



Avaliação da Acurácia das Estimativas de Precipitação do TRMM 3B43 em Escala Nacional e por Biomas Brasileiros

Hudson de Azevedo Macedo¹, Walter Ferreira dos Santos²

¹Professor Adjunto, do curso de Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia (FAENG), em Campo Grande-MS. Possui graduação em licenciatura em Geografia pela UFMS, Campus Pantanal (2010). Mestrado (2013) e Doutorado (2017) em Geociências e Meio Ambiente pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Campus de Rio Claro. Pós-Doutorado (2018) na Universidade Estadual de Maringá (UEM), E-mail: HUDSON.MACEDO@UFMS.BR (autor correspondente)

²Graduando em Licenciatura em Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campus do Pantanal (CPAN). E-mail: WALTER.FERREIRA@UFMS.BR

Artigo recebido em 18/10/2025 e aceito em 11/06/2026

RESUMO

A quantificação precisa da precipitação é crucial para o Brasil, mas a rede de estações pluviométricas é insuficiente para capturar sua alta variabilidade espacial. Produtos de satélite como o Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) surgem como alternativas, porém sua acurácia necessita de avaliação regional. Este estudo avaliou a performance do produto TRMM 3B43 em escala nacional e para os seis biomas brasileiros, comparando suas estimativas de precipitação anual com dados de 327 estações do INMET (2000-2014) por meio das métricas RMSE, MAE, viés e R^2 . Os resultados indicaram desempenho global satisfatório ($R^2 = 0,815$), mas com viés positivo de +40,6 mm/ano. A análise por bioma revelou variabilidade espacial significativa: o Cerrado apresentou o melhor desempenho ($R^2 = 0,686$; MAE = 146,0 mm/ano), enquanto a Mata Atlântica teve a pior capacidade explicativa ($R^2 = 0,487$). A Amazônia foi o único bioma com subestimação da precipitação (viés = -31,1 mm/ano). Conclui-se que o TRMM 3B43 é robusto para análises de variabilidade espacial e temporal da precipitação no país, mas sua aplicação para valores absolutos requer correções específicas por bioma, reforçando a importância de validações regionais para o uso eficaz desses dados em estudos hidroclimáticos.

Palavras-chaves: Validação, Estações INMET, Sensoriamento Remoto, Métricas de Erro, Variabilidade Espacial.

Assessment of the Accuracy of TRMM 3B43 Precipitation Estimates on a National Scale and for Brazilian Biomes

ABSTRACT

Accurate quantification of precipitation is crucial for Brazil, but the rain gauge network is insufficient to capture its high spatial variability. Satellite products such as the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) emerge as alternatives; however, their accuracy requires regional assessment. This study evaluated the performance of the TRMM 3B43 product on a national scale and for the six Brazilian biomes, comparing its annual precipitation estimates with data from 327 INMET stations (2000-2014) using the metrics RMSE, MAE, bias, and R^2 . The results indicated satisfactory global performance ($R^2 = 0.815$), but with a positive bias of +40.6 mm/year. The analysis by biome revealed significant spatial variability: the Cerrado showed the best performance ($R^2 = 0.686$; MAE = 146.0 mm/year), while the Atlantic Forest had the worst explanatory capacity ($R^2 = 0.487$). The Amazon was the only biome with precipitation underestimation (bias = -31.1 mm/year). It is concluded that TRMM 3B43 is robust for analyzing the spatial and temporal variability of precipitation in the country, but its application for absolute values requires specific corrections per biome, reinforcing the importance of regional validations for the effective use of this data in hydroclimatic studies.

Keywords: Validation, INMET Stations, Remote Sense, Error Metrics, Spatial Variability.

Introdução

A precipitação é uma variável meteorológica fundamental para o equilíbrio dos ecossistemas, o planejamento de recursos hídricos, a agricultura e a gestão de desastres naturais. No entanto, sua quantificação precisa representa um desafio significativo devido à alta variabilidade espaço-temporal e à influência de fatores topográficos e climáticos (Kidd e Huffman, 2011). Tradicionalmente, as medições de precipitação são realizadas por meio de redes de estações pluviométricas in situ. No entanto, em países de dimensões continentais como o Brasil, a distribuição espacial dessas estações é frequentemente irregular e insuficiente para capturar adequadamente a variabilidade da chuva, especialmente em regiões remotas e de difícil acesso (Collischonn et al., 2007).

Essas limitações tornam o sensoriamento remoto uma ferramenta indispensável para o monitoramento meteorológico e climático, fornecendo estimativas de precipitação com ampla cobertura espacial e temporal (Ballari et al., 2016). Entre os produtos de satélite disponíveis, destaca-se o *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), desenvolvido em parceria pela NASA e pela Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa (JAXA). O produto 3B43 do TRMM, que combina dados de múltiplos satélites e informações de estações pluviométricas para correção de vies, tem sido amplamente utilizado em estudos hidrológicos e climáticos, oferecendo dados com resolução espacial de 0,25° e resolução temporal mensal desde 1998 (Huffman et al., 2007).

Apesar de sua ampla aplicação, a acurácia das estimativas do TRMM pode variar significativamente em função de características regionais, como tipo de cobertura do solo, relevo e regime pluviométrico (Souza et al., 2022). Dessa forma, a validação desses produtos contra dados observacionais de superfície é uma etapa crucial para avaliar sua confiabilidade e definir o escopo de suas aplicações (Medeiros-Feitosa e Oliveira, 2020).

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a acurácia das estimativas de precipitação do produto TRMM 3B43 por meio da comparação com dados de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), abrangendo todo o território brasileiro no período de 2000 a 2014. Adicionalmente, buscou-se analisar o desempenho do produto nos seis biomas brasileiros – Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal –, visando identificar

padrões regionais de erro e contribuir para o uso mais informado desses dados em estudos futuros.

Material e métodos

Área de estudo e dados utilizados

Este estudo avaliou a acurácia do produto de precipitação TRMM 3B43 (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) em escala nacional e para os seis biomas brasileiros (Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal). Para a validação, utilizaram-se dados mensais de precipitação de 327 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes ao período de 2000 a 2014, obtidos através do portal do instituto (<https://bdmep.inmet.gov.br/>).

1.1. Processamento e consistência dos dados observacionais

Inicialmente, foram compilados dados de 383 estações com registros disponíveis no período (). Após análise de consistência, identificou-se a presença de lacunas nas séries temporais.

A ocorrência de falhas em séries históricas de precipitação é um problema recorrente em bases de dados pluviométricos, especialmente em redes de monitoramento extensas e de longa duração (ABOUZIED et al., 2025; SILVA, 2024). A simples exclusão de estações ou períodos com dados ausentes resultaria em perda substancial de informação, redução do tamanho amostral e possível introdução de vieses nas análises, comprometendo a representatividade espacial e temporal do estudo (Serrano-Notivol et al., 2017; Silva, 2024). Adicionalmente, a eliminação de estações com lacunas poderia concentrar a análise apenas em locais com registros completos, ignorando regiões de grande interesse científico onde o monitoramento é mais esparsa (Huerta et al., 2024).

Para contornar estas limitações e otimizar o aproveitamento dos dados disponíveis, adotou-se o preenchimento das lacunas, procedimento amplamente utilizado em estudos hidroclimáticos para gerar séries temporais completas e viabilizar análises consistentes em escalas anuais, sazonais e por bioma (Serrano-Notivoli et al., 2017; Huerta et al., 2024). O objetivo foi maximizar a base de dados sem descartar estações que, embora apresentassem falhas pontuais (um, dois ou mais meses sem registro em determinados anos), contribuem significativamente para a

caracterização da variabilidade pluviométrica regional (Abouzied et al., 2025).

