

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS - CIAMB**

GIOVANA MARANHÃO BETTIOL

**CONFORMIDADE ENTRE DADOS BIOFÍSICOS ORBITAIS E TERRESTRES
PARA O ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO, IDENTIFICAÇÃO ESPAÇO-
TEMPORAL DE TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO E SUAS RELAÇÕES COM
USO E COBERTURA DA TERRA NO BIOMA CERRADO**

Orientador: Dr. Manuel Eduardo Ferreira

GOIÂNIA

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
GERÊNCIA DE CURSOS E PROGRAMAS INTERDISCIPLINARES

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

GIOVANA MARANHÃO BETTIOL

3. Título do trabalho

CONFORMIDADE ENTRE DADOS BIOFÍSICOS ORBITAIS E TERRESTRES PARA O ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO, IDENTIFICAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO E SUAS RELAÇÕES COM USO E COBERTURA DA TERRA NO BIOMA CERRADO

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a)** consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b)** novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo

autor.



Documento assinado eletronicamente por **Manuel Eduardo Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 15/10/2021, às 18:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **GIOVANA MARANHÃO BETTIOL, Usuário Externo**, em 18/10/2021, às 19:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2390348** e o código CRC **1F18E74B**.

Referência: Processo nº 23070.048369/2021-16

SEI nº 2390348

GIOVANA MARANHÃO BETTIOL

**CONFORMIDADE ENTRE DADOS BIOFÍSICOS ORBITAIS E TERRESTRES
PARA O ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO, IDENTIFICAÇÃO ESPAÇO-
TEMPORAL DE TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO E SUAS RELAÇÕES COM O
USO E COBERTURA DA TERRA NO BIOMA CERRADO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestra em Ciências Ambientais.

Orientador: Dr. Manuel Eduardo Ferreira

Goiânia-GO

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Bettiol, Giovana Maranhão
CONFORMIDADE ENTRE DADOS BIOFÍSICOS ORBITAIS E TERRESTRES PARA O ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO, IDENTIFICAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO E SUAS RELAÇÕES COM USO E COBERTURA DA TERRA NO BIOMA CERRADO [manuscrito] / Giovana Maranhão Bettiol. - 2021.
199 f.: il.

Orientador: Prof. Manuel Eduardo Ferreira.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Pró reitoria de Pós-graduação (PRPG), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Goiânia, 2021.
Bibliografia. Anexos. Apêndice.
Inclui siglas, mapas, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. ZARC. 2. Cerrado. 3. Modelo Digital de Elevação. 4. GPM. 5. Tendência de Precipitação. I. Ferreira, Manuel Eduardo, orient. II. Título.

CDU 502/504



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

GERÊNCIA DE CURSOS E PROGRAMAS INTERDISCIPLINARES

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 17 da sessão de Defesa de Dissertação de **Giovana Maranhão Bettiol**, que confere o título de Mestre(a) em **Ciências Ambientais**, na área de concentração em **Estrutura e Dinâmica Ambiental**.

Ao/s **dez de setembro de 2021**, a partir da(s) **nove horas**, no(a) sala virtual <https://meet.google.com/tgr-bvju-wrt>, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“CONFORMIDADE ENTRE DADOS BIOFÍSICOS ORBITAIS E TERRESTRES PARA O ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO, IDENTIFICAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO E**

SUAS RELAÇÕES COM USO E COBERTURA DA TERRA NO BIOMA CERRADO”. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Professor(a) Doutor(a) Manuel Eduardo Ferreira (CIAMB/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor(a) Doutor(a) **Laerte Guimarães Ferreira Jr. (CIAMB/UFG)**, membro titular interno; Professor(a) Doutor(a) **Gislaine Cristina Luiz (IESA/UFG)**, membro titular externo. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido(a) o(a) candidato(a) **aprovado(a)** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo(a) Professor(a) Doutor(a) Manuel Eduardo Ferreira, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao(s) **dez de setembro de 2021**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Manuel Eduardo Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 28/10/2021, às 09:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gislaine Cristina Luiz, Professora do Magistério Superior**, em 28/10/2021, às 19:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Laerte Guimarães Ferreira Júnior, Professor do Magistério Superior**, em 29/10/2021, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?

29/10/2021 14:44

SEI/UGF - 2449280 - Ata de Defesa de Dissertação



[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](#), informando o código verificador **2449280** e o código CRC **600FD0D6**.

Referência: Processo nº 23070.048369/2021-16

SEI nº 2449280

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho. À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), por me conceder licença integral para o desenvolvimento da pesquisa. Ao meu orientador professor Dr. Manuel Eduardo Ferreira, pela orientação, atenção e disponibilidade costumeira. Ao professor e pesquisador da Embrapa Dr. Edson Eyji Sano, pela ajuda e presteza de sempre. Ao pesquisador da Embrapa Dr. Fernando Antonio Macena da Silva, pelo auxílio sempre prestado e incentivo para seguir em frente. À amiga Thaise Sussane de Souza Lopes, sempre ouvidos e com uma palavra amiga para me acalmar. Ao meu companheiro de vida, Luiz Pacheco Motta, sem o qual essa dissertação não teria acontecido; agradeço imensamente pela paciência, tempo e amor a mim dedicados. Aos colegas do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG), em especial ao João Vitor Silva Costa, pelas boas risadas e palavras de motivação. Aos amigos que ganhei nessa caminhada: Ana Carolina, Bruno, Joyce, Rodrigo, Mateus, os quais ingressaram comigo no mestrado e com os quais dividi os sabores e dissabores dessa jornada. Ao meu pai, Osmar Bettiol, e ao meu irmão, Fábio Maranhão Bettiol, pelo apoio incondicional. À minha mãe, Eugênia Maranhão Bettiol, Msc. bibliotecária aposentada da Embrapa, que cumpriu sua missão na terra e partiu em agosto de 2020. Ela sempre me dizia para que educação de boa qualidade era o bem mais precioso que ela poderia me deixar. Dona Eugênia, como sempre, estava certa. Espero continuar honrando seus ensinamentos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área de estudo, o bioma Cerrado (em verde) e regiões hidrográficas que recebem contribuições hídricas do bioma (em azul).....	58
Figura 2 - Fluxograma com etapas metodológicas, capítulo II.	60
Figura 3 - Fluxograma com etapas metodológicas, capítulo III.	60
Figura 4 - Fluxograma com etapas metodológicas, capítulo IV.....	61
Figure 5. Location of the study area (Cerrado biome) in Brazil and the 1695 reference stations (IBGE's polygonal stations and triangulation vertices).	76
Figure 6. Boxplots of reference altitude, NASADEM_HGT, and AW3D30 data sets from the Cerrado biome.	80
Figure 7. Eight selected municipalities in the Cerrado biome with the highest grain production.....	82
Figure 8. Areas with annual and perennial crops in 2018 (in red) in the municipalities of Sapezal, Mato Grosso State (A), Rio Verde, Goiás State (B), São Desidério, Bahia State (C), Maracaju, Mato Grosso do Sul State (D), Formosa do Rio Preto, Bahia State (E), Primavera do Leste, Mato Grosso State (F), Cristalina, Goiás State (G), and Balsas, Maranhão State (H). Source: [58]. In the Maracaju municipality, the area of croplands is larger than the area of municipality probably because of the double cropping system.....	84
Figure 9. Relation between reference altitudes and those estimated by the NASADEM_HGT (a) and AW3D30 (b) models.	85
Figure 10. Histograms of altitudes from reference (a), from NASADEM_HGT (b) and AW3D30 (c) digital elevation models.....	86
Figure 11. Histograms of altitude discrepancies for NASADEM_HGT (a) and AW3D30 (b).	88
Figure 12. Boxplots of the NASADEM_HGT and AW3D30 digital elevation models for the agricultural areas of Sapezal (a), Rio Verde (b), São Desidério (c), Maracaju (d), Formosa do Rio Preto (e), Primavera do Leste (f), Cristalina (g) and Balsas (h) municipalities.....	91
Figure 13. Violin plots of the NASADEM_HGT and AW3D30 digital elevation models for the agricultural areas of Sapezal (a), Rio Verde (b), São Desidério (c), Maracaju (d), Formosa do Rio Preto (e), Primavera do Leste (f), Cristalina (g), and Balsas (h) municipalities.....	92
Figure 14. Relation between NASADEM_HGT and AW3D30 for the agricultural areas of Sapezal (a), Rio Verde (b), São Desidério (c), Maracaju (d), Formosa do Rio Preto (e), Primavera do Leste (f), Cristalina (g), and Balsas (h) municipalities.	93

Figura 15 - Localização das 215 estações meteorológicas automáticas (EMA) do INMET no bioma Cerrado e buffer (área de estudo).	109
Figura 16 - Precipitações médias acumuladas mensais estimadas (GPM) e medidas (estações INMET).	119
Figura 17 - Precipitações médias acumuladas estimadas (GPM) e medidas (estações do INMET) por estações do ano.	120
Figura 18 - Box plots dos valores de precipitação (mm) nos meses de janeiro a junho, período 2017 a 2019.	121
Figura 19 - Box plots dos valores de precipitação (mm) nos meses de julho a dezembro, período 2017 a 2019.	121
Figura 20 - Box plots dos valores de precipitação (mm) por estação do ano, período 2017 a 2019.	122
Figura 21 - Box plot dos valores de precipitação (mm) para todos os dias, período 2017 a 2019.	123
Figura 22 - Gráficos de radar – distribuição das estatísticas e índices ao longo dos meses no período de 2017 a 2019.	126
Figura 23 - Gráficos de radar – distribuição das estatísticas e índices por estações do ano no período de 2017 a 2019.	128
Figura 24 – Índices POD, FAR, CSI e PC no bioma Cerrado.	135
Figura 25 – Mapa de localização da área de estudo (bioma Cerrado, em laranja) no Brasil, com identificação das unidades federativas.	156
Figura 26 - Anomalias de precipitação mensal significativas positivas (colunas em azul) e significativas negativas (colunas em vermelho). As mesmas foram calculadas com base na média mensal de todos os pixels do bioma Cerrado.	165
Figura 27 – Comportamento da precipitação no mês de dezembro ao longo do período analisado (2000 – 2019).	167
Figura 28 - Distribuição espacial das tendências mensais significativas de precipitação (Sen's Slope; $p \leq 0,05$) – período 2000-2019. Valores máximos em azul e valores mínimos em vermelho.	169
Figura 29 – “Mapa simplificado de tendência de precipitação” do bioma Cerrado para o período 2000-2019.	173
Figura 30 – Mapa de áreas estáveis do bioma Cerrado, que permaneceram com a mesma classe de uso e cobertura da terra por no mínimo 20 anos, no período 1985-2019.	175

Figura 31 – Mapa simplificado de tendência de precipitação x uso e cobertura da terra (uso antrópico e cobertura natural – áreas estáveis) no bioma Cerrado.....	176
Figura 32 – Mapa simplificado de tendência de precipitação em áreas estáveis de uso e cobertura da terra (agricultura, pecuária, formação florestal e formação savânica) no bioma Cerrado.	179

LISTA DE TABELAS

Table 1. Standard of altimetric cartographic accuracy of DEMs for the production of digital cartographic products defined for eight different scales and for classes A (most restricted), B, C, and D (least restricted).	74
Table 2. NASADEM products and their groupings.	77
Table 3. Characteristics and global accuracy (CE90, LE90, and RMSE) of the datasets used in this study.....	79
Table 4. Normality tests of reference altitudes and those obtained by the NASADEM_HGT and AW3D30 models.	81
Table 5. Agricultural position and harvest area of soybean, corn, cotton, and sugarcane of chosen municipalities.	83
Table 6. Quantitative measurements of reference altitude (m) and those obtained by the NASADEM_HGT and AW3D30 models. Total number of samples: 1695. Min = minimum altitude; Max = maximum altitude; SD = standard deviation. Q1 = first quartile; Q2 = second quartile; Q3 = third quartile; and CV (%) = coefficient of variation in percentage.	85
Table 7. Percentage of points that presented discrepancies lower than PEC (m).	87
Table 8. Tests of normality of the altitude discrepancies.....	87
Table 9. Statistics of altitude discrepancies.....	87
Table 10. Quantitative measurements of altitude (m) extracted from NASADEM_HGT and AW3D30 over eight municipalities of the Cerrado with highest grain production. Min. = minimum altitude (m); Max. = maximum; SD = standard deviation; DEM = digital elevation model; Q1 = first quartile; Q2 = second quartile; Q3 = third quartile; and CV = coefficient of variation.....	89
Table 11. Interpretation of the Cohen effect size measurements.	94
Table 12. Size measurements of the Cohen effect size per municipality.....	94
Tabela 13 - número de estações meteorológicas automáticas de superfície do INMET com informação para todos os dias do mês (anos sequenciais e meses com boa quantidade de estações – em amarelo. Entre 2015 e 2016, meses com pouca quantidade de estações – em vermelho).....	111
Tabela 14 - Notação das variáveis apresentadas nos índices estatísticos.....	116
Tabela 15 - Índices de avaliação por meses que compõem o período de 2017 a 2019.....	124
Tabela 16 - Índices de avaliação por estações do ano - período de 2017 a 2019.....	125
Tabela 17 - Índices de avaliação - todos os dias no período de 2017 a 2019.....	125

Tabela 18 - Medidas descritivas para os valores estimados (GPM) e medidos (INMET) por mês, período de 2017 a 2019.....	143
Tabela 19 - Medidas descritivas para os valores estimados (GPM) e medidos (INMET) por estações do ano, período de 2017 a 2019.	144
Tabela 20 - Medidas descritivas para os valores estimados (GPM) e medidos (INMET) para todos os dias, período de 2017 a 2019.....	144
Tabela 21 - Períodos que apresentaram anomalias significativas positivas e classificação segundo índice ONI para o período de evento ENOS.....	165
Tabela 22 - Períodos que apresentaram anomalias significativas negativas e classificação segundo índice ONI para o período de evento ENOS.....	166
Tabela 23 - Tendências mensais dos valores médios de precipitação acumulada entre 2000 e 2019.....	166
Tabela 24 - Percentual de ocupação das áreas que apresentaram tendência de precipitação no bioma Cerrado – análise mensal de 2000 a 2019.	172
Tabela 25 - Percentual de ocupação de cada classe do “mapa simplificado de tendência de precipitação” no bioma Cerrado.....	174
Tabela 26 - Porcentagem ocupada no bioma pelas classes do mapa de áreas estáveis do bioma Cerrado.....	175
Tabela 27 - Percentual de ocupação de cada classe estável de uso e cobertura da terra (uso antrópico e cobertura vegetal) no “mapa simplificado de tendência de precipitação” do bioma Cerrado.....	177
Tabela 28 - Percentual de ocupação de cada classe estável de uso e cobertura da terra (agricultura, pastagem, formação florestal e formação savânica) no “mapa simplificado de tendência de precipitação” do bioma Cerrado.....	180

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Produção técnico-científica e participação em eventos de Giovana Maranhão Bettiol, ao longo de sua trajetória acadêmico-profissional, até o presente momento.	29
Quadro 2 - Critérios de interpretação do índice de desempenho ou confiança “c”	132
Quadro 3 - Classificação de índices ENOS.	158
Quadro 4 - Regras consideradas para a elaboração do “mapa simplificado de tendência de precipitação” do bioma Cerrado.	162
Quadro 5 - Classes consideradas para uso antrópico, cobertura natural e uso não definido..	163

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ALOS - Advanced Land Observing Satellite

APP - Área de Preservação Permanente

ASI - *Agenzia Spaziale Italiana* (Agência Espacial Italiana)

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

BIAS - Viés

c - Coeficiente de Confiança ou Desempenho

CMN - Conselho Monetário Nacional

CSI - *Critical Success Index* (Índice de Sucesso Crítico)

d - Índice de Concordância de Willmott

DLR - *Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt* (Agência Espacial Alemã)

DoD - *Department of Defense* (Departamento de Defesa dos EUA)

EMA - Estação Meteorológica Automática

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ENOS - El Niño Oscilação Sul ETc - Evapotranspiração da Cultura

ETR - Evapotranspiração Real

ETo - Evapotranspiração de Referência

FAR - *False Alarm Ratio* (Taxa de Alarme Falso)

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICESat - *Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite*

GDEM - *Derived Global DEM*

GLAS - *Geoscience Laser Altimeter System*

GPM - *Global Precipitation Measurement*

IMERG - *Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM*

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

ION - Índice Oceânico Niño

ISNA - Índice de Satisfação de Necessidade de Água

JAXA - *Japan Aerospace Exploration Agency*

Kc - Coeficiente da Cultura

LUCC - *Land-use and land-cover change*

MAE - Erro Médio Absoluto

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MapBiomass - Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil

MDE - Modelo Digital de Elevação

ME - Erro Médio

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

NGA - *National Geospatial-Intelligence Agency*

OMM - Organização Meteorológica Mundial

PBIAS - Viés Percentual

PC - *Percentage Correct (Porcentagem Correta)*

PEC-PCD - Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos Cartográficos Digitais

POD - *Probability of Detection* (Probabilidade de Detecção)

PRISM - *Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping*

Proagro - Programa de Garantia Agropecuária

r - Coeficiente de Correlação de Pearson

RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

TRMM - *Tropical Rainfall Measurement Mission*

TSM - Temperatura de Superfície do Mar

ZARC - Zoneamento Agrícola de Risco Climático

SARRA - *Système d'Analyse Régionale des Risques Agro-climatologiques*

SMAS - Sistema de Monção da América do Sul

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

ZEE - Zoneamento Ecológico-Econômico

RESUMO

Contextualização

O bioma Cerrado ocupa papel de destaque na produção agrícola brasileira e mundial, onde aproximadamente 40% da produção agrícola nacional e 30% da renda bruta agrícola do país localizam-se nesse bioma. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) surge como importante instrumento da política agrícola brasileira por meio da indicação de datas mais favoráveis de plantio de cultura em escala municipal. Logo, o aprimoramento da metodologia empregada no ZARC é de suma importância e deve ser realizado de forma contínua. Altitude e temperatura são importantes condicionantes agrícolas, sendo a altitude um dos fatores empregados para o cálculo da temperatura por meio de equações de regressão. Já os dados de precipitação são considerados na modelagem do balanço hídrico das diferentes culturas agrícolas no ZARC.

Objetivos

Nesse contexto, a presente pesquisa objetiva analisar a conformidade/acurácia entre dados de altitude e precipitação obtidos de estações de referência terrestres e estimados por sensores orbitais, e identificar tendências de aumento ou redução na precipitação no bioma Cerrado, discriminadas por classes de uso e cobertura da terra.

Materiais e métodos

Os modelos digitais de elevação (MDEs) analisados foram o NASADEM_HGT da Agência Espacial Norte Americana (NASA) e o ALOS AW3D30 versão 3.1 da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA), ambos com resolução espacial de 30 metros. Esses modelos foram avaliados de acordo com os parâmetros recomendados no Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), que define tolerâncias de acordo com a escala de avaliação e classes (A, B, C ou D). Dados de precipitação *Global Precipitation Measurement* (GPM) *IMERG Final Run* da NASA, disponibilizadas a cada meia hora, foram comparadas com as medições horárias de 215 estações meteorológicas automáticas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas no bioma Cerrado, no período 2017 - 2019. Além disso, considerando o período de 2000 a 2019, áreas de tendência de precipitação foram identificadas no bioma e comparadas às classes predominantes de uso e cobertura da terra, obtidas pelo projeto MapBiomias.

Resultados

Considerando a classe A do PEC-PCD, o MDE NASADEM_HGT mostrou-se compatível com escalas de 1:250.000 e menores, enquanto o MDE ALOS AW3D30 atingiu escalas de 1:100.000 e menores. Quando comparados entre si, os modelos fornecem medidas próximas e semelhantes de altitudes e podem ser empregados no ZARC.

Houve boa conformidade entre dados de precipitação GPM e dados de estações meteorológicas automáticas, notadamente para os meses da estação seca (maio a setembro), destacando-se o mês de junho, que apresentou o melhor desempenho (0,89), concordância alta (0,96) e correlação positiva muito forte (0,93). Todos os índices de avaliação considerados, isto é, probabilidade de detecção, taxa de alarme falso, índice de sucesso crítico e porcentagem correta, demonstraram alta habilidade de detecção de chuva via dados orbitais.

Para o período de 2000 a 2019, foi possível perceber que a estação seca no bioma está sendo intensificada. Aproximadamente 20% do Cerrado coberto com vegetação nativa apresentou tendência de redução estatisticamente significativa de precipitação de -2,58 mm/mês e de -2,55 mm/mês em 12% da área total do Cerrado com cobertura antrópica. As áreas que apresentaram tendências significativas positivas de precipitação (aumento em torno de 5 mm/mês) ocuparam 5% do Cerrado.

Considerações finais

Resultados deste estudo mostraram que os MDEs e os dados GPM possuem grande potencial para serem incorporadas à metodologia do ZARC, especialmente para complementação da série histórica de dados provenientes de estações pluviométricas de superfície. Estudos mais aprofundados precisam ser conduzidos para analisar a tendência de aumento ou redução na precipitação com possíveis relações com mudanças no uso e cobertura da terra do bioma.

Palavras-chave: ZARC. Cerrado. Modelo Digital de Elevação. GPM. Tendência de Precipitação.

ABSTRACT

Context

The *Cerrado* biome plays a prominent role in Brazilian and global agricultural production, where approximately 50% of the national agricultural production and 30% of the country's gross agricultural income are in this biome. The Climatic Risk Agricultural Zoning (ZARC) arises as an important instrument of the Brazilian agricultural policy by indicating more favorable dates of crop planting on a municipal scale. The improvement of the methodology used in ZARC is of paramount importance and should be carried out continuously. Altitude and temperature are important agricultural conditions, with altitude being one of the factors used for the calculation of temperature by utilizing regression equations. As for the precipitation data, they are factored in the modeling of the water balance of different agricultural crops in ZARC.

Goals

In this context, the current study aims to analyze the conformity/accuracy between the altitude and precipitation data obtained from terrestrial reference stations and estimated by orbital sensors, and to identify trends of increase or decrease of precipitation in the *Cerrado* biome, itemized by classes of land use and land cover.

Materials and methods

The digital elevation models (MDEs) analyzed were NASADEM_HGT from NASA and ALOS3D30 version 3.1 from the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), both with a spatial resolution of 30 meters. These models were evaluated according to the parameters recommended in the Cartographic Accuracy of Digital Cartographic Products Standard (PEC-PCD), which defines tolerances according to the evaluation scale and classes (A, B, C, or D). NASA's IMERG Final Run Global Precipitation Measurement (GPM) data, available every half hour, were compared with the hourly measurements of 215 automatic surface weather stations of the National Institute of Meteorology (INMET) of the *Cerrado* biome in the 2017-2019 period. In addition, considering the period from 2000 to 2019, areas of precipitation tendency were identified in the biome and compared to the predominant classes of land use and land cover, obtained by the MapBiomas project.

Results

Considering class A of the PEC-PCD, MDE NASADEM_HGT was compatible with 1:250,000 scales and smaller, while MDE ALOS AW3D30 reached scales of 1:100,000 and smaller. When compared to each other, the models provide close and similar altitude measurements and may be used in ZARC.

There was great conformity between GPM precipitation data and data from automatic weather stations, notably for months of the dry season (May to September), especially June, which showed the best performance (0.89), high agreement (0.96), and very strong positive correlation (0.93). All the evaluation indices that were considered, that is, detection probability, false alarm rate, critical success rate, and correct percentage, demonstrated a high ability to detect rain via orbital data.

For the 2000 - 2019 period, it was possible to notice that the dry season in the biome is being intensified. Approximately 20% of the *Cerrado* that is covered with native vegetation showed a trend of statistically significant reduction of precipitation of -2.58 mm/month and -2.55 mm/month in 12% of the total area of *Cerrado* with anthropic cover. The areas that presented significant positive precipitation trends occupied 5% of the *Cerrado* (around 5 mm/month of increase).

Final considerations

The results of this study showed that the MDEs and the GPM data have great potential to be incorporated into the ZARC methodology, especially to complement the historical series of data from surface rainfall stations. More in-depth studies need to be conducted to analyze the trend of increase or decrease in precipitation with possible relations with changes in the land use and land cover of the biome.

Keywords: Agro-climatic Zoining Risk. Cerrado. Digital Elevation Model. GPM. Precipitation Trend.

APRESENTAÇÃO

Na Parte I da dissertação o Memorial Acadêmico da discente é apresentado.

Na Parte II, a contextualização da pesquisa nas ciências ambientais, as atividades que nortearam o desenvolvimento da mesma e a estrutura da dissertação são descritas.

Na Parte III, o desenvolvimento da pesquisa é descrito e os resultados são apresentados em forma de artigos, sendo composta por:

- ✓ Capítulo I: “Introdução, Fundamentação Teórica e Aspectos Metodológicos Gerais”;
- ✓ Capítulo II: “*Conformity of the NASADEM_HGT and ALOS AW3D30 DEM with the Altitude from the Brazilian Geodetic Reference Stations: A Case Study from Brazilian Cerrado*”;
- ✓ Capítulo III: “Análise da missão GPM (*Global Precipitation Measurement*) na estimativa de precipitação sobre o bioma Cerrado”;
- ✓ Capítulo IV: “Tendências espaço-temporais de precipitação no bioma cerrado entre os anos 2000 e 2019 e suas relações com uso e cobertura da terra”;
- ✓ Conclusões Gerais.

SUMÁRIO

PARTE I: MEMORIAL ACADÊMICO	25
PARTE II: CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA NAS CIÊNCIAS AMBIENTAIS, SUAS ATIVIDADES NORTEADORAS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	30
PARTE III: DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	32
CAPÍTULO 01	32
1 INTRODUÇÃO	32
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	39
2.1 Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC)	39
2.1.1 Sistema CON.PRE.ES – futura base de dados climáticos do ZARC	43
2.1.2 Variáveis biofísicas e meteorológicas para determinação de risco agroclimático e possíveis refinamentos no ZARC	44
2.2 Dados biofísicos provenientes de sensores orbitais	47
2.2.1 Background - MDE SRTM 30.....	47
2.2.2 NASADEM	49
2.2.3 MDE ALOS AW3D30	50
2.2.4 Global Precipitation Measurement (GPM).....	51
2.3 Variáveis meteorológicas e mudanças de uso e cobertura do solo no Cerrado	54
2.3.1 Evapotranspiração de Referência (ET _o).....	54
2.3.2 Temperatura.....	55
2.3.3 Precipitação	56
2.4 Área de estudo	57
3 ASPECTOS METODOLÓGICOS GERAIS	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
CAPÍTULO II - CONFORMITY OF THE NASADEM_HGT AND ALOS AW3D30 DEM WITH THE ALTITUDE FROM THE BRAZILIAN GEODETIC REFERENCE STATIONS: A CASE STUDY FROM BRAZILIAN CERRADO	70
CAPÍTULO III - ANÁLISE DA MISSÃO GPM (GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT) NA ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO SOBRE O BIOMA CERRADO	103
1 INTRODUÇÃO	105
2 MATERIAL E MÉTODOS	107
2.1 Área de estudo	108

2.2 Conjunto de dados	109
2.2.1 Precipitação – dados orbitais (GPM IMERG)	109
2.3 Processos e índices de Avaliação	112
2.3.1 Preparação dos dados.....	112
2.3.2 Erros e índices de avaliação do produto GPM IMERG <i>Final Run</i>	113
2.3.3 Espacialização dos índices de avaliação do produto GPM IMERG <i>Final Run</i>	118
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	118
3.1 Análise descritiva dos dados de precipitação	119
3.2 Análise dos erros e índices de avaliação dos produtos GPM IMERG <i>Final Run</i>	124
3.3 Índices de avaliação do produto GPM IMERG <i>Final Run</i> – dados agrupados escala temporal diária – para o bioma Cerrado	134
4 CONCLUSÕES	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
ANEXO I	143
APÊNDICE A - Fluxograma dos scripts empregados no capítulo e disponíveis em Motta (2020)	145
CAPÍTULO IV - TENDÊNCIAS ESPAÇO-TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO NO BIOMA CERRADO NO PERÍODO 2000-2019 E SUAS RELAÇÕES COM USO E COBERTURA DA TERRA	150
1 INTRODUÇÃO	152
2 MATERIAIS E MÉTODOS	155
2.1 Área de estudo.....	155
2.2 Dados de precipitação	157
2.3 O fenômeno El Niño e La Niña e sua influência na área de estudo	157
2.4 Métodos.....	159
2.4.1 Análise com todos os pixels – bioma Cerrado	160
2.4.1.1 Análise estatística das anomalias de precipitação	160
2.4.2 Análise pixel a pixel	161
2.4.2.1 Definição de áreas com tendência de precipitação.....	161
2.4.2.2 Definição de áreas estáveis em termos de uso e cobertura da terra.....	163
2.4.2.3 Mapa simplificado de tendência de precipitação por classe de uso e cobertura da terra (áreas estáveis).....	164
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	164
3.1 Análise para todos os pixels do bioma Cerrado	164

3.1.1 Anomalias pluviométricas e análise de tendências das médias mensais de precipitação acumulada.....	164
3.2 Análises mensais pixel a pixel	167
3.2.1 Tendências espaço-temporais mensais de precipitação.....	167
3.2.2 Mapa simplificado de tendência de precipitação.....	172
3.3 Áreas de tendência de precipitação e relações com uso e cobertura da terra.....	174
3.3.1 Mapa de áreas estáveis de uso e cobertura da terra	174
3.3.2 Mapa simplificado de tendência de precipitação em áreas estáveis de uso e cobertura da terra – 1º nível.....	176
3.3.3 Mapa simplificado de tendência de precipitação em áreas estáveis de uso e cobertura da terra – 2º nível.....	178
4 CONCLUSÕES.....	182
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	185
APÊNDICE A - Fluxograma dos scripts empregados no capítulo e disponibilizados em Motta (2021a)	191
APÊNDICE B - Fluxograma dos scripts empregados no capítulo e disponibilizados em Motta (2021b).....	192
APÊNDICE C - Fluxograma dos scripts empregados no capítulo e disponibilizados em Motta (2021c)	193
APÊNDICE D - Fluxograma dos scripts empregados no capítulo e disponibilizados em Motta (2021d).....	194
CONCLUSÕES GERAIS	196

PARTE I: MEMORIAL ACADÊMICO

No ano de 2001, ingressei no curso Bacharelado em Geografia na Universidade de Brasília (UnB). Minha opção se deu pelo fato da Geografia ser uma área multidisciplinar, a qual tem como objeto o espaço, com o foco nas interações do ser humano com o meio ambiente e nos impactos decorrentes dessa interferência, e como meta o desenvolvimento sustentável.

Durante a graduação, fui contemplada com uma bolsa de Iniciação Tecnológica Industrial (ITI) e Iniciação Científica (IC), ofertadas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Foquei meus estudos nas áreas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, tendo ingressado no Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE) do Departamento de Geografia da Universidade de Brasília em 2003. Nesse laboratório, contribuí para o desenvolvimento de pesquisas nas áreas de geomorfologia, modelagem matemática, cartografia, classificação e análise multitemporal do uso e cobertura da terra por meio de sensoriamento remoto. Fui também monitora das disciplinas de Geomorfologia Intertropical e Fotointerpretação.

No ano de 2004, durante a graduação, prestei consultoria pelo período de 6 (seis) meses para a Organização dos Estados Americanos (OEA), projeto ANA/GEF/PNUMA/OEA São Francisco - Subprojeto Nova Geografia da Bacia do São Francisco. Nela, realizei vetorização, edição e correção de base cartográfica relativa à bacia do Rio São Francisco, além da elaboração de layouts de cartas topográficas.

Ainda durante o curso de graduação, fiz estágio na Agência Nacional de Águas (ANA), onde elaborava mapas temáticos por intermédio dos softwares ArcView e ArcGIS. Também fui estagiária no Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM), onde executei análise espacial utilizando SIG; realizei manipulação, processamento e interpretação de imagens de satélites Landsat, CBERS, MODIS, IKONOS para o monitoramento ambiental de desflorestamentos no bioma amazônico.

Após a conclusão do curso de graduação, em julho de 2005, ano em que me formei Bacharel em Geografia, ingressei na pós-graduação Lato Sensu - Especialização em Geoprocessamento, oferecida pelo Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, almejando aperfeiçoar meus conhecimentos na área. Fui orientada pelo Dr. Edson Eyji Sano, pesquisador da Embrapa e então professor do curso. Apresentei, em cumprimento ao requisito para obtenção do título de especialista em geoprocessamento, a monografia “Análise

comparativa de quatro métodos de classificação supervisionada para a discriminação de fitofisionomias de cerrado".

Ainda no ano de 2005, fui bolsista do CNPq, modalidade Desenvolvimento Tecnológico e Industrial (DTI), na Área de Geotecnologias da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), onde, entre outras atribuições, utilizava o geoprocessamento para mapeamento e cálculo de área cultivada de diferentes culturas.

Em 2006, ingressei na empresa Poliedro Informática, Consultoria e Serviços Ltda., onde prestei serviços para a Coordenação Geral de Tecnologia da Informação (CGTI), Área de Gestão de Geotecnologias (AGGT) do Ministério do Meio Ambiente (MMA). Nessa área tive contato com plataformas livres de softwares de SIG (Sistema de Informações Geográficas), trabalhando com disponibilização de dados geográficos em ambiente Web (WebGIS) e catalogação de metadados.

Em 2007, trabalhei como Assessora da Diretoria de Urbanização – Departamento de Parques e Jardins (DPJ) da NOVACAP. Lá exerci fiscalização de trabalhos na área de geoprocessamento, elaboração de projetos básicos para licitações nas áreas de topografia, manutenção e conservação de áreas verdes.

Ainda em 2007, retornei para a empresa Poliedro Informática, Consultoria e Serviços Ltda. e fui prestadora de serviços na área de Geoprocessamento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), onde utilizava o geoprocessamento para realizar estudos sobre compensação financeira de usinas hidrelétricas. Em 2009, pela mesma empresa, trabalhei na Superintendência de Gestão e Estudos Hidroenergéticos (SGH) dessa Agência, onde realizava análise dos estudos cartográficos para apoio no aceite de Estudos de Inventários Hidrelétricos, Projetos Básicos de PCHs e UHEs e Estudos de Viabilidade de UHEs.

Entre os períodos supracitados, no ano de 2008 trabalhei no setor de meio ambiente da empresa ENGEVIX, dando suporte nas áreas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aos projetos lá desenvolvidos, além de elaborar e revisar textos relacionados ao setor elétrico que envolviam áreas da Geografia.

No ano de 2010, trabalhei como prestadora de serviços da empresa Qualidade Consultoria e Serviços Ltda. no Laboratório de Tratamento de Imagens de Satélite - LATIS, do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Lá, dentro do contexto do “Programa Boi Guardiã”, realizei o mapeamento de pastagens no estado do Pará por meio de imagens de satélite (LANDSAT-5 TM). O Programa tem como objetivo principal retratar a ocupação e monitorar semestralmente os avanços de áreas de pastagens no estado do Pará.

Neste ínterim, em 2006, prestei o concurso da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa – para o cargo que atualmente corresponde ao de Analista B - Geoprocessamento, no qual fiquei classificada em 8º lugar. Em junho de 2010, assumi o cargo na Unidade Embrapa Pecuária Sudeste (CPPSE), localizada em São Carlos – SP. Lá trabalhei dando apoio aos projetos de pesquisa desenvolvidos que utilizam como ferramentas o geoprocessamento e sensoriamento remoto, atuando principalmente nas áreas de Agricultura de Precisão (AP), Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), modelagem ambiental, georreferenciamento, disponibilização de dados geográficos em ambiente Web (WebGIS) e catalogação de metadados, conforme padrões estabelecidos pela Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) e Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR).

Em novembro de 2016, fui transferida, a meu pedido, para Embrapa Cerrados (CPAC), sendo lotada no Núcleo de Manejo e Conservação de Recursos Naturais (MCRN), chefiado à época pela pesquisadora Dra. Marina de Fátima Vilela. Trabalhei junto ao Laboratório de Biofísica Ambiental, sob a coordenação do pesquisador Dr. Fernando Antônio Macena da Silva, atendendo às demandas da Unidade que fazem uso do geoprocessamento e sensoriamento remoto.

Até o momento, contribuí principalmente na definição de metodologias e elaboração de mapas que compõem o Atlas Climático do Bioma Cerrado, na adaptação e redefinição das Ecorregiões do bioma Cerrado, no apoio à definição das Unidades Básicas de Relevância do referido bioma. Além disso, realizei análise da acurácia de imagens de sensores orbitais para estimativa de precipitação pluviométrica, avaliei métodos de interpolação do Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), a fim de contribuir para o aprimoramento da metodologia empregada no Zoneamento Agrícola de Riscos Climáticos (ZARC), operando Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) além de atender a demandas específicas, como a publicação Dinâmica agrícola do Cerrado, reuniões e eventos científicos da Unidade.

Em 2018, participei do processo seletivo do Programa de Pós-Graduação da Embrapa, pleiteando liberação integral para cursar pós-graduação *Stricto-Sensu* em nível de mestrado. Fui contemplada e liberada pela empresa para tanto. Prestei a seleção do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Goiás (UFG), sendo aprovada em 1º lugar, ingressando no Programa no primeiro semestre de 2019.

No decorrer do mestrado, em 2020, em colaboração com Roberto Abreu Rodrigues da Cunha, então discente do Programa de Pós-Graduação em Agronegócio da UFG, professor Dr. Alcido Elenor Wander e professor Dr. Manuel Eduardo Ferreira, publicamos o artigo “Definição de áreas prioritárias para recuperação de pastagens degradadas e seu impacto

econômico no Vale do Araguaia, estado de Goiás” na revista *Agrossistemas* (CUNHA *et al.*, 2020), disponível para visualização e download no seguinte link: <<https://periodicos.ufpa.br/index.php/agroecossistemas/article/view/8202/0>>.

Ainda em 2020, o *student poster (Abstract)* intitulado "Analysis Of Altimetric Conformity of Digital Elevation Models (DEMs) SRTM 1ArcSec and ALOS AW3D30 in the Cerrado Biome, Brazil" foi aceito para apresentação no Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference, evento que seria realizado em abril de 2020, se não fosse cancelado devido à Pandemia ocasionada pelo COVID-19.

Neste mesmo ano (2020) foi publicado o capítulo “Características gerais da paisagem do Cerrado”, no qual sou segunda autora, no livro “Dinâmica Agrícola do Cerrado” (SANO *et al.*, 2020).

Em 2021, o artigo intitulado “Conformity of the NASADEM_HGT and ALOS AW3D30 DEM with the Altitude from the Brazilian Geodetic Reference Stations: A Case Study from Brazilian Cerrado”, no qual sou primeira autora, foi publicado no periódico internacional *Sensors*, edição especial *Multi-Sensor Techniques for Topographic Mapping*. Este artigo é um dos capítulos que compõem essa dissertação de mestrado e conta co-autoria do professor Dr. Manuel Eduardo Ferreira, Msc. Luiz Pacheco Motta, professor Dr. Édipo Henrique Cremon e professor Dr. Edson Eyji Sano (BETTIOL *et al.*, 2021).

Associada à trajetória acadêmico-profissional, a minha produção técnico-científica e participação em eventos segue resumida em números no Quadro 1:

Quadro 1 - Produção técnico-científica e participação em eventos de Giovana Maranhão Bettioli, ao longo de sua trajetória acadêmico-profissional, até o presente momento.

Produção Bibliográfica	
Artigos completos publicados em periódico	18
Capítulos de livros publicados	04
Trabalhos publicados em anais de eventos	26
Apresentações de trabalhos (Conferência ou palestra)	03
Apresentações de trabalhos (Congresso)	03
Apresentações de trabalhos (Simpósio)	01
Demais produções bibliográficas	10
Produção Técnica	
Trabalhos técnicos (assessoria)	01
Outra produção técnica	01
Blog	01
Eventos	
Participações em eventos (congresso)	01
Participações em eventos (simpósio)	06
Participações em eventos (encontro)	02
Participações em eventos (outra)	07
Participação em banca de trabalhos de conclusão (graduação)	03

Fonte: Currículo Lattes de Giovana Maranhão Bettioli. Link: <http://lattes.cnpq.br/9857476550721468>, acessado em 20 de agosto de 2021.

PARTE II: CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA NAS CIÊNCIAS AMBIENTAIS, SUAS ATIVIDADES NORTEADORAS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

As Ciências Ambientais apresentam caráter interdisciplinar, em função das abrangências escalares e processuais dos fenômenos da natureza e da sociedade, bem como de suas inter-relações. Contando com contribuições das áreas de Geociências, Biociências, Ciências Humanas, Ciências Exatas e Geomática (cartografia e geoprocessamento), o cientista ambiental consegue compreender a natureza de forma integrada, considerando a complexidade dos processos ambientais, observados em diferentes escalas (LIMA *et al.*, 2013). Nesse contexto, a presente pesquisa vem unir a demanda de uma empresa pública do governo federal à Universidade, visando responder questões objetivas em relação ao aperfeiçoamento de uma política pública de grande êxito no Brasil, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC).

O método do ZARC, desenvolvido pela Embrapa e parceiros, é aplicado no Brasil oficialmente desde 1996, por meio do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. Este método proporciona a indicação de datas ou períodos de plantio/semeadura por cultura e por município, considerando características de clima, tipo de solo e ciclo de cultivares, com o objetivo de evitar que adversidades climáticas coincidam com as fases mais sensíveis das culturas, e assim minimizando as perdas agrícolas (EMBRAPA, 2021a).

Sobre a estrutura da dissertação, a mesma está dividida em quatro capítulos. No **Capítulo I** são apresentadas as justificativas para o tema de pesquisa, questões científicas, hipóteses, objetivos, embasamento teórico e aspectos metodológicos utilizados no trabalho.

O **Capítulo II** é dedicado à análise da conformidade de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) com estações planialtimétricas de referência do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e enquadramento na PEC-PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos Cartográficos Digitais). Abordamos também a comparação desses modelos entre si em municípios com proeminente produção agrícola no bioma Cerrado, tendo em vista que a variável biofísica de elevação pode ser empregada no ZARC para cálculo da temperatura do ar por meio de equações de regressão. Elaborado com vistas à submissão no periódico *Sensors* (ISSN: 1424-8220) - classificação A2 segundo Qualis-Periódicos na Área de Ciências Ambientais, edição especial "*Multi-Sensor Techniques for Topographic Mapping*", esse capítulo encontra-se em formato de artigo, seguindo as regras preconizadas pelo periódico, publicado em abril de 2021. O mesmo encontra-se disponível para acesso público no seguinte link: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/2935>>.

No **Capítulo III**, com o objetivo de avaliar os dados provenientes de sensores orbitais para incremento da malha de chuva do ZARC, foi elaborada uma análise da conformidade de dados orbitais da rede GPM (Global Precipitation Measurement), em sua melhor resolução temporal (30 minutos) com as estações de referência de campo (rede INMET).

O **Capítulo IV**, último desta dissertação, foi elaborado com o objetivo de identificar as áreas com possível tendência de precipitação entre os anos de 2000 e 2019 no bioma Cerrado, bem como investigar as relações entre tais áreas e as classes predominantes de uso e cobertura terra. Para tanto, foram consideradas análises de comportamento da precipitação, testes estatísticos e análises com mapeamentos do projeto MapBiomias (SOUZA JR. *et al.*, 2020).

Entendemos que o Capítulo IV contextualiza ainda mais a dissertação na conjuntura das Ciências Ambientais, tendo em vista a investigação acerca dos usos e coberturas da terra no bioma Cerrado e a variável climatológica de precipitação, levando em consideração a intervenção antrópica no meio ambiente, entendendo o ser humano como agente transformador da paisagem e do clima. Da mesma forma que o Capítulo II, os Capítulos III e IV foram elaborados objetivando-se a publicação em periódicos de impacto e boa classificação no Qualis-Periódicos, sendo que o último será também submetido à premiação do projeto MapBiomias, realizada anualmente.

PARTE III: DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

CAPÍTULO 01

1 INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca no cenário mundial como um dos principais produtores e exportadores de diversos produtos agrícolas por possuir condições favoráveis ao desenvolvimento agrícola em termos de solos e clima. Todavia, por ser um país de extensão continental, a produção agrícola pode ser afetada direta ou indiretamente por adversidades climáticas, como seca, granizo, geadas, chuvas em excesso, dentre outras (BRASIL, 2008).

Diante desta interferência negativa na economia, proveniente de quebras na produção agrícola, a partir da década de 1970, instituições brasileiras de pesquisas passaram a desenvolver mecanismos que permitissem indicar com maior segurança o local, a data e a cultivar mais propícias para o plantio de determinadas culturas agrícolas, em diferentes regiões brasileiras (BRASIL, 2008).

Nesse contexto, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) foi publicado pela primeira vez na safra de 1996 para a cultura do trigo, surgindo como um instrumento de política agrícola e gestão de riscos na agricultura. Tem por objetivo minimizar os riscos relacionados aos fenômenos climáticos adversos e permite a cada município brasileiro identificar a melhor época de plantio das culturas, nos diferentes tipos de solo e ciclos de cultivares. A ideia principal do ZARC é indicar ao produtor onde e quando plantar, com a menor exposição possível aos riscos climáticos (CUNHA e ASSAD, 2001; BRASIL, 2020a).

Para tanto, são analisados parâmetros de clima, solo e ciclos de cultivares, a partir de uma metodologia validada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e adotada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a qual permite quantificar os riscos climáticos envolvidos na condução das lavouras, os quais podem ocasionar perdas na produção. Os resultados do estudo são publicados na forma de portarias, por Unidade da Federação, tipos de cultura e três tipos de textura de solos, apresentando a relação de municípios indicados ao plantio e seus respectivos calendários de plantio ou semeadura. Atualmente, os estudos do ZARC contemplam todos os estados do Brasil e mais de 40 culturas de ciclos anual e permanente, além do consórcio milho-braquiária (BRASIL, 2020a).

Como requisito à adesão ao Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro) e para fazer jus à subvenção federal do Rural Privado (PSR), o produtor deve observar as recomendações do ZARC. Para os produtores que dependem do Proagro ou do PSR como garantia de crédito, trata-se de uma proteção e uma condição para acessar o crédito rural (EMBRAPA, 2018). Além disso, alguns agentes financeiros também condicionam a concessão do crédito rural à observância dos indicativos desse zoneamento (BRASIL, 2020a).

Até 2018, estima-se que o ZARC tenha proporcionado uma economia de R\$ 16,8 bilhões para o agronegócio brasileiro, segundo Balanço Social da Embrapa. Essa economia equivale, principalmente, aos prejuízos que o país deixou de sofrer com perdas de safras e às consequentes indenizações securitárias que elas provocariam. Desde 1996, quando o ZARC foi adotado pelo Proagro, até 2018, o programa pagou mais de R\$ 14 bilhões em indenizações. A estimativa do Balanço Social da Embrapa é que esse valor seria superior a R\$ 40 bilhões, se não existisse a tecnologia. Estima-se que o Proagro teve uma economia superior a R\$ 2,5 bilhões em 2018, graças à segurança ao investimento proporcionada pelas informações do Zoneamento (EMBRAPA, 2018).

Os satélites de observação da terra e meteorológicos, por meio do imageamento contínuo da superfície terrestre, têm oferecido um volume e variedade cada vez maior de dados úteis para as atividades de gestão e monitoramento da produção agropecuária (SANTOS e MARTINS, 2016). Essas geoinformações podem ser incorporadas ao ZARC para adensar e enriquecer a base de dados atualmente utilizada, levando ao aperfeiçoamento da metodologia adotada nesse zoneamento, instrumento técnico científico da política agrícola brasileira.

Por ser um importante instrumento de política agrícola e gestão de riscos na agricultura brasileira, além de premissa para pagamento de seguros agrícolas, o aprimoramento da metodologia empregada no ZARC é de suma importância e deve ser realizado de forma contínua.

Os novos sensores orbitais e a aquisição contínua de imagens da superfície terrestre oferecem grande volume e variedade de dados à comunidade científica (FREITAS *et al.*, 2011). Como exemplos desse recente segmento para modelagem ambiental, podem ser citados (1) os Modelos Digitais de Elevação (MDEs), provenientes do satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS) – denominado de “ALOS World 3D - 30 m” (AW3D30), derivado do MDE ALOS World 3D (AW3D) e NASADEM (este último, produto de reprocessamento dos dados brutos da missão SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*); (2) as imagens provenientes da constelação *Global Precipitation Measurement* (GPM), as

quais fornecem estimativas de precipitação a cada meia hora, em sua melhor resolução temporal.

Testes de conformidade/acurácia e qualidade desses dados, com potencial para serem incorporados ao ZARC, são primordiais para o aperfeiçoamento contínuo da metodologia desse pacote tecnológico, além de contribuir para a divulgação da qualidade e acurácia dessas geoinformações, as quais são amplamente utilizadas nos meios acadêmico e científico.

Neste sentido, a presente pesquisa dará subsídios para o adensamento e enriquecimento da malha de dados hoje adotada no Zoneamento, além de prover o ZARC com informações ainda mais confiáveis e subsidiar a implementação de etapas metodológicas, a fim de aprimorar seus resultados.

Do ponto de vista econômico, o bioma Cerrado assumiu importante papel na agropecuária brasileira, quando o Brasil se tornou mundialmente reconhecido como um dos principais produtores de grãos, fibras, biocombustíveis e carne bovina (BRASIL, 2015a). Aproximadamente 15% dos estabelecimentos agropecuários do Brasil localizam-se nesse bioma, totalizando 32% da renda bruta agrícola do Brasil. A produção proveniente das culturas agrícolas anuais (ou temporárias) do Cerrado corresponde atualmente a 40% da produção total nacional (BOLFE *et al.*, 2020).

Os rebanhos bovino, suíno e de aves também apresentaram expansão nas últimas quatro décadas. No que se refere ao rebanho bovino, embora a participação do bioma no total do país tenha reduzido após 1993 - explicada pela ampliação desse setor no Norte do país - em termos absolutos, o número de animais continuou crescendo, atingindo 76 milhões de cabeças em 2015. Por sua vez, a expansão da avicultura e da suinocultura acompanhou a maior disponibilidade de insumos, como milho e farelo de soja na região (BOLFE *et al.*, 2020; SANTANA *et al.*, 2020).

Nas últimas quatro décadas, as lavouras temporárias que mais expandiram no Cerrado foram a soja, o milho, o algodão, a cana-de-açúcar, o sorgo e o arroz. Outros cultivos como tomate, feijão, alho, amendoim e batata-inglesa também expandiram, reforçando a posição agrícola de destaque do bioma no país (SANTANA *et al.*, 2020).

Do ponto de vista territorial, é o segundo maior bioma da América do Sul, ocupando uma área de 1.983.017 km², cerca de 23,3% do território brasileiro, tomando-se como base o limite dos biomas revisado pelo IBGE em 2019 e compatível com a escala 1:250.000 (IBGE, 2019). Abrange totalmente ou parcialmente 1.434 municípios, em 12 estados e o Distrito Federal.

Em relação à sua diversidade biológica, o Cerrado é reconhecido como a savana mais rica do mundo, abrigando 11.627 espécies de plantas nativas já catalogadas (BRASIL, 2021). Sob o ponto de vista ambiental, faz conexão com os biomas Caatinga, Amazônia, Mata Atlântica e Pantanal (BRASIL, 2021), o que lhe confere relevantes características naturais, as quais devem ser estudadas, a fim de serem conhecidas e protegidas. Ademais, o bioma abriga oito nascentes das doze bacias hidrográficas mais importantes do Brasil (BOLFE *et al.*, 2020) e é considerado um dos Hotspots mundiais de biodiversidade (MYERS, *et al.*, 2000).

Além dos aspectos supracitados, cabe destacar a importância social desse bioma; muitas populações tradicionais sobrevivem de seus recursos naturais, incluindo etnias indígenas, comunidades quilombolas, raizeiros, ribeirinhos, babaqueiras e vazanteiros, as quais, juntas, compõem o patrimônio histórico e cultural brasileiro e detêm o conhecimento tradicional de sua biodiversidade (BRASIL, 2021).

Estudos realizados no bioma Cerrado que envolvem efeitos climáticos decorrentes das Mudanças no Uso e Cobertura da Terra (em inglês, *Land-use and land-cover change* - LUCC) demonstram - apesar das especificidades dos modelos empregados, cenários de conversão e escalas de estudo - um padrão de resposta climática: aumento da temperatura, redução da evapotranspiração e da precipitação. Tais efeitos climáticos são mais severos durante a estação seca ou nos meses de transição entre o período seco e chuvoso, quando as diferenças nos parâmetros entre a vegetação nativa e áreas de uso antrópico subsecutivas são mais acentuadas (COSTA e PIRES, 2010; LEE *et al.*, 2011; SPERA *et al.*, 2016; SALAZAR *et al.*, 2016; CAMPOS, 2018). Porém, a maioria dos trabalhos utilizaram-se de modelos climáticos globais ou regionais acoplados a modelos de superfície terrestre, alguns de dados observados de mudanças do uso e cobertura do bioma e poucos de observações de variáveis climáticas (CAMPOS, 2018).

