

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS ERECHIM
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

GABRIEL LORENZI

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO
COM BASE EM ESTIMATIVA DE SATÉLITES:
UM ESTUDO NO RIO GRANDE DO SUL

ERECHIM
2025

GABRIEL LORENZI

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO
COM BASE EM ESTIMATIVA DE SATÉLITES:
UM ESTUDO NO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS),
como requisito para obtenção do grau de
Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Valmir da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Jose Mario Vicensi Grzybowski

ERECHIM

2025

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Lorenzi, Gabriel
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL DA
PRECIPITAÇÃO COM BASE EM ESTIMATIVAS DE SATÉLITES: UM
ESTUDO NO RIO GRANDE DO SUL / Gabriel Lorenzi. -- 2025.
58 f.:il.

Orientador: Doutor Roberto Valmir da Silva
Co-orientador: Doutor José Mario Vicensi Grzybowski
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária,
Erechim,RS, 2025.

1. Precipitação por imagens de satélite. 2. Gestão de
recursos hídricos. I. Silva, Roberto Valmir da, orient.
II. Grzybowski, José Mario Vicensi, co-orient. III.
Universidade Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

GABRIEL LORENZI

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO
COM BASE EM ESTIMATIVA DE SATÉLITES:
UM ESTUDO NO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS),
como requisito para obtenção do grau de
Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 01/12/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Deise Paludo – UFFS
Avaliadora

Prof. Dr. Roberto Valmir da Silva – UFFS
Orientador

Prof. Dr. José Mario Vicensi Grzybowski – UFFS
Coorientador

Dedico este trabalho aos meus pais, que
não pouparam esforços para que eu
pudesse concluir meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por todo o zelo e dedicação que sempre dispenderam comigo. Aos meus amigos, pelo apoio, incentivo e pelos momentos de descontração que ajudaram a tornar essa caminhada mais leve.

Aos professores e orientadores, pela paciência, pelas valiosas contribuições e por compartilharem seu conhecimento ao longo dessa jornada acadêmica.

Aos colegas de curso, pela troca de experiências, pela parceria nos desafios e pela convivência enriquecedora durante todos esses anos.

E, acima de tudo, agradeço a Deus, por me conceder força, saúde e sabedoria para alcançar mais essa conquista.

“Sucesso é encontrar aquilo que se tenciona ser e depois fazer o que é necessário para isso”.

Epicteto.

RESUMO

A gestão dos recursos hídricos constitui um eixo essencial para o desenvolvimento socioeconômico e para a manutenção da sustentabilidade ambiental, especialmente em territórios marcados por elevada variabilidade climática, como o Rio Grande do Sul. Entretanto, os métodos convencionais de monitoramento da precipitação, baseados em redes pluviométricas terrestres, apresentam limitações quanto à cobertura espacial e à continuidade das medições, o que compromete a compreensão detalhada dos regimes de chuva e a capacidade de resposta a eventos extremos. Nesse cenário, o sensoriamento remoto destaca-se como uma alternativa tecnológica de grande potencial. Diante disso, este estudo teve como objetivo analisar o comportamento espaço-temporal da precipitação no estado, com base no produto GPM/IMERG (1999–2024), analisando os totais anuais, intensidades máximas anuais e coeficiente de variação, além de detectar tendências com o teste de Mann-Kendall. A metodologia envolveu o download, o pré-processamento e a análise de séries históricas de estimativas de precipitação, aplicando técnicas de estatística espacial e geoprocessamento para avaliar a variabilidade pluviométrica e delimitar áreas de maior concentração de chuvas. Os resultados indicaram que as estimativas do GPM/IMERG apresentam boa coerência com os padrões pluviométricos regionais, identificando um gradiente decrescente de precipitação do norte para o sul. A utilização do produto mostrou-se eficiente para identificar tendências sazonais e aprimorar o diagnóstico de eventos extremos, revelando ainda uma redução significativa na intensidade máxima horária e um aumento na variabilidade diária ao longo da série histórica.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, precipitação por imagem de satélite, gestão de recursos hídricos, GPM/IMERG, Rio Grande do Sul.

ABSTRACT

The management of water resources constitutes an essential pillar for socioeconomic development and for maintaining environmental sustainability, especially in territories marked by high climatic variability, such as Rio Grande do Sul. However, conventional precipitation monitoring methods, based on terrestrial rain gauge networks, have limitations regarding spatial coverage and measurement continuity, which compromises the detailed understanding of rainfall patterns and the capacity to respond to extreme events. In this scenario, remote sensing stands out as a technological alternative with great potential. Therefore, this study aimed to analyze the spatiotemporal behavior of precipitation in the state, based on the GPM/IMERG product (1999–2024), analyzing annual totals, annual maximum intensities, and the coefficient of variation, in addition to detecting trends using the Mann-Kendall test. The methodology involved downloading, preprocessing, and analyzing historical series of precipitation estimates, applying spatial statistics and geoprocessing techniques to assess rainfall variability and delineate areas of higher rainfall concentration. The results indicated that the GPM/IMERG estimates show good coherence with regional rainfall patterns, identifying a decreasing precipitation gradient from north to south. The use of the product proved efficient for identifying seasonal trends and improving the diagnosis of extreme events, also revealing a significant reduction in the maximum hourly intensity and an increase in daily variability over the historical series.

Keywords: Remote sensing, precipitation from satellite imagery, water resources management, GPM/IMERG, Rio Grande do Sul.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1: Histórico de eventos de El Niño e La Niña (1998–2025)	10
Figura 1: Localização do estado do Rio Grande do Sul	13
Figura 2: Sequência do desenvolvimento do estudo	14
Quadro 2: Precipitação total anual (1999-2024)	17
Quadro 3: Coeficiente de variação (1999-2024)	27
Quadro 4: Intensidade máxima em uma hora (1999-2024)	38
Gráfico 1: Representativo anual com teste de Mann-Kendall (1999-2024)	49
Gráfico 2: Representativo diário com teste de Mann-Kendall (1999-2024)	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPC	Centro de Previsão Climática
CV	Coeficiente de Variação
DPR	Radar de Precipitação de dupla frequência
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
GMI	Imagem de Micro-ondas GPM
GPM	Medição Global de Precipitação
IMERG	Recuperações Multissatélite Integradas para o GPM
JAXA	Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
NOAA	Administração Nacional Oceânica e Atmosférica
ONI	Índice Niño Oceânico
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
UFFS	Universidade Federal da Fronteira Sul
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo Geral.....	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
3.1. Gestão de recursos hídricos.....	3
3.2. Monitoramento da precipitação.....	5
3.3. Sistema GPM/IMERG.....	7
3.4. Variabilidade climática e fenômenos de larga escala.....	8
3.5. Teste de Mann-Kendall.....	11
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
4.1. Área de estudo.....	12
4.2. Dados utilizados.....	13
4.3. Métodos de análise.....	14
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
5.1. Padrões de precipitação.....	15
5.1.1. Precipitação anual.....	15
5.1.2. Coeficiente de variação.....	26
5.1.3. Intensidade máxima.....	36
5.1.4. Comparativo anual.....	46
5.1.5. Comparativo diário.....	49
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
REFERÊNCIAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

A água constitui um recurso natural essencial à manutenção da vida e ao desenvolvimento das atividades humanas, desempenhando papel central em diversos setores — desde o abastecimento doméstico até os processos industriais e agrícolas. No campo da Engenharia Ambiental e Sanitária, a gestão dos recursos hídricos compreende não apenas o monitoramento e a quantificação das disponibilidades, mas também a análise das demandas e dos múltiplos usos, buscando assegurar um equilíbrio sustentável entre oferta e consumo. Essa perspectiva converge com os fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433/1997, a qual define a bacia hidrográfica como a unidade básica para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos (BRASIL, 1997). Sob essa ótica, o manejo eficiente das águas adquire relevância estratégica tanto para o desenvolvimento econômico e social quanto para a preservação ambiental, configurando-se como um instrumento essencial à redução dos efeitos associados a eventos de escassez ou de excesso de precipitação (TUCCI, 2004; ANA, 2024).

Considerando que a precipitação representa a principal fonte de reposição dos corpos d'água superficiais e subterrâneos, o conhecimento aprofundado de seus padrões espaciais e temporais é indispensável. A variabilidade pluviométrica influencia diretamente a disponibilidade hídrica de uma região, afetando atividades fundamentais como a agricultura, o abastecimento de água potável e a geração de energia elétrica — especialmente em territórios cuja matriz energética depende de usinas hidrelétricas. No contexto brasileiro, fenômenos climáticos como El Niño e La Niña, originados de variações anômalas na temperatura do Oceano Pacífico, exercem papel determinante na variabilidade espacial e temporal das precipitações. Esses eventos podem intensificar tanto períodos de estiagem quanto de chuvas excessivas, ocasionando repercussões diretas na economia e na disponibilidade de recursos hídricos (GRIMM et al., 2009). Diante desse cenário, a análise detalhada dos padrões e das tendências de precipitação mostra-se fundamental para subsidiar o planejamento territorial e a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas (SOUZA, 2024).

Historicamente, o monitoramento da precipitação baseia-se em redes de pluviômetros instaladas em superfície, as quais, embora forneçam medições pontuais precisas, apresentam limitações significativas de cobertura espacial. Muitas regiões, sobretudo as de difícil acesso ou com baixa densidade populacional, permanecem sub monitoradas, o que compromete a representatividade das séries históricas. Ademais, a manutenção das redes de monitoramento exige investimentos constantes em infraestrutura e em pessoal especializado, um requisito que nem sempre é viável quando considerado em âmbito estadual ou nacional (PICOLI et al., 2019). Nesse contexto, o avanço do sensoriamento remoto, aliado ao uso de satélites meteorológicos, tem se mostrado uma alternativa eficiente para contornar essas restrições, ampliando significativamente a capacidade de observação e o monitoramento de parâmetros hidrometeorológicos em extensas áreas (CAMPOS et al., 2019).

A utilização de sistemas orbitais, especialmente o GPM (*Global Precipitation Measurement*) e seu produto IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM*), possibilita o monitoramento contínuo da precipitação em escala global, com elevada resolução temporal e espacial. Esses sistemas combinam dados de múltiplos sensores para gerar estimativas mais abrangentes e consistentes, permitindo análises detalhadas mesmo em locais onde as medições convencionais são escassas ou inexistentes (HUFFMAN et al., 2020).

O estado do Rio Grande do Sul apresenta grande diversidade climática e hidrológica, caracterizada por variações sazonais marcantes que alternam períodos de estiagem prolongada e eventos de chuva intensa. Essa dinâmica impõe desafios à gestão dos recursos hídricos, fundamentais para sustentar uma economia fortemente baseada nas atividades agrícola e industrial. A variabilidade pluviométrica no Rio Grande do Sul é condicionada por uma combinação de fatores geográficos e atmosféricos, entre os quais se destacam a latitude, os padrões de circulação regional e as características do relevo, que influenciam diretamente a distribuição espacial das chuvas. A recorrência de eventos extremos — como as estiagens de 2020–2021 e as inundações registradas em 2023 e 2024 — demonstra a elevada sensibilidade climática do estado (INMET, 2024; SCHULER et al., 2018). Esses episódios evidenciam a importância de fortalecer o monitoramento e o entendimento do regime pluviométrico regional, por meio de ferramentas

tecnológicas capazes de representar, com maior acurácia, as variações espaciais e temporais das precipitações (GONÇALVES et al., 2018).

Dessa forma, este estudo propõe-se a empregar o produto GPM/IMERG para analisar o comportamento espaço-temporal da precipitação no Rio Grande do Sul no período de 1999 a 2024, analisando os totais anuais, intensidades máximas anuais e coeficiente de variação, além de detectar tendências com o teste de Mann-Kendall, onde teve como objetivos automatizar o download e o pré-processamento de dados de chuva provenientes de imagens de satélite para o estado do Rio Grande do Sul, processar séries históricas de dados de precipitação obtidas por sensoriamento remoto e quantificar a variabilidade espacial da chuva no território gaúcho, delimitando as zonas de maior intensidade pluviométrica.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar o comportamento espaço-temporal da precipitação sobre o estado do Rio Grande do Sul.

2.2. Objetivos Específicos

- Automatizar o *download* e o pré-processamento de dados de chuva das imagens do satélite para o estado do Rio Grande do Sul;
- Processar séries históricas de dados de precipitação por imagens de satélite;
- Quantificar a variabilidade espacial da chuva no estado do Rio Grande do Sul, delimitando as zonas de maior intensidade pluviométrica.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Gestão de recursos hídricos

A gestão dos recursos hídricos abrange o conjunto de ações destinadas à administração e ao uso sustentável da água, de modo a atender simultaneamente às demandas sociais, econômicas e ambientais. No contexto do estado do Rio Grande

do Sul, essa gestão envolve o monitoramento contínuo e a análise da disponibilidade hídrica em toda a sua extensão territorial, considerando a diversidade climática e as diferentes regiões com regimes pluviométricos distintos. A Lei nº 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), estabelece princípios de gestão da água voltados à sustentabilidade, descentralização e participação social, reconhecendo a água como bem de domínio público e de valor econômico (BRASIL, 1997; ANA, 2024).

A análise da precipitação constitui etapa essencial para compreender a dinâmica hídrica e suas variações espaço-temporais, pois o regime de chuvas é o principal determinante da disponibilidade de água em uma região. No caso do Rio Grande do Sul, o uso de dados de precipitação obtidos via imagem de satélite permite uma visão abrangente e integrada do comportamento climático estadual, favorecendo a identificação de padrões e tendências que influenciam diretamente o manejo dos recursos hídricos (BRUBACHER et al., 2021).

A gestão hídrica no Brasil segue um modelo participativo, baseado em comitês de bacia hidrográfica, que reúnem representantes do poder público, usuários de água e sociedade civil. Essa estrutura busca promover decisões mais equitativas, transparentes e eficazes, incentivando o uso racional dos recursos e a preservação dos ecossistemas aquáticos (ABERS, 2007).

Entretanto, as pressões sobre os recursos hídricos têm se intensificado nas últimas décadas, impulsionadas pelo crescimento populacional, expansão agrícola, industrialização e pelas mudanças climáticas globais. Esses fatores tornam mais complexa a tarefa de conciliar o abastecimento humano, a produção agrícola, a geração de energia e a manutenção dos ecossistemas naturais (MILLY et al., 2008).

Nesse contexto, a Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) tem ganhado relevância como abordagem estratégica. Ela propõe o manejo coordenado da água, do solo e dos recursos associados, com o objetivo de maximizar o bem-estar econômico e social sem comprometer a integridade dos ecossistemas (GLEICK, 2000).

A eficiência dessa gestão depende diretamente da disponibilidade de informações confiáveis e atualizadas sobre oferta e demanda hídrica. Tecnologias como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e o sensoriamento remoto têm revolucionado esse campo, permitindo o monitoramento em tempo quase real, a

análise preditiva e a modelagem de eventos extremos, como secas e inundações (CAMPOS et al., 2019; TUCCI, 2004).

O uso de dados exclusivamente de imagens satelitais na análise da precipitação apresenta-se como alternativa eficaz para compreender a variabilidade espacial e temporal das chuvas no Rio Grande do Sul, especialmente em áreas com baixa densidade de estações pluviométricas. Essa abordagem oferece estimativas consistentes e contínuas, fortalecendo a capacidade de planejamento e de resposta a eventos hidrológicos críticos (BRUBACHER et al., 2021).

Ainda assim, a implementação de políticas eficazes de gestão hídrica enfrenta desafios estruturais, como a fragmentação das políticas setoriais, a insuficiente integração entre diferentes níveis governamentais e a limitação institucional em algumas regiões. Soma-se a isso a necessidade de aprimorar a alocação equitativa da água, os investimentos em infraestrutura, o monitoramento da qualidade hídrica e a conservação das nascentes (ABERS, 2007).

Assim, a efetividade da gestão dos recursos hídricos requer o engajamento contínuo de gestores e usuários, aliado à incorporação de tecnologias inovadoras que complementem os métodos tradicionais. A integração entre ciência, governança e tecnologia constitui um caminho promissor para promover o uso sustentável da água, reforçando a resiliência ambiental e social diante das pressões contemporâneas (GLEICK, 2000).

3.2. Monitoramento da precipitação

O monitoramento da precipitação é componente essencial da gestão hídrica, pois subsidia políticas de conservação, distribuição e uso racional da água. Tradicionalmente, essa atividade é realizada por meio de redes de pluviômetros terrestres, que fornecem medições locais precisas, mas limitadas espacialmente. A cobertura dessas redes tende a ser irregular, concentrando-se em áreas urbanas ou de fácil acesso, o que resulta em lacunas significativas em regiões remotas (SMITH et al., 2012).

Além da limitação espacial, as redes físicas exigem manutenção constante e estão sujeitas a falhas técnicas ou vandalismo, comprometendo a continuidade e a confiabilidade das séries históricas (KIDD & HUFFMAN, 2011). Para superar essas

limitações, o uso de dados de sensoriamento remoto tem se destacado como alternativa moderna e eficaz.

Os satélites meteorológicos permitem medições contínuas e em tempo quase real, cobrindo amplas extensões territoriais. Entre os principais avanços, destaca-se o *Global Precipitation Measurement* (GPM), resultado de uma parceria entre a NASA e a Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA), cujo objetivo é medir a precipitação global com alta precisão e frequência (HOU et al., 2014).

O produto IMERG (*Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM*) integra dados de múltiplos sensores, combinando observações de micro-ondas, infravermelho e radares, ajustadas por medições terrestres. Essa abordagem multi satélite aumenta a acurácia das estimativas, gerando informações com resoluções espaciais de até 0,1° e temporais de 30 minutos (HUFFMAN et al., 2020).

Entre as principais vantagens do monitoramento satelital estão a uniformidade dos dados, a abrangência espacial e a capacidade de detectar eventos extremos — como tempestades severas, ciclones e períodos prolongados de estiagem. Tais características tornam os satélites instrumentos indispensáveis para o desenvolvimento de modelos preditivos e estratégias de mitigação de riscos hidrológicos.

Por outro lado, o sensoriamento remoto também apresenta limitações. As medições indiretas exigem algoritmos complexos de conversão, sujeitos a incertezas associadas à calibração e à variabilidade dos sensores. Além disso, há desafios na detecção de chuvas leves e na diferenciação entre chuva e neve (TAPIADOR et al., 2012).

Ainda assim, o monitoramento via satélite possibilita análises abrangentes e padronizadas da variabilidade pluviométrica em todo o Rio Grande do Sul, oferecendo dados consistentes e de alta resolução — fundamentais para o aprimoramento de modelos hidrológicos e para a gestão eficiente dos recursos hídricos. O avanço contínuo dessa tecnologia representa um marco na transição para uma gestão hídrica baseada em evidências e adaptada às novas realidades climáticas.

3.3. Sistema GPM/IMERG

O satélite principal do sistema, denominado *Core Observatory*, é equipado com dois instrumentos centrais: o *Dual-frequency Precipitation Radar* (DPR) e o *GPM Microwave Imager* (GMI). Em conjunto, eles permitem detectar a estrutura tridimensional da precipitação, diferenciando tipos de chuva e neve, bem como sua intensidade e profundidade vertical (SKOFRONICK-JACKSON et al., 2017).

O principal produto derivado do sistema é o IMERG, que combina dados de micro-ondas, infravermelho e radar de diversos satélites, ajustados com medições de estações pluviométricas em superfície. Essa integração resulta em estimativas de alta precisão, atualizadas quase em tempo real, aplicáveis a estudos meteorológicos, hidrológicos e climáticos (HUFFMAN et al., 2020).

As vantagens do IMERG incluem sua capacidade de fornecer dados globais com resoluções temporais de meia em meia hora e espaciais de até 0.1 grau de latitude/longitude. Esta alta resolução é particularmente útil em estudos que requerem dados detalhados sobre a distribuição espacial e temporal de eventos de precipitação, como análises de chuvas intensas ou contínuas (TAN et al., 2019).

O IMERG disponibiliza três versões, denominadas “*runs*”, conforme o tempo de processamento e o grau de calibração dos dados:

- *Early Run* – disponibilizada cerca de quatro horas após a observação, voltada a alertas rápidos e monitoramento de eventos extremos;
- *Late Run* – publicada aproximadamente 14 horas após a coleta, incorporando calibrações adicionais e ajustes de consistência;
- *Final Run* – disponibilizada com maior atraso temporal (cerca de dois meses), representando a versão mais completa e calibrada, ideal para estudos científicos e análises climatológicas de longo prazo.

Embora o sistema apresente elevada precisão, desafios persistem, sobretudo em áreas áridas ou de baixa pluviosidade, onde a detecção se torna menos sensível. Para mitigar essas limitações, o IMERG realiza ajustes contínuos baseados em observações de superfície, aprimorando a acurácia global das estimativas (HOU et al., 2014; HUFFMAN et al., 2020).

O avanço do GPM/IMERG tem impacto direto em múltiplos setores, contribuindo para o monitoramento de desastres naturais, o planejamento de infraestrutura, a previsão meteorológica e a gestão integrada das águas. O contínuo

refinamento dos algoritmos e a integração com novas tecnologias de sensoriamento remoto prometem elevar ainda mais a precisão das medições, consolidando o sistema como ferramenta estratégica para a governança hídrica global.