Para a execução do preenchimento, inicialmente considerou-se o uso de técnicas de interpolação espacial, como o Inverso do Quadrado da Distância (IDW), comumente empregadas em dados hidrometeorológicos. No entanto, para validação desta abordagem, aplicou-se o Índice de Moran Global (MORAN, 1950) para verificar a existência de autocorrelação espacial significativa nos dados. Esse índice foi calculado utilizando as

bibliotecas de código aberto PySAL (Rey; Luna, 2023), NumPy (Harris et al., 2020) e pandas (THE PANDAS DEVELOPMENT TEAM, 2023)¹, implementadas em linguagem Python. Os resultados (Tabela 1) revelaram valores próximos de zero e não significativos ($p > 0,05$) tanto na análise global quanto em cada bioma, indicando ausência de dependência espacial. Esta constatação inviabilizou tecnicamente o uso de interpoladores espaciais, que pressupõem que pontos próximos no espaço tendem a ter valores semelhantes.

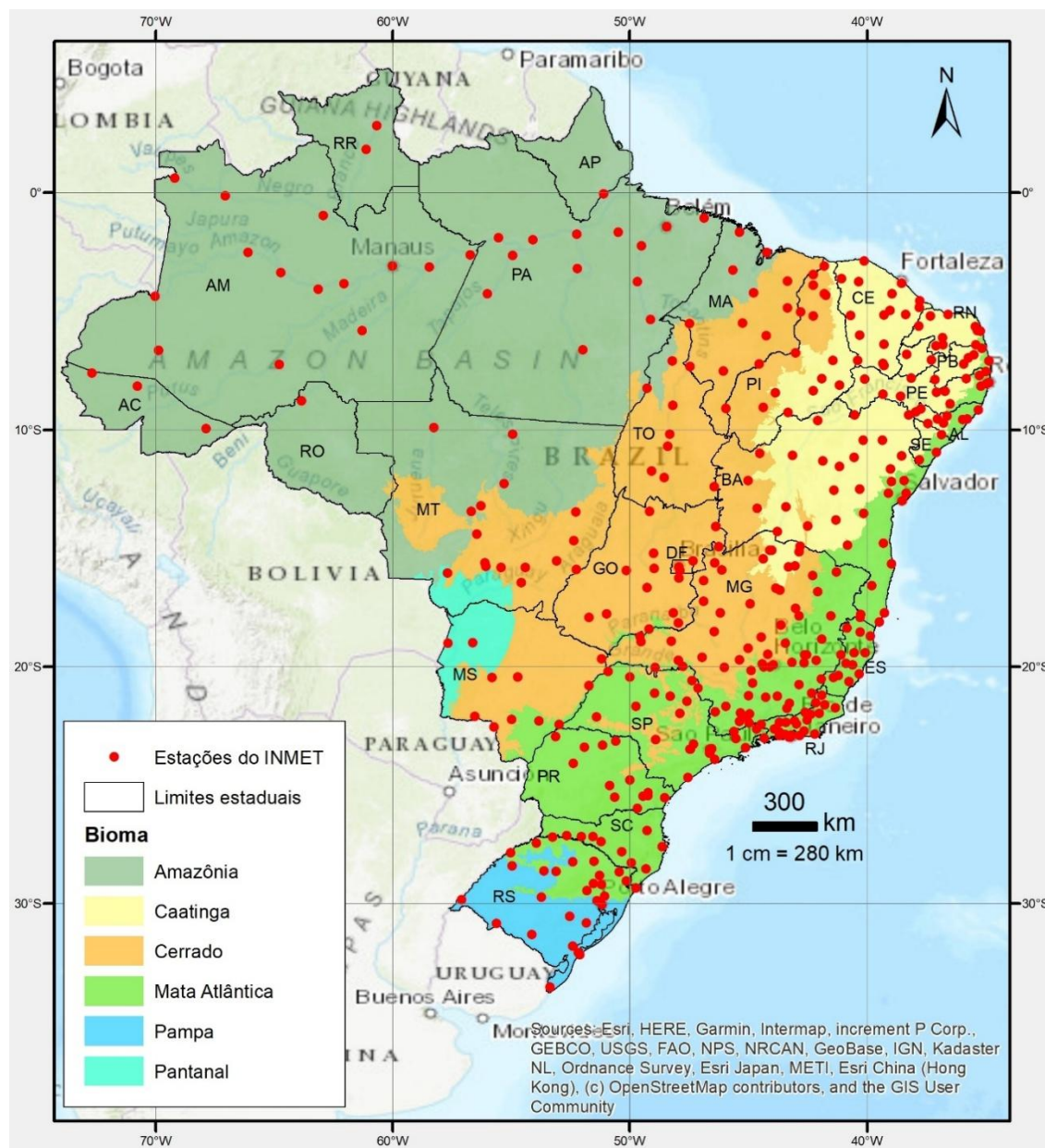


Figura 1 - Mapa de localização das estações INMET utilizadas neste estudo.

¹ Script utilizado neste processamento, disponível em: <https://link.ufms.br/E72Sf>.

Tabela 1 - Índice de Moran por bioma. Executado e linguagem Python no Google Colab: <https://link.ufms.br/msLTZ>.

Bioma	Índice de Moran	Estatística p	Amostras (n)
Amazônia	-0,015	0,135	50
Caatinga	-0,021	0,375	50
Cerrado	-0,021	0,480	50
Mata Atlântica	-0,019	0,245	50
Pantanal	-0,042	0,145	50
Pampa	-0,042	0,015	50

Diante deste cenário, adotou-se uma abordagem híbrida baseada em médias históricas, que se mostrou a alternativa mais robusta e parcimoniosa. O método consistiu em: (1) priorizar a média histórica da própria estação para preenchimento das lacunas, preservando as características locais da série; e (2) utilizar complementarmente a média do bioma para os casos com insuficiência de dados históricos (menos de 6 meses de registros), garantindo representatividade regional.

Para avaliar a qualidade do método de preenchimento, realizou-se uma validação cruzada, cujos resultados indicaram erro médio absoluto (MAE) de 52,7 mm, com 45% das estimativas apresentando erro ≤ 30 mm (Tabelas 2 e 3), demonstrando a adequação da abordagem escolhida. Do total de lacunas, apenas 12 foram preenchidas pela média do bioma devido à insuficiência de dados históricos, minimizando potenciais vieses².

Tabela 2 - Erros médios por método de preenchimento.

Método	Erro Médio	Amostra	Performance
Média por Estação	52.5 mm	488	Similar ao geral

Média por Bioma	61.6 mm	12	Pior (usado como fallback)
-----------------	---------	----	----------------------------

Tabela 3 - Métricas de erros obtidos pelo método das médias por estações.

Métrica	Valor	Interpretação
MAE	52.7 mm	Erro médio de ± 52.7 mm nas estimativas
RMSE	72.9 mm	Erros grandes penalizam mais (outliers)
Precisão ≤ 30 mm	45.0%	Quase metade das estimativas são muito precisas
Precisão ≤ 50 mm	58.6%	Mais da metade têm erro aceitável

Após o preenchimento, estações sem dados no período ou com menos de 12 meses de registros foram excluídas, restando 327 estações com séries quase completas, totalizando 4.509 registros de precipitação anual utilizados nas análises subsequentes. A distribuição final de estações e medidas por bioma é apresentada na **Tabela 4**.

Tabela 4 - Quantidade de estações e medidas de precipitação anual por bioma.

Bioma	Quantidade de estações	Quantidades de medidas
Cerrado	80	1.128
Caatinga	67	987
Amazônia	41	607
Mata Atlântica	123	1.559
Pampa	13	185
Pantanal	3	43

² Para visualização do script, acessar: <https://link.ufms.br/65wYs>.

Bioma	Quantidade de estações	Quantidades de medidas
TOTAL	327	4.509

Aquisição e processamento dos dados TRMM

Os dados de precipitação do produto TRMM 3B43 (resolução espacial de 0,25°) foram processados seguindo a metodologia proposta por Macedo et al. (2019), utilizando uma ferramenta desenvolvida em ArcGIS ModelBuilder 10.1 (ESRI, 2010). Os arquivos raster de precipitação anual gerados (Figura 2) permitiram a extração dos valores TRMM para as coordenadas das estações INMET. Essa etapa foi realizada por meio de um script desenvolvido em Python com auxílio de Inteligência Artificial (DEEPSEEK, 2025)³, que consolidou os dados observacionais e de satélites em uma única planilha para análise.

