenson, 2007; Jolliffe; Uddin, 2000; Kim; Hamlington; Na, 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia são detalhados a seguir. A análise foi organizada em três partes principais: primeiro, realizou-se a validação estatística das estimativas de precipitação fornecidas pelo CHIRPS; depois, fez-se a caracterização da climatologia anual, trimestral e mensal da precipitação no estado de Santa Catarina; por fim, examinou-se a variabilidade da precipitação na região por meio das análises EOF anual e CSEOF.

4.1 VALIDAÇÃO E AJUSTE DE VIÉS

Esta seção dedica-se à avaliação da qualidade das estimativas do produto CHIRPS para Santa Catarina. Antes da análise climatológica, é fundamental quantificar as incertezas inerentes aos dados de satélite, garantindo a confiabilidade dos modos de variabilidade a serem extraídos.

4.1.1 MÉTRICAS ESTATÍSTICAS MENSAIS

A Tabela 4 ilustra as estatísticas mês a mês das estimativas de precipitação do CHIRPS, comparadas com os dados coletados nas estações do INMET, em Santa Catarina, e as métricas adotadas dos trabalhos científicos ora usados como referência para o estudo.

Na validação mês a mês tem-se um BIAS (viés) considerado “excelente” por ser menor do que 25 mm. Na média do ano, o BIAS ficou em 0,073 mm (com máximo de 7,9 e mínimo de -9,1 mm), com um desvio padrão de 5,58 mm. O BIAS indica uma ausência de viés sistemático nos dados e aponta para uma ótima representatividade do CHIRPS.

Com relação as medidas de erros, o MAE e o RMSE, pelo menos 7 meses estão na categoria “Bom” e cinco meses na categoria “aceitável”. Já para o RMSE tem-se 5 meses em “Bom” e 7 em “Aceitável”. Os meses de Setembro e Novembro apontam para a mudança no RMSE (de “Bom” para “Aceitável”). Porém, ao subtrair o RMSE do MAE, obtém-se nos dois meses uma resultante menor que 7mm, o que

indica que os erros são relativamente consistentes, sem grandes variações ou valores extremos, indicando que o CHIRPS não apresenta comportamento errático.

O coeficiente de Pearson apresentou valores superiores a 0,8 em todos os meses do ano, refletindo uma forte associação. De acordo com a classificação de Hopkins (2009, conforme citado por Oliveira-Júnior et al., (2021), observa-se que, de junho a outubro, há uma associação considerada quase perfeita (entre 0,9 e 1,0), enquanto o período de novembro a maio é caracterizado como de associação altíssima (entre 0,7 e 0,9). Ademais, segundo Silva et al., (2020), todos os meses são classificados como significativos e bem correlacionados, uma vez que apresentam correlação acima de 0,47.

A significância das correlações, avaliada pelo *t-test* percentual em relação às estações com correlação significativa, está apresentada na coluna “% de estações significativas”. No período de junho a outubro, todas as estações alcançaram percentual máximo; entre novembro e maio, esse percentual variou de 84% a 97%. Todos os coeficientes de correlação ultrapassaram 0,8, evidenciando uma relação linear consistente entre o CHIRPS e as estações.

Tabela 4 - Métricas estatísticas mensais de desempenho do produto CHIRPS para o estado de Santa Catarina usando a Tabela 2 a Tabela 3 como critérios de referência.

Mês	BIAS (mm)	MAE (mm)	RMSE (mm)	R	% de estações Significativas	BIAS	MAE	RMSE	R
Janeiro	-5,56	33,43	38,57	0,83	84,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
Fevereiro	-9,08	32,51	37,52	0,84	88,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
Março	-5,39	31,37	36,67	0,87	91,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
Abril	2,17	27,09	32,75	0,87	97,0	Excelente	Bom	Bom	Altíssima
Mai	6,47	27,51	33,79	0,89	97,0	Excelente	Bom	Bom	Altíssima
Junho	5,58	26,23	32,40	0,90	100,0	Excelente	Bom	Bom	Q-perfeita
Julho	4,21	25,51	31,44	0,91	100,0	Excelente	Bom	Bom	Q-perfeita
Agosto	-4,35	23,04	28,88	0,91	100,0	Excelente	Bom	Bom	Q-perfeita
Setembro	-1,54	27,13	32,53	0,91	100,0	Excelente	Bom	Aceitável	Q-perfeita
Outubro	3,39	31,51	37,14	0,92	100,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
Novembro	7,92	29,20	35,07	0,83	91,0	Excelente	Bom	Aceitável	Altíssima
Dezembro	-2,95	30,69	36,37	0,86	91,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima

Fonte: elaborado pelo autor, dados: calculados a partir do CHIRPS e INMET.

4.1.2 MÉTRICAS ESTATÍSTICAS POR ESTAÇÃO

A Tabela 5 apresenta as métricas estatísticas calculadas de validação do CHIRPS para cada uma das 33 estações meteorológicas utilizadas no estudo. A tabela aponta os indicadores de qualidade da representação do CHIRPS e ao mesmo tempo, auxilia a identificar o uso ou não da estação como representativa do local.

Com respeito ao BIAS, que representa o erro sistemático do CHIRPS em relação a cada uma das estações, tem-se que somente uma (1) das 33 estações não satisfaz a condição de BIAS menor que 25 mm, no caso a estação A845 (Bom Jardim da Serra) localizada a cerca de 1.790 metros de altitude próxima à grandes encostas, e suscetível aos efeitos da orografia. Excetuando o outlier da A845 os demais pontos variaram entre 24,47 mm e -22,02 mm de BIAS, sendo que o BIAS médio, que caracteriza o erro sistemático médio, ficou em 0,20 mm, que indica que o CHIRPS não apresenta viés sistemático significativo, superestimando em alguns pontos e subestimando em outros, mas de forma equilibrada. Vale notar que 19 pontos (57,6%) tem BIAS menor que 10 mm, indicando uma excelente concordância com as observações locais.

Com respeito às métricas de erros, no MAE, dezessete (17) pontos foram considerados como “Bons” (MAE < 30 mm) e 15 como “Aceitável” (MAE < 40 mm). Mais uma vez a A845 é rejeitada no teste de MAE, sendo classificada como “Ruim” (MAE > 40 mm).

O RMSE indica dezessete pontos classificados como "Bons" (RMSE < 35 mm) e quinze como "Aceitável" (RMSE < 45 mm). Observa-se que o ponto referente à estação A845, apesar de apresentar uma diferença entre RMSE e MAE de 5,28 mm (inferior a 7 mm) e um coeficiente de correlação de 0,9, indicando que, tanto a precipitação observada quanto a estimada pelo CHIRPS, variam consistentemente ao longo do tempo, é rejeitado segundo as métricas de erro. É necessário avaliar se tal erro decorre da estimativa do CHIRPS para terrenos complexos ou da consistência dos registros da estação meteorológica. Quanto à rejeição da estimativa do CHIRPS por não representatividade em terrenos complexos, a Tabela 6 destaca a questão.

Tabela 5 – Métricas estatísticas da validação do CHIRPS por estação meteorológica. Destaque em laranja para as estações com registro de maior BIAS.

ID da estação	BIAS (mm)	MAE (mm)	RMSE (mm)	R	% Meses Significativos	BIAS	MAE	RMSE	R
A806	5,35	20,94	26,85	0,93	100,0	Excelente	Bom	Bom	Q-Perfeita
A814	7,59	22,80	28,54	0,90	100,0	Excelente	Bom	Bom	Q-Perfeita
A815	-0,88	26,93	33,02	0,86	100,0	Excelente	Bom	Bom	Altíssima
A816	10,52	32,19	37,94	0,90	100,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Q-Perfeita
A817	-1,59	30,20	36,78	0,85	100,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
A828	-7,35	29,99	36,64	0,88	100,0	Excelente	Bom	Aceitável	Altíssima
A829	-22,02	32,44	38,44	0,87	100,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
A841	6,83	28,85	35,39	0,91	100,0	Excelente	Bom	Aceitável	Q-Perfeita
A844	-8,73	29,52	35,48	0,88	100,0	Excelente	Bom	Aceitável	Altíssima
A845	38,14	43,94	49,22	0,88	64,0	Não Aceitável	Ruim	Ruim	Altíssima
A848	5,67	29,81	35,17	0,92	100,0	Excelente	Bom	Aceitável	Q-Perfeita
A851	2,06	33,55	39,49	0,86	92,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
A854	0,85	24,62	30,57	0,91	100,0	Excelente	Bom	Bom	Q-Perfeita
A857	-7,47	28,34	34,35	0,90	100,0	Excelente	Bom	Bom	Q-Perfeita
A858	-21,19	32,60	38,38	0,93	100,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Q-Perfeita
A859	3,83	26,37	31,68	0,90	100,0	Excelente	Bom	Bom	Q-Perfeita
A860	-8,40	27,30	33,03	0,87	92,0	Excelente	Bom	Bom	Altíssima
A861	1,87	30,28	35,89	0,82	92,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
A862	-2,08	26,67	32,18	0,86	92,0	Excelente	Bom	Bom	Altíssima
A863	1,97	26,30	32,83	0,84	100,0	Excelente	Bom	Bom	Altíssima
A864	-5,67	30,56	36,06	0,88	100,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima

ID da estação	BIAS (mm)	MAE (mm)	RMSE (mm)	R	% Meses Significativos	BIAS	MAE	RMSE	R
A865	-4,33	26,82	30,59	0,91	100,0	Excelente	Bom	Bom	Q-Perfeita
A866	-7,44	26,86	32,04	0,87	100,0	Excelente	Bom	Bom	Altíssima
A867	4,11	24,12	30,87	0,90	100,0	Excelente	Aceitável	Bom	Q-Perfeita
A868	2,75	30,91	36,07	0,86	100,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
A870	24,47	32,45	36,39	0,89	83,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
A874	-10,39	26,18	32,00	0,89	92,0	Excelente	Bom	Bom	Altíssima
A875	0,37	31,61	37,67	0,81	100,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
A876	-7,02	28,19	33,85	0,90	100,0	Excelente	Aceitável	Bom	Q-Perfeita
A880	-0,96	25,01	31,03	0,88	100,0	Excelente	Aceitável	Bom	Altíssima
A895	7,78	26,01	30,35	0,90	75,0	Excelente	Aceitável	Bom	Q-Perfeita
A897	-16,20	30,70	35,57	0,88	83,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
A898	13,60	27,15	32,63	0,82	67,0	Excelente	Bom	Bom	Altíssima

Fonte: elaborado pelo autor, dados: calculados a partir do CHIRPS e INMET

Nota: BIAS: Viés; MAE: Erro Absoluto Médio; RMSE: Raiz do Erro Médio Quadrático; R: Coeficiente de Correlação de Pearson; Número de Meses Significativos (%): Percentual de meses com correlação significativa ao nível de confiança de 95% ($p < 0,05$) pelo teste t-Student.

A Tabela 6 mostra todas as estações consideradas complexas, ou seja, com altitude maior do que 900 metros. Mesmo estando em regiões elevadas, São Joaquim (A815) e São José dos Ausentes (A829) apresentaram BIAS menor que 25 mm, considerado excelente. O principal fator que diferencia as estações aceitas da A845 (Bom Jardim da Serra) é o percentual de dados e meses válidos; enquanto a estação A898 (Campos Novos) possui 64,3% de registros válidos, a A845 tem apenas 51,1% no total (dados válidos multiplicado pelo número de meses válidos). O grande volume de dados inválidos registrados na A845 sugere que esta estação deve ser descartada para a validação do CHIRPS.

Tabela 6 – Comparativo de Altitude, % de dados válidos, % de meses significativos, métricas de erros das estações com altitude superior a 900 metros.

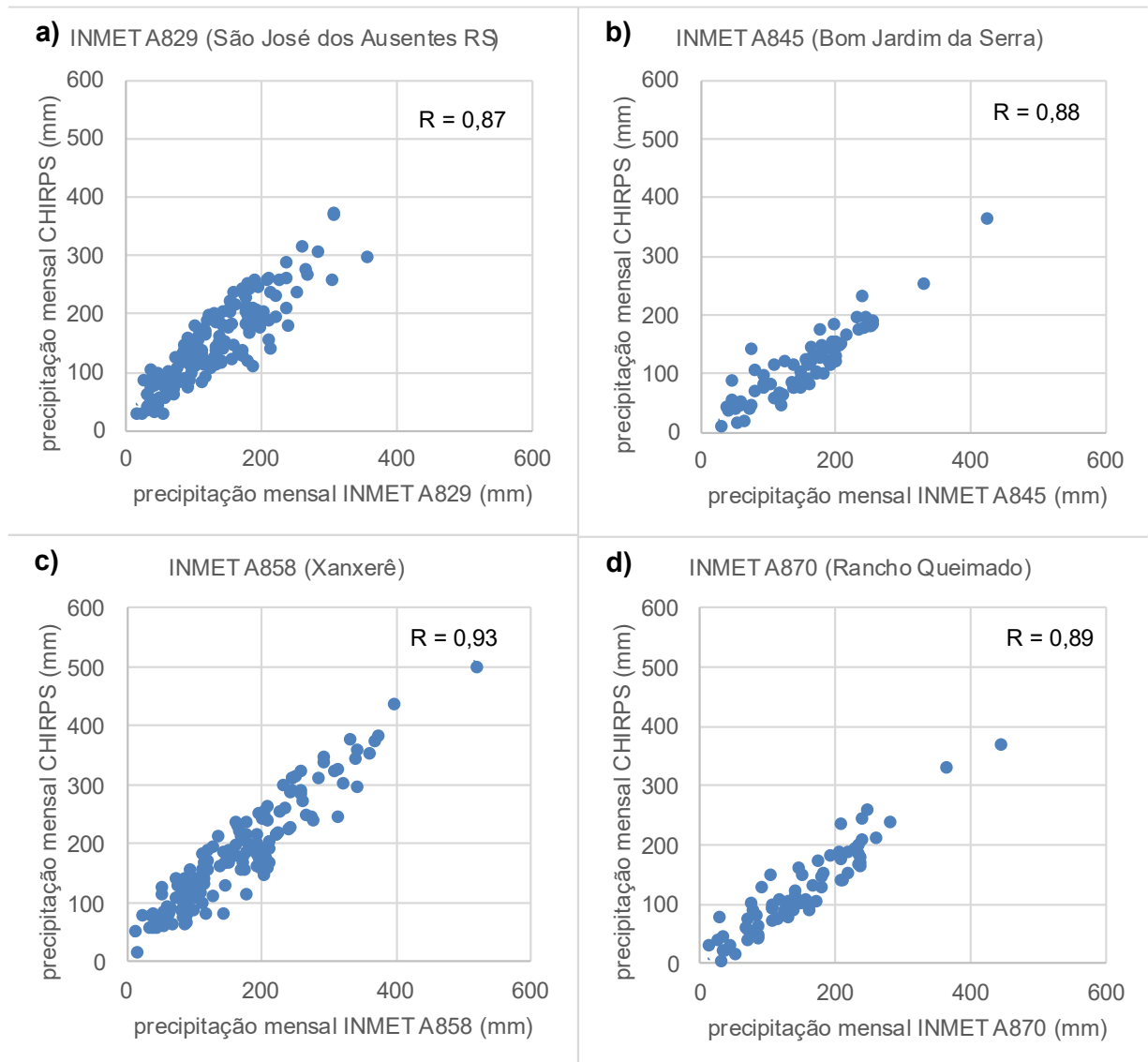
ID da Estação	Localidade	Altitude	% de dados Válidos	% de meses Significativos	BIAS	MBA	RMSE	R
A845	Bom Jardim da Serra	1.790,4	79,8	64,0	Não Aceitável	Ruim	Ruim	Altíssima
A815	São Joaquim	1.400,1	96,1	100,0	Excelente	Bom	Bom	Altíssima
A816	Novo Horizonte	943,6	81,1	100,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Q-Perfeita
A829	São José dos Ausentes	1.228,6	90,5	100,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
A859	Caçador	944,3	86,2	100,0	Excelente	Bom	Bom	Q-Perfeita
A860	Curitibanos	978,1	92,3	92,0	Excelente	Bom	Bom	Altíssima
A865	Lages	952,7	80,6	100,0	Excelente	Bom	Bom	Q-Perfeita
A875	General Carneiro	1.009,0	86,5	100,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
A880	Vacaria	969,9	95,4	100,0	Excelente	Aceitável	Bom	Altíssima
A897	Cambará do Sul	1.017,0	95,7	83,0	Excelente	Aceitável	Aceitável	Altíssima
A898	Campos Novos	963,0	95,9	67,0	Excelente	Bom	Bom	Altíssima

Fonte: elaborado pelo autor, dados: calculados a partir do CHIRPS e INMET.

