



**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO  
ALTO RIO PARDO (MG), ENTRE 1995 E 2024: ANÁLISE PIXEL A  
PIXEL COM DADOS CHIRPS**

**EVELYN BIANCA ALMEIDA VAZ**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO  
ALTO RIO PARDO (MG), ENTRE 1995 E 2024: ANÁLISE PIXEL A  
PIXEL COM DADOS CHIRPS**

**EVELYN BIANCA ALMEIDA VAZ**

**ORIENTADOR:**

**PROF. DR. ERALDO APARECIDO TRONDOLI MATRICARDI**

**BRASÍLIA – DF**

**MARÇO DE 2026**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO  
ALTO RIO PARDO (MG), ENTRE 1995 E 2024: ANÁLISE PIXEL A  
PIXEL COM DADOS CHIRPS**

**EVELYN BIANCA ALMEIDA VAZ**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
FLORESTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

Aprovada por:

---

PROF. DR. ERALDO APARECIDO TRONDOLI MATRICARDI (ORIENTADOR)  
Departamento de Engenharia Florestal (EFL/UnB)

---

PROF. DR. RICARDO DE OLIVEIRA GASPAR  
Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais (PG-EFL)

---

DR. ALDICIR OSNI SCARIOT  
Embrapa Cenargen

---

DR. BEN HUR MARIMON JÚNIOR  
Universidade Estadual de Mato Grosso, Campus Nova Xavantina

BRASÍLIA/DF, 30 de março de 2026.

## FICHA CATALOGRÁFICA

VAZ, EVELYN BIANCA ALMEIDA

DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO ALTO RIO PARDO (MG), ENTRE 1995 E 2024: ANÁLISE PIXEL A PIXEL COM DADOS CHIRPS

39 p., 210 x 297mm (EFL/FT/UnB, Mestre, Ciências Florestais, 2026)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal.

- |                                   |                         |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 1. Geoprocessamento               | 2. Análise de tendência |
| 3. Mann-Kendall                   | 4. Theil-Sem            |
| 5. Séries temporais <i>raster</i> | 6. Bacia hidrográfica   |
| 7. Cerrado                        |                         |
| I. EFL/FT/UnB                     |                         |

## REFERÊNCIA

VAZ, E.B.A. (2026). Dinâmica Espaço-Temporal Da Precipitação Na Bacia Do Alto Rio Pardo (Mg), Entre 1995 E 2024: Análise Pixel A Pixel Com Dados CHIRPS. Dissertação de Mestrado, Publicação PPGCFL.DM409.2026. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 39 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: EVELYN BIANCA ALMEIDA VAZ

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO:

DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO ALTO RIO PARDO (MG), ENTRE 1995 E 2024: ANÁLISE PIXEL A PIXEL COM DADOS CHIRPS

GRAU / ANO: Mestre / 2026

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir a dissertação de mestrado e para emprestar ou vender somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Evelyn Bianca Almeida Vaz

[eflevelyn@gmail.com](mailto:eflevelyn@gmail.com)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me guiado e sustentado até aqui.

Aos meus pais, Sandro e Lucilene, por todo o apoio incondicional ao longo de toda a minha trajetória, sendo fundamentais em cada etapa da minha formação pessoal e profissional.

À Universidade de Brasília, por mais esta oportunidade, que se soma à minha formação de graduação. Ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, bem como a todo o seu corpo docente, por serem a base da minha formação profissional, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento do pensamento crítico e científico.

Ao meu orientador, Eraldo, manifesto minha sincera gratidão pela orientação atenta, pela condução criteriosa e pelos ensinamentos que ultrapassam o campo acadêmico. Agradeço pela confiança depositada no desenvolvimento deste trabalho, pelas contribuições fundamentais ao longo de todo o processo e pela forma ética, comprometida e inspiradora com que conduz a pesquisa e a formação de seus orientandos. Seus conselhos e reflexões foram essenciais não apenas para a construção desta dissertação, mas também para o meu crescimento profissional e pessoal.

Às minhas parceiras na profissão e na vida, Laura e Júlia, pela amizade, apoio e companheirismo ao longo dessa jornada, tornando cada etapa mais significativa.

Ao meu colega Thomas, pela parceria ao longo do mestrado, pelas trocas de conhecimento, discussões construtivas e apoio mútuo durante os desafios dessa jornada.

À Embrapa e ao projeto Ecosipas, pelas oportunidades proporcionadas ao longo desta trajetória. Ao meu supervisor, Aldicir, expresse minha profunda gratidão pela confiança, pela orientação constante e pela parceria ao longo deste período. Sua atuação foi fundamental não apenas no suporte técnico e científico, mas também na construção de um ambiente de aprendizado, diálogo e crescimento profissional. Agradeço pela disponibilidade, pelos ensinamentos compartilhados e por todas as experiências proporcionadas, que contribuíram significativamente para a minha formação. Aos meus colegas de trabalho, pela convivência, pelas trocas e pelo apoio no dia a dia.

Ao ASA Programme, por me proporcionar uma experiência única e intercultural, essencial para a minha formação profissional e pessoal.

À Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT), pelo intercâmbio científico e pelas experiências vividas na Alemanha.

## RESUMO

A provisão de água é um serviço ecossistêmico fundamental, em que a regulação hidrológica depende da variabilidade climática, do uso e cobertura da terra e da sazonalidade das chuvas. Este estudo apresenta um arcabouço baseado em SIG para detectar tendências de precipitação em nível de pixel na bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo, Brasil, ao longo de uma série temporal de 30 anos (1995–2024). Dados diários do CHIRPS foram pré-processados no Google Earth Engine por meio do recorte pelo limite da bacia e da agregação anual e sazonal. As séries temporais *raster* foram então organizadas e analisadas no módulo Earth Trends Modeler do TerrSet/LiberaGIS. A magnitude e a significância das tendências foram avaliadas para cada pixel utilizando o estimador de Theil–Sen e o teste de Mann–Kendall. Não foi observada tendência anual estatisticamente significativa ao nível de 5% de significância. No entanto, padrões espacialmente coerentes de redistribuição sazonal da precipitação foram identificados, especialmente durante períodos de transição e em partes da estação seca. A análise da precipitação em nível de pixel revelou heterogeneidade espacial não capturada pelas análises baseadas em médias anuais, com implicações para a regulação hidrológica e os serviços ecossistêmicos relacionados à água.

**PALAVRAS-CHAVE:** Geoprocessamento; análise de tendência; Mann-Kendall; Theil-Sen; séries temporais *raster*; bacia hidrográfica; Cerrado.

## ABSTRACT

Water provision is a key ecosystem service, where hydrological regulation depends on climate variability, land use and land cover, and rainfall seasonality. This study presents a GIS-based framework for detecting pixel-level rainfall trends in the Alto Rio Pardo watershed, Brazil, over 30 years' time series dataset (1995–2024). Daily CHIRPS data were pre-processed in Google Earth Engine by watershed boundary clipping and annual and seasonal aggregation. Raster time series were then organized and analysed in the Earth Trends Modeler module of TerrSet/LiberaGIS. Trend magnitude and significance were assessed for each pixel using the Theil–Sen estimator and the Mann–Kendall test. No statistically significant annual trend was observed at the 5% significance level. However, spatially coherent patterns of seasonal rainfall redistribution were identified, particularly during transition periods and in parts of the dry season. The pixel-based analysis of the rainfall data revealed spatial heterogeneity not captured by annual average analysis, with implications for hydrological regulation and water-related ecosystem services.

**KEY WORDS:** Spatiotemporal analysis; precipitation trends; pixel-wise modeling; Mann-Kendall test; CHIRPS; tropical savanna.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	5
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>6</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	6
3.2	BASE DE DADOS CLIMÁTICA.....	7
3.2.1	<i>PRODUTO CHIRPS.....</i>	7
3.2.2	<i>RESOLUÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL .....</i>	8
3.2.3	<i>PROCESSAMENTO NO GOOGLE EARTH ENGINE.....</i>	8
3.2.4	<i>AGREGAÇÃO ANUAL.....</i>	9
3.2.5	<i>AGREGAÇÃO SAZONAL.....</i>	9
3.3	VALIDAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA PELO CHIRPS .....	11
3.3.1	<i>DADOS PLUVIOMÉTRICOS DE REFERÊNCIA .....</i>	11
3.4	ANÁLISE DA TENDÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL.....	13
3.4.1	<i>ORGANIZAÇÃO DA SÉRIE TEMPORAL .....</i>	13
3.4.2	<i>EARTH TRENDS MODELER (TERRSET LIBERAGIS) .....</i>	13
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>15</b>
4.1	VALIDAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA PELO CHIRPS .....	15
4.1.1	<i>INTERPRETAÇÃO ESPACIAL DO DESEMPENHO.....</i>	16
4.1.2	<i>CONSISTÊNCIA PARA ANÁLISE DE TENDÊNCIA.....</i>	17
4.2	CARACTERIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DA BACIA DO ALTO RIO PARDO (1995–2024) .....	17
4.2.1	<i>RELAÇÃO COM EVENTOS.....</i>	18
4.2.2	<i>FATORES ATMOSFÉRICOS ADICIONAIS QUE MODULAM A PRECIPITAÇÃO .....</i>	19
4.3	ANÁLISE DA TENDÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO .....	19
4.3.1	<i>TENDÊNCIA ANUAL.....</i>	20
4.3.2	<i>TENDÊNCIA SAZONAL – DJF.....</i>	20
4.3.3	<i>TENDÊNCIA SAZONAL – MAM.....</i>	21
4.3.4	<i>TENDÊNCIA SAZONAL - JJA .....</i>	22
4.3.5	<i>TENDÊNCIA SAZONAL – SON .....</i>	23
4.3.6	<i>SÍNTESE INTEGRADA DA TENDÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL .....</i>	24
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>28</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo, bacia hidrográfica do Alto do Rio Pardo. ....	6
Figura 2 - Distribuição espacial das tendências de precipitação anual na área de estudo no período de 1995 a 2024.....	20
Figura 3 - Distribuição espacial das tendências de precipitação para o trimestre DJF (Dezembro, Janeiro e Fevereiro). ....	21
Figura 4 - Distribuição espacial das tendências de precipitação para o trimestre MAM (Março, Abril e Maio). ....	22
Figura 5 - Distribuição espacial das tendências de precipitação para o trimestre JJA (Junho, Julho e Agosto).....	23
Figura 6 - Distribuição espacial das tendências de precipitação para o trimestre SON (Setembro, Outubro e Novembro).....	24

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Métricas de validação .....	15
Tabela 2 - - Resumo das estatísticas de tendência da precipitação.....	24

# 1 INTRODUÇÃO

A precipitação constitui um dos principais condicionantes da dinâmica hidrológica em bacias hidrográficas tropicais, influenciando diretamente os processos de geração de escoamento, recarga de aquíferos, armazenamento hídrico e disponibilidade de água para múltiplos usos. No Brasil central, onde predomina forte sazonalidade pluviométrica associada ao sistema de monção da América do Sul, a concentração das chuvas na estação úmida e a duração da estação seca condicionam a oferta hídrica anual e a estabilidade de sistemas ecológicos e produtivos do Bioma Cerrado. Estudos recentes apontam que mudanças no regime de chuvas, combinadas a mudanças no uso e cobertura da terra, podem reduzir a disponibilidade hídrica e ampliar a vulnerabilidade de bacias do Cerrado (LUIZ-SILVA et al., 2021; SIQUEIRA et al., 2021).