Análise estatística

O desempenho do TRMM 3B43 foi avaliado por meio de métricas estatísticas amplamente utilizadas na validação de produtos de precipitação (Pereira et al., 2013; Souza et al., 2022): coeficiente de determinação (R^2), erro absoluto médio (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e viés. Essas métricas foram calculadas para cada estação individualmente, considerando os valores anuais de precipitação. Em seguida, foram obtidas as médias por bioma e para o conjunto nacional, permitindo a identificação de padrões regionais de acurácia.

As análises estatísticas descritivas (média, desvio padrão, mínimo, máximo, quartis e

intervalo interquartil) foram realizadas para cada bioma, utilizando as bibliotecas NumPy (HARRIS et al., 2020) e pandas (THE PANDAS DEVELOPMENT TEAM, 2023) em ambiente Python. O coeficiente de variação (CV), definido como a razão entre o desvio padrão e a média, foi calculado para quantificar a variabilidade relativa da precipitação em cada bioma, permitindo comparar a dispersão dos dados independentemente da magnitude dos valores. Os resultados foram organizados em tabelas e visualizados por meio de boxplots, gerados com as bibliotecas matplotlib (Hunter, 2007) e seaborn (WASCOM, 2021).

Para a análise de tendências temporais, aplicou-se uma regressão linear simples entre os valores anuais de precipitação e o ano, para cada bioma, utilizando a função *linregress* da biblioteca SciPy (Virtanen et al., 2020). Foram extraídos o coeficiente angular (tendência em mm/ano), o coeficiente de determinação (R^2) e o valor-p, considerando como estatisticamente significativas as tendências com $p < 0,05$. Os resultados foram consolidados em uma tabela que indica a direção e a significância das mudanças ao longo do período estudado.

Na comparação entre os dados observados (estações INMET) e as estimativas do TRMM, foram calculadas as métricas de erro MAE, RMSE e viés para avaliar a acurácia do produto de satélite. Essas métricas foram obtidas a partir da diferença entre os valores estimados e observados em cada ano e estação, conforme descrito na literatura. Todos os processamentos estatísticos e a geração de gráficos foram realizados com scripts em Python, executados no ambiente Google Colab (GOOGLE, 2025).

³ Script disponível em: <https://link.ufms.br/TkFzg>.

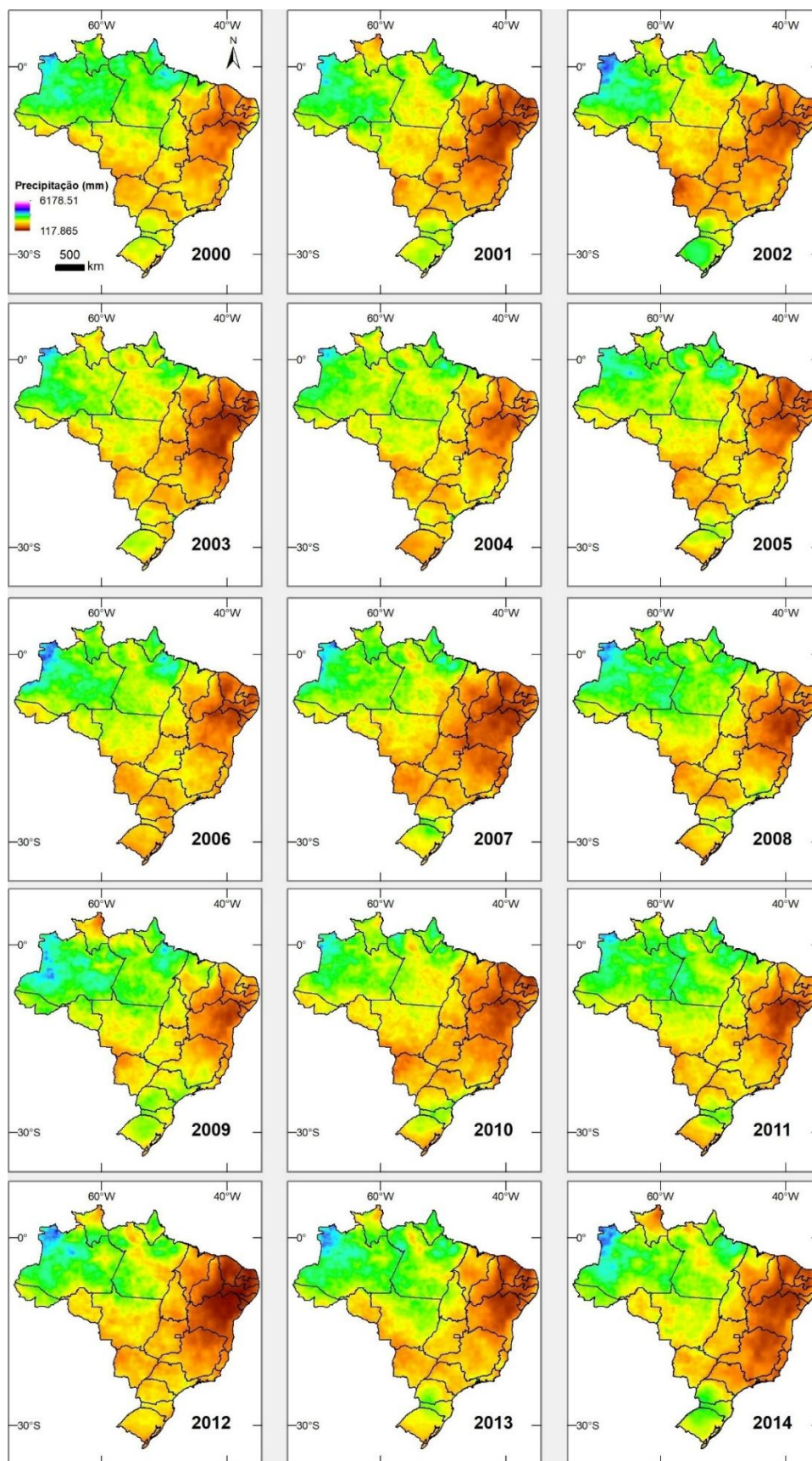


Figura 2 - Mapa de precipitações do Brasil estimadas pelo TRMM 3B43, processado por meio da ferramenta criada no ModelBuilder.

Resultados

A validação do produto de precipitação TRMM 3B43 contra dados observacionais de 327 estações hidrometeorológicas distribuídas nos seis biomas brasileiros, no período de 2000 a 2014 ($n =$

4.509 registros), demonstrou um desempenho geral satisfatório. O produto do satélite explicou 81,5% da variabilidade da precipitação observada ($R^2 = 0,815$), com erro absoluto médio de 186,7 mm/ano e viés positivo de +40,6 mm/ano, indicando uma tendência geral de superestimação por parte do TRMM (Figura 3).