Como ilustração da discussão da análise estatística, a Figura 5 destaca gráficos de dispersão para quatro estações meteorológicas que apontaram BIAS maior, embora só a A845 tenha um BIAS maior que 25 mm. a) A829 (São José dos Ausentes); b) a A845 (Bom Jardim da Serra); c) a A858 (Xanxerê); e, d) a A870 (Rancho Queimado). Como mencionado anteriormente, o coeficiente de correlação (R) indica que todas as estações e dados do CHIRPS tem uma oscilação temporal

coerente e consistente. A qualidade dos dados das estações (% total de dados válidos) é fator predominante para a aceitação ou não da estação para validação do CHIRPS. A A870 (Rancho Queimado) com um BIAS de 24,5 mm tem a menor diferença entre o RMSE e o MAE (3,94 mm) indicando que os erros são consistentes, o que é refletido na Figura 5.d) com os dados alinhados à reta de ajuste. Já a A829 (São José dos Ausentes), tem um Bias de -22,0 mm. Porém, uma diferença entre o RMSE e o MAE de 6,0 mm indicando erros mais variáveis, como indica o gráfico de dispersão (Figura 5.a).

Figura 5 – Gráficos de dispersão entre a precipitação mensal observada (INMET) e estimada (CHIRPS) para estações representativas das diferentes regiões de Santa Catarina.



Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS e INMET.

Os resultados indicam que o CHIRPS apresenta uma qualidade geral excelente (97% com BIAS excelente) para estudos com temporalidade mensal, indicando que é um produto de alta qualidade para a região estudada. Todas as métricas estatísticas avaliadas indicam que o CHIRPS não tem viés (BIAS) sistemático, isto é, com uma média de BIAS não significativa, o CHIRPS não subestima nem tampouco superestima a precipitação mensal. O baixo desvio padrão dos índices indica que o desempenho é consistente entre as estações.

A análise estatística conduzida neste estudo evidencia a existência de lacunas significativas nos registros de algumas estações meteorológicas. Ressalta-se que o uso desses dados sem a devida avaliação estatística dos erros pode comprometer a interpretação da variabilidade da precipitação.

4.2 CLIMATOLOGIA DA PRECIPITAÇÃO EM SANTA CATARINA

Nesta seção, apresenta-se a caracterização da climatologia de precipitação para o estado de Santa Catarina, fundamentada na série histórica de 44 anos (1981-2024) do produto CHIRPS. A análise contempla a distribuição espacial e a variabilidade sazonal, estabelecendo comparações com o Atlas Climatológico de Santa Catarina de Pandolfo et al., (2002) e o estudo de regionalização de Oliveira e Quadro, (2024a).

4.2.1 CLIMATOLOGIA ANUAL

A análise da precipitação média anual para o período de 1981 a 2024 (Figura 6) revela que Santa Catarina apresenta um regime pluviométrico distribuído espacialmente, com acumulados anuais variando predominantemente entre 1.400 mm e 2.500 mm. Espacialmente, se observa dois grandes núcleos de máxima pluviosidade:

- Região Extremo-Oeste, Oeste e Meio-Oeste: Apresenta acumulados anuais que, frequentemente, superam os 2.000 mm. Esse padrão está associado à frequente atuação de Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) (Velasco; Fritsch, 1987b) e à influência do Jato de Baixos Níveis, conhecidos como JBN, (Alcântara *et al.*, 2011; Rife *et*

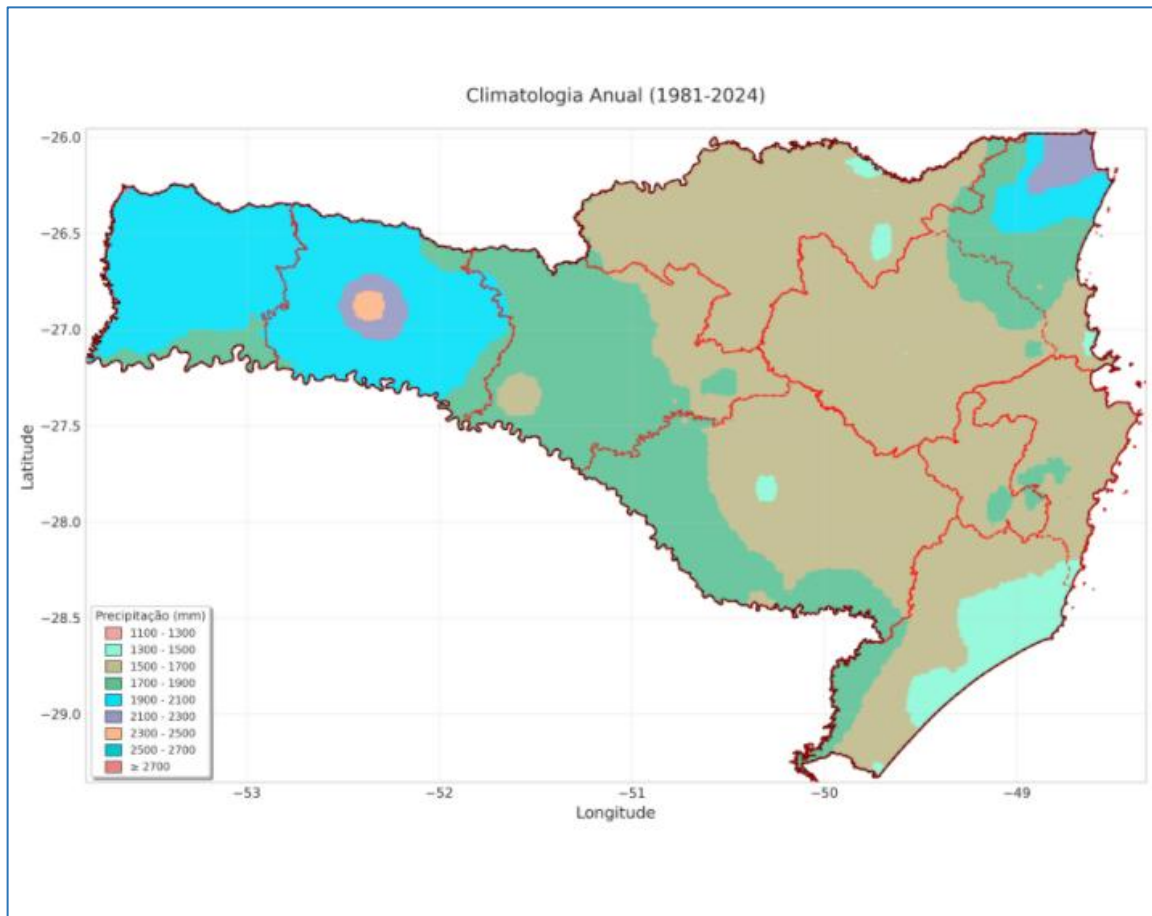
al., 2010), que transporta umidade da região amazônica para o sul do país.

- Litoral Norte: Também exhibe totais anuais elevados, impulsionados pela interação entre a circulação marítima (Lestada) e a orografia da Serra do Mar (Laura; Rodrigues, 2015a), que favorece a ascensão forçada de massas de ar úmidas e a consequente precipitação orográfica.

Por outro lado, as regiões do Planalto Sul, Planalto Norte, Litoral Sul e porções do Vale do Itajaí e Grande Florianópolis, apresentam acumulados ligeiramente inferiores, na faixa de 1.300 mm a 1.900 mm, embora ainda representem valores expressivos em comparação à média nacional.

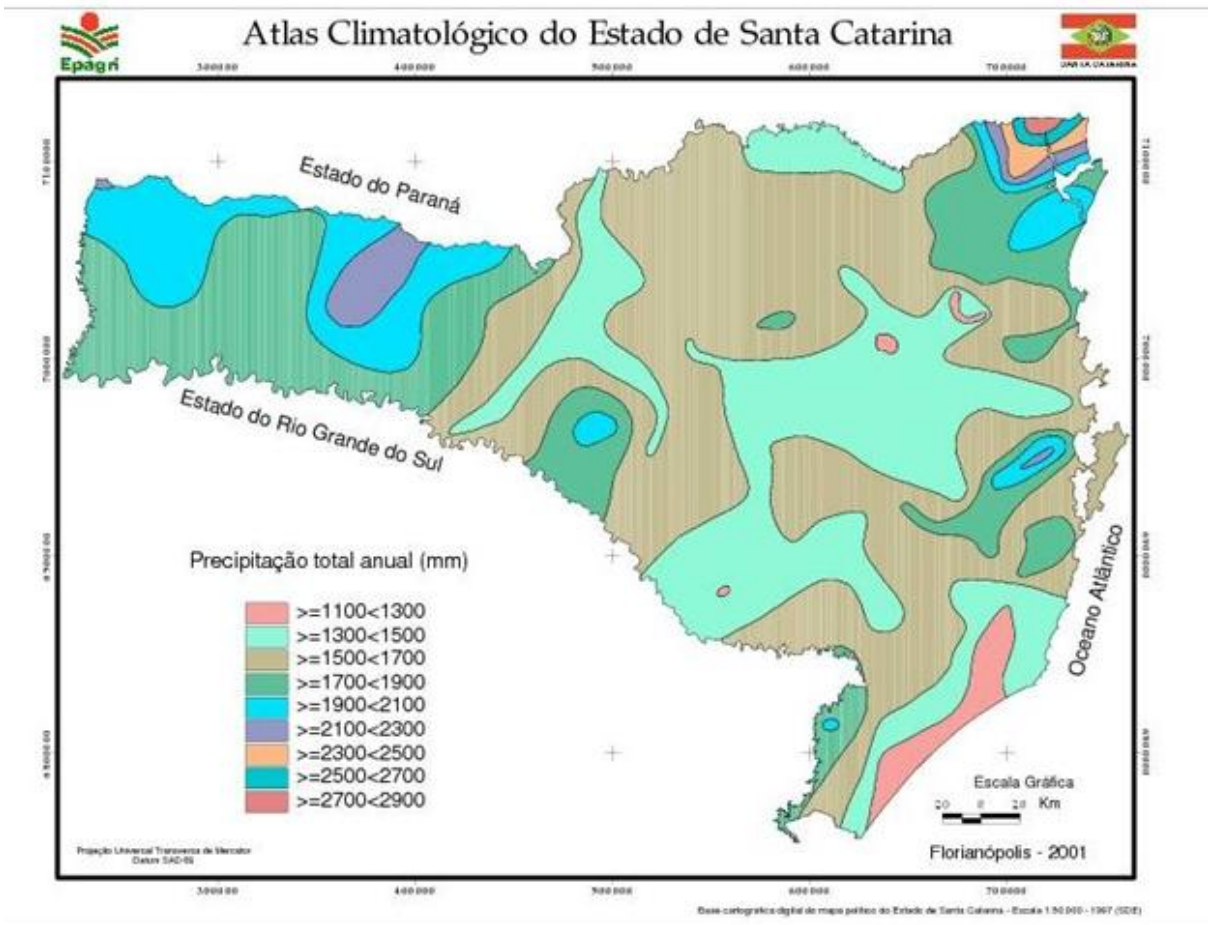
A média anual agregada para todo o território catarinense, extraída do produto CHIRPS, situa-se em 1.721 mm. Estes resultados apresentam uma convergência com o Atlas Climatológico de Santa Catarina (Pandolfo *et al.*, 2002) que aponta padrões espaciais similares, conforme visto na Figura 7. Adicionalmente, a distribuição anual identificada corrobora com a regionalização elaborada por Oliveira e Quadro, (2024a), reforçando a confiabilidade dos dados de satélite, para a representação da precipitação do estado.

Figura 6 – Climatologia anual da precipitação no estado de Santa Catarina a partir dos dados do CHIRPS (1981-2024).



Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS.

Figura 7 – Climatologia anual da precipitação no estado de Santa Catarina extraída do Atlas Climatológico do Estado de Santa Catarina de Pandolfo et. al, 2002.



Fonte: Atlas Climatológico do Estado de Santa Catarina, (Pandolfo et al., 2002).

4.2.2 CLIMATOLOGIA TRIMESTRAL

A análise dos totais pluviométricos trimestrais (Figura 8) revela a complexidade do regime de chuvas em Santa Catarina, marcado pela ausência de uma estação seca definida. No entanto, observa-se uma redução sazonal da precipitação em grande parte do estado, durante o outono e o inverno.