Na perspectiva do Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005), os serviços ecossistêmicos correspondem aos benefícios diretos e indiretos que os seres humanos obtêm dos ecossistemas, classificados em serviços de provisão, regulação, suporte e culturais. Nesse marco conceitual, a água é compreendida, de um lado, como serviço de provisão, em razão de seu fornecimento para múltiplos usos, e, de outro, como benefício sustentado por serviços de regulação, especialmente aqueles relacionados à dinâmica hidrológica e à manutenção da qualidade da água. No contexto hidrológico, destacam-se processos como infiltração, recarga subterrânea, armazenamento hídrico e manutenção de vazões, fundamentais para a disponibilidade de água doce em escala espacial e temporal. Nessa mesma linha, Boyd e Banzhaf (2007) ressaltam que a adequada mensuração dos serviços ecossistêmicos requer a distinção entre processos ecológicos e benefícios efetivamente apropriados pela sociedade, o que reforça a importância de indicadores espacialmente explícitos para a avaliação da disponibilidade hídrica.

Nessa perspectiva, a Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (CICES), proposta por Haines-Young e Potschin (2018), organiza os serviços de provisão de água como benefícios derivados do funcionamento dos sistemas naturais, enfatizando sua quantificação em bases territoriais. Schröter et al. (2017) argumentam que a abordagem de serviços ecossistêmicos deve ser orientada pela sustentabilidade, integrando mudanças climáticas, transformações no uso da terra e dinâmica hidrológica.

O bioma Cerrado, no qual se insere a bacia do Alto Rio Pardo, desempenha papel estratégico na regulação hidrológica em escala nacional, contribuindo com aproximadamente 43% da água superficial do Brasil fora da Amazônia (STRASSBURG et al., 2017). Além disso, abriga as nascentes das principais bacias hidrográficas do país, razão pela qual é frequentemente referido na literatura como o “berço das águas do Brasil”. A estrutura radicular profunda de muitas espécies de plantas savânicas favorece processos de infiltração e recarga subterrânea, contribuindo para a manutenção de vazões de base e maior estabilidade hídrica em períodos secos (SCHENK; JACKSON, 2002). Nesse contexto, a conservação dos ecossistemas do Cerrado está diretamente associada à manutenção de serviços ecossistêmicos hídricos, como o abastecimento público, a irrigação agrícola, a geração de energia hidrelétrica e a manutenção de vazões ecológicas, além de contribuir para a regulação de eventos extremos e a segurança hídrica regional.

Entretanto, nas últimas décadas, o Cerrado tem sido submetido a transformações intensas no uso da terra associadas à expansão agropecuária, à conversão de vegetação nativa e à reorganização do uso da terra (ESPÍRITO-SANTO et al., 2016; PARENTE et al., 2021; CONCEIÇÃO-BISPO et al., 2023). Essas mudanças podem alterar o balanço hídrico regional por meio de modificações nos fluxos de evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial (SIQUEIRA et al., 2021; SILVA et al., 2021). Evidências recentes indicam que a interação entre mudanças no uso da terra e variabilidade climática pode ampliar os riscos de redução de vazões e de insegurança hídrica em bacias do Cerrado (SALMONA et al., 2023). Por exemplo, mudanças no uso da terra na bacia do rio Urucuia, no Cerrado, ocorridas de forma significativa nas últimas décadas, indicam que a variabilidade climática, especialmente associada à precipitação e à evapotranspiração, exerceu papel predominante na dinâmica da produção de água (CORRÊA et al., 2025).

Paralelamente, registros observacionais apontam para um processo de aquecimento e possível intensificação da aridez em porções do bioma, com aumento da temperatura média e alterações na dinâmica pluviométrica nas últimas décadas (HOFMANN et al., 2021). Embora a variabilidade interanual da precipitação seja fortemente modulada por sistemas atmosféricos de grande escala, como o *El Niño* Oscilação Sul, a identificação de tendências persistentes requer análises estatísticas robustas aplicadas a séries temporais suficientemente longas (CAMPOS; CHAVES, 2020).

A avaliação de tendências climáticas em escala de bacia demanda bases de dados consistentes tanto espacial quanto temporalmente. Em regiões com rede pluviométrica limitada ou com lacunas históricas, produtos híbridos derivados da integração entre sensoriamento remoto e estações meteorológicas têm sido amplamente empregados (KATSANOS et al., 2016). O produto CHIRPS destaca-se por sua resolução espacial aproximada de 0,05° e pela integração de estimativas satelitais com dados observacionais, apresentando validações consistentes em diferentes contextos climáticos (FUNK et al., 2015).

A detecção de tendências em séries hidrometeorológicas é frequentemente realizada por métodos não paramétricos, como o teste de *Mann-Kendall* (KENDALL, 1975) e o estimador de inclinação de *Theil-Sen* (SEN, 1968), reconhecidos por sua robustez frente à presença de valores extremos e à não normalidade dos dados. Esses métodos têm sido amplamente aplicados em estudos de variabilidade e mudança climática em ambientes tropicais e semiáridos (BLAIN, 2014; PATAKAMURI et al., 2020).

No contexto da bacia do Alto Rio Pardo, situada no norte de Minas Gerais, em zona de transição entre o Cerrado e o semiárido brasileiro (Caatinga), a elevada variabilidade interanual e a forte sazonalidade climática tornam particularmente relevante a investigação de possíveis alterações no regime pluviométrico. A compreensão da dinâmica espaço-temporal da precipitação nessa bacia é fundamental para subsidiar análises hidrológicas, o planejamento de recursos hídricos e a avaliação de pressões climáticas associadas aos serviços ecossistêmicos relacionados à água, em consonância com os princípios da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

Neste contexto, propõe-se aqui analisar a dinâmica espaço-temporal da precipitação na bacia do Alto Rio Pardo no período de 1995 a 2024, utilizando o produto *CHIRPS* e técnicas estatísticas robustas de detecção de tendência aplicadas pixel a pixel. A abordagem integra

análise climática, espacialização geográfica e rigor estatístico, contribuindo para o entendimento de possíveis reorganizações intra-anuais do regime pluviométrico e de seus potenciais desdobramentos hidrológicos e socioambientais em escala de bacia.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar a dinâmica espaço-temporal da precipitação na bacia do Alto Rio Pardo (MG), no período de 1995 a 2024, utilizando dados do produto *CHIRPS* e métodos estatísticos não paramétricos aplicados pixel a pixel, com o intuito de identificar padrões de variabilidade e possíveis tendências no regime pluviométrico anual e sazonal.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Validar o desempenho do *CHIRPS* frente a dados observados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).
2. Caracterizar a variabilidade interanual e sua relação com eventos ENOS.
3. Aplicar os estimadores *Theil-Sen* e *Mann-Kendall* para detecção de tendências anuais e sazonais.
4. Avaliar a distribuição espacial das tendências identificadas.
5. Investigar possíveis indícios de reorganização intra-anual do regime pluviométrico.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Alto Rio Pardo localiza-se na porção norte do estado de Minas Gerais, inserida na Região Hidrográfica do Atlântico Leste, conforme classificação ANA (2019). A área abrange totalmente ou parcialmente os municípios de Montezuma, Rio Pardo de Minas, Taiobeiras, São João do Paraíso, Vargem Grande do Rio Pardo, Indaiabira e Santo Antônio do Retiro, situando-se em zona de transição entre o domínio do Cerrado e áreas sob influência do semiárido brasileiro, o que confere à região características climáticas e ecológicas intermediárias.

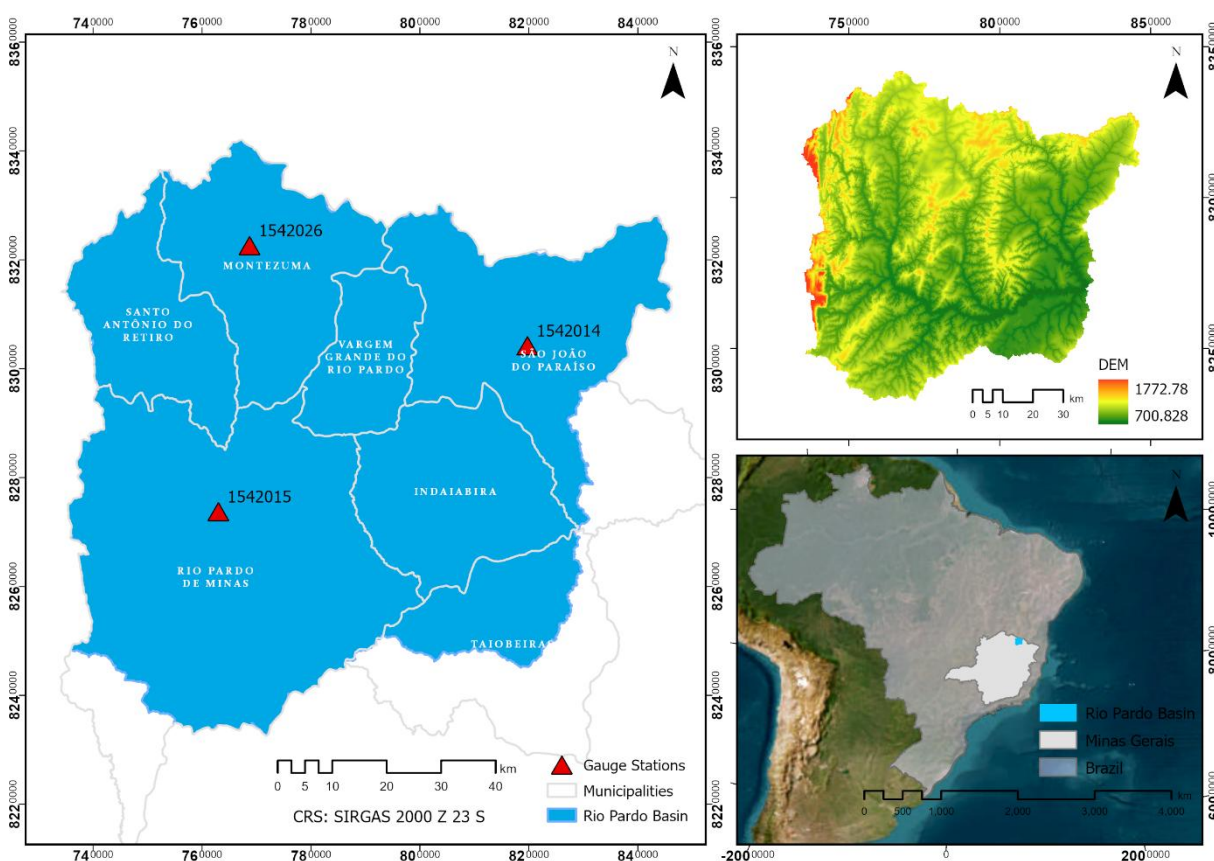


Figura 1 – Localização da área de estudo, bacia hidrográfica do Alto do Rio Pardo.

Sob o ponto de vista geomorfológico, a região integra os domínios morfoclimáticos do Cerrado, caracterizados por extensos planaltos dissecados, superfícies suavemente onduladas e compartimentos estruturais associados ao embasamento cristalino (AB’SÁBER, 2003). As altitudes variam aproximadamente entre 700 e 1.700 metros, com influência da Serra do Espinhaço na porção norte da bacia, especialmente no município de Montezuma, onde ocorrem áreas de maior declividade e compartimentação do relevo.