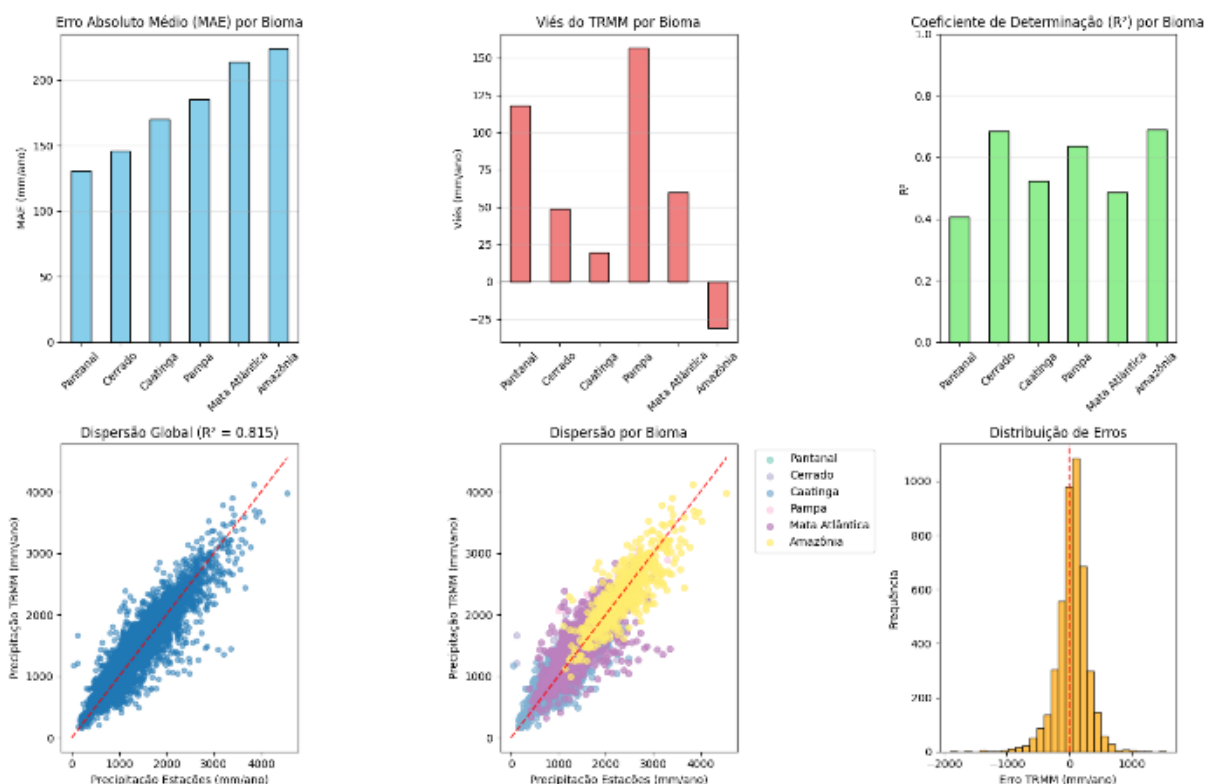


Figura 3 - Métricas de desempenho geral e por biomas no período analisado. Fonte: gerado pelo script criado em linguagem Python (<https://link.ufms.br/65wYs>).

Análise da distribuição das precipitações por bioma

O boxplot da distribuição das precipitações (Figura 4A) revela de maneira visualmente impactante a dramática variação de precipitação entre os biomas brasileiros, contando uma história de diversidade climática que vai da exuberância úmida da Amazônia à austeridade semiárida da Caatinga.

Os dados das estações INMET mostram a caixa da Amazônia posiciona-se isolada à direita, entre aproximadamente 1.970 e 2.660 mm/ano, demonstrando sua posição como o bioma mais chuvoso do país. A mediana em 2.289 mm situa-se quase no centro da caixa, indicando uma distribuição relativamente equilibrada entre anos mais e menos chuvosos. Os bigodes que se estendem até 1.112 mm no mínimo e 4.550 mm no máximo revelam a capacidade deste bioma de

experimental tanto períodos de relativa seca quanto eventos de precipitação extrema.

Agrupados na faixa de 1.100 a 1.800 mm/ano, encontram-se Pampa, Mata Atlântica e Cerrado, formando um conjunto com sobreposições significativas. O Pantanal destaca-se não pela posição, mas pela compactação. Sua caixa estreita (1.012-1.238 mm) com IQR de apenas 226 mm revela um regime pluviométrico notavelmente estável, possivelmente relacionado aos mecanismos regulatórios do ciclo hidrológico pantaneiro.

Posicionada claramente à esquerda, a Caatinga conta uma história de duplo desafio: baixa precipitação média (808 mm) combinada com alta imprevisibilidade. Sua caixa alongada (580-981 mm) com mediana deslocada para esquerda (756 mm) pintam o retrato de um bioma onde a escassez é a norma, mas os extremos são frequentes.

O produto TRMM (Figura 4B) reproduziu com notável fidelidade o gradiente pluviométrico observado nas estações, posicionando a Amazônia como bioma mais chuvoso (2.312 mm) e a Caatinga como o menos chuvoso (828 mm de precipitação média). Entretanto, diferenças

significativas emergem na representação da variabilidade interna: o TRMM apresentou caixa mais compacta para a Amazônia (IQR: 626 mm vs 688 mm das estações) e para o Cerrado (IQR: 409 mm vs 464 mm), sugerindo uma suavização das variações interanuais.

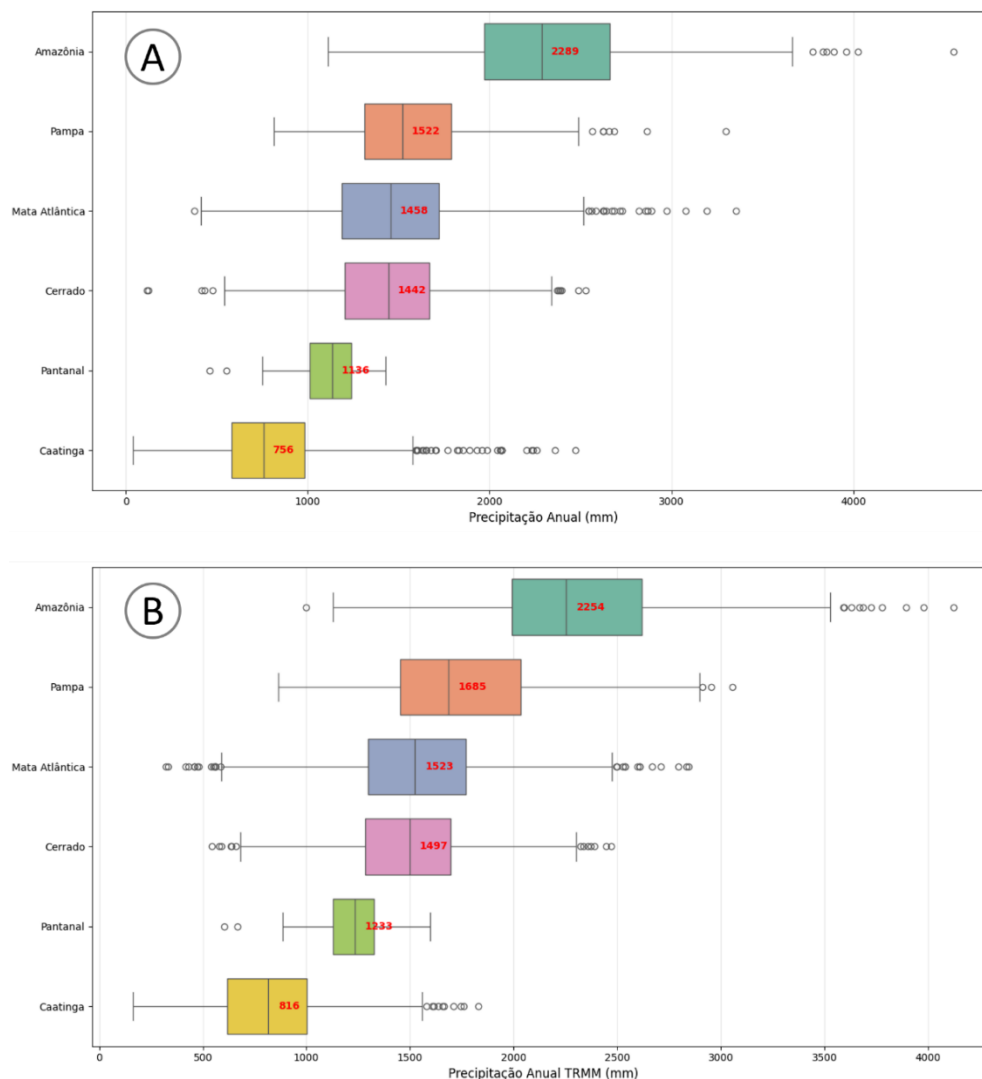


Figura 4 - Distribuição da precipitação por bioma. Dados retirados das estações INMET (A) e das estimativas TRMM 3B43 (B). Fonte: Elaborado pelos autores por meio de script Python (<https://link.ufms.br/OkkF9>).

Notavelmente, o TRMM capturou a alta variabilidade da Caatinga (CV: 34,2%), embora em magnitude inferior à observada nas estações (42,4%). O Pantanal manteve seu caráter de maior estabilidade pluviométrica (CV: 16,3% no TRMM vs 18,8% nas estações), enquanto a Mata Atlântica apresentou maior variabilidade no TRMM (CV: 26,3%) em comparação com os demais biomas do grupo intermediário.