No verão (DJF) é onde os maiores volumes de precipitação são registrados, com acumulados superiores a 500 mm. Os máximos concentram-se no Litoral Norte e na Grande Florianópolis (Serrana e Litorânea), com médias ultrapassando 800 mm, resultado da atividade de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) e da circulação marítima (Lestada). Estes padrões coincidem com Pandolfo et al., (2002) e Oliveira e

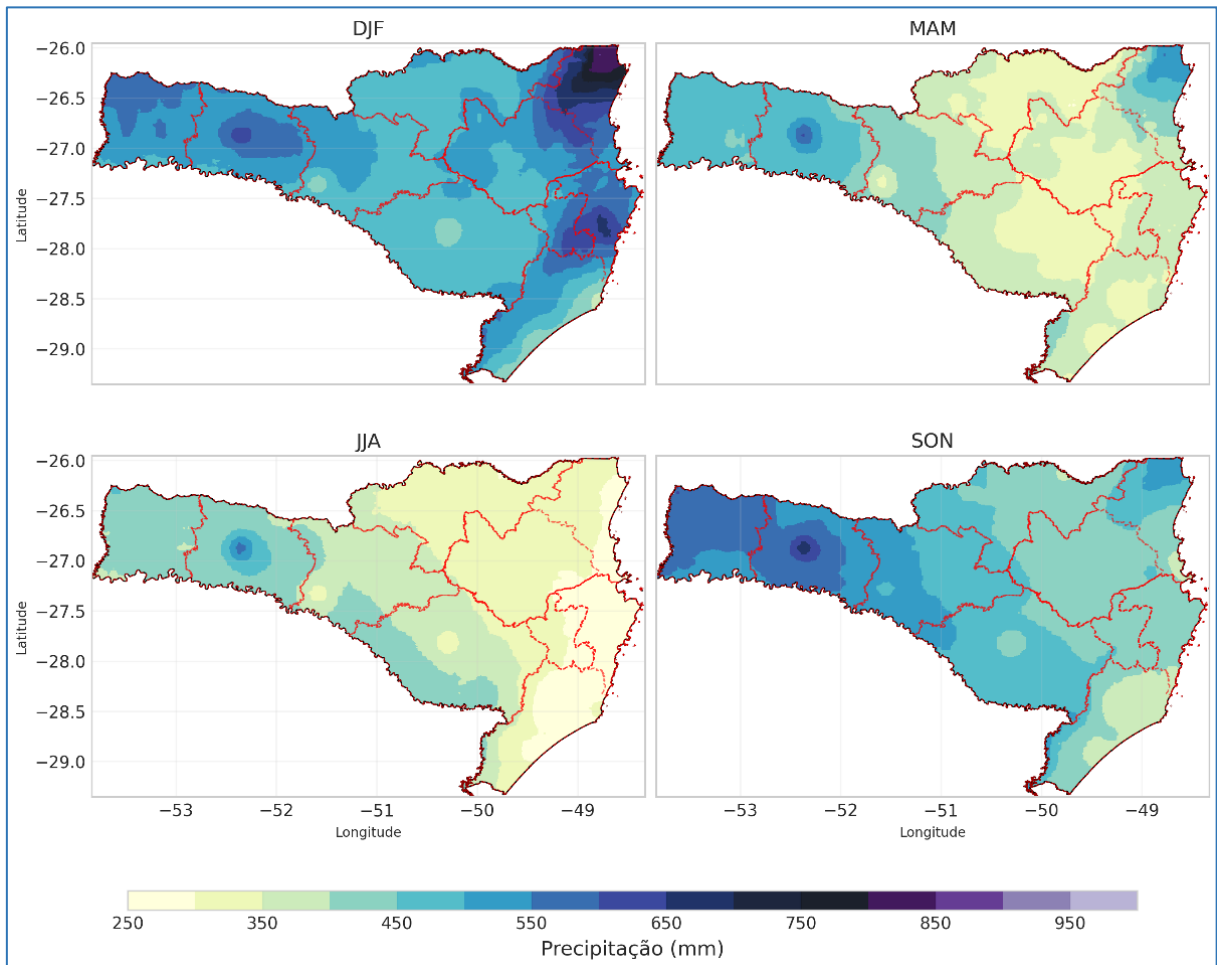
Quadro, (2024a), que identificam o verão como o período de maior atividade convectiva local.

No outono (MAM), ocorre uma redução gradual da chuva, com distribuição mais homogênea. O Litoral Norte mantém acumulados significativos pela persistência da circulação marítima, enquanto a maior frequência de sistemas frontais eleva os totais no Extremo-Oeste, Oeste e no Meio-Oeste.

O inverno (JJA) é o período de menor precipitação, especialmente nas regiões do litoral e dos planaltos. Diferente do Brasil Central, o inverno catarinense mantém médias trimestrais expressivas (acima de 300 mm), sustentadas por frentes frias e ciclones extratropicais. O gradiente de aumento em direção ao Oeste identificado pelo CHIRPS é consistente com a regionalização proposta por Oliveira e Quadro, (2024a).

Já a primavera (SON) se caracteriza pela retomada das chuvas intensas, no Extremo-Oeste, Oeste e Meio-Oeste, associadas ao Jato de Baixos Níveis (JBN) e à formação de Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM).

Figura 8 – Climatologia da precipitação no estado de Santa Catarina para os trimestres de DJF, MAM, JJA e SON a partir dos dados do CHIRPS (1981-2024).



Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS.

4.2.3 CLIMATOLOGIA MENSAL

A avaliação da marcha mensal da precipitação (Figura 9) permite uma visualização mais detalhada da transição entre os regimes de chuva. A comparação entre as estimativas do CHIRPS e a climatologia histórica de Pandolfo et al. (2002) (Figura 10), demonstra coerência espacial.

Em termos metodológicos, é importante ressaltar que, enquanto o Atlas de Pandolfo baseia-se exclusivamente em dados de estações de superfície (período 1961-1990), o presente estudo utiliza um produto híbrido (satélite + estações) com uma grade regular de $0,05^\circ$ (aproximadamente 5 km). Essa diferença metodológica permite que o CHIRPS capture nuances orográficas e gradientes, em áreas de vazio

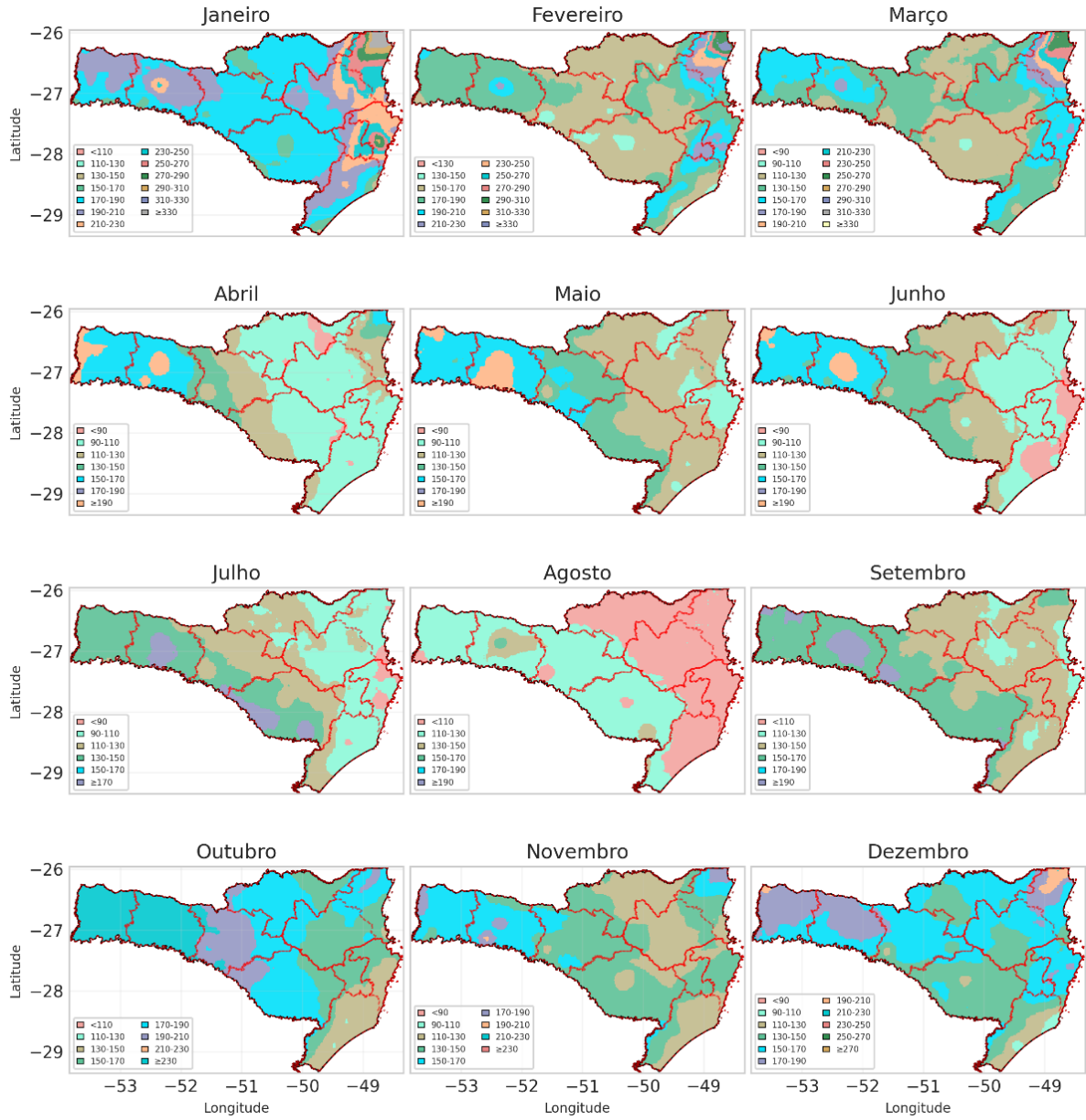
observacional, como as encostas da Serra Geral, que muitas vezes são suavizadas em interpolações baseadas apenas em postos pluviométricos esparsos.

Os resultados indicam que os meses de janeiro e fevereiro são os mais chuvosos para o Litoral e Vale do Itajaí, podendo superar 200 mm na média histórica do período na maior parte destas regiões, enquanto em março, os acumulados mais altos se restringem apenas ao Litoral Norte. Os meses de outubro a fevereiro apresentam os maiores acumulados para o Extremo-Oeste e Oeste catarinense, ultrapassando os 150 mm na média climatológica durante estes meses, com destaque para o mês de outubro com a maior parte destas regiões superando os 230 mm na média histórica.

Os meses de abril a agosto apresentam os menores acumulados em todo o estado, com redução mais expressiva nas regiões centro e leste, com algumas dessas áreas registrando médias históricas inferiores a 100 mm.

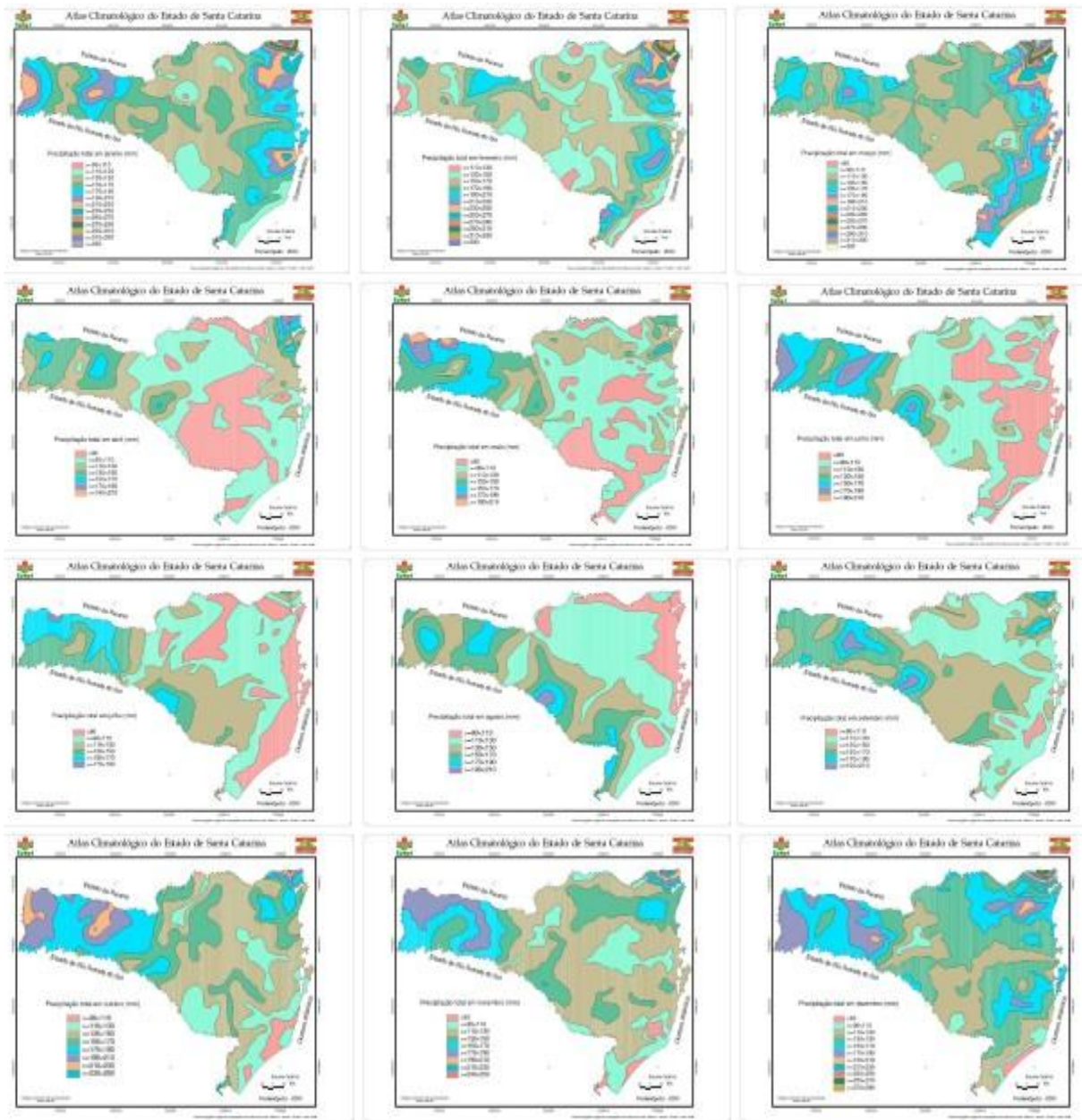
A coerência entre os dados validados e os estudos in situ de referência confirmam a robustez do CHIRPS para representar não apenas a média, mas também os gradientes regionais de precipitação em Santa Catarina na escala mensal, servindo como uma base sólida para a subsequente decomposição da variabilidade por EOF e CSEOF.

Figura 9 – Climatologia da precipitação no estado de Santa Catarina para os 12 meses do ciclo anual, a partir dos dados do CHIRPS (1981-2024).



Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS.

Figura 10 – Climatologia da precipitação no estado de Santa Catarina para os 12 meses do ciclo anual, extraída do Atlas Climatológico do Estado de Santa Catarina de Pandolfo et al, (2002).



Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS.

4.3 ANÁLISE DA EOF ANUAL

A decomposição de dados climáticos em modos ortogonais é uma ferramenta fundamental para compreender a variabilidade atmosférica em diferentes escalas temporais. Este trabalho foca na análise integrada de dois tipos de análise: a Análise de Funções Ortogonais Empíricas (EOF) Anual, que identifica padrões espaciais sem

considerar variações sazonais, e a Análise de Funções Ortogonais Empíricas Cicloestacionárias (CSEOF), que incorpora explicitamente a variabilidade sazonal. Juntas, essas análises revelam a estrutura hierárquica da variabilidade climática em Santa Catarina.

A Análise de Funções Ortogonais Empíricas (EOF) foi aplicada aos totais anuais de precipitação, do período de 1981 a 2024.