Estudo recente de Heinemann (2017) analisou as tendências históricas da temperatura média no estado de Goiás, as projeções esperadas para 2030 e 2050 e os impactos nas culturas de soja, arroz e feijão. Para a análise das tendências, o autor utilizou dados diários de temperatura de 75 estações no estado de Goiás, com séries históricas de 1980 a 2014. Tal análise demonstrou que há uma tendência de aumento da temperatura média para todas as estações climáticas estudadas e as projeções também mostraram um aumento de temperatura no futuro. Contudo, é importante ressaltar ainda que os estudos referentes à variável temperatura do ar concentram-se em áreas urbanas, onde há tendência de formação de ilhas de calor.

O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), em suas simulações para cenários com a baixa e alta emissões de Gases do Efeito Estufa (GEEs), prevê, especificamente para o bioma Cerrado, aumento de 1 °C na temperatura do ar e diminuição de 10% a 20% na chuva até 2040. Entre 2041 e 2070, estima-se aumento entre 3 °C e 3,5 °C na temperatura do ar e redução de 20% a 35% na precipitação. Já para o final do século (2071-2100), as simulações indicam aumento de temperatura entre 5 °C e 5,5 °C e diminuição da chuva entre 35% e 45%, além do aumento nas variações sazonais. As mudanças percentuais na chuva e temperatura são relativas aos valores do final do século XX (PBMC, 2013).

Dada a notória importância do bioma Cerrado para a socioeconomia e biodiversidade brasileira e mundial e o fato do mesmo encontrar-se altamente antropizado - em pouco mais de 40 anos, a modernização da agropecuária no bioma ocasionou rápidas mudanças no uso e cobertura do solo (BRASIL, 2015a), tendo perdido metade de sua vegetação nativa (BRASIL, 2015a) - faz-se necessário analisar e compreender as relações entre tais mudanças e o clima, além de se verificar os impactos da conversão do Cerrado em variáveis meteorológicas como precipitação, evapotranspiração e temperatura.

Dentro desse contexto, este estudo apresenta às seguintes questões científicas:

- a) Dados biofísicos de altitude e precipitação provenientes de sensores orbitais podem aprimorar o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) no bioma Cerrado?
- b) Existe tendência de precipitação (aumento ou redução) no bioma Cerrado? Onde?
- c) Qual a relação entre as áreas que apresentaram tendência de precipitação no bioma Cerrado e classes predominantes de uso e cobertura da terra (análise espaço-temporal)?

Com base nestas questões, a pesquisa apresenta as seguintes hipóteses:

- a) Dados de altitude e precipitação provenientes de sensores orbitais possuem conformidade/acurácia para serem empregados no aprimoramento da metodologia do ZARC;
- b) O regime de chuvas no bioma Cerrado é afetado diretamente pelo uso e a cobertura da terra.

Para responder a estas indagações e testar as hipóteses, a pesquisa traz os seguintes objetivos geral e específicos:

Objetivo geral: Analisar a conformidade/acurácia entre dados de altitude e precipitação obtidos de estações de referência terrestres e estimados por sensores orbitais, e identificar tendências de aumento ou redução na precipitação no bioma Cerrado, discriminadas por classes de uso e cobertura da terra.

Objetivos específicos:

- a) Avaliar a conformidade/acurácia de dados biofísicos (altitude e precipitação) derivados de sensores orbitais com dados obtidos a nível de superfície terrestre;
- b) Realizar análises estatísticas e de comportamento a fim de detectar tendências de precipitação e relacioná-las com os mapas de uso e cobertura da terra do bioma Cerrado, gerados pelo projeto MapBiomias (SOUZA JR. *et al.*, 2020).

Para alcançar os objetivos propostos, a dissertação está estruturada em quatro capítulos. O CAPÍTULO I apresenta o embasamento teórico e aspectos metodológicos utilizados no trabalho, referente às abordagens sobre Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), variáveis biofísicas e meteorológicas para determinação de risco agroclimático e possíveis refinamentos no ZARC; dados biofísicos provenientes de sensores orbitais; variáveis meteorológicas e relação com uso e cobertura da terra no Cerrado.

O CAPÍTULO II, intitulado de “*Conformity of the NASADEM_HGT and ALOS AW3D30 DEM with the Altitude from the Brazilian Geodetic Reference Stations: A Case Study from Brazilian Cerrado*”, apresenta a análise da conformidade entre os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) NASADEM e ALOS AW3D30 e estações planialtimétricas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), além da comparação entre as informações de altitude dos dois Modelos em municípios que apresentam proeminente produção agrícola no bioma. Este capítulo está apresentado na língua inglesa e segue as regras e formatação exigidos pelo periódico *Sensors* (ISSN: 1424-8220). O mesmo encontra-se publicado (abril de 2021) e está disponível para consulta no seguinte *link*: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/2935>>.

O CAPÍTULO III, intitulado de “*Análise da missão GPM (Global Precipitation Measurement) na estimativa de precipitação sobre o bioma Cerrado*”, apresenta a análise da conformidade de dados de precipitação provenientes dos dados GPM em relação às estações meteorológicas automáticas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

O CAPÍTULO IV, intitulado de “Tendências espaço-temporais de precipitação no bioma Cerrado no período 2000-2019 e suas relações com uso e cobertura da terra” apresenta a identificação espaço-temporal de tendências de precipitação no bioma Cerrado e analisa a relação dessas áreas com classes predominantes de uso e cobertura da terra.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC)

O ZARC nasceu de um contrato entre o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e a Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC) da Universidade de Brasília (UnB), com o objetivo de desenvolver estudos de regionalização dos sinistros climáticos no Brasil para minimizar as perdas na produção agrícola, disponibilizando ao produtor informações que o permitiriam evitar riscos climáticos provenientes do regime de chuva. Tal meta estava em consonância com a proposta desenvolvimentista do governo federal à época, o que permitiu o redirecionamento dos recursos para áreas realmente com vocação aos empreendimentos rurais.

O projeto do ZARC, iniciado efetivamente pela primeira vez na safra agrícola de 1995/1996, permitiu ao produtor o planejamento da atividade agrícola, voltado a minimizar perdas por sinistro climático, aumentando, conseqüentemente, a produção nacional de grãos (ROSETTI, 2001).

A partir do ano de 1997, o Conselho Monetário Nacional (CMN) passou a exigir a observância das recomendações do ZARC para o enquadramento dos empreendimentos em custeios agrícolas no Programa de Garantia Agropecuária (Proagro), reconhecendo a importância e eficiência desse zoneamento. Posteriormente, o ZARC passou a orientar também outros seguros governamentais e privados (BRASIL, 2020b).

Como instrumento de política agrícola do Governo Federal brasileiro, O ZARC objetiva racionalizar o uso dos recursos naturais e financeiros, para tornar a agricultura uma atividade mais rentável, estável e competitiva. Para tanto, baseia-se na definição das regiões e épocas de semeadura com menor risco de perdas por adversidades climáticas (AMORIM NETO *et al.*, 2001; CUNHA e ASSAD, 2001).

Segundo Monteiro e Borges (2020), as principais adversidades climáticas que ocasionam risco climático no Brasil são:

- Seca - maior responsável pela ocorrência de sinistros ou perdas graves de safra;
- Geada / temperaturas muito baixas - provocam distúrbios fisiológicos nas plantas até a necrose de tecidos, principalmente nas regiões sul e sudeste, em regiões de maior altitude, concentrando nas baixadas as geadas;
- Temperaturas altas - influenciam no abortamento floral, principalmente no feijão fazeolos, citrus e café. Também associadas a períodos de deficiência hídrica;

- Chuva em excesso / excesso hídrico - nas regiões mais frias do país, especialmente na região Centro-sul, nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do sul; em região de alta pluviosidade no Norte do país e em regiões litorâneas do Sudeste, com chuvas muito intensas. Evento danoso principalmente no momento da colheita, pois propicia a formação de fungos em grãos formados. Acompanhada de nebulosidade, tais condições de umidade impedem a colheita e ocasionam apodrecimento de grãos;

- Vento;

- Granizo - evento localizado. Ocorre principalmente nos meses iniciais de chuva, durante a primavera.

Os riscos avaliados no ZARC são:

- Deficiência Hídrica (seca e verânico);

- Temperaturas muito baixas (geadas);

- Excesso de chuvas (colheita) - contabilizado para zoneamentos recentes, a partir de 2018, nas culturas mais susceptíveis a esse evento climático;

- Excesso hídrico - contabilizado a partir de 2019 para a cultura do trigo.

Riscos não avaliados diretamente no ZARC:

- Temperaturas muito altas - indiretamente contabilizada e expressa pelo risco de deficiência hídrica (critério auxiliar);

- Doenças em tempo favorável - critério auxiliar empregado em culturas, nas quais em determinados períodos há favorabilidade para ocorrência de doenças e pragas. Tais datas são excluídas do zoneamento;

- Granizo e vendaval - não contabilizados por motivo de deficiência de base de dados, já que informações sobre ocorrência de granizo e vendaval são extremamente limitadas.

Ainda segundo Monteiro e Borges (2020), os critérios auxiliares não são contabilizados diretamente no ZARC, mas incluídos nos resultados quando reconhecidamente podem inviabilizar o desenvolvimento normal da cultura. São eles:

- Temperatura: principalmente nas regiões Sul e Sudeste, são utilizados critérios de temperatura para identificar condições limitantes para o desenvolvimento e produtividade da cultura, os quais podem ocasionar o prolongamento excessivo no ciclo da cultura (atraso no ciclo de desenvolvimento) ou provocarem distúrbios fisiológicos, diferentemente dos danos diretos ocasionados por geadas;

- Doenças como Mofo Cinzento na mamona; Ferrugem Asiática na soja (região do vazio sanitário); Brusone e Giberela no trigo, as quais ocasionam perda de qualidade de grãos. Os períodos críticos de ocorrência das doenças são bloqueados para o plantio.

Atualmente, o ZARC é coordenado pelo MAPA, executado pela Embrapa e envolve mais de 40 culturas e o consórcio milho - braquiária. Os produtores rurais e analistas de crédito e seguro agrícola podem tomar ciência por meio das plataformas disponibilizadas pelo MAPA¹, se a cultura tem probabilidade de 80%, 70% ou 60% de ser bem-sucedida nas condições e locais apontados nessa plataforma. Esse foi um dos avanços metodológicos implementados e dá subsídio para tomada de decisão de produtores mais arrojados, dispostos a correr mais riscos, além de possibilitar a negociação de termos nos contratos de seguro.

Conforme descrito por Comunello (2016), a metodologia empregada no ZARC é comum para as diversas culturas zoneadas, empregando-se o programa Sistema de Análise Regional dos Riscos Agroclimáticos (do francês *Système d'Analyse Régionale des Risques Agro-climatologiques* - Sarra) para a modelagem do balanço hídrico das culturas para períodos de dez dias (decêndios). Nessa modelagem, empregam-se como dados de entrada a precipitação diária, temperaturas máxima e mínima durante o ciclo da cultura, evapotranspiração de referência (ET_o), coeficiente da cultura (K_c), ciclo da cultura, e número e duração das fases fenológicas.

Os dados de precipitação são tomados de séries históricas com, no mínimo, 15 anos de dados diários. O ciclo considera quatro fases fenológicas: germinação/emergência; desenvolvimento vegetativo; florescimento/enchimento de grãos; e maturação, sendo que a duração de cada um deles e os períodos mais críticos para a cultura em questão são informados pelo usuário. O método classifica os solos brasileiros de acordo com três grupos de textura: Tipo 1 (arenosa); Tipo 2 (média) e Tipo 3 (argilosa). As diferenças na textura dos solos acarretam em diferentes capacidades de armazenamento de água ou capacidade de água disponível no solo (CAD). O processo de modelagem considera distintas datas de semeadura, com intervalos de dez dias, produzindo um balanço hídrico para cada data.

O modelo oferece diferentes opções de variáveis de saída, sendo adotado pelo ZARC o Índice de Satisfação de Necessidade de Água (ISNA) para a definição do risco. O ISNA é calculado com base no balanço hídrico, representando a relação entre as evapotranspirações real (ETR) e da cultura (ET_c). Assim, $ISNA = ETR/ET_c$, sendo a $ET_c = K_c$ (Coeficiente da Cultura) * ET_o (Evapotranspiração Potencial ou de Referência). O ISNA é calculado para

¹ BRASIL. Ministério da Agricultura. Disponível em: <<http://indicadores.agricultura.gov.br/zarc/index.htm>>. Acesso em: 10/11/2020

cada estação pluviométrica e fase fenológica da cultura, em diferentes datas de semeadura, uma a cada decêndio do ano, totalizando 36 decêndios por ano. São consideradas aptas as áreas com ISNA igual ou superior a um determinado limiar na fase crítica, a depender da cultura, em pelo menos 60% dos anos já analisados (nível de risco de 40%). A partir de 2016, o ZARC passa a ser divulgado por diferentes níveis de risco: 20, 30 e 40%, sendo que antes disso era divulgado apenas para 20%. Em 2015, foi implantada a fase de validação externa dos resultados com produtores, técnicos extensionistas, representantes do setor produtivo, entre outros, antes de sua publicação (MONTEIRO e BORGES, 2020).

Uma vez definido esses limiares, a etapa posterior consiste na espacialização dos resultados. Para tanto, os valores de ISNA obtidos no Sarra são interpolados e a grade gerada é classificada em três níveis, correspondendo às situações de alto, médio e baixo risco climático (COMUNELLO, 2016).

Dessa forma, a metodologia do ZARC pode ser representada em 4 etapas (MONTEIRO e BORGES, 2020):

1ª Etapa - Levantamento, preparação e organização de dados de precipitação, temperaturas mínima e máxima diárias, Evapotranspiração de Referência (ET_o) e informações agronômicas representativas;

2ª Etapa - Modelagem e simulação das culturas: representação do sistema solos-planta-atmosfera em valores numéricos, de forma quantitativa. Permite quantificar os riscos em função das necessidades específicas que ocorrem nas diferentes fases do ciclo de cada cultura;

3ª Etapa - Espacialização dos resultados;

4ª Etapa - Validação (análise e avaliação com público externo).

O resultado do estudo é publicado por meio de Portarias da Secretaria de Política Agrícola do MAPA, por cultura e Unidade da Federação (UF)². As portarias de Zoneamento Agrícola de Risco Climático são divulgadas anualmente no Diário Oficial da União e possuem a vigência da safra indicada. Nelas são disponibilizadas a listagem de cultivares indicadas para cada região e a relação de municípios com os respectivos calendários de plantio (BRASIL, 2020a). Nas portarias são mencionados os riscos considerados para o zoneamento da cultura, variando de uma cultura para outra.

² BRASIL. Ministério da Agricultura. Disponível em: < <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/portarias/portarias-novo-1>>. Acesso em: 10/08/2021.

A partir da safra 2019/2020, o produtor rural passou a acessar os dados do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) por meio do aplicativo "Zarc Plantio Certo", para Tablets e Smartphones. Por meio da seleção de quatro variáveis - município, tipo de solo, cultura e ciclo da planta -, o sistema faz um cálculo e indica ao produtor qual a melhor época do ano para fazer o plantio e o nível de risco de perdas (20%, 30% e 40%). Além disso, informa sobre quantidade de dias sem chuva e temperaturas (mínima e máxima) a cada dez dias (decêndios), e análises sobre armazenamento de água no solo provenientes do sistema Agritempo e AgroAPI Embrapa (BRASIL, 2020c).

2.1.1 Sistema CON.PRE.ES – futura base de dados climáticos do ZARC

Conforme exposto em <https://www.conprees.cnptia.embrapa.br/#/public/inicio> (EMBRAPA,2021b), o sistema CON.PRE.ES é uma plataforma colaborativa de análise e compartilhamento de dados meteorológicos, atualmente desenvolvida e gerida pela Embrapa, firmando parcerias com o objetivo de promover o intercâmbio de informações e melhorar a qualidade e a disponibilidade de dados meteorológicos no Brasil. Está disponível para consulta em <<https://www.conprees.cnptia.embrapa.br/#/public/inicio>>, mediante cadastro e aprovação prévios.

Nesse sistema, várias fontes de dados são integradas de forma complementar para compor uma base de dados aprimorada, com maior número de séries e melhor distribuição espacial possível em todo território nacional. Futuramente, essa base de dados climáticos será empregada no ZARC.

O banco de dados do CON.PRE.ES é multi-fonte, contendo dados de estações meteorológicas e pluviométricas, sensores orbitais, análise e reanálise de modelos meteorológicos. Em relação aos dados de precipitação provientes de sensores orbitais, existem atualmente alguns disponíveis no sistema como a TRMM e a GPM. Especificamente a este último sensor, versão que está sendo atualmente utilizada é a versão GPM IMERG *Late Precipitation* L3 de dados diários, devido ao prazo de latência de disponibilização das informações, que é de 12 horas.

No presente estudo optou-se por analisar a versão GPM IMERG *Final Run* - versão 06B - na sua resolução temporal melhor (30 minutos), visando o incremento da malha de chuva do ZARC principalmente no que se refere a dados históricos, tendo em vista o prazo de latência de disponibilização destes dados – 3,5 meses.

2.1.2 Variáveis biofísicas e meteorológicas para determinação de risco agroclimático e possíveis refinamentos no ZARC

A precipitação, evapotranspiração de referência (ET_o) e a temperatura do ar, entre outros, são importantes parâmetros empregados na determinação e caracterização do risco climático, conforme especificidades da cultura, de acordo com o exposto no documento “Parâmetros de Risco Climático” (BRASIL, 2015b).

Em linhas gerais, chuva, temperatura do ar e radiação solar são as principais variáveis meteorológicas que afetam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas, sendo que o fotoperíodo, a umidade do ar e do solo, a velocidade e da direção do vento também exercem influência (MONTEIRO, 2009).

O conhecimento das variáveis meteorológicas é de suma importância nos estudos relacionados ao desempenho das culturas agrícolas, sendo que a temperatura do ar é a que mais interfere nos processos fisiológicos que ocorrem nas plantas (ANTONINI *et al.*, 2009). A temperatura afeta uma série de processos nas plantas como a respiração de manutenção, a transpiração, o repouso vegetativo, a duração das fases fenológicas das culturas, a indução ao florescimento, o conteúdo de óleo em grãos, a taxa de germinação de sementes, etc. Com tantas interferências, temperatura se trona a principal variável meteorológica a ser considerada em zoneamentos agroclimáticos, juntamente com a chuva (MONTEIRO, 2009).

Em regiões tropicais e subtropicais, a relação entre altitude e temperatura assume grande relevância, pois diferenças de altitude podem levar a mudanças perceptíveis no ambiente, na adaptação da biota e sucesso do cultivo agrícola. A temperatura do ar sofre alterações com a altitude, latitude e longitude, em geral, nesta ordem de importância, sendo que a temperatura do ar normalmente decresce com a elevação da altitude numa proporção de aproximadamente 1°C / 100 m (gradiente adiabático existente quando o ar é seco) (FRITZSONS *et al.*, 2015).

Heinemann (2017) coloca que a temperatura do ar interfere na produtividade das culturas por ter caráter determinante na duração dos estádios de desenvolvimento das mesmas. Já a temperatura mínima é uma variável de grande relevância para a agricultura, pois está associada ao termo-período, às horas de frio, às ondas de frio e a outro fenômeno meteorológico, em geral adverso à agropecuária: a geada (BERLATO e ALTHAUS, 2010).

O monitoramento da temperatura do ar é feito por meio de estações meteorológicas convencionais ou automáticas. Entretanto, quando a rede dessas estações é insuficiente para permitir a caracterização térmica da região, a temperatura do ar pode ser estimada por

equação de regressão múltipla com base na altitude, latitude e longitude (ANTONINI *et al.*, 2009).

O modelo agrometeorológico empregado no ZARC considera elementos que influenciam diretamente no desenvolvimento da produção agrícola, como temperatura, chuvas, umidade relativa do ar, ocorrência de geadas, água disponível nos solos, demanda hídrica das culturas e elementos geográficos, como altitude, latitude e longitude (BRASIL, 2020d).

Cabe ressaltar que temperatura e altitude são importantes condicionantes biofísicos para o desenvolvimento de determinadas culturas, sendo consideradas como parâmetros de risco climático (BRASIL, 2015b) nas portarias do ZARC, sempre que disponíveis. Nesse contexto, como refinamento metodológico nesse zoneamento, parâmetros de temperatura podem ser calculados, segundo recortes geográficos de interesse, por meio de equações de regressões múltiplas, nas quais a altitude é um dos fatores de correção (ajuste).

Dessa forma, conforme recomenda o documento “Parâmetros de Risco Climático” (BRASIL, 2015b), estimativas de temperatura e probabilidade de ocorrência de geadas deverão ser calculadas a partir das séries diárias das estações meteorológicas disponíveis e também através de ajustes de funções de regressão múltipla a partir da análise de correlação entre temperatura, latitude, longitude e altitude.

Antonini *et al.* (2009, 2010) desenvolveram um modelo matemático para estimativa da temperatura média diária do ar no estado de Goiás, o qual considera simultaneamente as variações espacial e temporal. O modelo foi desenvolvido por meio de uma combinação linear da altitude, latitude, longitude e série trigonométrica de Fourier. Os parâmetros do modelo foram ajustados aos dados de 21 estações meteorológicas, por meio de regressão linear múltipla, sendo testado com os dados de três estações de altitudes diferentes: elevada (1.100 m), média (554 m) e baixa (431 m).

Outros exemplos de estudos nesta temática podem ser citados: Ferreira *et al.* (2006), nos estados de Minas Gerais e Pará, para estimar temperatura média mensal do ar, utilizando modelos digitais de elevação; Cargnelutti Filho *et al.* (2008), para estimar as temperaturas média e máxima na escala decendial para o estado do Rio Grande do Sul; Castro *et al.* (2010), utilizando MDE SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) para espacialização da temperatura do ar no estado do Espírito Santo - valores mensais e anual de temperatura média, mínima e máxima do ar.

Vale ressaltar o estudo elaborado por Montanher *et al.* (2018), no qual buscam compreender os fatores de controle da temperatura do ar no estado do Paraná, por meio da

avaliação da contribuição de quatro variáveis: latitude, longitude, altitude e oceanidade. Para tanto, foram obtidas séries históricas de temperatura média, mínima e máxima, reconstituídos, resultando em séries mensais contínuas para o período entre out./1976 a dez./2015. Com uso de regressão linear múltipla, as variáveis foram modeladas e, a partir da análise dos coeficientes dos modelos, concluíram que a altitude e a latitude possuem relações inversamente proporcionais com a temperatura do ar, enquanto a longitude possui relação proporcional; a variável região, empregada para simular o efeito de oceanidade sobre o litoral do estado, demonstrou uma dinâmica mais complexa do que as outras variáveis, com influência oposta no verão e inverno, e com pouca implicação nas estações do ano de transição; a importância das variáveis para os modelos não é a mesma para estatísticas descritivas empregadas e não é constante ao longo do ano.

Ademais, por meio da altitude é possível derivar produtos como declividade, direção de fluxo, fluxo acumulado e, a partir dessas informações, delimitar áreas inaptas à mecanização agrícola; Áreas de Preservação Permanente (APPs) referentes às encostas ou partes destas com declividade superior a 45°; bordas dos tabuleiros ou chapadas; topo de morros, montes, montanhas e serras; áreas de altitude superior a 1.800 metros, qualquer que seja a vegetação; e ao longo de cursos d'água, por meio da obtenção de redes de drenagens, conforme definido no Código Florestal brasileiro, para exclusão do zoneamento.

É viável, ainda, delimitar áreas em que existam limitações para a produção de culturas por fatores geográficos, como altitude, uma vez que este fator está intimamente ligado à temperatura e condições climáticas favoráveis ou não a um determinado cultivo. Tais delineamentos podem ser incorporados ao ZARC com o intuito de aprimorar sua metodologia.

Como é cerne do ciclo hidrológico do nosso planeta, entender as diversas características da precipitação é crucial para o entendimento do clima das regiões da Terra. Não é possível compreender o ciclo de energia e da água ou prever o tempo e clima sem o conhecimento preciso da intensidade e distribuição da precipitação em termos globais, sendo esse um dos grandes desafios na pesquisa de ciências da Terra (D'OLIVEIRA *et al.*, 2010).

As chuvas afetam tanto o crescimento quanto o desenvolvimento das culturas, além da disponibilidade hídrica dos solos, a qual, por sua vez, influencia a absorção de água pelas raízes e a condição hídrica das culturas. Em períodos de estiagem de chuvas, há a indução do fechamento dos estômatos das plantas, fixando menos CO₂, afetando negativamente a fotossíntese. Já em períodos com chuvas excessivas, há a redução da oxigenação dos solos, diminuindo a atividade radicular e a absorção de água e nutrientes pelas plantas. Dessa forma,

tanto a escassez de água quanto o encharcamento dos solos levam à redução da produtividade das culturas (MONTEIRO, 2009).

No ZARC, a informação de precipitação é considerada para a realização do balanço hídrico das culturas, sendo utilizadas em séries com, no mínimo, 15 anos de dados diários registrados pelas estações pluviométricas. Porém, o número de estações pluviométricas é insuficiente para o recobrimento satisfatório de todo território nacional, podendo a malha de chuva ser incrementada por dados provenientes de sensores orbitais.

Possíveis refinamentos metodológicos, não necessariamente ligados às variáveis biofísicas e meteorológicas, podem ainda ser contemplados no ZARC, a saber: exclusão de áreas legalmente atribuídas e protegidas, como Unidades de Conservação (UCs) e Terras Indígenas (TIs), e consideração das informações advindas dos Zoneamentos Ecológico-Econômicos dos Estados. Em consonância com o pacto federativo e Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama), o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) é executado de forma compartilhada entre a União, estados e municípios e compete à Comissão Coordenadora do Zoneamento Ecológico-Econômico do Território Nacional (CCZEE) acompanhar periodicamente os trabalhos de ZEE desenvolvidos nos estados. Todavia, a efetividade da contribuição do ZEE para a sustentabilidade depende da capacidade do poder público e do setor privado de integrá-lo aos diversos planos, programas, políticas, projetos e demais instrumentos de planejamento e ordenamento territorial (BRASIL, 2017).

2.2 Dados biofísicos provenientes de sensores orbitais

2.2.1 Background - MDE SRTM 30

A Missão *Shuttle Radar Topography Mission* foi uma cooperação entre *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), Departamento de Defesa dos EUA (DoD), Agência espacial alemã (*Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt* - DLR) e italiana (*Agenzia Spaziale Italiana* - ASI). A missão ocorreu a bordo do ônibus espacial *Endeavour*, durante 11 dias em fevereiro do ano de 2000. Seu principal objetivo foi mapear o relevo de áreas continentais da terra entre 60° de latitude Norte e 54° de longitude Sul (cerca de 80% da massa terrestre) por meio de interferometria de radar de abertura Sintética - InSAR (FARR *et al.*, 2007; GROHMANN *et al.*, 2008; GROHMANN, 2018; NASA, 2013).

Os radares de abertura sintética são instrumentos de visão lateral que adquirem dados ao longo de faixas contínuas. O objetivo era imaginar cada segmento de terreno pelo menos duas vezes, a partir de ângulos diferentes (em órbitas ascendentes - de norte a sul, e descendentes - sul a sul), a fim de preencher áreas sombreadas do sinal do radar por terreno. Uma revisão detalhada da missão SRTM é descrita por FARR *et al.* (2007). O DEM SRTM é o conjunto de dados mais procurado na história da NASA (NASA, 2020).

Dois radares de abertura sintética foram operados durante a missão SRTM: um sistema operando na banda C (5,3 GHz, comprimento de onda = 5,6 cm) e outro na banda X (9,6 GHz, comprimento de onda = 3,1 cm). Enquanto o sistema da banda C gerou uma cobertura de mapeamento contínua, os dados referentes à banda X foram gerados ao longo de faixas de 50 km de largura (FARR *et al.*, 2007). Três versões oficiais do SRTM foram lançadas, sendo que a última - NASA SRTM versão 3 ou “SRTM Plus” - incluem dados topográficos de fontes não-SRTM para preenchimento de "vazios" (ausência de dados) das versões anteriores.

Tais dados de preenchimento são provenientes, principalmente, do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), a bordo do satélite “Terra” da NASA, o qual imagea estereoscopicamente (bandas no Nadir e Backward) a Terra em comprimentos de onda do infravermelho-próximo (0,76 a 0,86 μm), desde 1999, produzindo o *Global Digital Elevation Model* (GDEM). A versão utilizada para preenchimento de vazios foi o GDEM 2. Secundariamente, o preenchimento se deu por meio de dados USGS *Global Multi-resolution Terrain Elevation Data* (GMTED2010) (DANIELSON e GESCH, 2011) e USGS *National Elevation Dataset* (NED) (GESCH *et al.*, 2002) no lugar do GMTED2010 para os Estados Unidos (exceto Alasca) e norte do México (GROHMANN, 2018; NASA, 2015).

Em 2014, os dados globais do SRTM NASA Versão 3, com resolução de 1 segundo de arco (~30 metros no Equador), foram divulgados publicamente e podem ser baixados gratuitamente³.

Os requisitos de desempenho para os produtos da missão SRTM em nível mundial, na resolução espacial de 30 metros, consistem em 16 m de erro vertical absoluto, 10 m de erro vertical relativo, 20 m de erro absoluto de geolocalização e 15 m de erro relativo de geolocalização (90% de erros) (RODRIGUEZ *et al.*, 2005).

³ EARTHDATA. Description. Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmg11v003>>. Acesso em: 10/08/2021

2.2.2 NASADEM

Fruto da colaboração entre NASA e National Geospatial-Intelligence Agency (NGA), com a participação das agências espaciais italiana e alemã, o produto NASADEM expande o legado da missão SRTM, melhorando a exatidão do Modelo Digital de Elevação (MDE) e a cobertura de dados em escala global.

As melhorias foram realizadas por meio do total reprocessamento dos dados originais do sinal de radar bruto SRTM, utilizando algoritmos aperfeiçoados e incorporando dados derivados principalmente do *Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite (ICESat) Geoscience Laser Altimeter System (GLAS)* e *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Derived Global DEMs (GDEMs)*. O instrumento LIDAR GLAS da missão ICESat e DEMs ASTER não estavam disponíveis durante o processamento original do SRTM (BUCKLEY *et al.*, 2020; NASA 2020).

A NASA usou anteriormente o ASTER GDEM versão 2 (GDEM2) e GMTED2010 (DANIELSON e GESCH, 2011) para criar o MDE NASA SRTM Versão 3 ou “SRTM Plus”. No decorrer do projeto NASADEM, o MDE ALOS World 3D de 30 metros de resolução espacial (TADONO *et al.*, 2016), uma missão da agência espacial japonesa (JAXA), foi lançado e utilizado para o preenchimento de vazios do DEM SRTM e para detecção de erros nos GDEMs. Dessa forma, apenas os ASTER GDEMs, MDE ALOS PRISM AW3D30 e interpolação para preenchimento de vazios foram empregados, sendo que o GMTED2010 ou outro MDE não foram utilizados. Uma descrição detalhada do produto NASADEM e dos processamentos empregados podem ser encontrados em Buckley *et al.* (2020).

O *Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC)* é responsável pelo arquivamento e distribuição dos registros de dados do NASA *Making Earth System Data Records for Use in Research Environments (MEASURES)*. Neste contexto, cinco produtos NASADEM são disponibilizados para a comunidade acadêmica e científica, diferindo por tipo e unidades de medida, de acordo com as descrições em agrupamentos apresentadas na Tabela 1.

O produto global “NASADEM Merged DEM” versão 1 (NASADEM_HGT), analisado neste estudo, possui 1 segundo de arco de resolução espacial (~30 metros no Equador), disponibilizado em uma grade de 1° x 1°, com altitudes ortométricas referenciadas ao modelo geoidal EGM96. Pode ser obtido gratuitamente em: <https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MEASURES/NASADEM_HGT.001/> e <<https://search.earthdata.nasa.gov/>> (NASA, 2020a).

As camadas de dados do produto NASADEM_HGT incluem o próprio DEM, número de cenas (“NUM”) e máscara atualizada de corpos d'água SRTM (“SWB”). A camada “NUM” indica o número de *tiles* DEM que foram processadas a cada pixel e a fonte dos dados. Um breve resumo dos valores de referência associados aos DEMs empregados no reprocessamento e apresentados na camada “NUM” pode ser encontrado em Buckley *et al.* (2020).

Em relação à correção de erros de ondulação de altitude (em inglês, Height Ripple Error Correction - HREC), há uma seção em Buckley *et al.* (2020) que descreve a abordagem utilizada para mitigar as ondulações de altura do DEM SRTM produzidas pelo movimento não compensado do mastro das antenas dos radares e outros erros sistemáticos em relação à altitude. A correção adaptativa das ondulações utiliza-se de dados disponíveis do ICESat GLAS sobre terra e da topografia modelada da superfície oceânica em regiões costeiras. Os resultados são apresentados para a América do Norte.

Quanto à exatidão nas altitudes, o processador SRTM foi modificado para melhorar a estimativa do erro. A nova implementação consiste em um cálculo mais exato do desvio padrão de fase do que o limite inferior *Cramer-Rao* (CRB) utilizado no processador original, e uma estimativa melhorada do número efetivo de filtros de processamento e no estimador de correlação (BUCKLEY *et al.*, 2020).

Em relação à validação do modelo NASADEM_HGT, erros vertical e horizontal - absoluto e relativo - em escala global, como o lançamento e disponibilização para o público desse MDE, são muito recentes, e ainda não há valores previstos em literatura especificamente para o mesmo.

2.2.3 MDE ALOS AW3D30

Lançado pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), o modelo digital de elevação (MDE) denominado de AW3D30 apresenta resolução espacial de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros no Equador). É fruto da reamostragem dos dados do MDE AW3D de 5 metros de resolução espacial, que é o dado de elevação de escala global mais exato no momento.

O conjunto de dados foi compilado com imagens adquiridas pelo satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS). O MDE advém do imageamento estereoscópico por meio do sensor *Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping* (PRISM) (0,52-0,77 μm). Este sensor possui três sistemas ópticos independentes: Nadir (ortogonal), Forward

(dianteira) e Backward (traseira) - com 2,5 m de resolução espacial no Nadir – o que permite, com o deslocamento da aeronave e aquisição contínua, a aquisição de três visadas do terreno e a recuperação da posição tridimensional (JAXA, 2020a).

Em cinco anos de operação, a ALOS produziu aproximadamente 6,5 milhões de cenas cobrindo todo o globo terrestre, com a exatidão relatada apenas para o conjunto de dados AW3D: 5 m de *Root Mean Square Error* (RMSE) horizontal e vertical (TAKAKU *et al.*, 2014). São disponibilizadas três versões do MDE ALOS AW3D30, as quais contaram com melhorias a cada nova versão e podem ser obtidas gratuitamente⁴. Esse MDE apresenta altitudes ortométricas referenciadas ao modelo geoidal EGM96 (JAXA, 2020b). A versão utilizada neste estudo foi a 3.1, a mais atual com cobertura global até o presente momento.

Tal versão foi lançada em abril de 2020 para a região norte, a partir de 60° sul, apresentando 19.183 quadrículas. Conta com espaçamento de pixels diferente para cada zona de latitude em zonas de latitudes elevadas, alteração dos dados da linha costeira e novos dados suplementares para preenchimento de vazios. Para o Japão, a versão utiliza-se da terceira edição da AW3D como fonte de dados (JAXA, 2020c).

2.2.4 Global Precipitation Measurement (GPM)

A concepção do Programa *Global Precipitation Measurement* (GPM) é uma resposta à necessidade de medidas acuradas de precipitação global. Tal programa sucedeu o *Tropical Rainfall Measurement Mission* (TRMM), ampliando sua abrangência e aprimorando a resolução temporal e espacial. Desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em conjunto com *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), dispõe de um consórcio de agências espaciais internacionais que visam monitorar globalmente, por meio de satélites, as precipitações na atmosfera na resolução espacial de 0,1°, ~11 km no Equador, a cada 30 minutos na sua melhor resolução temporal (NASA, 2020b).

Com base no sucesso da TRMM, o conceito GPM foca na implantação de um Observatório Central (*Core Observatory*), lançado em 27 de fevereiro de 2014 pela NASA e JAXA, que transporta um sistema avançado de radar / radiômetro para medir a precipitação do espaço e servir como padrão de referência para unificar as medições de precipitação de uma constelação de satélites de pesquisa e operacionais (NASA, 2020b).

⁴ EORC. ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30m (AW3D30). Disponível em: <<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>>. Acesso em: 10/09/2021.

O observatório central da constelação GPM possui um radar ativo de precipitação de dupla frequência (DPR) e um radiômetro de microondas passivo chamado “GPM *Microwave Imager*” (GMI), mais avançados e completos do que os do TRMM. O instrumento GMI pode medir precipitação leve a forte e o DPR pode medir as características de precipitação da coluna atmosférica em três dimensões (NASA, 2020c).

Conforme descrito na página da NASA sobre o instrumento⁵ (NASA, 2020d), o instrumento GMI é um radiômetro de microondas multicanal, de varredura cônica, caracterizado por 13 canais de microondas que variam em frequência de 10 GHz a 183 GHz, carregando canais similares TRMM *Microwave Imager* (TMI); o GMI carrega a mais quatro canais de alta frequência, de onda milimétrica, próximos a 166 GHz e 183 GHz.

Cada canal é sensível a uma frequência diferente de energia de microondas emitida naturalmente ou afetada por precipitação. Existem 5 canais sensíveis a chuvas fortes e moderadas, 4 à mistura de neve e gelo dentro das nuvens, sendo as camadas mistas frequentemente resultado do derretimento do gelo ou da neve em chuva à medida que ela cai, e 4 canais sensíveis ao vapor de água e à queda de neve. Os múltiplos canais em cada categoria garantem que o GMI capture uma gama completa de possíveis tipos de precipitação.

Os dados do GMI são usados como padrão de referência radiométrica para uma rede internacional de satélites de medição de precipitação de parceiros, conhecida como Constelação GPM. Os dados do Observatório Central GPM e destes satélites parceiros são unificados em um único conjunto global de dados de precipitação, chamado IMERG, que é atualizado a cada três horas (NASA, 2020d).

O DPR consiste em um radar de precipitação na banda Ku (KuPR) e um radar de precipitação na banda KaPR (Ka-band). O KuPR, que opera a 13,6 GHz, é uma versão atualizada da unidade presente na TRMM. Já a banda KaPR opera a 35,5 GHz e é mais sensível que seu predecessor TRMM, especialmente na medição de chuvas leves e queda de neve em regiões de latitude média. A determinação da precipitação/neve é realizada utilizando a atenuação diferencial entre as frequências da banda KuPR e da banda Ka-band. Os dados coletados em tais unidades fornecem observações tridimensionais da chuva e estimativas precisas da taxa de pluviosidade para a comunidade científica (NASA, 2020e).

Cada membro da constelação GPM possui objetivos próprios, mas também contribuem com medições de microondas passivas para a GPM, a fim de gerar e disseminar produtos de precipitação uniformemente processados em escala global. As medições dos

⁵ NASA. GPM Microwave Imager (GMI). Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/GMI>>. Acesso em: 10/08/2021.

sensores ativo e passivo do observatório central também são empregadas para calcular estimativas consistentes de precipitação provenientes da constelação de satélites fornecidos pelo consórcio de parceiros internacionais, a saber (NASA, 2020e):

- Megha-Tropiques (ISRO - Índia / CNES - França);
- Suomi NPP (NASA - Estados Unidos);
- GCOM-W1 (JAXA - Japão);
- MetOp 2/A, 1/B, 3/C (ESA - Europa);
- NOAA 19/20 (NOAA - Estados Unidos);
- DMSP F16/F17/F18 (DoD - Estados Unidos).

As estimativas de precipitação são complementadas também por estimativas baseadas no infravermelho (IR), registradas por satélites meteorológicos geossíncronos. Embora menos precisos, estes dados IR fornecem informações quando um local carece de dados de microondas passivas durante várias horas. Os satélites geossíncronos que contribuem são (NASA, 2020f):

- GMS, MTSat, Himawari Series (JMA - Japão);
- GOES-E Series (NESDIS - Estados Unidos);
- GOES-W Series (NESDIS - Estados Unidos);
- Metosat Prime Series (EUMETSTAT - ESA - Europa);
- Meteosat Reposition Series (EUMETSTAT - ESA - Europa).

Das informações capturadas pelos satélites e geradas pelo Observatório Central GPM, vários produtos são gerados pela NASA, divididos em níveis, sendo o primeiro aquele que apresenta dados mais brutos, e os últimos, dados mais refinados. Destaca-se o produto nível 3 (*Level 3*), trabalhado pelo algoritmo *Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM* (IMERG), que intercalibra, mescla e interpola todas as estimativas de microondas e infravermelho calibrado por microondas (IR) provenientes da constelação de satélites do GPM. Os produtos oriundos desse algoritmo já contam com pixels padronizados na grade de 0,1° de resolução espacial. Cabe ressaltar que contam também com radares e uma rede de postos pluviométricos em solo para realização de ajustes finais.

O sistema é executado várias vezes, primeiro dando uma estimativa rápida (IMERG *Early Run*) e, sucessivamente, fornecendo melhores estimativas à medida que mais dados chegam (IMERG *Late Run*). A etapa final utiliza dados de medição mensais de estações pluviométricas para criar produtos em nível de pesquisa (IMERG *Final Run*).

O IMERG *Early Run* (rodada recente) é disponibilizado em apenas 4 horas após a captura das informações pelos satélites e este produto mais inicial, e pretende auxiliar na

previsão de enchentes e condições de risco que precisem de informações em tempo real, assim como o *Late Run* (rodada tardia), disponibilizado depois de 12 horas e com mais tratamentos empregados. Já o IMERG *Final Run* (rodada final) é disponibilizado com latência de 3,5 meses após a passagem dos satélites (GADÊLHA, 2018; NASA, 2020g).

Por fim, o produto mensal IMERG *Final Run* passa pelo Ground Validation (validação de solo), que tem por objetivo aproximar a estimativa dos satélites com observações de uma rede de radares e postos pluviométricos existentes em solo.

Esta validação é baseada nos dados do *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC – Centro de Precipitação e Climatologia Global) e, apesar dos dados de solo de periodicidade mensal, são de grande importância para controlar distorções do IMERG e garantir melhorias. Tal validação é de responsabilidade da equipe de pesquisa de precipitação da NASA Goddard Space Flight Center (GADÊLHA, 2018; NASA, 2020h).

Ademais, o portal GPM de validação de solo (*Ground Validation - GV*)⁶ fornece acesso a uma ampla gama de informação de validação em solo, gerenciadas pela NASA, como radares, disdrômetros, estações pluviométricas e outros conjuntos de dados e instrumentos que dão suporte às atividades de validação de dados GPM. Nesse portal é possível ter acesso aos projetos especiais de parceiros internacionais, campanhas de campo e redes de validação existentes.

2.3 Variáveis meteorológicas e mudanças de uso e cobertura do solo no Cerrado

2.3.1 Evapotranspiração de Referência (ET_o)

O termo Evapotranspiração (ET) foi criado por Thornthwaite, na década de 1940, para descrever a ocorrência da evaporação da água diretamente da superfície do solo e transpiração das plantas. A ET é usualmente expressa como a quantidade de água perdida por unidade de tempo, usualmente medida em mm/dia (LOBATO, 2019).

Já o termo Evapotranspiração de Referência (ET_o) foi introduzido na década de 1970, sob o termo evapotranspiração potencial (ET_p), e indica a perda de água de uma superfície vegetada, em crescimento ativo e sem restrição hídrica, que cobre totalmente o solo (PEREIRA *et al.*, 1997; ALLEN *et al.*, 1998).

⁶ NASA. GPM. Disponível em: <<https://gpm-gv.gsfc.nasa.gov/index.php>>. Acesso em: 10/08/2021.

A evapotranspiração de referência (ET_o) é um importante parâmetro agrometeorológico, para planejamento e manejo de irrigação, além de ser considerada um elemento climático de demanda hídrica, o que justifica sua aplicação em estudos meteorológicos, climatológicos e hidrológicos (CARVALHO *et al.*, 2011). Pode ser determinada de duas formas: por meio de da utilização de lisímetros (método direto); ou por métodos indiretos empregando-se modelos físico-matemáticos de estimativa (SOBRINHO, 2011).

O modelo padrão para a estimativa de ET_o é o de Penman-Monteith (PMFAO 56), o qual preconiza dados de radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa do ar para seu emprego (ALLEN *et al.*, 1998; CONCEIÇÃO, 2013).

Uma vez que mudanças no uso e cobertura da terra influenciam os parâmetros utilizados no cálculo da ET_o acima mencionados, a mesma responderá de maneira direta à tais mudanças, hipótese que será testada neste estudo.

Cabe ressaltar que, por meio da associação da Evapotranspiração de Referência e o Coeficiente de Cultura (K_c), estima-se a evapotranspiração da cultura (ET_c), a saber: $ET_c = K_c \cdot ET_o$.

2.3.2 Temperatura

As alterações nos processos biofísicos da superfície, como albedo, rugosidade aerodinâmica e evapotranspiração influenciam a temperatura de maneiras específicas. Rugosidade aerodinâmica pode ser entendida como altura da superfície, a partir da qual ocorre turbulência do ar. Quanto mais fricção entre o ar e a cobertura terreno, maior a rugosidade, variando de acordo com uso e cobertura existente (DEVARAJU *et al.*, 2015). O aumento do albedo, depois da conversão da vegetação nativa, faz com que uma menor quantidade de radiação solar seja absorvida pela superfície, acarretando a diminuição da temperatura (DAVIN e NOBLET-DUCOUDRÉ, 2010). A redução da rugosidade aerodinâmica e da evapotranspiração, depois de mudanças de uso e cobertura da terra (LUCC), levam ao aumento da temperatura (PERUGINI *et al.*, 2017; CAMPOS, 2018). O impacto final na alteração da temperatura é definido pela combinação dos três fatores.

Se considerado isoladamente, o efeito climático do aumento do albedo devido ao LUCC seria um resfriamento da superfície terrestre. Porém, estudos demonstram que, para um mesmo tipo de mudança do uso e cobertura do solo, o efeito na temperatura devido à LUCC é altamente dependente da latitude (BONAN, 2008; DAVIN e NOBLET-DUCOUDRÉ, 2010;

PERUGINI *et al.*, 2017; CAMPOS, 2018). Nas regiões onde o efeito do albedo é dominante, como no hemisfério norte, o impacto biofísico do desmatamento é o resfriamento da superfície. Já na região tropical, haverá um aquecimento, pois a rugosidade aerodinâmica e evapotranspiração prevalecem sobre o albedo (SNYDER *et al.*, 2004; DAVIN e NOBLET-DUCOUDRÉ, 2010; PERUGINI *et al.*, 2017; CAMPOS, 2018).

2.3.3 Precipitação

A análise de dados observados para identificar o impacto da mudança da cobertura do solo no regime de chuva local é desafiadora, devido à dependência de vários fatores ambientais que não podem ser estritamente controlados (LIANG *et al.*, 2019). O efeito do LUCC sobre a precipitação em áreas tropicais não é tão evidente como no caso da temperatura, uma vez que os estudos disponíveis nesta área apresentam resultados distintos (CAMPOS, 2018).

Vários fatores como vegetação, topografia, tipos de solo, climatologia, distribuição de massas continentais e de água determinam a sensibilidade do clima regional à mudança da cobertura terrestre. Esta dependência das características específicas da região torna impossível prever as consequências do desmatamento em uma região, a partir da extrapolação de observações em outra região (LAWRENCE e VANDECAR, 2014).

Entretanto, simulações com modelos climáticos permitem entender os principais mecanismos e efeitos na precipitação regional causados pela LUCC (CAMPOS, 2018). Após a substituição da vegetação nativa por pastagens e lavouras, o aumento do albedo diminui o fluxo de energia na superfície, resfriando a atmosfera superior e favorecendo uma circulação termo induzida, a qual resulta no movimento descendente de massas de ar (ELTAHIR, 1996). Já a redução da rugosidade aerodinâmica acarreta na redução do fluxo de vapor de água para camadas superiores da atmosfera e dos processos convectivos. Tanto a umidade liberada através da evapotranspiração quanto a atividade convectiva na atmosfera são primordiais para a formação e desenvolvimento das nuvens, e consequentemente, na ocorrência da precipitação (CAMPOS, 2018).

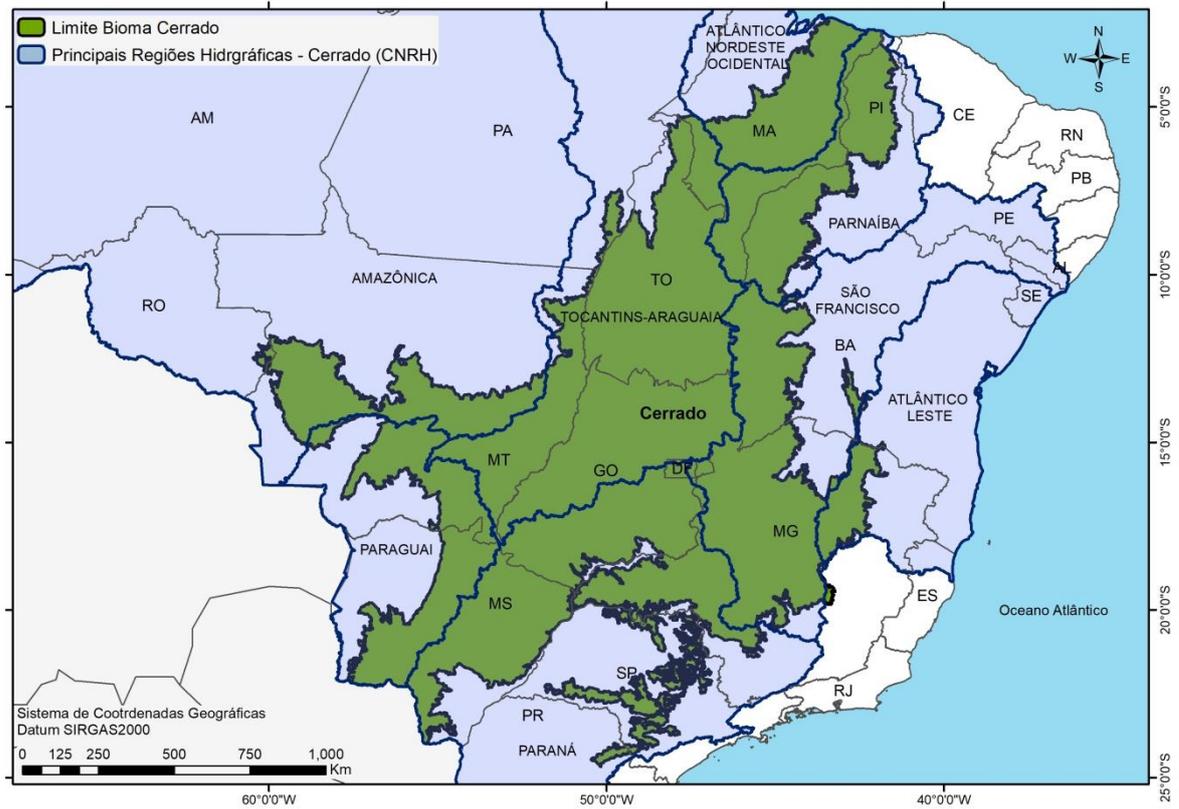
Em relação ao padrão da paisagem *versus* regime de chuva local, especula-se que não só apenas a quantidade, mas também a continuidade das áreas florestais é considerável para o processo de convecção dos ventos (NOBRE, 2009), o que demonstra a importância de grandes manchas de vegetação nativa.

Por fim, sabe-se que a variação do regime de chuva local depende também do tamanho da área natural que é convertida em uso. O aumento do ar quente sob pequenas áreas desmatadas reduz a pressão atmosférica no local, estimulando o fluxo de umidade das áreas florestadas circundantes. Em consequência, há aumento da convecção e formação de nuvens que agem favorecendo a precipitação naquele local. No entanto, à medida que as áreas desmatadas aumentam, esse sistema enfraquece pela redução da umidade vinda da vegetação nativa ao redor, resultando numa queda da precipitação (CAMPOS, 2018).