3.4. Variabilidade climática e fenômenos de larga escala

O regime climático do Rio Grande do Sul é fortemente influenciado por fenômenos atmosférico-oceânicos de larga escala, especialmente o El Niño–Oscilação Sul (ENOS), que exerce papel determinante na variabilidade interanual das chuvas no sul do Brasil (GRIMM, 2011).

O ENOS caracteriza-se pela oscilação das temperaturas da superfície do mar no Pacífico Tropical, alternando entre fases El Niño (aquecimento) e La Niña (resfriamento). No Rio Grande do Sul, os episódios de El Niño tendem a gerar precipitações acima da média, principalmente na primavera e no verão, enquanto os de La Niña estão associados a períodos de estiagem e redução dos volumes pluviométricos (MATZENAUER et al., 2017).

Essa relação, contudo, não é uniforme, sendo modulada por outros modos de variabilidade climática, como a Oscilação Antártica e as anomalias térmicas do Atlântico Sul. A compreensão dessas interações é essencial para interpretar corretamente as variações observadas nas séries de precipitação derivadas do GPM/IMERG.

O Oceanic Niño Index (ONI) é considerado o índice primário para monitoramento e classificação dos eventos do ENOS. Desenvolvido e mantido pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dos Estados Unidos, o ONI baseia-se nas anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) na região do Niño 3.4, localizada entre 5°N-5°S e 120°W-170°W (SARACHIK et al., 2017).

Metodologia do ONI:

- Calculado mediante médias móveis trimestrais das anomalias de TSM;
- Utiliza como base climatológica o período de 30 anos (atualmente 1991-2020);

Classificação oficial:

- El Niño: valores $\geq +0,5^{\circ}\text{C}$ por pelo menos 5 períodos consecutivos (Sim: Usar valor de pico; Não: Use faixa de variação.);

- La Niña: valores $\leq -0,5^{\circ}\text{C}$ por pelo menos 5 períodos consecutivos (Sim: Usar valor de pico; Não: Use faixa de variação.);
- Condição neutra: valores entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ e $+0,5^{\circ}\text{C}$;

A escolha da região Niño 3.4 deve-se à sua localização central no Pacífico equatorial, onde as respostas atmosféricas às anomalias de TSM são mais pronunciadas e consistentes (TRENBERTH, 1997).

O *Southern Oscillation Index* (SOI) quantifica o componente atmosférico do ENOS, medindo a diferença de pressão ao nível do mar entre o Pacífico tropical oriental (Taiti) e ocidental (Darwin, Austrália). Desenvolvido por Sir Gilbert Walker na década de 1920, o SOI reflete a intensidade da célula de circulação de Walker (TAKAHASHI et al., 2017).

Cálculo e Interpretação do SOI:

- Baseia-se na diferença normalizada de pressão entre Taiti e Darwin;
- Valores negativos persistentes indicam enfraquecimento dos ventos alísios, característico de eventos El Niño;
- Valores positivos persistentes indicam intensificação dos ventos alísios, associados a eventos La Niña;
- A persistência dos valores por vários meses é crucial para confirmação de eventos.

A combinação dos índices ONI (componente oceânico) e SOI (componente atmosférico) proporciona uma visão abrangente da evolução do ENOS. Enquanto o ONI detecta as manifestações oceânicas, o SOI captura as respostas atmosféricas, permitindo uma análise mais robusta do fenômeno acoplado oceano-atmosfera (CAI et al., 2019).

Aplicações práticas incluem:

- Previsão climática sazonal para diferentes regiões;
- Planejamento agrícola e gestão de recursos hídricos;
- Estudos de impactos em ecossistemas marinhos e terrestres;
- Análise de eventos extremos (secas, inundações, ondas de calor).

A utilização conjunta do ONI e SOI tem se mostrado fundamental para o entendimento e previsão do ENOS. A consistência temporal desses índices, com séries históricas que remontam à década de 1950, permite não apenas o monitoramento em tempo real, mas também estudos de variabilidade climática de longo prazo e possíveis alterações associadas às mudanças climáticas globais.

O quadro 1 resume os principais eventos de El Niño e La Niña ocorridos entre 1998 e 2025, com base nos dados do Climate Prediction Center (NOAA), indicando suas intensidades e respectivos Índices Niño Oceânico (ONI).

Classificação NOAA (Intensidade para + e -):

- Fraco: anomalias de 0,5°C a 0,9°C;
- Moderado: anomalias de 1,0°C a 1,4°C;
- Forte: anomalias de 1,5°C a 1,9°C;
- Muito forte: anomalias $\geq 2,0^\circ\text{C}$.

Quadro 1 - Histórico de eventos de El Niño e La Niña (1998–2025)

Ano	Variação	Valor ONI	Fenômeno	Intensidade
1998	Nov.,Dez.,Jan.	-1,6°C	La Niña	Forte
1999	Nov.,Dez.,Jan.	-1,7°C	La Niña	Forte
2000	Dez.,Jan.,Fev.	-1,7°C	La Niña	Forte
2001	-	-0,7°C a -0,1°C	Neutro/La Niña	Fraco
2002	Out.,Nov.,Dez.	+1,3°C	El Niño	Moderado
2003	-	-0,3°C a +0,9°C	Neutro/El Niño	Fraco
2004	-	+0,2°C a +0,7°C	Neutro/El Niño	Fraco
2005	-	-0,8°C a +0,6°C	Neutro	-
2006	-	-0,9°C a +0,9°C	Neutro/El Niño	Fraco
2007	Nov.,Dez.,Jan.	-1,6°C	La Niña	Forte
2008	Dez.,Jan.,Fev.	-1,6°C	La Niña	Forte
2009	Nov.,Dez.,Jan.	+1,6°C	El Niño	Forte
2010	Ago.,Set.,Out.	-1,6°C	La Niña	Forte
2011	Dez.,Jan.,Fev.	-1,4°C	La Niña	Moderado

2012	-	-0,9°C a 0,4°C	Neutro/La Niña	Fraco
2013	-	-0,4°C a -0,2°C	Neutro	-
2014	-	-0,5°C a +0,7°C	Neutro/El Niño	Fraco
2015	Out.,Nov.,Dez.	+2,6°C	El Niño	Muito Forte
2016	Set.,Out.,Nov.	-0,7°C	La Niña	Fraco
2017	-	-1,0°C a 0,3°C	Neutro/La Niña	Moderado
2018	-	-0,9°C a +0,9°C	Neutro	-
2019	-	+0,1°C a +0,7°C	Neutro/El Niño	Fraco
2020	-	-1,3°C a +0,5°C	Neutro/La Niña	Moderado
2021	Dez.,Jan.,Fev.	-1,0°C	La Niña	Moderado
2022	Mar.,Abr.,Maio	-1,1°C	La Niña	Moderado
2023	Nov.,Dez.,Jan.	+2,0°C	El Niño	Muito Forte
2024	-	-0,5°C a +1,8°C	Neutro/ El Niño	Forte
2025	Transição	-	Transição	-

Fonte: Adaptado de CPC/NOAA.

A previsão para 2025 sugere uma transição para condições neutras ou de La Niña. O entendimento desses padrões climáticos é indispensável para diferenciar variações naturais associadas ao ENOS de possíveis tendências de longo prazo ligadas às mudanças climáticas globais, permitindo análises mais precisas da variabilidade pluviométrica regional.

3.5. Teste de Mann-Kendall

Para detectar tendências estatisticamente significativas em séries temporais climáticas e hidrológicas, utiliza-se com frequência o teste não paramétrico de Mann-Kendall. Diferentemente de métodos que pressupõem normalidade dos dados

e relações lineares estritas, esse teste apresenta robustez frente a valores atípicos e distribuições não normais, sendo amplamente empregado em análises ambientais.

O procedimento consiste em avaliar o sinal das diferenças (positivo ou negativo) entre todos os pares de observações ao longo do tempo. Sua hipótese nula (H_0) estabelece que não há tendência monotônica na série, enquanto a hipótese alternativa (H_1) indica a presença de uma tendência crescente ou decrescente.

A interpretação dos resultados baseia-se no p-valor obtido, que é comparado a um nível de significância (α), usualmente fixado em 0,05 (5%).

- Quando $p < 0,05$, rejeita-se H_0 , concluindo-se que há uma tendência estatisticamente significativa de aumento ou redução.
- Quando $p \geq 0,05$, não se rejeita H_0 , indicando que as aparentes variações podem ser explicadas pela variabilidade natural da série.

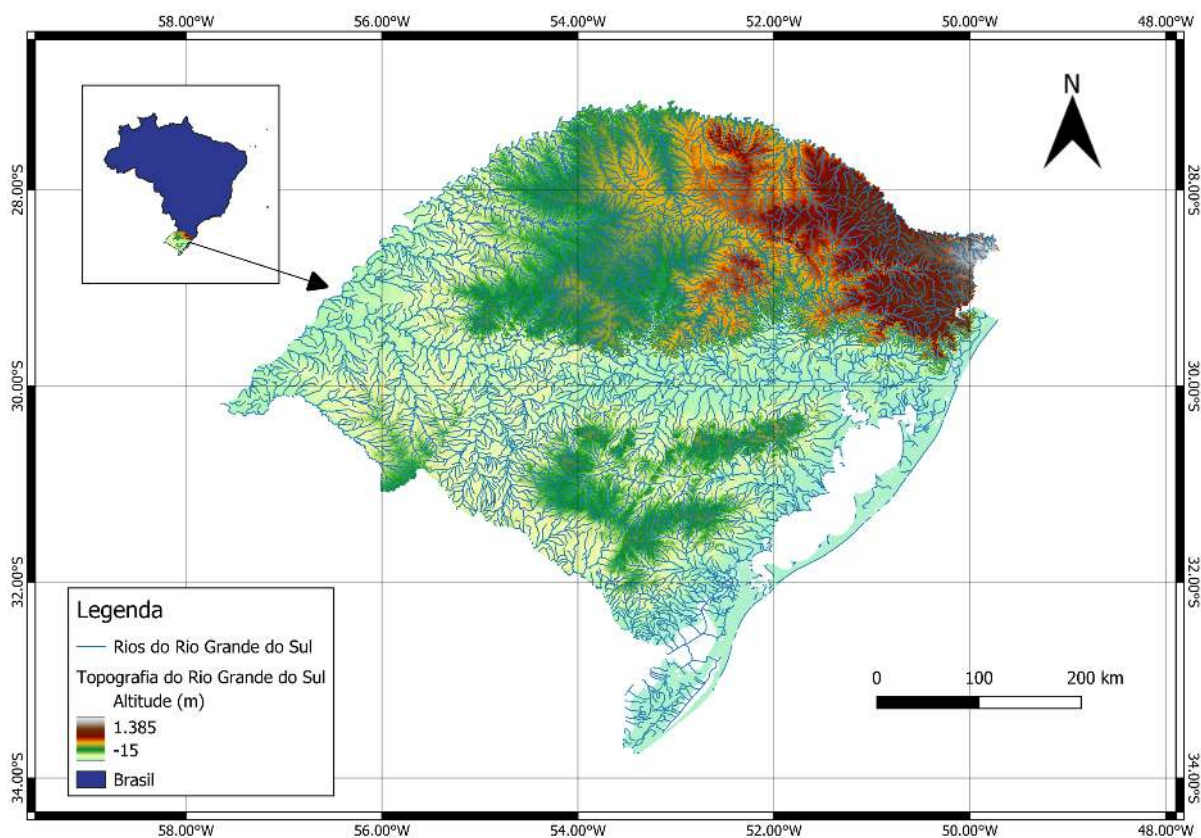
Nos gráficos analisados, essa significância é devidamente indicada para cada variável de precipitação.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

O presente estudo concentra-se na análise da precipitação em todo o estado do Rio Grande do Sul, utilizando exclusivamente dados provenientes de imagens de satélites meteorológicos. O Rio Grande do Sul, situado no extremo sul do Brasil, entre as latitudes 27°S e 34°S e longitudes 49°W e 58°W, apresenta ampla diversidade climática e hídrica, com variabilidade espacial e temporal significativa — fatores que impactam diretamente atividades econômicas essenciais, como a agricultura e a pecuária.

Figura 1 - Localização do estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Autoria própria.

4.2. Dados utilizados

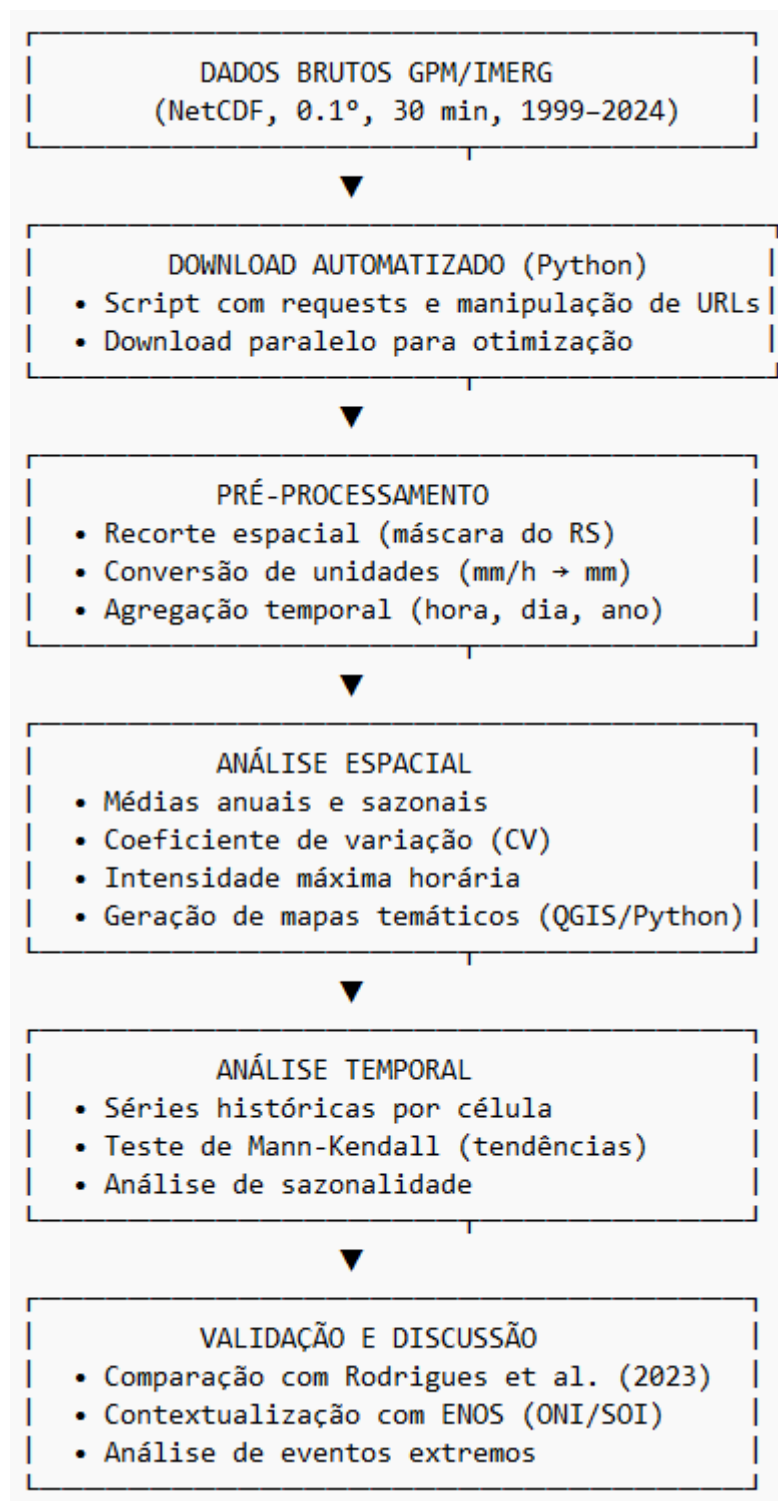
Foram utilizados dados do produto GPM/IMERG Final Run V07, disponibilizados pelo NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center. A escolha da versão '*final run*' deve-se à sua maior acurácia e calibração com dados de superfície, sendo recomendada para estudos climatológicos de longo prazo (HUFFMAN et al., 2020).

- Período: 1999 a 2024.
- Resolução temporal: 30 minutos.
- Resolução espacial: $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (~10 km).
- Formato: arquivos NetCDF.
- Variáveis: Precipitação total anual, intensidade máxima (mm/h) e coeficiente de variação.

4.3. Métodos de análise

Abaixo segue a figura 2, onde mostra o passo a passo seguido no estudo.

Figura 2: Sequência do desenvolvimento do estudo



Fonte: Autoria própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Padrões de precipitação

Nesta seção, serão apresentados mapas e gráficos da distribuição espacial e temporal da precipitação no Rio Grande do Sul, com base nos dados processados do GPM/IMERG. Serão analisados padrões sazonais e anuais, além de eventos extremos. As imagens foram analisadas anualmente, e, com base na visualização, foram obtidos os valores médios para cada região do estado para as variáveis de precipitação anual total, precipitação máxima (mm/h) e coeficiente de variação. Os extremos dos dados da série histórica foram utilizados para calcular as escalas de cores. O teste de Mann-Kendall foi empregado para identificar tendências nos dois gráficos produzidos.

Ademais, para obter uma melhor concordância com os valores de precipitação e tendências, considerou-se o estudo de Rodrigues et al. (2023), realizado na mesma área, porém com estações terrestres.

5.1.1. Precipitação anual

As imagens geradas a partir dos dados do GPM/IMERG revelam um gradiente climático marcante no território gaúcho, no qual os maiores acumulados pluviométricos anuais se concentram nas porções norte e nordeste, especialmente sobre o rebordo do planalto. Em contrapartida, os valores mais baixos são observados progressivamente em direção ao sul e ao litoral médio. Esta configuração espacial encontra ressonância direta nos levantamentos de Rodrigues et al. (2023), que, utilizando uma densa rede de pluviômetros, também identificaram os volumes mais expressivos de precipitação total anual nas mesorregiões noroeste e Nordeste, e os menores patamares na faixa costeira meridional. A convergência entre os dois conjuntos de dados — um oriundo de sensoriamento remoto e outro de medições terrestres — valida a representatividade do produto satelital para capturar os padrões climáticos regionais estabelecidos, reforçando a confiabilidade da técnica para diagnósticos em escala estadual, como apresentam as imagens do quadro 2.

A porção norte do estado, que abrange áreas como a serra gaúcha (Caxias do Sul, Bento Gonçalves) e o planalto médio (Passo Fundo, Erechim), registra os maiores volumes de precipitação anual do Rio Grande do Sul. As médias variam entre 1.600 mm e 1.800 mm, podendo ultrapassar 2.000 mm em setores mais

elevados da serra. O relevo é o principal condicionante dessa elevada pluviosidade. A serra gaúcha funciona como uma barreira natural aos ventos úmidos provenientes do atlântico, especialmente os ventos alísios de sudeste. Ao ascenderem as encostas, essas massas de ar se resfriam e condensam, originando chuvas orográficas que garantem uma distribuição relativamente uniforme ao longo do ano, sem uma estação seca bem definida (GRIMM, 2011).

A região sul, que compreende a campanha gaúcha (Bagé, Santana do Livramento) e a fronteira oeste (Uruguiana), apresenta os menores índices pluviométricos do estado, com médias anuais entre 1.200 mm e 1.400 mm. Essa área constitui uma zona de transição para o clima mais seco do Uruguai e da Argentina. O relevo suave, formado por coxilhas, não cria barreiras à circulação atmosférica, permitindo o predomínio de massas de ar continentais, mais secas. A atuação frequente de sistemas de alta pressão durante o verão e o outono reduz a formação de nuvens e chuvas, favorecendo a ocorrência de estiagens (MATZENAUER et al., 2017).