Todas as componentes obtidas, por meio das análises EOF e CSEOF, foram comparadas aos índices climáticos globais utilizando correlações, conforme especificado no Apêndice A. Somente as componentes consideradas pertinentes foram incluídas nas análises posteriores.

4.3.1 MODOS DE VARIABILIDADE DA EOF

O primeiro modo (autovalor) da EOF, representa 79,6% da variância da precipitação anual no estado, o que a caracteriza como o modo absoluto de variabilidade de larga escala. O modo 1 apresenta um padrão espacial homogêneo sobre toda a região. O mapa de correlação exibe tons alaranjados intensos cobrindo praticamente toda a área, indicando correlações positivas entre 0,7 e 0,9. Este padrão uniforme sugere que a variabilidade principal do sistema é caracterizada por um modo de escala regional, no qual toda a região varia de forma coerente e sincronizada.

A distribuição espacial homogênea do EOF PC1 contrasta fortemente com os padrões mais complexos observados nos modos cicloestacionários. Isto indica que a variabilidade de larga escala (representada pela EOF anual) é dominada por um sinal coerente que afeta uniformemente toda a região, enquanto a variabilidade cicloestacionária (CSEOF) captura estruturas espaciais mais refinadas que variam ao longo do ciclo anual.

4.3.2 PRIMEIRO MODO DE VARIABILIDADE EOF1

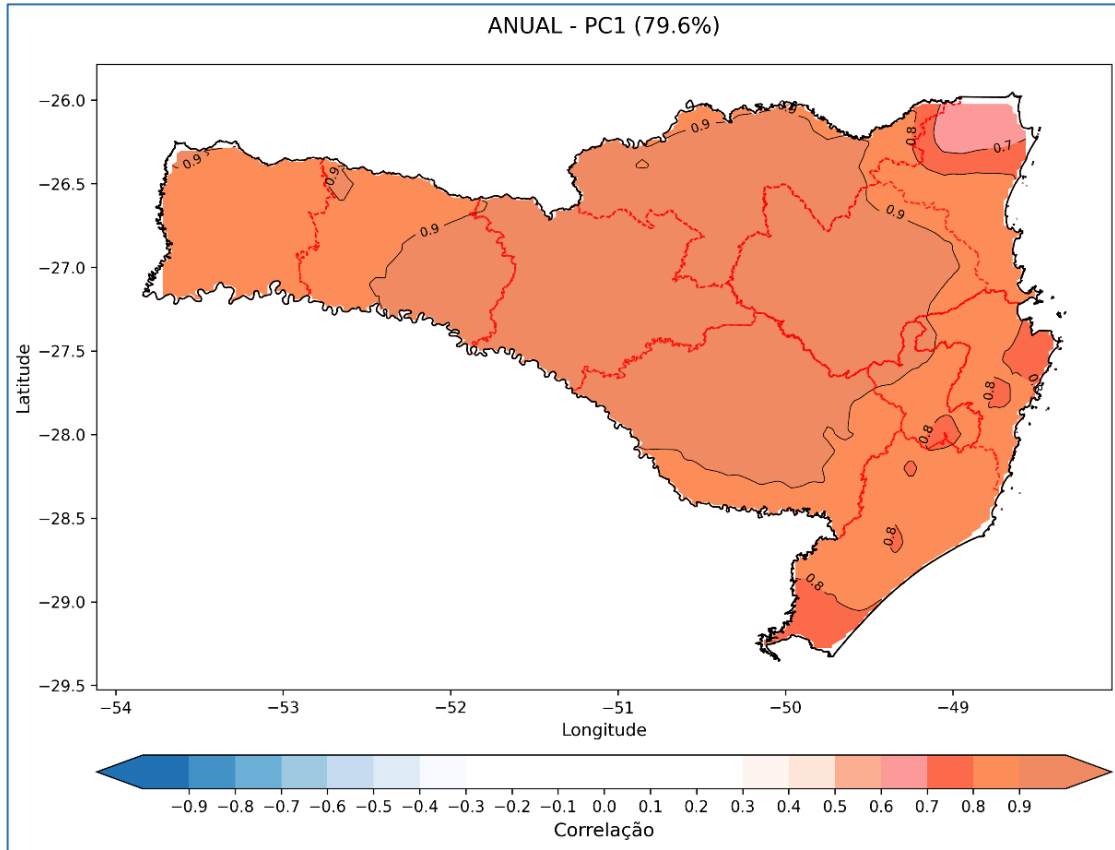
A série temporal anual do EOF PC1 (1981-2024) apresenta amplitude de flutuações entre aproximadamente -2,5 e +3,5, com episódios extremos bem definidos. A correlação com o índice NINO 1+2 (abril-maio-junho, AMJ) é equivalente a 0,64, representando uma relação significativa. Esta correlação implica que a EOF

PC1 e o NINO 1+2 compartilham aproximadamente 41% da variância ($R^2 = 0,41$), indicando um acoplamento notável entre a variabilidade climática regional e a região do NINO 1+2 no Oceano Pacífico tropical.

A Figura 12 apresenta o complemento da EOF, o deslocamento temporal representado pela PC1, e o coeficiente de correlação com a anomalia de temperatura da superfície do mar na região do Niño 1+2, um dos indicadores do ENOS. Aqui vale ressaltar que, para todos os modos de EOF, foi elaborada a correlação com os índices climáticos globais, como mostra o Apêndice A. Somente são mostradas as correlações relevantes.

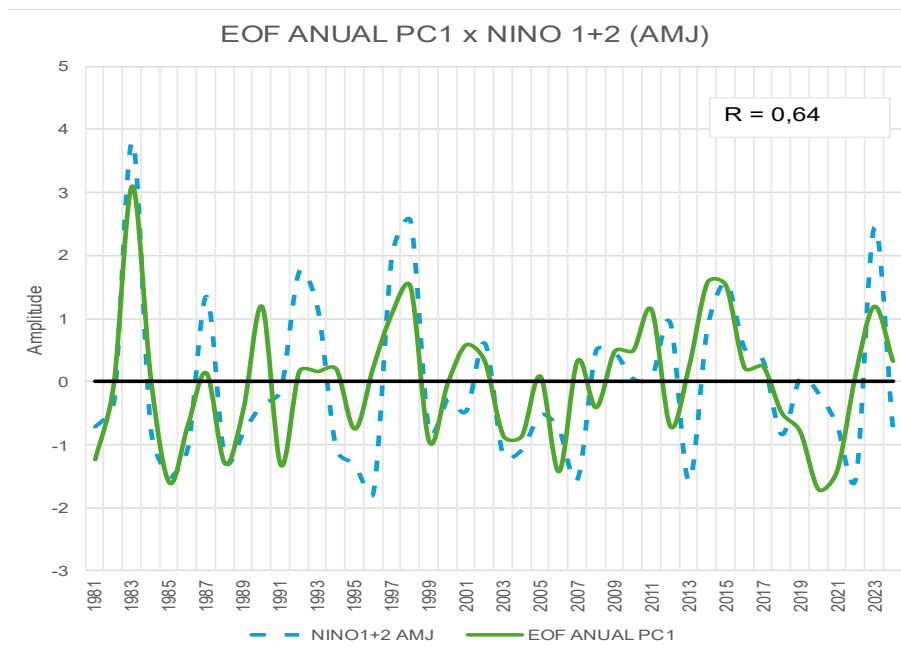
Os episódios extremos positivos do EOF PC1 coincidem sistematicamente com eventos El Niño forte, particularmente em 1982-1983 (pico máximo de aproximadamente 3,2), 1997-1998 (pico máximo de 2,5) e 2015-2016 (pico máximo de 1,8). Inversamente, os episódios extremos negativos ocorrem durante eventos La Niña, como em 1988-1989 (-1,8), 2010-2011 (-1,5) e 2020-2022 (-1,2). A série não apresenta tendência linear clara, mas exibe variabilidade multidecadal a ser melhor investigada futuramente.

Figura 11 – Modo 1 da EOF Anual: 79,6% da variância explicada - Mapa de correlação entre o autovetor e a componentes principal PC1.



Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS.

Figura 12 – PC1 da EOF anual (79,6%% de variância explicada) e índice climático NINO 1+2 para o trimestre AMJ (Abril-Maio-Junho)



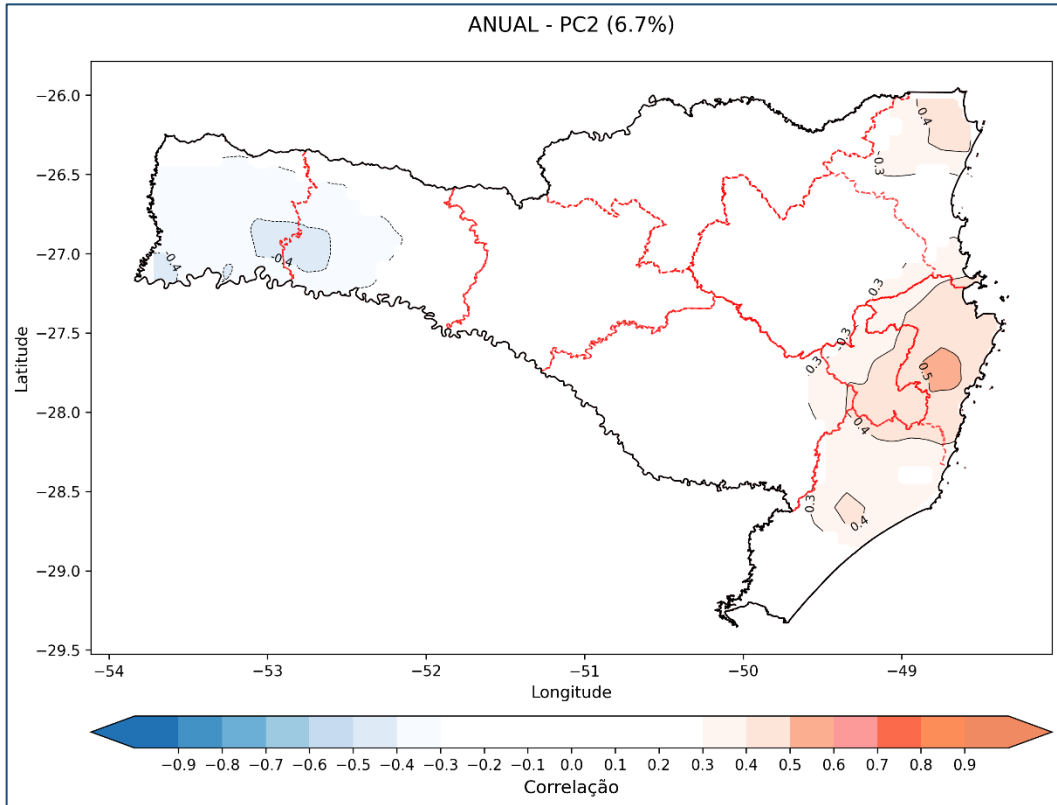
Fonte: elaborado pelo autor, dados: precipitação CHIRPS, índice NINO 1+2 (NOAA).

4.3.3 SEGUNDO MODO DE VARIABILIDADE EOF02

O segundo modo da EOF Anual apresenta uma estrutura radicalmente diferente do PC1, exibindo um padrão claramente bipolar. O mapa de correlação revela anomalias positivas (tons alaranjados/vermelhos) concentradas predominantemente no leste e nordeste da região, enquanto anomalias negativas (tons azuis) aparecem no oeste e sudoeste. Esta estrutura de dipolo é característica de modos que representam variabilidade de escala regional, onde diferentes partes da região variam em fase oposta.

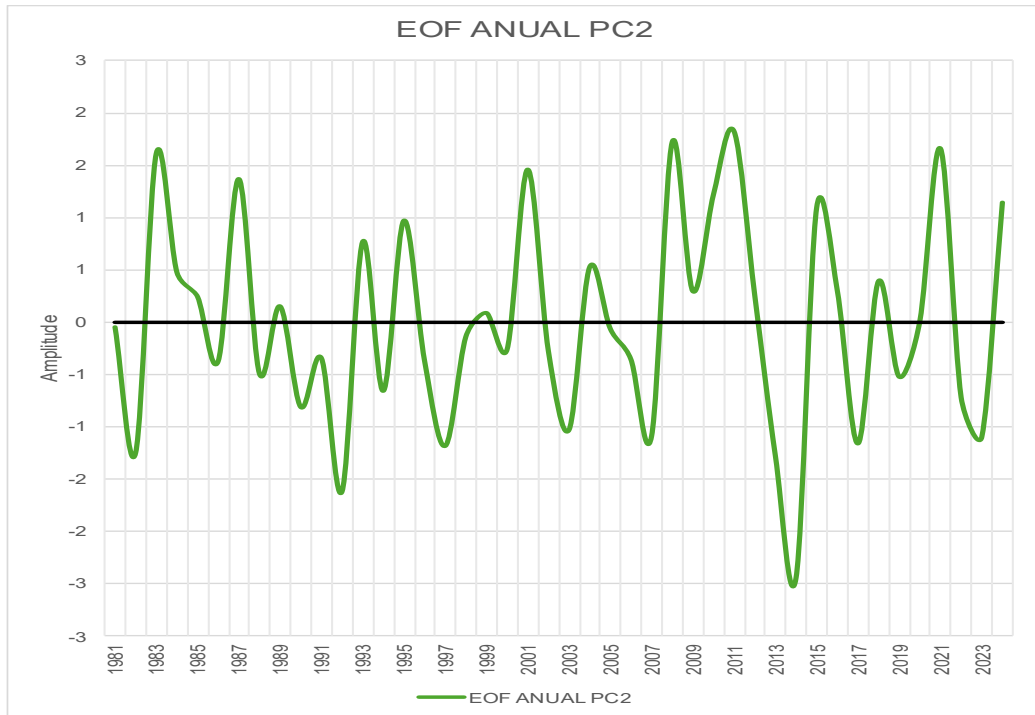
A série temporal do EOF Anual PC2 (Figura 13 e Figura 14), com variância explicada de 6,7%, exibe amplitude de flutuações entre aproximadamente -3,0 e +2,5, com variabilidade interanual pronunciada. Diferentemente do PC1, o PC2 não apresenta correlação significativa com índices ENOS simples, sugerindo que este modo captura variabilidade climática regional, que é menos diretamente governada pelo estado do Oceano Pacífico tropical. Os extremos do PC2 ocorrem em anos diferentes daqueles do PC1, indicando que representam processos físicos distintos.

Figura 13 – Modo 2 da EOF Anual com 6,7% da variância explicada - Mapa de correlação entre o autovetor e a componentes principal PC2.



Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS.

Figura 14 – PC2 da EOF anual (6,7% de variância explicada)



Fonte: elaborado pelo autor, dados: precipitação CHIRPS.

A análise da EOF Anual nos dois modos, conjuntamente, permite uma visão mais completa da hierarquia da variabilidade climática em Santa Catarina. O EOF PC1 (79,6%) domina, representando a resposta regional coerente ao ENSO. O EOF PC2 (6,7%) captura a variabilidade de escala regional, com estrutura bipolar, não correlacionada com ENSO. Juntos, estes dois modos explicam 86,3% da variância total, deixando apenas 13,7% para modos de ordem superior.