2.4 Área de estudo

A área de estudo refere-se ao bioma Cerrado, segundo maior bioma sul-americano. Ocupa, aproximadamente, 23,3% do território brasileiro, abrangendo 12 estados e Distrito Federal (IBGE, 2019). Considerado um dos *Hotspots* mundiais para a conservação da biodiversidade (MYERS *et al.*, 2000), oito das doze Regiões Hidrográficas brasileiras definidas pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) recebem contribuições hídricas deste bioma. São elas: Amazônica, Tocantins-Araguaia, Paraguai, Atlântico Nordeste Ocidental, Parnaíba, São Francisco, Atlântico Leste e Paraná (Figura 1) (LIMA e SILVA, 2007). Nele encontram-se também as nascentes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Araguaia/Tocantins, São Francisco e Prata). (ASSAD *et al.*, 2020) (Figura 1).

Figura 1 – Área de estudo, o bioma Cerrado (em verde) e regiões hidrográficas que recebem contribuições hídricas do bioma (em azul).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS GERAIS

Para atingir os objetivos propostos, os seguintes passos metodológicos foram adotados:

- Organização de banco de dados biofísicos de altitude e chuva do Cerrado provenientes dos satélites *Global Precipitation Measurement* (GPM) - versão 06B - disponibilizados a cada 30 minutos, *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS) - Modelos Digitais de Elevação (MDEs) AW3D30 versão 3.1 e NASADEM versão 1 (NASADEM_HGT), ambos com resolução espacial de 1 segundo de arco, aproximadamente 30 metros no Equador;
- Organização de banco de dados referentes às estações pluviométricas com informação de precipitação do Cerrado (INMET) – período de 2000 a 2019;
- Organização de banco de dados referente aos dados planialtimétricos provenientes das Estações Poligonais e Vértices de Triangulação do Banco de Dados Geodésicos (BDG) - Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o Cerrado;
- Análise estatística da conformidade/acurácia dos dados biofísicos derivados de sensores orbitais com dados obtidos em nível de superfície terrestre;
- Classificação dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos Cartográficos Digitais - PEC-PCD brasileiro;
- Classificação dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) utilizando o software GEOPEC, voltado para avaliação da acurácia posicional em dados cartográficos;
- Organização de banco de dados referente às informações GPM IMERG *Final Run* de precipitação acumulada mensal, versão 06B – período de 2000 a 2019;
- Organização de banco de dados referente aos mapas de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomias (SOUZA JÚNIOR *et al.*, 2020) – período de 1985 a 2019;
- Realização de testes estatísticos e de avaliação, análises de comportamento da precipitação ao longo do período de 2000 a 2019, a fim de identificar áreas com tendência de precipitação (acrécimo e decréscimo) e relacioná-las com os mapas de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomias (SOUZA JÚNIOR *et al.*, 2020) para o bioma Cerrado.

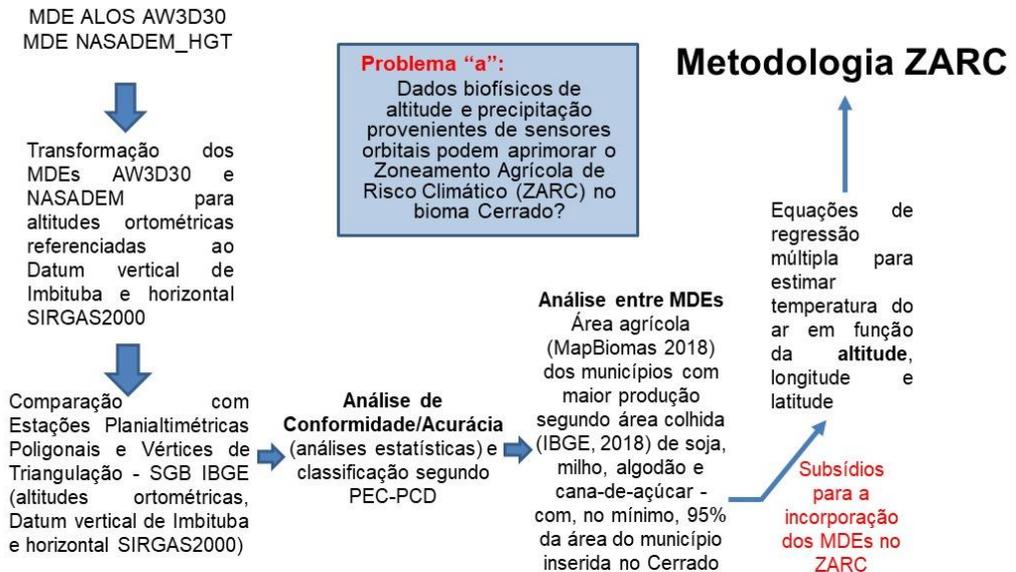
As figuras 2 e 3 apresentam os fluxogramas das etapas metodológicas adotadas no Capítulo II e Capítulo III, nesta ordem, até a incorporação dos MDEs à metodologia do ZARC e dados de precipitação GPM ao futuro banco de dados meteorológicos do ZARC (CON.PRE.ES).

Figura 2 - Fluxograma com etapas metodológicas, capítulo II.

Capítulo II

Metodologia

Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC)



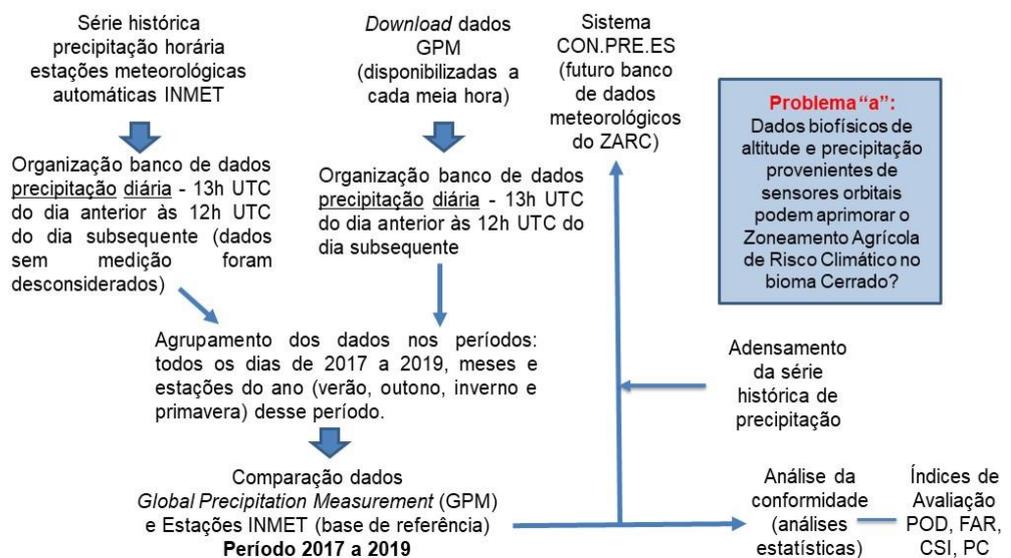
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 3 - Fluxograma com etapas metodológicas, capítulo III.

Capítulo III

Metodologia

Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC)

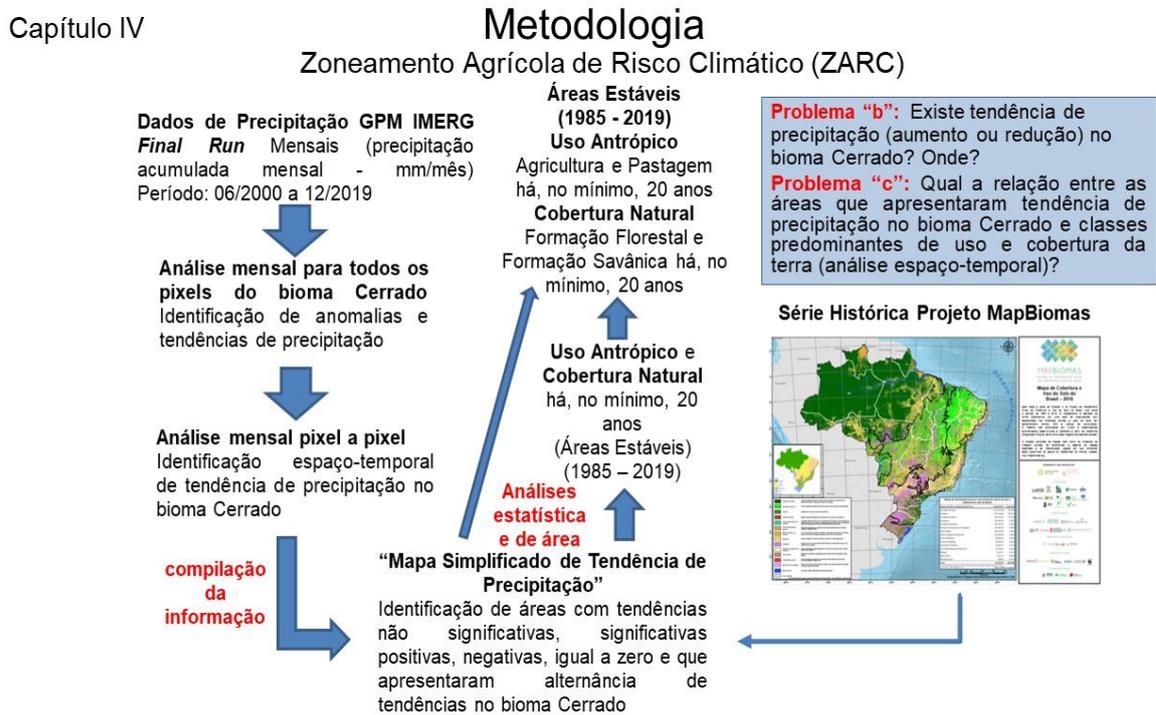


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A figura 4 refere-se ao Capítulo IV e apresenta o fluxograma dos passos metodológicos adotados para identificação espaço-temporal de tendências de precipitação no

bioma Cerrado e cruzamento dessas áreas com as classes predominantes de uso e cobertura da terra.

Figura 4 - Fluxograma com etapas metodológicas, capítulo IV.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998, 297 p.

AMORIM NETO, M. S.; ARAÚJO, A. E.; CARAMORI, P. H.; GONÇALVES, S. L.; WREGE, M. S.; LAZZAROTTO, C.; LAMAS, F. M.; SANS, L. M. A. Zoneamento agroecológico e definição de época de semeadura do algodoeiro no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 09, n. 03, p. 422- 428, 2001.

ANTONINI, J. C. A.; SILVA, E. M.; OLIVEIRA, L. F. C.; SANO, E. E. Modelo matemático para estimativa da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 44, n. 4, p. 331-338, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2009000400001>.

ANTONINI, J. C. A.; SILVA, E. M.; SANO, E. E.; OLIVEIRA, L. F. C.; MARCHI, G. **Modelo de estimativa da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010, 27 p.

ASSAD, E. D.; VICTORIA, D. C.; CUADRA, S. V.; PUGLIERO, V. S.; ZANETTI, M. R. Efeito das mudanças climáticas na agricultura do Cerrado. In: BOLFE, É. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 213-228.

BETTIOL, G.M.; FERREIRA, M.E.; MOTTA, L.P.; CREMON, É.H.; SANO, E.E. *Conformity of the NASADEM_HGT and ALOS AW3D30 DEM with the Altitude from the Brazilian Geodetic Reference Stations: A Case Study from Brazilian Cerrado*. **Sensors**, 2021, 21, 2935. <https://doi.org/10.3390/s21092935>.

BOLFE, É. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Eds.). **Dinâmica agrícola do Cerrado - análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, 2020, 312 p.

BONAN, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. **Science**, v. 320, n. 5882, p. 1444-1449, 2008. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1155121>.

BRASIL (2008). Ministério do Desenvolvimento Agrário. Secretaria da Agricultura Familiar. **Zoneamento agrícola de risco climático: um instrumento de gestão de risco utilizado pelo seguro agrícola do Brasil**. 2008. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Zoneamento_agricola_000f17v6vox02wyi v80isperruh04mek.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2021.

BRASIL (2015a). Ministério do Meio Ambiente. **Mapeamento do uso e cobertura do Cerrado: projeto TerraClass Cerrado**. 2015. Brasília-DF, 67 p., 2015.

BRASIL (2015b). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anexo I. Parâmetros de Risco Climático**. 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/documentos/Parametrosderisoclimatico.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2020.

BRASIL (2017). Ministério do Meio Ambiente. **Zoneamento Ecológico-Econômico nos Estados**. 2017. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/gestao-territorial/zoneamento-territorial/zee-nosestados>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

BRASIL (2020a). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento agrícola**. 2020b. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-dezoneamento-agricola-de-risco-climatico/zoneamento-agricola>>. Acesso em: 01 jul. 2020.

BRASIL (2020b). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Proagro**. 2020a. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/proagro>>. Acesso em: 10 jul. 2020.

BRASIL (2020c). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Aplicativo plantio certo**. 2020c. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/plano-safra-2019-2020/aplicativoplantio-certo>>. Acesso em: 14 jul. 2020.

BRASIL (2020d). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Embrapa inicia o cronograma de reuniões de validação do Zarc**. 2020d. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/embrapa-inicia-o-cronograma-de-reunioes-de-validacao-do-zarc>>. Acesso em: 15 jul. 2020.

BRASIL (2021). Ministério do Meio Ambiente. **O Bioma Cerrado**. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/biomas/cerrado.html>>. Acesso em: 20 jul. 2019.

BUCKLEY, S. M.; AGRAM, P. S.; BELZ, J. E.; CRIPPEN, R. E.; GURROLA, E. M.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; LAVALLE, M.; MARTIN, J. M.; NEUMANN, M.; NGUYEN, Q. D.; ROSEN, P. A.; SHIMADA, J. G.; SIMARD, M.; TUNG, W. W. **NASADEM (User Guide)**. Pasadena: National Aeronautics and Space Administration (NASA), Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2020, 52p.

CAMPOS, J. O. **Variabilidade da precipitação no Cerrado e sua correlação com a mudança no uso da terra**. 2018. 132f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MALUF, J. R. T.; MATZENAUER, R.; STOLZ, Á. P. Altitude e coordenadas geográficas na estimativa da temperatura mínima média decendial do ar no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 06, p. 893-901, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2006000600001>.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa.

Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics), v. 41, n. 03, p. 456-465, 2011. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i3.12760>

CASTRO, F. S.; PEZZOPANE, J. R. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. E. M. Utilização de imagens de radar na espacialização da temperatura do ar. **Idesia**, v. 28, n. 03, p. 69-79, 2010. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292010000300009>.

COSTA, M. H.; PIRES, G. F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. **International Journal Of Climatology**, v. 30, n. 13, p. 1970-1979, 2010. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.2048>.

COMUNELLO, Éder. **Aprimoramento do zoneamento agrícola de risco climático do sistema de produção da soja em Mato Grosso do Sul**. 2015. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Ajuste do modelo de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência no Noroeste Paulista. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 07, n. 05, p. 306-316, 2013. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v7n500172>.

CUNHA, Roberto Abreu Rodrigues da; WANDER, Alcido Elenor; FERREIRA, Manuel Eduardo; BETTIOL, Giovana Maranhão. Definição de áreas prioritárias para recuperação de pastagens degradadas e seu impacto econômico no Vale do Araguaia, estado Goiás. **Revista Agroecossistemas**, v. 12, n. 2, p. 34-50, 2021.

DANIELSON, J. J.; GESCH, D. B. **Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010)**. U. S: Geological Survey Open-File Report, 2011, 26 p. <https://doi.org/10.3133/ofr20111073>.

DAVIN, E. L.; NOBLET-DUCOUDRÉ, N. Climatic Impact of Global-Scale Deforestation: radiative versus nonradiative processes. **Journal Of Climate**, v. 23, n. 1, p. 97-112, 2010. <http://dx.doi.org/10.1175/2009jcli3102.1>.

DEVARAJU, N.; BALA, G.; NEMANI, R. Modelling the influence of land-use changes on biophysical and biochemical interactions at regional and global scales. **Plant, Cell & Environment**, v. 38, n. 09, p. 1931-1946, 2015. <http://dx.doi.org/10.1111/pce.12488>.

D'OLIVEIRA, A. B.; ANGELIS, C. F.; ARAI, N.; MACHADO, L. A. T. Estimativas de precipitação por microondas passivas com ênfase na participação brasileira no GPM. In: **XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2010. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém – Pará, p. 01-05, 2010. Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/rep/8JMKD3MGP7W/38CE3MP>>. Acesso em: 07 jul. 2020

ELTAHIR, E. A. B. Role of vegetation in sustaining large-scale atmospheric circulations in the tropics. **Journal Of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 101, n. 02, p. 4255-4268, 1996. <http://dx.doi.org/10.1029/95jd03632>.

EMBRAPA (2018). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **Aperfeiçoamento do zoneamento agrícola de risco climático evita perdas agrícolas**, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/39680900/aperfeicoamento-do-zoneamento-agricola-de-risco-climatico-evita-perdas-agricolas>>. Acesso em: 17 ago. 2020.

EMBRAPA (2021a). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático - ZARC**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/3933/zoneamento-agricola-de-risco-climatico---zarc>>. Acesso em: 03 de ago. 2021.

EMBRAPA (2021b). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Informática Agropecuária. **Bem-vindo ao CON.PRE.ES!** Disponível em: <<https://www.conprees.cnptia.embrapa.br/#/public/inicio>>. Acesso em: 03 de ago. 2021.

FARR, T.G.; ROSEN, P.A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Review of Geophysics**, v. 45, n. 02, p. 01-43. 2007. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>.

FERREIRA, W.P.M.; VALADARES, G.S.; HOTT, M.C. Estimativa da temperatura média mensal do ar para o Estado de Minas Gerais e do Pará, utilizando-se modelos originais de elevação. **Engenharia na Agricultura**, v. 14, n.04, p.293-303, 2006.

FREITAS, R. M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SOUZA, A. F.; SATO, F. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSA, R. R.; ANDERSON, L. O.; RUDORFF, B. F. T. Virtual laboratory of remote sensing series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v. 2, n. 01, p. 57-64, 2011. <https://doi.org/10.6062/jcis.2011.02.01.0032>

GADÊLHA, A. N. **Análise da missão GPM (Global Precipitation Measurement) na estimativa da precipitação sobre território brasileiro**. 2018. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 2018.

GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S. S. Aplicação dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 02, n. 02, p. 73-83, 2008.

GROHMANN, C. H. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: comparison with srtm, aster gdem and alos aw3d30. **Remote Sensing of Environment**, v. 212, p. 121-133, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.043>.

HEINEMANN, A. B. Tendências e projeções climáticas para o cerrado e potencial Impacto nas Culturas de Soja, Feijão e Arroz de Sequeiro. In: **Seminário Agropecuária no Cerrado Frente às Mudanças Climáticas**, 2018. Anais do Seminário Agropecuária no Cerrado Frente às Mudanças Climáticas. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, p. 41, 2018.

Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/177396/1/CNPAF-2018-p41.pdf>>. Acesso em: 07 jul. 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. 168p.

JAXA. Japan Aerospace Exploration Agency. **About ALOS - PRISM**. 2020a. Disponível em: <<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/prism.htm>>. Acesso em: 24 out. 2020.

JAXA. Japan Aerospace Exploration Agency. **ALOS world 3D-30m (AW3D30) Dataset - Product format description, version 3.1**. 2020b. Disponível em: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/aw3d30v21_format_e.pdf>. Acesso em: 24 out. 2020.

JAXA. Japan Aerospace Exploration Agency. **ALOS Global Digital Surface Model ALOS World 3D - 30m (AW3D30)**. 2020c. Disponível em: <<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>>. Acesso em: 24 out. 2020.

LAWRENCE, D.; VANDECAR, K. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. **Nature Climate Change**, [S.L.], v. 5, n. 01, p. 27-36, 2015. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2430>.

LEE, J. E.; LINTNER, B. R.; BOYCE, C. K.; LAWRENCE, P. J. Land use change exacerbates tropical South American drought by sea surface temperature variability. **Geophysical Research Letter**, v. 38, n. 19, p. 01-06, 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL049066>.

LIANG, C. X.; VAN, F. F.; VERVOORT, R. W. Detecting the impact of land cover change on observed rainfall. **Environmental Science**. p. 01-28. 2019. <https://doi.org/10.7717/peerj.7523>.

LIMA, Cláudia Valéria de; NUNES, Fabrizia Gioppo; OLIVEIRA, Ivanilton José de; BARRIO, Juan Bernardino Marques; BARROS, Juliana Ramalho; FERREIRA, Laerte Guimarães; FERREIRA, Manuel Eduardo Ferreira (comissão de elaboradores). **Projeto Pedagógico do Curso de Ciências Ambientais**. Universidade Federal de Goiás (UFG), Instituto de Estudos Socioambientais (IESA). Goiania, 2013.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. da. Estimativa da contribuição hídrica superficial do Cerrado para as grandes regiões hidrográficas brasileiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, 2007, São Paulo. Anais... São Paulo, 2007. 1 CD-ROM.

LOBATO, W. T. S. **Equações empíricas para determinação da evapotranspiração de referência no Nordeste Paraense**. 2018. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Capitão Poço, 2019.

MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009, p. 530.

MONTANHER, O. C.; MINAKI, C. Condicionantes geográficos da temperatura do ar no estado do paraná. **Revista Ra' e Ga Espaço Geográfico em Análise**, v. 45, p. 250-267, 2018. <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/55070/37565>.

MONTEIRO, E.; BORGES, H. Zoneamento agrícola de risco climático – ZARC: capacitação, metodologia e plataformas do Zarc no planejamento e gestão de riscos climáticos da produção agrícola. Brasília, DF: MAPA, 2020. Disponível em: <<https://tinyurl.com/gravacaozarc>>. Acesso: 18 nov. 2020.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, Jr. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NASA. National Aeronautics and Space Administration (NASA). **NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second**, 2013. Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmg1v003/>>. Acesso em: 19 jul. 2020.

NASA. National Aeronautics and Space Administration (NASA). **National Aeronautics and Space Administration. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Collection User Guide**, 2015. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/measures/docs/NASA_SRTM_V3.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2020.

NASA. National Aeronautics and Space Administration (NASA). **NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001**, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001>. Acesso em: 20 jul. 2020.

NASA. National Aeronautics and Space Administration (NASA). **The Global Precipitation Measurement Mission (GPM)**, 2020b. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM>>. Acesso em: 17 jul. 2020.

NASA. National Aeronautics and Space Administration (NASA). **GPM Core Observatory**, 2020c. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/core-observatory>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

NASA. National Aeronautics and Space Administration (NASA). **GPM Microwave Imager (GMI)**, 2020d. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/GMI>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

NASA. National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Dual-frequency Precipitation Radar (DPR)**, 2020e. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/DPR>>. Acesso em: 22 jul. 2020.

NASA. National Aeronautics and Space Administration (NASA). **The GPM Constellation**, 2020f. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/constellation>>. Acesso em: 22 jul. 2020.

NASA. National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Precipitation Data Directory**, 2020g. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/data/directory>>. Acesso em: 23 jul. 2020.

NASA. National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Precipitation Data Directory**, 2020h. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/data/directory>>. Acesso em: 23 jul. 2020.

NOBRE, P.; MALAGUTTI, M.; URBANO, D. F.; DE ALMEIDA, R. A. F.; GIAROLLA, E. Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation. **Journal Of Climate**, v. 22, n. 21, p. 5686-5697, 2009. <http://dx.doi.org/10.1175/2009jcli2757.1>.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Porto Alegre: Guaíba Agropecuária, 2002, 478p.

PERUGINI, L.; CAPORASO, L.; MARCONI, S.; CESCATTI, A.; QUESADA, B.; DE NOBLET-DUCOUDRÉ, N.; HOUSE, J. I.; ARNETH, A. Biophysical effects on temperature and precipitation due to land cover change. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 05, p. 1-13, 2017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b3f>

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo do GT1. PBMC: Rio de Janeiro, Brasil. 2013a, 24p.

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C.S.; BELZ, J.E.; CHAPIN, E.C.; MARTIN, J.M., DAFFER, W.; HENSLEY, S. **An assessment of the SRTM topographic products technical report JPL D-31639**. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, NASA, 2005.

ROSSETTI, L. A. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e securidade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 03, p. 386-399, 2001.

SALAZAR, A.; KATZFEY, J.; THATCHER, M.; SYKTUS, J.; WONG, K.; MCALPINE, C. Deforestation changes land-atmosphere interactions across South American biomes. **Global And Planetary Change**, v. 139, p. 97-108, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.01.004>.

SANO, Edson Eyji; BETTIOL, Giovana Maranhão; MARTINS, Eder de Souza; COUTO JÚNIOR, Antônio Felipe.; VASCONCELOS, Vinícius; BOLFE, Edson Luis; VICTORIA, Daniel de Castro. Características gerais da paisagem do bioma Cerrado. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Eds.). **Dinâmica agrícola do Cerrado - Análises e Projeções**. Brasília, DF: Embrapa, pp. 21-37, 2020.

SANTANA, C. A. M.; CAMPOS, S. K.; MARRA, R.; ARAGÃO, A. A. Cerrado: pilar da agricultura brasileira. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S.K. (Eds.). **Dinâmica Agrícola do Cerrado - Análises e Projeções**. Brasília: Embrapa, 2020, p.39-58.

SANTOS, W. G.; MARTINS, J. I. F. O zoneamento agrícola de risco climático e sua contribuição à agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 03, p. 73-94, 2016.

SNYDER, P. K.; DELIRE, C.; FOLEY, J. A. Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. **Climate Dynamics**, v. 23, n. 3-4, p. 279-302, 2004. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-004-0430-0>.

SOBRINHO, T. A.; RODRIGUES, D. B. B.; OLIVEIRA, P. T. S.; REBUCCI, L. C. S.; PERTUSSATTI, C. A. Estimativa da evapotranspiração de referência através de redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 26, n. 02, p. 197-203, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000200004>.

SOUZA, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; FERREIRA NETO, L. C. F.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12172735>.

SPERA, A. S.; GALFORD, G. L.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; MUSTARD, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, n. 10, p. 3405-3413, 2016. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13298>.

TADONO T.; ISHIDA, H.; ODA, F.; NAITO, S.; MINAKAWA, K.; IWAMOTO, H. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. **Isprs Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 04, p. 71-76, 2014. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsannals-ii-4-71-2014>.

TAKAKU, J.; TADONO, T.; TSUTSUI, K. Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM. **The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences**, [S.L.], v. 04, p. 243-248, 2014. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-4-243-2014>.

CAPÍTULO II - CONFORMITY OF THE NASADEM_HGT AND ALOS AW3D30 DEM WITH THE ALTITUDE FROM THE BRAZILIAN GEODETIC REFERENCE STATIONS: A CASE STUDY FROM BRAZILIAN CERRADO⁷

Academic Editors: Yuichi S. Hayakawa, Hitoshi Saito and Kotaro Iizuka

Sensors **2021**, *21*(9), 2935; <https://doi.org/10.3390/s21092935>

Received: 23 January 2021 / Revised: 30 March 2021 / Accepted: 30 March 2021 / Published: 22 April 2021

(This article belongs to the Special Issue Multi-Sensor Techniques for Topographic Mapping)

Abstract: The Brazilian Cerrado (tropical savanna) is the second largest biome in South America and the main region in the country for agricultural production. Altitude is a crucial information for decision-makers and planners since it is directly related to temperature that conditions, for example, the climatic risk of rainfed crop plantations. This study analyzes the conformity of two freely available digital elevation models (DEMs), the NASADEM Merged Digital Elevation Model Global 1 arc second (NASADEM_HGT) version 1 and the Advanced Land Observing Satellite Global Digital Surface Model ALOS 3D 30 m (AW3D30) version 3.1, with the altitudes provided by 1695 reference stations of the Brazilian Geodetic System. Both models were evaluated based on the parameters recommended in the Brazilian Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD), which defines error tolerances according to different 8 scales (from 1:1000 to 1:250,000) and classes A (most strict tolerance, for example, 0.17 m for 1:1000 scale), B, C, and D (least strict tolerance, for example, 50 m for 1:250,000 scale). Considering the class A, the NASADEM_HGT meets 1:250,000 and lower scales, while AW3D30 meets 1:100,000 and lower scales; for class B, NASADEM_HGT meets 1:100,000 scale and AW3D30 meets 1:50,000. AW3D30 presented lower values of root mean square error, standard deviation, and bias, indicating that it presents higher accuracy in relation to the NASADEM_HGT. Within eight Cerrado's municipalities with the highest grain production, the differences between average altitudes, measured by the Cohen's effect size, were statistically insignificant. The results obtained by the PEC-PCD for the Cerrado biome indicate that both models can be employed in different DEM-dependent applications over this biome.

Keywords: Digital Elevation Model; cartographic accuracy standard; Brazilian geodetic system; PEC-PCD.

⁷Este capítulo é uma nota técnica elaborada pelos(as) autores(as) BETTIOL, G. M.; FERREIRA, M. E.; MOTTA, L. P.; CREMON, É. H.; SANO, E. E. Conformity of the NASADEM_HGT and ALOS AW3D30 DEM with the Altitude from the Brazilian Geodetic Reference Stations: a case study from Brazilian Cerrado. *Sensors*, [S.L.], v. 21, n. 9, p. 01-25, 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/s21092935>.

1. Introduction

Digital elevation models (DEMs) have been applied in different studies, including water management, geomorphology and landscape analysis, volcanic activity monitoring, and sea level change detection [1]. Grohmann [2] also pointed out other applications such as development of geopotential global models, evaluation of glacier volume change, climatic modeling, vegetation mapping, and development of navigation systems for commercial aviation. Most of the environmental and geological studies need accurate elevation data with global coverage [1]. The high demand for DEMs accelerated the launch of satellites that collect stereo pair data in the optical spectral range as well as interferometric synthetic aperture radar (InSAR) data in the microwave spectral range.

The most popular and freely available DEMs are the 1 arc second (~ 30-meter spatial resolution) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [3] and the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM) [4,5]. More recently, the German Aerospace Center (DLR) produced a global, consistent, and high-resolution (12-meter spatial resolution) DEM with unprecedented accuracy based on the TanDEM-X mission [6]. These data are only freely available for scientific and commercial purposes. Another DEMs are the 30-meter spatial resolution NASADEM, considered as the successor of SRTM, that was produced by reprocessing the SRTM and merging it with ASTER GDEM [7], as well as the Advanced Land Observing Satellite Global Digital Surface Model ALOS 3D - 30 m (AW3D30; 30-meter spatial resolution), produced based on the ALOS Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) [8]. Recently, NASA made available the NASADEM Merged Digital Elevation Model Global 1 arc second (NASADEM_HGT) data layers that include the DEM itself, the number of scenes processed by each pixel, and an updated SRTM water body mask [9].

Several studies have been published assessing the vertical accuracy of these products. For example, the vertical accuracy of AW3D30 was assessed by [2,5,10] while NASADEM accuracy was assessed by [11,12]. Assessment of the accuracy of satellite-based DEMs is based on the comparison with the altitudes provided by high-precision global navigation satellite systems (GNSS) receivers, geodetic marks, and laser scanning data, among other products. For example, Gdulová et al. [13] assessed the vertical accuracy of TanDEM-X DEM (12-meter spatial resolution) over a European mountain environment based on the airborne LiDAR data, presenting vertical accuracy exceeding 30 cm. They found that this product complies with the 10 m mission specification benchmark: in non-forested areas, the LE90 (90% confidence of vertical accuracy) reached values below 6 m while in coniferous forests, it was equal or below 12 m. González-Morada and Viveen [14] compared ASTER GDEM, SRTM, AW3D30, and TanDEM-X DEMs against a set of 139 measurements gathered by a

dual-frequency Trimble 5800 Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver. The root mean square error (RMSE) were below 7 m for all models, especially for TanDEM-X (RMSE = 1.7 m).

In Brazil, the accuracy of DEMs is often presented in terms of Standard of Cartographic Accuracy of Digital Cartographic Products (PEC-PCD, abbreviation in Portuguese), according to the DEM's RMSE, eight scales of evaluation (1:1000, 1:2000, 1:5000, 1:10,000, 1:25,000, 1:50,000, 1:100,000, and 1:250,000), and classes A, B, C, and D (see Sections 2.1 and 2.2 for details). Viel et al. [15] evaluated the PEC-PCD of SRTM, AW3D30, and ASTER GDEM from a test site located in the Rio Grande do Sul State, Brazil. Results showed that all models fitted 1:50,000, class D. According to Barbosa et al. [16], AW3D30 DEM reached a PEC-PCD of 1:25,000, class C, in a study area located in the municipality of Formoso, Minas Gerais State, Brazil. To our best knowledge, the majority of the studies using the Brazilian PEC-PCD criterion are conducted taking into consideration relatively small areas, that is, with site-specific conditions in terms of topography and land use and land cover. Therefore, more regional evaluation (e.g., at the scale of biome) of existing DEMs are needed in order to include a wider range of landscape conditions.

In this context, this study aims to analyze the altimetric conformity and accuracy of the global NASADEM_HGT and AW3D30 version 3.1 DEM with the altitude data from the Brazilian geodetic stations located in the Cerrado biome. These two DEMs were selected because they are freely available on a global scale with spatial resolution of 1 arc second, widely used by the scientific communities (except the NASADEM_HGT, launched recently).

2. Background

2.1. Brazilian Geodetic System (SGB)

The Brazilian Geodetic System (SGB) has a set of points with geographic coordinates (latitude and longitude) and altitude, calculated according to precision geodetic models [17]. The geodetic database can be understood as the set of information of the reference stations that constitute the SGB. Such stations are mostly materialized with concrete landmarks containing metal sheets on their top with identification of the respective registration and the type of station. The coordinates, altitude, and gravity of these stations are determined through the high-precision geodetic procedures and models [18].

The Decree-Law No. 243 of February 28, 1967 [19], established the guidelines and basis for the Brazilian cartography, recommending the development of a planialtimetric system of geodetic control points to serve as a basis for the development of cartographic works and to be the reference for the determination of coordinates and altitudes in Brazil. The Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) is responsible for the maintenance and densification of the SGB network [19]. The first

geodetic basis was installed in 1944, near the city of Goiânia, Goiás State. In 1991, IBGE acquired Global Positioning System (GPS) receivers and began to use this technology to increase the SGB data set, which consists of the following networks [20]:

- a) Planialtimetric network: set of satellite-based geodetic stations, classified as GPS or Doppler, and the polygonal stations and triangulation vertices based on conventional surveying [20];
- b) Altimetric network: set of reference levels for vertical positioning and composed of high precision geometric leveling measurements [21]. In 2018, this network was adjusted by geopotential numbers, where gravity observations in reference levels were considered with the objective of obtaining physically meaningful altitudes, resulting in normal-orthometric altitudes [22]. In this study, it was not possible to use the SGB's altimetry network as a reference, determined through the reference levels, since IBGE has not launched the quasi-geoidal model yet to which the normal orthometric altitudes of the reference levels will be referred. This quasi-geoidal model is necessary for the conversion of the orthometric altitudes of the DEMs to the reference system of the IBGE's planialtimetric stations used in the study; and
- c) Gravimetric network: a set of geodetic stations, called gravimetric stations, which contain information of the gravity acceleration and stations' characteristics [23].

2.2. Brazilian Standard of Positional Accuracy

The Decree-Law No. 89,817 of 1984 [24] details the Brazilian standard of positional accuracy for analog cartographic data (PEC) and, with adaptations to PEC-PCD (for digital cartographic products), constituted the Standard of Cartographic Accuracy (PEC) and Standard Error (EP) tolerances defined according to the eight scales of evaluation (1:1000, 1:2000, 1:5000, 1:10,000, 1:25,000, 1:50,000, 1:100,000, and 1:250,000) and the corresponding classes A (best accuracy), B, C, and D (worst accuracy).

In 2010, the Brazilian Army Geographic Service (DSG) published the document titled Specifications of the Vector Geospatial Data Acquisition Techniques (ET-ADGV) [25]. In 2016, Technical Specification for Quality Control of Geospatial Data (ET-CQDG) [26] was published to provide a standardized way to evaluate the quality of the geospatial datasets that are part of the Brazilian National Cartographic System. Both, the ET-ADGV and the ET-CQDG technical specifications, are complementary to the Decree-Law No. 89,817, which has regulatory power. In other words, a spatial data, to be classified in a certain scale and class, need to consider the following conditions [24,27]:

- a) Ninety percent of the samples points in a cartographic product shall present values of positional discrepancies equal to or less than the PEC tolerance value ($1.6449 \cdot EP$) of the scale and class tested, when compared with corresponding ground truth data; and
- b) The RMSE of the positional discrepancies must be equal to or less than the EP tolerance defined for each scale and class.

Table 1 shows the error tolerances in meters of PEC-PCD, discriminated by class A, B, C, and D. It also shows the EP tolerances, which is related to the RMSE, of the positional discrepancies of the analyzed points in relation to the reference points [25].

Table 1. Standard of altimetric cartographic accuracy of DEMs for the production of digital cartographic products defined for eight different scales and for classes A (most restricted), B, C, and D (least restricted).

Scale	Class							
	A		B		C		D	
	PEC (m)	EP (m)						
1:1000	0.27	0.17	0.50	0.33	0.60	0.40	0.75	0.50
1:2000	0.27	0.17	0.50	0.33	0.60	0.40	0.75	0.50
1:5000	0.54	0.34	1.00	0.66	1.20	0.80	1.50	1.00
1:10,000	1.35	0.84	2.50	1.67	3.00	2.00	3.75	2.50
1:25,000	2.70	1.67	5.00	3.33	6.00	4.00	7.50	5.00
1:50,000	5.50	3.33	10.00	6.66	12.00	8.00	15.00	10.00
1:100,000	13.70	8.33	25.00	16.66	30.00	20.00	37.50	25.00
1:250,000	27.00	16.67	50.00	33.33	60.00	40.00	75.00	50.00

Source: [25]

For example, a specific DEM will be classified as class A in the 1:50,000 scale if it presents $RMSE \leq EP$ of 3.33 m and if 90% of altimetric discrepancies (errors) are ≤ 5.50 m (permissible error, represented in Table 1 by the PEC, in meters). Altimetric discrepancies (error – ε) is defined in this technical specification as the difference between DEMs' altitudes (Z_m) and the reference ones (Z_r) (Eq. 1).

$$\varepsilon = Z_m - Z_r \quad (1)$$

Carvalho and Silva [28] stated that both PEC and PEC-PCD do not clearly present the methodological procedures to be applied in the quality assessment process so that many complementary methods of analysis have been used to verify positional accuracies. Furthermore, the Decree-Law No. 89,817 of June 20, 1984 defines that the PEC is a statistical dispersion indicator, relative to 90% of probability, corresponding to 1.6449 times the EP, that is, $PEC = 1.6449 \cdot EP$, considering this value relative to the 90% probability within the normal distribution curve. Thus, both PEC and PEC-PCD are valid only if the variable has a normal distribution.

3. Materials and Methods

3.1. Study Area

The Cerrado biome (Figure 1) occupies an area of 198.5 million hectares, i.e., about 23% of the Brazilian territory and covers, partially or totally, 1434 municipalities in 12 states and the Federal District [29]. This biome corresponds to the world's richest tropical savanna in terms of biodiversity, is considered as one of the world's hotspots for biodiversity conservation [30] and encompasses eight headwaters of the twelve most important hydrographic basins in Brazil [31]. Besides, the Cerrado plays an important role in the Brazilian agriculture, with the annual crops cultivated in this biome representing 40% of the national production [31]. In the last four decades, the annual crops that expanded mostly in the Cerrado were soybean, corn, cotton, sugarcane, sorghum, and rice. Other crops such as coffee, tomatoes, beans, garlic, peanuts, and potatoes also have expanded, reinforcing the biome's prominent agricultural position in the country [32].

Agricultural modernization, intensified after the 1970's, marked the beginning of the fast process of Cerrado's native vegetation conversion into areas for production of agricultural commodities, which caused approximately 50% loss in its native vegetation [33]. Thus, it is necessary to understand its dynamics to protect its natural resources and to guarantee environmentally sustainable exploitation of this ecosystem.

3.2. Planialtimetric Reference Data

Data from the polygonal stations and triangulation vertices, which compose the planialtimetric geodetic network of the SGB, were used as reference. We found 387 polygonal stations and 1308 triangulation vertices with altitude data, resulting in 1695 stations with orthometric altitude data referenced to the Imbituba vertical datum and SIRGAS 2000 horizontal datum, over the Cerrado biome (Figure 5).

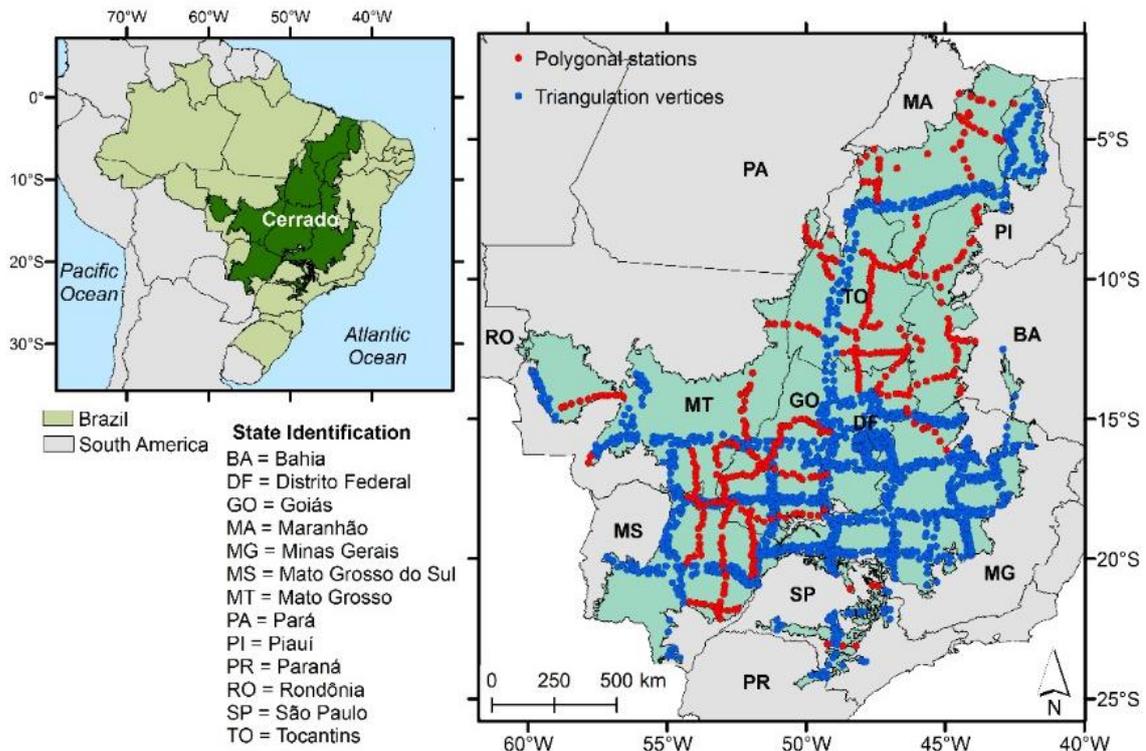


Figure 5. Location of the study area (Cerrado biome) in Brazil and the 1695 reference stations (IBGE's polygonal stations and triangulation vertices).

3.3. Digital Elevation Models

3.3.1. NASADEM_HGT

NASADEM expanded the legacy of the SRTM by improving the accuracy of the DEM and data coverage on a global scale. SRTM mission mapped the topography of continental areas of the Earth between 60° N latitude and 56° S latitude using InSAR [2,34,35]. Three versions of the SRTM were launched; the last one is the SRTM Global 1 arc second, version 3.0 (SRTM Plus or SRTM NASA Version 3), which is void-filled using elevation data from ASTER GDEM 2, USGS National Elevation Dataset, and USGS Global Multi-resolution Terrain Elevation Data (GMTED) 2010 [36,37]. SRTM Plus was produced under the NASA's Making Earth System Data Records for Use in Research Environments (MEaSUREs) Program and, in 2014, it was publicly announced with a resolution of 1 arc second (~ 30 meters in the equator line) [37]. The performance requirements for the worldwide SRTM data products need to reach vertical absolute height errors below 16 m for 90% of the data (LE90) (RMSE of 9.73 m) [38,39,40,41] and circular absolute geolocation errors below 20 m for 90% of the data (CE90) [40]. The LE90 for South America was reported by [41] as 6.2 m, which corresponds to a RMSE of 3.8 m.

Improvements have been made by reprocessing original SRTM raw signals data using enhanced algorithms and by incorporating data derived primarily from the Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite (ICESat) Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) and ASTER GDEMs. The

LiDAR GLAS instrument of the ICESat mission and ASTER DEMs were not available during the original SRTM processing [42,43]. The Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) is responsible for the archiving and distribution of NASA's MEaSUREs program. Five NASADEM products are made available to the academic and scientific community, differing by type (Table 2).

Table 2. NASADEM products and their groupings.

Product	Description	Data Type	Units	Fill Value	No Data Value	Valid Range	Scale Factor
NASADEM_HGT: NASADEM Merged DEM Product Grouping							
hgt	Void-filled DEM merge	2-byte signed integer	meters (relative to the EGM96 geoid)	N/A	N/A	-32767 to 32767	N/A
num	NUM file associated with hgt file	byte	Class: 1-255 (see "Reference Data for Number of Scenes Layer")	N/A	N/A	0 to 255	N/A
swb	Updated SRTM water body data	byte	Class: 0 for land; 255 for water	N/A	N/A	255	N/A
NASADEM_SC: NASADEM Slope and Curvature Product Grouping							
slope	Slope derived from hgt	2-byte unsigned integer	hundreds of degrees (0 = water)	0	NaN	Non-negative	See Units
aspect	Slope aspect angle derived from hgt	2-byte unsigned integer	Hundreds of degrees clockwise from North (0 = water)	0	NaN	Non-negative	See Units
plan (planc)	Plan curvature derived from hgt	4-byte real	Inverse meters (0 = water)	0	NaN	-	N/A
profile (profc)	Profile curvature derived from hgt	4-byte real	Inverse meters (0 = water)	0	NaN	-	N/A
swbd (swb)	Updated SRTM water body data	byte	Class: 0 for land; 255 for water	N/A	N/A	255	N/A
NASADEM_SSP: NASADEM SRTM Subswath Product Grouping							
tot.cor	Radar total correlation	2-byte unsigned integer	correlation value * 10,000 (0 = void)	0	N/A	Non-negative	See Units
vol.cor	Radar volumetric correlation	2-byte unsigned integer	correlation value * 10,000 (0 = void)	0	N/A	Non-negative	See Units

img	Radar individual images	Byte	$DN + 128$ (0 = void) (i.e., $fileValue = 10 * \log_{10}(actualValue) + 128$)	0	N/A	-	See Units
Inc0	Radar incidence angle (relative to ellipsoid)	2-byte unsigned integer	hundreds of degrees (0 = void)	0	N/A	Non-negative	See Units
inc	Radar incidence angle (local)	2-byte unsigned integer	hundreds of degrees (0 = void)	0	N/A	Non-negative	See Units
NASADEM_SIM: NASADEM SRTM Image Mosaic Product Grouping							
Img_comb (img)	Radar combined images	byte	$DN + 128$ (0 = void) (i.e., $fileValue = 10 * \log_{10}(actualValue) + 128$)	0	N/A	-	See Units
img_comb_num (img.num)	NUM file associated with combined images	byte	Number of pixels averaged for each img_comb output pixel	0	N/A	0 to 10	N/A
NASADEM_SHHP: NASADEM SRTM-only Height and Height Precision Product Grouping							
Hgt_srtmOnly (hgts)	SRTM-only floating-point DEM	4-byte real	meters (relative to the WGS84 ellipsoid)	-32768	N/A	-	N/A
err	Height error (precision)	2-byte unsigned integer	millimeters (32769 = void)	32769	N/A	Non-negative	N/A

Source: [42].

N/A and NaN = No value.

In this study, we used the global NASADEM Merged DEM version 1 product (NASADEM_HGT), distributed in 1° by 1° tiles with 1 arc second spatial resolution (~ 30 m in Equator line), and referenced to the EGM96 geoid model. The layers included the DEM itself, the number of scenes (NUM), and the SRTM-based water body mask (SWB). The NUM layer indicates the number of DEM tiles that were processed for each pixel and the source of the data [43]. As the NASADEM_HGT model is a new release and made available to the public recently (April 2020), there is few information in the literature specifically for this DEM regarding its validation, for vertical and horizontal absolute and relative errors.

3.3.2. AW3D30

The DEM called AW3D30 was launched by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) with a spatial resolution of approximately 30 meters in the equator line, resulting from the resampling

of the ALOS World 3D DEM (AW3D) data, with 0.15 arc second (~ 5-meter spatial resolution). In five years of operation, ALOS produced approximately 6.5 million scenes covering the entire globe, with horizontal and vertical accuracy – 5 m (RMSE) - being reported only for the 5 m dataset [2,44] (Table 3). This DEM has orthometric altitudes referenced to the EGM96 geoid model [45]. In this study, we used the version 3.1, launched in April 2020. It has different pixel spacing for each latitude zone at high latitudes, improved coastline and a new additional data for filling voids [46].

Table 3. Characteristics and global accuracy (CE90, LE90, and RMSE) of the datasets used in this study.

Dataset	Imaging System	Wavelength	Pixel Spacing	Horizontal Accuracy	Vertical Accuracy
NASADEM HGT	SAR C-band	5.66 cm	30 m	< 20 m (CE90)	< 16 m (LE90)
ALOS AW3D	PRISM	0.52–0.77 μm	5 m	5 m (RMSE)	5 m (RMSE)

Source: [2].

3.4. Validation

While the NASADEM_HGT product has 3601 x 3601 pixels per 1° x 1° grid with overlapping in the borders, the AW3D30 has 3600 x 3600 pixels per 1° x 1° grid without overlapping in the borders, resulting in a displacement of 1/2 pixel. Thus, it was necessary to perform displacement to make the pixels coincident, which was done through a Python language script using GDAL/OGR library [47].

In order to evaluate the DEMs, it was necessary to make them comparable to the IBGE reference stations. Thus, the orthometric altitudes referenced to the EGM96 geoid model was converted to the orthometric altitudes referenced to the Imbituba vertical datum and SIRGAS 2000 horizontal datum. The following steps were performed, based on the methodologies employed by [2,48,49].

- a) Computation of the geoidal undulation of the EGM96 model from a 15' grid file provided by the National Geospatial Intelligence Agency (NGA). A 30-meter spatial resolution grid was generated using the Spline interpolation method available in the GRASS software [50];
- b) Calculation of the ellipsoidal height (h), obtained by the sum of the geoid undulation (N) and the orthometric height H ($h = H + N$) [51]. H (datum: EGM96) was converted into h (datum: WGS84) based on the addition of the EGM96 geoid undulation values obtained in the previous step;
- c) Computation of the geoidal undulation for the determination of orthometric altitude (Imbituba vertical datum) using input grid of the MAPGEO2015 software (5' interval). This file was also interpolated to 30 m using the Spline interpolation method in the GRASS software;

- d) Conversion of the ellipsoidal altitude (WGS84) into the orthometric altitude referenced to the Imbituba vertical datum based on the subtraction of the geoidal undulation values obtained in the previous step; and
- e) Conversion of the WGS84 horizontal datum to SIRGAS 2000 horizontal datum.

The same script was also used to obtain the altitudes of the resulting raster GRID over the reference stations. These values were described in terms of mean, standard deviation, quartiles, and coefficient of variation, as well as with the support of boxplots, scatterplots, and histograms. We detected the presence of four outliers in the DEM models and in the reference altitudes (Figure 6), indicating equivalence among these outliers and corroborating the impression of high conformity among these data sets, i.e., the distribution of these three data sets is practically the same.

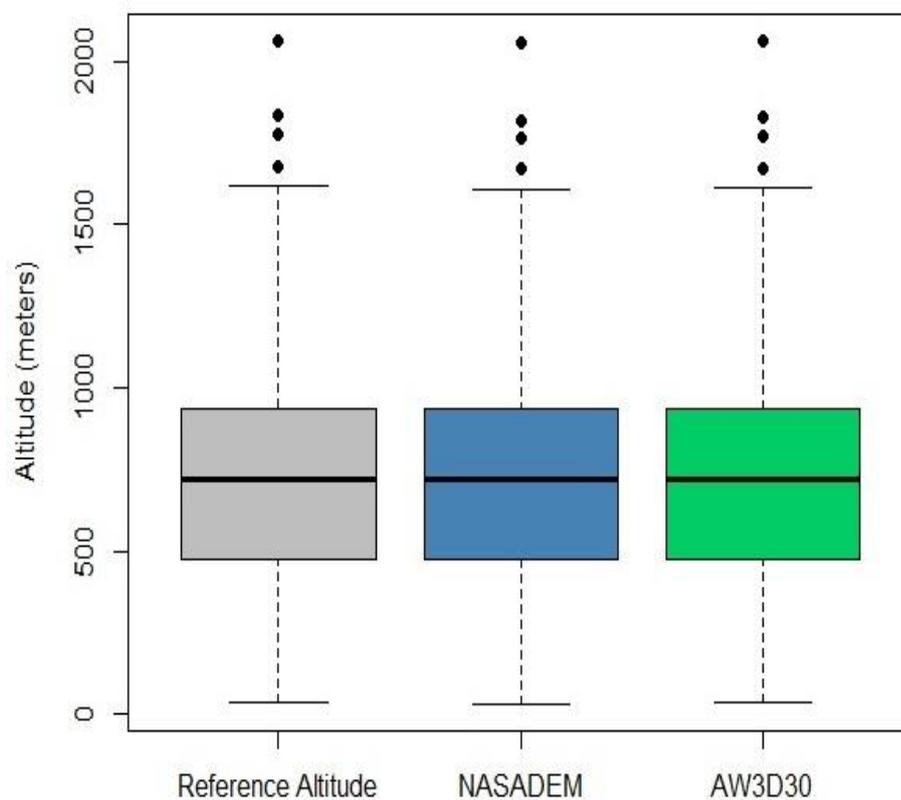


Figure 6. Boxplots of reference altitude, NASADEM_HGT, and AW3D30 data sets from the Cerrado biome.