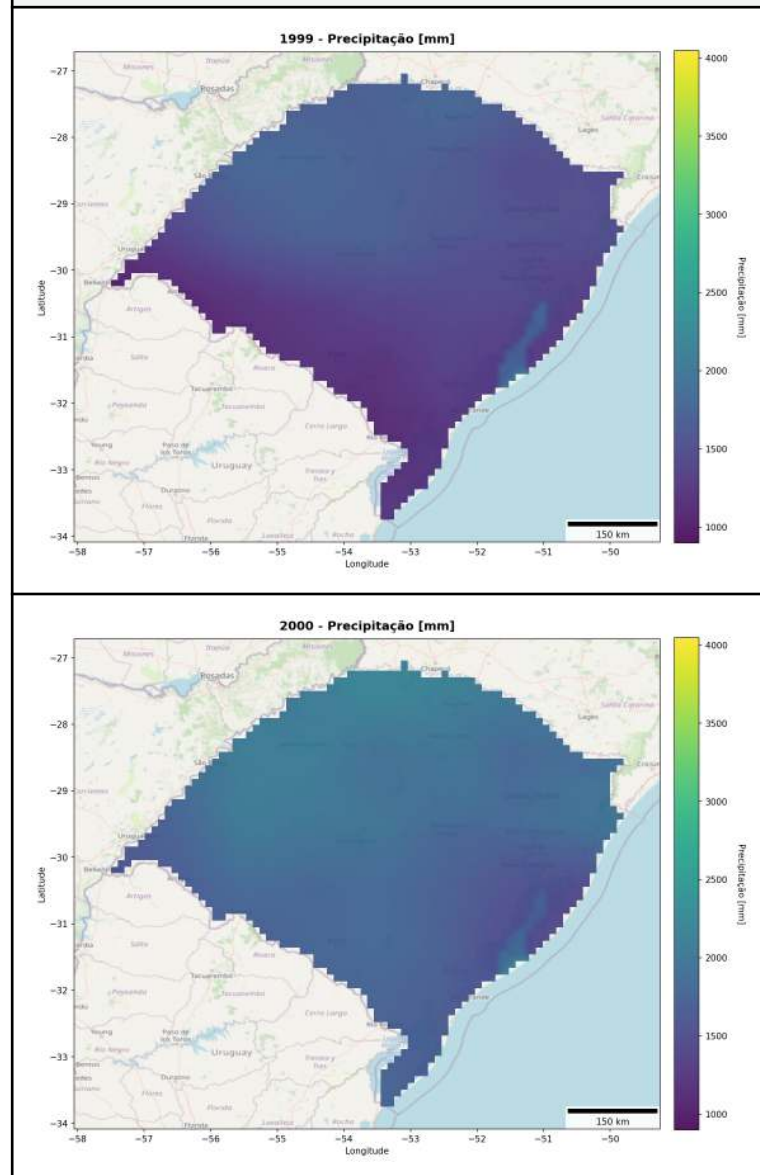
A região leste compreendendo a planície costeira e a encosta inferior do planalto (Porto Alegre, Pelotas, Rio Grande), a região leste apresenta precipitações médias anuais entre 1.400 mm e 1.600 mm. A influência direta do Oceano Atlântico é determinante para o regime de chuvas, pois a evaporação marítima mantém altos níveis de umidade na atmosfera. Frentes frias e ciclones extratropicais, frequentes no outono e inverno, intensificam a ocorrência de chuvas persistentes e volumosas, especialmente nos meses mais frios (GONÇALVES et al., 2018).

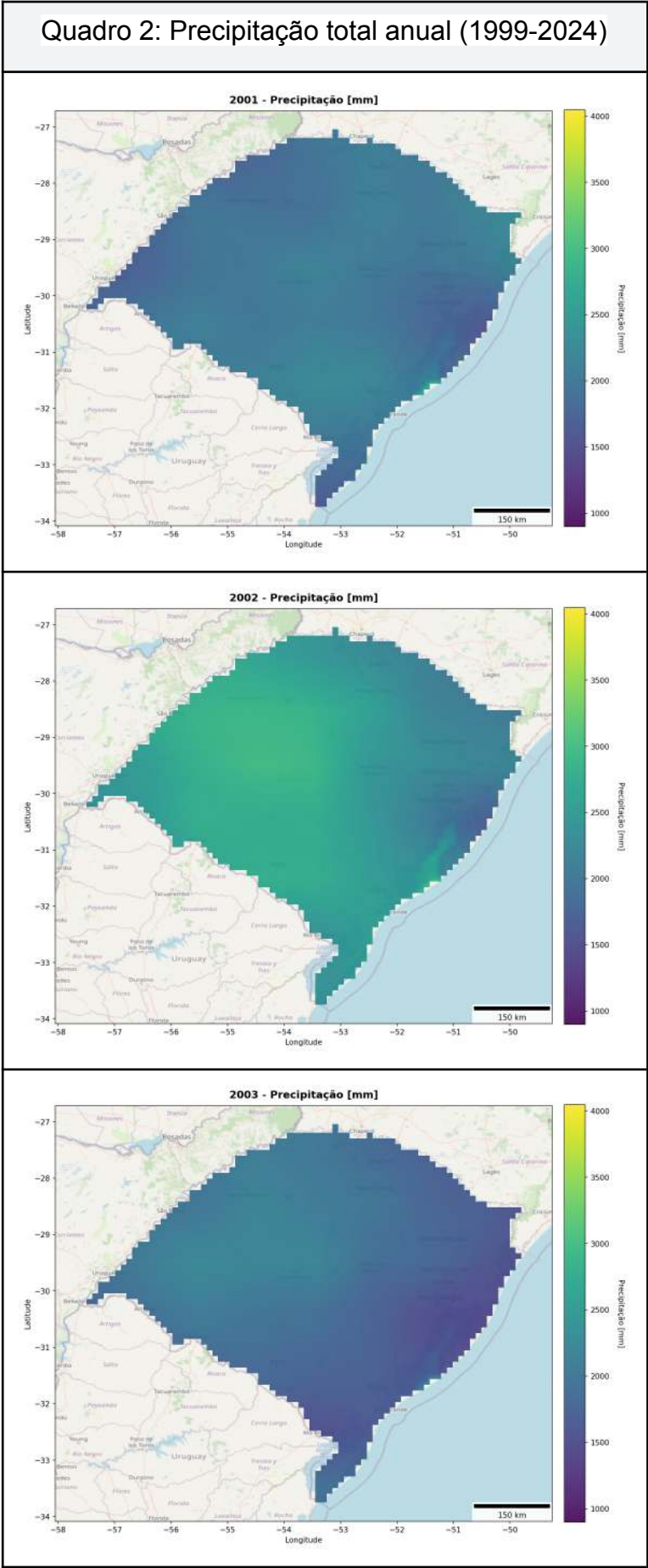
O setor oeste, que abrange o noroeste (Santa Rosa, Ijuí) e se estende até o sudoeste do estado, apresenta um comportamento intermediário de precipitação, com médias entre 1.500 mm e 1.700 mm no noroeste e valores próximos de 1.400 mm no extremo sudoeste. A influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é marcante no verão, provocando volumes expressivos de chuva nesse período. Já no inverno, a precipitação reduz-se consideravelmente. Essa alternância confere à região um regime sazonal bem definido, com verões chuvosos e invernos mais secos. Em decorrência disso, o oeste é vulnerável tanto a estiagens no inverno e primavera quanto a eventos de chuvas intensas e enchentes no verão (GRIMM et al., 2009).

Mais do que a divisão em quadrantes, a separação entre metade norte e metade sul do estado apresenta grande relevância para a compreensão do regime

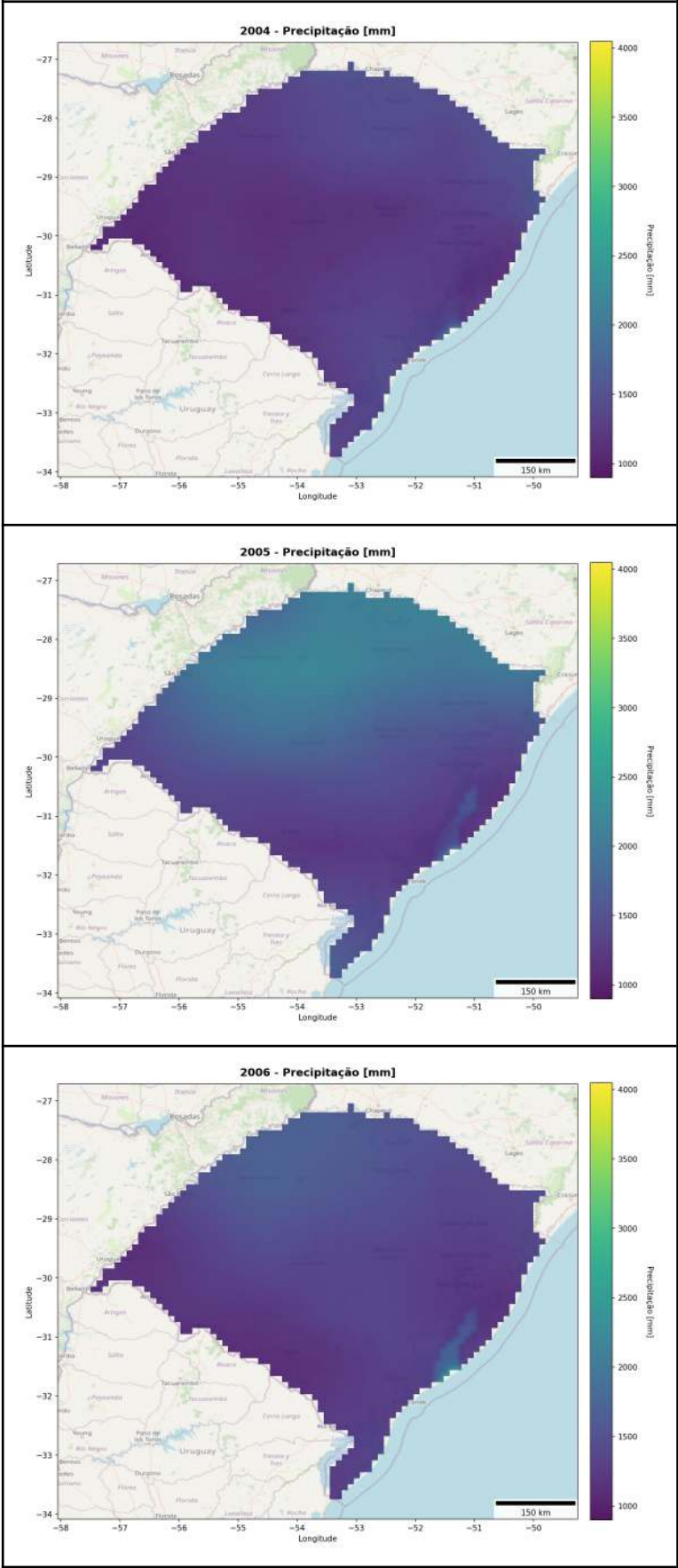
pluviométrico gaúcho. A metade sul — que engloba as regiões sul e parte do oeste — caracteriza-se pelos menores índices de precipitação e pela maior variabilidade interanual (BRUBACHER et al., 2021).

Quadro 2: Precipitação total anual (1999-2024)

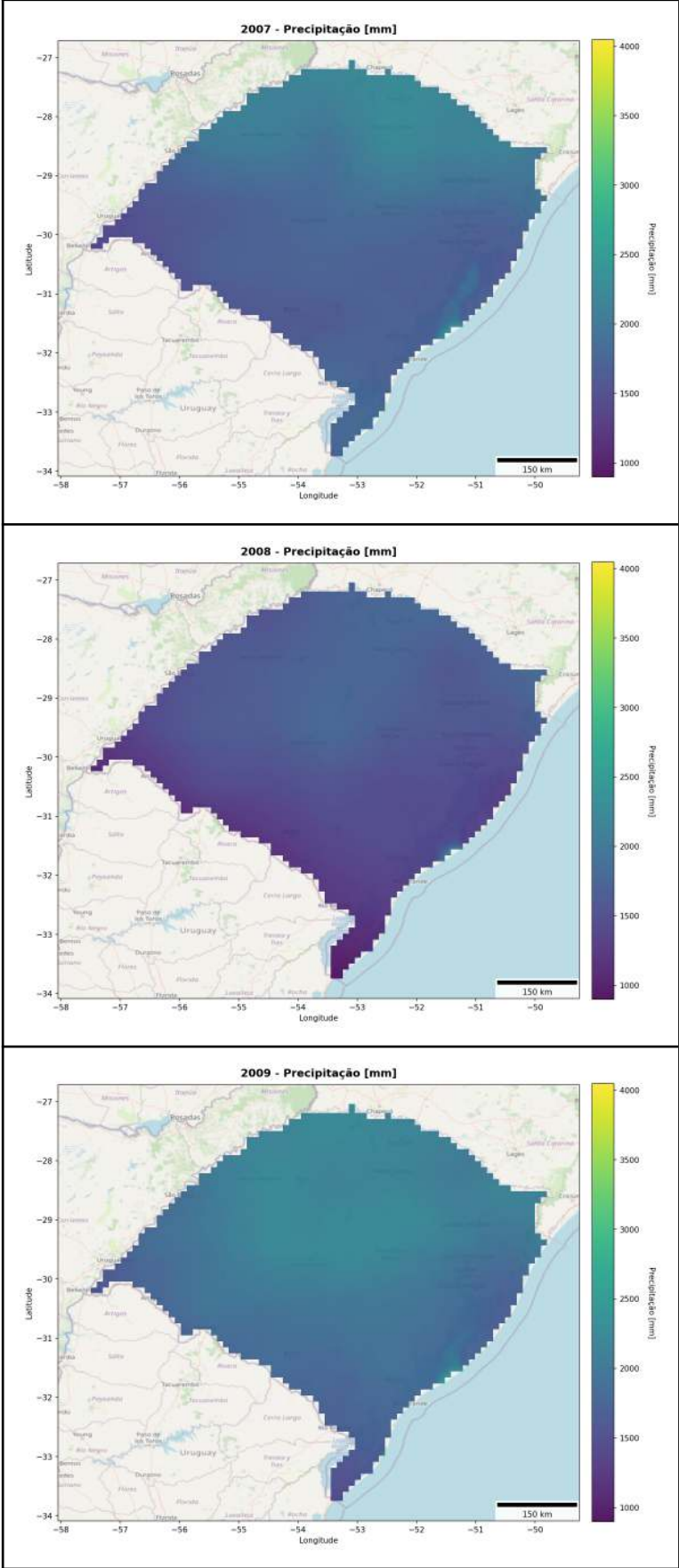




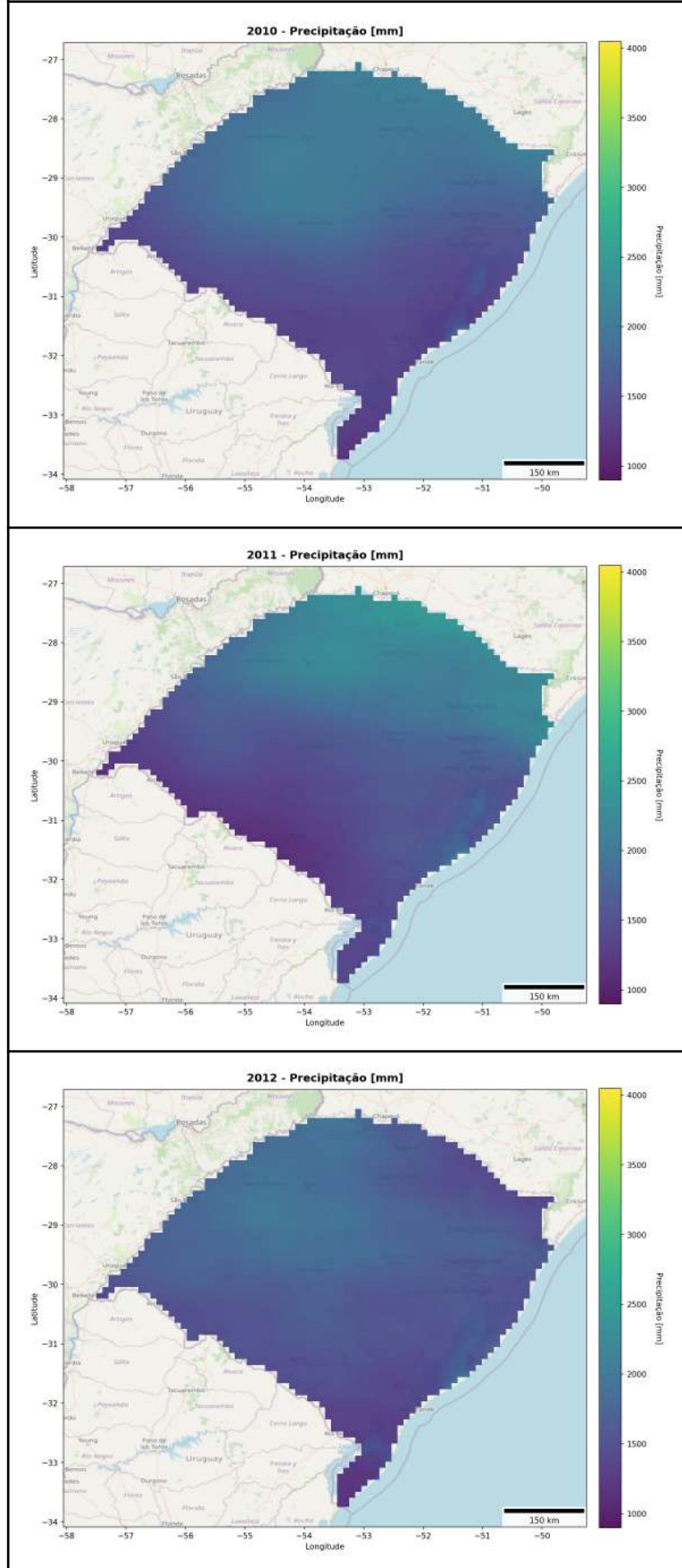
Quadro 2: Precipitação total anual (1999-2024)



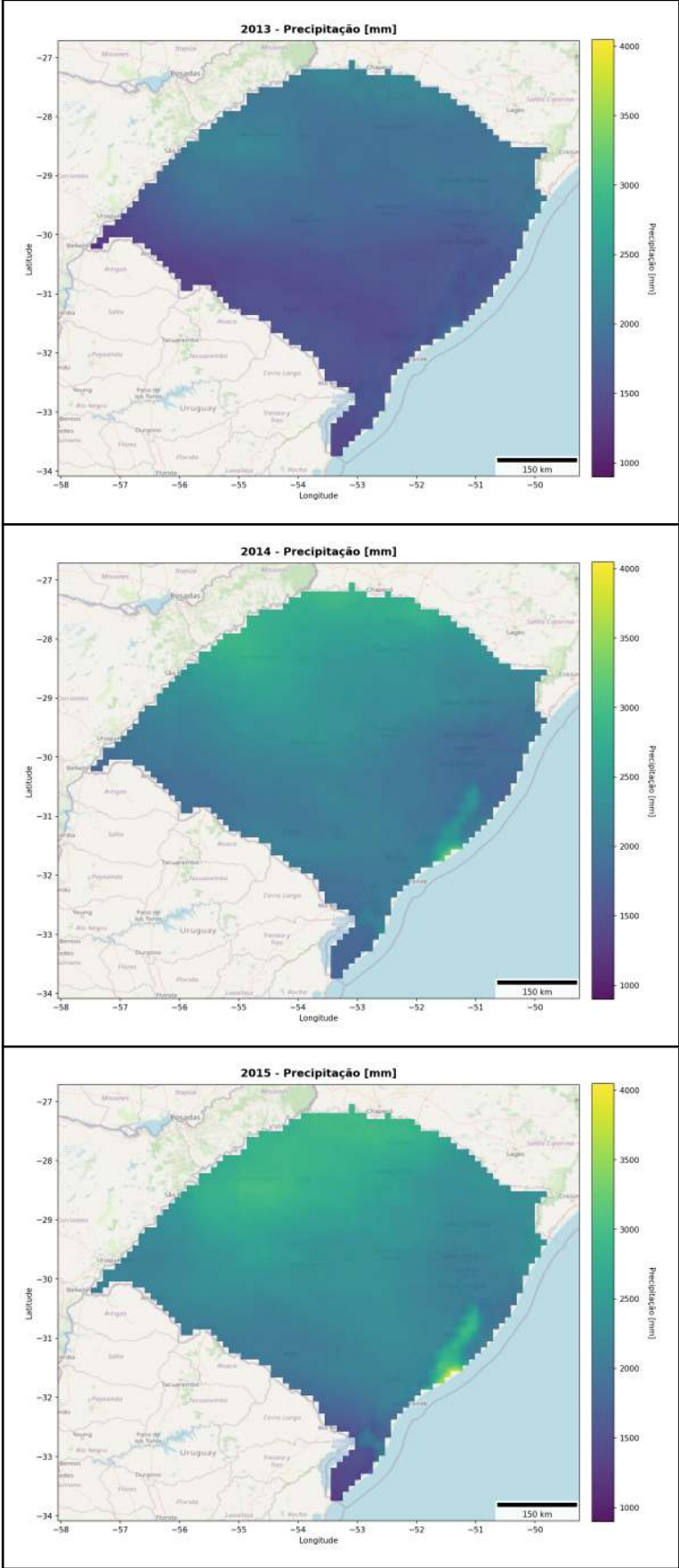
Quadro 2: Precipitação total anual (1999-2024)