A análise de outliers revelou padrões distintos de extremos pluviométricos entre os

biomas, com diferenças significativas na detecção entre estações e TRMM:

- **Amazônia:** As estações registraram 7 anos com precipitação excepcionalmente alta, enquanto o TRMM detectou 9 anos acima do extremo superior e 1 ano abaixo do inferior, indicando que o satélite superestima a frequência de extremos e introduz um padrão bilateral não observado in situ.
- **Pampa:** Redução significativa de outliers no TRMM, com apenas 3 anos de extremos

superiores contra 6 anos nas estações, sugerindo subdetecção de eventos de chuva intensa pelo satélite.

- Mata Atlântica: Mudança no padrão de assimetria - as estações mostraram predominância de extremos superiores com apenas 1 inferior, enquanto o TRMM apresentou equilíbrio entre outliers superiores e inferiores, indicando alteração na representação da distribuição de extremos.
- Cerrado: Manutenção do padrão bilateral, porém com diferenças qualitativas: as estações exibiram outliers inferiores mais extremos (valores mais afastados do bigode), enquanto o TRMM mostrou outliers mais compactos e próximos aos bigodes, sugerindo suavização dos valores mais extremos.
- Pantanal: Concordância notável entre estações e TRMM, ambos detectando apenas outliers inferiores com frequência similar, reforçando a vulnerabilidade deste bioma a eventos de seca severa.

- Caatinga: Manutenção do padrão de apenas outliers superiores em ambos os conjuntos, porém com redução significativa na frequência e magnitude no TRMM, que apresentou outliers mais compactos e próximos do bigode superior.

Estas diferenças na detecção de extremos destacam desafios específicos do produto TRMM em representar eventos pluviométricos excepcionais, com implicações para monitoramento de secas e inundações.

Análise detalhada da evolução temporal do viés do TRMM

O estudo do viés do produto de precipitação do TRMM em comparação com dados de estações meteorológicas, ao longo do período de 2000 a 2014, revela uma trajetória marcante de melhoria na precisão das estimativas de precipitação (

). A análise dos valores anuais de viés (em mm/ano) mostra uma clara tendência de redução ao longo do tempo, embora com variações interessantes que merecem destaque.

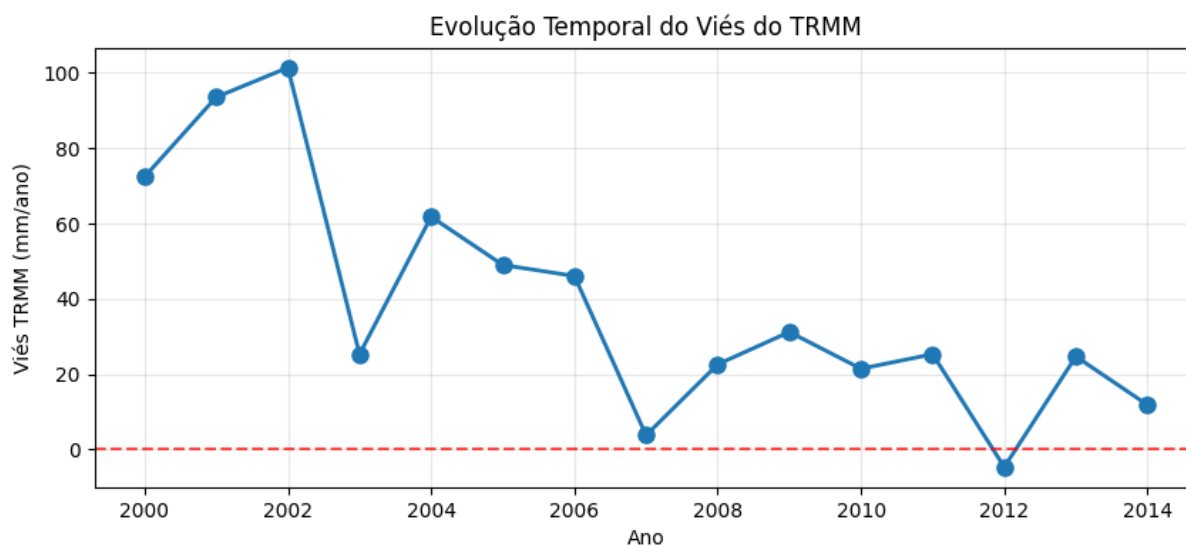


Figura 5 - Evolução temporal do viés global do TRMM. Fonte: gerado pelo script criado em linguagem Python (<https://link.ufms.br/65wYs>).

Padrões e Tendências Identificados:

1 - Período Inicial de Ajuste (2000-2002): Os primeiros anos apresentaram os maiores vieses positivos da série, atingindo o pico de 101,37 mm/ano em 2002. Isso sugere que, no início da operação, o TRMM superestimava

significativamente a precipitação em relação às estações terrestres.

2 Queda Acentuada (2003-2007): A partir de 2003, observa-se uma redução drástica no viés, que cai para 25,32 mm/ano, seguida por uma trajetória irregular, porém descendente, até atingir o menor valor positivo da série em 2007 (3,80 mm/ano). Esse período provavelmente reflete ajustes

contínuos nos algoritmos e processos de calibração do satélite.

3 - Estabilização com Viés Reduzido (2008-2011): Entre 2008 e 2011, o viés manteve-se em patamares relativamente baixos, variando entre 21,46 e 31,21 mm/ano, indicando uma fase de maior estabilidade e confiabilidade do produto.

4 - Viés Negativo em 2012: Um marco importante ocorreu em 2012, quando o viés se tornou negativo (-4,63 mm/ano), sugerindo que, nesse ano, o TRMM subestimou ligeiramente a precipitação em relação às estações. Esse comportamento pode estar associado a condições atmosféricas específicas ou a ajustes finos no sensoriamento.

5 - Tendência Final de Redução (2013-2014): Nos dois últimos anos da série, o viés manteve-se em

níveis baixos (24,70 mm/ano em 2013 e 11,85 mm/ano em 2014), reforçando a consolidação de uma estimativa mais próxima da realidade observada.

Desempenho por bioma

Os resultados revelaram padrões distintos de desempenho do TRMM entre os biomas brasileiros (Tabela 5 e Tabela 6; Figura 4). O Cerrado apresentou o melhor desempenho, com menor erro absoluto (MAE = 146,0 mm/ano) e alta correlação ($R^2 = 0,686$), acompanhado por diferença percentual mínima (+3,4%). A Caatinga destacou-se pelo viés quase neutro (+19,4 mm/ano) e alta precisão percentual (+2,4%).

Tabela 5 - Estatística detalhada por bioma

Bioma	Correlação	Precipitação média (Estações - mm/ano)	Precipitação média (TRMM - mm/ano)	Diferença percentual
Cerrado	0,842	1435.8	1484.4	+3,4%
Caatinga	0,732	808.3	827.7	+2.4%
Amazônia	0.837	2343.2	2312.1	-1.3%
Mata Atlântica	0.746	1468.2	1528.4	+4.1%
Pampa	0.896	1596.0	1752.6	+9.8%
Pantanal	0.863	1101.0	1218.7	+10.7%

Em contraste, a Amazônia foi o único bioma onde o TRMM subestimou a precipitação (viés = -31,1 mm/ano; -1,3%), embora mantivesse boa correlação ($R^2 = 0,690$). O Pampa e Pantanal apresentaram os vieses percentuais mais elevados (+9,8% e +10,7%, respectivamente), indicando

superestimação significativa. A Mata Atlântica mostrou o pior desempenho em termos de capacidade explicativa ($R^2 = 0,487$), sugerindo limitações do produto em regiões costeiras complexas.