The normality of the dataset was verified using the Shapiro-Wilk and Anderson-Darling tests [52,53]. The data did not follow normal probability distribution, with p-values < 0.05 (Table 4). Pearson's correlation coefficients (r) were also calculated to check the level of correlation among the data obtained by the two DEMs and the reference stations. Positional errors were assessed according to the parameters recommended in the PEC-PCD regulated by the Decree-Law No. 89,817 of June 20,

1984, as well as in the technical specification for the acquisition of vector geospatial data (ET-ADGV) and in the technical specification for quality control of geospatial datasets products (ET-CQDG), complementary to the Decree-Law (Table 1).

Table 4. Normality tests of reference altitudes and those obtained by the NASADEM_HGT and AW3D30 models.

Parameter	Test of Normality	
	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling
Reference altitude	< 0.001	< 0.001
NASADEM_HGT	< 0.001	< 0.001
AW3D30	< 0.001	< 0.001

The GeoPEC software [54] was used to classify DEMs according to accuracy measurements such as mean square error (MSE), proposed by Gauss and known as the (Eq. 2).

$$MSE = E \left[(\hat{\theta} - \theta)^2 \right] = \sigma_{\hat{\theta}}^2 + b^2 \cong \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N} + b^2 \quad (2)$$

where σ^2 represents the dispersion of the measurements (variance or uncertainty) and b represents the tendency, error of estimator or bias. In other words, σ^2 and b represent random and systematic errors, respectively. For large samples, the MSE corresponds to the quadratic mean of the errors (ε) [55,56].

Although this is a proposed measure of accuracy, a better way to evaluate it is in terms of the independent parameters of tendency and precision (σ), which allows discrimination between systematic and random errors. Since there is no tendency, accuracy and σ are confused. Mathematically, the tendency is the mean of the altimetric discrepancies – difference between the observations (measured/estimated) and the known (or expected reference) values [56] – and the σ is the standard deviation of errors. In this study, b and σ were calculated by Eq. (3) and Eq. (4), respectively. The accuracy was calculated by the RMSE (Eq. 5).

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i}{N} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\varepsilon_i - b)^2}{N}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N}} \quad (5)$$

In addition to these statistical measurements, Pearson's correlation coefficient (r) was employed to verify the correlation between DEMs' altitudes and reference data and the Willmott index of agreement (d) [57] was obtained.

3.5. Comparison of DEMs in Eight Municipalities with the Highest Grain Production in the Cerrado

Eight municipalities with the highest agricultural production in the Cerrado biome [58] were selected to compare the two DEMs original values with each other (Figure 7; Table 5). The spatial distribution of these municipalities in the biome and their altitudes were also taken into account to guarantee spatial representativeness of them in the biome. The temporary and perennial crops mapped in 2018 by the MapBiomas Project [59] were used as a mask. The altitudes were analyzed pixel by pixel within these areas (Figure 8). The MapBiomas Project generates historical series of annual land use and land cover maps from Brazil based on cloud processing and automated classifiers in the Google Earth Engine platform.

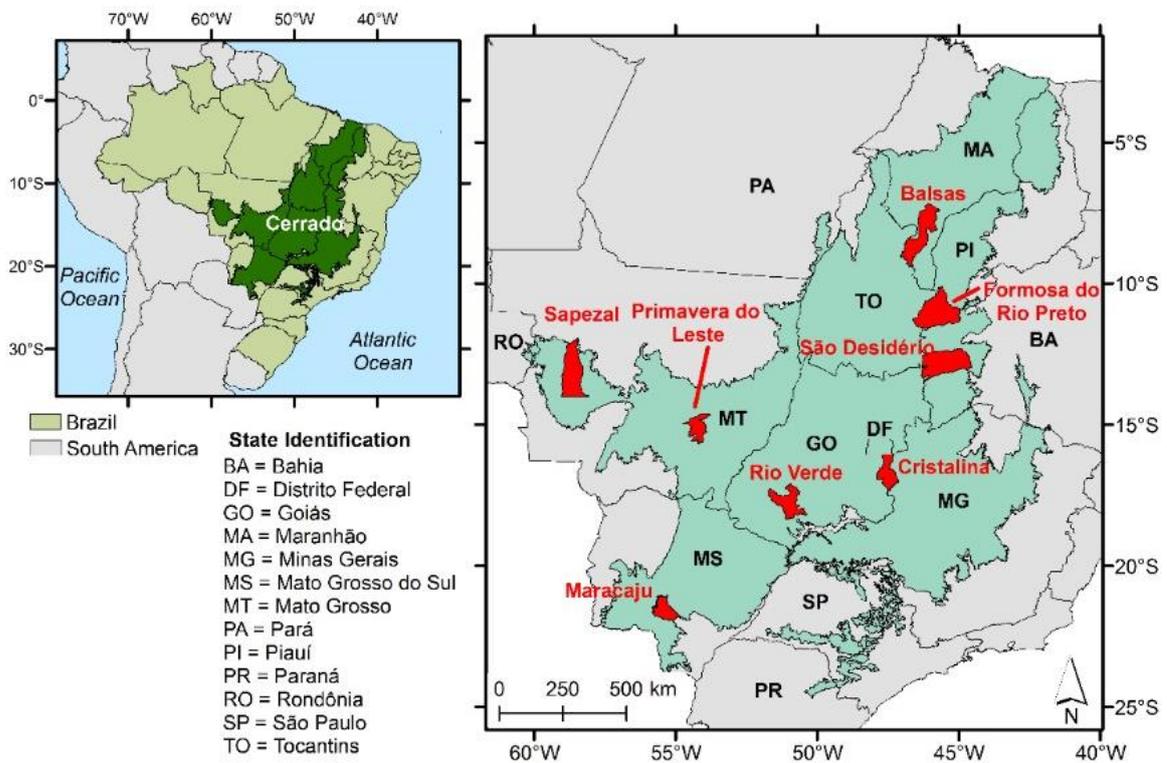
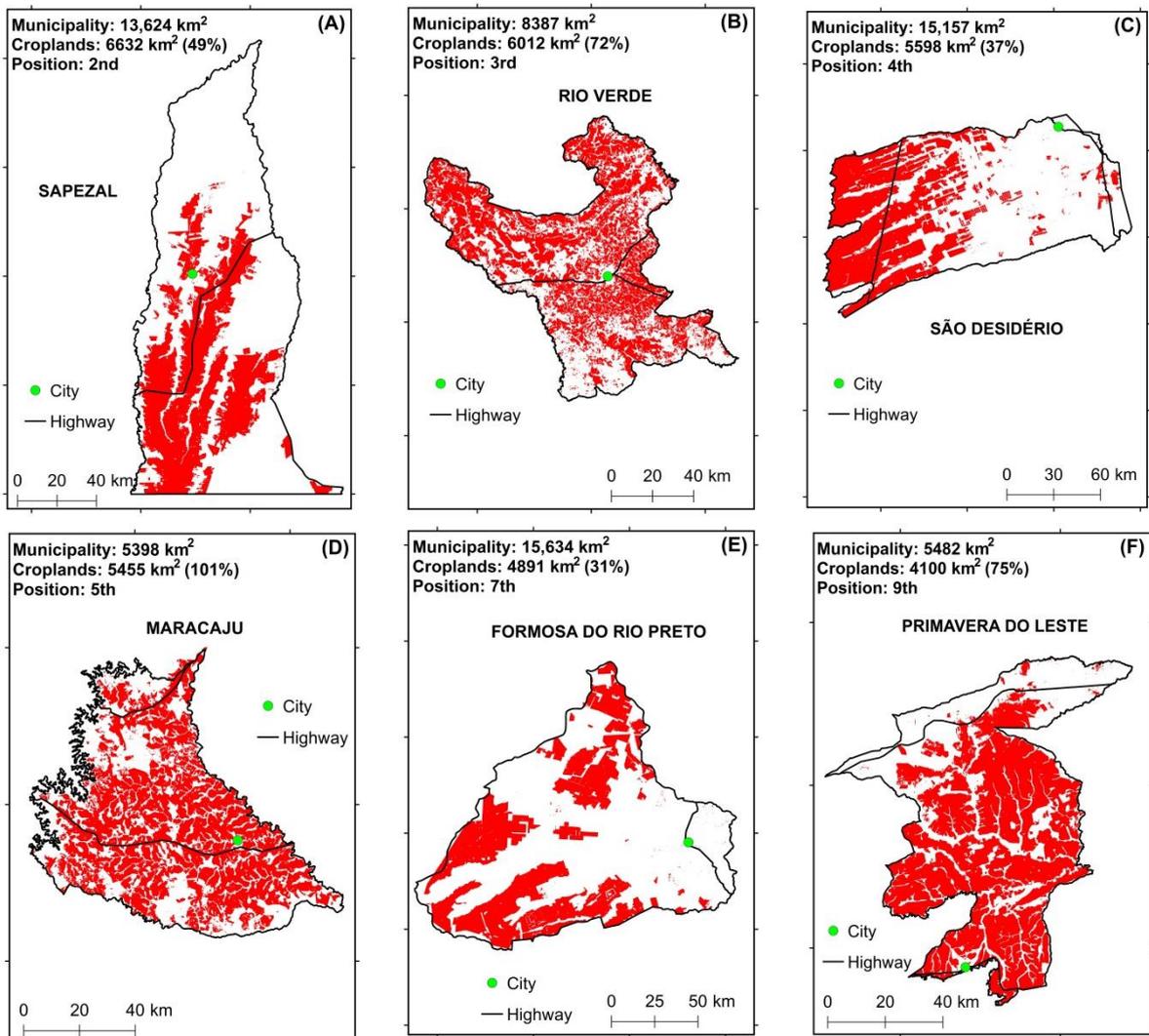


Figure 7. Eight selected municipalities in the Cerrado biome with the highest grain production.

Table 5. Agricultural position and harvest area of soybean, corn, cotton, and sugarcane of chosen municipalities.

Municipality (State)	Position in the Cerrado in terms of Grain Production	Harvested Area (ha)
Sapezal (MT)	2nd	663,198
Rio Verde (GO)	3rd	601,210
São Desidério (BA)	4th	559,763
Maracaju (MS)	5th	545,458
Formosa do Rio Preto (BA)	7th	489,137
Primavera do Leste (MT)	9th	410,000
Cristalina (GO)	13th	320,000
Balsas (MA)	14th	298,495

Source: [58].



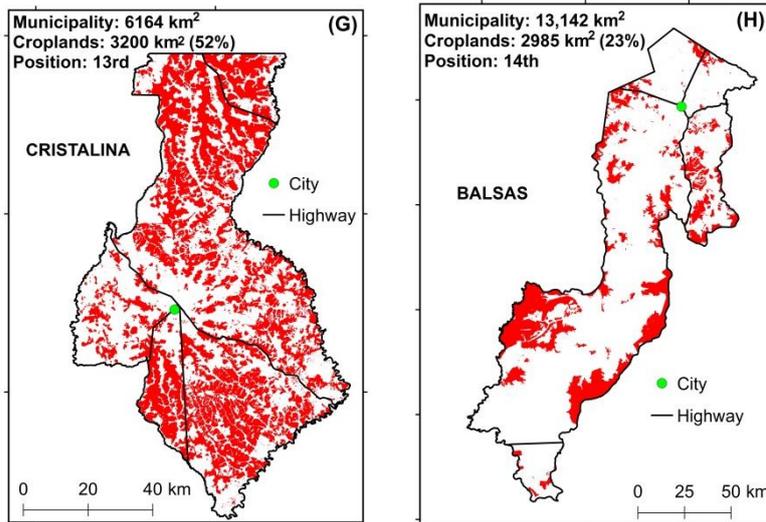


Figure 8. Areas with annual and perennial crops in 2018 (in red) in the municipalities of Sapezal, Mato Grosso State (A), Rio Verde, Goiás State (B), São Desidério, Bahia State (C), Maracaju, Mato Grosso do Sul State (D), Formosa do Rio Preto, Bahia State (E), Primavera do Leste, Mato Grosso State (F), Cristalina, Goiás State (G), and Balsas, Maranhão State (H). Source: [58]. In the Maracaju municipality, the area of croplands is larger than the area of municipality probably because of the double cropping system.

Initially, a script using Python language and GDAL/OGR library was written in order to obtain the pixel values of the analyzed models [47]. Descriptive measurements of the models were obtained for agricultural areas of each municipality in terms of boxplots, histograms, and scatterplots. In addition, the corresponding r values were also calculated to quantify the level of correlation between the models. After the descriptive analysis of the data, the altitude measurements obtained through the models were compared with each other. This comparison was made by calculating the differences between the average altitudes through Cohen's effect size (dc) [60].

4. Results

4.1. Descriptive Analysis of DEMs Against the Reference Stations

Descriptive statistical measures of the reference altitudes and DEMs are shown in Table 6. The altitudes obtained for the NASADEM_HGT and AW3D30 were quite close with the measures provided by the SGB. In Figure 9, it is also possible to note a strong linear relationship between the reference altitudes and the estimations from NASADEM_HGT and AW3D30, which is emphasized by the r values close to 1: 0.99960 and 0.99979 for NASADEM_HGT and AW3D30, respectively. The Willmott index of agreement (d) was also very close to 1: 0.99978 for the NASADEM; and 0.99989 for the ALOS AW3D30.

Table 6. Quantitative measurements of reference altitude (m) and those obtained by the NASADEM_HGT and AW3D30 models. Total number of samples: 1695. Min = minimum altitude; Max = maximum altitude; SD = standard deviation. Q1 = first quartile; Q2 = second quartile; Q3 = third quartile; and CV (%) = coefficient of variation in percentage.

Variable	Min	Max	Mean	SD	Q1	Q2	Q3	CV (%)
Reference altitude	35.37	2,061.76	716.48	297.78	476.66	721.81	936.28	41.56
NASADEM_HGT	31.77	2,056.24	713.58	297.44	471.36	718.32	933.38	41.68
AW3D30	36.77	2,061.24	717.17	297.37	474.51	719.04	936.16	41.46

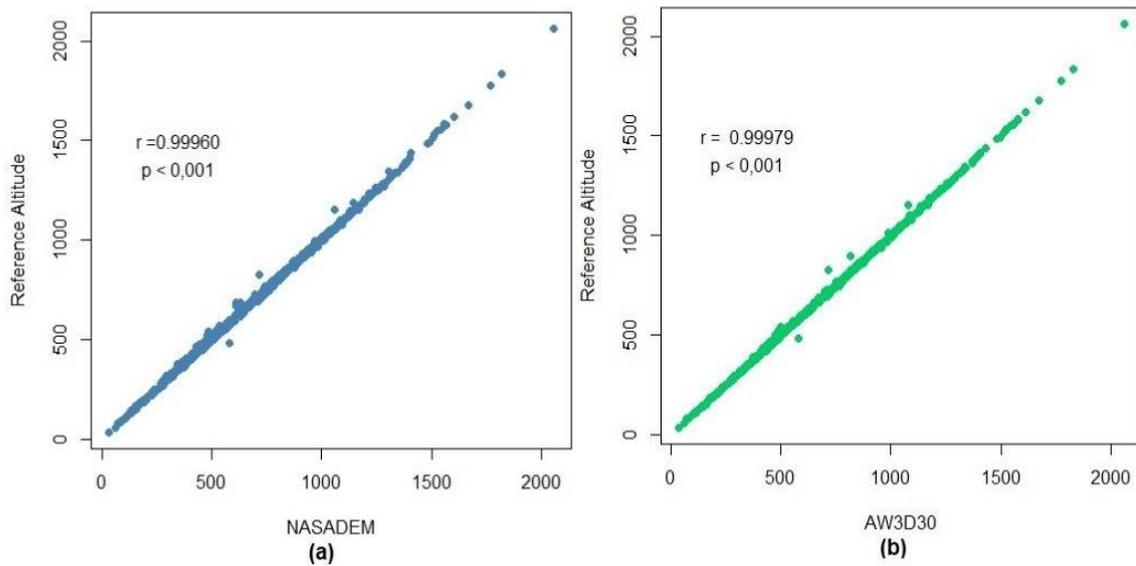


Figure 9. Relation between reference altitudes and those estimated by the NASADEM_HGT (a) and AW3D30 (b) models.

Figure 10 shows the histograms of the reference altitudes and the NASADEM_HGT and AW3D30 models. It is possible to infer that the distributions of the altitudes measured by the NASADEM_HGT and AW3D30 are practically identical to the distribution of the reference altitudes, indicating high conformity of the models.

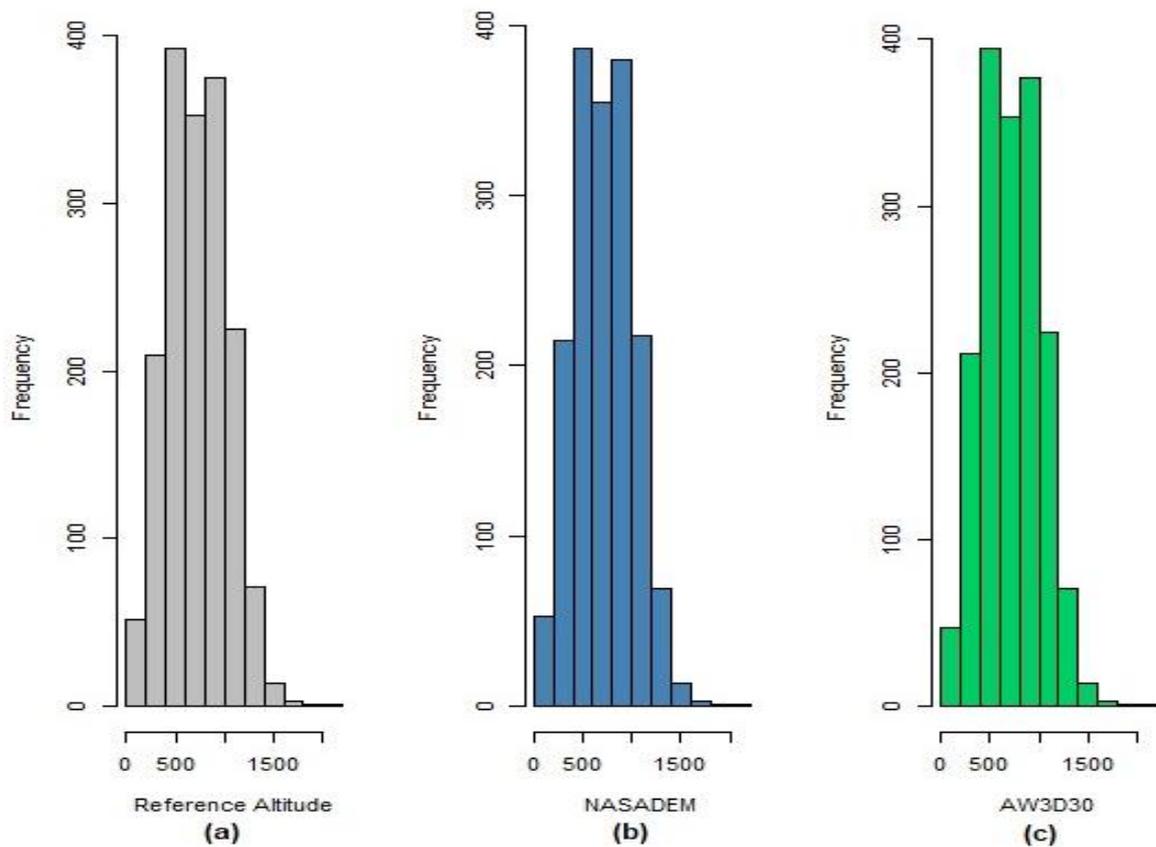


Figure 10. Histograms of altitudes from reference (a), from NASADEM_HGT (b) and AW3D30 (c) digital elevation models.

4.2. Classification of DEMs Considering PEC-PCD

The evaluation of the PEC-PCD was conducted in two steps. First, the RMSE was calculated for each DEM in order to compare them to the EP as a function of the scale. The RMSEs of the models were 8.87783 m and 6.14927 m for NASADEM_HGT and AW3D30, respectively. The EP for the 1:100,000 scale and class A is 8.33 m and for the 1:100,000 scale and class B is 16.66 m (Table 7). According to this criterion, the NASADEM_HGT meets the 1:250,000 scale and class A, and 1:100,000 scale and class B. The AW3D30 meets the 1:100,000 scale and class A, and 1:50,000 scale and class B. At least 90% of the points presented altitude errors equal or lower than the PEC values shown in this table. In this step, the two DEMs met the 1:100,000 scale and class A. However, when analyzing both criteria together, considering the class A, it was possible to conclude that the NASADEM_HGT meets 1:250,000 scales while AW3D30 meets the 1:100,000 and lower scales. Considering the class B, NASADEM_HGT meets the 1:100,000 scale while AW3D30 meets 1:50,000 and lower scales.

Table 7. Percentage of points that presented discrepancies lower than PEC (m).

Scale	Class	Standard Error EP (m)	PEC (m)	Percentage (%)	
				NASADEM_HGT	AW3D30
1:25,000	A	1.67	2.70	49	60
1:25,000	B	3.33	5.00	69	85
1:50,000	A	3.33	5.50	72	87
1:50,000	B	6.66	10.00	86	96
1:100,000	A	8.33	13.70	92	99
1:100,000	B	16.66	25.00	98	100
1:250,000	A	16.67	27.00	99	100
1:250,000	B	33.33	50.00	100	100

The positional accuracy of the two models was also verified through the GeoPEC software which analyzes whether the discrepancies are equal or lower than the PEC and if $RMSE \leq EP$, according to the assumptions of Decree-Law No. 89,817 of June 20, 1984 and the specifications of ET-CQDG. The same results and classifications described in the previous paragraphs were obtained. The normality of altitude's discrepancies was verified using the Shapiro-Wilk and Anderson-Darling tests. The data did not follow a normal distribution, according to the p-values (< 0.05) (Table 8).

Table 8. Tests of normality of the altitude discrepancies.

Variable	Test of Normality	
	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling
NASADEM_HGT errors	< 0.001	< 0.001
AW3D30 errors	< 0.001	< 0.001

Table 9 presents the results of the statistical analyzes in relation to the altitude discrepancies. Overall, AW3D30 presented better results, though with very close values regarding the minimum and maximum errors, while the maximum errors were the same in both models.

Table 9. Statistics of altitude discrepancies.

Parameters	NASADEM_HGT	AW3D30
Minimum error	-109.72	-108.72
Maximum error	96.80	97.80
Mean error or bias (tendency)	-2.90	0.69
Standard deviation (precision)	8.39	6.11

Root mean square error (RMSE) (accuracy)

8.88

6.15

The mean error or bias, representing the tendency, was -2.90 m for NASADEM_HGT and 0.69 m for AW3D30, indicating that the AW3D30 data presents smaller systematic error than the NASADEM_HGT data, and the altitude values represented in the NASADEM_HGT model are underestimated in relation to the reference and overestimated in relation to the AW3D30. The result for AW3D30 is close to the ideal (zero), and for NASADEM_HGT is low considering the spatial resolution and the appropriate scales for the models. The standard deviation (precision) was lower for the AW3D30, indicating that the discrepancies for this model are closer to the average of the discrepancies. The precision of this model (6.11 m) is 1.37 times greater than the NASADEM_HGT precision (8.39 m), which means that altitude errors are less scattered in the AW3D30 than in the NASADEM_HGT. The histograms referring to the errors for the altimetric component of the DEMs are presented in Figure 11.

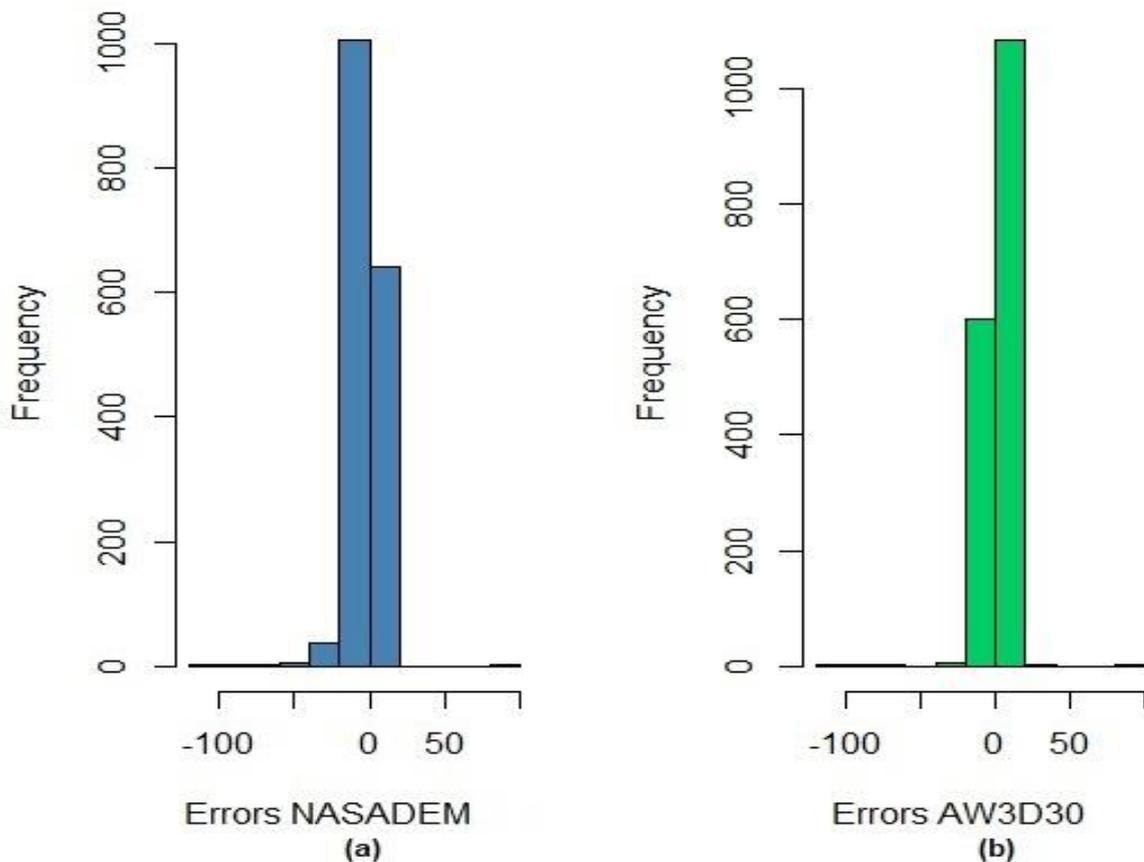


Figure 11. Histograms of altitude discrepancies for NASADEM_HGT (a) and AW3D30 (b).

The RMSE for the AW3D30 was 6.15 m and for the NASADEM_HGT was 8.88 m. In relation to the RMSE, understanding accuracy as a reflection of the tendency and precision measures and, as the tendency value in AW3D30 was very close to 0 and low in NASADEM_HGT, the accuracy value

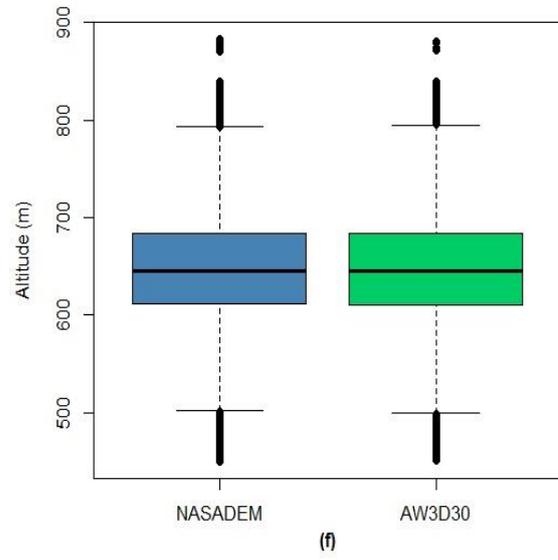
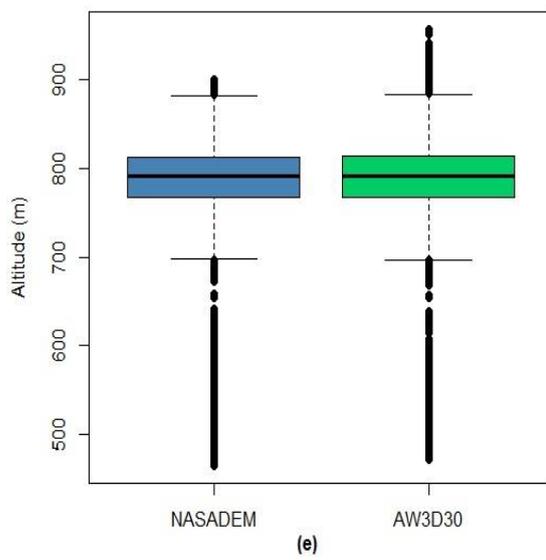
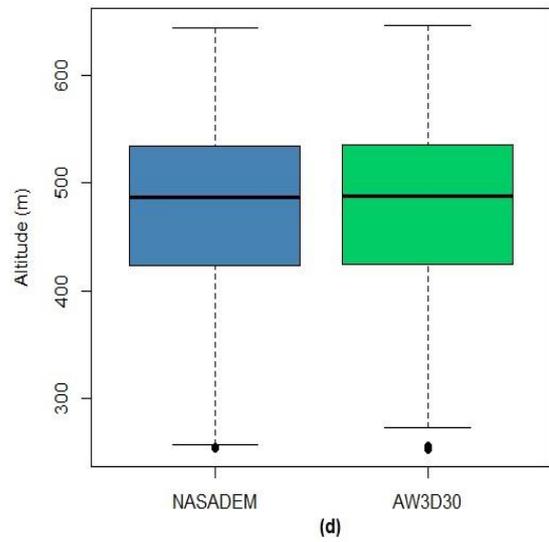
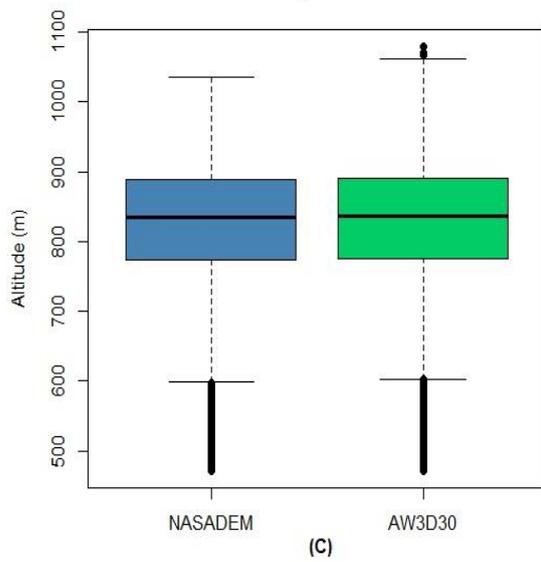
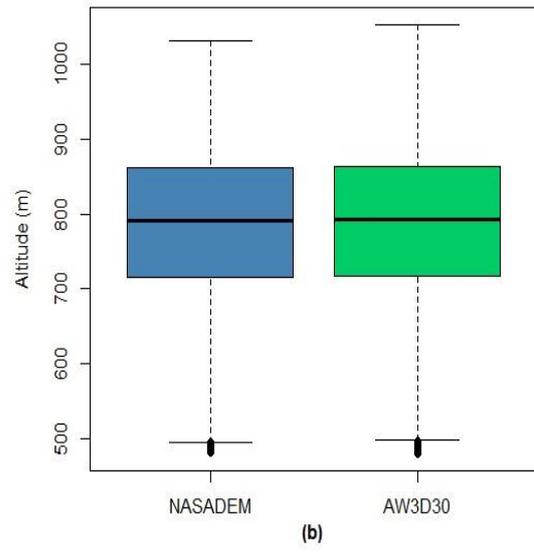
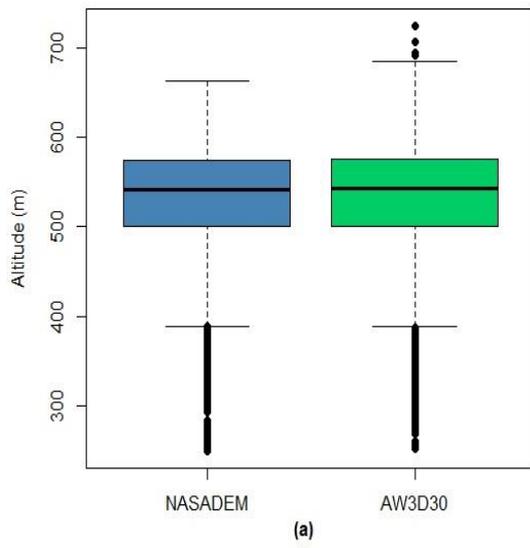
(in this study represented by the RMSE) tends to be similar to the precision values (represented by standard deviation in this study).

4.3. Descriptive Analysis of DEMs in the Municipalities with the Highest Grain Production in the Cerrado

Table 10 presents the descriptive measures for each municipality with the highest harvested area in the Cerrado biome. Considering the values of means, standard deviations, quartiles, and coefficients of variation, the values are very close between the NASADEM_HGT and AW3D30 models. So, the initial impression is that the DEMs have very similar altitudes, with homogenous data according to the coefficient of variation (CV (%)). Figure 12 shows the boxplots for agricultural areas in each municipality, with NASADEM_HGT represented in blue and AW3D30 in green. Analyzing them, it is possible to realize that the distributions of the measurements of each model are very similar, a fact that is common for each municipality analyzed.

Table 10. Quantitative measurements of altitude (m) extracted from NASADEM_HGT and AW3D30 over eight municipalities of the Cerrado with highest grain production. Min. = minimum altitude (m); Max. = maximum; SD = standard deviation; DEM = digital elevation model; Q1 = first quartile; Q2 = second quartile; Q3 = third quartile; and CV = coefficient of variation.

Municipality	DEM	Number of Pixels	Min. (m)	Max. (m)	Mean (m)	SD (m)	Q1 (m)	Q2 (m)	Q3 (m)	CV (%)
Sapezal	NASADEM	4,691,742	250	663	533.19	59.40	500	542	574	11.14
	AW3D30	4,691,742	252	724	533.60	59.86	500	543	575	11.22
Rio Verde	NASADEM	5,341,106	481	1031	786.07	103.38	715	791	862	13.15
	AW3D30	5,341,106	480	1053	788.03	103.56	717	792	864	13.14
São Desidério	NASADEM	6,222,247	472	1035	838.44	72.49	773	835	889	8.65
	AW3D30	6,222,247	472	1079	839.45	72.11	775	836	890	8.59
Maracaju	NASADEM	3,603,927	254	644	478.66	70.95	423	487	534	14.82
	AW3D30	3,603,927	253	646	479.71	71.14	424	488	535	14.83
Formosa do Rio Preto	NASADEM	5,696,443	465	901	794.13	35.74	767	791	813	4.50
	AW3D30	5,696,443	472	957	794.43	36.09	767	791	814	4.54
Primavera do Leste	NASADEM	3,511,471	450	883	649.37	53.43	611	645	684	8.23
	AW3D30	3,511,471	451	881	649.06	53.35	610	645	684	8.22
Cristalina	NASADEM	3,039,881	737	1225	930.38	69.26	880	923	970	7.44
	AW3D30	3,039,881	738	1226	931.26	68.99	882	924	971	7.41
Balsas	NASADEM	2,774,848	229	655	483.22	91.99	404	524	549	19.04
	AW3D30	2,774,848	229	658	484.29	91.71	405	524	550	18.94



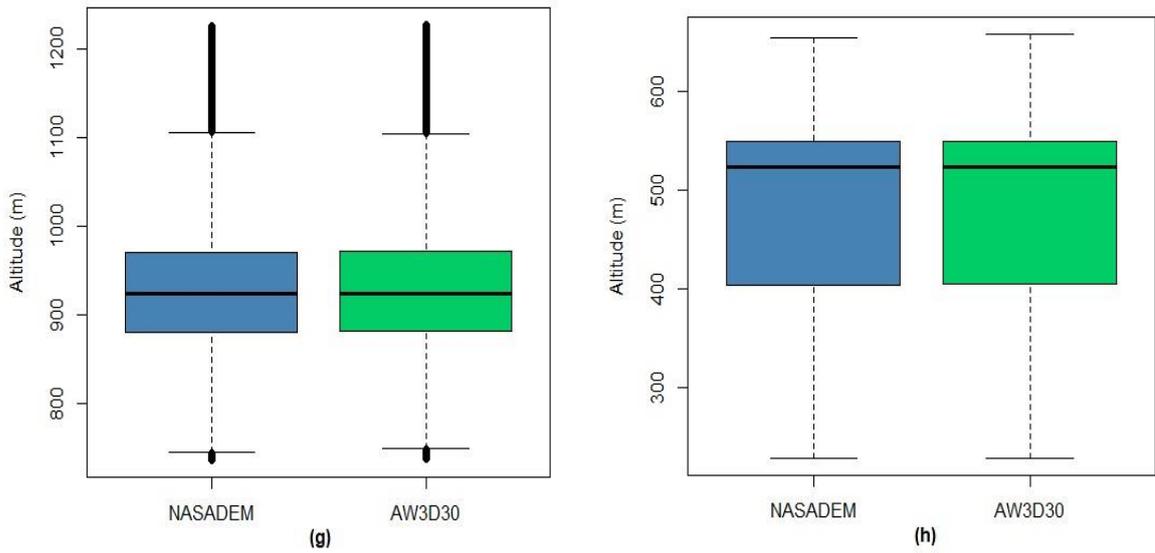
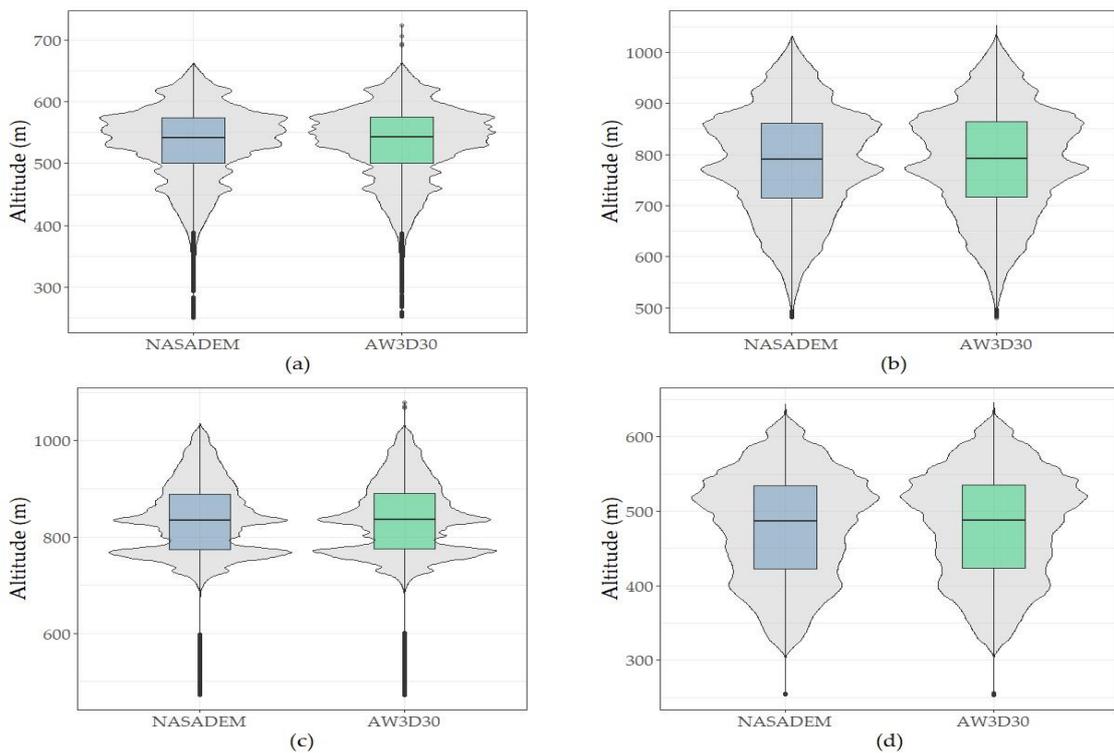


Figure 12. Boxplots of the NASADEM_HGT and AW3D30 digital elevation models for the agricultural areas of Sapezal (a), Rio Verde (b), São Desidério (c), Maracaju (d), Formosa do Rio Preto (e), Primavera do Leste (f), Cristalina (g) and Balsas (h) municipalities.

Figure 13 shows the violin plots, which combines boxplots and histograms in the same graphical output of chosen municipalities. It appears that the distributions of measurements inherent to the NASADEM_HGT and AW3D30 are very similar. Such graphs confirm the initial impression that the models tend to present values of very close altitudes. Overall shape and distribution are similar for both models, with quartiles very close to each other, where it is possible to observe the correspondence of outliers.



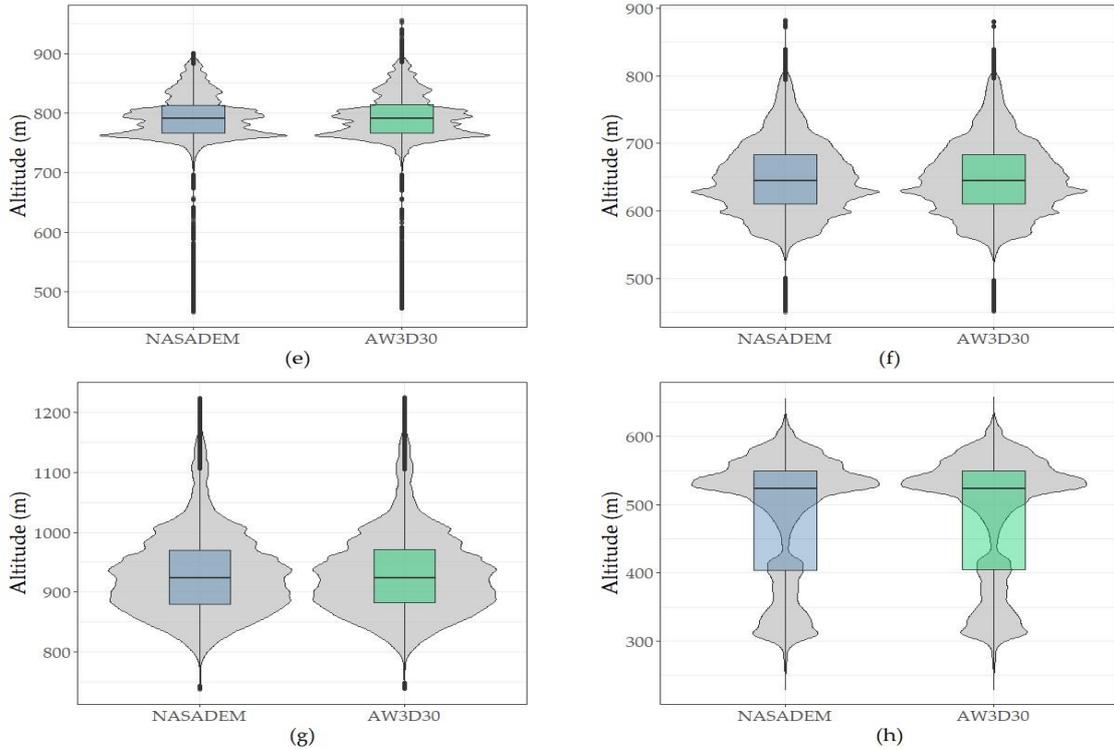
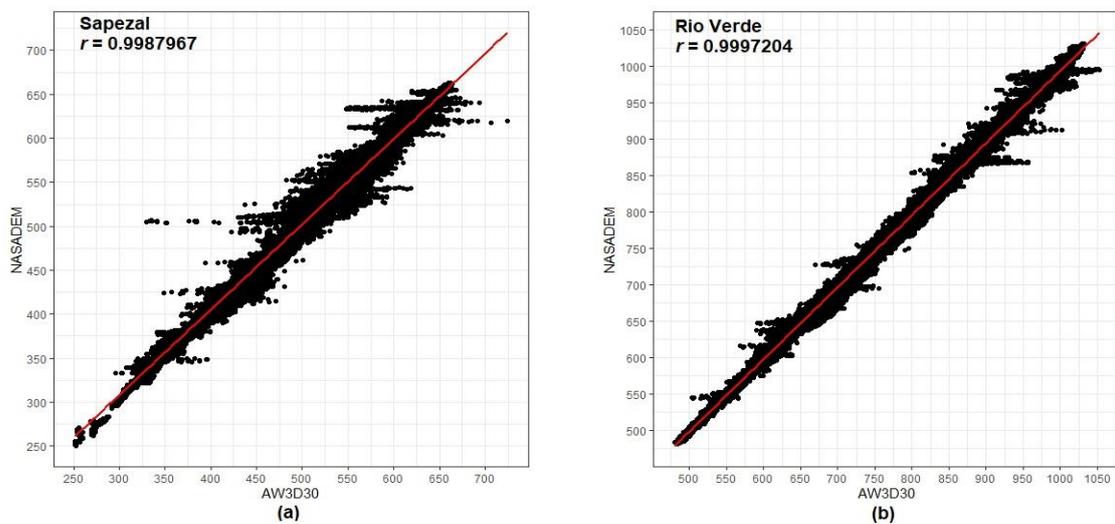


Figure 13. Violin plots of the NASADEM_HGT and AW3D30 digital elevation models for the agricultural areas of Sapezal (a), Rio Verde (b), São Desidério (c), Maracaju (d), Formosa do Rio Preto (e), Primavera do Leste (f), Cristalina (g), and Balsas (h) municipalities.

Figure 14 shows the scatterplots for each municipality in order to assess the degree of association between the altitudes of each model. It is possible to note that there is a linear relation between the variables analyzed and values very close to 1 ($r > 0.99$), indicating a correlation quasi perfect between the altitudes of the two models for all municipalities analyzed.



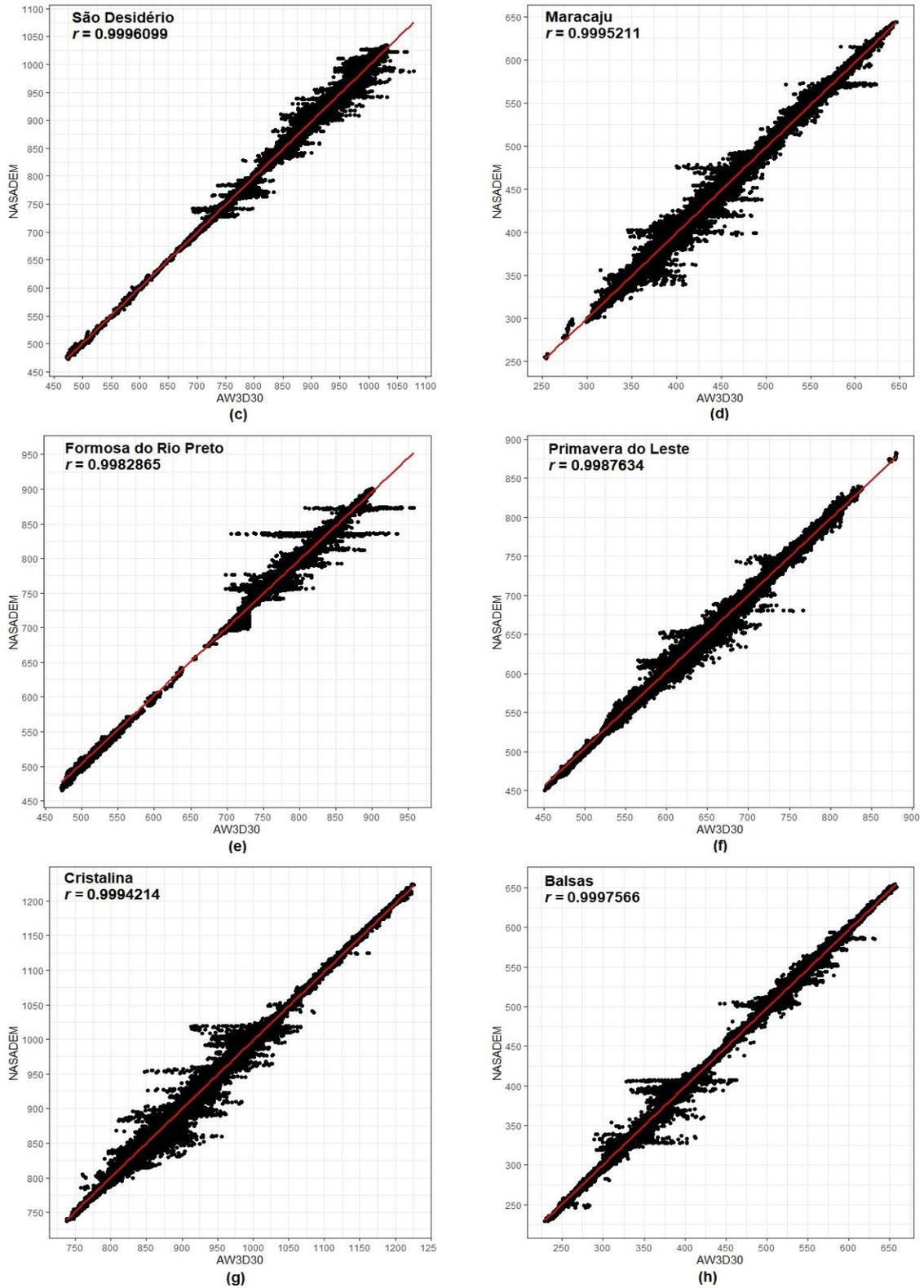


Figure 14. Relation between NASADEM_HGT and AW3D30 for the agricultural areas of Sapezal (a), Rio Verde (b), São Desidério (c), Maracaju (d), Formosa do Rio Preto (e), Primavera do Leste (f), Cristalina (g), and Balsas (h) municipalities.

4.4. Comparison of DEMs in Agricultural Areas of Municipalities with the Highest Grain Production in the Cerrado Using the Size of Cohen Effect (dc)

In this subsection, the results of the comparison between the altitudes of the NASADEM_HGT and AW3D30 models, performed by measuring the size of the Cohen effect (dc), are presented. The interpretations of the results were performed according to Table 11, while the measurements of size effects for each municipality are shown in Table 12. It is possible to notice that all values for the size of the Cohen effect (dc) were less than 0.19. Thus, it can be said that the effect of the difference between the altitude measurements of the NASADEM_HGT and AW3D30 models is insignificant for all the analyzed municipalities. These results, combined with the descriptive analysis, allow us to conclude that the two DEMs tend to provide very similar altitude measurements.

Table 11. Interpretation of the Cohen effect size measurements.

Cohen Effect	Interpretation
≥ 1.30	Very high
0.80 – 1.29	High
0.50 – 0.79	Medium
0.20 – 0.49	Low
≤ 0.19	Not significant

Source: [61].

Table 12. Size measurements of the Cohen effect size per municipality.

Municipality	Mean Altitude		Mean Difference	Cohen Effect	Interpretation
	NASADEM_HGT	AW3D30			
Sapezal	533.19	533.60	0.40	0.00678507	Not significant
Rio Verde	786.07	788.03	1.95	0.01889108	Not significant
São Desidério	838.44	839.45	1.00	0.01388478	Not significant
Maracaju	478.66	479.71	1.05	0.01472942	Not significant
Formosa do Rio Preto	794.13	794.43	0.29	0.008158326	Not significant
Primavera do Leste	649.37	649.06	0.31	0.005793891	Not significant
Cristalina	930.38	931.26	0.89	0.01281434	Not significant
Balsas	483.22	484.29	1.07	0.01164616	Not significant

5. Discussion

The adopted methodology allowed to conclude that the vertical accuracy of the AW3D30 (RMSE of 6.15 m) is close to that specified for the original ALOS World 3D (~ 5 meters of spatial resolution) (RMSE of 5 m). The vertical accuracy of the NASADEM_HGT (RMSE of 8.88 m) is in

accordance with the vertical accuracy requirements for the overall product of SRTM mission, from where its data is derived, < 16 m (LE90), which corresponds to RMSE of 9.76 m.