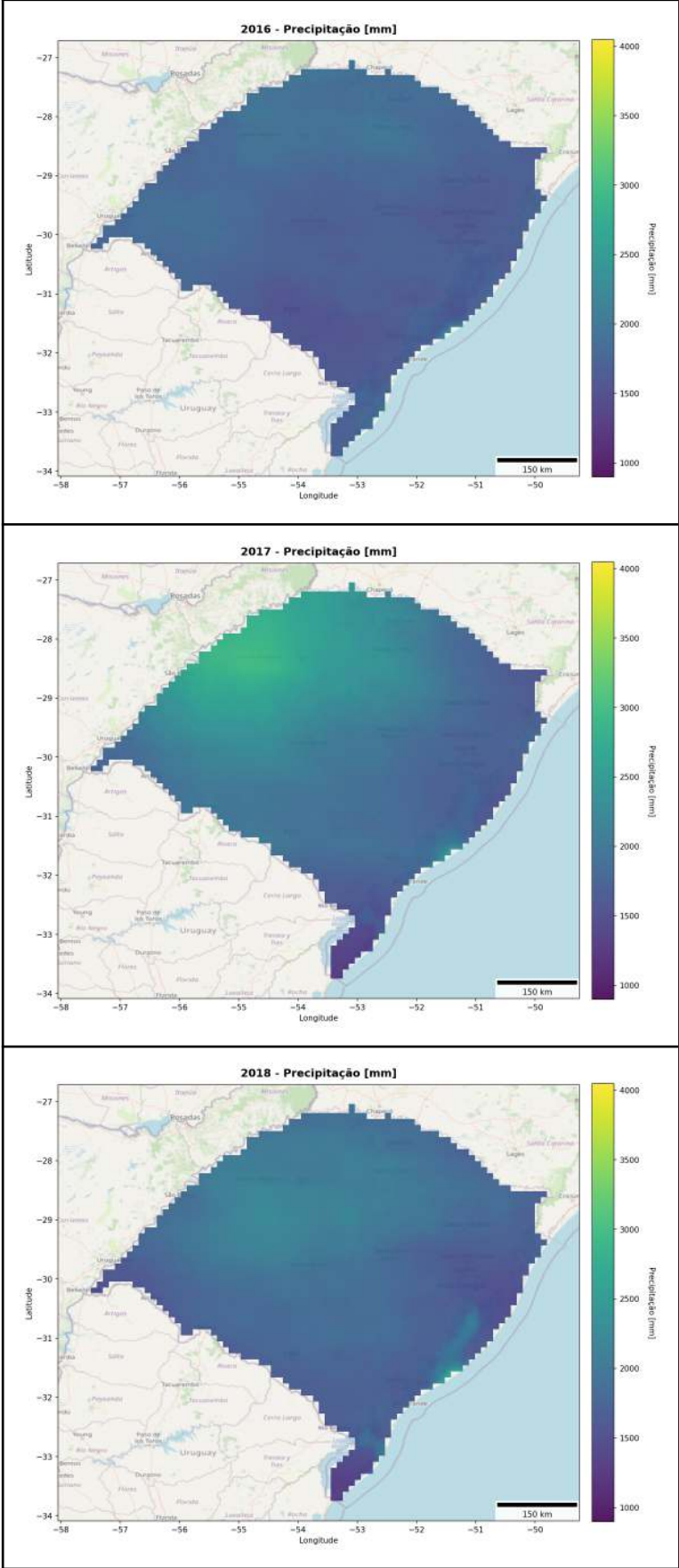
Quadro 2: Precipitação total anual (1999-2024)



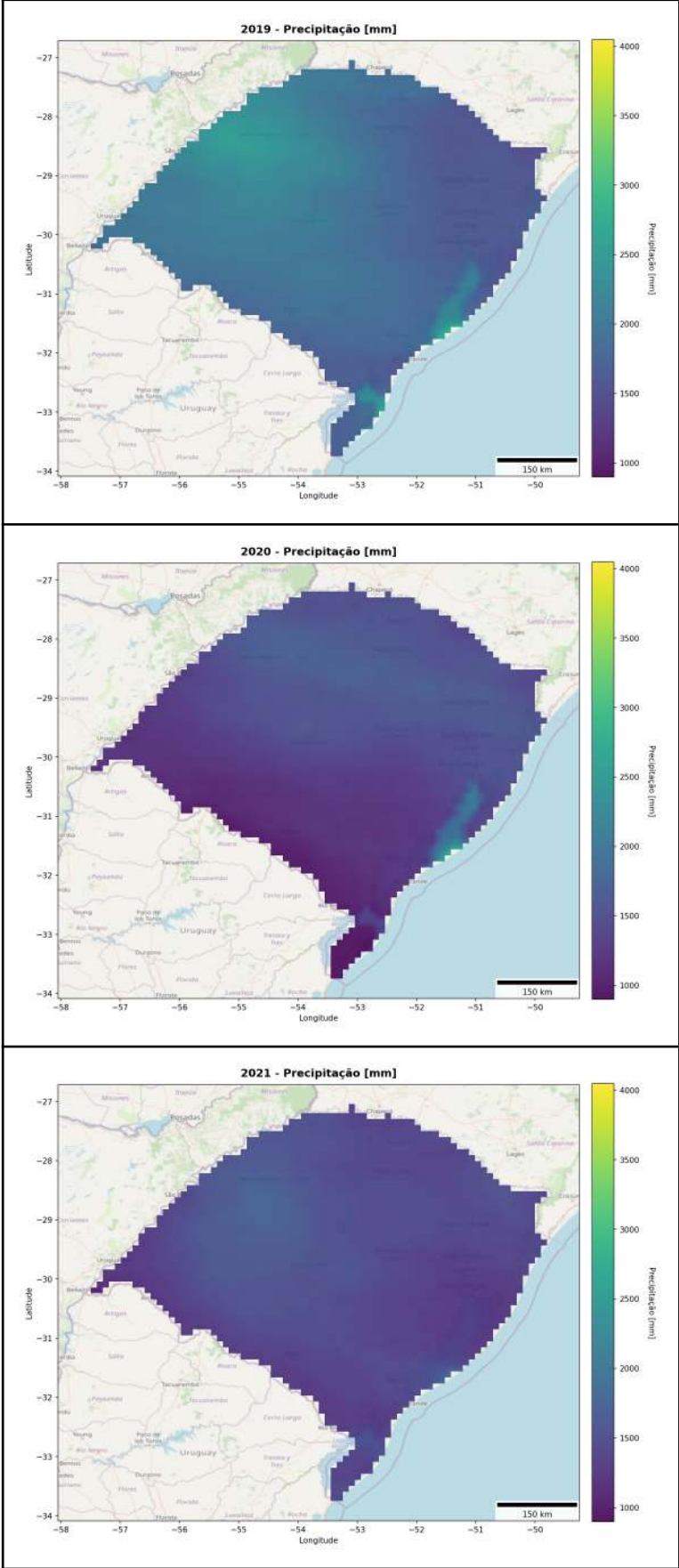
Quadro 2: Precipitação total anual (1999-2024)

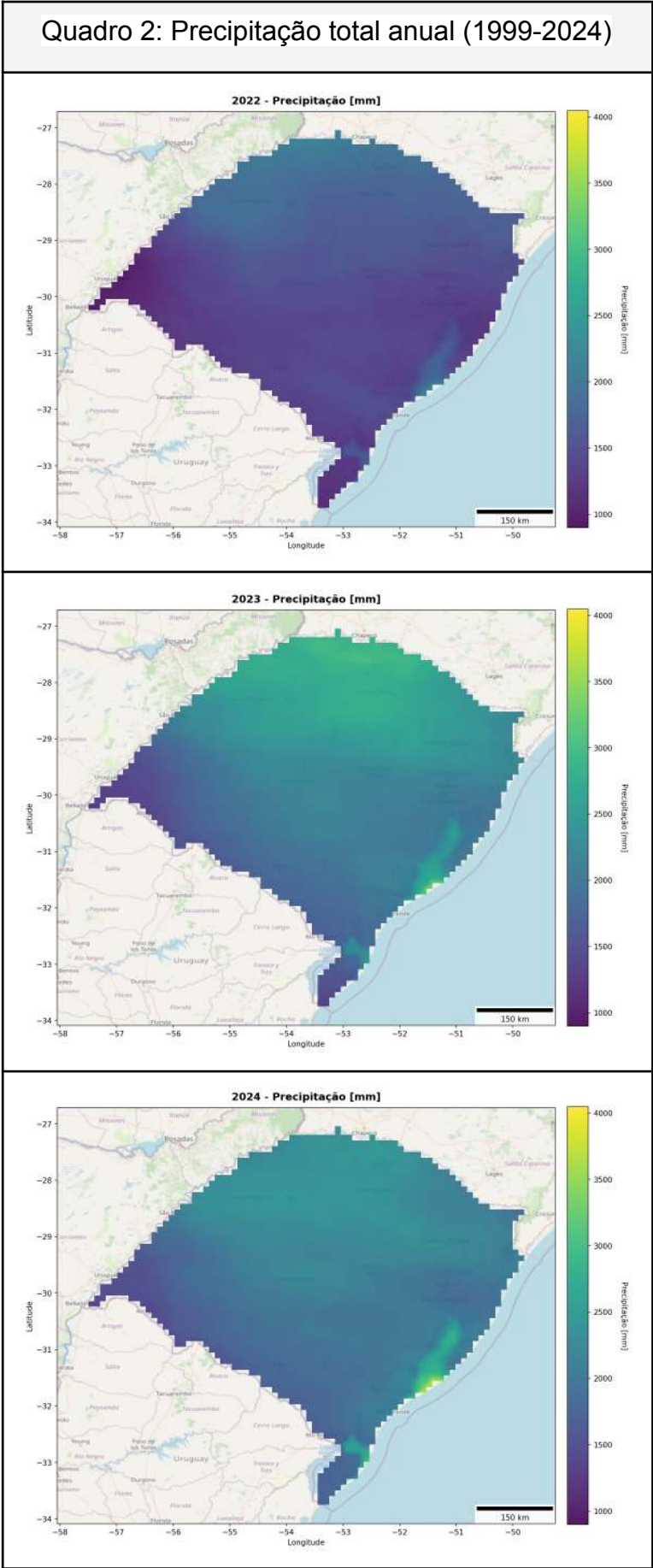


Quadro 2: Precipitação total anual (1999-2024)



Quadro 2: Precipitação total anual (1999-2024)





Fonte: Autoria própria.

5.1.2. Coeficiente de variação

O coeficiente de variação (CV) da precipitação constitui um dos principais indicadores estatísticos utilizados para avaliar a variabilidade e a estabilidade do regime de chuvas. O CV representa a razão entre o desvio padrão e a média de uma série histórica de dados, revelando o grau de irregularidade do comportamento pluviométrico em uma determinada localidade. Valores reduzidos de CV indicam maior uniformidade, enquanto valores elevados denotam forte oscilação interanual, com alternância entre períodos de estiagem e períodos chuvosos, como apresentam as imagens do quadro 3.

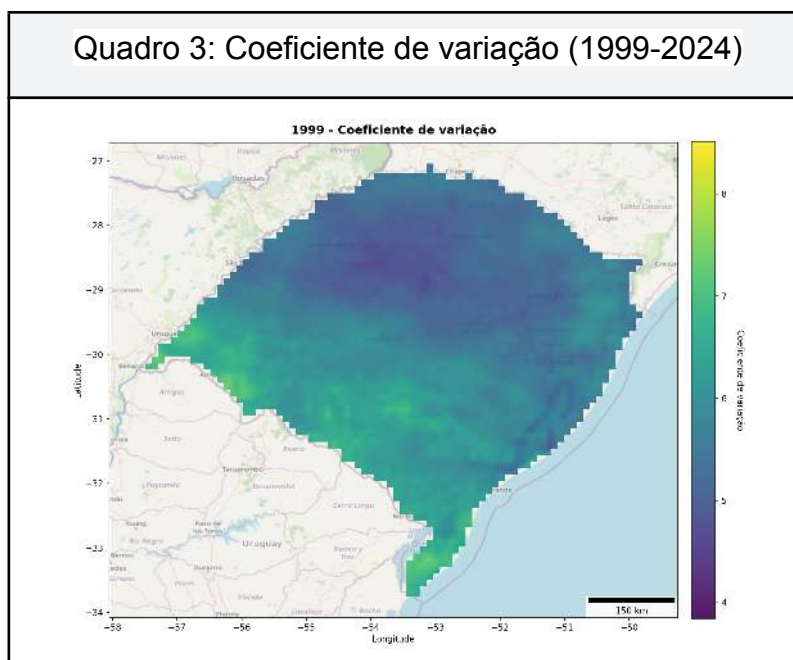
A porção norte do estado, que abrange partes do planalto médio e da metade superior da campanha, localiza-se em uma área de transição climática. Essa região sofre a influência simultânea e, por vezes, conflitante, de massas de ar úmidas provenientes da Amazônia e de sistemas frontais de origem subtropical (MATZENAUER et al., 2017). Tal configuração favorece anos de elevada pluviosidade quando há maior atuação da umidade amazônica (GRIMM et al., 2009), mas também a ocorrência de severas estiagens durante episódios de La Niña (MATZENAUER et al., 2017; CPC/NOAA, 2024). Essa alternância entre extremos hídricos resulta em um CV intermediário, evidenciando alta variabilidade anual nas condições de precipitação observadas em cada mapa.

A região sul compreendendo a campanha meridional e a fronteira oeste, o setor sul do estado apresenta os valores de CV intermediários e altos. A predominância de sistemas frontais oriundos do polo sul promove chuvas regulares e bem distribuídas ao longo do ano (GONÇALVES et al., 2018). Embora o volume anual de precipitação não figure entre os mais elevados do estado, a constância e a previsibilidade pluviométrica garantem uma estabilidade climática superior.

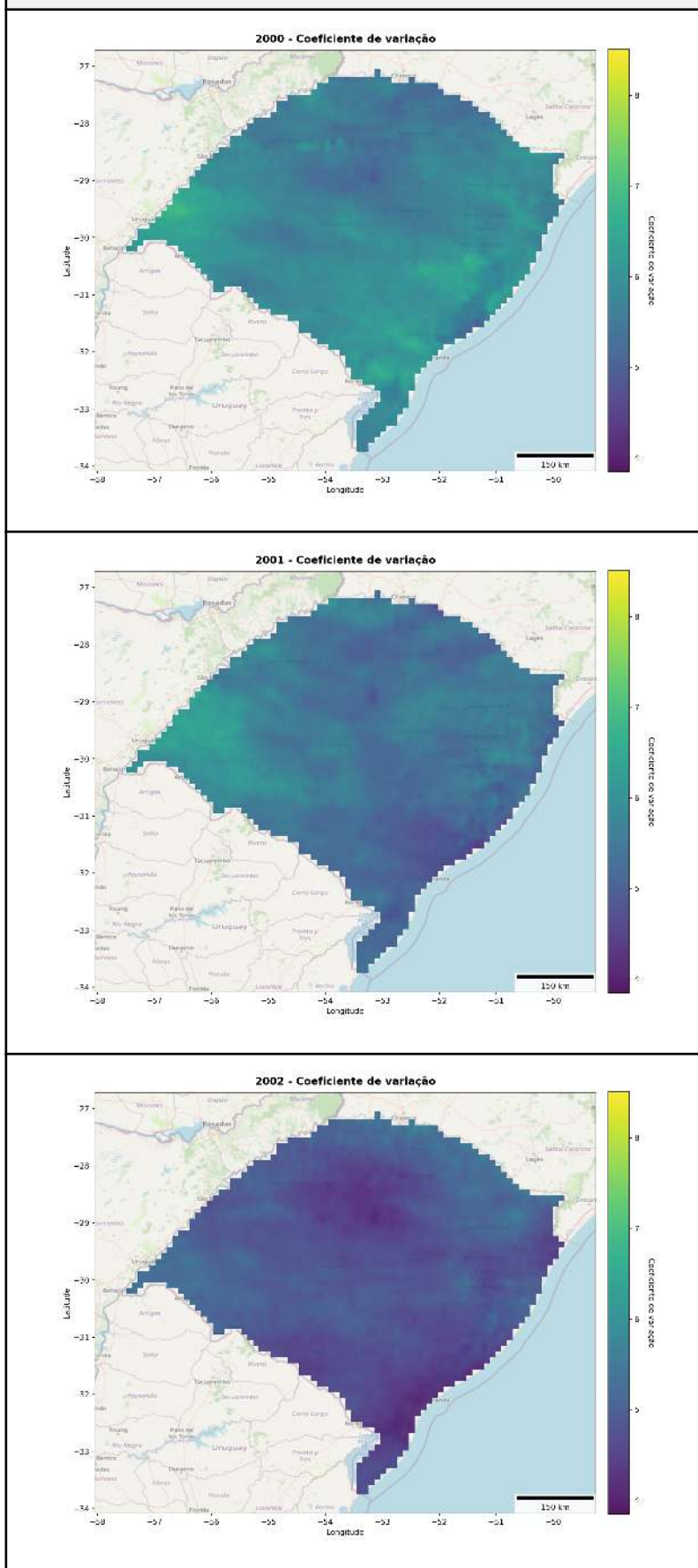
A faixa leste, abrangendo o litoral norte e a serra gaúcha, destaca-se como a mais úmida do estado, com totais anuais frequentemente superiores a 1.500 mm (BRUBACHER et al., 2021). Nessa região, os valores mais elevados de precipitação média anual resultam em menores variações relativas entre os anos, refletindo-se em valores intermediários de coeficiente de variação (CV). Essa menor variabilidade decorre do fato de que, em áreas com maior volume de chuvas, as diferenças anuais representam uma proporção menor da média total.

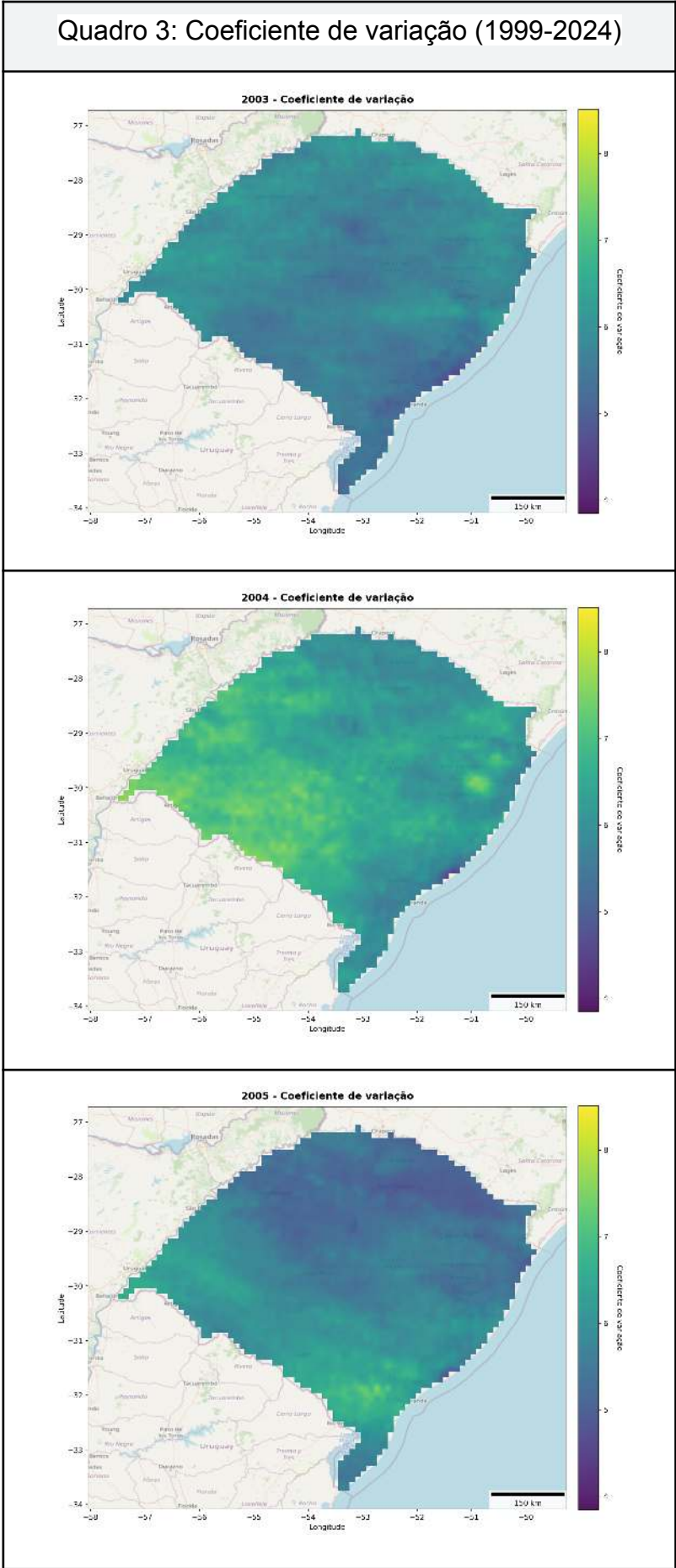
No extremo oeste, correspondente à bacia do Rio Uruguai, a precipitação apresenta comportamento singular. Trata-se de uma das áreas mais chuvosas do estado, porém sujeita a variações expressivas. A pluviosidade depende fortemente da umidade amazônica e da convecção local, resultando em tempestades de intensidade variável (GRIMM et al., 2009). A ocorrência de veranicos durante o verão contribui para oscilações nos totais anuais, o que eleva o CV em relação à faixa leste. Assim, ainda que o volume médio seja alto, a variabilidade das chuvas permanece significativa.