O clima regional é classificado predominantemente como tropical com estação seca (Aw), segundo a classificação de Köppen, conforme sistematizado para o território brasileiro por Alvares et al. (2013). A precipitação média anual situa-se entre aproximadamente 700 e 800 mm, concentrando-se majoritariamente entre os meses de outubro e março. O período seco estende-se de maio a setembro, quando se observam baixos totais pluviométricos e elevadas taxas de evapotranspiração potencial. Essa forte sazonalidade constitui característica marcante

do norte de Minas Gerais e condiciona diretamente a dinâmica hidrológica regional, influenciando processos de geração de escoamento, armazenamento hídrico e recarga de aquíferos (ANA, 2019).

Os solos predominantes na região são Latossolos e Argissolos, desenvolvidos sob condições de intenso intemperismo tropical (EMBRAPA, 2018). Os Latossolos, geralmente profundos, bem drenados e com elevada porosidade, favorecem processos de infiltração e armazenamento hídrico no perfil do solo. Em áreas de maior declividade e menor profundidade efetiva, ocorrem Neossolos rasos, nos quais o escoamento superficial tende a ser mais expressivo durante eventos de precipitação intensa, aumentando a suscetibilidade a processos erosivos.

A cobertura vegetal predominante corresponde às formações savânicas do bioma Cerrado, reconhecido como *hotspot* global de biodiversidade (MYERS et al., 2000) e considerado estratégico para a conservação dos recursos hídricos no Brasil (KLINK; MACHADO, 2005). A elevada diversidade estrutural da vegetação e a presença de sistemas radiculares profundos contribuem para a infiltração de água no solo e para a manutenção de vazões de base, desempenhando papel relevante na regulação hidrológica regional.

Destaca-se, ainda, a presença da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Nascentes Gerazeiras, com 38.177 ha, criada em 2014, com o objetivo de proteger áreas de nascentes, zonas de recarga hídrica e remanescentes de vegetação nativa, além de assegurar o uso sustentável por comunidades tradicionais gerazeiras (MINAS GERAIS, 2014). A existência dessa unidade de conservação reforça a importância estratégica da bacia sob a perspectiva da manutenção dos serviços ecossistêmicos associados à água.

Sob a abordagem de serviços ecossistêmicos, a provisão e a regulação hídrica configuram benefícios fundamentais derivados do funcionamento dos ecossistemas naturais. Conforme o *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005), a conservação da cobertura vegetal contribui para a estabilidade dos fluxos hídricos e para a redução da vulnerabilidade socioambiental. Na estrutura conceitual da Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (CICES), esses benefícios são enquadrados principalmente como serviços de provisão de água doce e de regulação do ciclo hidrológico (HAINES-YOUNG; POTSCHIN). Assim, a bacia do Alto Rio Pardo assume relevância não apenas sob o ponto de vista físico-geográfico, mas também como território estratégico para a sustentabilidade hídrica regional.

## **3.2 BASE DE DADOS CLIMÁTICA**

### *3.2.1 PRODUTO CHIRPS*

A base de dados pluviométrica utilizada neste estudo corresponde ao produto *CHIRPS versão 3.0* (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations*), desenvolvido pelo *Climate Hazards Center da University of California*, Santa Barbara, CA, EUA. O *CHIRPS* constitui um conjunto de dados quase-global de precipitação, com cobertura espacial entre 60°N e 60°S, disponível a partir de 1981 até o presente, com resolução espacial de 0,05° (aproximadamente 5 km) (FUNK et al., 2015; CHC, 2026).

O produto é classificado como híbrido, integrando estimativas derivadas de sensoriamento remoto com dados observacionais provenientes de estações pluviométricas. Sua metodologia baseia-se no algoritmo *CHIRP*, que utiliza imagens infravermelhas de satélites geoestacionários para estimar precipitação por meio da técnica de *Cold Cloud Duration (CCD)*, posteriormente ajustada com dados de estações para redução de viés (FUNK et al., 2015).

A versão 3.0 apresenta aprimoramentos metodológicos relacionados à ampliação da base de estações utilizadas na calibração e à melhoria da consistência temporal da série histórica (CHC, 2026), sendo amplamente empregada em estudos de variabilidade climática, monitoramento de secas e avaliação de extremos pluviométricos.

### 3.2.2 RESOLUÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL

Foram utilizados dados diários do CHIRPS referentes ao período de janeiro de 1995 a dezembro de 2024, totalizando 30 anos de observações. Esse intervalo temporal atende às recomendações da Organização Meteorológica Mundial para análises climatológicas e avaliação de variabilidade. (WMO, 2017).

A resolução espacial original do produto é de  $0,05^\circ$ , correspondente a aproximadamente 5 km na região de estudo. Para compatibilização cartográfica, os dados foram reprojeto para o sistema de referência UTM, zona 23S, datum SIRGAS 2000 (EPSG:31983), mantendo-se a resolução espacial equivalente ( $\sim 5.500$  m), a fim de evitar distorções associadas à reamostragem.

Cada *pixel* do produto representa a estimativa de precipitação acumulada sobre uma área aproximada de 25 km<sup>2</sup>, sendo essa escala considerada adequada para análises em nível de bacia hidrográfica regional, sobretudo em contextos semiáridos, onde a variabilidade espacial da precipitação é relevante.

### 3.2.3 PROCESSAMENTO NO GOOGLE EARTH ENGINE

O processamento foi realizado na plataforma Google Earth Engine (GEE), ambiente de computação em nuvem voltado à análise de grandes volumes de dados geoespaciais (GORELICK et al., 2017). A plataforma permitiu a filtragem espacial e temporal da coleção CHIRPS, agregações temporais e exportação automatizada dos produtos gerados. Inicialmente, procedeu-se à delimitação espacial da bacia do Alto Rio Pardo por meio da importação de arquivo vetorial correspondente ao limite hidrográfico. Em seguida, aplicou-se filtro temporal à coleção de dados diários do CHIRPS, restringindo-a ao período compreendido entre 1995 e 2024.

A partir da coleção filtrada, realizaram-se agregações temporais anuais e sazonais por meio da soma dos valores diários de precipitação, gerando imagens compostas representativas de cada período. Posteriormente, as imagens matriciais (*raster*) resultantes foram rereprojeto para o sistema de coordenadas UTM, *datum* SIRGAS 2000 (EPSG:31983), mantendo-se a resolução espacial equivalente à original do produto. Os arquivos foram então exportados para posterior análise no módulo *Earth Trends Modeler (TerrSet)*, bem como para geração de tabelas em formato CSV destinadas à validação estatística.

Todas as etapas de processamento foram implementadas por meio de script desenvolvido em linguagem *JavaScript* no ambiente GEE. O script contempla as operações de filtragem espacial e temporal, agregação anual e sazonal, projeção cartográfica e exportação dos produtos finais. O código completo encontra-se apresentado no Apêndice A, garantindo transparência metodológica, rastreabilidade dos procedimentos e reprodutibilidade dos resultados.

O uso do GEE permitiu a padronização das rotinas de processamento, a redução de erros operacionais associados a manipulações manuais e a replicabilidade integral das etapas analíticas.

### 3.2.4 AGREGAÇÃO ANUAL

A precipitação anual foi obtida por meio da soma acumulada dos valores diários de precipitação para cada ano da série temporal, conforme a Equação 1:

$$P_{anual,y} = \sum_{d=1}^n P_{d,y}$$

Em que:

$P_{anual,y}$  = total anual de precipitação no ano  $y$ ;

$P_{d,y}$  = valor diário de precipitação; e

$n$  = número de dias do respectivo ano.

A partir desse procedimento, os dados diários do produto *CHIRPS* foram agregados em escala anual, resultando em *rasters* correspondentes ao total pluviométrico acumulado em cada ano da série histórica. Essa etapa forneceu a base para a caracterização da variabilidade interanual da precipitação e para a análise de tendências espaço-temporais ao longo do período avaliado.

### 3.2.5 AGREGAÇÃO SAZONAL

Com o objetivo de investigar a variabilidade intra-anual da precipitação e identificar possíveis alterações na distribuição das chuvas, procedeu-se à agregação sazonal dos dados diários do produto *CHIRPS*. A segmentação sazonal foi realizada segundo a climatologia convencional adotada em estudos meteorológicos, considerando quatro estações meteorológicas:

1. DJF – dezembro, janeiro e fevereiro;
2. MAM – março, abril e maio;
3. JJA – junho, julho e agosto;
4. SON – setembro, outubro e novembro.

A precipitação sazonal foi obtida por meio da soma dos totais mensais correspondentes a cada estação, conforme a Equação (2):

$$P_{s,y} = \sum_{mes} P_{m,y}$$

Em que:

$P_{s,y}$  = total sazonal de precipitação da estação  $s$  no ano  $y$ ;

$P_{m,y}$  = total mensal de precipitação no mês  $m$ ;

$s$  = indica o conjunto de meses pertencentes à estação considerada.

Para a estação DJF, adotou-se a convenção climatológica que atribui o mês de dezembro ao ano de referência subsequente da estação, de modo a evitar descontinuidade temporal na série. Assim, o cálculo específico para DJF foi realizado conforme a Equação (3):

$$P_{DJF,y} = P_{Dec,y-1} + P_{Jan,y} + P_{Feb,y}$$

Essa padronização assegura coerência estatística da série temporal e evita a fragmentação do período chuvoso principal, característica marcante do regime pluviométrico da região.

A análise sazonal é particularmente relevante na bacia do Alto Rio Pardo, onde a precipitação apresenta forte concentração no verão austral, período associado à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004). Em ambientes com marcante sazonalidade hídrica, a simples análise dos totais anuais pode mascarar alterações relevantes na distribuição intra-anual da precipitação. A segmentação sazonal permite avaliar, de maneira mais refinada, possíveis modificações na intensidade da estação chuvosa, variações na duração ou no deslocamento temporal do período úmido e tendências diferenciadas entre estação seca e estação chuvosa. Esses aspectos são particularmente relevantes em regiões sujeitas a processos de escassez hídrica e vulnerabilidade à desertificação, como ocorre em porções do norte de Minas Gerais.

Além disso, mudanças na distribuição sazonal das chuvas podem repercutir diretamente na recarga de aquíferos, na manutenção de vazões superficiais, na estabilidade dos ecossistemas do Cerrado e no desempenho de sistemas produtivos dependentes da precipitação. Assim, enquanto a agregação anual fornece uma visão integradora da disponibilidade hídrica total, a análise sazonal possibilita compreender como esse volume se organiza ao longo do ciclo hidrológico, permitindo para uma análise mais consistente das dinâmicas ambientais regionais.

A agregação sazonal foi implementada no ambiente *Google Earth Engine* por meio da soma dos valores diários de precipitação correspondentes aos meses integrantes de cada estação meteorológica. Considerando a necessidade de incorporação do mês de dezembro do ano anterior para o cálculo da estação DJF, a série sazonal foi construída para o período de 1996 a 2024, totalizando 29 anos completos de observação sazonal.

Para cada ano da série foram gerados quatro *rasters* sazonais (DJF, MAM, JJA e SON), resultando em um conjunto de 116 imagens (29 anos  $\times$  4 estações). Os *rasters* produzidos foram recortados ao limite da bacia hidrográfica, reprojatados para o sistema UTM (EPSG:31983) e mantidos na resolução espacial equivalente à original do produto *CHIRPS*, mantendo resolução espacial equivalente à original, de modo a minimizar distorções associadas ao processo de reprojeção e reamostragem. Posteriormente, os arquivos foram exportados para análise no módulo *Earth Trends Modeler*, garantindo compatibilidade espacial e temporal entre as séries.