The tendency (bias) of the two models was -2.90 m and 0.69 m for NASADEM_HGT and AW3D30, respectively, which means that they have low and very low systematic underestimation and overestimation errors, considering the nature of the biophysical variable under analysis (altitude) and the scales compatible with the models. The r and d values between the altitudes of the DEMs and the reference altitudes were very close to 1, that is, an almost perfect correlation and agreement.

For the Cerrado biome, more than 90% of the altitude discrepancies between IBGE data and the NASADEM_HGT and the AW3D30 models were less than 13.7 meters. However, the AW3D30 presented lower RMSE, fitting in the class B of 1:50,000 scale and in the class A of 1:100,000 scale, and smaller. The NASADEM_HGT is aligned with the class B of the 1:100,000 scale and, for class A, it meets the 1:250,000 scale. A similar classification was found by [62] when AW3D30 DEM was analyzed considering the PEC-PCD in different regions of Brazil.

It is important to take into account the scales of each model pointed out through the classification based on the PEC-PCD carried out in this study and the non-use of the DEMs in scales larger than those pointed out, as they are not compatible. The AW3D30 presented lower values of RMSE (higher accuracy), standard deviation (higher precision) and bias. Therefore, it is more accurate and precise than the NASADEM_HGT considering the methodology and dataset adopted in this study. Previous authors comparing dataset from SRTM and AW3D30 with reference points surveyed in the field [49,62] and with more accurate DEM [2] also found similar results in relation to accuracy. Uuemaa et al. [11] compared vertical accuracy of freely available global DEMs: ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM in Estonia, Norway, New Zealand, and China and concluded that the AW3D30 was the most robust and presented the most stable performance in most of the tests employed. It is, therefore, the best choice for a global analysis. According to these authors, the NASADEM model, as a successor of SRTM, showed only slight improvement in comparison to SRTM. These studies presented RMSE similar to those found in the present study for NASADEM and AW3D30.

When analyzing the DEMs with each other in different municipalities, it was possible to conclude that the two models present measurements of similar altitudes. The r values were very close to 1 for all eight municipalities analyzed and the effect of the difference in mean altitudes of the NASADEM_HGT and AW3D30 models, measured by the Cohen effect (dc), was insignificant, which corroborates that statement.

It is important to highlight the importance of the process of converting the elevations of the DEMs adopted in this study. Originally, the orthometric values referenced to the geoid model EGM96

and horizontal datum WGS 84 were transformed to ellipsoidal altitudes referenced to the ellipsoid WGS 84. Next, the transformation to orthometric altitudes referenced to the Imbituba vertical datum and SIRGAS 2000 horizontal datum, the same system of reference IBGE points, was done. This process allowed the comparison of the same type of measure in the same reference system.

As the data distributions used in this study did not show normal distribution, it would be interesting to consider, in the future, the classification of models according to standards that contemplate the situation of non-normal distribution for discrepancy in altimetric data such as the ASPRS standards [63]. It is also worth emphasizing the relevance of carrying out studies on regional scales such as that one adopted in this work, which brings a broader scope of analysis. This study is a precursor to NASADEM_HGT's accuracy analysis for a regional scale, given its recent launch. The most recent version (3.1) of global DEM ALOS AW3D30 was also employed in this study.

6. Conclusions

In the Cerrado biome, the NASADEM_HGT and AW3D30 DEMs show statistically insignificant difference, according to the Cohen effect size and the correlation coefficient data. However, when analyzed by the PEC-PCD criterion, the AW3D30 data show better altimetric quality. NASADEM_HGT meets the 1:250,000 scale and class A (tolerance error of 16.67 m), and 1:100,000 scale and class B (tolerance error of 16.66 m). The AW3D30 meets the 1:100,000 scale and class A (tolerance error of 8.33 m), and 1:50,000 scale and class B (tolerance error of 6.66 m). Bias effects are found for both products, expressed by the vertical shift component. This effect is lower for the AW3D30 data than for the NASADEM_HGT data.

Acknowledgments

We would like to thank Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa) for supporting this research, the Critical Ecosystem Partnership Fund for Cerrado (CEPF Cerrado) for supporting the development of the Cerrado Knowledge Platform (# CEPF-103768), and the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for supporting directly and indirectly the development of this research.

References

1. Nikolakopoulos, K.G. Accuracy assessment of ALOS AW3D30 DSM and comparison to ALOS PRISM DSM created with classical photogrammetric techniques. *Eur. J. Remote Sens.* **2020**, *53*, 39–52. DOI: 10.1080/22797254.2020.1774424
2. Grohmann, C.H. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. *Remote Sens. Environ.* **2018**, *212*, 121–133. DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.043.

3. Farr, T.G.; Rosen, P.A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R.; Hensley, S.; Kobrick, M.; Paller, M.; Rodriguez, E.; Roth, L.; Seal, D.; Shaffer, S.; Shimada, J.; Umland, J.; Werner, M.; Oskin, M.; Burbank, D.; Alsdorf, D. The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.* **2007**, *45*, 33 p. DOI: 10.1029/2005RG000183.
4. Abrams, M.; Crippen, R.; Fujisada, H. ASTER global digital elevation model (GDEM) and ASTER global water body dataset (ASTWBD). *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1156. DOI: 10.3390/rs12071156.
5. Florinsky, I.V.; Skrypitsyna, T.N.; Luschikova, O.S. Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: A case study on the Zaoksky testing ground, Central European Russia, *Remote Sens. Lett.* **2018**, *9*, 706–714. DOI: 10.1080/2150704X.2018.1468098.
6. Rizzoli, P.; Martone, M.; Gonzales, C.; Wecklich, C.; Tridon, D.B.; Brautigam, B.; Backmann, M.; Schulze, D.; Fritz, T.; Huber, M.; Wessel, B.; Krieger, G.; Zink, M.; Moreira, A. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2017**, *132*, 119–139. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008.
7. Crippen, R.; Buckley, S.; Agram, P.; Belz, E.; Gurrola, E.; Hensley, S.; Kobrick, M.; Lavalley, M.; Martin, J.; Neumann, M.; Nguyen, Q.; Rosen, P.; Shimada, J.; Simard, M.; Tung, W. NASADEM global elevation model: methods and progress. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2016**, *XLI-B4*, 125–128. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B4-125-2016.
8. Tadono, T.; Nagai, H.; Ishida, H.; Oda, F.; Naito, S.; Minakawa, K.; Iwamoto, H. Generation of the 30-m-mesh global digital surface model by ALOS PRISM. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2016**, *XLI-B4*, 157–162. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B4-157-2016.
9. Buckley, S. *NASADEM_HGT v001 (NASADEM Merged DEM Global 1 arc second)*, EarthData, NASA, 2019. Available online: https://lpdaac.usgs.gov/products/nasadem_hgtv001/ (accessed Dec. 10, 2020).
10. Yap, L.; Kandé, L.H.; Nouayou, R.; Kamguia, J.; Ngouh, N.A.; Makuate, M.B. Vertical accuracy evaluation of freely available latest high-resolution (30 m) global digital elevation models over Cameroon (Central Africa) with GPS/leveling ground control points. *Int. J. Digit. Earth* **2018**, *12*, 500–524. DOI: 10.1080/17538947.2018.1458163.
11. Uuema, E.; Ahi, S.; Montibeller, B.; Muru, M.; Kmoch, A. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). *Remote Sens.* **2020**, *12*, 3482. DOI: 10.3390/rs12213482.
12. Vaka, D.S.; Kumar, V.; Rao, Y.S.; Deo, R. Comparison of various DEMs for height accuracy assessment over different terrains of India. In Proceedings of the IEEE International Geoscience

- and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2019), Yokohama, Japan, Jul. 28-Aug. 2, 2019, pp. 1998-2001, DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898492.
13. Gdulová, K.; Marešová, J.; Moudrý, V. Accuracy assessment of the global TanDEM-X digital elevation model in a mountain environment. *Remote Sens. Environ.*, **2020**, *241*, 111724. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111724.
 14. Gonzáles-Moradas, M.R.; Viveen, W. Evaluation of ASTER GDEM2, SRTMv.3.0, ALOS AW3D30 and TanDEM-X DEMs for the Peruvian Andes against highly accurate GNSS ground control points and geomorphological-hydrological metrics. *Remote Sens. Environ.*, **2020**, *237*, 111509. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111509.
 15. Viel, J.A.; Rosa, K.K.; Mendes Júnior, C.W. Avaliação da acurácia vertical dos modelos digitais de elevação SRTM, ALOS World 3D e ASTER GDEM: Um estudo de caso no Vale dos Vinhedos, RS – Brasil. *Rev. Bras. Geogr. Fís.*, **2020**, *13*, 2255-2268.
 16. Barbosa, V.R.F.; Cicerelli, R.E.; Almeida, T.; Marotta, G.S.; Rodrigues, S.W.P. ALOS PRISM (AW3D05 Standard) and Sentinel-1: Evaluation of new sources of digital elevation models. *Rev. Bras. Geogr. Fís.*, **2020**, *13*, 2319-2331.
 17. IBGE. *Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em Território Brasileiro*. Rio de Janeiro: IBGE, 1983.
 18. IBGE. *Banco de dados geodésicos - BDG - o que é*. Available online: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16327-banco-de-dados-geodesicos.html?=&t=o-que-e>> (accessed on 8 Aug. 2020).
 19. Brazil. *Decreto N° 243, de 28 de Fevereiro de 1967, fixa as diretrizes e bases da cartografia brasileira*. 1967. Available online: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/1965-1988/Del0243.htm> (accessed on 7 Aug. 2020).
 20. IBGE. *Sobre a publicação - rede planialtimétrica*. Available online: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16284-rede-planialtimetrica.html?=&t=sobre>> (accessed on 7 Oct. 2020).
 21. IBGE. *Rede altimétrica - o que é*. Available online: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16283-rede-altimetrica.html?=&t=o-que-e>> (accessed on 8 Aug. 2020).
 22. IBGE. *Relatório: reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais - REALT-2018*. Rio de Janeiro: IBGE, 47 p., 2018.
 23. IBGE. *Rede gravimétrica - o que é*. Available online: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16286-rede-gravimetrica.html?=&t=o-que-e>> (accessed on 8 Aug. 2020).

24. Brazil. Decreto N° 89.817 de 20 de junho de 1984. *Normas técnicas da Cartografia nacional*, 1984. Available online: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm> (accessed on 20 Sept. 2020).
25. DSG. *Especificações Técnicas para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)*. 2nd ed. Brasília: DSG. 2016.
26. DSG. *Especificação Técnica de Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)*. Brasília: DSG, 2016.
27. Santos, A.P.; Rodrigues, D.D.; Santos, N.T.; Gripp Jr., J. Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais utilizando técnicas de estatística espacial: proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira. *Bol. Ciênc. Geod.* **2016**, *22*, 630–650. DOI: 0.1590/S1982-21702016000400036.
28. Carvalho, J.A.B.; Silva, D.C. Métodos para avaliação da acurácia posicional altimétrica no Brasil. *Rev. Bras. Cart.*, v. 70, n. 2, p. 725–744, 2018. DOI: 10.14393/rbcv70n2-45404.
29. IBGE. *Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000*. Rio de Janeiro: IBGE, *Relatórios Metodológicos*, v. 45, 168 p., 2019.
30. Myers, N.; Mittermeier, R.A.; Mittermeier, C.G.; Fonseca, G.A.B.; Jennifer, K. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* **2000**, *403*, 853–858. DOI: 10.1038/35002501.
31. Bolfe, E.L.; Sano, E.E.; Campos, S.K. (Eds.). *Dinâmica agrícola do Cerrado - Análises e Projeções*. Brasília: Embrapa, 2020.
32. Santana, C.A.M.; Campos, S.K.; Marra, R.; Aragão, A.A. Cerrado: pilar da agricultura brasileira. In: Bolfe, E.L.; Sano, E.E.; Campos, S.K. (Eds.). *Dinâmica Agrícola do Cerrado - Análises e Projeções*. Brasília: Embrapa, 2020.
33. Sano, E.E.; Rosa, R.; Scaramuzza, C.A.M.; Adami, M.; Bolfe, E.L. et al. Land use dynamics in the Brazilian Cerrado in the period from 2002 to 2013. *Pesq. Agropec. Bras.* **2019**, *54*, e00138. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00138.
34. NASA. *NASA Shuttle radar topography mission (SRTM) version 3.0 Global 1 arc second data released over Asia and Australia*. Available online: <<https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/nasa-shuttle-radar-topography-mission-srtm-version-3-0-global-1-arc-second-data-released-over-asia-and-australia>> (accessed on 20 Oct. 2020).
35. Farr, T.G.; Rosen, P.A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R. et al. The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.* **2007**, *45*, 33 p. DOI: 10.1029/2005RG000183.
36. NASA. *SRTMGL1 v003 - NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second*. Available online: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003/>> (accessed on 21 Oct. 2020).

37. NASA. *The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Collection User Guide*. 2015. Available online: https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/measures/docs/NASA_SRTM_V3.pdf (accessed on 20 Oct. 2020).
38. FGDC. *Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy* (FGDC-STD-001-1998). Washington: FGDC. Available online: <https://www.fgdc.gov/standards/projects/accuracy/part3/chapter3> (accessed on 4 Jul. 2020).
39. Pal, M. Advanced algorithms for land use and cover classification. In: Yang, X.; & Li, J. (Eds.). *Advances in Mapping from Remote Sensor Imagery: Techniques and Applications*. Boca Raton: CRC Press, p. 69–90, 2012.
40. Mukul, M.; Srivastava, V.; Jade, S.; Mukul, M. Uncertainties in the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 41672, 10 p. DOI: 10.1038/srep41672.
41. Rodriguez, E.; Morris, C.S.; Belz, J.E.; Chapin, E.C.; Martin, J.M., Daffer, W.; Hensley, S. *An assessment of the SRTM topographic products*. Pasadena: NASA JPL, Technical Report JPL D-31639.
42. Buckley, S.M.; Agram, P.S.; Belz, J.E.; Crippen, E.M. et al. *NASADEM User Guide*. Pasadena: NASA JPL, 2020, 52 p.
43. NASA *NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001*. 2020. Available online: https://doi.org/10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001 (accessed on 20 Oct. 2020).
44. Takaku, J.; Tadono, T.; Tsutsui, K. Generation of high resolution global DSM from ALOS PRISM. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **2014**, *XL-4*, 243–248. Available online: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-4/243/2014/isprsarchives-XL-4-243-2014.pdf> (accessed on 25 Feb. 2021).
45. JAXA. *ALOS Global Digital Surface Model (DSM) - ALOS World 3D-30m (AW3D30) - product format description, version 3.1*. Available online: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/aw3d30v31_product_e_a.pdf (accessed on 16 Oct. 2020).
46. JAXA. *ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30m (AW3D30)*. Available online: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm> (accessed on 15 Oct. 2020).
47. Motta, L.P. *Lapig msc giovana package*. Brasília (DF): Github. Available online: https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/tree/main/script/MDE (accessed on 11 Nov. 2020).

48. Rodrigues, T.G.; Paradella, W.R.; Oliveira, C.G. Evaluation of the altimetry from SRTM-3 and planimetry from high-resolution PALSAR FBD data for semi-detailed topographic mapping in the Amazon region. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, **2011**, *83*, 953–966.
49. Souza, M.; Ramos, A.P.M.; Marcato Júnior, J. Analysis of the altimetric accuracy of ALOS AW3D30 digital surface model for Mato Grosso do Sul. *Anu. Inst. Geociênc.* **2019**, *42*, 333–338.
50. GRASS Development Team, 2017. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.2*. Open Source Geospatial Foundation. Electronic document. Available online: <<http://grass.osgeo.org>> (accessed on 15 Oct. 2020).
51. Agrawal, R.; Mahtab, A.; Jayaprasad, P.; Pathan, S.K.; Ajai. Validating SRTM DEM with differential GPS measurements - A case study with different terrains. In Proceedings of the Symposium of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Goa, India, 25-30 Sep. 2006, p. 25–30.
52. Shapiro, S.S.; Wilk, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, **1965**, *52*, 591–611.
53. Anderson, T.W.; Darling, D.A. Asymptotic theory of certain “goodness of fit” criteria based on stochastic processes. *Ann. Math. Stat.*, **1952**, *23*, 193–212.
54. Santos, A.P. *Software GeoPEC versão 3.5.2*. Viçosa, 2019. Available online: <<http://www.geopec.com.br/p/software-geopec.html>> (accessed on 15 Oct. 2020).
55. Mikhail, E.; Ackerman, F. *Observations and Least Squares*. University Press of America, 497 p. 1976.
56. Monico, J.F.G.; Dal Poz, A.P.; Galo, M.; Santos, M.C.; Oliveira, L.C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. *Boletim de Ciências Geodésicas*, **2009**, *15*, 469–483.
57. Willmott, C.J. On the validation of models. *Phys. Geogr.* **1981**, *2*, 184-194. <http://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>.
58. IBGE. *Produção Agrícola Municipal (PAM) - Ano Base 2018*. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Available online: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>> (accessed on 10 Sept. 2020).
59. Souza Jr., C.M.; Shimbo, J.Z.; Rosa, M.R.; Parente, L.L.; Alencar, A.A. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. *Remote Sens.*, **2020**, *12*, 2735. DOI: 10.3390/rs12172735.
60. Cohen, J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Hillsdale, NJ: L. Erlbaum Associates, 1988.
61. Rosenthal, J.A. Qualitative descriptors of strength of association and effect size. *J. Soc. Serv. Res.*, **1996**, *21*, 37–59. DOI: 10.1300/J079v21n04_02

62. Silva, A.S.; Santiago, O.R.P.L.; Silva, C.R. Análise de exatidão entre MDEs: AW3D, SRTM-30 m e projeto SPMGGO50. *Geografia*, **2018**, *27*, 87–98.
63. ASPRS. *Accuracy Standards for Large-Scale Maps*. Bethesda, ASPRS, 1990.

CAPÍTULO III - ANÁLISE DA MISSÃO GPM (GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT) NA ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO SOBRE O BIOMA CERRADO

RESUMO

A precipitação pluviométrica é o cerne do ciclo hidrológico, climatológico e energético da Terra, desempenhando papel fundamental para a manutenção da vida dos seres vivos. Em países de dimensão continental, como o Brasil, a distribuição de estações pluviométricas é insuficiente para recobrir todo o território. Dados da missão espacial *Global Precipitation Measurement* (GPM), lançada em 2014, têm demonstrado bons resultados ao estimar a precipitação ao redor do planeta Terra. No Brasil, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) é um instrumento crucial de apoio à tomada de decisão, planejamento e execução de atividades agrícolas e políticas públicas, em especial à seguridade agrícola. No ZARC, os dados de precipitação obtidos de estações meteorológicas são utilizados para estimar o balanço hídrico das culturas. O presente estudo tem como objetivo analisar a conformidade entre dados de precipitação do GPM e dados de estações meteorológicas automáticas, visando fornecer subsídios para a incorporação de dados orbitais de precipitação no ZARC. Foram analisados dados de 215 estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizadas no bioma Cerrado, durante o período de 2017 a 2019, agrupados para dias, meses e estações do ano desse período. Todos os meses do ano apresentaram bons resultados, principalmente para os meses da estação seca (maio a setembro), particularmente para o mês de junho, que apresentou o melhor desempenho (0,89), concordância alta (0,96) e correlação positiva muito forte (0,93). Dados de GPM de julho, novembro e dezembro apresentaram subestimação em relação às medidas das estações meteorológicas. Para os meses chuvosos (outubro a abril), destacam-se os meses de abril e novembro, nesta ordem. Ambos apresentaram forte correlação (0,84 - abril e 0,83 - novembro), alta concordância (0,91 - abril e 0,90 - novembro) e bom desempenho (0,77 - abril e 0,75 - novembro). Considerando-se as estações do ano, o outono destacou-se pela correlação forte (0,89), alta concordância (0,94) e alto desempenho (0,84), enquanto os dados do GPM de inverno apresentaram características de superestimativa. Para todos os dias do período analisado, os resultados indicaram forte correlação (0,69), alta concordância (0,82) e desempenho de 0,57, superestimação de 6,60% (Viés Percentual - PBIAS), Erro Médio (ME) de 0,22 mm/dia, Erro Médio Absoluto (MAE) de 2,80 mm/dia e RMSE de 7,53 mm/dia, os quais representam bons resultados, tendo em vista a grande quantidade de dados avaliados (187.206 dias), a alta variabilidade espacial de dados de precipitação e a resolução espacial dos dados GPM: 0,1°, aproximadamente ~11 Km no Equador. Os índices Probabilidade de Detecção (POD), Taxa de Alarme Falso (FAR), Índice de Sucesso Crítico (CSI) e Porcentagem Correta (PC), nas escalas temporais analisadas, demonstraram a alta habilidade de detecção de chuva pelo sensor orbital, alta porcentagem de acertos e bom índice de sucesso em relação à detecção de chuva, apesar da ocorrência de alarmes falsos - quando não há medição de chuva nas estações meteorológicas automáticas do INMET, mas a GPM detecta precipitação - principalmente no limite Nordeste do bioma Cerrado. Os resultados mais fracos para esses índices foram encontrados para o período seco, especialmente para os meses de junho, julho e agosto, porém ainda bastante satisfatórios: POD > 89%, FAR < 25%, CSI > 69% e PC > 74%. Tais resultados são justificados pela resolução espacial dos dados GPM, os quais apresentam um valor médio de chuva na área do pixel. Quando comparados a dados pontuais das estações automáticas, é

esperado que ocorra tais discrepâncias. Cabe ressaltar que tais índices são calculados tomando-se como base somente eventos de chuva e não chuva, na qual valores numéricos e a relação entre eles não interferem na análise. O índice POD foi muito próximo à 100% em todas as estações do ano. Já o índice FAR apresentou seu pior resultado no Inverno - 8,87% - por englobar meses secos (julho, agosto e setembro) e devido à relação com a resolução espacial dos dados GPM. Em relação aos índices CSI e PC, os menores resultados estão também associados ao Inverno. Ainda assim, estão acima de 90%, o que representa um ótimo resultado. Tomando-se como base a escala temporal diária, e tendo em vista a resolução espacial da GPM e a grande quantidade de dados analisados, os índices também apresentaram-se bastante satisfatórios: $POD > 83\%$, $FAR < 31\%$, $CSI > 61\%$, $PC > 82\%$. Conclui-se, dessa forma, que os dados GPM possuem grande potencial para serem incorporadas à metodologia do ZARC, levando em consideração o período de latência de disponibilização dos dados, especialmente para complementação da série histórica de dados provenientes de estações pluviométricas de superfície.

Palavras-chave: Precipitação, GPM, Cerrado, Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC).

ABSTRACT

Pluviometric precipitation is the core of the Earth's hydrological, climatological and energetic cycle, playing a vital role in maintaining the life of living beings. In countries of continental dimension such as Brazil, the distribution of pluviometric stations is insufficient to cover the whole territory. Data from the Global Precipitation Measurement (GPM) space mission, launched in 2014, has shown good results in estimating rainfall around Earth. In Brazil, Agro-climatic Zoning Risk (ZARC) is a crucial tool to support decision-making, planning and execution of agricultural activities and public policies, especially in agricultural security. In ZARC, precipitation data obtained from meteorological stations are used to estimate the crop water balance. This study aims to analyze the conformity between GPM precipitation data and automatic weather stations data, in order to provide subsidies for the incorporation of precipitation satellite data into the ZARC. Data from 215 stations of the National Institute of Meteorology (INMET) located in the Cerrado biome were analyzed during the period 2017 to 2019, grouped by days, months and seasons of the year for that period. All the months of the year presented good results, principally for the dry season months (May to September), particularly for the month of June, which presented the best performance (0.89), high agreement (0.96) and very strong positive correlation (0.93). GPM data for July, November and December showed underestimation in relation to weather station measurements. For the rainy months (October to April), the months of April and November were outstanding in this order. Both presented strong correlation (0.84 - April and 0.83 - November), high agreement (0.91 - April and 0.90 - November) and good performance (0.77 - April and 0.75 - November). Considering the seasons of the year, Autumn stood out for strong correlation (0.89), high concordance (0.94) and high performance (0.84), while winter GPM data presented overestimation characteristics. For all the days of the analyzed period, the results indicated strong correlation (0.69), high agreement (0.82) and performance of 0.57, overestimation of 6.60 % (Percentage Bias - PBIAS), average error (ME) of 0.22 mm/day, average absolute error (MAE) of 2.80 mm/day and RMSE of 7.53 mm/day, which represent good results considering the large amount of evaluated data (187,206), the high spatial variability of precipitation data and the spatial resolution of GPM images: 0.1° , approximately ~ 11 Km in Ecuador. The indexes Probability of Detection (POD), False Alarm Rate (FAR), Critical Success Index (CSI) and Percent Correct (PC), in the analyzed temporal scales,

demonstrated the high ability of rain detection by the satellite, high percentage of hits and high success rate regarding rain detection, despite the occurrence of false alarms - when there is no rainfall measurement in the automatic weather stations of INMET, but the GPM detects precipitation - mainly in the northeast boundary of the Cerrado biome. The weakest results for these indices were found for the dry period, especially for the months of June, July and August, but still quite satisfactory: POD > 89%, FAR < 25%, CSI > 69% and CP > 74%. Such results are justified by the spatial resolution of the GPM data, which present an average rainfall value in this pixel area. When compared to point data from automatic stations it is expected that such discrepancies occur. It should be pointed out that these indices are calculated based only on rainfall and non-rainfall events, where numerical values and the relationship between them do not interfere in the analysis. The POD index was very close to 100% in all seasons. The FAR index presented its worst result in winter - 8.87% - because it includes dry months (July, August and September) and due to the relationship with the spatial resolution of the GPM data. Regarding the CSI and PC indices, the lowest results are also associated with winter. Still, they are above 90%, which represents a very good result. Taking the daily time scale as a basis, in view of the spatial resolution of the GPM and the large amount of data analyzed, the indices were also highly satisfactory: POD > 83%, FAR < 31%, CSI > 61%, PC > 82%. Thus, it can be concluded that GPM data has great potential to be incorporated into ZARC methodology, with high spatial resolution. It is concluded that GPM data has great potential to be incorporated into ZARC methodology, taking into account the latency period of data availability, especially for complementing the historical series of data from surface rainfall stations.

Keywords: Precipitation, GPM, Cerrado, Agro-climatic Zoning Risk.

1 INTRODUÇÃO

A precipitação é o cerne do ciclo hidrológico do planeta Terra, sendo fator fundamental para uma ampla gama de modelos hidrológicos, meteorológicos e climáticos. Sem o conhecimento acurado da intensidade e distribuição da precipitação em escala global, não é possível compreender o ciclo de energia e da água ou prever o tempo e clima, sendo este um grande desafio na pesquisa de ciências da Terra (D'OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Em termos agronômicos, as chuvas afetam tanto o crescimento quanto o desenvolvimento das culturas, além da disponibilidade hídrica dos solos, a qual, por sua vez, influencia a absorção de água pelas raízes e a condição hídrica das culturas. Em períodos de estiagem de chuvas, há a indução do fechamento dos estômatos das plantas, fixando menos CO₂, afetando negativamente a fotossíntese. Já em períodos chuvosos, há a redução da oxigenação dos solos, diminuindo a atividade radicular e a absorção de água e nutrientes pelas plantas. Dessa forma, tanto a escassez de água quanto o encharcamento dos solos levam à redução da produtividade das culturas (MONTEIRO, 2009).

O Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), desenvolvido e validado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e parceiros, traz a indicação de datas ou períodos de plantio/semeadura por cultura e município, considerando as características do clima, tipos de solo e ciclo de cultivares a fim de evitar que adversidades climáticas coincidam com as fases mais sensíveis das culturas, minimizando perdas agrícolas. Constitui, portanto, em uma ferramenta fundamental de apoio à tomada de decisão, para o planejamento e execução de atividades agrícolas e para políticas públicas, em especial, à seguridade agrícola (BRASIL, 2020). No ZARC, a informação de precipitação é considerada para a realização do balanço hídrico das culturas, sendo utilizadas em séries com, no mínimo, 15 anos de dados diários registrados nas estações pluviométricas distribuídas pelo país.

Por ser um importante instrumento de política agrícola e gestão de riscos na agricultura brasileira com vistas a racionalização do uso dos recursos naturais e financeiros para tornar a agricultura uma atividade mais rentável, estável e competitiva (AMORIM NETO *et al.*, 2001; CUNHA e ASSAD, 2001) e pelo fato da observância de suas indicações ser premissa para fins de crédito e seguro agrícola, o aprimoramento da metodologia empregada no ZARC é de suma importância e dever ser realizado de forma contínua.

Testes de conformidade/acurácia e qualidade de dados com potencial para serem incorporados ao ZARC são vitais para o aperfeiçoamento contínuo da metodologia desse pacote tecnológico, visando o adensamento e enriquecimento da malha de dados hoje adotada no Zoneamento, além de prover o ZARC com informações ainda mais confiáveis e subsidiar a implementação de etapas metodológicas, a fim de aprimorar seus resultados. Ademais, é uma forma de contribuir para a divulgação da qualidade e acurácia dessas geoinformações, as quais são amplamente utilizadas nos meios acadêmico e científico.

A obtenção de medições de precipitação baseadas em solo pode ser feita por meio de pluviômetros e radares meteorológicos, considerados fontes confiáveis, principalmente em relação à escala local. No entanto, existem limitações para utilização de medições terrestres em relação escala regional e global, especialmente para a maioria dos países em desenvolvimento (MAGHSOOD *et al.*, 2019), caso do Brasil. O número de estações pluviométricas é insuficiente para o recobrimento satisfatório de todo território nacional, podendo a malha de chuva ser incrementada por dados provenientes de sensores orbitais.

Os sensores orbitais e a aquisição contínua de imagens da superfície terrestre oferecem grande volume e variedade de dados à comunidade científica de sensoriamento remoto (FREITAS *et al.*, 2011). Como exemplos desse recente segmento de modelagem ambiental, podem ser citados os dados provenientes da constelação *Global Precipitation Measurement*

(GPM), as quais fornecem estimativas a cada 30 minutos de precipitação em sua melhor resolução temporal.

No Brasil, estudos de avaliação de dados GPM têm sido realizados em escalas locais, como em Dantas e Ferreira (2019), que avaliaram tais imagens mensais para o estado de Goiás. Já Gadêlha (2018) avaliou para todo território brasileiro por meio de recortes para áreas representativas dos biomas. Porém, análises regionais para os biomas como um todo são escassos.

O bioma Cerrado ocupa 23,3% do território nacional (aproximadamente 198,5 milhões de Hectares) (IBGE, 2019) e é considerado a savana tropical mais rica do mundo em termos de biodiversidade (fauna e flora). Oito das doze Regiões Hidrográficas brasileiras definidas pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) recebem contribuições hídricas deste bioma. (LIMA e SILVA, 2007; BOLFE *et al.*, 2020).

Além disso, é uma das regiões em que a agricultura brasileira mais se desenvolveu nas últimas décadas. A produção proveniente das culturas agrícolas anuais do Cerrado corresponde a 40% do total produzido no país e rebanhos de bovinos, suínos e aves também apresentaram expansão nas últimas quatro décadas (BOLFE *et al.*, 2020). Tais características fazem com que haja crescente preocupação com a preservação e o uso sustentável dos recursos naturais nesse bioma e com o desenvolvimento de uma agricultura sustentável na região.

O objetivo desse estudo é analisar a conformidade entre dados orbitais de precipitação do GPM com dados das estações meteorológicas automáticas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), visando fornecer subsídios para a incorporação de dados orbitais de precipitação no Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC).

2 MATERIAL E MÉTODOS

No presente estudo realizou-se para o bioma Cerrado uma abrangente avaliação do desempenho dos produtos IMERG *Final Run* de resolução temporal de 30 minutos, agrupados por dia, com base em sete critérios de avaliação estatística. Os períodos de análise foram: todos os dias compreendidos entre 01/01/2017 a 31/12/2019, meses e estações do ano deste período. Para tanto, utilizou-se como base de referência medições do solo de estações automáticas meteorológicas de superfície do INMET. A descrição da área de estudo e os passos metodológicos adotados para o desenvolvimento da pesquisa estão descritos a seguir.

2.1 Área de estudo

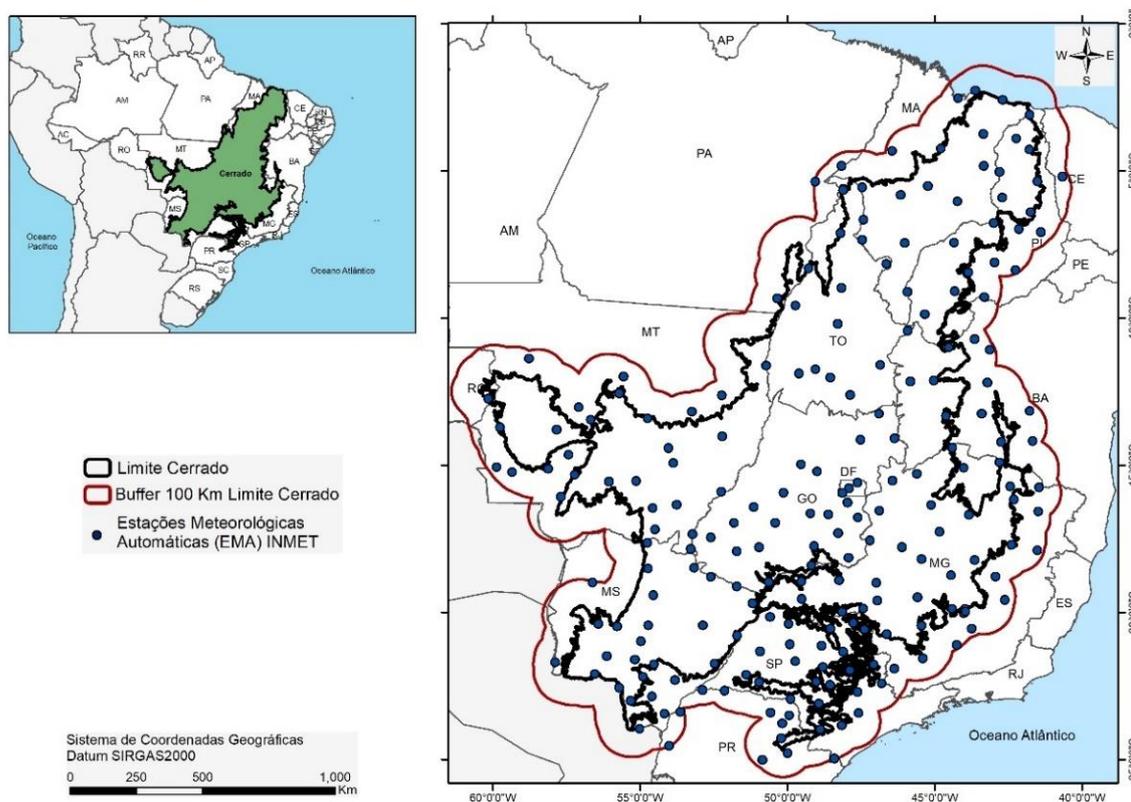
A área de estudo corresponde a um buffer de 100 km no entorno do limite do bioma Cerrado (IBGE, 2019). O Bioma Cerrado ocupa 1.983.017 km², aproximadamente 23,3% da área territorial do Brasil, abrangendo 12 estados brasileiros e o Distrito Federal (IBGE, 2019). É considerado um dos *Hotspots* mundiais (MYERS *et al.*, 2020; LAHSEN *et al.*, 2016) e uma das últimas fronteiras agrícolas do planeta (BORLAUG, 2002; LAMBIN *et al.*, 2013), com características socioeconômicas, biofísicas e ecossistêmicas únicas que lhe conferem grande importância estratégica para o país (BRASIL, 2015).

Segundo Sano *et al.* (2020), a distribuição da precipitação anual no bioma Cerrado varia entre 650 mm a 2.250 mm, aumentando de leste (limite com o bioma Caatinga) para oeste (limite com o bioma Amazônia). A precipitação média anual é de 1.394 mm, com desvio-padrão de 255 mm, com base em estimativas calculadas adotando-se banco de dados denominado WorldClim 2 (FICK e HIJMANS, 2017).

O clima do bioma é estacional, apresentando um período chuvoso, que vai de outubro a abril, seguido por um período seco, de maio a setembro. As temperaturas variam ao longo do ano, entre 22 °C e 27 °C em média (KLINK e MACHADO, 2005).

Neste estudo, tomou-se como base de referência os dados de precipitação medidos por 215 estações meteorológicas automáticas (EMA) de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), espalhadas ao longo de toda área de estudo, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Localização das 215 estações meteorológicas automáticas (EMA) do INMET no bioma Cerrado e buffer (área de estudo).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

2.2 Conjunto de dados

2.2.1 Precipitação – dados orbitais (GPM IMERG)

A concepção do Programa *Global Precipitation Measurement* (GPM) é uma resposta à necessidade de medidas acuradas de precipitação global. Tal programa sucedeu o *Tropical Rainfall Measurement Mission* (TRMM), ampliando sua abrangência e aprimorando a resolução temporal e espacial. Desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), em conjunto com *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), dispõe de um consórcio de agências espaciais internacionais que visam monitorar globalmente, por meio de satélites, as precipitações na atmosfera em alta resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, ~ 11 km no Equador e temporal de 30 minutos no seu produto de melhor resolução (NASA, 2020a).

Como evolução lógica do TRMM, lançado em 2014, o observatório central da constelação GPM (*GPM Core Observatory*) possui um radar ativo de precipitação de dupla

frequência (DPR) e um radiômetro de microondas passivo (GMI), mais avançados e completos do que os do TRMM. O DPR e o GMI tornam possível a realização de medidas e a construção de uma base de dados de perfis, que é usada para calibração de todos os outros satélites do GPM, pois, além destes sensores, a constelação GPM também abrange satélites parceiros (NASA, 2020b; NASA, 2020c; NASA, 2020d).

O GMI usa 13 canais de micro-ondas diferentes para captar a energia de diferentes tipos de precipitação através das nuvens, desde chuva severa a leve até detecção de neve caindo. Já o DPR fornece informações tridimensionais sobre energia refletida por partículas de precipitação em diferentes alturas dentro do sistema de nuvens. As duas frequências da DPR também permitem que o radar infira os tamanhos das partículas de precipitação e ofereça previsões sobre as características físicas de uma tempestade (NASA, 2020c; NASA, 2020d).

Os dados GPM são disponibilizados de acordo com níveis de processamento, sendo que o primeiro nível (Nível 1) apresenta dados geolocalizados e calibrados, o segundo nível (Nível 2) refere-se a dados geofísicos derivados do produto de Nível 1 e o terceiro nível (Nível 3) é trabalhado pelo algoritmo Integrated Multi-SatellitE Retrievals for GPM (IMERG), que intercalibra, mescla e interpola todas as estimativas de micro-ondas da constelação de satélites do GPM (GADÊLHA, 2018).

O terceiro nível está disponível na forma de três tipos de produtos: rodada recente (IMERG-*Early Run*), rodada tardia (IMERG-*Late Run*) e rodada final (IMERG-*Final Run*), que são publicadas com latências de 4 horas, 12 horas e 3,5 meses, respectivamente, e um produto mensal (IMERG-Mensal). Dados IMERG-*Early Run* podem ser empregados para alertas de possíveis inundações ou deslizamentos de terra, enquanto os dados IMERG-*Late* e *Final Run* podem ser utilizados na previsão agrícola, monitoramento de secas e modelagem hidrológica (SUNGMIN *et al.*, 2017).

O produto final – IMERG *Final Run* (rodada final) passa por uma validação de solo (*Ground Validation*), que tem por objetivo aproximar a estimativa dos satélites a observações de uma rede de radares, estações pluviométricas e disdrômetros existentes em solo (GADÊLHA, 2018). Tais produtos são apresentados após ajuste de viés por meio das medições mensais dos dados de solo.

2.2.2 Precipitação no solo - estações meteorológicas automáticas de superfície

Os dados de precipitação de solo foram obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Considerou-se para esse estudo somente as estações meteorológicas automáticas, por serem menos susceptíveis a erros de medições (i.e. falha humana). Uma estação meteorológica automática (EMA) de superfície coleta, a cada minuto, as informações meteorológicas de temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos e radiação solar representativas da área em que está localizada. A cada hora, estes dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos, via satélite ou telefonia celular, para a sede do INMET, em Brasília. O conjunto dos dados recebidos é validado, por meio de um controle de qualidade e armazenado em banco de dados (BRASIL, 2011).

Apesar da alta frequência de disponibilização dos dados e de estarem totalmente acessíveis para a sociedade, existem muitas interrupções na série histórica – horas sem medição ou nulas. Dessa forma, horários sem medições foram desconsiderados e garantiu-se a seleção de estações com 24 medições para evitar qualquer tipo de enviesamento nas análises estatísticas, a partir de uma análise sobre continuidade dos dados do ano de 2000 até 2019.

Para as 215 estações meteorológicas automáticas analisadas, apenas nos anos sequenciais de 2017 a 2019 existem registros diários de chuva para uma boa quantidade de estações, com informação de precipitação para todos os dias do mês, de acordo com o número de dias existentes em cada mês, conforme demonstrado na Tabela 13. Já os dados GPM IMERG são historicamente completos (sem falha de dados).

Tabela 13 – Número de estações meteorológicas automáticas de superfície do INMET com informação para todos os dias do mês (anos sequenciais e meses com boa quantidade de estações – em amarelo. Entre 2015 e 2016, meses com pouca quantidade de estações – em vermelho).

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2000	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
2001	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0
2002	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2003	0	3	7	8	0	2	7	7	9	9	9	5
2004	0	3	7	1	11	0	0	0	0	1	0	1
2005	1	1	1	0	4	6	1	8	0	0	5	12
2006	16	0	2	0	0	2	6	0	0	34	1	0
2007	37	17	12	33	0	3	3	1	71	22	10	92
2008	98	53	45	119	6	28	147	142	136	147	80	140

2009	32	57	147	158	151	148	136	149	139	4	155	152
2010	4	148	126	151	148	151	142	21	141	138	152	152
2011	133	126	1	137	124	135	149	142	161	135	155	162
2012	134	146	107	162	152	127	153	1	162	162	161	169
2013	159	158	1	157	151	2	100	172	174	174	168	162
2014	157	160	146	139	155	163	157	149	157	157	143	152
2015	37	143	115	145	150	154	148	151	154	152	157	147
2016	136	149	146	154	157	145	151	123	139	59	146	150
2017	154	144	145	143	126	121	143	129	127	129	145	157
2018	143	130	127	139	147	149	147	147	134	135	138	146
2019	145	127	132	135	139	155	152	139	155	132	127	125

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

2.3 Processos e índices de Avaliação

2.3.1 Preparação dos dados

Os dados GPM IMERG *Final Run* são disponibilizados a cada 30 minutos em: <https://gpm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm>. Por meio de scripts quem empregam linguagem Python e biblioteca GDAL disponibilizados em: https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/blob/main/cap_03/ (MOTTA, 2020), procedeu-se a leitura das imagens e compilação para o período diário, conforme preconiza a Organização Meteorológica Mundial (OMM) – 13 horas UTC do dia anterior até 12 horas UTC do dia seguinte. Por meio destes scripts também foi possível coletar os valores dos dados GPM nas coordenadas exatas das estações de referência (estações do INMET). A comparação dos pixels GPM diretamente com os pontos das estações de referência em solo foi realizada, a fim de se evitar erros adicionais provenientes de interpolação.

A base de dados GPM e base do INMET foram integradas a um Banco de Dados SQL por meio de linguagem Python e trabalhadas no Software SQLite por meio de linguagem SQL. Cabe ressaltar que, a base de dados do INMET foi trabalhada da mesma forma - produto diário - desconsiderando medições nulas, garantindo a seleção de estações com 24 medições por dia. A comparação pixel-ponto foi realizada diretamente para evitar erros adicionais trazidos por métodos de interpolação.

Após essa etapa, também por meio de linguagem SQL, tabelas comparativas entre os dados de chuva estimados (GPM) versus dados observados em solo (INMET) foram elaboradas para três períodos de análise: todos os dias do período de 2017 a 2019, meses e estações do ano ao longo do mesmo período, excluindo o verão de 2019/2020, tendo em vista

que a estação se inicia 22/12/2019 e a escassa quantidade de dados até 31 de dezembro deste mesmo ano.

O Apêndice A deste capítulo apresenta os fluxogramas de utilização dos scripts empregados para o desenvolvimento deste capítulo, além do endereço do documento explicativo de como empregá-los. Tais fluxogramas, documentos explicativos e scripts utilizados estão disponíveis em: https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/blob/main/cap_03/2020 (MOTTA, 2020).

Para definição das estações do ano, foram consideradas as informações disponibilizadas pelo Departamento de Astronomia da Universidade de São Paulo (USP) em: <https://www.iag.usp.br/astronomia/inicio-das-estacoes-do-ano>. Conforme as datas apresentadas neste endereço, a primavera compreende, basicamente, os meses de outubro, novembro e dezembro; o verão – janeiro, fevereiro e março; outono – abril, maio e junho e inverno – julho, agosto e setembro.

Cabe ressaltar que, para garantir a qualidade e uniformidade das análises nas escalas temporais em meses e estações do ano, tomou-se como premissa para seleção das estações de referência/dados medidos (estações do INMET) a condição de que todos os dias do mês teriam informação de precipitação, de acordo com o número de dias existentes em cada mês. Para compor o banco de dados na escala temporal diária, foram selecionadas as estações que apresentaram as 24 medições do dia.

Para todos os agrupamentos realizados no período de 2017 a 2019 – dias, meses e estações do ano – a variável analisada foi a precipitação acumulada, sendo as unidades de medida mm/dia e mm/mês, conforme o agrupamento.

Para o cálculo das estações do ano, foram utilizados os dados de precipitação mensal acumulada nos meses correspondentes a cada estação do ano. Para seleção e agrupamento das estações do INMET por estações do ano, considerou-se, ao menos, a ocorrência de um mês com medições completas.

2.3.2 Erros e índices de avaliação do produto GPM IMERG *Final Run*

Para avaliar o desempenho do produto GPM IMERG *Final Run* de 30 minutos, agrupados para medições diárias, em relação às medições de chuva das estações automáticas meteorológicas de superfície, tomou-se como base estatísticas de avaliação adotadas por Wang *et al.* (2016, 2017), Maghsood *et al.* (2020) e amplamente empregadas em literatura como o Erro Médio Absoluto (MAE), Viés Percentual (PBIAS), Coeficiente de Correlação de

Pearson (r), acrescidos do Índice de Concordância de Willmott (d) (WILLMOTT, 1985), Índice de Confiança e Desempenho (c) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) e Erro Médio (ME ou BIAS).

Nesse contexto, o MAE (Equação 06) indica a distribuição dos erros e a magnitude média dos erros sem considerar direção. O MAE tem a mesma unidade que os dados de precipitação (ou seja, mm/dia ou mm/mês). Esses critérios foram calculados para cada ponto relativo às estações automáticas de superfície.

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |s_i - o_i|}{n} \quad (06)$$

O Viés Relativo (rBIAS) representa o tamanho e a direção da diferença entre os dois conjuntos de dados. Dessa forma, rBIAS positivo e negativo, respectivamente, representam uma superestimação e subestimação dos dados orbitais em relação às medições de solo. Quando multiplicado por 100, é denominado PBIAS ou Viés Percentual, sendo que nesse estudo optou-se pela adoção deste índice, obtido pela Equação 07. Assim como o viés relativo, o viés percentual (PBIAS) mede a tendência média dos valores estimados de serem maiores ou menores do que os seus valores observados ou medidos. O valor ótimo de PBIAS é 0 (zero), com valores de baixa magnitude indicando uma simulação precisa do modelo. Valores positivos indicam viés de sobrestimação, enquanto que valores negativos indicam viés de subestimação dos dados estimados (R DOCUMENTATION, 2020).

$$\text{PBIAS} = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - o_i)}{\sum_{i=1}^n o_i} \quad (07)$$

O Coeficiente de Correlação de Pearson (r) (Equação 08) demonstra a concordância entre a precipitação estimada pelas medições de satélite e estações meteorológicas de superfície. É um número adimensional, que varia entre -1 e 1, sendo igual a zero quando não há correlação e 1 quando há correlação perfeita.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s}) \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})}} \quad (08)$$

ME, MAE e PBIAS próximos a 0 e “r” próximo a 1 demonstram o melhor desempenho do Produto GPM IMERG em relação às medições de solo das estações meteorológicas de superfície (MAGSHOOD *et al.*, 2020).

O índice “d” proposto por Willmott (1985) permite a avaliação dos desvios entre os valores estimados pelos dados GPM e as referências em solo - estações do INMET, apresentando valores variando de 0 a 1. Quanto menor o desvio, melhor o desempenho da metodologia avaliada. Os valores do índice “d” variam entre 0 (zero) para nenhuma concordância a 1 (um) para uma concordância perfeita. É obtido a partir da Equação 09.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|s_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad (09)$$

Tomando-se como base o proposto por Camargo e Sentelhas (1997), calculou-se o coeficiente de confiança ou desempenho (c), da seguinte maneira (Equação 10):

$$c = r * d \quad (10)$$

Onde “c” é o Índice de Confiança ou Desempenho; “r” é o Coeficiente de Correlação de Pearson e “d” é o Índice de Concordância de Willmott.

O índice "c" integra os indicadores estatísticos “r” (precisão) e “d” (exatidão), permitindo classificar o desempenho das estimativas (SILVA *et al.*, 2017; LEITÃO; OLIVEIRA; LEITÃO, Ted J. V, 2007; CRIBARI-NETO e GOIS, 2007).

A Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) é usualmente empregada para expressar a acurácia dos resultados numéricos e apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. O RMSE é definido por (Equação 11) (HALLAK e PEREIRA FILHO, 2011):

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - o_i)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

Já o Erro Médio (ME ou BIAS) é o índice de avaliação mais simples derivado da diferença entre medidas estimadas e observadas. Mede a tendência do modelo em superestimar ou subestimar a precipitação em relação ao dado medido. Esta tendência, também chamada de erro sistemático, é definida como (Equação 12) (HALLAK e PEREIRA FILHO, 2011):

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{n} \quad (12)$$

Onde O_i e S_i são as medições das estações meteorológicas automáticas e a precipitação estimada pelo satélite, respectivamente; \bar{O} e \bar{S} são as médias de precipitação das estações meteorológicas do INMET e média das estimativas satelitárias, nesta ordem; n é o número total de pares de dados satélite-estação, os quais estão sendo comparados.

Foram selecionados índices a fim de avaliar o desempenho do satélite quanto à assertividade na detecção de um evento e similaridade com a série de dados observados em campo, além da precisão das estimativas.

A Tabela 14, também denominada de “Tabela de Contingência” (NOAA, 2021), demonstra os valores para cada uma das quatro possíveis combinações dos eventos observados e previstos / estimados, onde:

“a” é o número de eventos estimados que correspondem aos eventos observados (acertos) - i.e: tanto o satélite quanto a estação automática registraram evento chuvoso ;

“b” é o número de eventos estimados que não correspondem com os eventos observados (alarmes falsos) - i.e: evento chuvoso detectado pelo satélite, mas não observado na estação automática;

“c” é o número de eventos não estimados que correspondem aos eventos observados (falhas) - i.e: evento chuvoso observado pela estação automática, mas não detectado pelo satélite;

“d” é o número de eventos não estimados que correspondem aos não observado (rejeições corretas) - i.e: quando não há precipitação observada na estação automática nem detectada no satélite.

Na soma de todos os eventos anteriores é representa o tamanho da amostra ($n = a + b + c + d$). Utiliza-se o termo "evento chuvoso" para se referir a um dia que ou o satélite ou o pluviômetro das estações automáticas (ou ambos) registrou um valor não nulo (> 0).

Tabela 14 - Notação das variáveis apresentadas nos índices estatísticos.

Observados			
Estimados	Sim	Não	Total
Sim	a	b	a + b
Não	c	d	c + d
Total	a + c	b + d	a + b + c + d = n

Fonte: NOAA, 2021

Esta tabela 2 x 2 (i.e., tabela 14) é referência para a definições de várias medidas de desempenho formuladas com base no problema de verificação 2 x 2. Estas medidas incluem porcentagem correcta (PC), probabilidade de detecção (POD), taxa de alarme falso (FAR), índice se sucesso crítico (CSI), entre outros (NOAA, 2021).

Para quantificar a capacidade de detecção de precipitação das estimativas orbitais *versus* observações terrestres, foram utilizadas os índices Probabilidade de Detecção (POD) e Taxa de Alarme Falso (FAR), empregados por Magshood *et al.* (2020), Wang *et al.* (2016, 2017), Gadêlha (2018), entre outros.