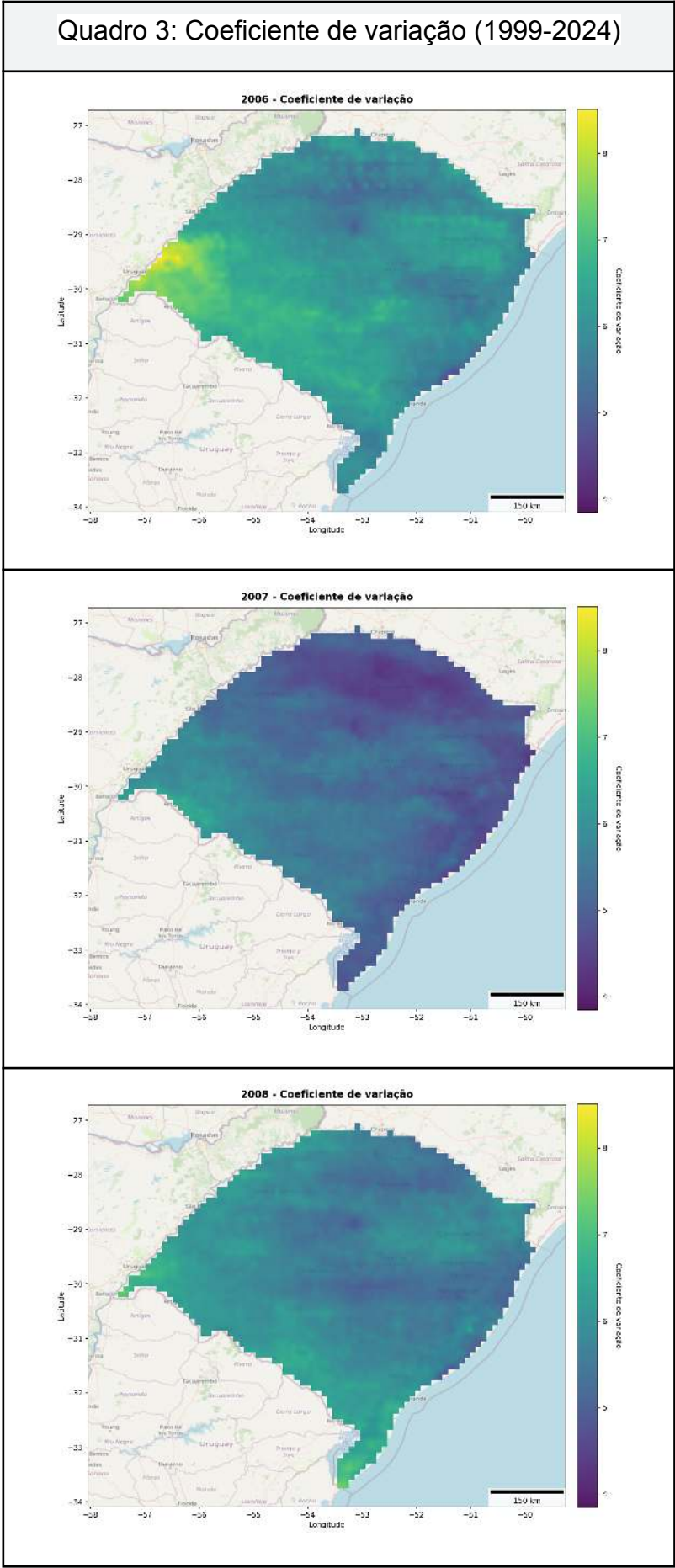
A região central do estado, abrangendo a depressão central e áreas adjacentes à capital Porto Alegre, desempenha um papel de transição entre o leste úmido e o oeste mais variável. O regime pluviométrico resulta da interação entre diferentes sistemas atmosféricos — frentes frias, brisas lacustres da Lagoa dos Patos e convecção de verão —, o que gera uma variabilidade intermediária (GONÇALVES et al., 2018). Essa condição confere ao planalto central um comportamento pluviométrico relativamente equilibrado, sem extremos marcantes de instabilidade ou regularidade.



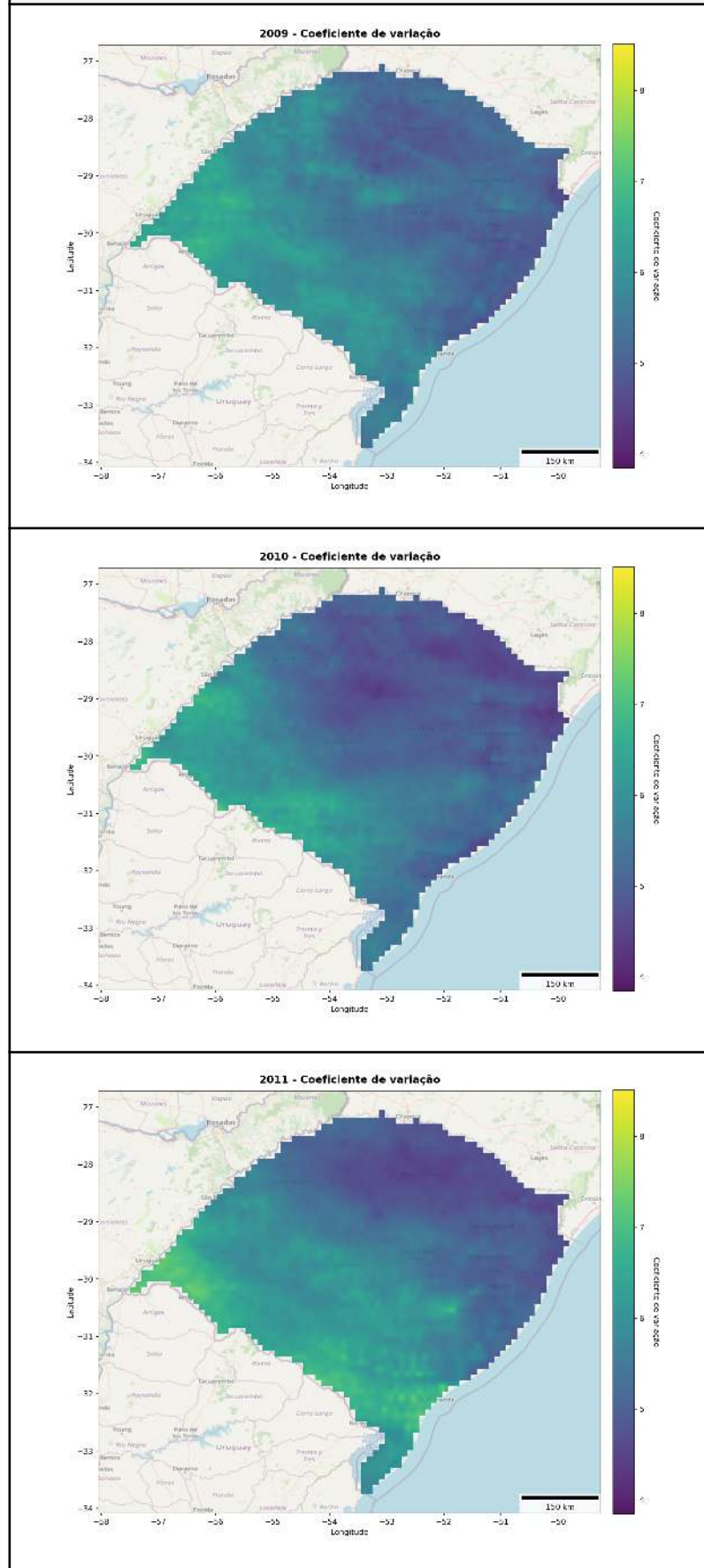
Quadro 3: Coeficiente de variação (1999-2024)



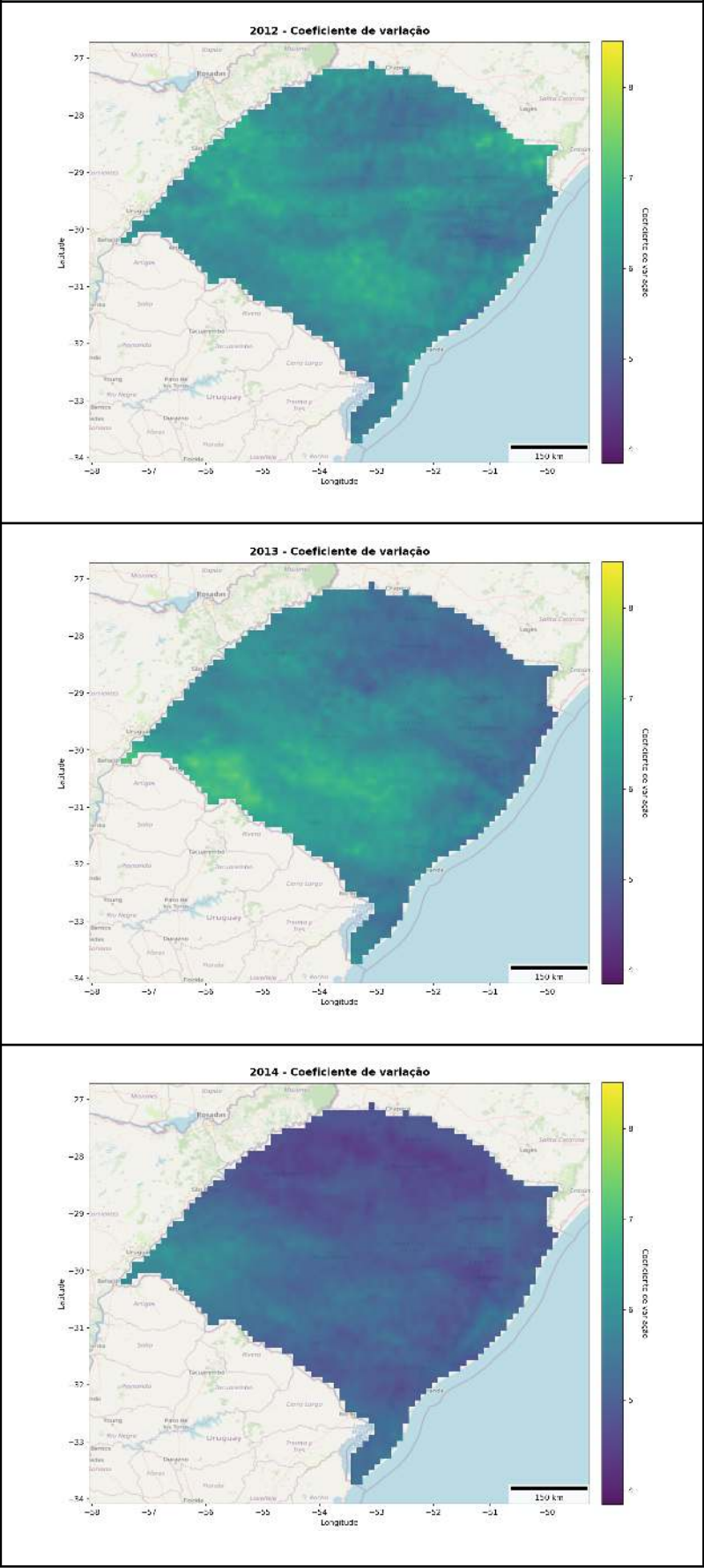




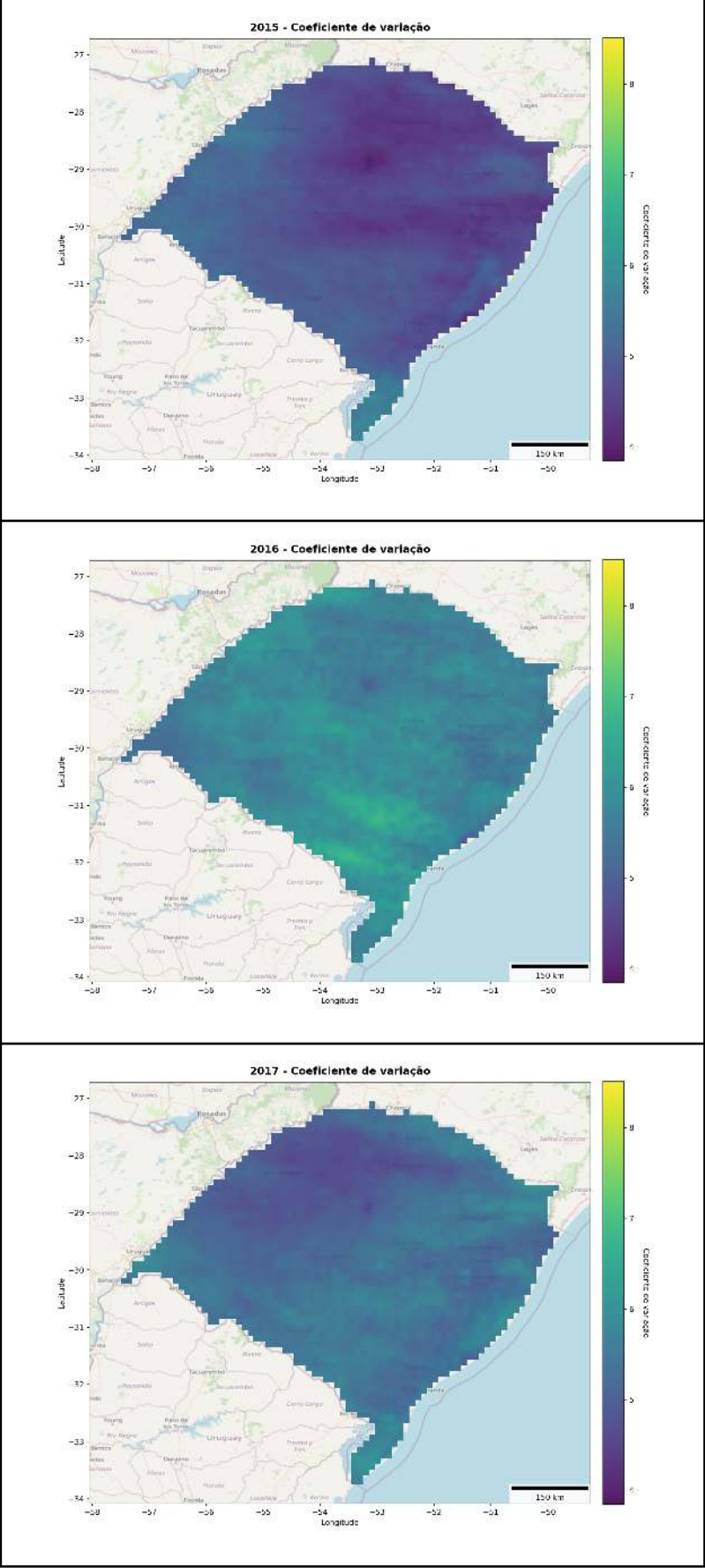
Quadro 3: Coeficiente de variação (1999-2024)



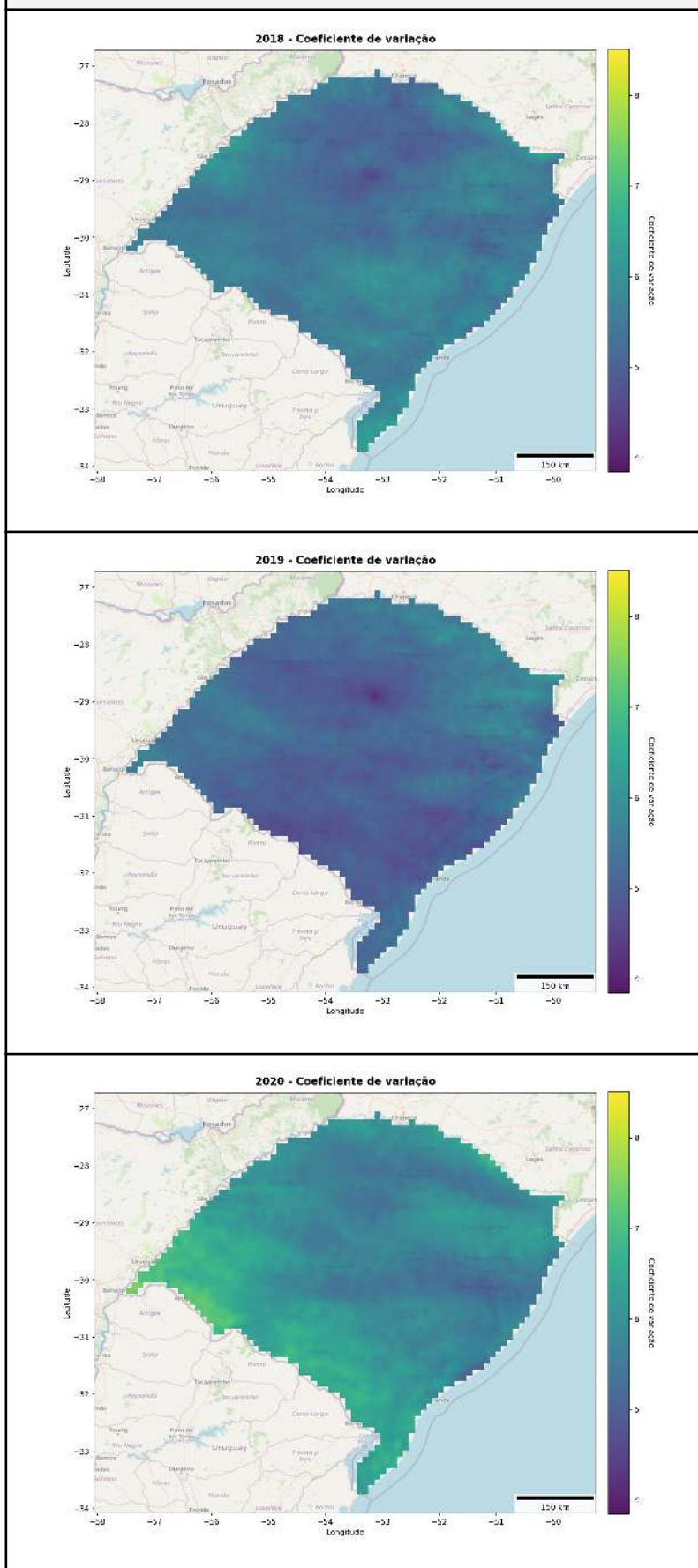
Quadro 3: Coeficiente de variação (1999-2024)



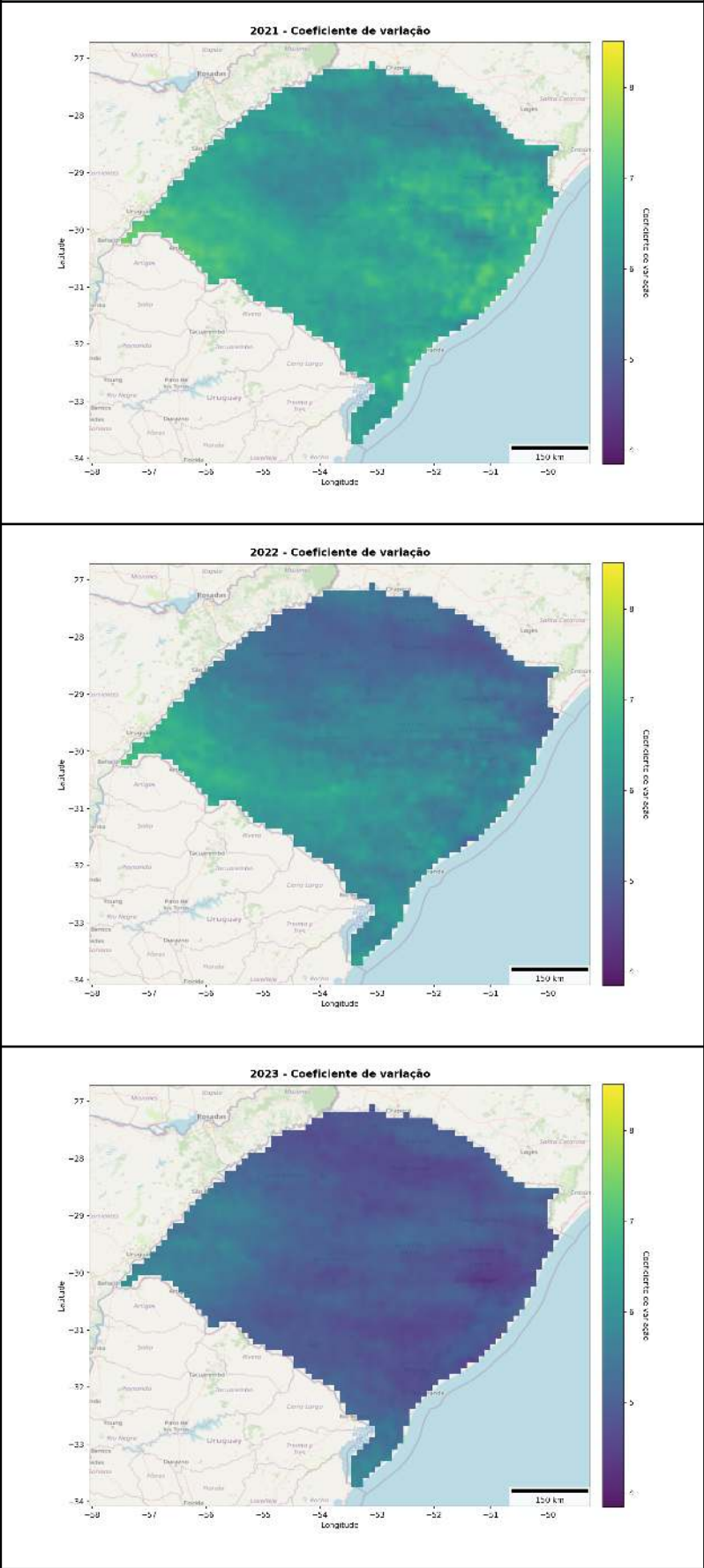
Quadro 3: Coeficiente de variação (1999-2024)

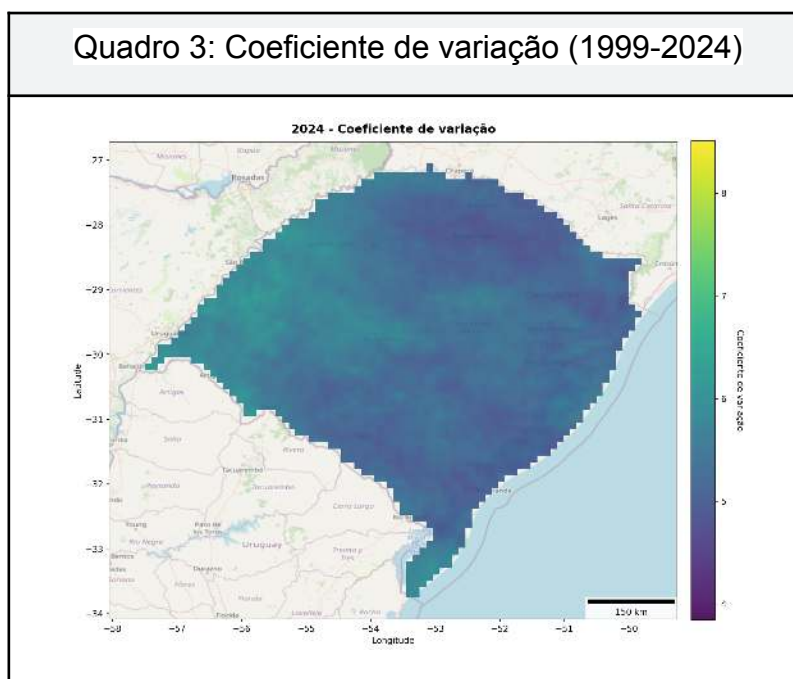


Quadro 3: Coeficiente de variação (1999-2024)



Quadro 3: Coeficiente de variação (1999-2024)





Fonte: Autoria própria.