4.4 ANÁLISE DA EOF CICLOESTACIONÁRIA

A CSEOF representa uma evolução da EOF convencional, sendo ideal para analisar dados que apresentam variações periódicas, como a precipitação ao longo das estações. Ao contrário da EOF, a CSEOF possibilita mudanças nos padrões espaciais dentro de um ciclo específico (por exemplo, ao longo dos 12 meses), permitindo identificar diferentes modos de variabilidade em cada fase do ano e proporcionando uma análise mais precisa dos processos sazonais.

Por meio das Funções Ortogonais Empíricas Cicloestacionárias (CSEOF), é possível aprofundar a investigação de padrões periódicos, superando as limitações da EOF tradicional, que examina apenas padrões constantes. Com essa abordagem, observa-se a evolução dos padrões espaciais ao longo de ciclos definidos, o que facilita distinguir múltiplos tipos de variabilidade em períodos distintos, contribuindo para um entendimento mais completo dos mecanismos físicos envolvidos nas mudanças sazonais (Sapucci; Mayta; Da Silva Dias, 2025; Sun *et al.*, 2021).

4.4.1 PRIMEIRO MODO DE VARIABILIDADE -CSEOF1

O primeiro modo ciclostacionário (CSEOF1) explica 14,4% da variância e, como mostra a Figura 15, este modo apresenta uma estrutura bimodal clara ao longo do ano, com dois picos bem definidos de intensidade desigual:

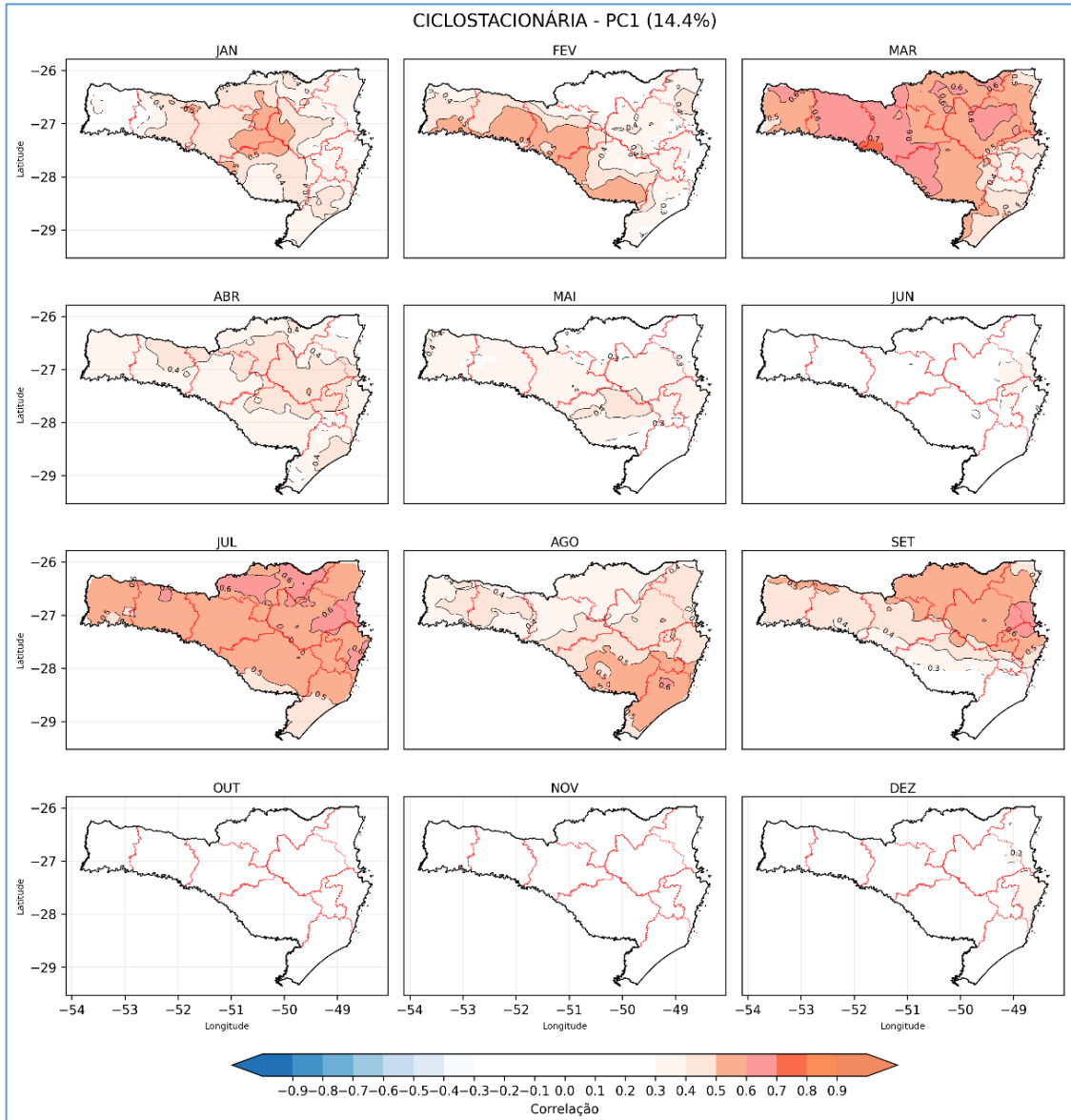
- O primeiro pico ocorre durante o verão austral (janeiro-março), com máximo em março, quando as correlações atingem valores entre 0,8 e 0,9, cobrindo quase a totalidade da região com tons vermelhos intensos; e,

- O segundo pico manifesta-se durante o inverno austral (julho-setembro), com máximos em julho-agosto, apresentando correlações entre 0,4 e 0,6, menos intenso que o primeiro pico. Entre os picos, observam-se períodos de mínima atividade em junho e entre outubro-dezembro, durante os quais o padrão praticamente desaparece.

A evolução mensal do CSEOF PC1 revela uma progressão suave, sendo que janeiro apresenta um padrão fraco (correlações 0,3-0,4), fevereiro marca intensificação (correlações de 0,5), março atinge o pico máximo (correlação de 0,8-0,9). Em abril inicia o declínio (correlações entre 0,2 e 0,3), e maio-junho apresentam um padrão praticamente nulo. Julho marca o reaparecimento (correlações em 0,4-0,6), agosto-setembro mantêm o segundo pico (correlações de 0,3-0,6), e outubro-dezembro retornam a padrão residual fraco.

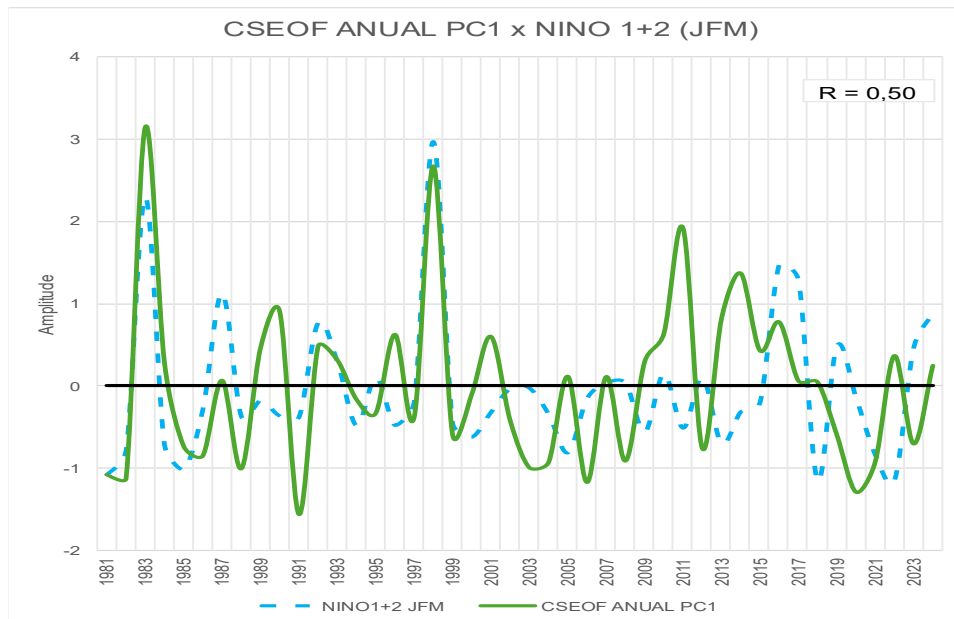
A série temporal associada (PC1), na Figura 16, exibe uma correlação com índice NINO 1+2 (janeiro-fevereiro-março, JFM) de 0,50, representando uma relação moderada. Esta correlação indica que aproximadamente 25% da variância do CSEOF PC1 é compartilhada com o NINO 1+2, enquanto 75% da variância é explicada por outros fenômenos. Os picos do CSEOF PC1 tendem a coincidir com episódios El Niño (NINO 1+2 > 0), enquanto períodos de La Niña (NINO 1+2 < 0) associam-se a valores negativos do modo. A série temporal demonstra picos coincidentes em anos de forte El Niño costeiro ou global, como 1982-1983 e 1997-1998.

Figura 15 – Mapa de correlação PC1 x precipitação CHIRPS, com variância explicada de 14,4% para a CSEOF.



Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS.

Figura 16 – CSEOF PC1 (14,4% de variância explicada) e índice climático NINO 1+2 JFM (Janeiro-Fevereiro-Março)



Fonte: elaborado pelo autor, dados: precipitação CHIRPS, índice NINO 1+2 (NOAA).

4.4.2 SEGUNDO MODO DE VARIABILIDADE - CSEOF2

O segundo modo (CSEOF2) responde por 11,6% da variância (Figura 17). Os doze mapas de correlação do PC2 revelam uma evolução sazonal marcante e bem definida. Durante os meses de verão inicial (janeiro, fevereiro e março), o padrão é extremamente fraco, com anomalias praticamente nulas ou muito reduzidas em toda a região. Este período de "dormência" do modo sugere que a estrutura bipolar característica do PC2 não se expressa durante o verão austral.

A transição para o outono marca o início da ativação do padrão. Em abril, anomalias fracas começam a aparecer, principalmente em regiões específicas. Em maio, o padrão atinge sua expressão mais forte e mais claramente definida. O mapa de maio apresenta uma estrutura fortemente bipolar, com anomalias negativas (tons azuis) concentradas no setor oeste e sudoeste da região, enquanto anomalias positivas (tons vermelhos/alaranjados) aparecem no leste e nordeste. Esta estrutura de dipolo é característica de modos que representam a oposição de fases entre diferentes setores da região.

Durante o inverno (junho, julho e agosto), o padrão mantém expressão significativa, embora com características ligeiramente diferentes. Em junho, as

anomalias negativas permanecem no oeste, mas com menor intensidade que em maio, enquanto as anomalias positivas no leste também se atenuam. Em julho, o padrão volta a se intensificar, com uma estrutura bipolar novamente bem definida, apresentando anomalias negativas no oeste e positivas no leste. Agosto mostra uma continuidade do padrão, mas com redução geral da amplitude.

A transição para a primavera (setembro, outubro e novembro) marca uma mudança gradual. Em setembro, o padrão começa a se desorganizar, com anomalias reduzidas e menos coerentes espacialmente. Em outubro, o padrão é praticamente nulo, com anomalias muito fracas distribuídas aleatoriamente. Em novembro, o padrão permanece fraco, iniciando a transição para o período de dormência do verão.

A série temporal PC2 (Figura 18) mostra uma correlação de 0,55 com o Índice da Oscilação Sul (SOI) que é um índice que mede a diferença de pressão normalizada entre Tahiti e Darwin, sendo um indicador clássico e robusto do fenômeno ENSO. Uma correlação de 0,55 é considerada moderada, indicando que aproximadamente 30% da variância do PC2 é explicada pelo SOI ($R^2= 0,30$).

A análise da série temporal revela uma correspondência entre os extremos do PC2 e as fases do ENSO. Durante eventos de La Niña (SOI positivo), o PC2 tende a apresentar amplitudes positivas, enquanto durante eventos de El Niño (SOI negativo), o PC2 frequentemente apresenta amplitudes negativas. Esta relação inversa é esperada, pois o SOI é definido de forma que valores positivos indicam La Niña e valores negativos indicam El Niño.

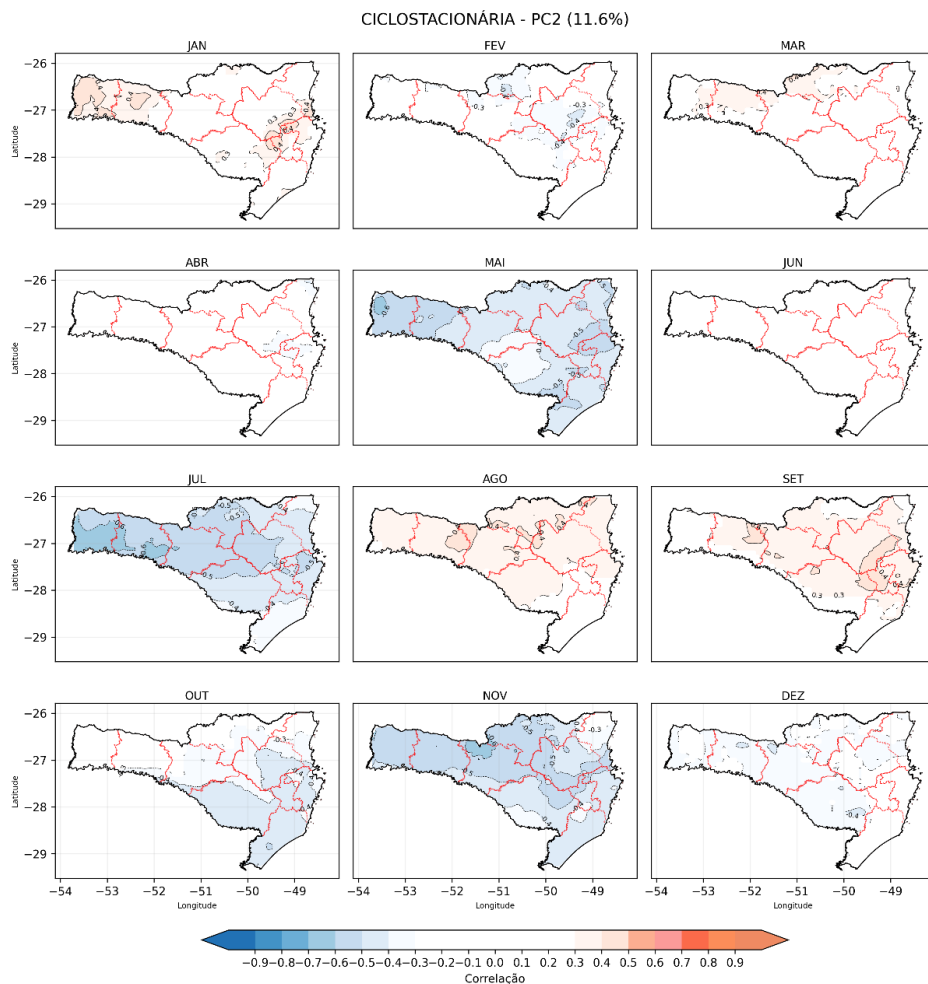
Examinando anos específicos, observa-se que em 1982-1983, período de um dos mais intensos El Niño do século XX, o PC2 apresenta uma amplitude negativa (em torno de -3,0), coincidindo com o SOI profundamente negativo. Em contraste, em 1988-1989, durante um evento de La Niña, o PC2 atinge valores positivos (em torno de +2,0), enquanto o SOI está positivo. Este padrão se repete em eventos subsequentes, como em 1997-1998 (El Niño intenso com PC2 negativo) e em 2010-2011 (La Niña com PC2 positivo).