As séries sazonais constituíram a base para a aplicação de testes de tendência no *Earth Trends Modeler*, incluindo o estimador robusto de inclinação de *Theil-Sen* e o teste não paramétrico de Mann-Kendall, com avaliação de significância estatística por meio do escore *Z*. Essa abordagem permitiu examinar não apenas a tendência global da precipitação anual, mas também possíveis alterações específicas associadas à estação chuvosa e à estação seca.

A incorporação da dimensão sazonal amplia a capacidade interpretativa da análise temporal, possibilitando identificar se eventuais mudanças no regime pluviométrico decorrem de redução no volume da estação úmida, prolongamento da estação seca ou redistribuição intra-anual das chuvas. Dessa forma, a análise sazonal complementa e aprofunda os resultados obtidos a partir da agregação anual, fornecendo subsídios mais detalhados para a compreensão das transformações no regime pluviométrico da bacia do Alto Rio Pardo.

### **3.3 VALIDAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA PELO CHIRPS**

#### *3.3.1 DADOS PLUVIOMÉTRICOS DE REFERÊNCIA*

A validação do produto *CHIRPS* foi realizada com base em dados observacionais provenientes de estações pluviométricas operadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), obtidos por meio do sistema HidroWeb, disponibilizado no âmbito do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Os dados mensais foram obtidos em formato bruto e submetidos à verificação de consistência temporal. Para cada estação, foi construída a série anual de precipitação mediante soma dos totais mensais válidos. A comparação foi realizada para o período comum entre as séries observadas e o produto *CHIRPS* (1995–2024).

Considerando a ocorrência de lacunas em séries pluviométricas históricas, adotou-se como critério mínimo de consistência anual a disponibilidade de pelo menos 10 meses válidos em cada ano hidrológico. Anos com número inferior de meses disponíveis foram excluídos da comparação, a fim de evitar viés decorrente da subestimação artificial da precipitação anual. Esse procedimento confere maior robustez estatística à validação e reduz a influência de falhas operacionais nas estações.

Os valores do *CHIRPS* foram extraídos nas coordenadas geográficas correspondentes às estações pluviométricas por meio de amostragem pontual no ambiente *Google Earth Engine*. Para cada estação e para cada ano do período analisado, foi obtido o valor anual de precipitação acumulada (mm), garantindo compatibilidade temporal entre as bases. A comparação foi realizada entre a precipitação anual observada (ANA) e a precipitação anual estimada (*CHIRPS*).

A avaliação do desempenho do *CHIRPS* foi realizada com base em métricas estatísticas complementares, selecionadas para mensurar a associação entre as séries, a magnitude dos erros e a ocorrência de viés sistemático entre os dados observados e estimados. Tais métricas são amplamente empregadas em estudos de validação hidrológica e climática, conforme Nash e Sutcliffe (1970), Krause et al. (2005) e Moriasi et al. (2007). Foram adotadas as seguintes métricas:

## 1. Coeficiente de correlação de Pearson (r)

Avalia o grau de associação linear entre os valores observados e estimados:

$$r = \frac{\sum(O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum(O_i - \bar{O})^2 \sum(E_i - \bar{E})^2}}$$

Em que:

$O_i$  = valor observado;

$E_i$  = valor estimado;

$\bar{O}, \bar{E}$  = médias das séries.

Valores próximos de 1 indicam forte associação positiva.

## 2. Viés médio (Bias)

Indica erros sistemático médio:

$$Bias = \left(\frac{1}{n}\right) * \sum (E_i - O_i)$$

Viés Próximo a Zero: Indica um estimador não enviesado (*unbiased*), significando que, em média, as estimativas são precisas em relação ao valor real.

Viés Positivo (Viés > 0): Significa que o modelo ou pesquisa está superestimando o valor verdadeiro (a previsão é, em média, maior que a realidade).

Viés Negativo (Viés < 0): Significa que o modelo está subestimando o valor real (a previsão é, em média, menor que a realidade).

## 3. Raiz do erro quadrático médio (RMSE)

Quantifica a magnitude média do erro:

$$RMSE = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{n}\right) * \sum ((E_i - O_i)^2)\right)}$$

O RMSE penaliza erros de maior magnitude e expressa o desvio médio absoluto em milímetros.

## 4. Eficiência de Nash- Sutcliffe (NSE)

Avalia o desempenho relativo do produto em relação à média observada:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(O_i - E_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2}$$

Valores:

$NSE = 1$  → ajuste perfeito;

$NSE > 0$  → desempenho aceitável;

$NSE < 0$  → desempenho inferior à média observada.

### 3.4 ANÁLISE DA TENDÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL

A dinâmica espaço-temporal da precipitação na bacia do Alto Rio Pardo foi investigada por meio de técnicas estatísticas aplicadas a séries temporais *raster*, permitindo avaliação pixel a pixel das mudanças ocorridas no período de 1995 a 2024.

A abordagem adotada possibilita identificar não apenas a existência de tendência temporal, mas também sua distribuição espacial, aspecto fundamental em bacias hidrográficas com heterogeneidade geomorfológica e climática.

#### 3.4.1 ORGANIZAÇÃO DA SÉRIE TEMPORAL

As imagens anuais e sazonais de precipitação derivadas do produto *CHIRPS* foram organizadas em arquivos do tipo *Time Series File (TSF)* no módulo *Earth Trends Modeler (ETM)*, pertencente ao *software TerrSet*.

Para garantir consistência analítica, todos os *rasters*:

- ✓ apresentaram mesma extensão espacial;
- ✓ foram reprojatados para o sistema UTM, datum SIRGAS 2000 (EPSG:31983);
- ✓ mantiveram resolução espacial equivalente ao produto original;
- ✓ foram ordenados cronologicamente.

Cada pixel passou a representar uma série temporal independente de precipitação, permitindo análise espaço-temporal contínua ao longo do período estudado.

Foram organizadas:

- Série anual (1995–2024;  $n = 30$  anos)
- Séries sazonais (DJF, MAM, JJA, SON;  $n = 29$  anos para DJF, considerando dependência do mês de dezembro do ano anterior)

#### 3.4.2 EARTH TRENDS MODELER (TERRSET LIBERAGIS)

A análise de tendência espaço-temporal foi conduzida no módulo *Earth Trends Modeler (ETM)*, integrante do software *TerrSet*. O ETM é uma aplicação voltada à modelagem e análise de séries temporais *raster*, desenvolvida especificamente para estudos de mudanças ambientais e dinâmicas de ecossistemas, permitindo avaliação pixel a pixel da evolução temporal de variáveis ambientais (Neeti & Eastman, 2011).

O módulo opera a partir de arquivos do tipo *Time Series File (TSF)*, que organizam sequências temporais de imagens georreferenciadas mantendo consistência espacial, resolução e ordenamento cronológico. Cada pixel do conjunto de dados passa a representar uma série temporal independente, possibilitando análise espacialmente explícita das tendências.

No presente estudo, foram utilizados exclusivamente operadores não paramétricos, considerados mais robustos para séries climáticas caracterizadas por elevada variabilidade

interanual e possível presença de valores extremos. Foram aplicados os seguintes procedimentos, recomendados para séries hidrometeorológicas com presença de outliers e não normalidade (BLAIN, 2014; PATAKAMURI et al., 2020):

- **Median Trend (Theil–Sen):** estima a inclinação da tendência por meio do cálculo da mediana de todas as inclinações possíveis entre pares de observações temporais.
- **Monotonic Trend (Mann–Kendall):** avalia a direção e consistência da tendência monotônica.
- **Mann–Kendall Significance:** calcula os valores de estatística Z e probabilidade associada (p-value), permitindo inferência estatística sobre a significância da tendência detectada.

O estimador de inclinação de Theil–Sen apresenta elevada robustez à presença de valores atípicos, uma vez que se baseia na mediana das inclinações calculadas entre pares de observações ao longo da série temporal. Essa característica o torna particularmente adequado para séries pluviométricas, nas quais eventos extremos podem influenciar métodos baseados em regressão linear.

O teste de Mann–Kendall é um método não paramétrico amplamente utilizado para detectar tendências monotônicas em séries temporais, avaliando a existência de aumento ou redução sistemática ao longo do tempo, independentemente da magnitude das variações. Por não exigir pressupostos de normalidade dos dados, o teste é especialmente indicado para séries hidrometeorológicas caracterizadas por elevada variabilidade interanual e possível ocorrência de valores extremos.

A associação entre o estimador de Theil–Sen, responsável pela quantificação da magnitude da tendência, e o teste de Mann–Kendall, voltado à avaliação de sua significância estatística, constitui abordagem metodológica consolidada na literatura para análise de tendências em séries ambientais. Essa combinação apresenta elevada robustez frente à presença de outliers e maior estabilidade em relação a métodos paramétricos tradicionais, sendo amplamente empregada em estudos climatológicos e hidrológicos (Yue et al., 2002; Blain, 2014; Neeti & Eastman, 2011; Corrêa et al., 2025).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 VALIDAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA PELO CHIRPS

A confiabilidade de produtos de precipitação por sensoriamento remoto constitui etapa essencial em estudos de tendência climática, sobretudo em regiões semiáridas, onde pequenas variações no regime pluviométrico podem produzir impactos hidrológicos significativos, sendo amplamente discutida na literatura internacional (KATSANOS et al., 2016; DINKU et al., 2018; PEREIRA et al., 2021).

Os resultados indicaram desempenho satisfatório do CHIRPS na maior parte da bacia (Tabela 1).

**Tabela 1 - Métricas de validação entre os dados de precipitação do CHIRPS e as estações pluviométricas na bacia do Alto Rio Pardo (1995–2024).**

Código da estação	Correlação R	Bias (mm)	Bias (%)	RMSE (mm)	NSE	Anos Utilizados
1542014	0,852	53,79	7,26	153,78	0,648	29
1542015	0,823	10,12	1,24	103,14	0,656	29
1542026	0,658	-106,64	-12,39	197,64	0,162	19

*Nota: A correlação (R) indica o grau de associação entre as séries, enquanto o Bias (mm) e o Bias (%) representam o desvio médio absoluto e relativo, respectivamente. O RMSE (mm) expressa o erro médio quadrático e o NSE (Nash–Sutcliffe Efficiency) avalia o desempenho do modelo. A coluna “Anos Utilizados” refere-se ao período efetivamente considerado na comparação entre as séries.*

Os coeficientes de correlação superiores a 0,80 nas estações 1542014 e 1542015 indicam forte associação linear entre os valores estimados pelo CHIRPS e os dados observados, sugerindo que o produto reproduz de forma satisfatória a variabilidade interanual da precipitação na área de estudo. Valores dessa magnitude são considerados consistentes em avaliações de produtos satelitais aplicados a regiões tropicais e semiáridas (FUNK et al., 2015; PEREIRA et al., 2021).

Na estação 1542026, o coeficiente de correlação ( $r = 0,658$ ) indica associação moderada. Embora inferior à observada nas demais estações, o resultado ainda demonstra capacidade do produto em captar parte relevante da variabilidade anual da precipitação, ainda que com maior dispersão em relação aos dados observados.

O viés percentual revelou leve superestimação nas estações 1542014 (+7,26%) e 1542015 (+1,24%), enquanto a estação 1542026 apresentou subestimação média de -12,39%. Esse padrão evidencia heterogeneidade espacial no desempenho do produto, possivelmente associada a fatores como efeitos orográficos locais, ocorrência de eventos convectivos de pequena escala, diferenças de representatividade entre o pixel do produto ( $\sim 0,05^\circ$ , aproximadamente 5 km) e a medição pontual das estações, bem como à densidade da rede pluviométrica assimilada no processo de calibração do CHIRPS.