5.1.3. Intensidade máxima

A intensidade máxima de precipitação (mm/h) constitui um parâmetro hidrometeorológico essencial para o dimensionamento de sistemas de drenagem, o ordenamento urbano e o gerenciamento de riscos associados a inundações e enxurradas. No Rio Grande do Sul, a diversidade climática e a atuação simultânea de distintos sistemas atmosféricos produzem uma distribuição espacial heterogênea desses eventos. Assim, a análise regional torna-se indispensável para compreender a dinâmica e a variabilidade desse fenômeno ao longo do território estadual.

É importante destacar que as intensidades máximas representam eventos de natureza extrema e localizada, frequentemente associados a sistemas convectivos de mesoescala. Tais formações atmosféricas são capazes de gerar chuvas de curta duração e elevada intensidade em praticamente qualquer ponto do estado. Ainda assim, padrões espaciais recorrentes podem ser identificados quando se observam séries históricas mais extensas, como apresentam as imagens do quadro 4.

As regiões norte e noroeste apresentam alguns dos valores mais elevados do Rio Grande do Sul, que decorrem principalmente da forte convecção que ocorre entre a primavera e o verão. A combinação de altas temperaturas, abundante umidade transportada pelos ventos alísios e a atuação recorrente de frentes frias e sistemas de baixa pressão vindos do noroeste argentino favorece a formação de tempestades severas e supercélulas, responsáveis por taxas de precipitação

extremamente elevadas em curtos intervalos de tempo (GRIMM et al., 2009; MATZENAUER et al., 2017).

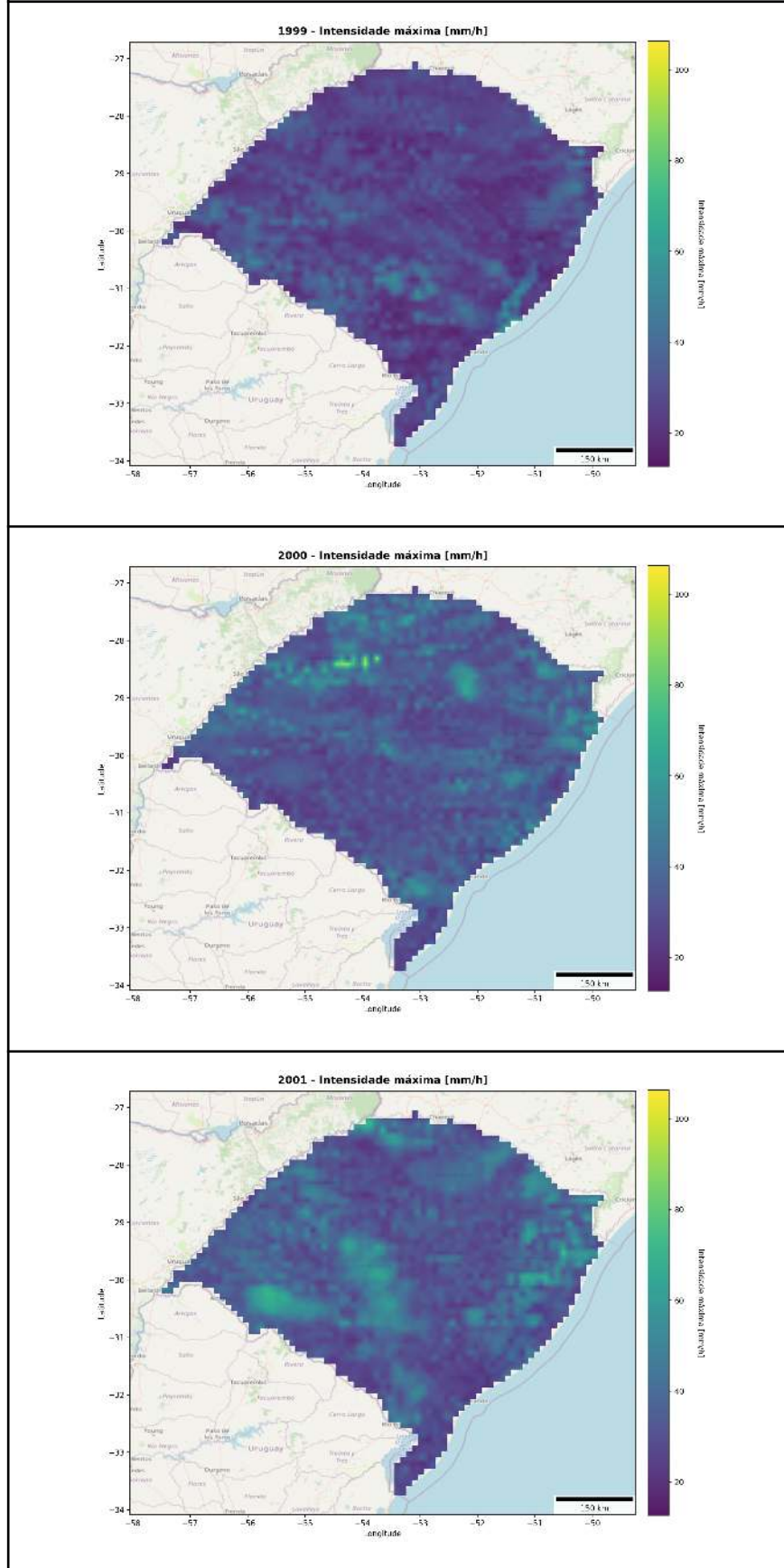
A região sul na campanha e serra do sudeste os valores tendem a ser moderados a altos, pois a proximidade com o oceano Atlântico exerce um efeito moderador sobre a instabilidade atmosférica, reduzindo a frequência de convecções profundas. Entretanto, a passagem de frentes frias intensas e a ocorrência de ciclones extratropicais no litoral sul podem gerar precipitações volumosas e persistentes, caracterizadas por duração mais longa e picos de intensidade levemente inferiores (GONÇALVES et al., 2018).

A região leste no litoral e costa apresenta comportamento duplamente influenciado, onde destaca-se a convecção costeira — resultante do contraste térmico entre o mar e o continente — e a atuação de sistemas frontais que, ao encontrarem a barreira orográfica da serra geral, tornam-se quase estacionários, intensificando os volumes de chuva (BRUBACHER et al., 2021). Além disso, episódios associados a Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) também contribuem para a ocorrência de precipitações intensas e duradouras.

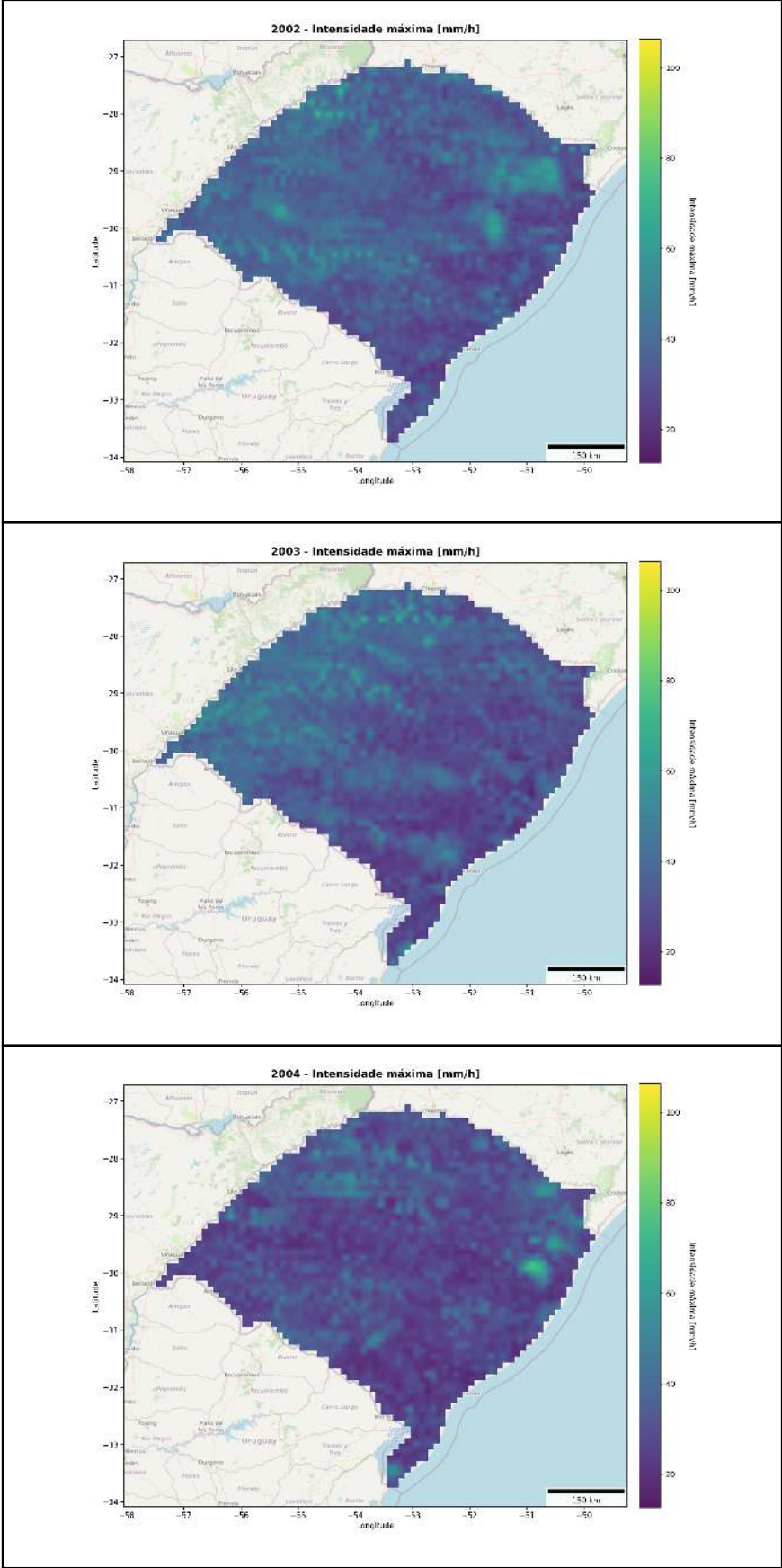
A região oeste na fronteira apresenta comportamento semelhante ao norte, onde essa variabilidade está relacionada à atuação dos mesmos sistemas convectivos intensos que atingem o norte e o noroeste, sobretudo aqueles originados no chaco paraguaio e no norte da Argentina (GRIMM et al., 2009). O calor intenso do verão fornece energia adicional para o desenvolvimento de tempestades de grande magnitude.

Já na região da serra gaúcha e planalto superior, apesar de apresentar os maiores totais anuais de precipitação do estado, os picos horários não figuram entre os mais extremos. A orografia exerce papel determinante, forçando a ascensão do ar úmido proveniente do oceano, o que favorece chuvas persistentes e volumosas (BRUBACHER et al., 2021). Quando sistemas convectivos estacionam sobre a região, podem ocorrer episódios de precipitação catastrófica, com grande potencial de causar enxurradas e deslizamentos de terra em áreas de encosta.

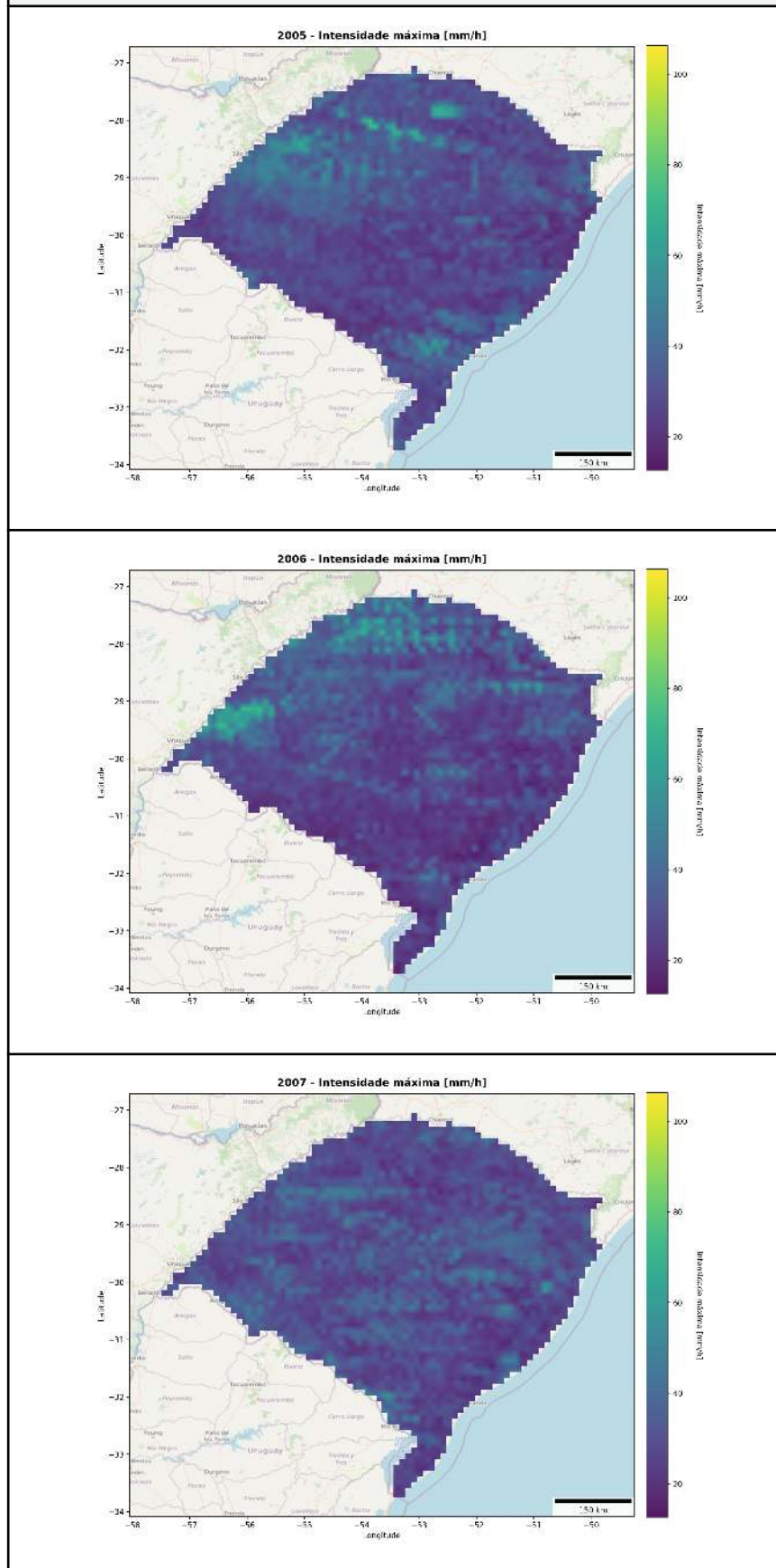
Quadro 4: Intensidade máxima em uma hora (1999-2024)



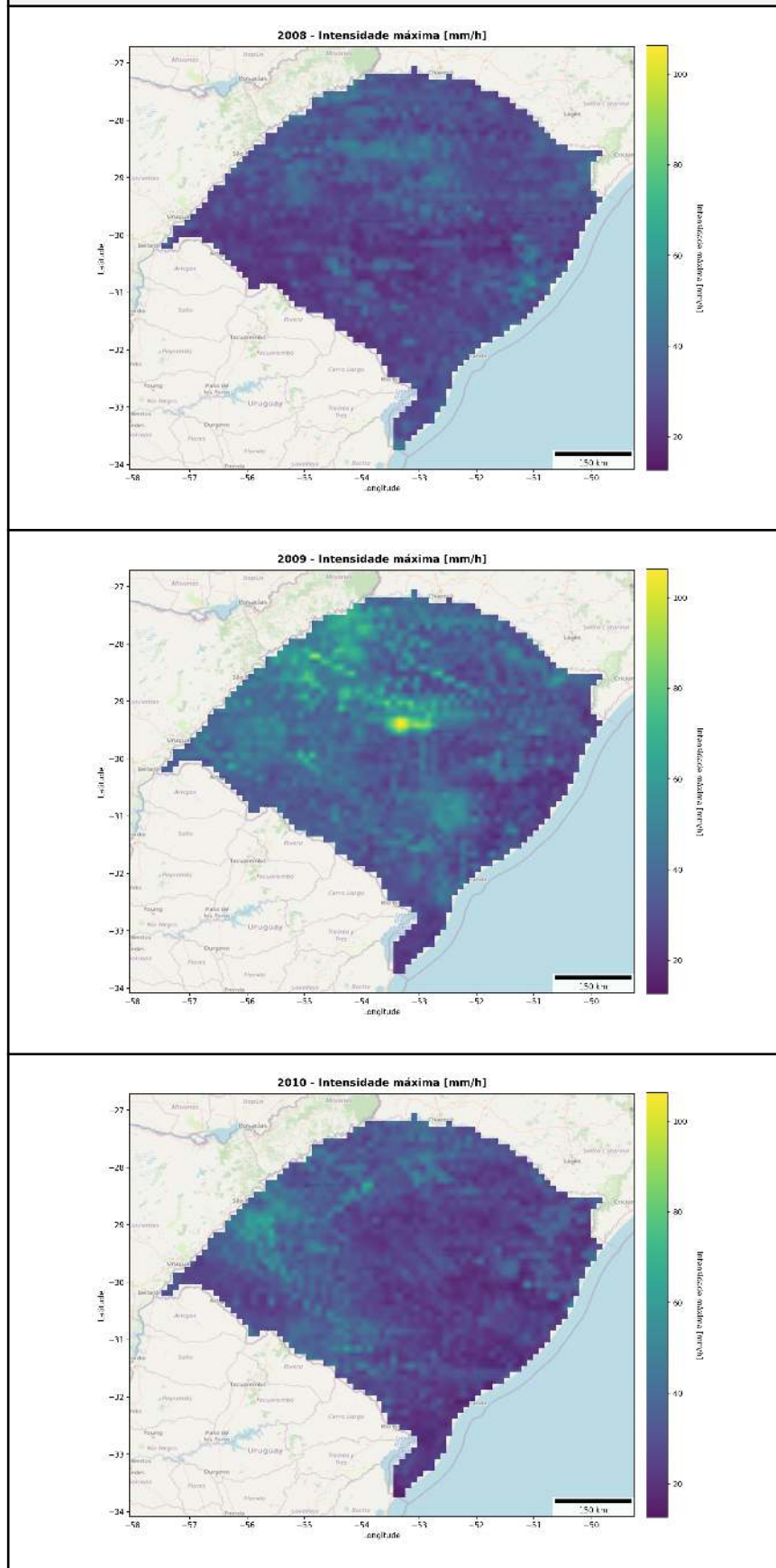
Quadro 4: Intensidade máxima em uma hora (1999-2024)