O índice POD descreve a taxa de concordância de precipitação entre o satélite e medições de solo (MAGSHOOD *et al.*, 2000), representando a proporção de ocorrências dos eventos que foram previstos corretamente. É obtido por meio da equação 13.

$$\text{POD} = \frac{a}{a + c} * 100 \quad (13)$$

Este índice é sensível aos sucessos, mas ignora os alarmes falsos. Dessa forma, deve ser empregado em conjunto com a taxa de alarme falso (FAR).

O índice FAR mede a proporção de eventos sem chuva que são confundidos com eventos de chuva pelo satélite (MAGSHOOD *et al.*, 2000). Define a fração dos eventos que foram previstos, mas não ocorreram, sendo calculado pela equação 14:

$$\text{FAR} = \frac{b}{a+b} * 100 \quad (14)$$

O índice FAR é sensível aos alarmes falsos, porém ignora falhas (GADÊLHA, 2018). Valores próximos a 100% e 0% exibem o melhor desempenho dos dados orbitais para POD e FAR, respectivamente.

O Índice de Sucesso Crítico (CSI, do inglês *Critical Success Index*), também conhecido como *Thread Score* (TS), mede a fração de eventos observados que foram corretamente previstos. O CSI é sensível aos acertos, penaliza as falhas e os alarmes falsos e não é afetado pelo número de rejeições corretas (GADÊLHA, 2018; NOAA, 2021). É definido conforme a equação 15.

$$\text{CSI} = \frac{a}{a+b+c} * 100 \quad (15)$$

Os valores do CSI encontram-se no intervalo entre 0 e 1, apresentados neste trabalho em porcentagem, sendo o CSI = 100% para previsões perfeitas.

A Porcentagem Correta (PC), simplificada, corresponde à porcentagem de previsões corretas, sendo calculado pela equação 16: número total de previsões corretas (acertos + rejeições corretas) divididas pelo número total de previsões (NOAA, 2021).

$$PC = \frac{a + d}{a + b + c + d} * 100 \quad (16)$$

Os valores do PC encontram-se no intervalo entre 0 e 1, apresentados neste trabalho em porcentagem, sendo PC = 100% uma previsão perfeita.

Os índices POD e FAR avaliam habilidade de detecção de chuva pelo satélite. CSI e PC estão associados à qualidade das previsões (GADÊLHA, 2018).

É importante ressaltar que o valor mínimo registrado pelos pluviômetros das estações automáticas do INMET é 0,2 mm. No cálculo dos índices POD, FAR, CSI e PC, para fins da determinação da ocorrência ou não de precipitação, valores abaixo desse limiar foram considerados como zero, tanto para observações das estações automáticas e estimativas do satélite.

2.3.3 Espacialização dos índices de avaliação do produto GPM IMERG *Final Run*

Nesta etapa procedeu-se com a seleção das estações meteorológicas automáticas de superfície que apresentaram todas as medições diárias e em todos os dias dos meses dentro do período analisado (2017 a 2019). Não foi utilizado o filtro em todos os meses do período analisado. Dessa forma, é possível que haja estações com dados completos para todos os dias de janeiro de 2017 e 2018, mas não para janeiro de 2019, por exemplo. Posteriormente, foram calculados e espacializados os índices de avaliação POD, FAR, CSI e PC para o Cerrado.

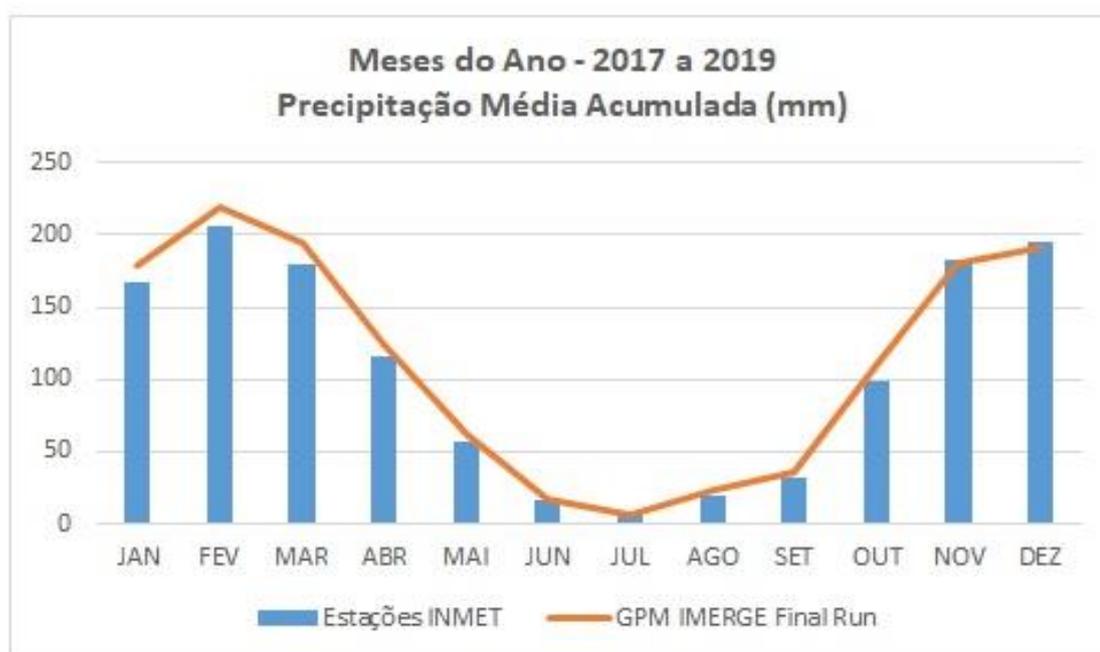
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta sessão é apresentada e discutida uma análise descritiva dos dados, sendo expostas tabelas com medidas descritivas e gráficos, tais como o de barras e box plot. Em seguida, foram obtidos gráficos de radar para as medidas de erro e precisão. Os resultados foram discriminados por meses, estações do ano e todos os dias do período de 2017 a 2019. O software utilizado na execução das análises estatísticas apresentadas foi o R, versão 4.0.2.

3.1 Análise descritiva dos dados de precipitação

Inicialmente, foram obtidos os gráficos das precipitações médias acumuladas observadas e estimadas por mês e estação do ano do período de 2017 a 2019, os quais são apresentados nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

Figura 16 - Precipitações médias acumuladas mensais estimadas (GPM) e medidas (estações INMET).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Diante dos resultados apresentados na Figura 16, pode-se perceber que os comportamentos das precipitações médias estimadas e medidas são similares, de modo que são maiores entre os meses de janeiro a abril e de outubro a dezembro (na faixa que compreende o 1º e o 4º trimestre – período chuvoso). No período de maio a setembro, as precipitações médias apresentaram valores menores (período seco).

Figura 17 - Precipitações médias acumuladas estimadas (GPM) e medidas (estações do INMET) por estações do ano.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

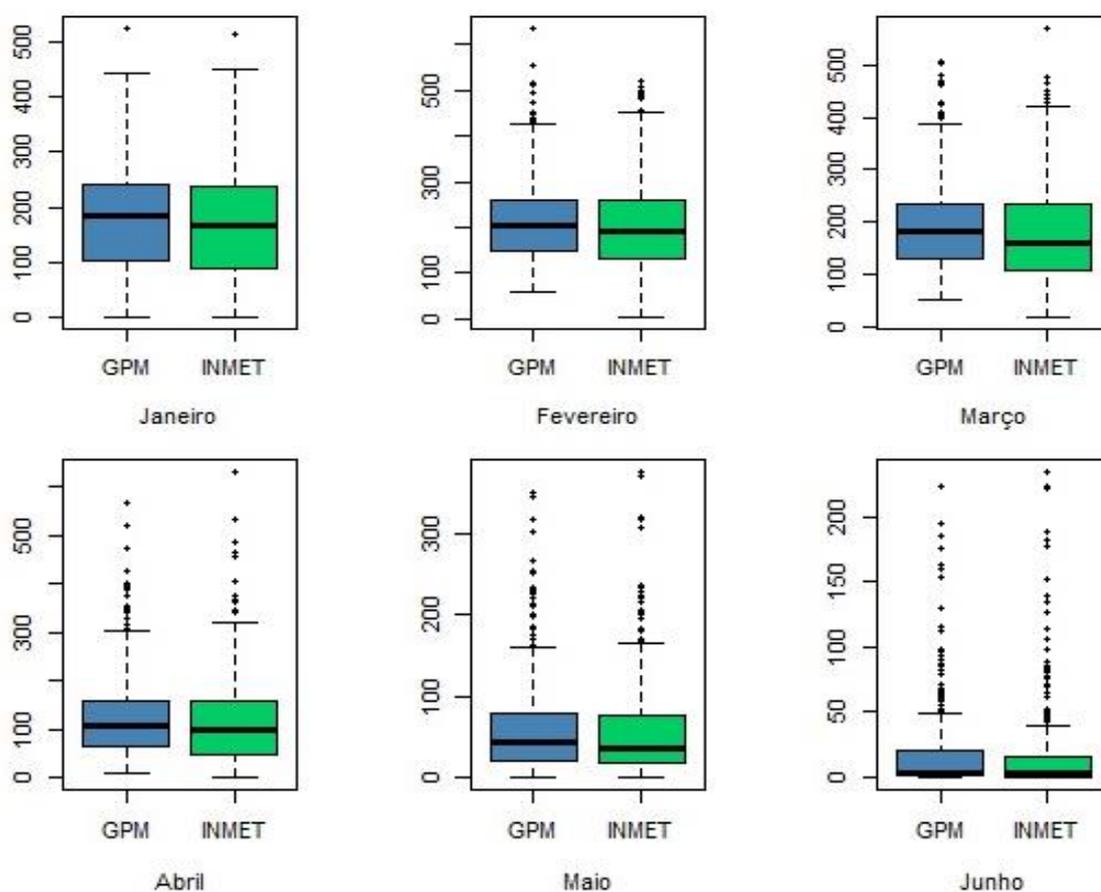
Observando o gráfico apresentado na Figura 17, percebe-se que os maiores valores de precipitação média se encontram nas estações Primavera e Verão, sendo as estações Outono e Inverno aquelas que apresentaram os menores valores de precipitação média.

É importante destacar que os valores de precipitação estimados pela constelação GPM seguem o mesmo comportamento dos valores medidos pelas estações meteorológicas automáticas de superfície do INMET, em ambos os períodos apresentados.

As medidas descritivas dos valores de precipitação detalhadas por todos os dias, meses e estações do ano compreendidos no período de 2017 a 2019 seguem detalhadas no Anexo I deste capítulo.

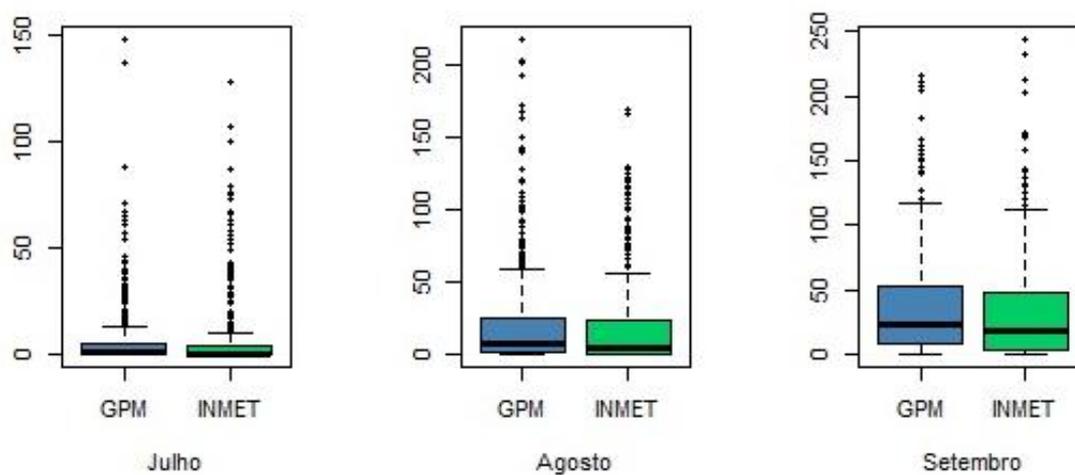
As Figuras 18 e 19 apresentam os gráficos box plot dos valores de precipitação por mês no 1º e 2º semestre, respectivamente.

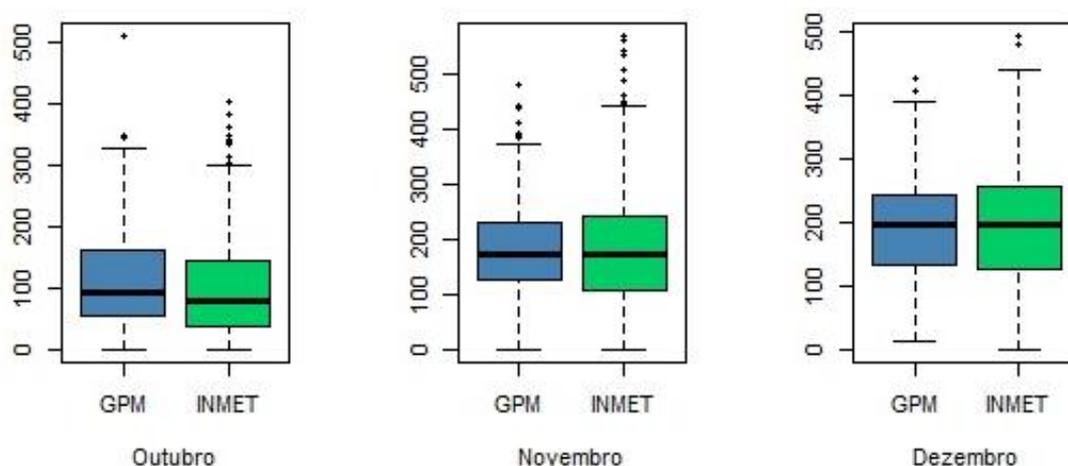
Figura 18 - Box plots dos valores de precipitação (mm) nos meses de janeiro a junho, período 2017 a 2019.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 19 - Box plots dos valores de precipitação (mm) nos meses de julho a dezembro, período 2017 a 2019.



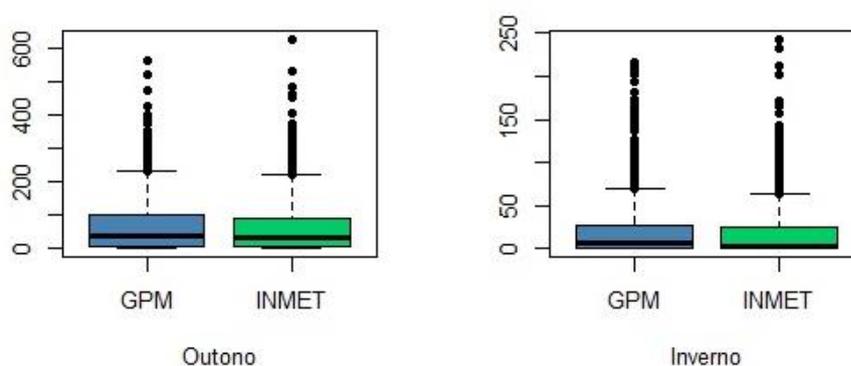


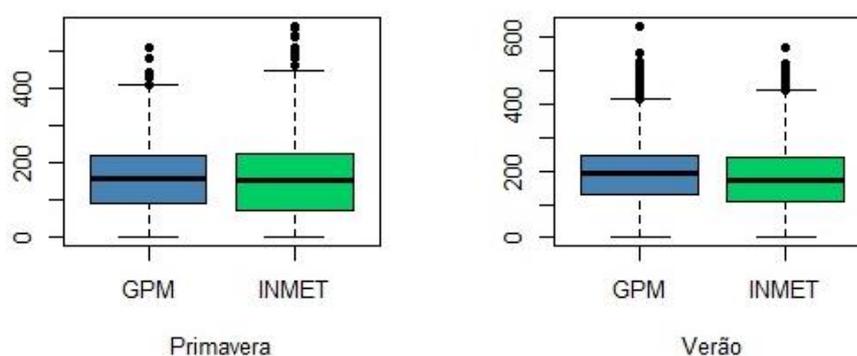
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Pode-se observar nos gráficos apresentados na Figuras 18 e 19 que os valores de precipitação são mais elevados no 1º e 4º trimestres, enquanto que o período de maio a setembro apresenta valores menores de precipitação. Além disso, apresentam também uma quantidade maior de valores discrepantes (*outliers*). Devido a esses *outliers*, o período de maio a setembro apresenta uma maior variabilidade de precipitação, conforme pode ser visto por meio dos valores dos Coeficientes de Variação (CV) - apresentados nas tabelas no Anexo I deste capítulo.

A Figura 20 apresenta os gráficos box plot dos valores de precipitação por estações do ano, período 2017 a 2019.

Figura 20 - Box plots dos valores de precipitação (mm) por estação do ano, período 2017 a 2019.



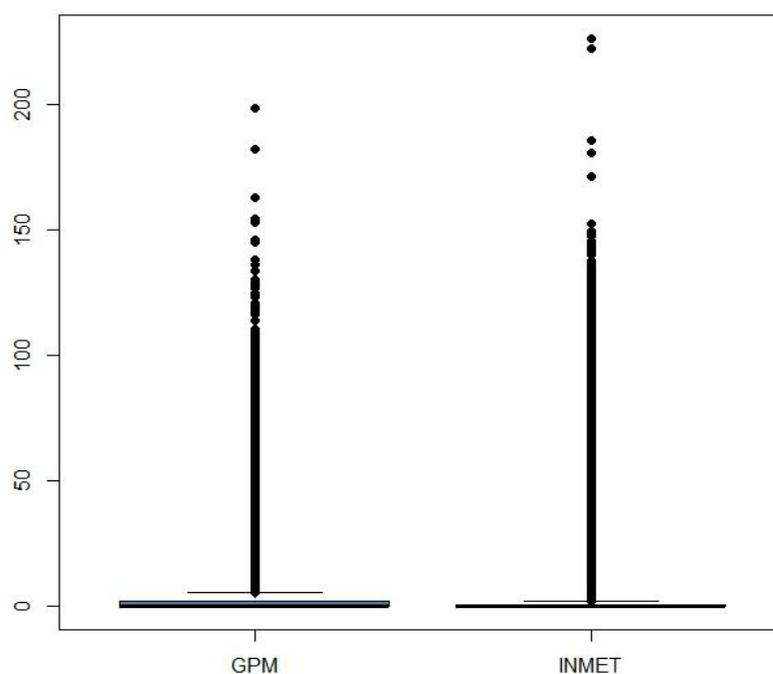


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Diante dos gráficos apresentados na Figura 20, é possível observar que nas estações do outono e inverno existe uma maior quantidade de *outliers*, de modo que os mesmos ocasionam uma variabilidade maior da precipitação nessas estações quando comparados com a primavera e o verão. Fato esse corroborado pelos valores do Coeficiente de Variação (CV) apresentado no Anexo I deste capítulo.

A Figura 21 mostra o box plot referente a todos os dias, período 2017 a 2019.

Figura 21 - Box plot dos valores de precipitação (mm) para todos os dias, período 2017 a 2019.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nota-se a presença de vários de outliers, o que demonstra grande variabilidade dos dados, conforme também altos valores de Coeficiente de Variação (CV) apresentados no

Anexo I deste Capítulo. Optou-se pela não remoção de outliers, pois entende-se que aí podem estar as variações de conformidade entre os dados orbitais e medidos em solo.

3.2 Análise dos erros e índices de avaliação dos produtos GPM IMERG *Final Run*

Uma comparação espaço-temporal de valores de precipitação nos dois conjuntos de dados analisados – orbitais e estações meteorológicas automáticas de superfície do INMET, no mesmo local e espaço de tempo (dia, mês) –, foi realizada utilizando-se os índices de avaliação introduzidos na sessão 2.3.2. A Tabela 15 apresenta estes índices: Erro Médio (ME), Erro Médio Absoluto (MAE), Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE), Viés Percentual (PBIAS), Coeficiente de Correlação de Pearson (r), Índice de Concordância de Wilmott (d), Índice de Confiança ou Desempenho (c) para a escala de tempo diária do produto GPM IMERG *Final Run* versus estações de referência (INMET), para os meses que compõem o período em análise (2017 a 2019). Já as tabelas 16 e 17 apresentam estes índices para estações do ano e todos os dias deste período.

Os índices foram calculados com base nos pixels GPM IMERG *Final Run* sobrepostos ao local exato das coordenadas das estações do INMET durante o período de 2017-2019. Para efeitos de comparação, o produto GPM IMERG *Final Run*, disponibilizado a cada meia hora e medições horárias das estações do INMET foram acumulados e apresentados na escala temporal diária.

Tabela 15 - Índices de avaliação por meses que compõem o período de 2017 a 2019.

Medidas	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
ME (mm mês ⁻¹)	11,88	13,43	15,92	8,08	5,13	1,11	-0,18	4,80	2,72	10,69	-3,72	-4,21
MAE (mm mês ⁻¹)	44,73	52,70	50,55	37,43	22,20	6,90	3,88	10,51	11,92	33,81	46,06	46,88
RMSE (mm mês ⁻¹)	61,76	72,42	66,08	52,30	33,80	12,52	8,38	21,89	18,80	48,05	62,41	64,46
PBIAS %	7,10	6,50	8,90	6,90	9,00	6,80	-2,40	24,90	8,40	10,80	-2,00	-2,20
r	0,79	0,74	0,75	0,84	0,85	0,93	0,87	0,83	0,89	0,82	0,83	0,75
d	0,89	0,85	0,85	0,91	0,92	0,96	0,93	0,89	0,94	0,90	0,90	0,85
c	0,70	0,63	0,64	0,77	0,78	0,89	0,82	0,74	0,83	0,74	0,75	0,64
POD (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	94,76	89,55	96,07	100,00	100,00	100,00	100,00
FAR (%)	0,68	0,00	0,00	0,00	2,24	24,51	24,69	19,70	11,20	4,11	1,01	0,24
CSI (%)	99,32	100,00	100,00	100,00	97,76	72,46	69,23	77,75	88,80	95,89	98,99	99,76
PC (%)	99,32	100,00	100,00	100,00	97,76	74,50	80,63	80,94	89,14	95,89	98,99	99,76

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 16 - Índices de avaliação por estações do ano no período de 2017 a 2019.

Medidas	Primavera	Verão	Outono	Inverno
ME (mm mês ⁻¹)	0,77	13,67	4,78	2,42
MAE (mm mês ⁻¹)	42,39	49,15	22,19	8,71
RMSE (mm mês ⁻¹)	58,93	66,70	36,69	17,27
PBIAS %	0,50	7,50	7,50	12,40
r	0,83	0,77	0,89	0,87
d	0,90	0,87	0,94	0,93
c	0,75	0,67	0,84	0,81
POD (%)	100	100	99,40	99,10
FAR (%)	0,80	0,00	0,60	8,87
CSI (%)	99,20	100,00	98,80	90,39
PC (%)	99,20	100,00	98,80	90,82

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

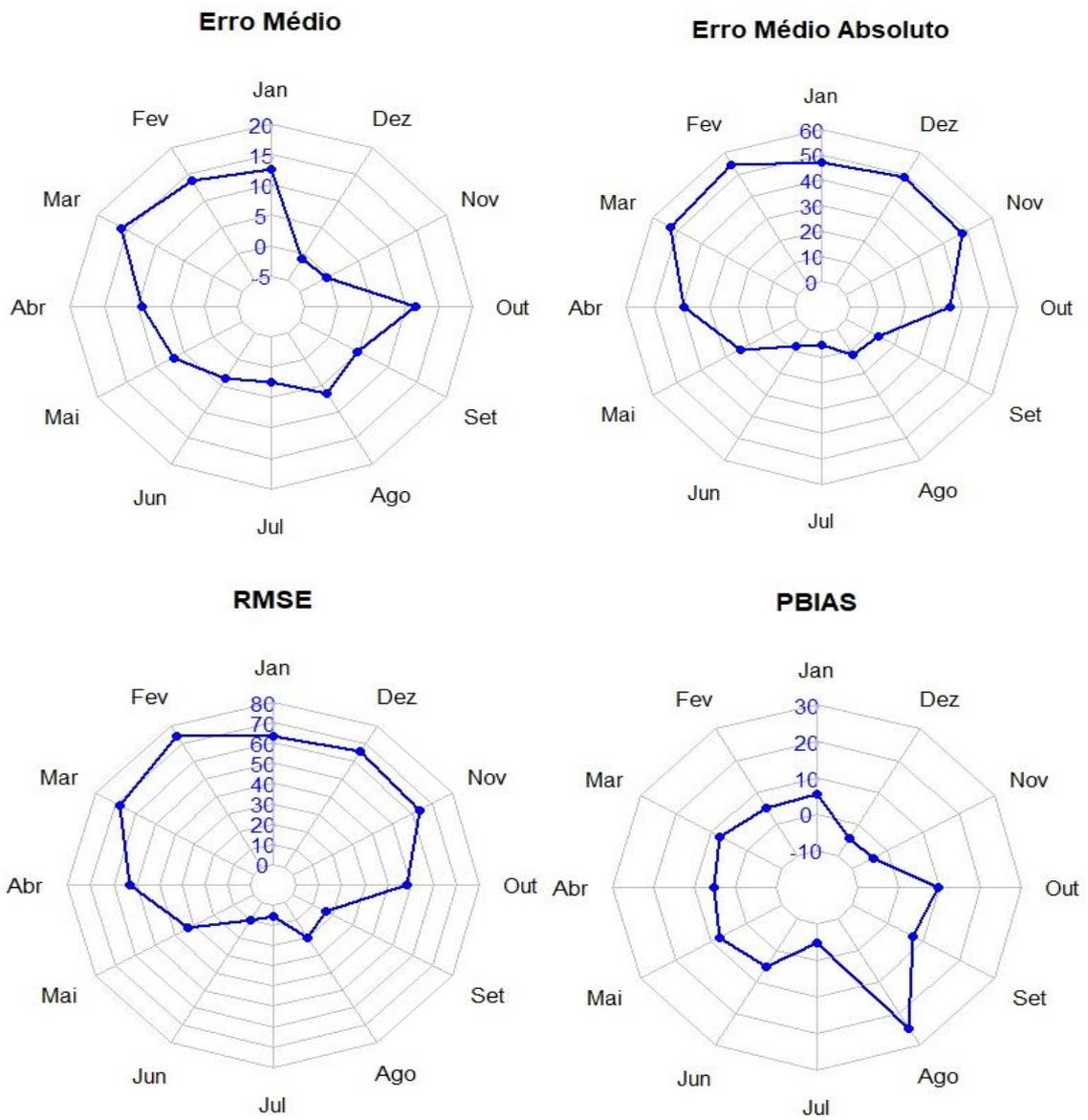
Tabela 17 - Índices de avaliação - todos os dias no período de 2017 a 2019.

Medidas	Todos os Dias
ME (mm dia ⁻¹)	0,22
MAE (mm dia ⁻¹)	2,80
RMSE (mm dia ⁻¹)	7,53
PBIAS %	6,60
r	0,69
d	0,82
c	0,57
POD (%)	83,27
FAR (%)	30,22
CSI (%)	61,20
PC (%)	82,01

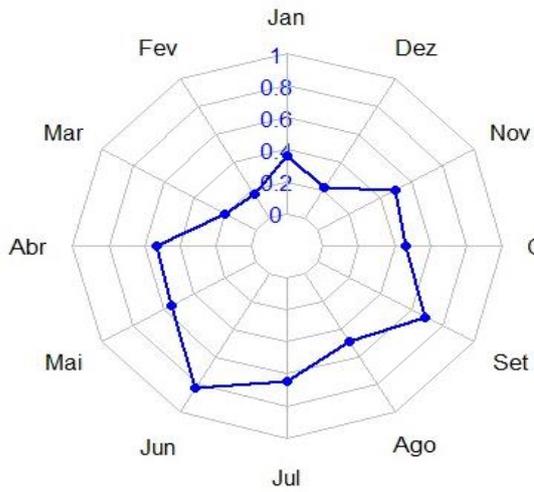
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A seguir, são apresentados os “gráficos de radar”, discriminados para os meses (Figura 22) e estações do ano (Figura 23) no período em análise (2017 a 2019).

Figura 22 - Gráficos de radar – distribuição das estatísticas e índices ao longo dos meses no período de 2017 a 2019.



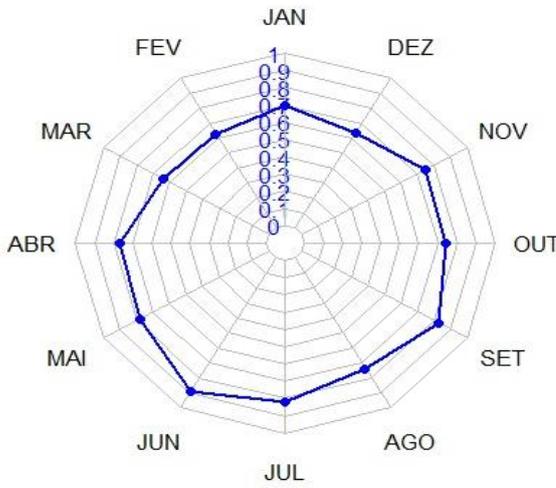
Correlação de Pearson



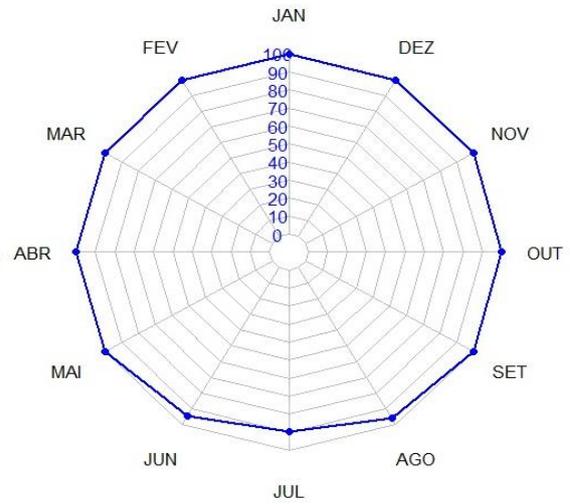
Concordância de Willmott



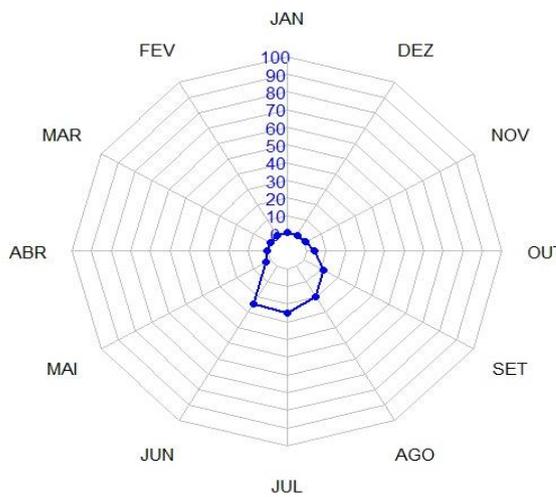
Índice de Confiança ou Desempenho



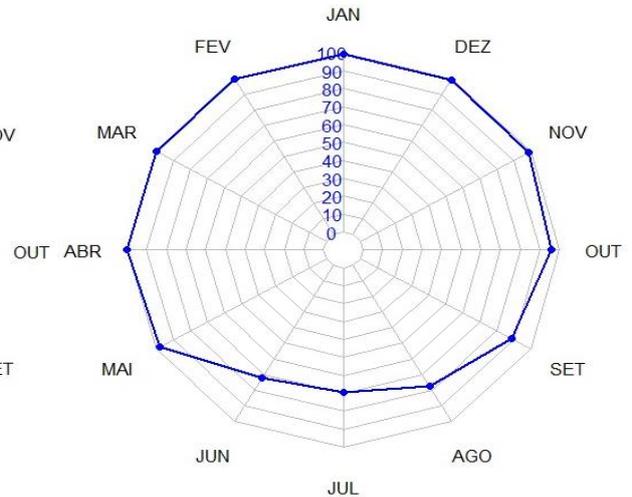
POD

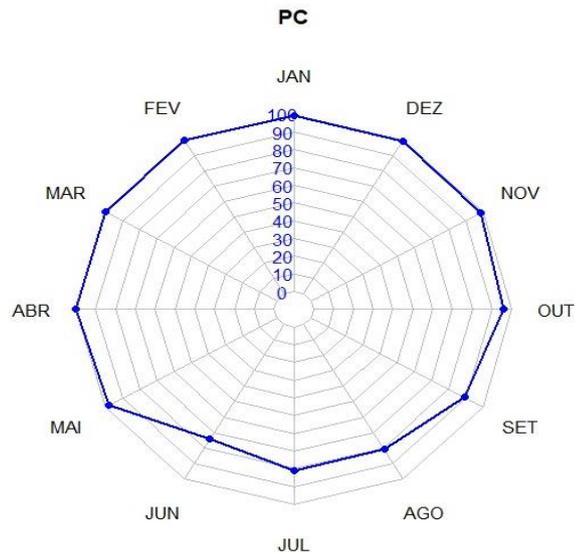


FAR



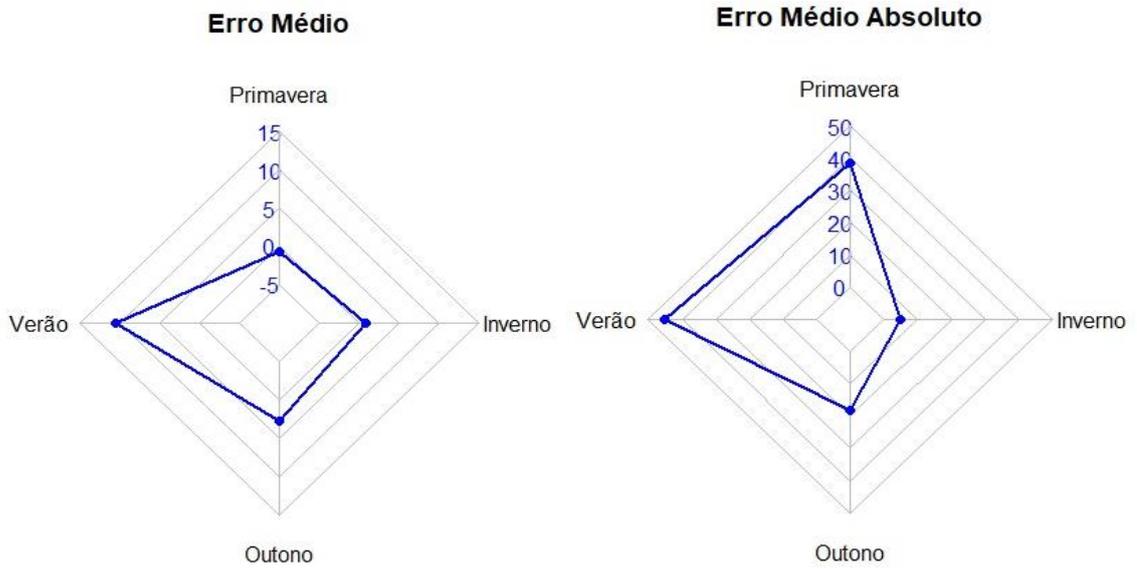
CSI

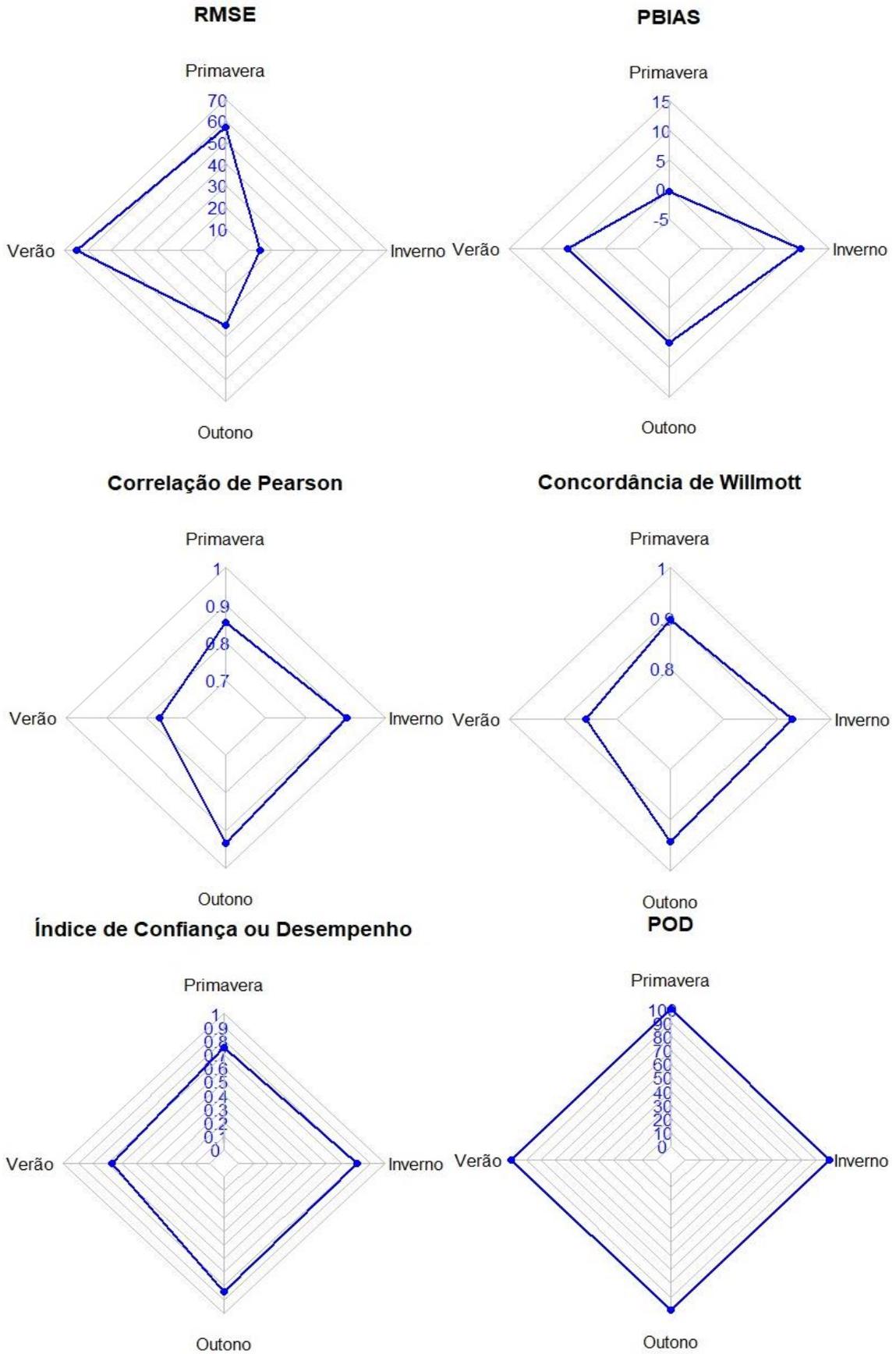


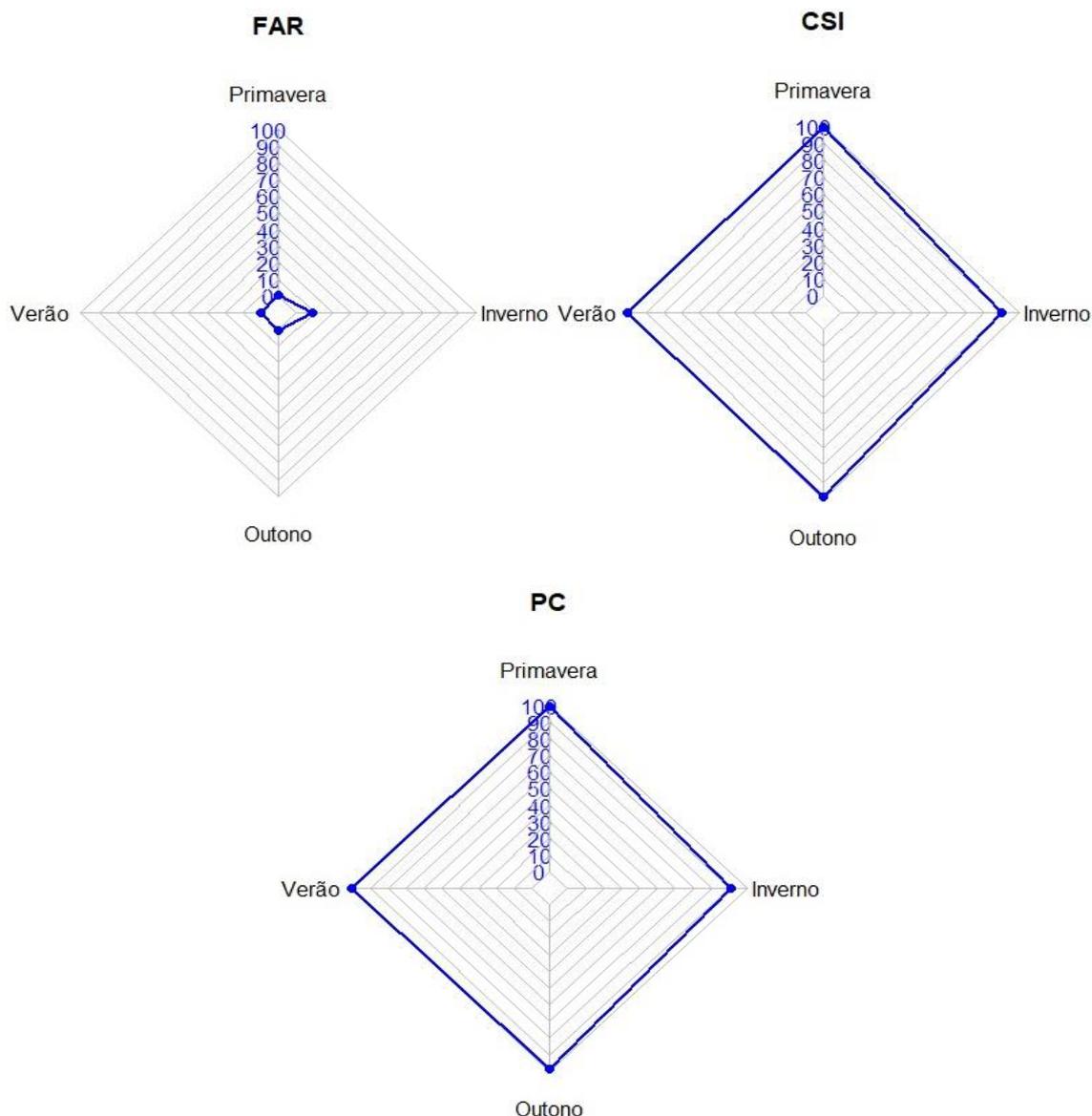


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 23 - Gráficos de radar – distribuição das estatísticas e índices por estações do ano no período de 2017 a 2019.







Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 15 e Figura 22, é possível extrair as seguintes interpretações:

- Os meses de novembro e dezembro foram os que apresentaram os menores Erros Médios (-3,72 e -4,21, respectivamente), sendo os meses de março e fevereiro os que apresentaram os maiores valores: 15,92 e 13,43;
- Em relação aos Erros Médios Absolutos (MAE), os meses de julho e junho foram os que apresentaram os menores valores: 3,88 e 6,90, respectivamente, sendo que os maiores valores foram apresentados nos meses de fevereiro e março;
- Os meses de junho e julho foram os que apresentaram os menores valores de RMSE, sendo que os meses de fevereiro e março apresentaram os maiores valores: 12,52; 8,38 e 72,42; 66,08 mm/mês, respectivamente;

- Tratando-se do PBIAS, podemos destacar julho como o mês que apresentou o menor valor, seguido de dezembro e novembro (-2,40%; -2,20%; -2,00%, nesta ordem), o que demonstra valores de precipitação orbitais subestimados em relação às referências em solo (valores medidos nas Estações Meteorológicas Automáticas do INMET). Tal subestimação também é demonstrada nos Erros Médios (BIAS) destes meses. O mês de agosto foi o que apresentou o maior valor: 24,90% - superestimação dos dados orbitais em relação às estações de referência;

- Os meses de fevereiro, março e dezembro (0,74; 0,75; 0,76, respectivamente) foram os que apresentaram os menores valores de Correlação de Pearson (r) entre os valores estimados pelo satélite e medidos em solo, sendo os meses de junho (0,93), setembro (0,89) e julho (0,87) os que apresentaram os maiores valores;

- Em relação ao índice de concordância de Willmott (d), os meses de fevereiro, março e dezembro foram os que apresentaram os menores valores (0,85), sendo os meses de junho, setembro e julho os que apresentaram os maiores valores: 0,96; 0,94; 0,93, respectivamente. Tais resultados estão em consonância com o Coeficiente de Correlação de Pearson (r);

- O índice de confiança ou desempenho (c) foi melhor para o mês de junho (0,89), setembro (0,83) e julho (0,82).

Dessa forma, pode-se inferir que os dados orbitais apresentam maior conformidade e acurácia, representados por melhores índices de avaliação, no período de não chuva ou meses de seca (maio a setembro), destacando-se junho e julho como meses que apresentaram os menores erros e índices de avaliação.

É importante ressaltar que para os meses do período analisado, mesmo os valores mais baixos de correlação de Pearson (0,74) e concordância de Willmott (0,85) ainda apresentam resultados satisfatórios, fortemente correlacionados e concordantes (1 = concordância perfeita).

O índice de desempenho ou confiança (c) corrobora o melhor desempenho para os meses de seca (não chuva), sendo o desempenho dos dados orbitais em relação às medições das estações do INMET classificado como “ótimo” para o mês de junho e “muito bom” para os mesmos setembro e julho, segundo classificação de Camargo e Sentelhas (1997) – Quadro 2. Cabe salientar que, considerando todos os meses do período analisado, mesmo o menor valor do índice “c”, 0,63 para fevereiro, ainda é considerado como mediano segundo esta classificação. Em relação aos meses chuvosos, os que apresentaram melhor desempenho, classificados como “bom” (Quadro 02), foram novembro (0,75), outubro (0,74) e janeiro (0,70).

Quadro 2 - Critérios de interpretação do índice de desempenho ou confiança “c”.

Índice de Desempenho ou Confiança	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

Em relação aos índices POD e FAR, que avaliam a habilidade de detecção de chuva pelo satélite, é possível observar grande assertividade dos produtos *GPM IMERG Final Run* em relação às estações automáticas de superfície do INMET, com valores de 100% em quase todos os meses. Apresentou maiores taxas de alarmes falsos nos meses de julho (24,69%), junho (24,51%) e agosto (19,70%). Já em relação ao CSI, que é sensível aos acertos, penalizando as falhas e alarmes falsos, os índices mais baixos foram para os meses de julho, agosto e junho, nesta ordem.

Para o índice PC, que contempla os sucessos (a) e rejeições corretas (d) divididos pelo tamanho total da amostra (a+b+c+d), os resultados mais baixos foram para junho (74,50%), julho (80,63%) e agosto (80,94%), respectivamente. Porém, os valores desses índices são melhores que o CSI, pois estão contabilizadas aí as rejeições corretas (d), ou seja, quando não houve medição de chuva nas estações do INMET e no satélite.

Tais resultados podem ser explicados devido à resolução espacial da imagem, aproximadamente 11 km x 11 km no Equador, pois representa uma média da precipitação nesse espaço relativo ao pixel da imagem. Em meses secos, pode não ter chovido pontualmente na localização da estação automática, mas sim nas adjacências, e a GPM, devido à sua resolução espacial, registra essa chuva. Por isso, apesar dos altos índices de correlação (r), concordância (d) e desempenho (c) em termos de valores de precipitação e relação numérica, é esperado tais resultados em termos de habilidade de detecção de chuva pelo satélite e qualidade da detecção nos meses secos. No cálculo desses índices, os valores de precipitação e relação entre eles não exercem influência, partindo-se para uma análise booleana baseada somente em eventos de chuva e não-chuva.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 16 e Figura 23, referentes às estações do ano do período em análise, é possível observar que:

- A primavera foi a estação que apresentou o menor valor de erro médio (0,77), enquanto que o verão foi a que apresentou o maior valor (13,67);
- O inverno foi a estação que apresentou o menor valor de erro médio absoluto (8,71), enquanto que o verão foi a que apresentou o maior valor (49,15);
- O inverno foi a estação que apresentou o menor valor de RMSE (17,27), enquanto que o verão foi a que apresentou o maior valor (66,70);
- A primavera foi a estação que apresentou o menor valor de PBIAS% (0,50), enquanto que o inverno foi a que apresentou o maior valor (12,40). Tais superestimacões também estão representadas no erro médio;
- O verão foi a estação que apresentou o menor valor de correlação de Pearson (0,77) entre os valores orbitais e medidos, enquanto que o outono (0,89) foi a que apresentou o maior valor;
- O verão foi a estação que apresentou o menor valor do índice de concordância de Wilmott (0,87) entre os valores estimados e medidos, enquanto que o outono foi a que apresentou o maior valor (0,94). Tais resultados estão em consonância com o Índice de Correlação de Pearson (r);
- No que diz respeito ao índice de confiança ou desempenho “c”, o outono foi a que apresentou o melhor desempenho (0,84), classificado como “muito bom”, seguido do inverno (0,81) – “muito bom”, primavera (0,75) – “bom” e verão (0,67) – “mediano”.

Esse resultado advém do fato do outono englobar, basicamente, os meses abril, maio e junho e este último ser o mês que apresentou os menores erros e melhores índices de avaliação. Já o inverno engloba julho, agosto e setembro, meses não chuvosos e que apresentaram baixos erros, bons índices de avaliação. Cabe ressaltar, os menores índices de avaliação apresentados (verão – janeiro, fevereiro e março) ainda refletem correlação forte, concordância alta e desempenho mediano.

No que diz respeito à habilidade de detecção pelo satélite, o índice POD foi muito próximo a 100% em todas as estações do ano. Já em relação aos alarmes falsos, o índice FAR apresentou seu pior resultado no Inverno - 8,87% - por englobar meses secos (julho, agosto e setembro) e devido à relação com a resolução espacial do produto GPM IMERG *Final Run* anteriormente descrita. Em relação aos índices CSI e PC os menores resultados estão também associados ao Inverno pelo mesmo motivo. Ainda assim, estão acima de 90%, o que representa um ótimo resultado.

Para todos os dias do período analisado (2017 a 2019) – Tabela 17, os erros foram baixos, principalmente no que se refere ao erro médio (0,22) e viés percentual (6,00). Para

esse período, os dados de precipitação estimados pela constelação GPM apresentaram forte correlação (0,68) com os registros nas estações meteorológicas automáticas do INMET. Apresentaram também alta concordância (0,81), segundo índice de concordância de Willmott (valor próximo de 1), e desempenho “sofrrível” (0,56), segundo categorização proposto no Quadro 02 para o índice de desempenho ou confiança “c”.