A fase de defasagem temporal também é evidente. Em alguns períodos, o PC2 parece preceder o SOI, enquanto em outros, o segue. Esta defasagem é esperada e reflete a complexidade das teleconexões entre o Pacífico Equatorial e a região, onde a resposta atmosférica não é instantânea, mas ocorre com atrasos

sazonais variáveis. A correlação moderada com a SOI confirma que o ENOS é um forçante importante, mas não exclusivo, para este modo.

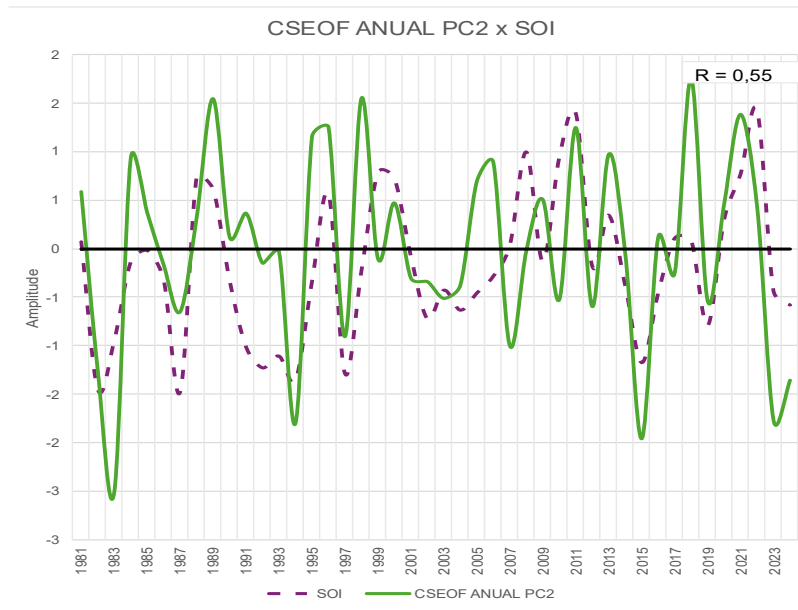
O padrão de dipolo reflete os mecanismos físicos descritos por diversos autores (Duarte, 2017; Grimm; Ambrizzi, 2009). Durante eventos de El Niño, há uma intensificação do Jato de Baixos Níveis (JBN) que advecta umidade para o interior do continente, favorecendo a formação de Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) no oeste de Santa Catarina. Simultaneamente, a circulação anômala pode inibir a chuva na região litorânea, gerando o padrão de dipolo observado.

Figura 17 – Mapa de correlação PC2 x precipitação CHIRPS, com variância explicada de 11,6% para a CSEOF.



Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS.

Figura 18 – CSEOF PC2 (11,6% de variância explicada) e índice climático SOI



Fonte: elaborado pelo autor, dados: precipitação CHIRPS, índice SOI (NOAA).

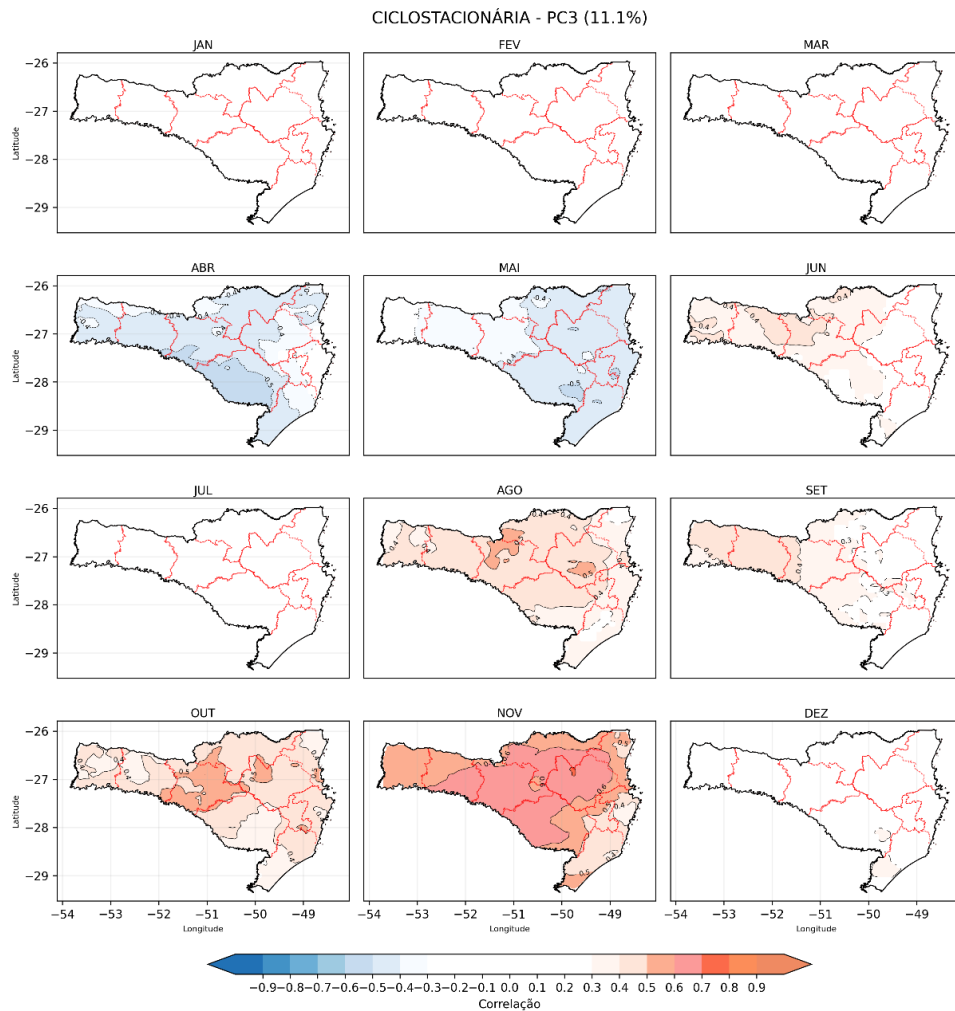
4.4.3 TERCEIRO MODO DE VARIABILIDADE - CSEOF3

O terceiro modo (CSEOF3), que explica 11,1% da variância (Figura 19), exibe um padrão mais complexo de variabilidade, e, conforme visto na Figura 20, tem uma correlação moderada com a região do Niño 3, durante o trimestre de Julho-Agosto-Setembro (JAS). Este modo se destaca por um comportamento temporal focado. Os mapas mensais mostram que o padrão é fraco ou nulo, durante quase todo o ano, com exceção do mês de novembro, quando emerge um sinal positivo, forte e homogêneo sobre todo o território catarinense. A série temporal revela a correlação mais alta entre os modos analisados. O gráfico da Figura 20 ilustra um acoplamento parcial com a curva do PC3 indicando que as oscilações do NINO 3 provocam uma resposta direta e defasada do clima de Santa Catarina, em novembro, às anomalias do Pacífico Central ocorridas meses antes.

Este modo pode ser interpretado como um precursor ou uma fase de estabelecimento do padrão de primavera visto no CSEOF2. Ele captura a resposta da precipitação no início da estação chuvosa do Oeste ao aquecimento do Pacífico que se consolida durante o inverno. A correlação com o Niño 3 em JAS sugere que a atmosfera na região já começa a responder às condições de El Niño, em desenvolvimento, antes que o pico da estação chuvosa da primavera seja atingido. A

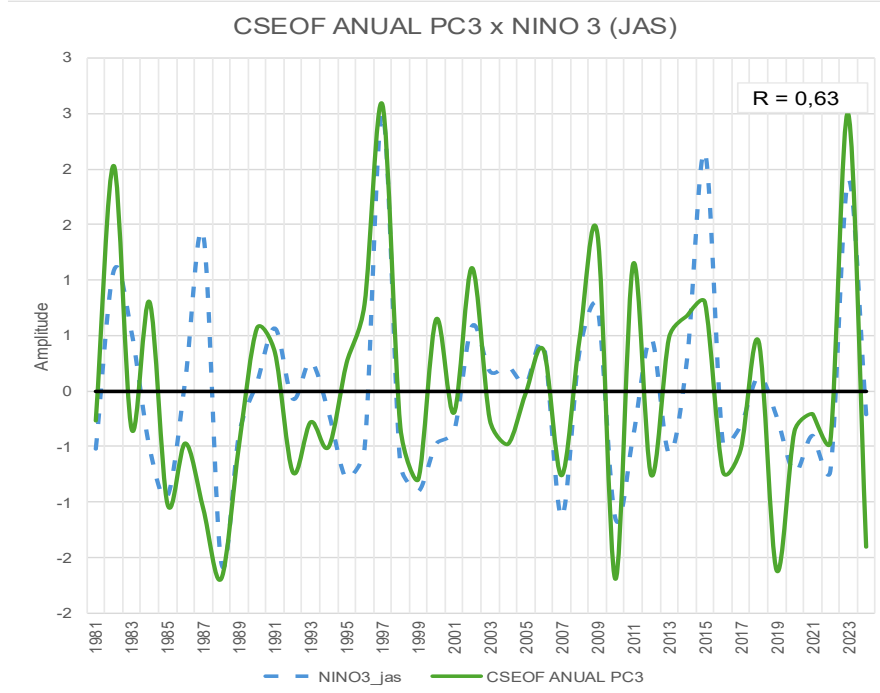
CSEOF, portanto, consegue não apenas separar os modos sazonais, mas também identificar diferentes estágios da influência do ENOS ao longo do ano.

Figura 19 – Mapa de correlação PC3 x precipitação CHIRPS, com variância de 11,1% .



Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS.

Figura 20 – CSEOF PC3 (11,1%) e índice climático NINO 3 JAS (Julho-Agosto-Setembro).

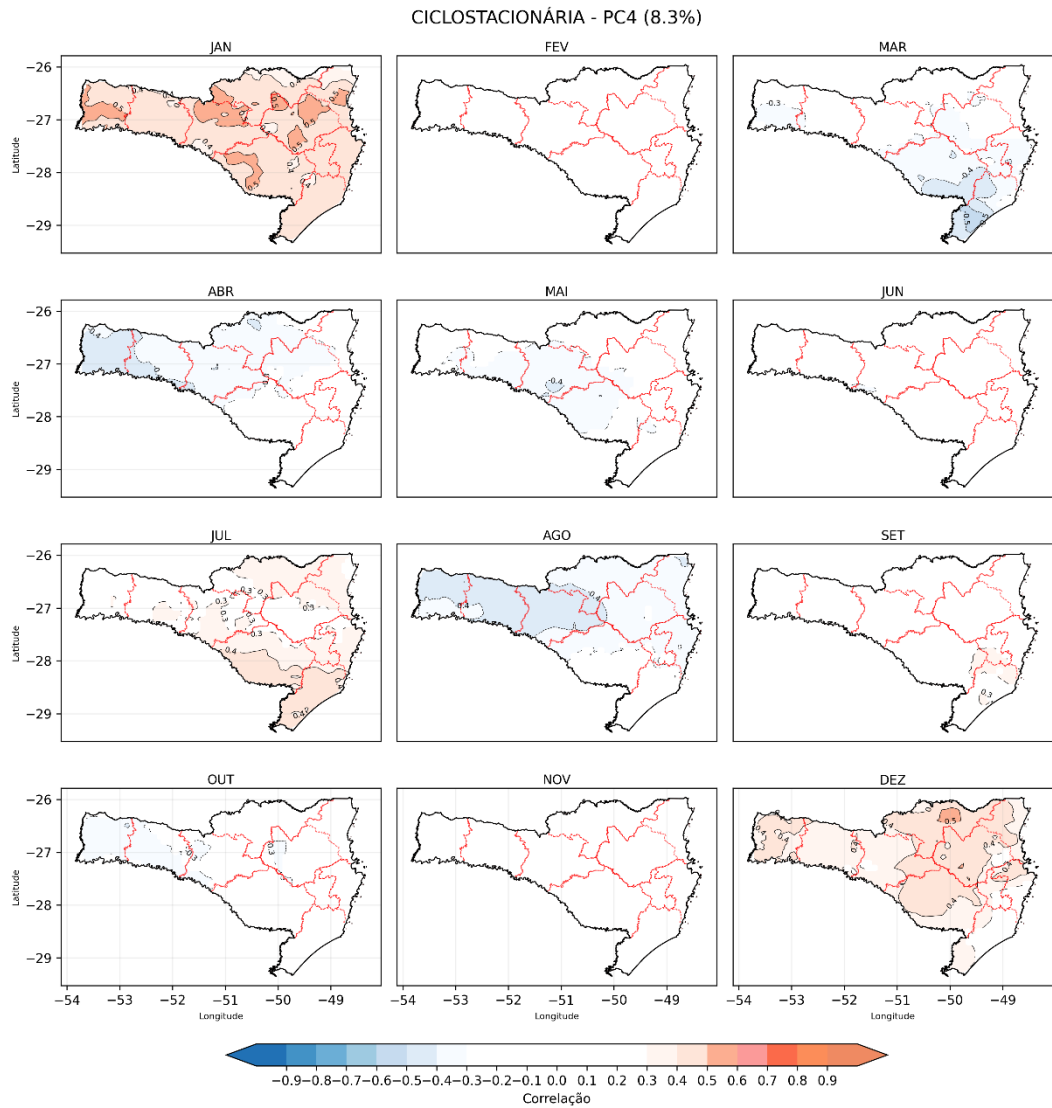


Fonte: elaborado pelo autor, dados: precipitação CHIRPS, índice NINO3 (NOAA).