Tabela 6 - Métricas de desempenho do TRMM por bioma brasileiro (2000-2014)

Bioma	MAE (mm/ano)	RMSE (mm/ano)	R^2	Viés (mm/ano)	N
Cerrado	146,0	194,7	0,686	+48,7	1.128
Caatinga	169,9	236,5	0,523	+19,4	987

Bioma	MAE (mm/ano)	RMSE (mm/ano)	R²	Viés (mm/ano)	N
Amazônia	224,0	293,5	0,690	-31,1	607
Mata Atlântica	214,0	297,1	0,487	+60,2	1.559
Pampa	185,6	247,1	0,635	+156,6	185
Pantanal	130,7	158,1	0,405	+117,7	43

Discussão

Desempenho global do TRMM 3B43 para o Brasil

A avaliação do produto TRMM 3B43 para o território brasileiro no período de 2000 a 2014 demonstrou um desempenho global satisfatório, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,815, indicando que o produto explica 81,5% da variabilidade da precipitação observada nas estações hidrometeorológicas. Este resultado corrobora estudos anteriores que validaram o TRMM para o Brasil, como o de Pereira et al. (2013), que também encontraram altas correlações (~97%) entre dados do TRMM e observações de estações meteorológicas.

O viés positivo global de +40,6 mm/ano observado em nosso estudo confirma a tendência de superestimação reportada na literatura para produtos TRMM. Pereira et al. (2013), utilizando a versão 6 do produto 3B43, encontraram superestimação média de 8% para o território brasileiro, com variações regionais entre 6% e 13%. Nossos resultados mostram uma superestimação absoluta de aproximadamente 2,7% considerando a precipitação média anual brasileira, o que representa uma melhora em relação às versões anteriores do produto.

Em linha com nossos achados, Quirino et al. (2013), em estudo no estado de Goiás (2008-2011) utilizando o algoritmo 3B42 V7 (precursor direto do 3B43), também reportaram uma tendência clara do TRMM em superestimar a precipitação nos meses chuvosos e subestimar nos meses secos, reforçando o padrão de viés sazonal identificado em nossa análise nacional.

O Erro Absoluto Médio (MAE) de 186,7 mm/ano e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) de 258,1 mm/ano demonstram que, embora o

produto apresente boa acurácia na captura dos padrões espaciais e temporais da precipitação (evidenciada pelo alto R^2), existem erros absolutos significativos que devem ser considerados em aplicações que requerem valores precisos de precipitação.

Distribuição das chuvas - implicações para vulnerabilidade climática

A análise comparativa da distribuição de precipitação entre dados in situ e TRMM revela nuances importantes sobre a vulnerabilidade climática dos biomas brasileiros. A distribuição assimétrica dos outliers nas estações demonstra que a susceptibilidade a extremos climáticos varia significativamente entre os biomas: Pampa, Caatinga e Amazônia mostram maior vulnerabilidade a eventos de precipitação extrema, com implicações para riscos de inundações, erosão e alterações nos regimes hidrológicos; Pantanal demonstra particular sensibilidade a déficits hídricos severos, com potencial para comprometimento de seus sistemas alagáveis característicos; Cerrado apresenta vulnerabilidade dual, exigindo estratégias adaptativas mais complexas para enfrentar ambos os tipos de extremos climáticos. Essa dualidade no Cerrado é consistente com os achados de Campos e Chaves (2019), que identificaram tendências de redução na precipitação anual em 71% das estações analisadas, mas com meses chuvosos apresentando quedas significativas (como janeiro, com redução de 26%), ao mesmo tempo em que a estação seca se intensifica. Marcuzzo et al. (2012), ao analisarem a sazonalidade no Cerrado do Mato Grosso do Sul, já haviam identificado padrões preocupantes: 56,39% dos meses no período 1977-2006 foram classificados como secos a extremamente secos pelo Índice de Anomalia de Chuva (IAC), ante apenas 41,67% de meses chuvosos a extremamente chuvosos. Esse desequilíbrio sazonal corrobora a

tendência de intensificação da estação seca identificada por Campos e Chaves (2019), que relataram reduções de precipitação nos meses de transição entre estações (maio: -11%, setembro: -36%, outubro: -22%), indicando um prolongamento do período seco.

Entretanto, a representação desses padrões pelo TRMM introduz importantes qualificações. A detecção de um outlier inferior na Amazônia pelo TRMM, não observado nas estações, sugere que o produto do satélite pode superestimar a ocorrência de secas extremas neste bioma. Este achado corrobora com Ribeiro et al. (2018), que identificaram a Amazônia como bioma com maior precipitação média, mas também com alta variabilidade interanual. Similarmente, a subdetecção de outliers superiores no Pampa (3 no TRMM vs 6 nas estações) indica possíveis limitações do satélite em capturar eventos convectivos intensos característicos desta região, padrão também observado por Penereiro et al. (2017) em análises de tendências sazonais.

A concordância entre ambos os conjuntos de dados no Pantanal reforça a confiabilidade do TRMM para monitoramento de secas neste bioma criticamente dependente de regularidade hídrica, conforme destacado por Ribeiro et al. (2018) em seu estudo sobre a relação entre pluviometria, NDVI e umidade do solo. No Cerrado, a manutenção do padrão bilateral por ambos os conjuntos, mas com outliers menos extremos no TRMM, sugere que o produto pode ser conservador na detecção de eventos severos, possivelmente subestimando riscos climáticos para a agricultura e recursos hídricos desta região, o que se alinha com as observações de Penereiro et al. (2017) sobre tendências de temperatura neste bioma.

A ausência de outliers inferiores em três dos seis biomas estudados pelas estações (Pampa, Caatinga e Amazônia) sugere que estes ecossistemas podem possuir mecanismos de resiliência mais eficazes contra extremos de seca dentro da variabilidade climática observada no período. No entanto, a detecção de outliers bilaterais na Mata Atlântica pelo TRMM contrasta com o padrão predominantemente unilateral das estações, indicando possíveis diferenças na sensibilidade a diferentes tipos de eventos extremos, aspecto também observado por Ribeiro et al. (2018) em análises de correlação entre variáveis ambientais.

Estes padrões de extremos pluviométricos fornecem subsídios importantes para o desenvolvimento de estratégias de conservação específicas por bioma, particularmente em cenários

de mudanças climáticas onde a frequência e intensidade de eventos extremos tendem a aumentar, conforme alertado por Penereiro et al. (2017) em seu estudo abrangente sobre tendências climáticas. A complementaridade entre dados in situ e orbitais mostra-se essencial para uma compreensão abrangente da vulnerabilidade climática, com as estações fornecendo a base de validação para eventos extremos e o TRMM oferecendo a cobertura espacial necessária para monitoramento em regiões com escassez de dados terrestres, abordagem similar à utilizada por Ribeiro et al. (2018) em sua análise integrada de múltiplas variáveis ambientais.

As diferenças observadas na detecção de outliers destacam a importância de considerar as limitações específicas de cada produto no planejamento de ações de adaptação climática, particularmente para aplicações que demandam alta confiabilidade na detecção de eventos extremos, como sistemas de alerta de desastres e gestão de recursos hídricos. Esta necessidade de validação cuidadosa é consistente com as recomendações de Penereiro et al. (2017), que enfatizam a importância de análises estatísticas robustas para identificação de tendências climáticas confiáveis.

Os resultados aqui apresentados ampliam as constatações de Ribeiro et al. (2018) sobre as diferenças quantitativas entre biomas, demonstrando que além das variações médias, os padrões de extremos pluviométricos também apresentam assinaturas distintivas por bioma. Da mesma forma, complementam as análises de Penereiro et al. (2017) ao fornecer uma caracterização mais detalhada do comportamento dos extremos de precipitação, que são cruciais para a compreensão dos impactos das mudanças climáticas nos diferentes ecossistemas brasileiros.

A integração desses achados com estudos anteriores sugere que a vulnerabilidade climática dos biomas brasileiros é multidimensional, envolvendo não apenas as características médias de precipitação, mas também a frequência e intensidade de eventos extremos, bem como a capacidade de detecção desses eventos pelos diferentes sistemas de monitoramento disponíveis.

Variabilidade espacial do desempenho por bioma

Uma das principais contribuições deste estudo é a revelação da acentuada variabilidade espacial no desempenho do TRMM 3B43 entre os diferentes biomas brasileiros. Esta variabilidade corrobora os achados de Michot et al. (2018), que

destacaram a influência de fatores regionais na acurácia de produtos de precipitação por satélite.