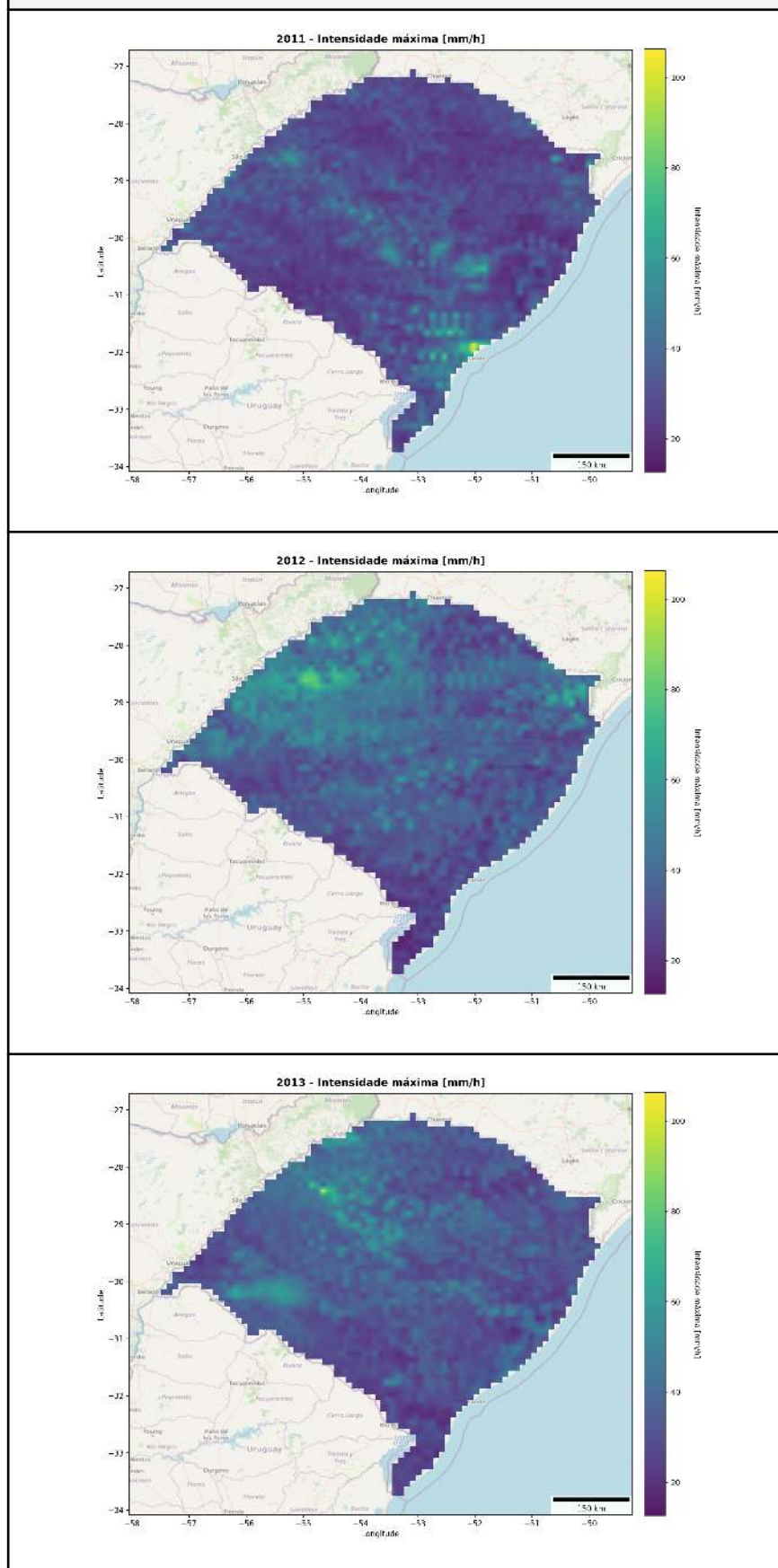
Quadro 4: Intensidade máxima em uma hora (1999-2024)



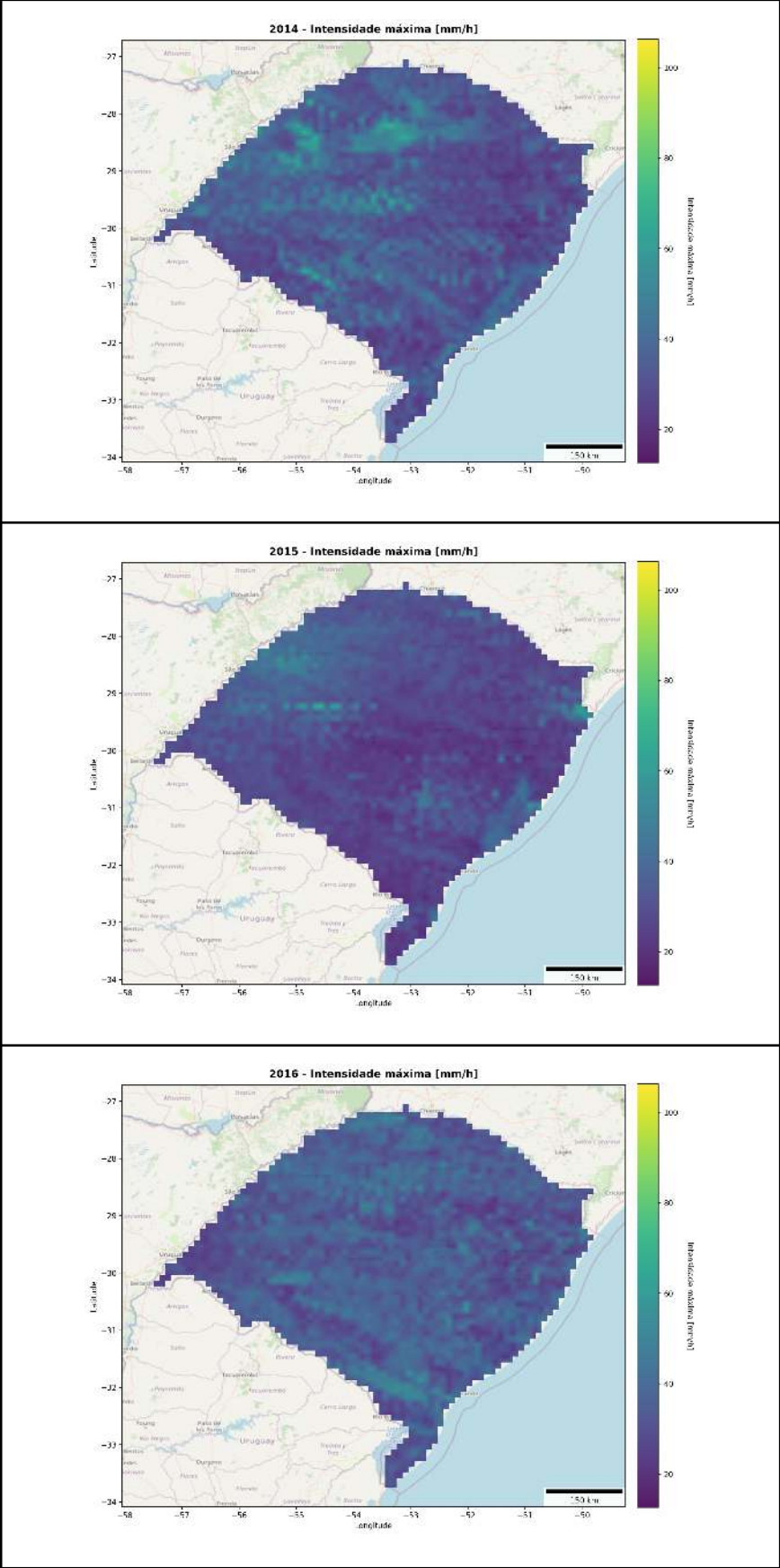
Quadro 4: Intensidade máxima em uma hora (1999-2024)



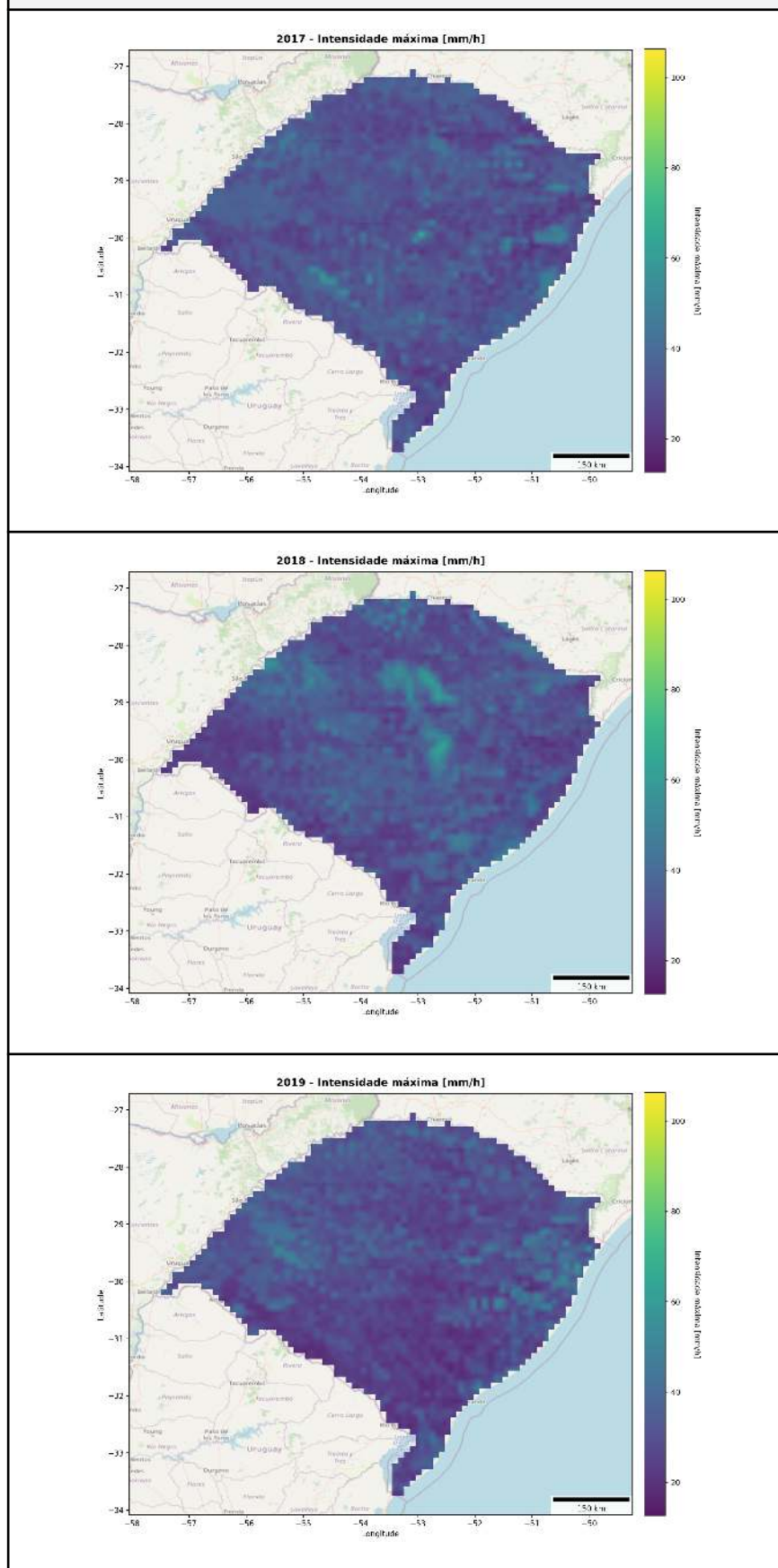
Quadro 4: Intensidade máxima em uma hora (1999-2024)



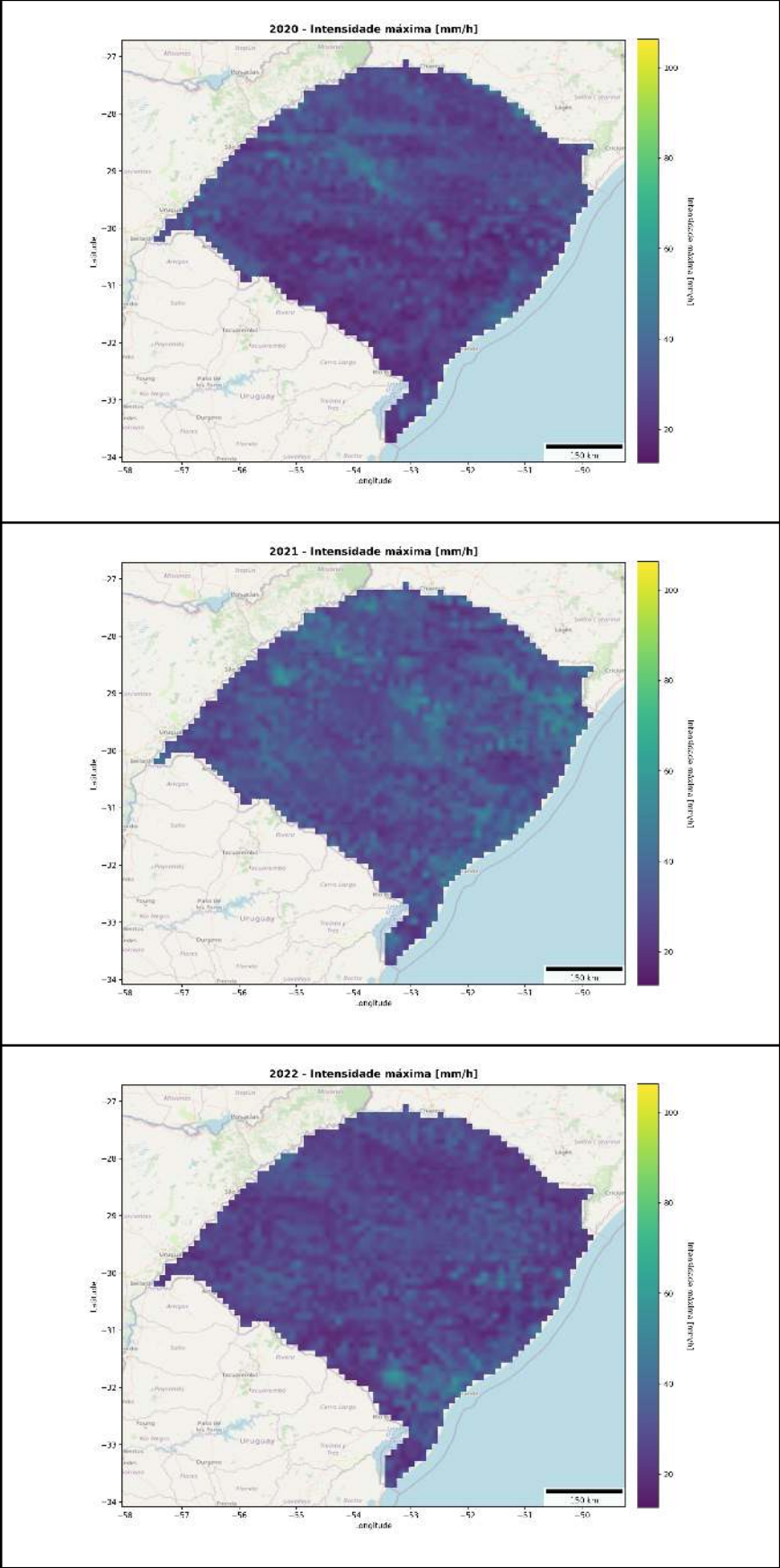
Quadro 4: Intensidade máxima em uma hora (1999-2024)



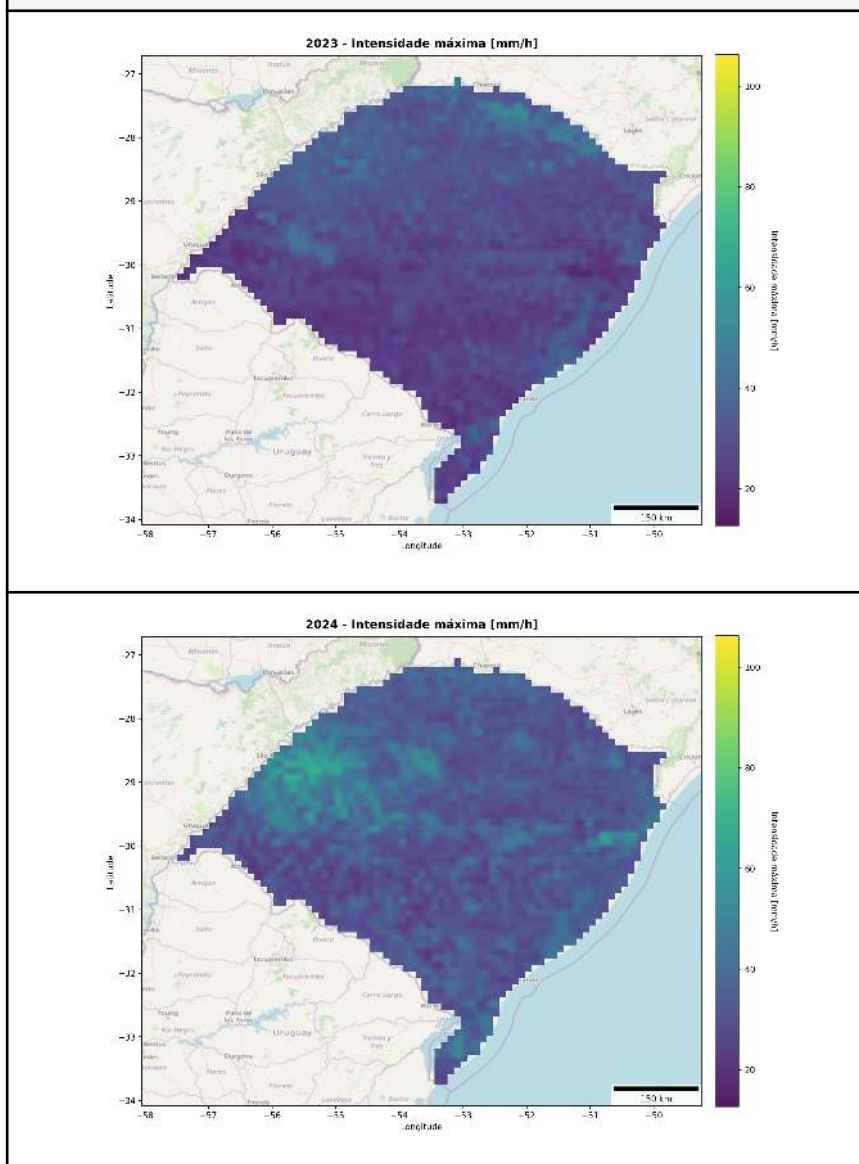
Quadro 4: Intensidade máxima em uma hora (1999-2024)



Quadro 4: Intensidade máxima em uma hora (1999-2024)



Quadro 4: Intensidade máxima em uma hora (1999-2024)



Fonte: Autoria própria.

5.1.4. Comparativo anual

A análise contempla quatro métricas principais da precipitação no período de 1999 a 2024, permitindo uma compreensão abrangente do comportamento pluviométrico ao longo do tempo, como apresenta o gráfico 1.

1º) Total precipitado anual (mm/ano)

Teste de Mann-Kendall:

- Tau (τ): 0,1077

- P-valor: 0,4536 (não significativo)

O teste de Mann-Kendall indica um aumento não estatisticamente significativo. Assim, não é possível afirmar, com 95% de confiança, que ocorreu uma mudança consistente no volume anual de precipitação. A forte variabilidade interanual, influenciada por fenômenos como El Niño e La Niña, tende a mascarar possíveis tendências de longo prazo. Em síntese, a alternância entre anos muito chuvosos e anos secos impede que o aumento se consolide como um padrão estável.

Este resultado parece, à primeira vista, contrastar com os achados de Rodrigues et al. (2023), cujo estudo de séries seculares (1912-2018) detectou tendências significativas de crescimento da precipitação total anual em diversas localidades, sobretudo no norte do Rio Grande do Sul. No entanto, essa aparente contradição pode ser elucidada ao se considerar a janela temporal distinta de cada estudo. O trabalho referencial identificou um ponto de mudança significativo por volta de 1971, a partir do qual se iniciou um patamar mais elevado de precipitação. Nossa investigação, focada nas últimas duas décadas e meia, pode estar capturando justamente um período posterior a essa mudança, onde o sinal de tendência de longo prazo se atenua e se confunde com a forte variabilidade interanual, dominada por ciclos do ENOS. Assim, não se trata de uma incompatibilidade, mas da análise de fases temporais diferentes de um processo climático não linear.

2°) Média da precipitação (mm/h)

Teste de Mann-Kendall:

- Tau (τ): 0,1015
- P-valor: 0,4806 (não significativo)

A intensidade média das chuvas manteve-se praticamente constante ao longo dos 26 anos analisados. O p-valor acima de 0,05 reflete estabilidade no comportamento médio das precipitações. O resultado estatístico reforça que as variações observadas estão dentro dos limites da flutuação climática natural, sem indícios de que as chuvas se tornaram, em média, mais intensas ou mais brandas por hora.