É amplamente reconhecido que produtos derivados de sensoriamento remoto tendem a apresentar maiores incertezas em regiões sujeitas à ocorrência de precipitação convectiva intensa e espacialmente concentrada (DINKU et al., 2018), característica recorrente no norte de Minas Gerais durante a estação chuvosa.

O RMSE variou entre 103 mm e 198 mm, refletindo diferenças na magnitude média dos erros entre as estações avaliadas. Em termos relativos à ordem de grandeza dos totais anuais

observados na área de estudo, esses valores situam-se em faixa compatível com a reportada em estudos de validação conduzidos em contextos climáticos semelhantes (PEREIRA et al., 2021; SILVA et al., 2022).

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) apresentou valores superiores a 0,60 nas estações 1542014 e 1542015, indicando desempenho satisfatório segundo critérios de avaliação hidrológica frequentemente empregados na literatura (CITAR!). Para a estação 1542026, o NSE foi de 0,162, caracterizando desempenho mais limitado. Ainda assim, o valor positivo indica que o produto supera o desempenho de uma estimativa baseada exclusivamente na média observada, embora com menor capacidade explicativa em escala local.

Em conjunto, os resultados indicam que o produto CHIRPS apresenta desempenho satisfatório para representar a variabilidade interanual da precipitação na bacia do Alto Rio Pardo, especialmente nas estações 1542014 e 1542015, nas quais se observaram correlações elevadas, baixos vieses relativos e valores de NSE superiores a 0,60. Embora a estação 1542026 tenha apresentado desempenho inferior, a validação ainda sustenta a adequação do produto para análises regionais em escala de bacia, desde que suas limitações locais sejam consideradas na interpretação dos resultados. Desse modo, os resultados obtidos conferem suporte ao uso do CHIRPS como base para a análise espaço-temporal das tendências pluviométricas desenvolvida neste estudo.

#### *4.1.1 INTERPRETAÇÃO ESPACIAL DO DESEMPENHO*

A avaliação espacial do desempenho do CHIRPS indica melhor ajuste nos setores leste e centro-sul da bacia, representados pelas estações 1542014 e 1542015, respectivamente, enquanto o setor norte, associado à estação 1542026, apresentou desempenho inferior. Esse padrão evidencia heterogeneidade espacial na aderência entre o produto satelital e os dados observados. Contudo, essa diferença não deve ser atribuída exclusivamente a fatores espaciais, uma vez que a estação 1542026 apresentou menor extensão temporal e maior ocorrência de lacunas na série observacional, o que reduziu o número de anos válidos utilizados na validação.

No caso da estação 1542026, foram considerados apenas os anos de 2005 a 2023, totalizando 19 observações anuais válidas, ao passo que as estações 1542014 e 1542015 contribuíram com 29 anos. Essa limitação reduz a robustez estatística das métricas calculadas e pode aumentar sua sensibilidade à influência de anos atípicos, comprometendo a comparabilidade direta com as demais estações.

Além da menor completude da série observacional, a menor concordância entre os valores observados e estimados nessa estação pode também refletir limitações inerentes à resolução espacial do produto e especificidades locais da dinâmica da precipitação. O CHIRPS possui resolução aproximada de  $0,05^\circ$  (cerca de 5 km na latitude da área de estudo), de modo que cada pixel representa uma estimativa média areal da precipitação, ao passo que as estações pluviométricas registram a chuva em ponto fixo. Em áreas marcadas por elevada variabilidade espacial da precipitação e ocorrência de eventos convectivos localizados, essa diferença de suporte espacial pode intensificar divergências entre estimativas em grade e medições pontuais.

Além disso, o desempenho de produtos híbridos satélite-estação depende, em parte, da densidade e da distribuição espacial da rede observacional assimilada no processo de correção

estatística (FUNK et al., 2015). Em setores com menor cobertura observacional ou maior complexidade espacial do regime pluviométrico, a incerteza residual tende a ser mais elevada, o que pode contribuir para o desempenho mais limitado observado no setor norte da bacia.

#### 4.1.2 CONSISTÊNCIA PARA ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Apesar das diferenças observadas entre os dados observados e estimados, os resultados de validação indicam que o CHIRPS reproduz satisfatoriamente a variabilidade interanual da precipitação na bacia do Alto Rio Pardo, especialmente nas estações 1542014 e 1542015, que apresentaram maior extensão temporal e métricas de desempenho mais robustas. Os coeficientes de correlação elevados e os valores de NSE superiores a 0,60 nessas estações reforçam a adequação do produto para análises em escala de bacia hidrográfica.

No caso da estação 1542026, o desempenho inferior deve ser interpretado com cautela, uma vez que a validação foi realizada com base em série observacional mais curta e com maior ocorrência de lacunas, abrangendo apenas o período de 2005 a 2023. Essa limitação reduz a robustez estatística das métricas calculadas e torna a comparação com as demais estações menos direta, de modo que os resultados dessa estação devem ser compreendidos como indicativos, e não como evidência isolada de inadequação do produto naquele setor da bacia.

Cabe destacar que a análise de tendência temporal depende, sobretudo, da coerência interna, da estabilidade e da comparabilidade da série ao longo do tempo, mais do que da ausência absoluta de viés sistemático. Nesse sentido, uma vez demonstrada a capacidade do CHIRPS de representar satisfatoriamente a variabilidade interanual nas estações com melhor base observacional, sua utilização para a investigação de tendências anuais e sazonais mostra-se metodologicamente justificável.

Dessa forma, os resultados da validação conferem suporte às análises espaço-temporais conduzidas no módulo *Earth Trends Modeler*, ao mesmo tempo em que recomendam cautela na interpretação de padrões locais em áreas representadas por séries observacionais menos completas. Em conjunto, os achados indicam que o CHIRPS constitui base de dados adequada para a análise das tendências pluviométricas na bacia do Alto Rio Pardo, desde que suas limitações espaciais e observacionais sejam consideradas na discussão dos resultados.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DA BACIA DO ALTO RIO PARDO (1995–2024)

A variabilidade pluviométrica da bacia do Alto Rio Pardo foi analisada a partir da série anual de precipitação estimada pelo produto *CHIRPS* no período de 1995 a 2024. A média anual obtida foi de 804,06 mm, com desvio padrão de 174,08 mm e coeficiente de variação de 21,65 por cento. Esses valores evidenciam elevada variabilidade interanual, característica típica de regiões inseridas em domínio climático de transição entre semiárido e subúmido seco no norte de Minas Gerais (REBOITA et al., 2010; MARENGO et al., 2012)

O valor mínimo da série ocorreu em 2015, com 500,36 mm, enquanto o máximo foi registrado em 2022, com 1115,44 mm. A amplitude interanual superior a 600 mm reforça a irregularidade do regime pluviométrico regional, o que tem implicações diretas para a

disponibilidade hídrica superficial, recarga de aquíferos e estabilidade de sistemas socioecológicos dependentes da água.

#### 4.2.1 RELAÇÃO COM EVENTOS

A variabilidade observada foi analisada à luz da classificação oficial de eventos *El Niño* e *La Niña* divulgada pelo CPTEC/INPE, baseada nas anomalias de temperatura da superfície do mar na região *Niño* 3.4.

De acordo com o CPTEC/INPE, ocorreram eventos de *El Niño* nos períodos 1997–1998, 2002–2003, 2009–2010, 2015–2016 e 2023–2024, com diferentes intensidades. Eventos de *La Niña* foram registrados em 1998–1999, 1999–2000, 2007–2008, 2010–2011, 2017–2018 e no período prolongado de 2020–2022.

Ao comparar esses episódios com a série pluviométrica da bacia, observam-se padrões parcialmente coerentes com a literatura para o semiárido brasileiro:

- O evento *El Niño* 1997–1998 esteve associado a valores abaixo da média em 1998.
- O evento 2009–2010 coincide com redução relativa da precipitação em 2009.
- O episódio 2015–2016 apresenta correspondência clara com o ano mais seco da série, 2015, sugerindo forte influência do fenômeno sobre a supressão das chuvas na região.

Esses resultados estão alinhados com a climatologia do semiárido brasileiro, na qual eventos *El Niño* tendem a reduzir a precipitação em porções do Nordeste e norte de Minas Gerais, especialmente quando associados a alterações na posição e intensidade da Zona de Convergência do Atlântico Sul.

Por outro lado, períodos classificados como *La Niña* pelo CPTEC/INPE apresentam tendência a maiores volumes anuais ou manutenção de precipitação próxima ou acima da média:

- O evento 2010–2011 coincide com recuperação dos totais pluviométricos após 2009.
- O período 2020–2022, caracterizado por *La Niña* persistente, inclui 2021 e 2022, sendo este último o ano mais chuvoso da série analisada.

A ocorrência de 2022 como máximo pluviométrico da série reforça a coerência com o padrão climatológico observado durante fases frias do Pacífico equatorial, nas quais a circulação atmosférica favorece maior convergência de umidade sobre parte do Brasil central e sudeste.

O evento *El Niño* 2023–2024, reconhecido pelo CPTEC/INPE como de forte intensidade, coincide com redução da precipitação em 2023, cujo total anual foi de 505,47 mm, valor muito inferior à média histórica. Esse comportamento reforça o padrão de resposta regional às anomalias quentes do Pacífico.

#### 4.2.2 FATORES ATMOSFÉRICOS ADICIONAIS QUE MODULAM A PRECIPITAÇÃO

Embora a associação entre eventos *El Niño* e *La Niña* e a variabilidade interanual da precipitação na bacia do Alto Rio Pardo seja consistente em diversos anos analisados, a resposta pluviométrica regional não é exclusivamente determinada pelo ENOS. A precipitação no Brasil central e no norte de Minas Gerais resulta da interação entre múltiplos sistemas atmosféricos de diferentes escalas.

Durante o verão austral, a principal estrutura responsável pela organização das chuvas na região é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), caracterizada por uma banda de nebulosidade e precipitação orientada no sentido noroeste–sudeste, conectando a Amazônia ao Sudeste do Brasil (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004). A persistência, intensidade e posicionamento da ZCAS exercem papel determinante na distribuição espacial e temporal das chuvas na região do Cerrado e do norte mineiro.

Outro mecanismo relevante é o Jato de Baixos Níveis da América do Sul (JBN), responsável pelo transporte de umidade da Amazônia para o centro-sul do Brasil. Variações na intensidade desse jato podem intensificar ou enfraquecer a convecção associada à ZCAS, modulando os totais pluviométricos sazonais (MARENGO et al., 2004).

Além da influência do Pacífico, anomalias de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical também desempenham papel significativo na modulação da precipitação no Nordeste e no Sudeste do Brasil. Gradientes térmicos meridionais no Atlântico podem deslocar a Zona de Convergência Intertropical e alterar a convergência de umidade sobre o interior do continente (NOBRE; SHUKLA, 1996).

Em escala intrassazonal, a Oscilação Madden–Julian (MJO) influencia a organização da convecção tropical e pode interferir na duração e intensidade de episódios de ZCAS, afetando a distribuição das chuvas dentro da estação chuvosa (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004).