Cerrado - Melhor desempenho

O Cerrado apresentou o melhor desempenho entre todos os biomas ($MAE = 146,0$ mm/ano; $R^2 = 0,686$), o que pode ser atribuído à sua topografia menos acidentada e aos padrões climáticos mais homogêneos. Este resultado está alinhado com Pereira et al. (2013), que reportaram a menor superestimação do TRMM para a região Centro-Oeste (9%), onde o Cerrado é predominante. O estudo de Quirino et al. (2013) em Goiás, estado inserido majoritariamente no Cerrado, encontrou correlações elevadas entre o TRMM e as estações de superfície, validando a boa performance do produto nesse bioma, mesmo apontando para a necessidade de ajustes sazonais. Araújo et al. (2022), avaliando a região de transição Cerrado-Amazônia no norte do Tocantins (Bico do Papagaio), também encontraram correlações muito altas (r entre 0,84 e 0,91) e coeficientes de determinação (R^2 entre 0,70 e 0,84) para dados mensais, reforçando a confiabilidade do TRMM em áreas do bioma Cerrado e suas transições.

Amazônia - Padrão de subestimação único

A Amazônia foi o único bioma onde o TRMM 3B43 apresentou subestimação (-1,3%), padrão também observado por Michot et al. (2018) em estudo específico na bacia amazônica. Estes autores atribuem este viés negativo à dificuldade do sensor em penetrar sistemas convectivos profundos característicos da floresta tropical. Ballari et al. (2016), ao validarem o TRMM 3B43 no Equador, encontraram um padrão semelhante na região da Floresta Amazônica equatoriana, com um viés positivo baixo (25,28 mm) e uma correlação de 0,78, indicando que a subestimação é uma característica consistente do produto em ambientes de floresta tropical úmida, possivelmente devido à incapacidade dos sensores em detectar completamente a precipitação de nuvens baixas e sistemas convectivos profundos.

Caatinga - Desempenho satisfatório em região semiárida

A Caatinga destacou-se em nossa análise pelo viés bem pequeno (+19,4 mm/ano) e alta precisão percentual (+2,4%), demonstrando uma boa captura dos totais pluviométricos pelo TRMM neste bioma semiárido. Este resultado é fortemente respaldado pelo estudo de Medeiros-Feitosa e Oliveira (2020), que, ao validar o TRMM no estado do Ceará (bioma Caatinga) entre 1998 e 2017,

encontraram uma performance excepcional, com correlação de 0,96, Erro Médio Absoluto (MAE) de 16,46 mm e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) de 26,78 mm. Os autores atribuíram esse excelente desempenho às condições atmosféricas predominantes na região, como alta radiação solar e baixa cobertura de nuvens durante a maior parte do ano, que favorecem a atuação dos sensores do satélite. A divergência no R^2 (0,523 em nosso estudo contra ~0,92 no Ceará) pode estar associada a diferenças metodológicas, como a abordagem de comparação "pixel a pixel" adotada por eles, que se mostrou superior, ou à densidade e distribuição das estações de validação utilizadas.

Mata Atlântica - Pior desempenho explicativo

A Mata Atlântica apresentou o pior desempenho em termos de capacidade explicativa ($R^2 = 0,487$), revelando as limitações do produto em regiões costeiras montanhosas com alta complexidade orográfica. Este achado corrobora Pereira et al. (2013), que reportaram as maiores superestimações do TRMM (13%) para a região Sudeste. Este resultado encontra eco no estudo de Ballari et al. (2016), que identificou os *Andean highlands* (região montanhosa dos Andes) como a área de pior desempenho do TRMM 3B43 no Equador, com a menor correlação (0,75) e o maior viés (27,89 mm) entre as três regiões analisadas. Isso reforça que a complexidade topográfica é um fator crítico que limita significativamente a acurácia do produto TRMM, seja nas escarpas da Mata Atlântica brasileira ou nas elevadas altitudes andinas.

Pampa e Pantanal - Vieses percentuais elevados

O Pampa e Pantanal apresentaram os maiores vieses percentuais (+9,8% e +10,7%, respectivamente), possivelmente relacionados à influência de corpos d'água e à complexa interação terra-atmosfera nestes biomas. Nossos resultados para o Pantanal (viés de +117,7 mm/ano) são consistentes com o estudo de Souza et al. (2022), que avaliou o TRMM 3B43 V7 no Pantanal Sul-Mato-Grossense (1998-2019). Eles identificaram que o produto tende a superestimar significativamente a precipitação no período seco (maio a outubro), com um viés relativo de +25,2%, enquanto subestima ligeiramente no período chuvoso. Essa superestimação na estação seca foi atribuída por eles à potencial influência de aerossóis de queimadas, que podem alterar a microfísica de nuvens e afetar as estimativas do satélite.

1.2. Implicações para aplicações práticas

Os resultados demonstram que a escolha do produto TRMM 3B43 deve considerar a finalidade da aplicação. Para estudos de variabilidade espacial e temporal, o produto apresenta desempenho global muito satisfatório ($R^2 = 0,815$). No entanto, para aplicações que requerem valores absolutos precisos, como modelagem hidrológica quantitativa, são necessários ajustes regionais específicos.

O desempenho diferenciado por bioma ressalta a importância de estratégias de correção regionalizadas, mais do que a aplicação de um fator de correção único para todo o território nacional. Os trabalhos de Souza et al. (2022) no Pantanal, Medeiros-Feitosa e Oliveira (2020) no Ceará, Araújo et al. (2022) no Tocantins e Ballari et al. (2016) no Equador reforçam essa necessidade, mostrando que a performance do TRMM é altamente dependente do contexto regional, sendo influenciada por fatores como sazonalidade, topografia, tipo de cobertura do solo e regime de precipitação. Portanto, algoritmos de correção devem ser desenvolvidos e aplicados considerando essas particularidades regionais e até mesmo sazonais para se obter maior precisão.

Perspectivas futuras

A transição para produtos mais recentes, como a *Global Precipitation Measurement* (GPM) Mission, mencionada por Michot et al. (2018), representa uma oportunidade para superar algumas das limitações identificadas no TRMM 3B43, particularmente em regiões de complexa topografia como a Mata Atlântica e em biomas com padrões de precipitação complexos como a Amazônia. A validação consistente e contínua, como a realizada nos estudos aqui citados para diferentes regiões do Brasil e do mundo (como o Equador), é fundamental para orientar o aprimoramento desses novos produtos e garantir sua confiabilidade para aplicações hidrometeorológicas e climáticas. O estudo de Ballari et al. (2016), por exemplo, já utilizou a versão V7 do TRMM, que mostrou melhorias em relação à V6, indicando que o contínuo refinamento dos algoritmos é capaz de gerar produtos mais robustos.

Conclusões

Este estudo realizou uma avaliação abrangente da acurácia do produto de precipitação TRMM 3B43 em escala nacional e por bioma, com base em dados de estações do INMET no período de 2000 a 2014. Os resultados demonstraram que o produto apresenta desempenho global satisfatório,

com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,815, indicando sua capacidade de capturar a variabilidade espacial e temporal da precipitação no Brasil. No entanto, o viés positivo de +40,6 mm/ano e o Erro Absoluto Médio de 186,7 mm/ano evidenciam a necessidade de cautela em aplicações que demandem valores absolutos de precipitação.

A análise por bioma revelou uma notável variabilidade no desempenho do TRMM. O Cerrado foi o bioma com melhor desempenho, enquanto a Mata Atlântica apresentou a menor correlação com os dados observados, provavelmente em função de sua complexa topografia e influência oceânica. A análise de extremos pluviométricos revelou padrões distintos entre os biomas: Pampa, Caatinga e Amazônia apresentaram vulnerabilidade predominante a eventos de precipitação extrema (outliers superiores), enquanto o Pantanal mostrou sensibilidade a déficits hídricos severos (outliers inferiores). Destaca-se o Cerrado como único bioma com exposição bilateral a ambos os tipos de extremos, fator que pode influenciar o desempenho do TRMM em condições climáticas anômalas.