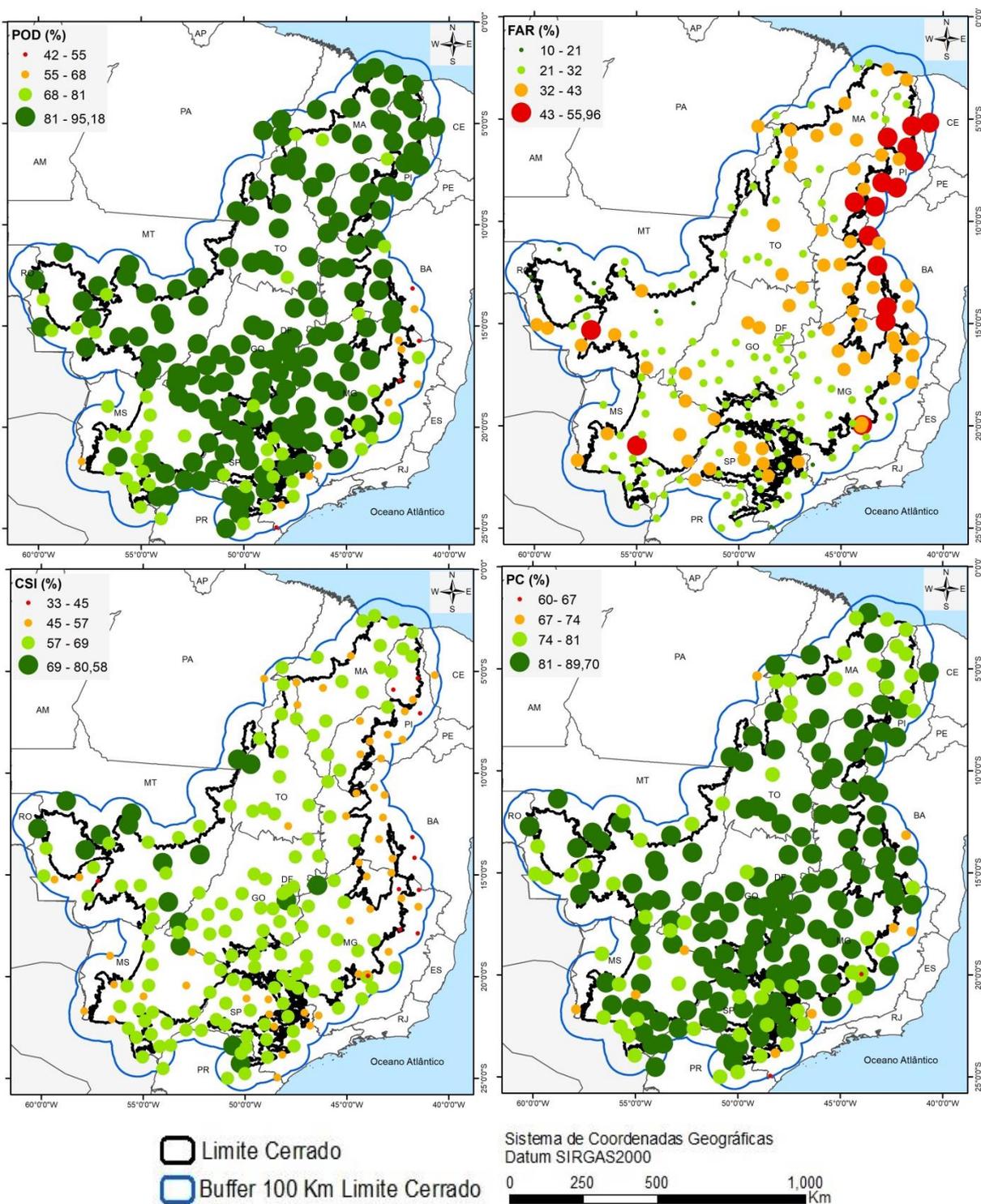
A grande quantidade de dados (187.206 dias) influenciou nos resultados apresentados acima. É preciso, ainda, levar em conta a alta variabilidade espacial de dados de precipitação e a resolução espacial dos dados GPM: 0,1° ~11 Km no Equador. Assim, os valores orbitais apresentados correspondem a uma média de chuva dentro de um pixel de aproximadamente 11 x 11 Km, de acordo com o período correspondente à resolução temporal adotada – diária, no caso desse estudo.

O índice POD apresentou alto valor - 83,27% - o que demonstra a alta habilidade de detecção de chuva pelo satélite, considerando todos os dias do período analisado (2017 a 2019). O índice FAR foi de 30,22%, o que aponta a ocorrência de alarmes falsos – quando há estimativa de chuva pelo satélite, mas não há medição de chuva na estação automática do INMET. O índice CSI foi de 61,20% - resultado bastante satisfatório, tendo em vista a grande quantidade de dados e resolução espacial do satélite GPM anteriormente mencionada. O índice PC foi de 82,01%, superando o CSI, pois engloba as rejeições corretas (d), que é quando não há medição de chuva na estação nem no satélite.

3.3 Índices de avaliação do produto GPM IMERG *Final Run* – dados agrupados escala temporal diária – para o bioma Cerrado

A figura 24 demonstra as estações meteorológicas automáticas do INMET (estações de referência) que apresentam todas as 24 medições diárias do período analisado - 2017 a 2019, totalizando 215 estações. A escolha dessa escala temporal deu-se devido à importância do dado de precipitação diária para a agricultura e o ZARC, além de ser a escala com maior representatividade de dados. As legendas são apresentadas por símbolos que variam gradualmente conforme os intervalos das classes de cada índice de avaliação.

Figura 24 – Índices POD, FAR, CSI e PC no bioma Cerrado.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Com base nos índices apresentados na figura 24, os piores resultados de FAR e CSI encontram-se no limite do buffer de 100 km do Cerrado, na região Nordeste do bioma (estados do Ceará, Piauí e Bahia), apontando que o produto IMERG *Final Run* apresentou

maior porcentagem de alarmes falsos nessa região. Os melhores resultados de POD e PC encontram-se distribuídos na região central, nos estados de Goiás e Mato Grosso (Centro-Oeste do país); no estado de Tocantins (região Norte do país) e no Sudeste (São Paulo e Minas Gerais) do bioma Cerrado. Resultados semelhantes foram encontrados por Gadêlha (2018) na comparação dos produtos IMERG em escala diária.

4 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, é possível constatar que os dados GPM IMERGE *Final Run*, disponibilizados a cada 30 minutos em sua melhor resolução temporal, apresentaram bons índices estatísticos de avaliação – Índice de Correlação de Pearson (r), Índice de Concordância de Willmott (d) e Índice de Confiança ou Desempenho (c) – e erros considerados satisfatórios para todos os dias, meses e estações do ano do período analisado (2017-2019).

Considerando os meses do período analisado, o menor valor para “ r ” foi de 0,74 (fevereiro), considerado uma forte correlação entre valores orbitais estimados e medidos em superfície. O menor valor para “ d ” foi 0,85 (fevereiro, março e dezembro), sendo considerada uma alta concordância entre valores estimados e medidos. Em relação ao índice “ c ”, o menor valor obtido foi de 0,63 – mês de fevereiro, considerado um desempenho mediano. O mês de junho se destacou por apresentar os melhores índices de avaliação e erros baixos. Os menores valores de RMSE e MAE foram obtidos para julho e junho, nesta ordem. Os valores de precipitação estimados GPM apresentaram-se subestimados em relação às medições das estações do INMET em julho, novembro e dezembro, subestimação refletida nos valores do Viés Percentual (PBIAS) e Erro Médio (ME ou BIAS) desses meses. Já o mês de agosto apresentou superestimação de 24,90% dos dados.

Para os meses chuvosos, outubro a abril no bioma Cerrado, destacam-se os meses de abril e novembro, nesta ordem, com forte correlação (0,84 - abril e 0,83 - novembro), alta concordância (0,91 - abril e 0,90 - novembro) e bom desempenho (0,77 - abril e 0,75 - novembro).

Em relação aos índices POD e FAR, os quais avaliam a habilidade de detecção de chuva pelo satélite (nessa escala temporal), é possível observar grande assertividade dos produtos *GPM IMERG Final Run* em relação às estações automáticas de superfície do INMET, com valores de 100% em quase todos os meses. Os resultados mais fracos para esses

índices foram encontrados para o período seco, especialmente para os meses de junho, julho e agosto, porém ainda bastante satisfatórios: $POD > 89\%$, $FAR < 25\%$, $CSI > 69\%$ e $PC > 74\%$.

Tais resultados podem ser explicados devido à resolução espacial da imagem, aproximadamente 11 km x 11 km no Equador, pois representa uma média da precipitação nessa área relativa ao pixel da imagem. Em meses secos, pode não ter chovido pontualmente na localização da estação automática, mas sim nas adjacências, com a GPM registrando essa chuva, devido à sua resolução espacial. Por isso, apesar dos altos índices de correlação (r), concordância (d) e desempenho (c) e erros baixos em termos de valores de precipitação e relação numérica, é esperado tais resultados em termos de habilidade de detecção de chuva pelo satélite e qualidade da detecção nos meses secos. Cabe ressaltar que, no cálculo desses índices, os valores de precipitação e a relação entre eles não exercem influência, partindo-se para uma análise booleana, baseada somente em eventos de chuva e não-chuva.

Considerando as estações do ano do período em análise (2017 a 2019), os resultados indicam os melhores resultados para o outono, apresentando correlação forte (0,89) entre dados estimados e observados, alta concordância (0,94) e desempenho considerado muito bom. Em seguida, o inverno apresentou melhores índices de desempenho, seguido da primavera e verão. Para o inverno, a GPM apresentou características de superestimativa da precipitação em relação às medidas das estações meteorológicas do INMET.

No que diz respeito à habilidade de detecção pelo satélite nessa escala temporal, o índice POD foi muito próximo a 100% em todas as estações do ano, ou seja, os dados orbitais apresentaram habilidade de detecção de chuva quase perfeita. Em relação aos alarmes falsos, o índice FAR apresentou seu pior resultado no Inverno - 8,87% - por englobar meses secos (julho, agosto e setembro) e devido à relação com a resolução espacial do produto GPM *IMERG Final Run* descrita anteriormente; em outras palavras, a proporção de eventos sem chuva que são confundidos com eventos de chuva pelos dados orbitais é baixo, mesmo em meses secos. Em relação aos índices CSI e PC , os menores resultados estão também associados ao Inverno. Ainda assim, a fração de eventos observados que foram corretamente previstos e a porcentagem de previsões corretas pelos dados GPM estão acima de 90%, o que representa um ótimo resultado.

Considerando todos os dias do período analisado, os resultados indicaram forte correlação ($r = 0,69$) e alta concordância ($d = 0,82$) entre os dados estimados por sensoriamento remoto e medidos pelas estações meteorológicas e desempenho ($c = 0,57$). Superestimação de 6,60 % ($PBIAS$), Erro Médio (ME) de 0,22 mm/dia, Erro Médio Absoluto

(MAE) 2,80 mm/dia e RMSE de 7,53 mm/dia, os quais, tomando-se como base a quantidade de dias analisados (187.206 dias), representam bons resultados.

Nessa escala temporal, tendo em vista a resolução espacial da GPM e grande quantidade de dados analisados, os índices também se apresentaram bastante satisfatórios: POD > 83%, FAR < 31%, CSI > 61%, PC > 82. O último índice apresentou-se maior que o CSI, pois engloba as rejeições corretas, que é quando não há medição de chuva na estação nem no satélite.

Quando espacializados, os piores resultados de FAR e CSI encontram-se no limite do buffer de 100 km do bioma Cerrado, na região Nordeste do bioma (estados do Ceará, Piauí e Bahia), apontando que o produto GPM IMERG *Final Run* apresentou maior porcentagem de alarmes falsos nessa região. Os melhores resultados de POD e PC encontram-se distribuídos na região central, nos estados de Goiás e Mato Grosso (Centro-Oeste do país); no estado de Tocantins (região Norte do país) e no Sudeste (São Paulo e Minas Gerais) do bioma Cerrado. Tais resultados corroboram os encontrados por Gadêlha (2018) na comparação dos produtos IMERG em escala diária. Em outras palavras, quando espacializados os índices que medem habilidade e qualidade das estimativas de chuva, considerando todos os dias do período analisado, os dados GPM obtiveram melhor desempenho melhor em áreas que apresentam médias de precipitação mais elevadas.

É importante ressaltar novamente que dados de precipitação possuem grande variabilidade espacial, considerando especialmente a resolução espacial da de 0,1° (~11 km no Equador) dos dados GPM. Ainda assim, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, apontando o mesmo comportamento entre dados de precipitação GPM e medidos nas estações meteorológicas automáticas de superfície do INMET ao longo dos dias, meses e estações do ano do período analisado (2017 a 2109), alta habilidade de detecção de chuva pelos dados provenientes de sensores orbitais, alta porcentagem de acertos e bom índice de sucesso em relação à detecção de chuva, apesar da ocorrência de alarmes falsos, principalmente no limite Nordeste do bioma Cerrado. Dessa forma, esses dados possuem grande potencial para serem incorporados à metodologia do ZARC, considerando-se o período de latência de disponibilização dos dados de 3,5 meses, especialmente para complementação da série histórica de dados provenientes de estações pluviométricas de superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOLFE, É. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Eds.). **Dinâmica agrícola do Cerrado - análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, 2020, 312 p.

BORLAUG, N. E. Feeding a word of 10 billion people: the miracle ahead. In: R., Bailey. **Global warming and other eco-myths**. p. 20-60, Competitive Enterprise Institute, Roseville, EUA, 2002.

BRASIL (2011). Instituto Nacional de Meteorologia. INMET. **Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET**. Brasília: INMET, 2011. 11 p. Nota Técnica n° 001/2011/SEGER/LAIME/ CSC/INMET.

BRASIL (2015). Ministério do Meio Ambiente. **Mapeamento do uso e cobertura do Cerrado: projeto TerraClass Cerrado**. 2015. Brasília-DF, 67 p., 2015.

BRASIL (2019). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: IBGE, Relatórios metodológicos, v. 45. 168 p. 2019. ISSN 0101-2843.

BRASIL (2020b). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento agrícola**. 2020b. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/zoneamento-agricola>>. Acesso em: 01 out. 2020.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Tradução. [s.l.] Artmed Editora, 2009.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97. 1997.

CRIBARI-NETO, Francisco; GOIS, Matheus Cabral de Araújo. Uma análise de Monte Carlo do desempenho de estimadores de matrizes de covariância sob heterocedasticidade de forma desconhecida. **Revista Brasileira de Economia**., Rio de Janeiro, v. 56, n. 2, p. 309-334, 2002 Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-71402002000200005&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 02 nov. 2020. <https://doi.org/10.1590/S0034-71402002000200005>.

CUNHA, G. R.; ASSAD, E. D. Uma visão geral do número especial da RBA sobre o zoneamento agrícola no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Número Especial: Zoneamento Agrícola, v. 9, p. 446-459, 2001.

D'OLIVEIRA, A. B.; ANGELIS, C. F.; ARAI, N.; MACHADO, L. A. T. Estimativas de precipitação por microondas passivas com ênfase na participação brasileira no GPM. In: **XVI**

Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém – Pará, p. 01-05, 2010. Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/rep/8JMKD3MGP7W/38CE3MP>>. Acesso em: 07 jul. 2020

DANTAS, Tiago Miranda; FERREIRA, Nilson Clementino. Avaliação de séries temporais pluviométricas de alta resolução na região metropolitana de Goiânia e no estado de Goiás. In: ANAIS DO XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2019, Santos. Anais eletrônicos... São José dos Campos, INPE, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/avaliacao-de-series-temporais-pluviometricas-de-alta-resolucao-na-regiao-metropolitana-de-goiania-e-no-estado-de-goias?lang=pt-br>> Acesso em: 03 nov. 2020.

FICK, Steve; HIJMANS, Robert. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**. 10.1002/joc.5086. 2017.

FREITAS, R. M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SOUZA, A. F.; SATO, F. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSA, R. R.; ANDERSON, L. O.; RUDORFF, B. F. T. Virtual laboratory of remote sensing series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v. 2, p. 57-64, 2011.

GADÊLHA, A. N. **Análise da missão GPM (Global Precipitation Measurement) na estimativa da precipitação sobre território brasileiro**. 2018. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 2018.

HALLAK, Ricardo; PEREIRA FILHO, Augusto José. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 26, n. 4, p. 591-608, 2011. DOI: 10.1590/s0102-77862011000400009.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. 168p.

KLINK, C A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, v. 01, n. 01, p. 147-155, 2005.

LAHSEN, Myanna; BUSTAMANTE, Mercedes M. C; DALLA-NORA, Eloi L. Undervaluing and Overexploiting the Brazilian Cerrado at Our Peril **Environment: science and policy for sustainable development**, v. 58, n. 6, p. 4-15, 2016.

LAMBIN, E.F. ; GIBBS, H.K. ; FERREIRA, L. ; GRAU, R. ; MAYAUX, P. ; MEYFROIDT, P. ; MORTON, D.C. ; RUDEL, T.K. ; GASPARRI, I. ; MUNGER, J. . Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach. **Global Environmental Change**, v. 23, p. 892-901, 2013.

LEITÃO, Mário de M. V. B. R.; OLIVEIRA, Gertrudes M. de; LEITÃO, Ted J. V. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 585-593, dez. 2007. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662007000600006&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 02 nov. 2020.
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000600006>.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. da. Estimativa da contribuição hídrica superficial do Cerrado para as grandes regiões hidrográficas brasileiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, 2007, São Paulo. Anais... São Paulo, 2007. 1 CD-ROM.

MAGHSOOD, F. F.; HASHEMI, H.; HOSSEINI, S. H.; BERNDTSSON, R. Ground Validation of GPM IMERG Precipitation Products over Iran. **Remote Sensing**, v. 12(1), 48, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs12010048>>. Acesso em: 17 out. 2020.

MONTEIRO, José Eduardo B. A. (Org.) **Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET. 530 p., 2009.

MOTTA, LUIZ PACHECO. **Lapig msc giovana package**. Brasília (DF): Github. <https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/blob/main/cap_03/2020>. Acessado em: 18 set. 2021.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, Jr. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NASA (2020a). National Aeronautics and Space Administration. **The Global Precipitation Measurement Mission (GPM)**. 2020a. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM>>. Acesso em: 17 out. 2020.

NASA (2020b). National Aeronautics and Space Administration. **GPM Core Observatory**. 2020c. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/core-observatory>>. Acesso em: 20 out. 2020.

NASA (2020c). National Aeronautics and Space Administration. **GPM Microwave Imager (GMI)**. 2020d. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/GMI>>. Acesso em: 21 out. 2020.

NASA (2020d). National Aeronautics and Space Administration. **Dual-frequency Precipitation Radar (DPR)**. 2020d. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/DPR>>. Acesso em: 22 out. 2020.

NETO M. A. S.; ARAÚJO A. E.; CARAMORI P. H.; GONÇALVES S. L.; WREGE M. S., LAZZAROTTO C.; LAMAS F. M.; SANS L. M. A. Zoneamento agroecológico e definição de época de semeadura do algodoeiro no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. 9(3):422-428. 2001.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Forecast Verification Glossary**. Disponível em: <<https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u30/Forecast%20Verification%20Glossary.pdf>>. 2021. Acesso em: 22 de mar. 2021.

R DOCUMENTATION. **HydroGOF**. Disponível em: <<https://www.rdocumentation.org/packages/hydroGOF>>. 2020. Acesso em: 02 de nov. 2020.

SILVA, C. O. da; ANDRADE JUNIOR, A. S. de; SOUSA, V. F. de; RIBEIRO, V. Q.; SENTELHA, P. C. Estimativa da evapotranspiração de referência com dados climáticos limitados no estado do Piauí. **Revista Espacios**, v. 37, n. 23, 16 p. 2016.

SUNGMIN, O.; FOELSCHE, U.; KIRCHENGAST, G., FUCHSBERGER, J.; TAN, J.; PETERSEN, W. A. Evaluation of GPM IMERG Early, Late, and Final rainfall estimates using WegenerNet gauge data in southeastern Austria. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 12, p. 6559-6572, 2017.

WANG, Wei; LU, Hui. Evaluation and comparison of newest GPM and TRMM products over Mekong River Basin at daily scale. In: **Anais do 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2016)**. 613-616.10.1109/IGARSS.2016.7729153. 2016.

WANG, Wei; LU, Hui; ZHAO, Tianjie; JIANG, Lingmei; SHI, Jiancheng. Evaluation and comparison of daily rainfall from latest GPM and TRMM products over the mekong river basin. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**. PP. 10.1109/JSTARS.2017.2672786. 2017.

WILLMOTT, C. J. *et al.* Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

ANEXO I

Para as tabelas a seguir, considerar:

- Min. e Máx.: valores mínimo e máximo, respectivamente;
- Q1 e Q3: 1º e 3º quartis, respectivamente;
- DP e CV: desvio padrão e coeficiente de variação, respectivamente.

Tabela 18 - Medidas descritivas para os valores estimados (GPM) e medidos (INMET) por mês, período de 2017 a 2019.

Mês	Variável	Min.	Máx.	Q1	Média	Mediana	Q3	DP	CV
Janeiro	GPM	1,25	523,75	103,05	178,42	183,90	242,05	91,36	51,21
	INMET	0,00	513,40	89,90	166,54	165,40	238,75	96,53	57,96
Fevereiro	GPM	60,60	633,55	150,65	219,51	203,32	260,43	92,42	42,10
	INMET	3,80	520,40	131,90	206,08	191,30	260,10	102,68	49,83
Março	GPM	51,55	507,10	131,35	194,99	183,30	234,30	83,66	42,90
	INMET	18,20	568,40	109,40	179,07	161,40	234,00	94,47	52,76
Abril	GPM	7,25	567,45	62,35	124,73	105,00	158,98	90,02	72,17
	INMET	0,60	630,40	48,70	116,65	100,00	157,70	93,10	79,81
Maio	GPM	0,65	352,15	21,40	62,17	42,80	77,85	61,01	98,13
	INMET	0,00	376,20	17,15	57,03	36,00	76,70	60,13	105,44
Junho	GPM	0,00	223,45	0,81	17,26	3,45	20,24	31,68	183,55
	INMET	0,00	234,20	0,00	16,15	2,80	16,60	33,46	207,18
Julho	GPM	0,00	147,75	0,00	7,08	0,60	5,40	15,77	222,74
	INMET	0,00	128,40	0,00	7,26	0,00	4,20	17,25	237,60
Agosto	GPM	0,00	216,95	1,00	24,06	7,95	24,68	38,32	159,27
	INMET	0,00	168,40	0,00	19,26	4,40	22,80	31,24	162,20
Setembro	GPM	0,00	216,05	8,25	35,14	22,95	52,65	38,13	108,51
	INMET	0,00	243,20	2,60	32,42	17,40	47,20	40,10	123,69
Outubro	GPM	0,35	509,45	53,90	109,73	93,45	163,55	76,04	69,30
	INMET	0,00	403,00	39,20	99,04	79,40	143,40	80,64	81,42
Novembro	GPM	1,10	478,55	125,55	179,69	172,75	228,73	88,57	49,29
	INMET	0,00	567,20	107,00	183,40	173,60	241,80	112,18	61,17
Dezembro	GPM	14,05	428,05	135,07	190,75	197,50	243,62	75,67	39,67
	INMET	0,00	493,40	127,30	194,96	196,60	258,90	97,39	49,95

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 19 - Medidas descritivas para os valores estimados (GPM) e medidos (INMET) por estações do ano, período de 2017 a 2019.

Estação	Variável	Min.	Máx.	Q1	Média	Mediana	Q3	DP	CV
Primavera	GPM	0,35	509,45	90,90	160,92	160,05	218,00	87,77	54,54
	INMET	0,00	567,20	75,30	160,15	153,40	226,70	106,45	66,47
Verão	GPM	1,25	633,55	129,85	196,88	191,40	244,40	90,84	46,14
	INMET	0,00	568,40	109,80	183,21	170,80	241,80	99,20	54,15
Outono	INMET	0,00	567,45	9,82	68,12	41,50	100,22	78,91	115,84
	GPM	0,00	630,40	6,40	63,34	33,80	92,70	78,60	124,09
Inverno	GPM	0,00	216,95	0,45	21,90	7,25	28,00	34,35	156,85
	INMET	0,00	243,20	0,00	19,48	3,60	25,40	32,50	166,84

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

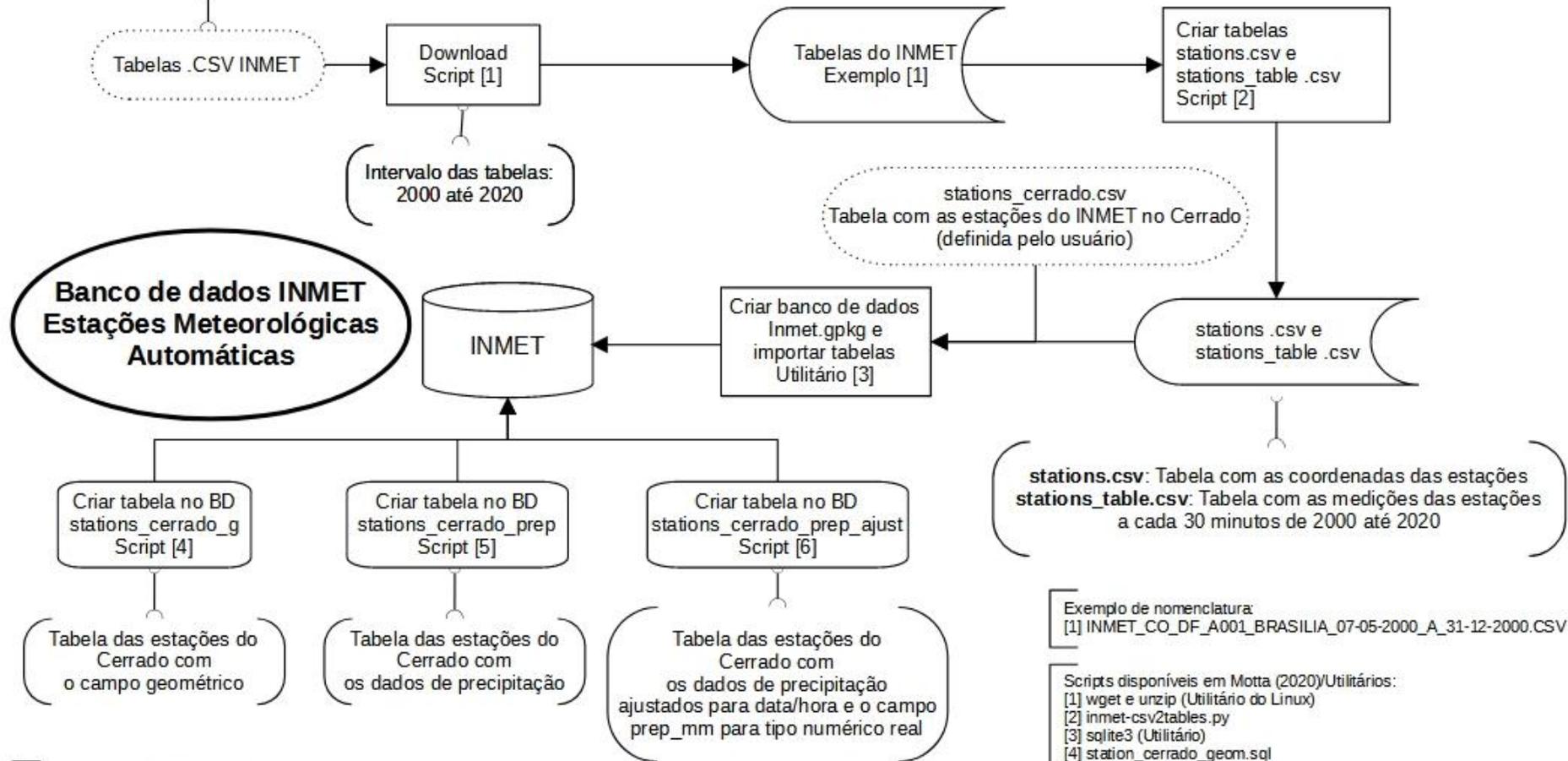
Tabela 20 - Medidas descritivas para os valores estimados (GPM) e medidos (INMET) para todos os dias, período de 2017 a 2019.

Variável	Min.	Máx.	Q1	Média	Mediana	Q3	DP	CV
GPM	0,00	198,55	0,00	3,60	0,00	2,30	9,08	252,22
INMET	0,00	226,60	0,00	3,37	0,00	0,80	9,81	291,10

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE A – Fluxograma dos *scripts* empregados no capítulo e disponíveis em Motta (2020)

(<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>)

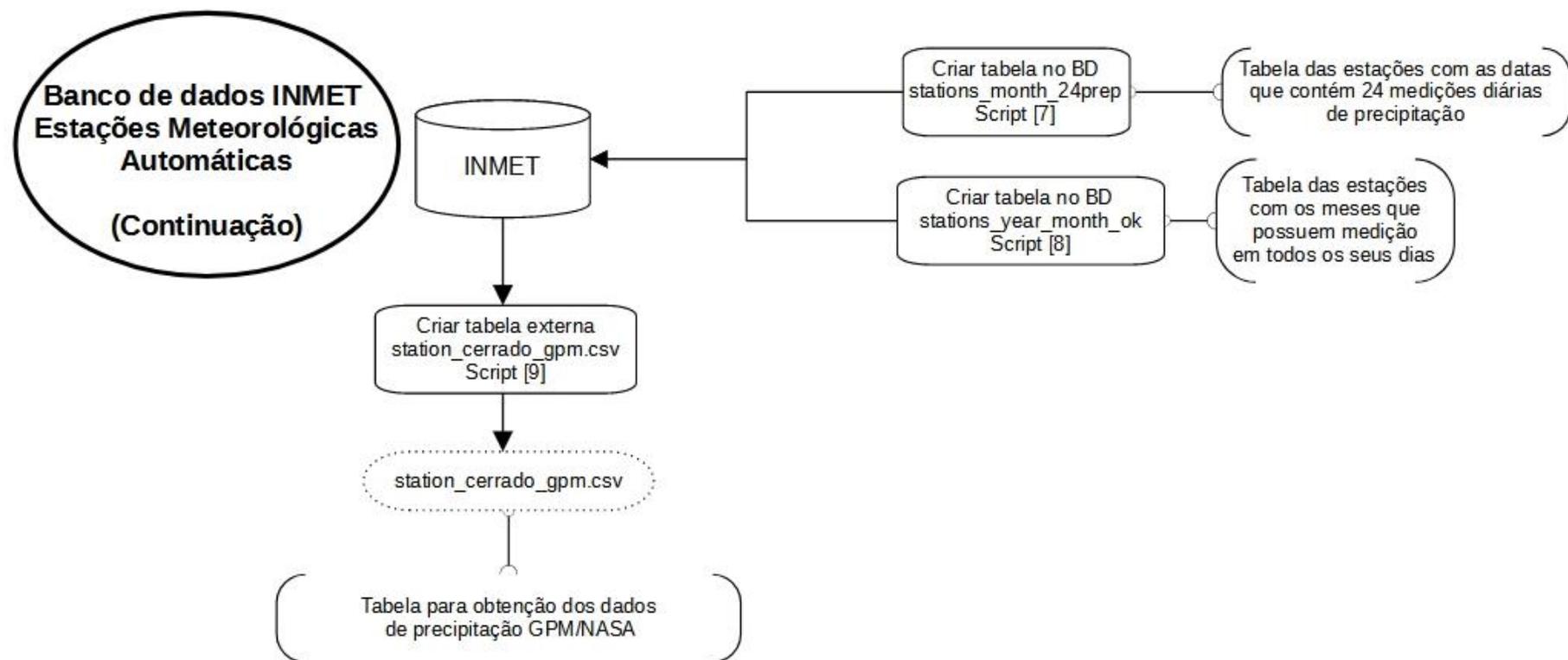


Documento Explicativo do Fluxograma:
https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/blob/main/cap_03/fluxo_processamento_prep_inmet-gpm.odt

Exemplo de nomenclatura:
 [1] INMET_CO_DF_A001_BRASILIA_07-05-2000_A_31-12-2000.CSV

Scripts disponíveis em Motta (2020)\Utilitários:
 [1] wget e unzip (Utilitário do Linux)
 [2] inmet-csv2tables.py
 [3] sqlite3 (Utilitário)
 [4] station_cerrado_geom.sql
 [5] stations_cerrado_prep.sql
 [6] stations_cerrado_prep_ajust.sql

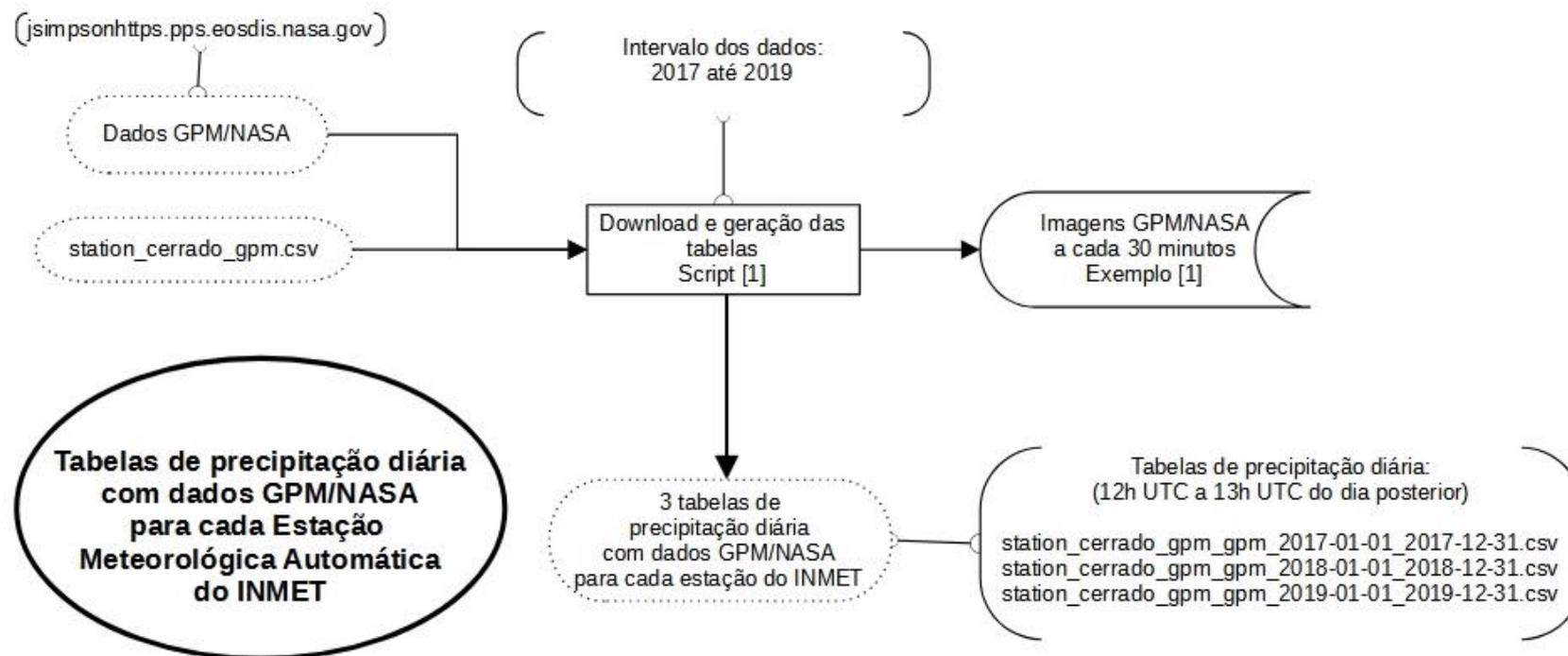
APÊNDICE A - Fluxograma dos *scripts* empregados no capítulo e disponíveis em Motta (2020) (continuação)



Documento Explicativo do Fluxograma:
https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/blob/main/cap_03/fluxo_processamento_prep_inmet-gpm.odt

Scripts disponíveis em Motta (2020):
 [7] stations_month_24prep.sql
 [8] stations_year_month_ok.sql
 [9] comando SQL p/ exportar tabela

APÊNDICE A - Fluxograma dos *scripts* empregados no capítulo e disponíveis em Motta (2020) (continuação)



Exemplo de nomenclatura:

[1] 3B-HHR-L.MS.MRG.3IMERG.20061222-S100000-E102959.0600.V06B.30min.tif

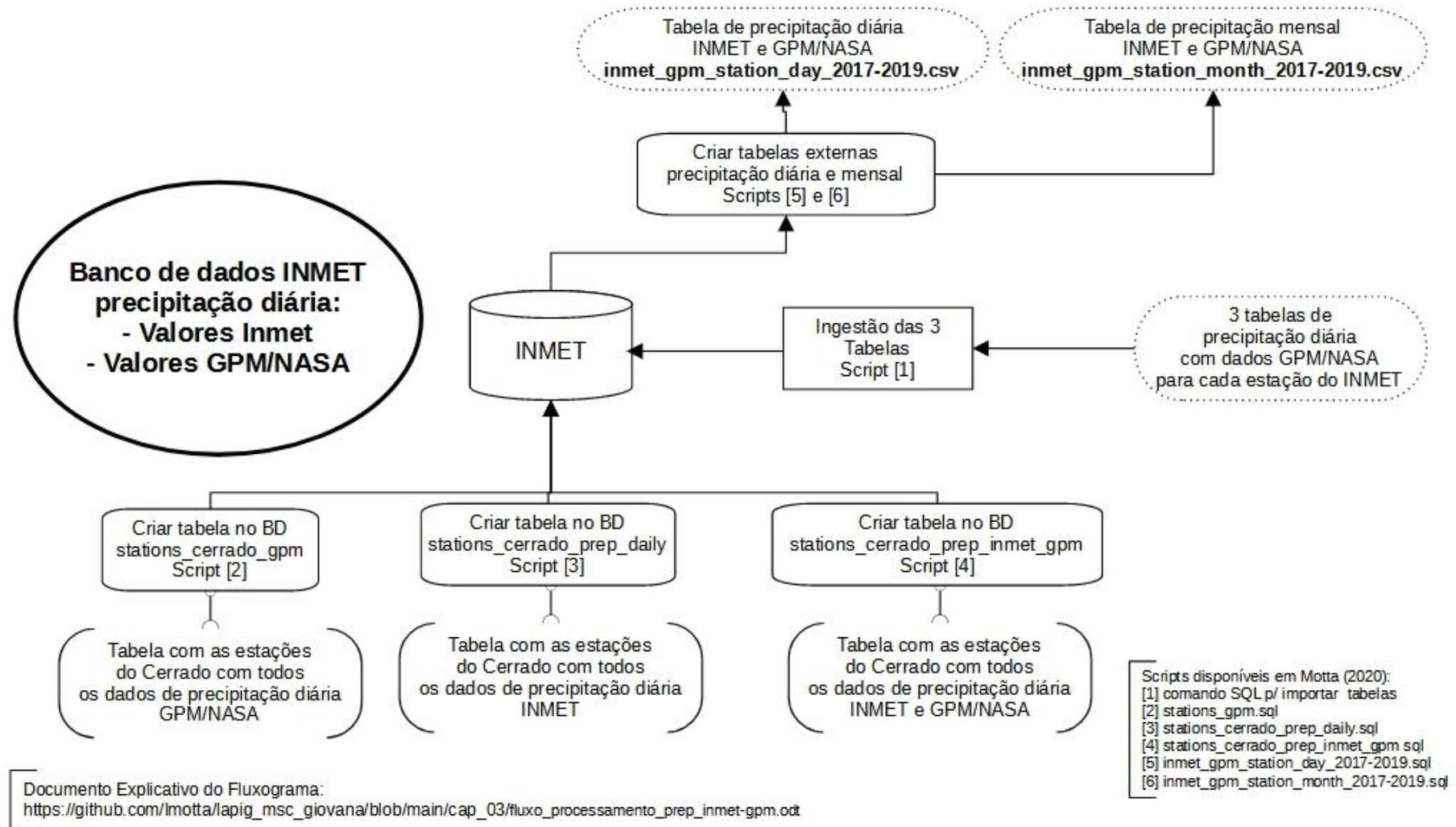
Scripts disponíveis em Motta (2020):

[1] daily_precipitation_gpm_html.py

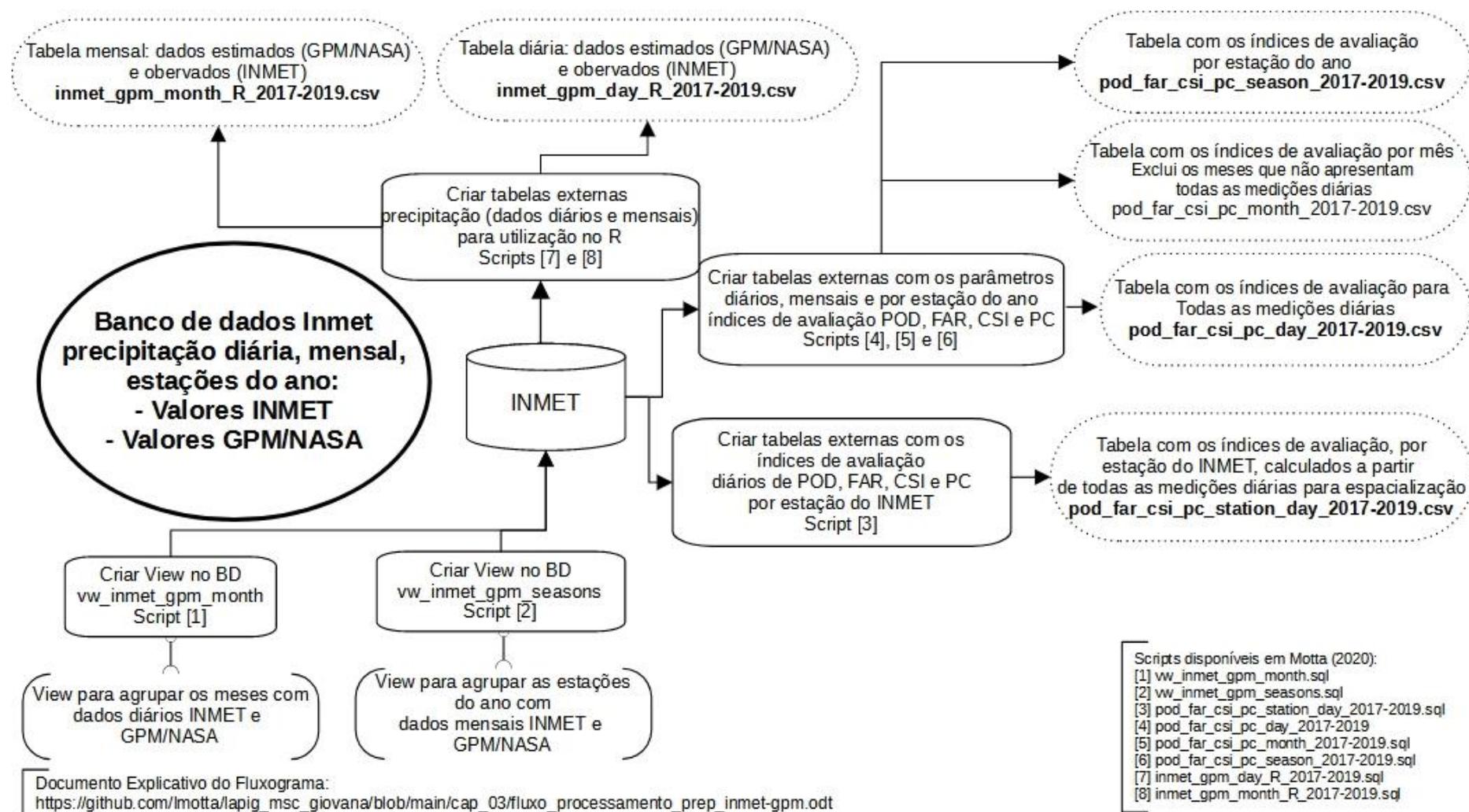
Documento Explicativo do Fluxograma:

https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/blob/main/cap_03/fluxo_processamento_prep_inmet-gpm.odt

APÊNDICE A - Fluxograma dos *scripts* empregados no capítulo e disponíveis em Motta (2020) (continuação)



APÊNDICE A - Fluxograma dos *scripts* empregados no capítulo e disponíveis em Motta (2020) (continuação)



CAPÍTULO IV - TENDÊNCIAS ESPAÇO-TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO NO BIOMA CERRADO NO PERÍODO 2000-2019 E SUAS RELAÇÕES COM USO E COBERTURA DA TERRA

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo identificar, para o período 2000-2019, a existência de áreas com tendência de precipitação no bioma Cerrado e sua relação com as classes predominantes de uso e cobertura da terra. Para isso, o foco foi dado para aquelas áreas que não apresentaram mudanças de uso e cobertura de terras por no mínimo 20 anos (áreas estáveis). O estudo foi baseado nos dados mensais de precipitação obtidos pelo sistema *Global Precipitation Measurement (GPM) IMERG Final Run*. O teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall foi empregado para avaliação da tendência, enquanto o estimador Sen's Slope foi utilizado para avaliação da magnitude da tendência. Considerando todos os pixels do bioma Cerrado, para o período de 2000 a 2019, foi identificada tendência significativa negativa de precipitação para o mês de dezembro com Sen's slope, na ordem de 3,29 mm/mês. Anomalias na precipitação também foram identificadas nesse período, as quais, em sua maioria, coincidiram com a fase de neutralidade entre eventos ENOS El Niño e La Niña. Foi possível identificar que a estação seca no bioma está sendo intensificada, ocorrendo tendências significativas negativas principalmente nos meses de seca no Cerrado (maio a setembro), com Sen's Slope de até -9,1 mm/mês. No mês de agosto, tais tendências cobriram extensa área no estado de Goiás e DF, com valor de Sen's Slope chegando a -1,55 mm/mês. Na região norte do bioma, no mês de junho, foram identificadas no estado do Maranhão tendências significativas negativas que alcançaram -9,1 mm/mês, assim como nas regiões oeste (Mato Grosso) e sudeste do bioma (Minas Gerais), no mês de julho, alcançando -3,68 mm/mês. Com o objetivo de permitir o cruzamento entre a informação espaço-temporal de tendência de precipitação e áreas estáveis de uso e cobertura da terra, com no mínimo vinte anos na mesma cobertura/uso, foi preciso conjugar as informações das tendências mensais de precipitação em um único mapa, intitulado "mapa simplificado de tendência de precipitação". A partir dele foram realizados cruzamentos em dois níveis, sendo o primeiro nível uso antrópico e cobertura natural (áreas estáveis) e o segundo nível classes predominantes de uso antrópico: agricultura e pecuária (áreas estáveis) e de cobertura natural: formações florestal e savânica (áreas estáveis). De acordo com a metodologia adotada nesse estudo, no primeiro nível de cruzamento, as áreas de cobertura natural que apresentaram tendência significativa negativa ocuparam 19,86% (393.768 km²) do bioma Cerrado, com média Sen's slope de -2,58 mm/mês. Já áreas de uso antrópico ocuparam 12,31% do bioma (244.101 km²) do Cerrado e apresentaram -2,55 mm/mês de precipitação. As médias dos valores para áreas positivas foram muito próximas para ambos. Já no segundo nível de cruzamento, que considerou as classes predominantes em relação às áreas que apresentaram tendências significativas negativas de precipitação no bioma Cerrado, foi possível identificar que 10,10% (200.257 km²) se localizaram em formação savânica. Em seguida, as áreas de pastagem ocuparam 9,14% (181.291 km²) das regiões que apresentaram essa tendência, seguidas de formação florestal – classe de cobertura natural - (6,03%; 119.642 km²) e agricultura (2,02%, 40.059 km²). Já as áreas que apresentaram tendências significativas positivas de precipitação (apenas 5,43% do Cerrado) são ocupadas por pastagens (1,97%; 39.156 km²), seguida de formação savânica (1,11%; 21.293 km²). No que se refere aos valores médios de decréscimo de precipitação das áreas com tendência significativa negativa, a classe que apresentou o maior

valor de Sen's Slope foi agricultura (-3,27 mm/mês), seguida de formação florestal, pastagem e formação savânica: -2,71 mm/mês, -2,35 mm/mês e -2,26 mm/mês, respectivamente. Já em relação ao valor médio de acréscimo de precipitação das áreas com tendência significativa positiva, a agricultura apresentou o maior valor (5,60 mm/mês), seguida de pastagem (5,38 mm/mês), formações florestal e savânica, com 5,17 mm/mês e 4,54 mm/mês, respectivamente. As relações entre decréscimo e acréscimo de precipitação e tais classes de uso e cobertura da terra provavelmente se dão devido às características intrínsecas das mesmas e interações com o ambiente ao longo dos anos. As causas das ocorrências das anomalias na precipitação no bioma não foram aprofundadas nesta pesquisa, visando tão somente a análise espaço-temporal para determinação das áreas de ocorrência de tendência de precipitação, e assim elucidar considerações sobre suas relações com uso e cobertura da terra no bioma. Dessa forma, estudos mais específicos para este fim são incentivados, com a possibilidade de aplicação de outras fontes de dados e variáveis climáticas, considerando, ainda, a influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), sistemas de alta pressão atmosférica como a Alta da Bolívia, eventos extremos de precipitação e seca, além do aumento da temperatura no bioma e relações solo-planta-clima.

Palavras-chave: Tendência de precipitação, bioma Cerrado, teste Mann-Kendall, GPM, uso e cobertura da terra.

ABSTRACT

The current study aims to identify, for the 2000-2019 period, the existence of areas of precipitation tendency in the *Cerrado* biome and their relationship with the predominant classes of land use and land cover. For this, the focus was given to those areas that did not show changes in land use and land cover for at least 20 years (stable areas). The study was based on monthly precipitation data obtained by the Global Precipitation Measurement (GPM) IMERG Final Run system. The Mann-Kendall nonparametric statistical test was employed to evaluate the trend, while the Sen's Slope estimator was used to assess the magnitude of the trend. Considering all pixels of the *Cerrado* biome, for the period from 2000 to 2019, a significant negative precipitation trend was identified for the month of December with Sen's slope, in the order of 3.29 mm/month. Anomalies in precipitation were also identified during this period, which coincided with the neutrality phase between ENOS El Niño and La Niña events. It was possible to identify that the dry season in the biome is being intensified, with significant negative trends occurring mainly in the dry months of the *Cerrado* (May to September), with Sen's Slope of up to -9.1 mm/month. In August, such trends covered an extensive area in the state of Goiás and DF, with a Sen's Slope value reaching -1.55 mm/month. In the northern region of the biome, in June, significant negative trends were identified in the state of Maranhão, reaching -9.1 mm/month, as well as in the northwest (Mato Grosso) and southeast regions of the biome (Minas Gerais), in July, reaching -3.68 mm/month. To allow the crossover between the space-time information of precipitation trend and stable areas of land use and land cover, with at least twenty years in the same coverage/use, it was necessary to combine the information of the monthly precipitation trends in a single map, entitled "simplified map of precipitation trend". From it crossovers were performed on two levels, the first level being anthropic use and natural coverage (stable areas) and the second level being predominant classes of anthropic use: agriculture and livestock (stable areas) and natural cover: forest and savannah formations (stable areas). According to the methodology adopted in this study, in the first level of crossover, the areas of natural

cover that presented a significant negative trend occupied 19.86% (393,768km²) of the *Cerrado* biome, with an average Sen's slope of -2.58 mm/month. On the other hand, areas of anthropic use occupied 12.31% of the biome (244,101km²) of the *Cerrado* and presented -2.55 mm/month of precipitation. The average values for positive areas were very close for both. In the second level of crossing, which considered the predominant classes in relation to the areas that presented significant negative precipitation trends in the *Cerrado* biome, it was possible to note that 10.10% (200,257 km²) were in savannah formation. Then, the pasture areas occupied 9.14% (181,291km²) of the regions that presented this trend, followed by forest formation – a natural cover class – (6.03%; 119.642 km²) and agriculture (2.02%; 40,059km²). On the other hand, the areas that showed significant positive precipitation trends (only 5.43% of the *Cerrado*) are occupied by pastures (1.97%; 39,156km²), followed by savannah formation (1.11%; 21,293 km²). Regarding the average values of precipitation decrease of areas with a significant negative trend, the class with the highest Sen's Slope value was agriculture (-3.27 mm/month), followed by forest formation, pasture, and savannah formation: -2.71 mm/month, -2.35 mm/month and -2.26 mm/month, respectively. Concerning the average values of precipitation increase of areas with a significant positive trend, agriculture showed the highest value (5.60 mm/month), followed by pasture (5.38 mm/month), forest and savannah formations, with 5.17 mm/month and 4.54 mm/month, respectively. The relationship between decrease and increase in precipitation and such classes of land use and land cover are probably due to their intrinsic characteristics and interactions with the environment over the years. The causes of the occurrence of anomalies in the biome were not further explored in this study, using only the space-time analysis to determine the areas of occurrence of precipitation tendency, and thus elucidate considerations about its relations with land use and land cover in the biome. Thus, more specific studies for this purpose are encouraged, with the possibility of applying other data sources and climatic variables, also considering the influence of the South Atlantic Convergence Zone (SACZ), Intertropical Convergence Zone (ITCZ), the South American Monsoon System (SAMS), high atmospheric pressure systems such as the Alta de Bolivia, extreme events of precipitation and drought, in addition to the increase in temperature in the biome and soil-plant-climate relations.

Keywords: Precipitation trends, GPM, Cerrado biome, Mann-Kendall test, land use and land cover.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais apresentam-se como um dos mais importantes temas da ciência na atualidade, constituindo-se em um grande desafio, não apenas ambiental, mas principalmente político, econômico e cultural. No âmbito da ciência, podem ser identificadas três correntes distintas sobre o tema: catastrofista – a dominante, a cética ou negacionista - minoritária, e a crítica, ainda ínfima. De acordo com a primeira corrente, as mudanças climáticas são decorrentes principalmente da industrialização e do desmatamento, enquanto a segunda afirma que essas mudanças estão relacionadas com a resposta natural dos ciclos do

planeta Terra. A terceira corrente busca levantar questões para a compreensão científica do fenômeno (MENDONÇA, 2021).

O Grupo de Trabalho I do Painel Intergovernamental sobre o Clima (IPCC), em suas contribuições para o Sexto Relatório de Avaliação - IPCC AR6, WG1 (IPCC, 2021a) - é enfático ao afirmar que é irrefutável que a influência humana aqueceu a atmosfera, o oceano e a terra e que mudanças generalizadas e rápidas na atmosfera, oceano, criosfera e biosfera ocorreram. Do aquecimento de 1,09 °C observado entre 2011-2020 em comparação com o período pré-industrial (1850-1900), 1,07 °C provavelmente deriva de ações antropicas, como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento. Cada uma das últimas quatro décadas foi mais quente que todas as anteriores desde 1850. Entre 2011-2020, o aquecimento da temperatura sobre os continentes foi, em média, de 1,59 °C, e de 0,88 °C sobre os oceanos (ANGELO e MARENGO, 2021).