3°) Intensidade máxima da precipitação (mm/h)

Teste de Mann-Kendall:

- Tau (τ): -0,3969 (tendência negativa)
- P-valor: 0,0048 (significativo)

Entre todas as métricas avaliadas, esta representa o resultado mais relevante. A tendência negativa aponta uma redução na intensidade máxima das chuvas. O teste confirma que essa diminuição é estatisticamente significativa, sugerindo, que os eventos extremos anuais de precipitação vêm apresentando menor severidade. Esse comportamento pode estar relacionado a mudanças nos padrões de circulação atmosférica regional, à frequência de sistemas precipitantes, ou ainda à influência de fenômenos climáticos como El Niño e La Niña, que podem modular a intensidade das chuvas extremas ao alterar as condições dinâmicas da atmosfera – aspectos que merecem aprofundamento em estudos complementares.

Esta conclusão estabelece um contraponto importante com Rodrigues et al. (2023), que verificaram uma tendência predominante de aumento na precipitação máxima diária anual em séries pluviométricas. Para conciliar estas perspectivas, é fundamental examinar as escalas de análise envolvidas. O produto GPM/IMERG, ao fornecer uma média espacial contínua em células de aproximadamente 10 km, tem sua sensibilidade naturalmente atenuada para picos de chuva hiperlocalizados, que são perfeitamente capturados por um pluviômetro. Além disso, as métricas diferem: enquanto eles analisam o maior acumulado em 24 horas de cada ano da precipitação máxima diária anual, o TCC foca no pico de intensidade em uma hora. É plausível que, nas últimas décadas, os eventos extremos estejam se manifestando com uma assinatura temporal distinta — talvez com intensidades horárias ligeiramente menores, mas com duração suficiente para gerar totais diários elevados, ou com uma distribuição espacial mais fragmentada que o satélite suaviza. Esta divergência metodológica ressalta a complexidade do fenômeno e a necessidade de abordagens complementares.

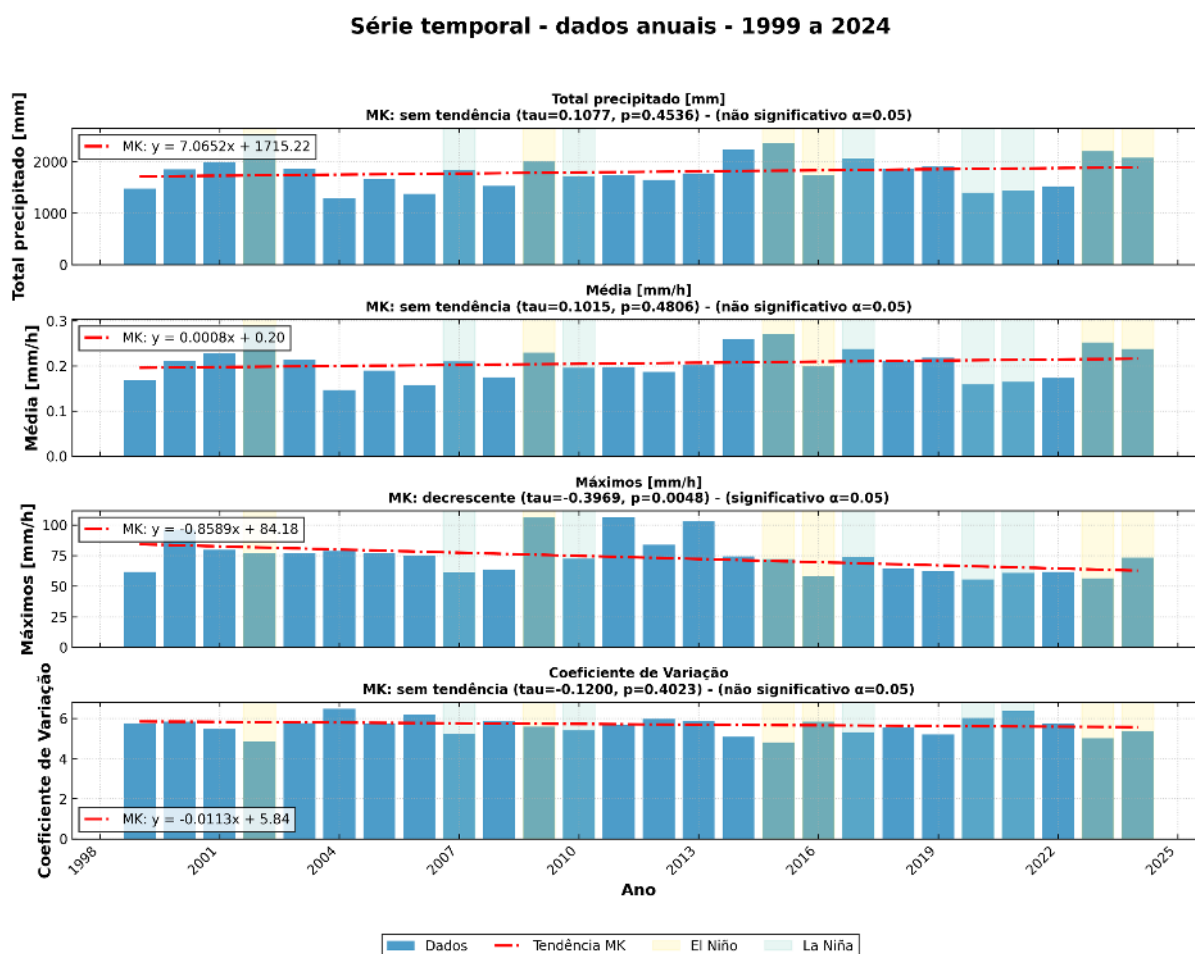
4°) Coeficiente de variação

Teste de Mann-Kendall:

- Tau (τ): -0,1200
- P-valor: 0,4023 (não significativo)

O resultado não é estatisticamente significativo. Portanto, não há evidências consistentes de que o regime de chuvas tenha se tornado mais estável ou mais irregular no período analisado.

Gráfico 1: Representativo anual com teste de Mann-Kendall (1999-2024)



Fonte: Autoria própria.

5.1.5. Comparativo diário

O resultado mais expressivo desta análise é que todas as quatro variáveis investigadas exibem tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). Essa significância pode estar ligada ao número de dados que temos, tendo um maior poder estatístico. A seguir, apresenta-se o comportamento de cada uma delas de forma detalhada, conforme o gráfico 2:

1°) Total precipitado dia (mm/dia)

Teste de Mann-Kendall:

- Tau (τ): -0,0198 (tendência negativa)
- P-valor: 0,0039 (significativo)

O teste de Mann-Kendall revelou uma tendência de leve diminuição, estatisticamente significativa. O sinal negativo de τ e de Z confirma o decrescimento, enquanto o p-valor inferior a 0,05 indica que a probabilidade de esse comportamento ser aleatório é mínima. Assim, mesmo que a variação seja discreta, observa-se um padrão consistente de redução nos valores diários ao longo dos 26 anos analisados.

2°) Média da precipitação (mm/h)

Teste de Mann-Kendall:

- Tau (τ): -0,0198 (tendência negativa)
- P-valor: 0,0039 (significativo)

De modo semelhante ao total precipitado diário, a média da intensidade diária das chuvas apresenta tendência de diminuição sutil, porém significativa. O teste de Mann-Kendall confirma sua existência. Isso indica que, ao longo do período estudado, os eventos de chuva tendem a ocorrer com intensidade ligeiramente menor.

3°) Intensidade máxima da precipitação (mm/h)

Teste de Mann-Kendall:

- Tau (τ): -0,0147 (tendência negativa)
- P-valor: 0,0312 (significativo)

A análise pelo teste de Mann-Kendall identificou uma tendência negativa (decrecente) estatisticamente significativa na intensidade máxima das precipitações. Este resultado aponta para um declínio mínimo, porém detectável, nos valores máximos horários de chuva ao longo da série histórica analisada. Contudo, a extrema suavidade desta tendência indica que, na prática, a variável se comporta com notável estabilidade, sem alterações expressivas em seu padrão ao longo do tempo.

4º) Coeficiente de variação

Teste de Mann-Kendall:

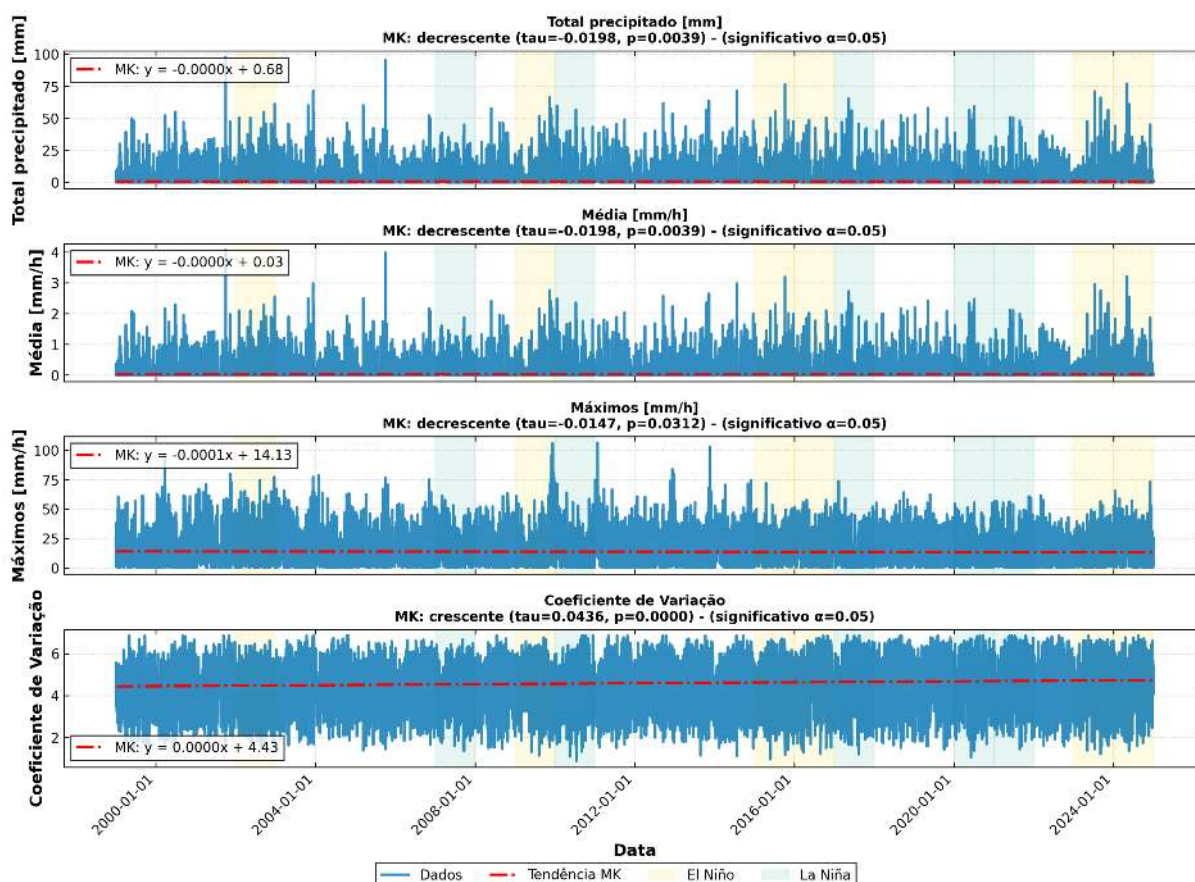
- Tau (τ): +0,0436 (tendência positiva)
- P-valor: 0,0000 (significativo)

O Coeficiente de Variação, indicador da dispersão relativa dos dados de precipitação, também apresentou tendência de aumento significativo de acordo com o Mann-Kendall. O crescimento do CV reflete uma elevação na variabilidade das chuvas, sugerindo um regime pluviométrico mais irregular e menos previsível. Esse comportamento implica uma alternância mais marcada entre períodos secos e episódios de chuva intensa, apontando para uma crescente instabilidade nas condições pluviométricas da área de estudo.

De acordo com Rodrigues et al. (2023), ambos os estudos convergem em um ponto crítico: a crescente irregularidade do regime pluviométrico. No TCC houve detecção de um aumento significativo no coeficiente de variação na escala diária, sinalizando que os dias com chuva estão se tornando mais esparsos e/ou com maior disparidade entre volumes baixos e altos. Esta constatação ecoa as conclusões de Rodrigues et al. (2023), que, através do índice de concentração de precipitação, identificaram uma distribuição mais irregular das chuvas, principalmente no outono e na mesorregião sudoeste do estado. A combinação dessas evidências — uma obtida pela análise da concentração sazonal e regional, e outra pela análise da dispersão estatística diária — constrói um quadro robusto e preocupante. Ele aponta para um clima mais caprichoso, com alternâncias mais bruscas entre períodos de estiagem e episódios concentrados de precipitação, um cenário que amplifica os desafios para a agricultura, o abastecimento hídrico e a gestão de riscos de desastres.

Gráfico 2: Representativo diário com teste de Mann-Kendall (1999-2024)

Série temporal - dados diários - 01/01/1999 a 31/12/2024



Fonte: Autoria própria.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa analisou o comportamento espaço-temporal da precipitação no Rio Grande do Sul entre 1999 e 2024, utilizando exclusivamente dados do produto GPM/IMERG. O objetivo geral de analisar a dinâmica pluviométrica foi atendido por meio da automatização do *download* e processamento, do cálculo de indicadores espaciais e da aplicação de testes de tendência, conforme proposto na metodologia.

Os resultados confirmaram a eficácia do GPM/IMERG na representação dos padrões climáticos regionais, identificando um gradiente pluviométrico decrescente do norte para o sul, com maiores acumulados anuais na serra gaúcha e menores volumes na campanha. A quantificação da variabilidade espacial, um dos objetivos específicos, permitiu delimitar zonas de maior intensidade pluviométrica,

especialmente nas regiões norte e noroeste, áreas mais susceptíveis a eventos convectivos intensos.

Na escala temporal, o teste de Mann-Kendall aplicado conforme a metodologia proposta não detectou tendência significativa nos totais anuais, mas revelou um declínio significativo na intensidade máxima horária e um aumento na variabilidade diária. Esses achados dialogam diretamente com estudos recentes publicados na Revista Brasileira de Climatologia, como Rodrigues et al. (2023), que também apontam para uma crescente irregularidade no regime de chuvas no estado.

Em síntese, este trabalho demonstrou que o uso exclusivo de dados de sensoriamento remoto é viável e robusto para o monitoramento pluviométrico em escala estadual, oferecendo uma base consistente para a gestão hídrica e a adaptação climática. Recomenda-se a continuidade dos estudos com a integração de dados de superfície para validação pontual e a ampliação das análises para eventos extremos específicos.

REFERÊNCIAS

ABERS, R. N. **Organizing for governance**: building collaboration in Brazilian river basins. *World Development*, v. 35, n. 8, p. 1450–1463, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X07000757>. Acesso em: 14 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: informe 2024. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 28 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 470, 9 jan. 1997. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/551309>. Acesso em: 28 maio 2025.

BRUBACHER, J. P. et al. **Banco de dados espacial de precipitação do estado do Rio Grande do Sul**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, n. 3, p. 471–493, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/d6smph7RGwzv4d6XDnnh4kd/?lang=pt>. Acesso em: 28 maio 2025.

CAI, W. et al. **Pantropical climate interactions**. *Science*, v. 363, n. 6430, p. 1-11, 2019. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aav4236>. Acesso em: 12 out. 2025.

CAMPOS, J. F. et al. **Aplicações do sensoriamento remoto em estudos hídricos**. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/09.16.17.45/doc/97573.pdf>. Acesso em: 12 set. 2025.

CPC/NOAA. **Historical El Niño/La Niña Episodes (1950-present)**. Climate Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024. Disponível em: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 10 out. 2025.

GLEICK, P. H. **The changing water paradigm**: a look at twenty-first century water resources development. *Water International*, v. 25, n. 1, p. 127–138, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/245327826_The_Changing_Water_Paradigm_-_A_Look_at_Twenty-First_Century_Water_Resources_Development. Acesso em: 10 jun. 2025.

GONÇALVES, F. N. et al. **Análise da variação espacial e sazonal e de tendências na precipitação da região sul do Brasil.** Disponível em: https://scielo.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2018000300002. Acesso em: 17 jun. 2025.

GRIMM, A. M. **Interannual climate variability in South America:** impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 25, n. 4, p. 537-554, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-010-0420-1>. Acesso em: 10 out. 2025.

GRIMM, A. M. et al. **ENSO and extreme rainfall events in South America.** *Journal of Climate*, v. 22, p. 1589–1609, 2009. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/22/7/2008jcli2429.1.xml>. Acesso em: 10 out. 2025.

HOU, A. Y. et al. **The Global Precipitation Measurement Mission.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 95, n. 5, p. 701–722, 2014. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/95/5/bams-d-13-00164.1.xml>. Acesso em: 09 jun. 2025.

HUFFMAN, G. J. et al. **Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG), Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 06.** Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center, 2020. Disponível em: https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-05/IMERG_ATBD_V06.3.pdf. Acesso em: 12 jun. 2025.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Boletim Climático Anual do Rio Grande do Sul:** 2024. Brasília: INMET, 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

KIDD, C.; HUFFMAN, G. J. **Global precipitation measurement.** *Meteorological Applications*, v. 18, n. 3, p. 334–353, 2011. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/met.284>. Acesso em: 09 jun. 2025.

MATZENAUER, R. et al. **O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul.** *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 25, n. 2, p. 323-331, dez. 2017. Disponível em: <https://apct.sede.embrapa.br/index.php/agrometeoros/article/view/25510>. Acesso em: 10 out. 2025.

MILLY, P. C. D. et al. **Stationarity is dead:** whither water management? *Science*, v. 319, n. 5863, p. 573–574, 2008. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1151915>. Acesso em: 09 jun. 2025.

NASA. **GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 x 0.1 degree V07.** NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, 2024. Disponível em: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGHH_07/summary?keywords=imerg. Acesso em: 09 jun. 2025.

PICOLI, M. et al. **Comparação entre dados meteorológicos provenientes de sensoriamento remoto (modelados e de satélites) e de estações de superfície.** Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/334046951_Comparacao_entre_dados_meteorologicos_provenientes_de_sensoriamento_remoto_modelados_e_de_satelites_e_de_estacoes_de_superficie. Acesso em: 15 out. 2025.

RODRIGUES, A. A. et al. **Tendência e variabilidade da chuva no Rio Grande do Sul, Brasil.** Revista Brasileira de Climatologia, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/370019780_Tendencia_e_variabilidade_da_chuva_no_Rio_Grande_do_Sul_Brasil. Acesso em: 02 dez. 2025.

SARACHIK, E. et al. **The El Niño-Southern Oscillation Phenomenon.** Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/256476400_The_El_Nino-Southern_Oscillation_Phenomenon. Acesso em: 15 out. 2025.

SCHULER, A. E. et al. **Gestão integrada de recursos hídricos.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1090729/gestao-integrada-de-recursos-hidricos>. Acesso em: 11 jul. 2025.

SKOFRONICK-JACKSON, G. et al. **The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society.** Bulletin of the American Meteorological Society, v. 98, n. 9, p. 1679–1695, 2017. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/98/8/bams-d-15-00306.1.xml>. Acesso em: 12 jun. 2025.

SOUZA, R. M. **Dinâmica pluviométrica da região sul: padrões espaço temporais e implicações socioespaciais da variabilidade.** Disponível em: https://www.cbg2024.agb.org.br/resources/anais/9/cbg2024/1727751269_ARQUIVO_c3edb6d076d315efd4944f8b43e6d726.pdf. Acesso em: 13 jul. 2025.

SMITH, T. M. et al. **Improved reconstruction of global precipitation since 1900.** Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 29, n. 10, p. 1505–1517, 2012. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/29/10/jtech-d-12-00001_1.xml. Acesso em: 09 jun. 2025.

TAKAHASHI, K. et al. **The very strong El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific.** Climate Dynamics, v. 52, n. 12, p. 7389-7415, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-017-3702-1>. Acesso em: 09 out. 2025.

TAN, J. et al. **Diurnal cycle of IMERG V06 precipitation.** Geophysical Research Letters, v. 46, n. 11, p. 6067–6074, 2019. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019GL085395>. Acesso em: 09 jun. 2025.

TAPIADOR, F. J. et al. **Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications.** Atmospheric Research, v. 104-105, p. 70-97, 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809511003607>. Acesso em: 12 jun. 2025.

TRENBERTH, K. E. **The definition of El Niño**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 78, n. 12, p. 2771-2777, 1997. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/78/12/1520-0477_1997_078_2771_tdoeno_2_0_co_2.xml. Acesso em: 12 out. 2025.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2004. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/520179125/Hidrologia-Ciencia-e-Aplicacao-4%C2%A> A-Ed-Tucci. Acesso em: 11 ago. 2025.