A Amazônia foi o único bioma onde o TRMM subestimou a precipitação, um padrão também observado em estudos realizados em outras regiões de floresta tropical, como no Equador. Vale destacar que, apesar desta subestimativa geral, a Amazônia apresentou anos com precipitação excepcionalmente alta, sugerindo que o produto pode ter dificuldades adicionais em capturar eventos extremos positivos neste bioma. A Caatinga, por sua vez, mostrou viés reduzido, corroborando estudos anteriores que apontam boa performance do produto em regiões semiáridas. Contudo, a alta frequência de outliers superiores neste bioma indica que o TRMM pode enfrentar desafios na representação de eventos de chuva intensa em regimes semiáridos.

Os resultados reforçam a importância de validações regionais para produtos de precipitação derivados de satélite, uma vez que fatores locais como topografia, tipo de vegetação e regime de chuvas influenciam significativamente a acurácia das estimativas. A identificação de padrões específicos de extremos pluviométricos por bioma fornece *insights* valiosos para o desenvolvimento de algoritmos de correção mais robustos, particularmente para eventos climáticos extremos. O TRMM 3B43 mostrou-se uma ferramenta valiosa para estudos de clima, tendências e modelagem hidrológica em regiões com escassez de dados *in situ*, desde que consideradas suas

limitações e aplicados ajustes específicos por bioma ou regime climático.

Para estudos futuros, recomenda-se a exploração de técnicas de correção de vies adaptadas a cada bioma, com especial atenção ao desempenho do produto durante eventos extremos de precipitação, bem como a transição para produtos de missões mais recentes, como a *Global Precipitation Measurement* (GPM), que prometem avanços na resolução e na precisão das estimativas de precipitação e potencial melhoria na detecção de valores extremos.

Material suplementar

Os arquivos raster GeoTiff gerados nos processamentos realizados com arquivos NetCDF dos dados TRMM podem ser baixados neste endereço https://link.ufms.br/TRMM_GeoTIFF. A planilha com os dados das estações INMET compilados estão disponíveis neste endereço: https://link.ufms.br/estacoes_INMET. Os arquivos TRMM no formato NetCDF estão disponíveis neste endereço: https://link.ufms.br/TRMM_NetCDF. A ferramenta para processamento dos dados TRMM NetCDF está disponível neste endereço: https://link.ufms.br/ArcGIS_ModelBuider.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FUNDECT (processos 267/2022, 172/2023, 342/2024, 111/2024) pelo apoio financeiro dado às nossas pesquisas. Também agradecemos à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) por fornecer a licença do ArcGIS Pro, o qual utilizamos neste artigo, bem como pelo fornecimento do auxílio financeiro para pagamento da taxa de publicação. Os autores informam que ferramentas de inteligência artificial (modelos de linguagem) foram utilizadas exclusivamente como apoio na elaboração de scripts para processamento de dados e automação de análises estatísticas, conforme indicado na seção de metodologia e material suplementar. Os autores assumem integral responsabilidade pelo conteúdo científico, análises e conclusões apresentadas neste trabalho.

Referências

Abouzied, G. A. A., et al. (2025). Completion of the Central Italy daily precipitation instrumental data series from 1951 to 2019. *Geoscience Data Journal*, 12, e267.

Araújo, H. L., Silva, J. M., Lima, R. S., & Costa, F. A. (2022). Análise comparativa entre dados de precipitação observados em superfície e estimados por satélite TRMM na região norte do Tocantins. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 10, 14–22.

Ballari, D., Castro, E., & Campozano, L. (2016). Validation of satellite precipitation (TRMM 3B43) in Ecuadorian coastal plains, Andean highlands and Amazonian rainforest. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-B8, 305–311.

Campos, J. O., & Chaves, H. M. L. (2019). Tendências e variabilidades nas séries históricas de precipitação mensal e anual no bioma Cerrado no período 1977–2010. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34, 157–168. <https://doi.org/10.1590/0102-7786351019>

Collischonn, B., Collischonn, R., & Tucci, C. E. M. (2007). Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior. *Revista Brasileira de Cartografia*, 59, 93–99. <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43965>

DeepSeek. (2025). *DeepSeek-V3: Modelo de linguagem de inteligência artificial*. <https://www.deepseek.com/>

ESRI. (2010). *ArcGIS Desktop (Version 10)*. ESRI. Google. (2025). *Google Colab*. <https://colab.research.google.com/>

Harris, C. R., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

Huerta, A., Serrano-Notivol, R., Brönnimann, S. (2024). *SC-PREC4SA: A serially complete daily precipitation dataset for South America*. EarthArXiv. <https://doi.org/10.31223/X5JQ7D>

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K. P., & Stocker, E. F. (2007). The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38–55. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>

Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

- Kidd, C., & Huffman, G. (2011). Global precipitation measurement. *Meteorological Applications*, 18(3), 334–353. <https://doi.org/10.1002/met.284>
- Macedo, H. A., Stevaux, J. C., Silva, A., & Bergier, I. (2019). Water balance of the Upper Paraguay Basin and its relationship with hydroclimatological dynamics of the Pantanal wetland. *RAE GA – O Espaço Geográfico em Análise*, 46, 34–47. <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/67014>
- Marcuzzo, F. F. N., Melo, D. C. R., & Costa, H. C. (2012). Sazonalidade e distribuição espaço-temporal das chuvas no bioma do Cerrado do estado do Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17(1), 77–86. https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/613/1/art_sazonal_marcuzzo.pdf
- Medeiros-Feitosa, J. R., & Oliveira, C. W. (2020). Estudo comparativo dos dados de precipitação do satélite TRMM e postos pluviométricos no estado do Ceará, Brasil. *Revista Geográfica de América Central*, 65, 239–262. <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.10>
- Michot, V., Vila, D., Arvor, D., Silva, F. R., & Sondag, F. (2018). Performance of TRMM TMPA 3B42 V7 in replicating daily rainfall and regional rainfall regimes in the Amazon Basin (1998–2013). *Remote Sensing*, 10(12), 1879. <https://doi.org/10.3390/rs10121879>
- Moran, P. A. P. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37(1–2), 17–23. <https://doi.org/10.1093/biomet/37.1-2.17>
- Penereiro, J. C., Badinger, A., Maccheri, N. A., & Meschiatti, M. C. (2017). Distribuições de tendências sazonais de temperatura média e precipitação nos biomas brasileiros. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(1), 97–112. <https://doi.org/10.1590/0102-7786321009>
- Pereira, G., Silva, M. E. S., Moraes, E. C., & Cardozo, F. S. (2013). Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18(3), 139–148.
- Quirino, D. T., Paula Neto, H. M., & Oliveira, R. A. J. (2013). Avaliação das estimativas de precipitação do satélite TRMM (algoritmo 3B42 V7) sobre o estado de Goiás. In *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/66/SBRH2013_PAP013360.pdf
- Rey, S. J., & Luna, F. (2023). *PySAL: Python Spatial Analysis Library*. <https://pysal.org/>
- Ribeiro, H. J., Ferreira, N. C., Oliveira, W. N., Siqueira, R. V., Oliveira, A. W. N., & Oliveira, V. T. (2018). Distribuição da pluviometria, NDVI e umidade do solo nos biomas brasileiros. In *Anais do 7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal* (pp. 400–410). <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m16b/2022/05.20.10.56/doc/p62.pdf>
- Serrano-Notivol, R., de Luis, M., & Beguería, S. (2017). An R package for daily precipitation climate series reconstruction. *Environmental Modelling & Software*, 89, 190–195. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.005>
- Silva, T. M. M. (2024). *Preenchimento de falhas em série de dados meteorológicos e evolução temporal de índices bioclimáticos na bacia hidrográfica do Alto Paranapanema* (Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista).
- Souza, A., Silva, R. C., Oliveira, L. M., & Almeida, T. (2022). Evaluation of TRMM 3B43V7 satellite precipitation in the Pantanal of Mato Grosso do Sul in the years 1998 to 2019. *Mercator*, 21, e21023. <https://doi.org/10.4215/rm2022.e21023>
- The Pandas Development Team. (2023). *pandas-dev/pandas*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>
- Virtanen, P., et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Waskom, M. L. (2021). seaborn: Statistical data visualization. *Journal of Open Source Software*, 6(60), 3021. <https://doi.org/10.21105/joss.03021>