Dessa forma, embora eventos *El Niño* estejam frequentemente associados à redução da precipitação em parte do Brasil central e eventos *La Niña* à intensificação do regime pluviométrico, conforme documentado por Grimm (2003) e Marengo (2007), a magnitude da resposta regional depende da interação entre esses diferentes sistemas atmosféricos

A variabilidade observada na bacia do Alto Rio Pardo entre 1995 e 2024, incluindo anos secos coincidentes com eventos *El Niño* intensos, como 2015 e 2023, e anos úmidos associados a *La Niña* persistente, como 2022, deve ser interpretada à luz dessa multifatorialidade climática. Assim, o ENOS atua como modulador relevante da variabilidade interanual, mas não como único determinante do regime hidrológico regional.

#### 4.3 ANÁLISE DA TENDÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO

A abordagem adotada permitiu avaliar tendências pixel a pixel, preservando a variabilidade espacial interna da bacia, diferentemente de análises baseadas apenas em médias agregadas.

### 4.3.1 TENDÊNCIA ANUAL

Os valores do coeficiente *Tau de Kendall* variaram aproximadamente entre  $-0,15$  e  $+0,16$ , indicando tendências de baixa intensidade relativa ao longo da bacia. Observou-se padrão espacial relativamente organizado, com predominância de valores negativos nas porções norte e noroeste e valores positivos na região central e sul da bacia.

Entretanto, a estatística *Z* do teste de *Mann-Kendall* apresentou amplitude entre  $-1,14$  e  $+1,21$ , valores inferiores ao limiar crítico de  $|Z| > 1,96$  requerido para significância ao nível de 5 por cento. De forma consistente, os p-valores permaneceram acima de 0,05 em toda a área analisada, indicando ausência de tendência estatisticamente significativa na precipitação anual no período considerado.

A magnitude estimada pelo método de *Theil-Sen* variou aproximadamente entre  $-4,7$  mm por ano e  $+6,3$  mm por ano. Embora tais valores sugiram possíveis padrões de redistribuição espacial do regime pluviométrico, a ausência de significância estatística impede a inferência de mudança sistemática no volume anual de precipitação ao longo das três décadas analisadas.

De modo geral, os resultados indicam predominância de estabilidade climática em escala anual na bacia do Alto Rio Pardo entre 1995 e 2024. A variabilidade interanual observada, fortemente associada a eventos de ENOS e a outros moduladores atmosféricos, mostra-se mais expressiva do que qualquer tendência linear persistente no período avaliado.

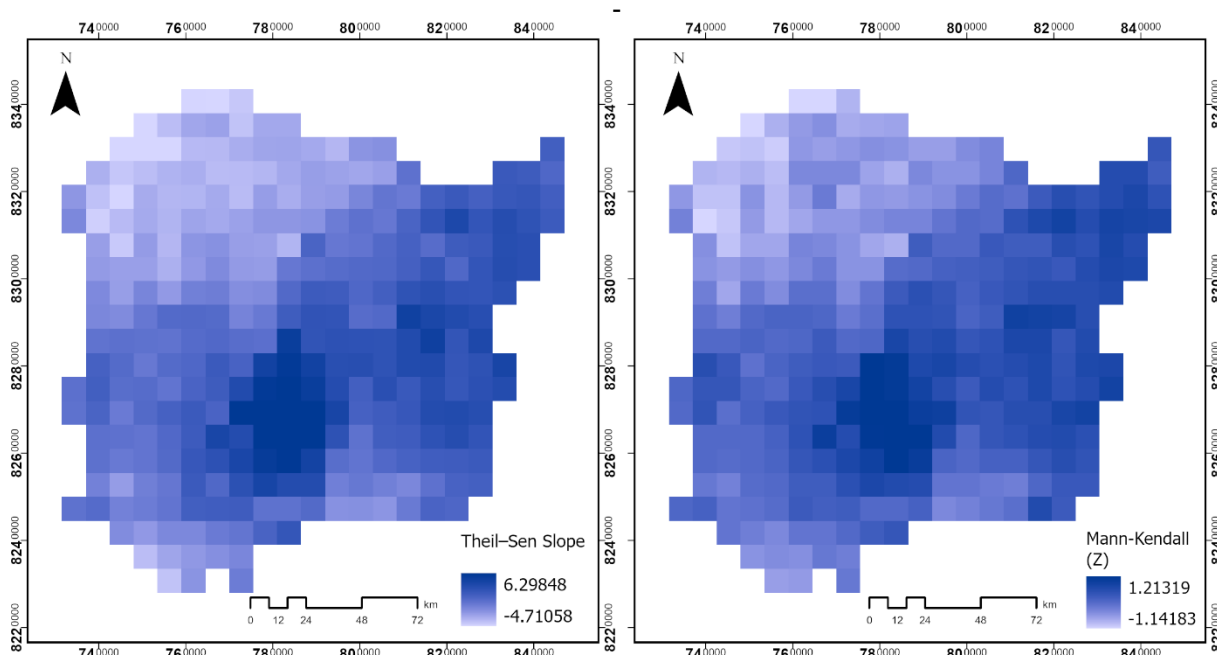


Figura 2 - Distribuição espacial das tendências de precipitação anual na área de estudo no período de 1995 a 2024.

### 4.3.2 TENDÊNCIA SAZONAL – DJF

A análise sazonal para o trimestre dezembro–janeiro–fevereiro (DJF), correspondente ao principal período chuvoso da bacia, revelou padrão espacial de tendências semelhantes ao observado na escala anual. A magnitude estimada pelo método de *Theil-Sen* variou

aproximadamente entre  $-2,46$  mm por ano e  $+3,35$  mm por ano, com predominância de valores positivos nas porções central e sul e valores negativos no setor noroeste.

O coeficiente *Tau de Kendall* apresentou variação entre aproximadamente  $-0,10$  e  $+0,12$ , indicando tendências de baixa intensidade relativa. A estatística *Z* permaneceu entre  $-0,81$  e  $+0,92$ , não ultrapassando o limiar crítico de significância ( $|Z| > 1,96$ ). Os p-valores variaram entre 0,36 e 1,00, não sendo identificados pixels com tendência estatisticamente significativa ao nível de 5 por cento.

Esses resultados indicam ausência de tendência sistemática na precipitação do período chuvoso ao longo das três décadas analisadas, sugerindo que a variabilidade sazonal associada à dinâmica da Zona de Convergência do Atlântico Sul e aos eventos de ENOS permanece como principal modulador do regime pluviométrico regional.

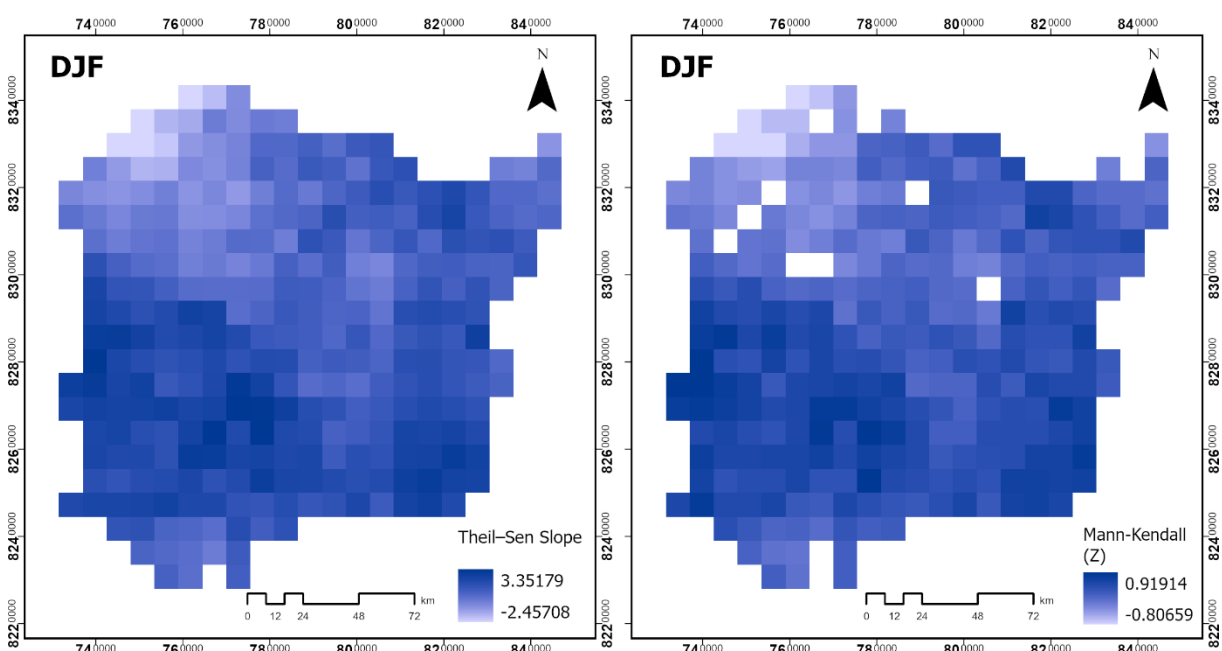


Figura 3 - Distribuição espacial das tendências de precipitação para o trimestre DJF (Dezembro, Janeiro e Fevereiro).

#### 4.3.3 TENDÊNCIA SAZONAL – MAM

A análise do trimestre março–abril–maio (MAM), correspondente ao período de transição entre a estação chuvosa e a estação seca, revelou padrão espacial distinto em relação às demais escalas analisadas. A magnitude estimada pelo método de Theil-Sen variou aproximadamente entre  $-2,59$  mm por ano e  $+0,14$  mm por ano, com predominância de valores negativos em grande parte da bacia.

O coeficiente *Tau de Kendall* apresentou variação entre aproximadamente  $-0,18$  e  $0,00$ , indicando tendência monotônica predominantemente negativa, ainda que de baixa intensidade relativa. A estatística *Z* variou entre  $-1,33$  e  $0,02$ , não atingindo o limiar crítico de significância ao nível de 5 por cento ( $|Z| > 1,96$ ). Os p-valores permaneceram acima de 0,05, embora algumas áreas apresentem valores inferiores a 0,25, sugerindo sinal consistente de redução, ainda que não estatisticamente significativa no nível convencional.

Os resultados indicam possível enfraquecimento das chuvas no período de transição outonal, o que pode estar associado a alterações na persistência da Zona de Convergência do

Atlântico Sul ou na duração da estação chuvosa regional. Embora a tendência não seja estatisticamente significativa, o padrão espacial organizado e a predominância de valores negativos sugerem sinal climático que merece atenção em análises hidrológicas subsequentes.