4.4.4 QUARTO MODO DE VARIABILIDADE – CSEOF4

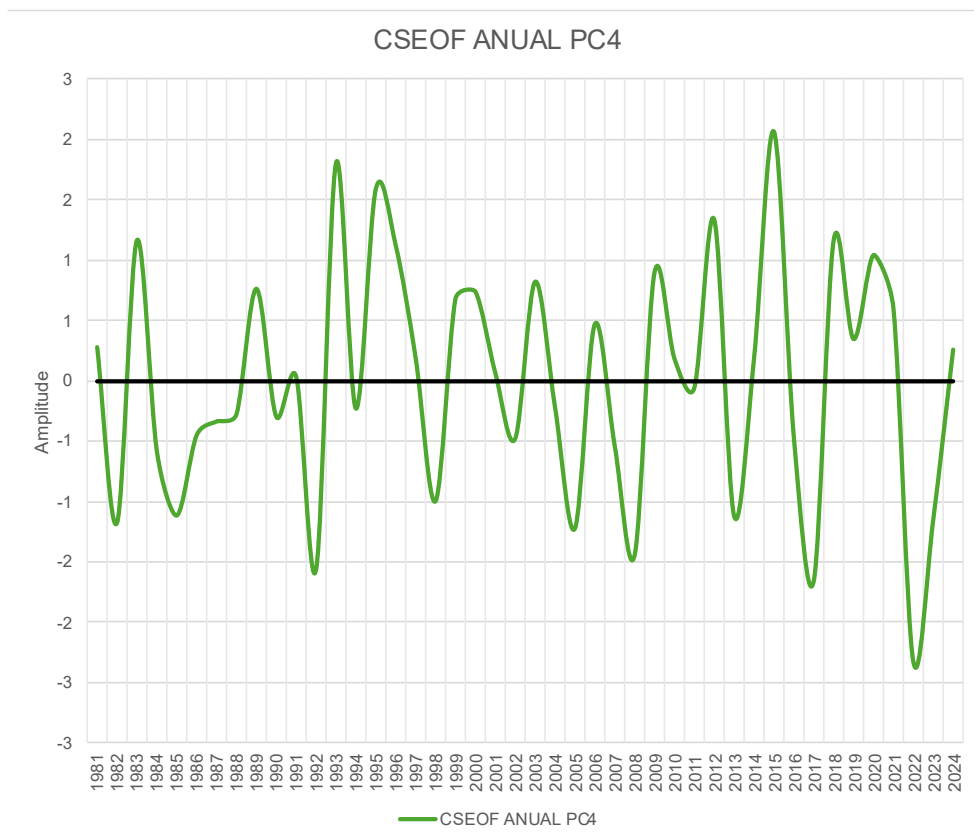
O quarto modo (CSEOF4), explica 8,3% da variância (Figura 21). A análise dos mapas mensais indica que este padrão tem sua maior expressão durante os meses de verão, principalmente em dezembro e janeiro, apresentando anomalias positivas distribuídas pelo estado. Observa-se também um sinal secundário em agosto, caracterizado por anomalias negativas no interior. A série temporal (Figura 22) exhibe forte variabilidade interanual com picos abruptos, incluindo uma queda negativa extrema nos anos mais recentes do gráfico. A figura não apresenta correlação explícita com índices climáticos, refletindo uma dinâmica sazonal específica do verão catarinense.

Figura 21 – Mapa de correlação PC4 x precipitação CHIRPS, com variância explicada de 8,3% para a CSEOF.



Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS.

Figura 22 – CSEOF PC4 (8,3% de variância explicada)

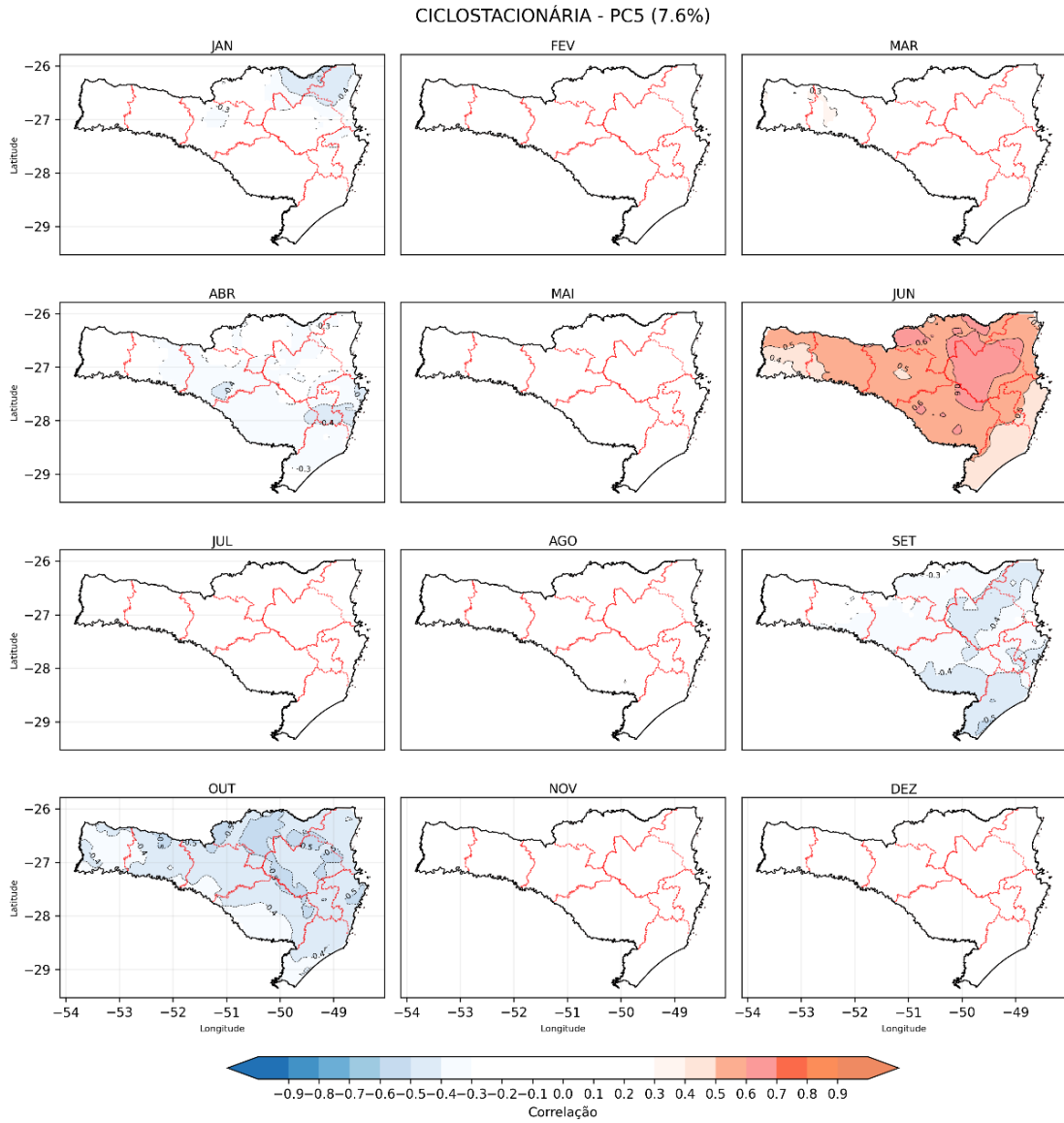


Fonte: elaborado pelo autor, dados: precipitação CHIRPS.

4.4.5 QUINTO MODO DE VARIABILIDADE – CSEOF5

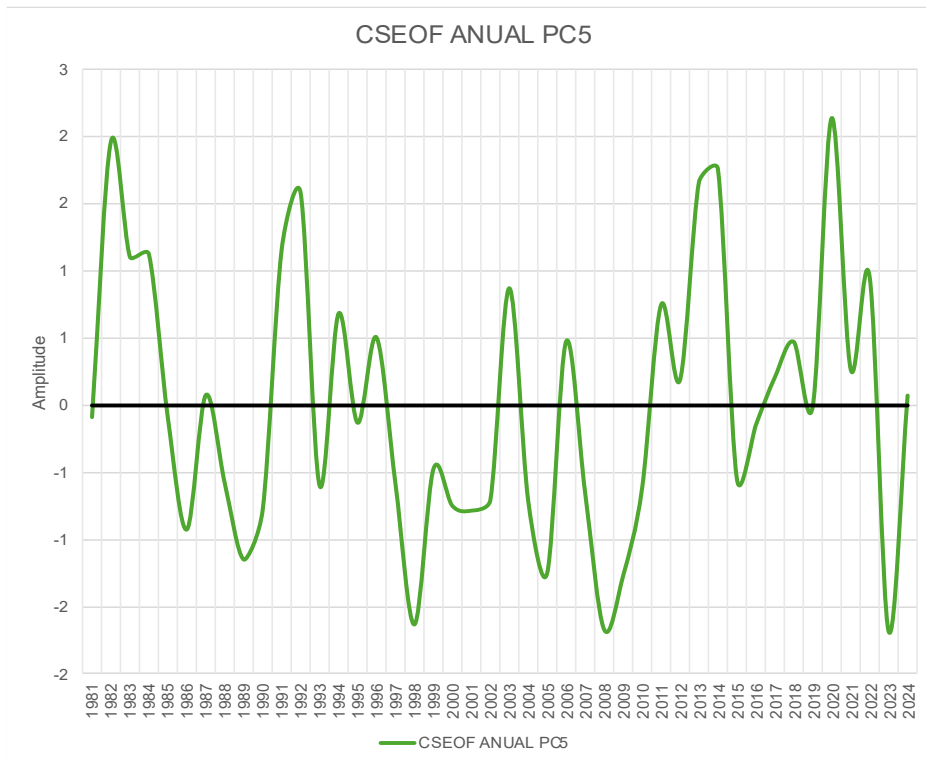
O quinto modo ciclostacionário (CSEOF PC5) explica 7,6% da variância (Figura 23) e apresenta uma evolução espacial caracterizada por um duplo pico com fases opostas. Os mapas revelam anomalias positivas homogêneas em Santa Catarina no mês de junho, contrastando com anomalias negativas que dominam o estado no mês de outubro. A série temporal (Figura 24) mostra ciclos multianuais com extremos bem definidos ao longo das décadas. Assim como no PC4, o gráfico não indica correlação com índices climáticos externos, sugerindo que este modo captura transições sazonais complexas e específicas entre o início do inverno e o meio da primavera na região.

Figura 23 – Mapa de correlação PC5 x precipitação CHIRPS, com variância explicada de 7,6% para a CSEOF.



Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS.

Figura 24 – CSEOF PC5 (7,6% de variância explicada)



Fonte: elaborado pelo autor, dados: precipitação CHIRPS.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou validar o uso de dados de precipitação do produto CHIRPS para Santa Catarina, caracterizar a climatologia do estado e decompor a variabilidade da precipitação utilizando as técnicas de EOF e CSEOF, correlacionando os modos encontrados com fenômenos de grande escala.

A etapa de validação estatística confirmou a robustez do produto CHIRPS para a região. Os resultados demonstraram boa relação com os dados de superfície do INMET, de acordo com as métricas de referência encontradas na literatura.

A metodologia de validação utilizada no CHIRPS é considerada robusta, pois facilita a identificação de informações provenientes de estações meteorológicas com baixa frequência temporal de dados.

O CHIRPS demonstra habilidade ao representar a precipitação até mesmo em áreas com relevo complexo, o que o confirma como um recurso importante para compensar a falta de dados em regiões com variadas características orográficas.

A caracterização climatológica, baseada na série histórica de 44 anos (1981-2024), reafirmou a complexidade do regime pluviométrico catarinense. A média anual de 1.721 mm e a ausência de uma estação seca definida foram corroboradas, destacando-se os núcleos de máxima precipitação no Extremo-Oeste (influenciados por Complexos Convectivos de Mesoescala e Jatos de Baixos Níveis) e no Litoral Norte (pela interação entre a circulação marítima e a orografia da Serra do Mar).

A análise integrada de EOF demonstra que a variabilidade climática em Santa Catarina é governada por uma hierarquia de padrões. A maior parte da variância (79,6%) responde de forma homogênea e anual ao Pacífico (EOF1). No entanto, a decomposição cicloestacionária (CSEOF) revela que essa influência não é constante, sendo fortemente modulada pelas estações do ano.

Somados, os 5 modos da CSEOF representam 53% da variabilidade da precipitação no estado. A decomposição cicloestacionária revela que a influência do Oceano Pacífico (índices climáticos) não é constante, sendo fortemente modulada pelas estações do ano, com respostas específicas no verão/inverno (CSEOF1) e um pico agudo em novembro (CSEOF3). Adicionalmente, o estado apresenta uma variabilidade regional importante baseada no contraste entre o interior e o litoral, capturada tanto na média anual (EOF2) quanto em sua janela de atividade no outono/inverno (CSEOF2), esta última correlacionada com o SOI. Os modos de menor

variância (CSEOF4 e 5) complementam o sistema, detalhando dinâmicas sazonais específicas do verão e transições de fase entre junho e outubro.

A análise de EOF Cicloestacionária (CSEOF) permitiu decompor a variabilidade, separando com sucesso os mecanismos físicos que atuam em diferentes estações do ano. Uma análise mais aprofundada ainda é necessária para identificar possíveis outros índices bem correlacionados, que possam inclusive atuar como preditores da precipitação no estado.

Conclui-se, que a precipitação em Santa Catarina é modulada por uma complexa interação de sistemas de diferentes escalas, com o ENOS atuando como o principal vetor da variabilidade interanual, mas com seus efeitos se manifestando através de mecanismos físicos distintos em cada estação do ano. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação do impacto de diferentes tipos de El Niño (Leste versus Central) e a influência de outros modos de variabilidade, como a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação Antártica (AAO), sobre os padrões de chuva no estado. Adicionalmente, a aplicação de técnicas de downscaling estatístico e a análise de extremos de precipitação, em cenários de mudanças climáticas, podem fornecer informações valiosas para o planejamento e gestão de recursos hídricos em Santa Catarina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ACHI, A. The Student's t-Test: A Brief Description. **Research & Reviews: Journal of Hospital and Clinical Pharmacy**, v. 5, n. 1, 2019. Disponível em: <https://www.rroj.com/open-access/the-students-ttest-a-brief-description.php?aid=87488>. Acesso em: 1 mar. 2025.

ALCÂNTARA, C. R.; SILVA DIAS, M. A. F.; SOUZA, E. P.; COHEN, J. C. P. Verification of the role of the low level jets in Amazon squall lines. **Atmospheric Research**, v. 100, n. 1, p. 36–44, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.12.023>

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

BARNETT, T. P.; PIERCE, D. W.; LATIF, M.; DOMMENGET, D.; SARAVANAN, R. Interdecadal interactions between the tropics and midlatitudes in the Pacific basin. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 5, p. 615–618, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/1999GL900042>

BROWN, A. The strange origins of the Student's t-test. **Physiology News**, n. Summer 2008, p. 13–16, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.36866/pn.71.13>

CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE, I. F.; FERREIRA JESUS, N.; JUSTI DA SILVA, M. G.; FAUSS DA SILVA DIAS, M. A. **TEMPO E CLIMA NO BRASIL**. 1. ed. [S. l.]: Oficiana de Textos, 2009. v. 1. *E-book*. Disponível em: www.ofitexto.com.br. Acesso em: 25 maio. 2024

CERÓN, W. L.; KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; AVILA, A.; CANCHALA, T.; FRANCÉS, F.; RIVERA, I. A.; ALFONSO-MORALES, W.; DE SOUZA, R. A. F.; CARVAJAL-ESCOBAR, Y. Streamflow intensification driven by the atlantic multidecadal oscillation (AMO) in the atrato river basin, Northwestern Colombia. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12010216>

CERÓN, W. L.; KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; CANCHALA, T.; AVILA-DIAZ, A.; RIBEIRO, I. O.; ROJAS, J. D.; ESCOBAR-CARBONARI, D.; TAPASCO, J. New insights into trends of rainfall extremes in the Amazon basin through trend-empirical orthogonal function (1981–2021). **International Journal of Climatology**, v. 44, n. 11, p. 3955–3975, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.8561>

CHEON, S. H.; HAMLINGTON, B. D.; REAGER, J. T.; CHANDANPURKAR, H. A. Identifying ENSO-related interannual and decadal variability on terrestrial water storage. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92729-4>

CHICCO, D.; SICHENZE, A.; JURMAN, G. A simple guide to the use of Student's t-test, Mann-Whitney U test, Chi-squared test, and Kruskal-Wallis test in

biostatistics. **BioData Mining**, v. 18, n. 1, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13040-025-00465-6>

COSTA, J. C.; PEREIRA, G.; SIQUEIRA, M. E.; DA SILVA CARDOZO, F.; DA SILVA, V. V. VALIDAÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO ESTIMADOS PELO CHIRPS PARA O BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v24i0.60237>

DA MOTTA PACA, V. H.; ESPINOZA-DÁVALOS, G. E.; MOREIRA, D. M.; COMAIR, G. Variability of trends in precipitation across the Amazon river basin determined from the CHIRPS precipitation product and from station records. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 5, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/W12051244>

DANCEY, C. P. .; REIDY, John. **Estatística sem matemática para psicologia : usando SPSS para Windows**. [S. l.]: Artmed, 2006

DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; DA SILVA JUNIOR, C. A.; TEODORO, P. E.; ROSSI, F. S.; BLANCO, C. J. C.; LIMA, M.; DE GOIS, G.; CORREIA FILHO, W. L. F.; DE BARROS SANTIAGO, D.; DOS SANTOS VANDERLEY, M. H. G. Confronting CHIRPS dataset and in situ stations in the detection of wet and drought conditions in the Brazilian Midwest. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 9, p. 4478–4493, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.7080>

DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. D.; MECHOSO, C. R. Relationships between Precipitation Anomalies in Uruguay and Southern Brazil and Sea Surface Temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Climate**, 1998. Disponível em: [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<0251:RBPAlU>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<0251:RBPAlU>2.0.CO;2)

DUARTE, L. **Laís Gonçalves Fernandes Duarte O FENÔMENO EL NIÑO-OSCILAÇÃO SUL E OS EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO EM SANTA CATARINA**. 2017. [s. l.], 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/182076>. Acesso em: 17 dez. 2025

GONÇALVES, F. N. **ÍNDICES DE PRECIPITAÇÃO PARA O ESTADO DE SANTA CATARINA**. 2017. Master - Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, 2017. Disponível em: [/http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/5663/1/Fabiane%20Nunes%20Gonçalves.pdf](http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/5663/1/Fabiane%20Nunes%20Gonçalves.pdf) f. Acesso em: 27 jul. 2025

GOTADO, R.; PIAZZA, G. A.; TORRES, E.; SEVERO, D. L.; KAUFMAN, V. Distribuição espacial e temporal das chuvas no estado de Santa Catarina. **Geosul**, v. 33, n. 67, p. 253–276, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2018v33n67p253>

GRIMM, A. M.; AMBRIZZI, T. **Teleconnections into South America from the Tropics and Extratropics on Interannual and Intraseasonal Timescales**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <http://www.springer.com/series/5869>

HAMLINGTON, B. D.; LEBEN, R. R.; NEREM, R. S.; HAN, W.; KIM, K. Y. Reconstructing sea level using cyclostationary empirical orthogonal functions. **Journal**

of **Geophysical Research: Oceans**, v. 116, n. 12, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2011JC007529>

HANNACHI, A. **A Primer for EOF Analysis of Climate Data**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://civil.colorado.edu/~balajir/CVEN6833/lectures/eofprimer.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2025

HANNACHI, A.; JOLLIFFE, I. T.; STEPHENSON, D. B. **Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.1499>

HARRISON, L.; LANDSFELD, M.; HUSAK, G.; DAVENPORT, F.; SHUKLA, S.; TURNER, W.; PETERSON, P.; FUNK, C. Advancing early warning capabilities with CHIRPS-compatible NCEP GEFS precipitation forecasts. **Scientific Data**, v. 9, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01468-2>

JOLLIFFE, I. T.; UDDIN, M. **The Simplified Component Technique: An Alternative to Rotated Principal Components** *Journal of Computational and Graphical Statistics*. [S. l.: s. n.].

KANE, R. P. Prediction of droughts in north-east Brazil: Role of ENSO and use of periodicities. **International Journal of Climatology**, v. 17, n. 6, p. 655–665, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199705\)17:6<655::AID-JOC144>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199705)17:6<655::AID-JOC144>3.0.CO;2-1)

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; FERREIRA DE SOUZA, R. A. Relations between ENSO and the South Atlantic SST modes and their effects on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 8, p. 2008–2023, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.3569>

KAYANO, M. T.; CERÓN, W. L.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F.; AVILA-DIAZ, A.; ZULUAGA, C. F.; CARVALHO, L. M. V. Does the El Niño-Southern Oscillation Affect the Combined Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation and Pacific Decadal Oscillation on the Precipitation and Surface Air Temperature Variability over South America? **Atmosphere**, v. 13, n. 2, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos13020231>

KIM, K. Y.; HAMLINGTON, B.; NA, H. **Theoretical foundation of cyclostationary EOF analysis for geophysical and climatic variables: Concepts and examples**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.06.003>

KIM, K.-Y.; NORTH, G. R.; HUANG, J. EOFs of One-Dimensional Cyclostationary Time Series: Computations, Examples, and Stochastic Modeling. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 53, n. 7, p. 1007–1017, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1996\)053<1007:EOODCT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<1007:EOODCT>2.0.CO;2)

KIM, K.-Y.; WU, Q. Optimal Detection Using Cyclostationary EOFs. **Journal of Climate**, 2000. Disponível em: [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0938:ODUCE>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0938:ODUCE>2.0.CO;2)

LAURA, M.; RODRIGUES, G.; PAULO, S. **EVENTOS DE CHUVA OROGRÁFICA EM SANTA CATARINA: CLIMATOLOGIA E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**. 2015. [s. l.], 2015

LIU, Y.; CHEN, J.; PAN, T.; LIU, Y.; ZHANG, Y.; GE, Q.; CIAIS, P.; PENUELAS, J. Global Socioeconomic Risk of Precipitation Extremes Under Climate Change. **Earth's Future**, v. 8, n. 9, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019EF001331>

LORENZ, E. **Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction**. [S. l.: s. n.]

MONAHAN, A. H.; FYFE, J. C.; AMBAUM, M. H. P.; STEPHENSON, D. B.; NORTH, G. R. **Empirical orthogonal functions: The medium is the message**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3062.1>

OLIVEIRA, C.; QUADRO, M. F. REGIONALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA EM SANTA CATARINA COM DADOS DE ALTA RESOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 35, 2024. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.55761/abclima.v35i20.17652>

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JUNIOR, V. P.; MASSIGNAM, A. M.; PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F. V. **ATLAS CLIMATOLÓGICO DO ESTADO DE SANTA CATARINA**. Florianópolis: [s. n.], 2002. Disponível em: https://ciram.epagri.sc.gov.br/ciram_arquivos/atlasClimatologico/atlasClimatologico.pdf. Acesso em: 9 jan. 2026

PAREDES-TREJO, F. J.; BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T. V. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 139, p. 26–40, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.009>

PUGAS, A. F.; SILVA, A. P. B. da; SILVA, E. B. da; ROLDÃO, H. P.; QUADRO, M. F. L. de; VITOR, A.; MUZA, M. N. Análise da variabilidade temporal de precipitação no Estado de Santa Catarina - Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 34, p. 51–78, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55761/abclima.v34i20.17164>

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; CRESPO, N. M.; DUTRA, L. M. M.; FERREIRA, G. W. de S.; REHBEIN, A.; DRUMOND, A.; DA ROCHA, R. P.; SOUZA, C. A. de. Impacts of teleconnection patterns on South America climate. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1504, n. 1, p. 116–153, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nyas.14592>

RICHMAN, M. B. **REVIEW ARTICLE ROTATION OF PRINCIPAL COMPONENTS**JOURNAL OF CLIMATOLOGY. [S. l.: s. n.]

RIFE, D. L.; PINTO, J. O.; MONAGHAN, A. J.; DAVIS, C. A.; HANNAN, J. R. Global distribution and characteristics of diurnally varying low-level jets. **Journal of**

Climate, v. 23, n. 19, p. 5041–5064, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3514.1>

SANTOS, S.; ANGELI SANSIGOLO, C.; TRINDADE DE ARAUJO TIBURTINO NEVES, T.; PAULA PAES DOS SANTOS, A. Variabilidade sazonal da precipitação na Amazônia: Validação da série de precipitação mensal do GPCC. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 6, p. 1721–1729, 2017. Disponível em: www.ufpe.br/rbgfe

SAPUCCI, C. R.; MAYTA, V. C.; DA SILVA DIAS, P. L. South American Intraseasonal Oscillation: EOF and Neural Network Approaches. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 130, n. 5, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2024JD041988>

SCHOBER, P.; SCHWARTE, L. A. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. **Anesthesia and Analgesia**, v. 126, n. 5, p. 1763–1768, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>

SELUCHI, M.; BEU, C.; ANDRADE, K. M. Características das frentes frias causadoras de chuvas intensas no leste de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, p. 25–37, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-778632120150095>

SILVA, E. R. M. da; BARBOSA, I. C. da C.; SILVA, H. J. F. da; COSTA, L. G. da S.; ROCHA, E. J. P. da. Análise do Desempenho da Estimativa de Precipitação do Produto CHIRPS para Sub-Bacia do Rio Apeú, Castanhal-PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1094–1105, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p1094-1105>

SMITH, L. **Elementary linear algebra**. [S. l.]: Wiley, 2002

STUDZINSKI, C. D. S. **Um estudo da precipitação na Região Sul do Brasil e sua relação com os oceanos Pacífico e Atlântico Tropical Sul**. 1995. Master Degree - INPE, São Jose dos Campos, 1995. Disponível em: <http://marte3.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/banon/2001/04.03.15.36.19/doc/mirrorget.cgi?metadataarepository=sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.29.03.32&languagebutton=pt-BR&choice=fullBibINPE>. Acesso em: 25 fev. 2026

SUN, M.; KIM, G.; XU, X.; WANG, Y. Investigation of South Korea Precipitation Variation using Empirical Orthogonal Function (EOF) and Cyclostationary EOF. In: 2021, **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. : IOP Publishing Ltd, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/643/1/012084>

TÓRNIO, C. A. A.; KEDE, M. L. F. M.; SILVA DE SOUZA, L. Avaliação do desempenho das estimativas de precipitação do produto CHIRPS para os municípios de São Gonçalo e Niterói (RJ). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 34, p. 79–103, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55761/abclima.v34i20.17317>

ULIANA, E. M.; FOMACA DE SOUSA JUNIOR, M.; DE, J.; ARAUJO, A.; RICARDO, U.; AIRES, V.; DAVID DA SILVA, D.; ZANUZO, M. R.; FANTIN DA CRUZ,

I. VALIDAÇÃO E ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR SENSORIAMENTO REMOTO CHIRPS PARA O ESTADO DE MATO GROSSO, BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 35, 2024

VELASCO, I.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. D8, p. 9591–9613, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/JD092iD08p09591>

VIANNA, L. F. de N.; MASSIGNAN, Â. M. Distribuição Espacial dos Metadados Temporais e Qualidade dos Metadados Espaciais das Estações Hidrometeorológicas do Estado de Santa Catarina para Climatologia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 412–425, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-7786333002>

WILKS, D. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2. ed ed. [S. l.: s. n.]

WMO. **WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals**: WMO-No. 1203. Geneva: [s. n.], 2017. Disponível em: https://library.wmo.int/viewer/55797/download?file=1203_en.pdf&type=pdf&navigator=1. Acesso em: 25 fev. 2026

YUAN, H.; SCHULTZ, P.; TOLLERUD, E. I.; HOU, D.; ZHU, Y.; PENA, M.; CHARLES, M.; TOTH, Z.; PENA, M. **Pseudo-Precipitation: A Continuous Precipitation Variable**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://doi.org/10.25923/3h37-gp49>

ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; BATTISTI, D. S. ENSO-like Interdecadal Variability: 1900–93. **Journal of Climate**, v. 10, n. 5, p. 1004–1020, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1004:ELIV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2)

APÊNDICE A CORRELAÇÕES COM ÍNDICES CLIMÁTICOS

Tabela 7 - Correlação entre as Componentes Principais da EOF e CSEOF com os índices climáticos analisados

Índice Climático	Anual		Ciclo Anual				
	EOF1	EOF2	CSEOF1	CSEOF2	CSEOF3	CSEOF4	CSEOF5
NINO1+2	0,59	0,00	0,29	-0,50	0,40	0,08	-0,12
NINO1+2 JFM	0,46	0,11	0,50	-0,30	-0,25	-0,04	-0,15
NINO1+2 AMJ	0,64	0,09	0,44	-0,43	0,25	0,07	-0,13
NINO1+2 JAS	0,55	0,00	0,18	-0,45	0,59	0,11	-0,15
NINO1+2 OND	0,28	-0,19	-0,11	-0,44	0,60	0,10	0,04
NINO3	0,48	-0,08	0,10	-0,58	0,41	0,10	-0,03
NINO3 JFM	0,38	0,10	0,43	-0,36	-0,36	-0,02	0,05
NINO3 AMJ	0,62	0,03	0,39	-0,48	0,24	0,08	-0,04
NINO3 JAS	0,37	-0,06	-0,09	-0,48	0,63	0,13	-0,09
NINO3 OND	0,18	-0,24	-0,26	-0,41	0,62	0,10	-0,01
NINO3.4	0,34	-0,16	-0,02	-0,56	0,32	0,10	0,05
NINO3.4 JFM	0,30	0,03	0,33	-0,36	-0,37	-0,02	0,11
NINO3.4 AMJ	0,48	-0,10	0,23	-0,52	0,18	0,09	0,10
NINO3.4 JAS	0,21	-0,13	-0,23	-0,47	0,53	0,13	-0,03
NINO3.4 OND	0,12	-0,25	-0,29	-0,38	0,57	0,10	-0,01
NINO4	0,18	-0,23	-0,12	-0,46	0,19	0,13	0,11
NINO4 JFM	0,16	-0,14	0,09	-0,34	-0,27	0,01	0,16
NINO4 AMJ	0,27	-0,17	0,02	-0,46	0,12	0,13	0,18
NINO4 JAS	0,12	-0,20	-0,23	-0,42	0,34	0,16	0,04
NINO4 OND	0,07	-0,24	-0,26	-0,31	0,43	0,14	0,01
SOI	-0,22	0,20	0,28	-0,32	-0,36	-0,02	0,10
PDO	0,14	-0,14	0,05	0,55	-0,15	-0,10	-0,12

Fonte: elaborado pelo autor, dados: CHIRPS e NOAA.