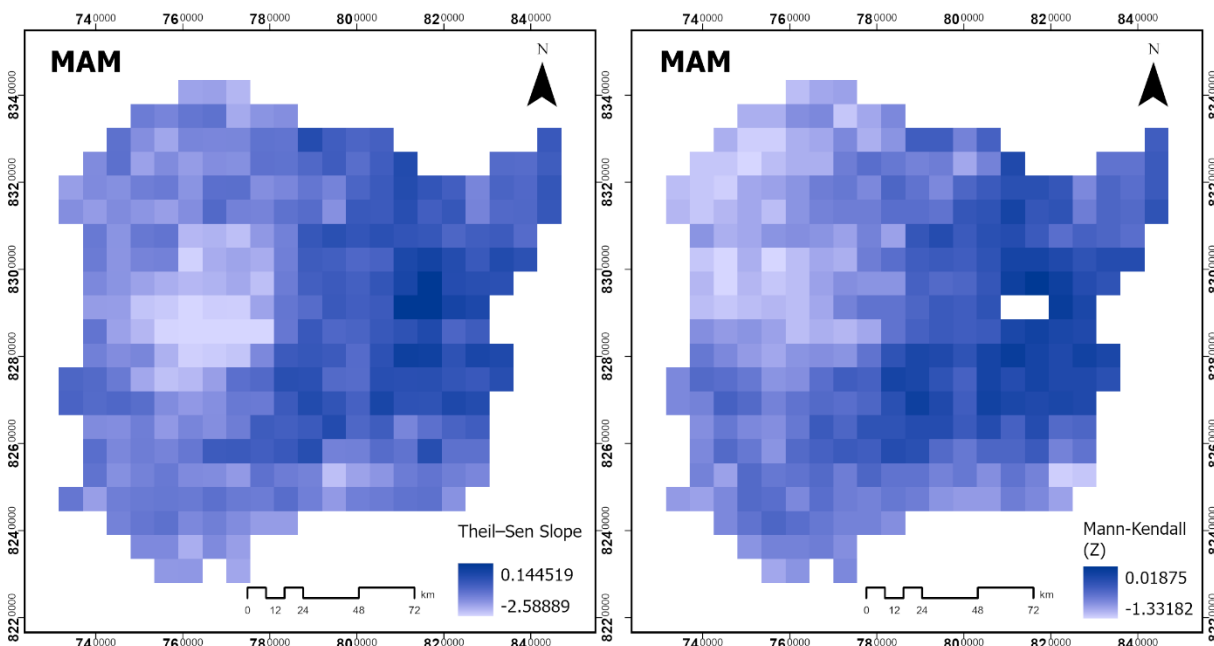


Figura 4 - Distribuição espacial das tendências de precipitação para o trimestre MAM (Março, Abril e Maio).

#### 4.3.4 TENDÊNCIA SAZONAL - JJA

A análise do trimestre junho–julho–agosto (JJA), correspondente à estação seca regional, revelou padrão distinto em relação às demais escalas temporais. A magnitude estimada pelo método de Theil-Sen variou entre aproximadamente  $-0,14$  mm por ano e  $+0,44$  mm por ano, refletindo alterações de pequena amplitude absoluta, coerentes com o baixo volume pluviométrico característico do período.

O coeficiente *Tau de Kendall* apresentou variação entre aproximadamente  $-0,29$  e  $+0,29$ , indicando tendência monotônica de intensidade moderada em alguns setores da bacia. A estatística *Z* variou entre  $-2,17$  e  $+2,16$ , ultrapassando o limiar crítico de  $|Z| > 1,96$  em áreas localizadas. De forma consistente, os *p*-valores atingiram valores mínimos próximos de  $0,03$ , evidenciando tendência estatisticamente significativa ao nível de 5 por cento em porções específicas da bacia.

As áreas com tendência significativa negativa concentram-se predominantemente no setor sudoeste, enquanto tendências positivas foram identificadas em parte do setor sudeste. Embora as magnitudes anuais sejam reduzidas, alterações na precipitação durante a estação seca podem influenciar a umidade antecedente do solo e a transição para o período chuvoso subsequente, com possíveis implicações para a dinâmica hidrológica regional

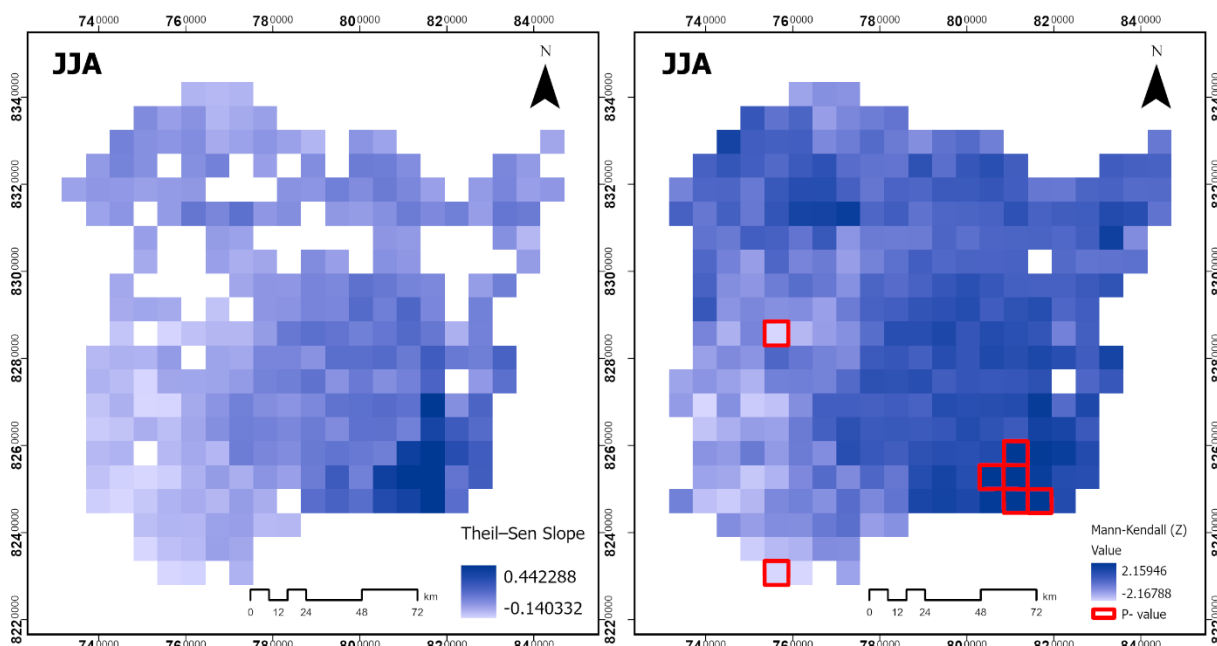


Figura 5 - Distribuição espacial das tendências de precipitação para o trimestre JJA (Junho, Julho e Agosto).

#### 4.3.5 TENDÊNCIA SAZONAL – SON

A análise do trimestre setembro–outubro–novembro (SON), correspondente ao período de transição entre a estação seca e o início da estação chuvosa, revelou padrão espacial de tendência predominantemente negativa. A magnitude estimada pelo método de Theil-Sen variou entre aproximadamente  $-2,91$  mm por ano e  $+0,94$  mm por ano, com predomínio de reduções no setor norte e centro-norte da bacia.

O coeficiente *Tau de Kendall* apresentou valores entre aproximadamente  $-0,20$  e  $+0,07$ , indicando tendência monotônica majoritariamente negativa. A estatística *Z* variou entre  $-1,52$  e  $+0,51$ , não ultrapassando o limiar crítico de significância ao nível de 5 por cento ( $|Z| > 1,96$ ). Os p-valores permaneceram acima de 0,05 em toda a área analisada, embora algumas regiões apresentem valores próximos de 0,15, sugerindo sinal consistente de redução.

Os resultados indicam possível enfraquecimento das chuvas no período de início da estação úmida, o que pode refletir alterações na dinâmica da Zona de Convergência do Atlântico Sul ou atraso no estabelecimento do regime chuvoso regional. Embora a tendência não seja estatisticamente significativa ao nível convencional, o padrão espacial organizado sugere sinal climático que merece atenção em análises hidrológicas integradas.

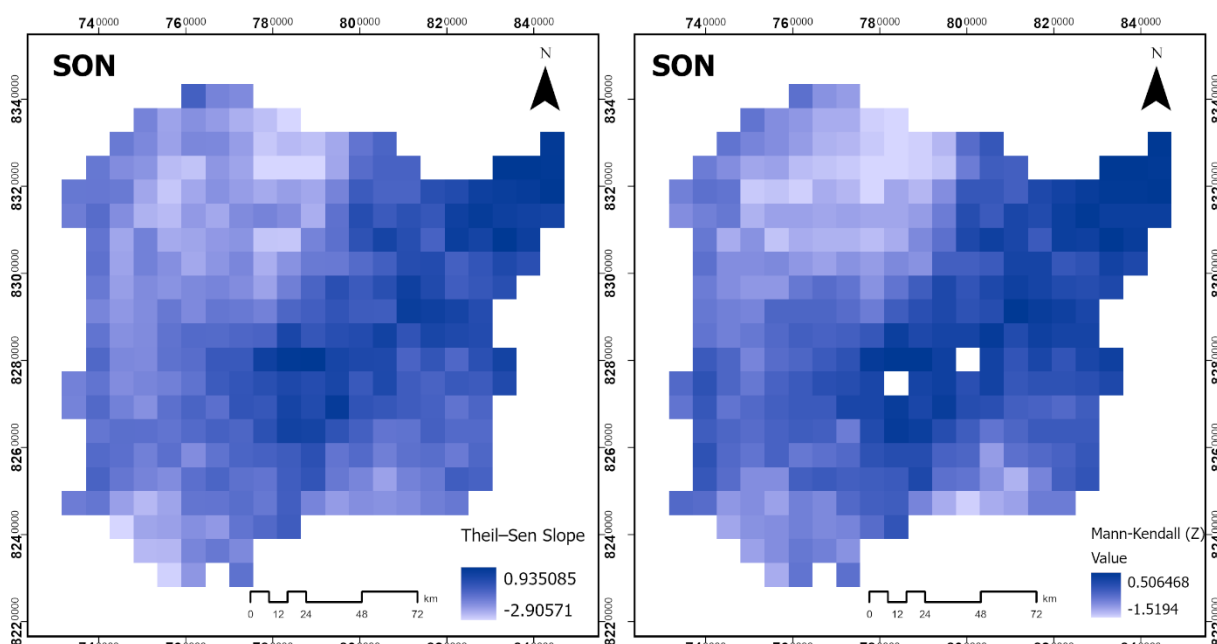


Figura 6 - Distribuição espacial das tendências de precipitação para o trimestre SON (Setembro, Outubro e Novembro).

#### 4.3.6 SÍNTESE INTEGRADA DA TENDÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL

A análise integrada das tendências anuais e sazonais da precipitação na bacia do Alto Rio Pardo no período de 1995 a 2024 revela padrão climático caracterizado por predominância de estabilidade em escala anual, associada a sinais sazonais diferenciados ao longo do ciclo hidrológico (Tabela 2).

Tabela 2 - Estatísticas de tendência da precipitação anual e sazonal na bacia do Alto Rio Pardo (1995–2024).

Período	Inclinação de Theil-Sen (mm year <sup>-1</sup> )	Tau de Kendall	Z (MK)	p-valor
Anual	-4.7 to +6.3	-0.15 to +0.16	-1.14 to +1.21	> 0,05 em toda bacia hidrográfica
DJF	-2,46 a +3,35	-0,10 a +0,12	-0,81 a +0,92	0,36 a 1,00
MAM	-2,59 a +0,14	-0,18 a 0,00	-1,33 a +0,02	> 0,05 (com áreas < 0,25)
JJA	-0,14 a +0,44	-0,29 a +0,29	-2,17 a +2,16	Algumas áreas < 0,05
SON	-2,91 a +0,94	-0,20 a +0,07	-1,52 a +0,51	> 0,05 (com áreas próximas 0,15)

Nota: A inclinação de Theil-Sen representa a magnitude da tendência (mm ano<sup>-1</sup>). O tau de Kendall e o estatístico Z referem-se ao teste de Mann-Kendall. Valores de  $p < 0,05$  indicam tendência estatisticamente significativa ao nível de 5%.

Na escala anual, não foram identificadas tendências estatisticamente significativas pelo teste de Mann-Kendall ao nível de 5%, com valores de Z inferiores ao limiar crítico e p-valores superiores a 0,05 em toda a bacia. As magnitudes estimadas pelo método de Theil-Sen indicaram variações espaciais moderadas, porém insuficientes para caracterizar mudança sistemática no volume anual de precipitação. Esses resultados sugerem que, no período analisado, a variabilidade interanual associada a forças climáticas de grande escala, como o ENOS, permanece mais expressiva do que qualquer tendência linear persistente.

A análise sazonal, contudo, evidenciou padrões intra-anuais mais complexos. No trimestre DJF, correspondente ao núcleo da estação chuvosa, o comportamento foi semelhante ao anual, com ausência de tendências significativas e baixa intensidade monotônica. Em contraste, os trimestres de transição apresentaram sinais mais consistentes. Em MAM, observou-se predominância de tendências negativas espacialmente organizadas, ainda que não significativas ao nível convencional. De modo semelhante, em SON verificou-se padrão de redução mais acentuado no setor norte da bacia, sugerindo possível enfraquecimento das chuvas no início da estação úmida.

O trimestre JJA apresentou comportamento distinto, com identificação de áreas localizadas com tendência estatisticamente significativa, tanto positiva quanto negativa, ainda que com magnitudes absolutas reduzidas. Considerando que JJA corresponde ao período seco regional, pequenas variações podem alterar a umidade antecedente do solo e influenciar a transição para o período chuvoso subsequente.

De forma integrada, os resultados indicam ausência de mudança estrutural no volume anual de precipitação, mas sugerem possível reorganização intra-anual do regime pluviométrico, com sinais de redução nos períodos de transição (MAM e SON) e alterações localizadas na estação seca (JJA). Tal configuração é compatível com sistemas climáticos em que a variabilidade sazonal e a modulação por sistemas atmosféricos de grande escala exercem papel predominante sobre tendências lineares de longo prazo (CITAR).

Esses achados são particularmente relevantes sob a perspectiva hidrológica, uma vez que alterações na distribuição sazonal das chuvas podem produzir impactos mais significativos na geração de escoamento e na recarga hídrica do que variações na média anual total. Assim, a avaliação integrada da produção de água, apresentada na seção seguinte, permite verificar se os sinais sazonais identificados se refletem na dinâmica hidrológica da bacia.

## 5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa analisou a dinâmica espaço-temporal da precipitação na bacia do Alto Rio Pardo (MG) no período de 1995 a 2024, empregando o produto CHIRPS e técnicas robustas de detecção de tendência aplicadas pixel a pixel no ambiente *Earth Trends Modeler*. A abordagem adotada integrou sensoriamento remoto, Sistemas de Informação Geográfica e estatística não paramétrica, com o propósito de identificar possíveis alterações no regime pluviométrico anual e sazonal e discutir suas implicações hidrológicas e socioambientais.

A etapa de validação indicou que o CHIRPS apresenta desempenho satisfatório na representação da variabilidade interanual da precipitação na bacia, evidenciado por elevados coeficientes de correlação e valores positivos de eficiência de *Nash–Sutcliffe* nas estações com séries mais consistentes. Embora tenham sido observadas discrepâncias pontuais, especialmente em áreas de maior heterogeneidade espacial da chuva, os resultados confirmam a adequação do produto para análises climatológicas em escala de bacia hidrográfica e para investigações de tendência espaço-temporal.

A caracterização pluviométrica revelou elevada variabilidade interanual, com amplitude superior a 600 mm entre o ano mais seco e o mais chuvoso da série. A coerência observada entre anos secos e fases quentes do Pacífico, bem como entre anos chuvosos e episódios de *La Niña* persistente, reforça o papel do ENOS como importante modulador da precipitação regional.

No que se refere às tendências, a análise anual não identificou mudanças estatisticamente significativas no volume total de precipitação ao longo das três décadas avaliadas, indicando predominância de estabilidade climática em escala anual. A variabilidade interanual associada a forças atmosféricas de grande escala mostrou-se mais expressiva do que um eventual sinal linear persistente no período analisado.

Entretanto, a análise sazonal evidenciou padrões intra-anuais diferenciados. Enquanto o trimestre de verão (DJF) apresentou comportamento semelhante ao anual, os períodos de transição (MAM e SON) indicaram predominância de sinais negativos espacialmente organizados, ainda que não significativos ao nível de 5%, sugerindo possível enfraquecimento das chuvas nesses intervalos. O trimestre de inverno (JJA) apresentou tendências significativas localizadas, embora com magnitudes absolutas reduzidas, compatíveis com o baixo volume pluviométrico da estação seca.

De forma integrada, os resultados apontam para ausência de alteração estrutural no volume anual de precipitação, mas sugerem possível reorganização intra-anual do regime pluviométrico. Essa redistribuição sazonal pode exercer influência relevante sobre a dinâmica hidrológica da bacia, uma vez que a geração de escoamento, a recarga de aquíferos e a manutenção de vazões dependem não apenas do volume anual total, mas também da concentração temporal das chuvas ao longo do ciclo hidrológico.

Sob a perspectiva dos serviços ecossistêmicos, tais alterações sazonais podem afetar a provisão e a regulação hídrica, modificando a disponibilidade de água para usos múltiplos e a estabilidade de sistemas socioecológicos dependentes do recurso hídrico. Ainda que não tenham sido detectadas tendências anuais estatisticamente significativas, indícios de

reorganização sazonal configuram sinal relevante para o planejamento hídrico e a gestão territorial, especialmente em regiões de transição entre Cerrado e semiárido.

Metodologicamente, a aplicação de análise espacialmente explícita em ambiente SIG, associada aos estimadores robustos de *Mann-Kendall e Theil-Sen*, demonstrou elevada capacidade de revelar padrões sazonais que poderiam ser mascarados por médias agregadas. A pesquisa evidencia, portanto, o potencial dos Sistemas de Informação Geográfica e de séries temporais *raster* como instrumentos analíticos para monitoramento climático e avaliação da sustentabilidade de serviços ecossistêmicos hídricos em escala de bacia.

Em síntese, embora não se observe tendência anual significativa, os sinais sazonais identificados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo do regime pluviométrico e de incorporação da dimensão espaço-temporal nas estratégias de gestão de recursos hídricos e conservação de ecossistemas no norte de Minas Gerais.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB’SÁBER, Aziz Nacib. Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual. Brasília: ANA, 2019.
- ALLEN, Richard G. et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- BLAIN, Gabriel Constantino. Removing the influence of the serial correlation on the Mann-Kendall test. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 29, n. 2, p. 161–170, 2014.
- BOYD, James; BANZHAF, Spencer. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, v. 63, n. 2–3, p. 616–626, 2007.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 9 jan. 1997.
- CAMPOS, Juliana de Oliveira; CHAVES, Hélio Mário Lopes. Tendências e variabilidades nas séries históricas de precipitação mensal e anual no bioma Cerrado no período 1977–2010. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 1, p. 157–169, 2020.
- CARVALHO, Leila M. V.; JONES, Charles; LIEBMANN, Brant. The South Atlantic Convergence Zone: persistence, intensity, form, extreme precipitation and relationships with intraseasonal to interannual activity. *Journal of Climate*, v. 17, p. 88–108, 2004.
- CLIMATE HAZARDS CENTER (CHC). CHIRPS v3 (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations). Santa Barbara: University of California, 2025. Disponível em: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>. Acesso em: 2 fev. 2026.
- CONCEIÇÃO-BISPO, Pedro da et al. Overlooking vegetation loss outside forests imperils the Brazilian Cerrado and other non-forest biomes. *Nature Ecology & Evolution*, v. 8, p. 12–13, 2024.
- CORRÊA, T. R. et al. Sustainability under deforestation and climate variability in tropical savannas: water yield in the Urucuia River Basin, Brazil. *Sustainability*, v. 17, p. 8169, 2025.
- DINKU, Tufa et al. Validation of satellite rainfall products over Africa’s complex topography. *Journal of Hydrometeorology*, v. 19, p. 503–520, 2018.
- FUNK, Christopher et al. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, v. 2, p. 150066, 2015.
- GORELICK, Noel et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 18–27, 2017.
- GRIMM, Alice M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. *Journal of Climate*, v. 16, p. 263–280, 2003.

- GRIZZETTI, Bruna et al. Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environmental Science & Policy*, v. 61, p. 194–203, 2016.
- HAINES-YOUNG, R.; POTSCHIN, M. CICES V5.1 – Towards a Common International Classification of Ecosystem Services (Version 5.1): Guidance on the application of the revised structure. 2018. Disponível em: <https://cices.eu>. Acesso em: 2 fev. 2026.
- HOAGLIN, David C.; MOSTELLER, Frederick; TUKEY, John W. Understanding robust and exploratory data analysis. New York: Wiley, 2000.
- HOFMANN, Gabriel S. et al. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. *Global Change Biology*, v. 27, n. 17, p. 4060–4073, 2021.
- KATSANOS, Dimitrios; RETALIS, Adrianos; MICHAELIDES, Silas. Validation of a high-resolution precipitation database (CHIRPS). *Atmospheric Research*, v. 169, p. 459–464, 2016.
- KENDALL, Maurice G. Rank correlation methods. 4. ed. London: Charles Griffin, 1975.
- KLINK, Carlos A.; MACHADO, Ricardo B. Conservation of the Brazilian Cerrado. *Conservation Biology*, v. 19, n. 3, p. 707–713, 2005.
- MANN, Henry B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.
- MARENGO, José A. et al. Climatology of the low-level jet east of the Andes. *Journal of Climate*, v. 17, p. 2261–2280, 2004.
- MARENGO, José A. Climate change in Latin America: impacts and vulnerability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 88, p. 1809–1813, 2007.
- MARENGO, José A. et al. Recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, 2012.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington: Island Press, 2005.
- MINAS GERAIS. Decreto de 13 de outubro de 2014. Cria a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Nascentes Geraizeiras. *Diário do Executivo*, Belo Horizonte, 14 out. 2014.
- MORIASI, Daniel N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.
- MYERS, Norman et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, p. 853–858, 2000.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.
- NEETI, Naga; EASTMAN, J. Ronald. A contextual Mann–Kendall approach for the assessment of trend significance in image time series. *Transactions in GIS*, v. 15, n. 5, p. 599–611, 2011.
- NOBRE, Paulo; SHUKLA, Jagadish. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate*, v. 9, p. 2464–2479, 1996.

- PARENTE, Leandro et al. Quality assessment of PRODES Cerrado deforestation data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 21, 2021.
- PATAKAMURI, Srikanth K.; MUTHIAH, Karuppanan; SRIDHAR, Venkataramana. Long-term homogeneity, trend, and change-point analysis of rainfall. *Water*, v. 12, 2020.
- SALMONA, Yago B. et al. A worrying future for river flows in the Brazilian Cerrado provoked by land use and climate changes. *Sustainability*, v. 15, 2023.
- SCHENK, H. J.; JACKSON, R. B. Rooting depths and belowground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, v. 90, n. 3, p. 480–494, 2002.
- SCHRÖTER, Matthias et al. Refocusing ecosystem services towards sustainability. *Ecosystem Services*, v. 25, p. 35–43, 2017.
- SEN, Pranab Kumar. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968.
- SIQUEIRA, Paulo P. et al. Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 37, 2021.
- SILVA, A. L. et al. Water appropriation on the agricultural frontier in western Bahia. *Water*, v. 13, n. 8, 2021.
- STRASSBURG, Berardo B. N. et al. Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology & Evolution*, v. 1, 2017.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Guidelines on the calculation of climate normals. Geneva: WMO, 2017.
- .