O AR6 emprega cinco cenários de emissões, o CMIP6 (sigla em inglês para “Projeto de Intercomparação de Modelos Climáticos Versão 6”): dois de baixas emissões de Gases do Efeito Estufa (GEEs) (SSP1-1.9 e SSP1-2.6), um de médias emissões (SSP2-4.5) e dois de altas emissões (SSP3-7 e SSP5-8.5). Em todos eles, o limite pactuado no Acordo de Paris de 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais para aumento da temperatura global deve ser ultrapassada entre 2021 e 2040, embora a probabilidade que isso ocorra seja maior nos cenários de mais alta emissão (ANGELO e MARENGO, 2021).

Especificamente na América do Sul, são amplamente observados e projetados aumentos da temperatura média e uma mudança em direção ao calor extremo. A projeção para a precipitação média é que se apresente num padrão dipolo com aumentos no noroeste e sudeste da América do Sul; reduções no nordeste e sudoeste; e maiores reduções no norte desse continente. Ainda no nordeste da América do Sul, observa-se que aridez e as secas agrícolas e ecológicas estão aumentando. Prevê-se também o aumento da ocorrência de incêndios no sul desse continente (IPCC, 2021b).

O aquecimento global acarreta impactos profundos no planeta, como a extinção de espécies animais e vegetais, alteração na frequência e intensidade de chuvas, elevação do nível do mar por meio do derretimento de neve e geleiras e intensificação de fenômenos meteorológicos, isto é, tempestades severas, inundações, vendavais, ondas de calor e secas prolongadas, entre outros (O’GORMAN, 2015; ZANDONADI *et al.*, 2016; ALIZADEH-CHOOBARI e NAJAFI, 2018; INPE, 2021a).

Seguindo o mesmo modelo de organização em Grupos de Trabalhos (GTs) do IPCC, o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) lançou três volumes baseados nas

contribuições dos GTs à temática das mudanças climáticas (PBMC, 2013a, 2014a), impactos, vulnerabilidade e adaptação (PBMC, 2013b, 2014b) e mitigação das mudanças climáticas no Brasil (PBMC, 2013c, 2014c). Em linhas gerais, as projeções indicam diminuição significativa das chuvas na maior parte do Centro-Oeste, Norte e Nordeste brasileiro. Os cenários climáticos futuros apontam para o aumento de eventos extremos de secas e estiagens prolongadas, principalmente nos biomas Amazônia, Cerrado e Caatinga, sendo que tais mudanças poderão se acentuar a partir da metade e final do século XXI. No que se refere à temperatura do ar, todas as projeções indicam condições futuras de clima mais quente. Tais projeções são simuladas para os períodos de verão (dezembro a fevereiro) e inverno (junho a agosto), a partir de dois cenários futuros de aquecimento global, com baixa e alta emissão de gases de efeito estufa (GEE) (PBMC, 2013a).

Especificamente para o bioma Cerrado, até 2040, a previsão é de aumento de 1 °C na temperatura do ar e diminuição de 10% a 20% na chuva. Entre 2041 e 2070, estima-se aumento entre 3 °C e 3,5 °C na temperatura do ar e redução de 20% a 35% na precipitação. Já para o final do século (2071-2100), as simulações indicam aumento de temperatura entre 5 °C e 5,5 °C e diminuição da chuva entre 35% a 45%, além do aumento nas variações sazonais. As mudanças percentuais na chuva e temperatura são relativas aos valores atuais (final do século XX) (PBMC, 2013a).

Hofmann *et al.* (2021), ao analisar a tendência das temperaturas máxima e mínima, umidade absoluta e depressão do ponto de orvalho durante quatro meses da estação seca no bioma Cerrado, para o período 1961-2019, encontraram aumentos mensais de 2,2 °C a 4,0 °C nas temperaturas máximas e de 2,4 °C a 2,8 °C nas temperaturas mínimas. Embora tenham registrado uma tendência ascendente em umidade absoluta, a umidade relativa do ar foi reduzida em ~15%. Se essas tendências forem mantidas, o gradual aquecimento do ar tornará o resfriamento noturno insuficiente para atingir o ponto de orvalho no início das horas da noite. Portanto, haverá redução progressiva tanto na quantidade quanto na duração da queda de orvalho noturno, que é a principal fonte de água para numerosas plantas e espécies animais do Cerrado brasileiro durante a estação seca.

Clima e agricultura apresentam uma intrínseca relação, pois a agricultura é fortemente influenciada por fatores climáticos como chuva, temperatura, umidade, geada, ventos e radiação solar, de tal modo que os efeitos das mudanças climáticas se configuram como um dos principais fatores de risco para as atividades agrícolas. Mudanças no ciclo hidrológico e aumento da temperatura podem acarretar ainda em alterações da fenologia das culturas e em redução da produtividade das atividades agropecuárias (PBMC, 2013b).

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e instituições parceiras têm desenvolvido pesquisas de zoneamento agroclimático para diversas culturas, as quais podem auxiliar os produtores e os tomadores de decisão a criarem estratégias de adaptação para áreas que porventura se tornem impróprias para a produção de grãos no futuro. Tais estratégias devem contemplar um planejamento amplo de adaptação, passando pelo desenvolvimento de variedades agrícolas adaptadas e formas de manejo adequadas aos contextos climáticos futuros (PBMC, 2013b). Dessa forma, é de suma importância a identificação espaço-temporal das mudanças climáticas ocorridas no bioma Cerrado e o entendimento de suas relações com o uso e cobertura da terra, a fim de subsidiar a implementação de políticas públicas e medidas mitigadoras.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo identificar, para o período 2000-2019, a existência de áreas com tendência de precipitação no bioma Cerrado e sua relação com as classes predominantes de uso e cobertura da terra. Para isso, foco foi dado para aquelas áreas que não apresentaram mudanças de uso e cobertura de terras por no mínimo 20 anos (áreas estáveis). O estudo foi baseado nos dados mensais de precipitação obtidos pelo sistema *Global Precipitation Measurement (GPM) IMERG Final Run*. O teste estatístico não-paramétrico de Mann-Kendall foi empregado para avaliação da tendência, enquanto o estimador Sen's Slope foi utilizado para avaliação da magnitude da tendência.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nas seções seguintes, serão apresentadas a área de estudo da pesquisa, isto é, o bioma Cerrado, os passos metodológicos para identificação das áreas de tendência de precipitação, as análises mensais tanto em nível de pixel como em nível de bioma, além do cruzamento dessas informações de precipitação com os dados de uso e cobertura da terra produzidos pelo projeto MapBiomias. As diferentes classes espectrais mapeadas por esse projeto foram agrupadas nas classes agricultura e pastagem (uso antrópico) e formações florestal e savânica (cobertura natural).

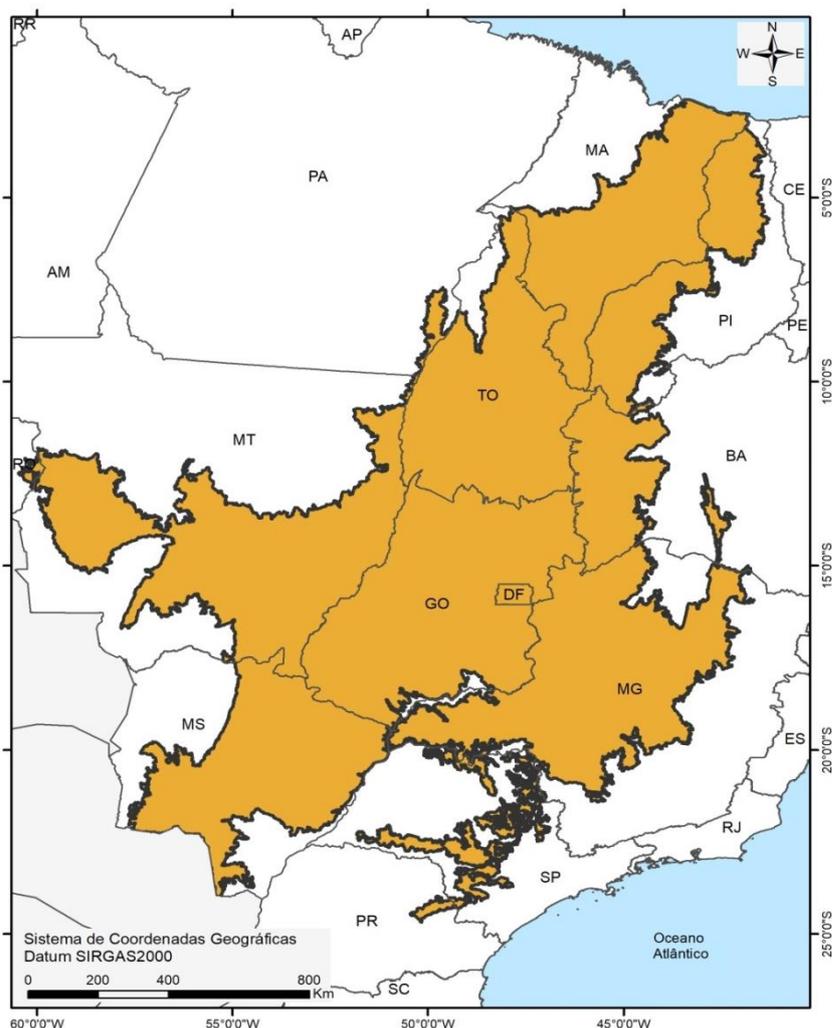
2.1 Área de estudo

A área de estudo selecionada foi o bioma Cerrado (Figura 25), conforme limite definido pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE) na escala 1:250.000 (IBGE, 2019). O Cerrado está presente em 23,3% do território nacional, totalizando 1.983.017 km²,

englobando 12 estados e o Distrito Federal (DF), fazendo limite com todos os outros biomas do país, exceto o Pampa (IBGE, 2019). Nele, encontram-se as nascentes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Araguaia/Tocantins, São Francisco e Prata) (ASSAD *et al.*, 2020),

As culturas agrícolas anuais do Cerrado correspondem a 40% da produção nacional, possuindo ainda participação relevante na produção de carne bovina, suína e avícola (BOLFE *et al.*, 2020), com destaque para produção agrícola intensiva e altamente mecanizada. O Cerrado é considerado um dos *hotspots* mundiais da preservação ambiental por ostentar o título de savana com maior biodiversidade do planeta (MYERS *et al.*, 2000). Apesar disso, mais de 50% da vegetação nativa desse bioma já foi suprimida e convertida em outros tipos de uso, principalmente o agropecuário (BRASIL, 2015).

Figura 25 – Mapa de localização da área de estudo (bioma Cerrado, em laranja) no Brasil, com identificação das unidades federativas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

2.2 Dados de precipitação

Global Precipitation Measurement (GPM) é uma missão lançada em 2014 pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), com o objetivo de estimar a precipitação em escala global. Com resolução espacial de $0,1^\circ$ (~11 km no Equador) e de 30' em sua melhor resolução temporal, as informações provenientes dessa missão têm sido amplamente empregadas no meio acadêmico, mostrando bons resultados na estimativa da precipitação. O principal produto dessa missão é o *IMERG Final Run*, que emprega um ajuste que combina dados multisatelitários com medidas de estações terrestres de referência/controlado (GADÊLHA, 2018; NASA, 2021a, 2021b).

Os dados de precipitação empregados nesse estudo são provenientes do produto GPM *IMERG Final Run*, versão 06B, formato GeoTIFF, com frequência mensal, obtidos a partir do mês de junho de 2000 até o ano de 2019. Tais dados são disponibilizados com 3,5 meses de latência e resolução espacial de $0,1^\circ$ na linha do equador.

2.3 O fenômeno El Niño e La Niña e sua influência na área de estudo

Eventos El Niño e a La Niña fazem parte de um mesmo fenômeno atmosférico-oceânico que ocorre no Oceano Pacífico Equatorial (e na atmosfera adjacente), denominado de El Niño Oscilação Sul (ENOS). ENOS refere-se às situações nas quais o Oceano Pacífico Equatorial está mais quente (El Niño) ou mais frio (La Niña) do que a média normal histórica, ambos os casos relacionados às anomalias da temperatura de superfície do mar (TSM). A mudança na temperatura do Oceano Pacífico Equatorial acarreta efeitos globais na temperatura e precipitação. O ENOS é analisado por meio de índices como o Índice Oceânico Niño (ION ou *Oceanic Niño Index* – ONI, em inglês), definido pela média móvel trimestral da anomalia de TSM para a região do Niño, por, no mínimo, cinco meses consecutivos. Anomalias maiores que $0,5^\circ\text{C}$ estão associados a El Niño e inferiores a $-0,5^\circ\text{C}$ estão associados a La Niña. Assim, os eventos de ENOS podem apresentar uma fase positiva, negativa ou neutra (INPE, 2021b).

A classificação proposta pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos (NOAA) descreve os limites da TSM para que um evento seja reconhecido como ENOS, apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 – Classificação de índices ENOS.

Índice ENOS (ONI)	Classificação
0,5 – 0,9	Fraco
1,0 – 1,4	Moderado
1,5 – 1,9	Forte
> 2,0	Muito Forte

Fonte: Silva (2018).

Em anos de La Niña, a região Norte e o setor norte da região Nordeste apresentam aumento na frequência e volume das chuvas durante o verão. Nas regiões Sudeste e Sul ocorre diminuição de chuvas, aumento na temperatura e intensificação do clima seco (AGÊNCIA BRASIL, 2021).

Os efeitos do fenômeno El Niño no Brasil também variam de acordo com a região. Na região Norte ocasiona diminuição da precipitação e secas, enquanto no Nordeste ocasionam secas severas. Na região Sul, ocasiona precipitação abundante na primavera, com chuvas intensas principalmente de maio a junho. Nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, não há evidências de efeitos acentuados na precipitação (INPE, 2021).

Alguns estudos apontam a influência do aumento ou diminuição (anomalias) da TSM nas variações de precipitação no bioma Cerrado. Marcuzzo e Romero (2013) concluíram que El Niño e La Niña exercem influência relativa e sazonal na precipitação pluviométrica máxima diária no estado de Goiás. Segundo Silva (2018), existem relações entre a ocorrência do fenômeno El Niño de intensidade muito forte com a precipitação no bioma Cerrado. Foram observadas anomalias negativas e positivas de precipitação, ocorridas ao longo da série histórica analisada (1980 a 2010 e meses da ocorrência do ENOS 2015-16) e nos registros de 1982-1983, 1997-1998 e 2015-2016 - eventos ENOS considerados muito fortes, principalmente nas áreas mais ao sul do bioma, onde tende a ocorrer anomalias positivas de precipitação. Já grande parte da região central do Cerrado, seguindo para oeste e parte do sudeste do bioma não apresentaram anomalias significativas de precipitação, enquanto a área situada ao norte do bioma apresentou valores muito abaixo da média, estiagem presente por circunstância da manifestação e atuação do fenômeno El Niño nos anos analisados.

Campos e Chaves (2020) apontaram, como possível causa para a tendência de redução da precipitação no bioma, a influência das anomalias de TSM que alteram os padrões do vento, reduzindo o transporte de umidade para o continente, e conseqüentemente dificultando a formação de nuvens. Esses autores indicaram ainda que o aumento da temperatura do oceano causado pelo aquecimento global nas próximas décadas pode intensificar essas anomalias, reduzindo o nível de precipitação no bioma.

2.4 Métodos

Primeiramente, foram realizadas análises considerando a média da precipitação acumulada mensal para todos os pixels do produto GPM referentes ao bioma Cerrado. Os valores de chuva (total acumulado) foram extraídos para cada mês considerando todo o período de 06/2000 a 12/2019, calculando-se, em seguida, as possíveis tendências. Tomou-se como base os dados mensais de precipitação GPM *Imerg Final Run*, Versão 06B - total acumulado - em formato GeoTIFF, descritos na Seção 2.2. As anomalias e análises de tendências foram calculadas no programa estatístico R (versão 4.0.4) (R CORE TEAM, 2021). As análises de tendências foram realizadas por meio das funções "mk.test" e "sens.slope" disponíveis no pacote "Trend" (POHLERT, 2018). O nível de significância adotado para todas as análises foi de 95% ($p \leq 0,05$).

Outras bases que apresentam informações históricas de diferentes variáveis climáticas para as superfícies terrestres globais são disponibilizadas gratuitamente, porém, é preciso atentar-se para o fato de que algumas delas não são recomendadas para serem empregadas diretamente em avaliações independentes de tendências, como é o caso da base TerraClimate, conforme apontado na seção “*Data Limitations*” em <http://www.climatologylab.org/terraclimate.html>.

A fim de determinar a distribuição espaço-temporal de tendências de precipitação e relacioná-las ao uso e cobertura da terra no bioma, foi elaborado um mapa simplificado de tendência de precipitação, definidas áreas estáveis de uso e cobertura da terra (com 20 anos ou mais anos sem mudanças) em 2 níveis e feito o cruzamento entre esses mapas. Para tanto, foram elaborados *scripts* na plataforma *Google Earth Engine* (GORELICK, 2017), *scripts* utilizando linguagem de programação Python, bibliotecas GDAL (GDAL/OGR CONTRIBUTORS, 2021), “NumPY” (HARRIS *et al.*, 2020) e “pyMannKendall” (HUSSAIN e MAHAMUD, 2019), os quais estão disponíveis para acesso público em:

- https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/tree/main/cap_04/motta_2021a (MOTTA, 2021a);
- https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/tree/main/cap_04/motta_2021b (MOTTA, 2021b);
- https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/tree/main/cap_04/motta_2021c (MOTTA, 2021c);
- https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/tree/main/cap_04/motta_2021d (MOTTA, 2021d).

Os fluxogramas de utilização dos referidos *scripts* estão descritos nos Apêndices A ao D deste capítulo. O Apêndice A se refere aos *scripts* disponibilizados em Motta (2021a), o B em Motta (2021b), o C em Motta (2021c) e o D em Motta (2021d).

2.4.1 Análise com todos os pixels – bioma Cerrado

Nessa etapa, foram tomadas como base as médias acumuladas mensais de precipitação para todos os pixels do bioma Cerrado. As análises foram realizadas considerando-se o bioma como um todo, identificando-se as anomalias significativas de precipitação ao longo do período do 2000-2019.

2.4.1.1 Análise estatística das anomalias de precipitação

Com o objetivo de investigar a relação da média mensal da precipitação acumulada em relação à média daquele mês ao longo do período analisado (2000-2019) para todos os pixels do bioma Cerrado, foram calculadas as anomalias de precipitação normalizadas pelo desvio-padrão (Eq. 17) (ARAGÃO *et al.*, 2007; SILVA JÚNIOR, 2018). Estudos anteriores utilizaram essa metodologia para identificar anomalias em séries históricas de precipitação, incêndios, índices de vegetação e radiação solar (ARAGÃO *et al.*, 2007; SALESKA *et al.*, 2007; ANDERSON *et al.*, 2010; SILVA JÚNIOR, 2018).

$$X_{Anomaly} = \frac{(\bar{X}_i - \bar{X}_{2000-2019})}{\sigma_{2000-2019}} \quad (17)$$

Onde: \bar{X}_i é a média da precipitação acumulada no mês do ano em análise; \bar{X} é a média mensal daquele mês no período 2000-2019; e σ é o desvio-padrão dessa série temporal.

Anomalias significativas (95% de intervalo de confiança) foram consideradas menores ou iguais a 1,96 e maiores ou iguais a 1,96 desvio-padrão (ANDERSON *et al.*, 2010; SILVA JÚNIOR, 2018). A média (\bar{X}) e o desvio-padrão (σ) relativos ao período analisado foram calculados de acordo com as Eqs. 18 e 19, respectivamente.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X}_i)}{n} \quad (18)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (19)$$

2.4.2 Análise pixel a pixel

2.4.2.1 Definição de áreas com tendência de precipitação

Nessa etapa, também foram tomados como base os dados mensais de precipitação GPM *Imerg Final Run*, Versão 06B - total acumulado - em formato GeoTIFF. Para detecção da existência de tendências das séries históricas de precipitação, foi utilizado o teste Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975). A magnitude das alterações foi quantificada pelo estimador Sen's Slope (SEN, 1968). Esses métodos não-paramétricos não exigem que os dados estejam em conformidade com uma distribuição específica, são menos sensíveis a *outliers* e têm sido amplamente empregados para quantificar as tendências em séries temporais de dados (MOURATO *et al.*, 2010; AHMAD *et al.*, 2015; DEBORTOLI *et al.*, 2015; SANOGO *et al.*, 2015; BISHT *et al.*, 2018, SILVA JÚNIOR, 2018; CAMPOS e CHAVES, 2020).

A hipótese nula (H0) é que não há tendência significativa na série de dados, com observações independentes e distribuídas de forma idêntica. A hipótese alternativa (H1) é de que há tendência crescente ou decrescente significativa (SILVA JÚNIOR, 2018; CAMPOS e CHAVES, 2020). Dessa forma, considerando-se que uma série temporal de (n) dados, onde cada valor da série (x_i) é comparado com o valor subsequente (x_j), a soma dos sinais (sgn) de todas as diferenças consideradas representa a variável estatística “S” do teste de Mann-Kendall (Eq. 20).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sgn(x_j - x_i) \quad (20)$$

Em que:

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} +1; & se \ x_j > x_i \\ 0; & se \ x_j = x_i \\ -1 & se \ x_j < x_i \end{cases}$$

A variância da série ($Var(S)$) é calculada a partir da Eq. 21, na qual t_i representa a quantidade de repetições de uma extensão i . Por exemplo, uma série histórica com quatro valores iguais entre si apresenta uma repetição de extensão igual a 4, ou seja, $t_i = 1$ e $i = 4$.

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i)(i-1)(2i+5)}{18} \quad (21)$$

A presença de tendência estatisticamente significativa na série temporal é avaliada através do “ S ” e do valor de Z_{MK} , que é obtido com base no sinal de S , por meio da Eq. 22. Essa estatística é usada para testar a hipótese nula de que não existe nenhuma tendência. Os valores positivos/negativos de Z_{MK} indicam tendência crescente/decrescente.

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & se S > 0 \\ 0; & se S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & se S < 0 \end{cases} \quad (22)$$

A significância estatística foi calculada pelo teste p-valor e foram consideradas apenas as áreas que apresentaram tendência significativa, ao nível de 5% de significância ($p \leq 0,05$) bioma por meio de *scripts* que empregam linguagem de programação Python, bibliotecas GDAL, “NumPY” e “pyMannKendall” (MOTTA, 2021a; Apêndice A). Esses testes foram empregados para todo o período de análise, pixel a pixel, para o bioma e para as médias mensais do bioma como um todo (todos os pixels) no *software* R. As análises mensais de tendência foram compiladas para todo o período 2000-2019, considerando-se as seguintes classes: tendência negativa, neutra (igual a zero), positiva e áreas de alternância de tendências. Esse mapa foi denominado de “mapa simplificado de tendência de precipitação”.

Algumas regras foram adotadas para a elaboração desse mapa: se o pixel não apresentava tendência significativa e migrou para uma das três primeiras classes descritas em ao menos em um mês, foi considerado como sendo daquela classe; se alternou de não significativo para uma das três primeiras classes e, posteriormente, para outra classe, foi considerado como alternância de tendência; idem para pixels que alternaram entre as classes positiva, negativa e neutra. O Quadro 4 apresenta as regras de cruzamento empregadas para a elaboração desse mapa, as quais foram implementadas em *script* empregando a biblioteca GDAL e linguagem de programação Python (MOTTA, 2021a; Apêndice A).

Quadro 4. Regras consideradas para a elaboração do “mapa simplificado de tendência de precipitação” do bioma Cerrado.

Tendência dos Pixels				
	Sem Significância	Negativo	Positivo	Neutra (igual a 0)
Sem significância	Sem significância	Negativo	Positivo	Neutra
Negativo	Negativo	Negativo	Alternância	Alternância
Positivo	Positivo	Alternância	Positivo	Alternância
Neutra (igual a 0)	Neutra	Alternância	Alternância	Neutra

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Os valores médios gerais de Sen's Slope apresentados para esse mapa e cruzamentos a partir dele foram calculados a partir da média de cada pixel, a fim de se considerar a espacialidade e especificidade dos mesmos.

2.4.2.2 Definição de áreas estáveis em termos de uso e cobertura da terra

Nessa etapa, foram empregados os dados de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomias (SOUZA *et al.*, 2020), coleção 5.0, para o período 1985-2019. Foram consideradas como áreas estáveis, os pixels que se mantiveram com a mesma classe de uso e cobertura da terra durante 20 anos no mínimo. Para tanto, foram consideradas as classes “Uso Antrópico”, “Cobertura Natural” e “Uso Não Definido”, definidas no documento “Códigos das classes da legenda e paleta de cores utilizadas na Coleção 5 do MapBiomias” (Quadro 5).

Quadro 5 - Classes consideradas para uso antrópico, cobertura natural e uso não definido.

Uso Antrópico	Cobertura Natural	Uso Não Definido
Floresta Plantada	Formação Florestal	Outras Áreas não Vegetadas
Pastagem	Formação Savânica	Não Observado
Cana	Mangue	
Mosaico de Agricultura e Pastagem	Campo Alagado e Área Pantanosa	
Infraestrutura Urbana	Formação Campestre	
Mineração	Outras Formações não Florestais	
Aquicultura	Praia e Duna	
Lavoura Perene	Afloramento Rochoso	
Soja	Apicum	
Outras Lavouras Temporárias	Rio, Lago e Oceano	

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

As subdivisões consideradas nesse estudo para “Uso Antrópico” foram as classes predominantes “Agricultura”, a qual englobou as classes “Soja”, “Cana”, “Outras Lavouras Temporárias” e “Lavoura Perene”; e “Pastagem”. Nas subdivisões da “Cobertura Natural”, foram consideradas as classes predominantes “Formação Florestal” e “Formação Savânica”.

Com o objetivo de definir e fazer o *download* das áreas estáveis de uso antrópico e cobertura natural e classes predominantes agricultura, pastagem, formações florestal e savânica, foi elaborado *script* em linguagem JavaScript para ser utilizado na plataforma *Google Earth Engine* (MOTTA, 2021b). *Scripts* auxiliares empregando a biblioteca GDAL e linguagem de programação Python para definição dessas áreas também foram elaborados por Motta (2021c), disponibilizados nos seguintes *links*: https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/tree/main/cap_04/motta_2021b (Apêndice B) e https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/tree/main/cap_04/motta_2021c (Apêndice C deste capítulo).

2.4.2.3 Mapa simplificado de tendência de precipitação por classe de uso e cobertura da terra (áreas estáveis)

Essa análise foi realizada em duas etapas. A primeira consistiu no cruzamento das informações do “mapa simplificado de tendência de precipitação” com as classes estáveis de “Uso Antrópico” e “Cobertura Natural” (1º nível). Em um segundo momento, o “Uso Antrópico” foi subdividido nas classes estáveis predominantes “Agricultura” e “Pastagem” e a “Cobertura Natural” nas classes estáveis predominantes “Formação Florestal” e “Formação Savânica” (2º nível).

Na análise pixel a pixel do bioma, foram elaborados *scripts* empregando linguagem de programação Python, bibliotecas GDAL, “NumPY” e “pyMannKendall” para definição das áreas que apresentaram tendência de precipitação e para o cruzamento dessas informações com o mapa de uso e cobertura da terra, os quais estão descritos e disponibilizados publicamente em Motta (2021d) (Apêndice D).

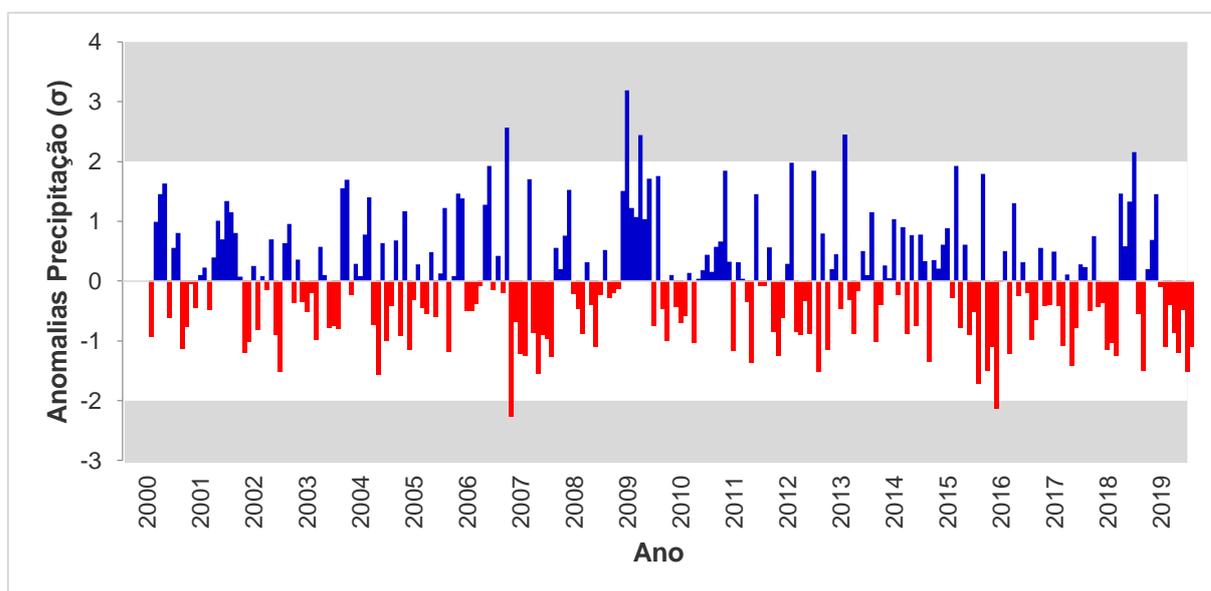
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise para todos os pixels do bioma Cerrado

3.1.1 Anomalias pluviométricas e análise de tendências das médias mensais de precipitação acumulada

As anomalias das médias mensais do total acumulado de chuva no bioma Cerrado no período 2000-2019 são demonstradas na Figura 26.

Figura 26 - Anomalias de precipitação mensais significativas positivas (colunas em azul) e significativas negativas (colunas em vermelho). As mesmas foram calculadas com base na média mensal de todos os pixels do bioma Cerrado.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Anomalias significativas positivas foram identificadas nos meses dos anos abaixo descritos. Estão descritas também a classificação do índice ONI para o período de ocorrência das mesmas (Tabela 21). O índice ONI para os períodos onde ocorreram anomalias foi obtido da seguinte página eletrônica: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php, e a classificação desse índice para os eventos Niños foi baseada no Quadro 3.

Tabela 21 – Períodos que apresentaram anomalias significativas positivas e classificação segundo índice ONI para o período de evento ENOS.

Mês /Ano	Anomalia	Classificação índice ONI para o período de ENOS
Fevereiro / 2007	2,56 σ	Neutra
Maio / 2009	3,19 σ	Neutra
Agosto / 2009	2,44 σ	Neutra
Junho / 2012	1,98 σ	Neutra
Junho / 2013	2,45 σ	Neutra
Novembro / 2018	2,15 σ	El Niño fraco

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Já as anomalias significativas negativas foram identificadas nos anos e meses apresentados na Tabela 22. Estão descritas também a classificação do índice ONI para o período de ocorrência das mesmas.

Tabela 22 – Períodos que apresentaram anomalias significativas negativas e classificação segundo índice ONI para o período de evento ENOS.

Mês /Ano	Anomalia	Classificação índice ONI para o período de ENOS
Março / 2007	-2,24 σ	Neutra
Abril /2016	-2,16 σ	El Niño fraco

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Em uma primeira análise, essa classificação não sugere relação entre as anomalias apontadas nesse estudo e as variações de TSM provenientes de El Niño e La Niña, tendo em vista que a maioria delas aconteceram em fases neutras. No entanto, há de se considerar que, devido à extensão do bioma, os efeitos desses fenômenos se apresentam de forma diversificada e heterogênea no Cerrado. O presente estudo não tem como objetivo esmiuçar as causas das ocorrências das anomalias no bioma e sim realizar uma análise espaço-temporal para determinação das áreas de ocorrência de tendência de precipitação e elucidar considerações sobre sua relação com uso e cobertura da terra no bioma. Dessa forma, estudos mais aprofundados podem ser realizados para este fim.

A partir da análise das médias mensais de precipitação acumulada para o bioma como um todo, empregando-se os testes Mann Kendall e Sen's Slope, foi possível observar que apenas o mês de dezembro apresentou tendência significativa de decréscimo, na ordem de -3,29 mm/mês (Tabela 23). A Figura 27 apresenta o comportamento da variável ao longo dos meses do período analisado. Observa-se um decréscimo considerável em dezembro (estação chuvosa), o que pode acarretar perdas significativas na agricultura, pois é um dos meses em que acontece o crescimento e desenvolvimento de cultivos agrícolas no bioma Cerrado. A ocorrência de veranicos longos nessas fases pode prejudicar os rendimentos finais dos mesmos. Tal tendência negativa é corroborada na análise pixel a pixel realizada para o bioma e apresentada a seguir.

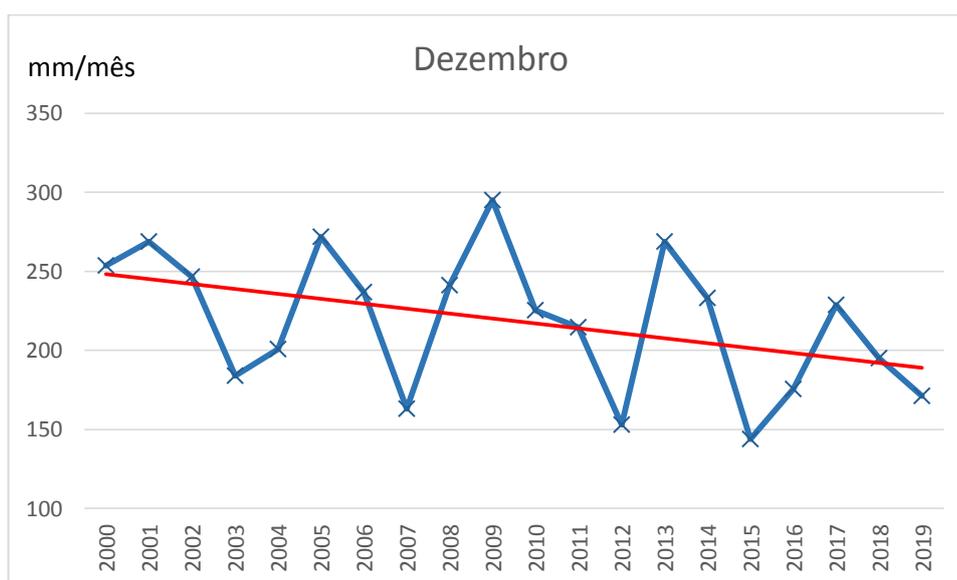
Tabela 23- Tendências mensais dos valores médios de precipitação acumulada entre 2000 e 2019.

Mês	Sen's Slope (mm mês⁻¹)	p
JAN	-3,39	0,12
FEV	0,42	0,83
MAR	-0,26	0,94
ABR	1,32	0,40

MAI	0,07	0,83
JUN	-0,19	0,72
JUL	-0,41	0,28
AGO	-0,29	0,42
SET	-1,27	0,14
OUT	0,00	1,00
NOV	1,24	0,42
DEZ	-3,29	0,05

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 27 – Comportamento da precipitação no mês de dezembro ao longo do período analisado (2000 – 2019).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2 Análises mensais pixel a pixel

3.2.1 Tendências espaço-temporais mensais de precipitação

A análise das tendências pluviométricas mensais pixel a pixel (Figura 28) demonstrou a ocorrência de tendências significativas positivas e negativas de precipitação agrupadas em diferentes regiões do bioma. Ocorreram tendências significativas negativas principalmente nos meses de seca no Cerrado (maio a setembro), apresentando Sen's Slope de até -9,1 mm/mês. No mês de agosto, tais tendências cobriram extensa área no estado de Goiás e DF, com valor de Sen's Slope chegando a -1,55 mm/mês. Na região norte do bioma, foram identificadas no mês de junho, no estado do Maranhão, tendências significativas negativas que alcançaram -9,1 mm/mês, assim como nas regiões noroeste (Mato Grosso) e sudeste do

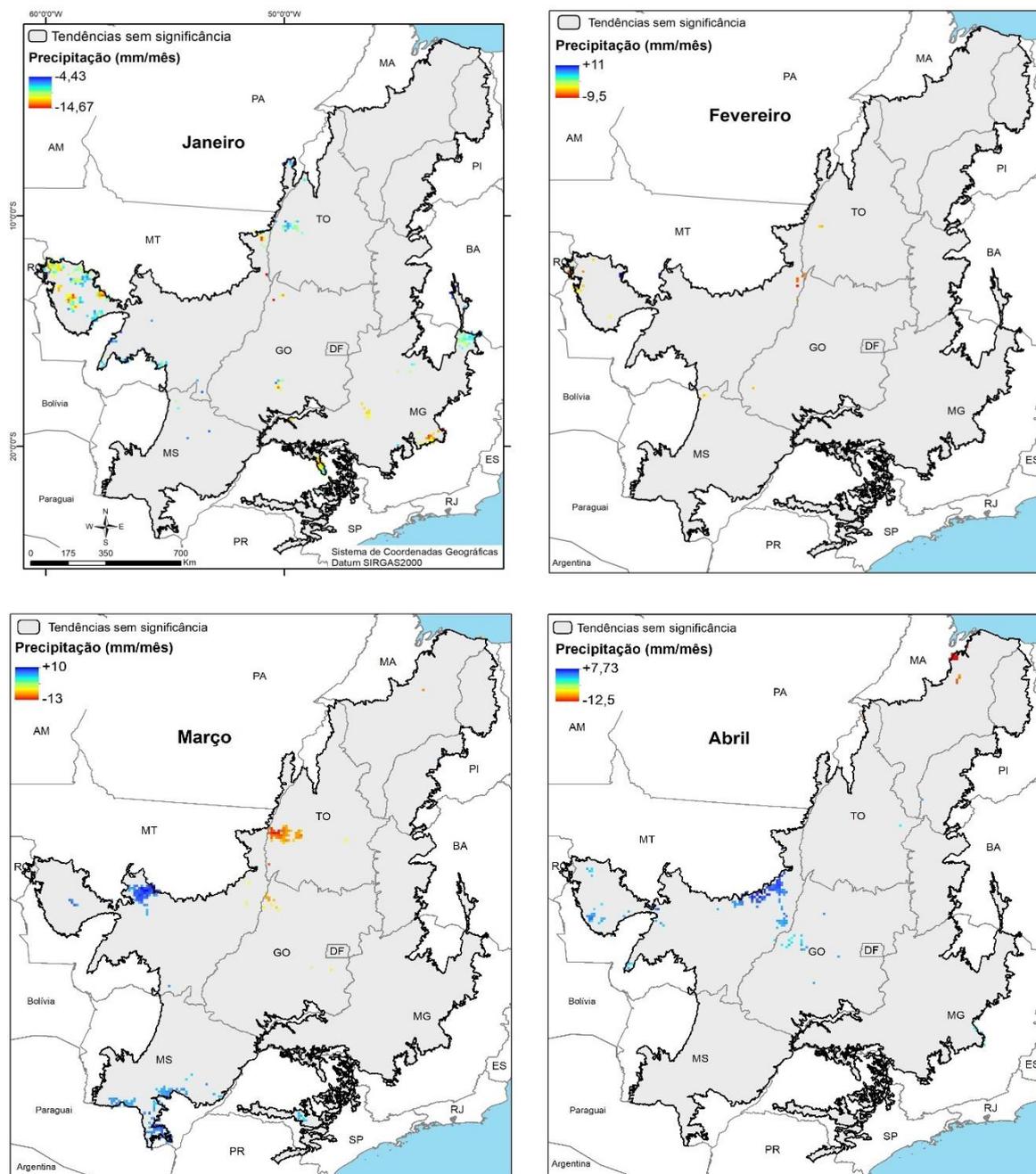
bioma (Minas Gerais) no mês de julho, alcançando $-3,68$ mm/mês. As tendências significativas negativas observadas em setembro cobriram áreas pontuais na região central do estado de Goiás e leste de Mato Grosso, com valores de até $-4,43$ mm/mês.

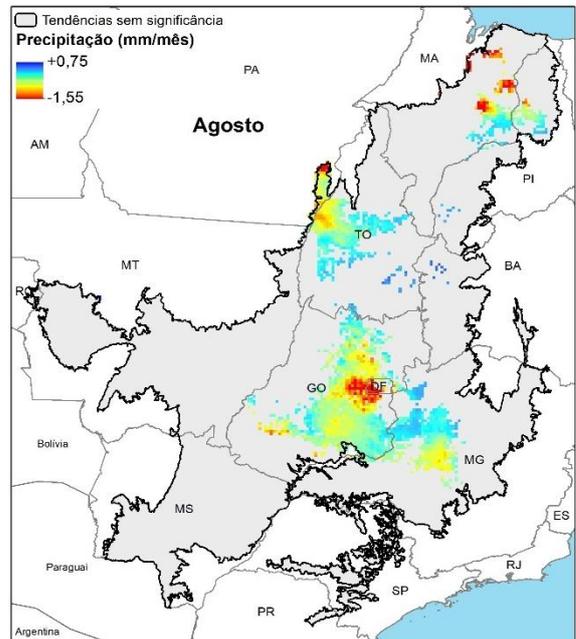
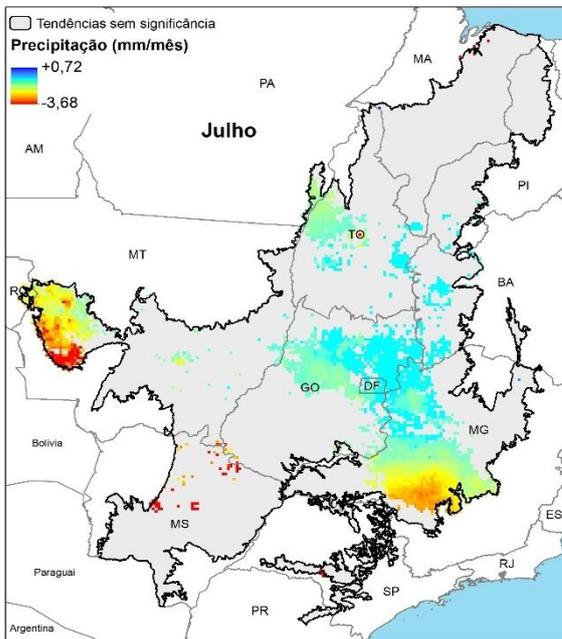
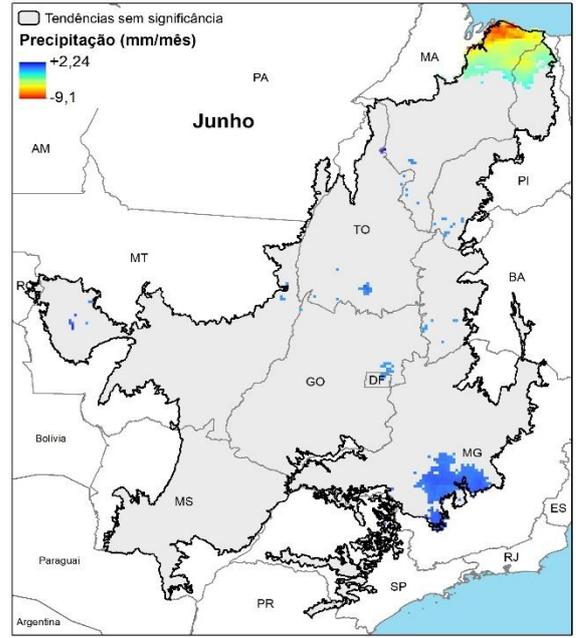
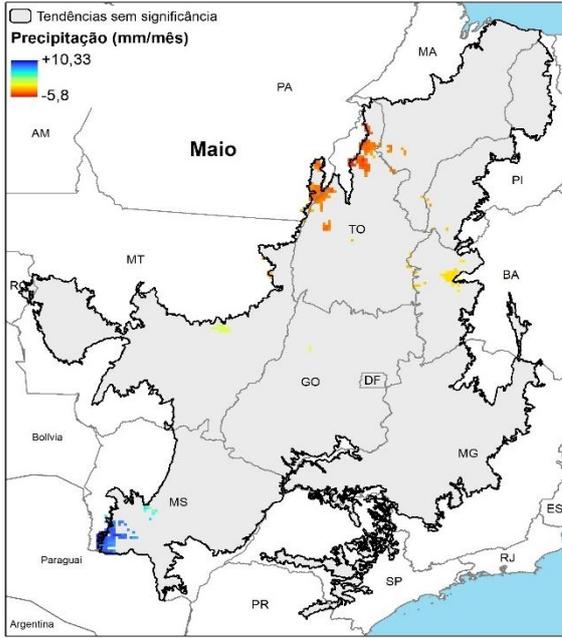
Em dezembro, mês do período chuvoso no bioma, foi observada novamente tendências significativas negativas em áreas consideráveis no sudeste do bioma (Minas Gerais) e região central do estado de Goiás. Vale ressaltar que, nesse mês, foram apontadas somente tendências negativas, variando de $-14,05$ mm/mês a $-2,53$ mm/mês. O mesmo ocorreu em janeiro, outro mês reconhecidamente chuvoso no Cerrado, demonstrando tendências pontuais negativas que atingiram $-14,67$ mm/mês, indicando a ocorrência de veranicos, conforme apontaram Assad (1993) e Campos e Chaves (2020).

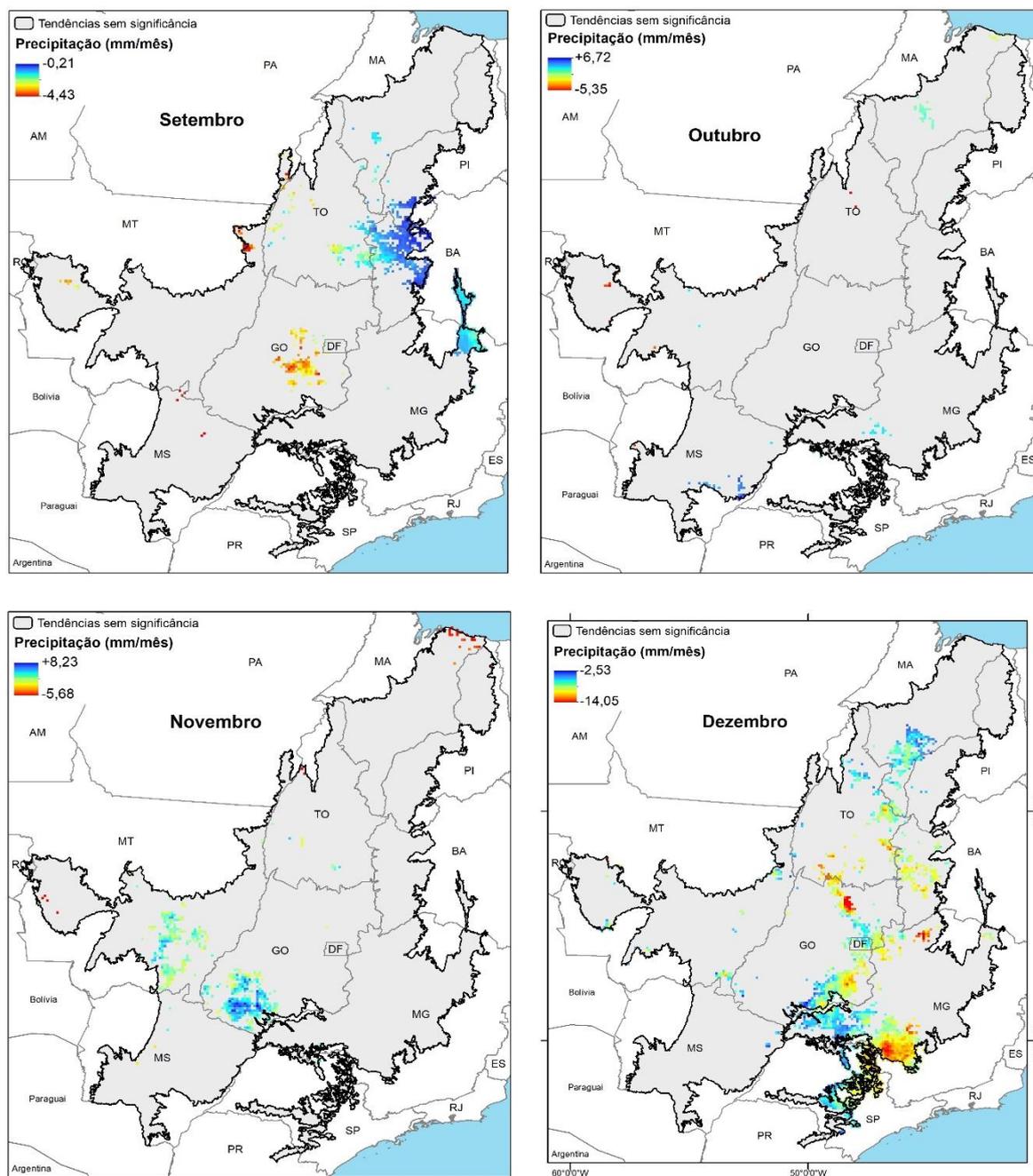
Tais resultados corroboram e complementam os encontrados por Campos e Chaves (2020), que analisaram as séries históricas de precipitação de 125 estações do bioma Cerrado para o período 1977-2010. Segundo esses autores, os meses de estação seca apresentaram tendências de redução na precipitação em 76% das séries estudadas, sinalizando uma possível intensificação do período de estiagem na região. No período analisado nesse estudo, a precipitação total anual no Cerrado diminuiu 125 mm (8,4%) e apenas 28% das estações apresentaram tendência de aumento, sendo que destas, 1% foi estatisticamente significativa.

Tendências significativas positivas foram observadas principalmente nos meses de março (área central do estado do Mato Grosso, atingindo 10 mm/mês), abril (leste de Mato Grosso, alcançando 10 mm/mês) e novembro (sudoeste goiano, aproximando-se de 8,23 mm/mês). Vale ressaltar que o mês de junho também apresentou tendência significativa de aumento de precipitação na parte central do estado de Minas Gerais, chegando a 8,23 mm/mês.

Figura 28 - Distribuição espacial das tendências mensais significativas de precipitação (Sen's Slope; $p \leq 0,05$) – período 2000-2019. Valores máximos em azul, valores mínimos em vermelho e tendências sem significância estatística ($p \leq 0,05$) em cinza claro.







Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A Tabela 24 mostra o percentual de ocupação no bioma das áreas que apresentaram tendências significativas negativas, positivas e que não apresentaram tendência (neutra, igual a zero) de precipitação, bem como as áreas sem tendência significativa. Em média, não foram observadas tendências significativas em 94,68% (1.877.679 km²) dos pixels analisados, variando entre 81,25% (1.611.153 km²) em julho e 99,80% (1.978.963 km²) em fevereiro. Em média, 4,18% (82.959 km²) da área apresentaram tendências significativas negativas, variando entre 0,04% (767 km²) em novembro a 13,65% (270.735 km²) em julho. Em média, 0,70% dos pixels (13.833 km²) apresentaram tendências positivas significativas, variando de

0% janeiro, setembro e dezembro a 2,92% (57.960 km²) em novembro. Em relação às áreas que apresentaram tendência neutra (igual a zero), em média, 0,43% do Cerrado apresentou pixels com tendência neutra no período analisado, sendo que o mês de julho concentrou 5,9% (100.909 km²) dessas áreas e os meses restantes analisados não apresentaram esse tipo de tendência.

Tabela 24 - Percentual de ocupação das áreas que apresentaram tendência de precipitação no bioma Cerrado – análise mensal de 2000 a 2019.

Porcentagem Ocupação Bioma				
Mês	Tendência sem significância (%)	Tendência significativa negativa (%)	Tendência neutra (igual a zero) (%)	Tendência significativa positiva (%)
JAN	97,92	2,08	0,00	0,00
FEV	99,80	0,18	0,00	0,02
MAR	98,39	0,40	0,00	1,20
ABR	99,01	0,09	0,00	0,91
MAI	98,11	1,28	0,00	0,61
JUN	94,83	2,98	0,01	2,18
JUL	81,25	13,65	5,09	0,01
AGO	87,10	12,81	0,07	0,01
SET	95,05	4,95	0,00	0,00
OUT	99,44	0,06	0,01	0,50
NOV	97,04	0,04	0,00	2,92
DEZ	88,33	11,67	0,00	0,00

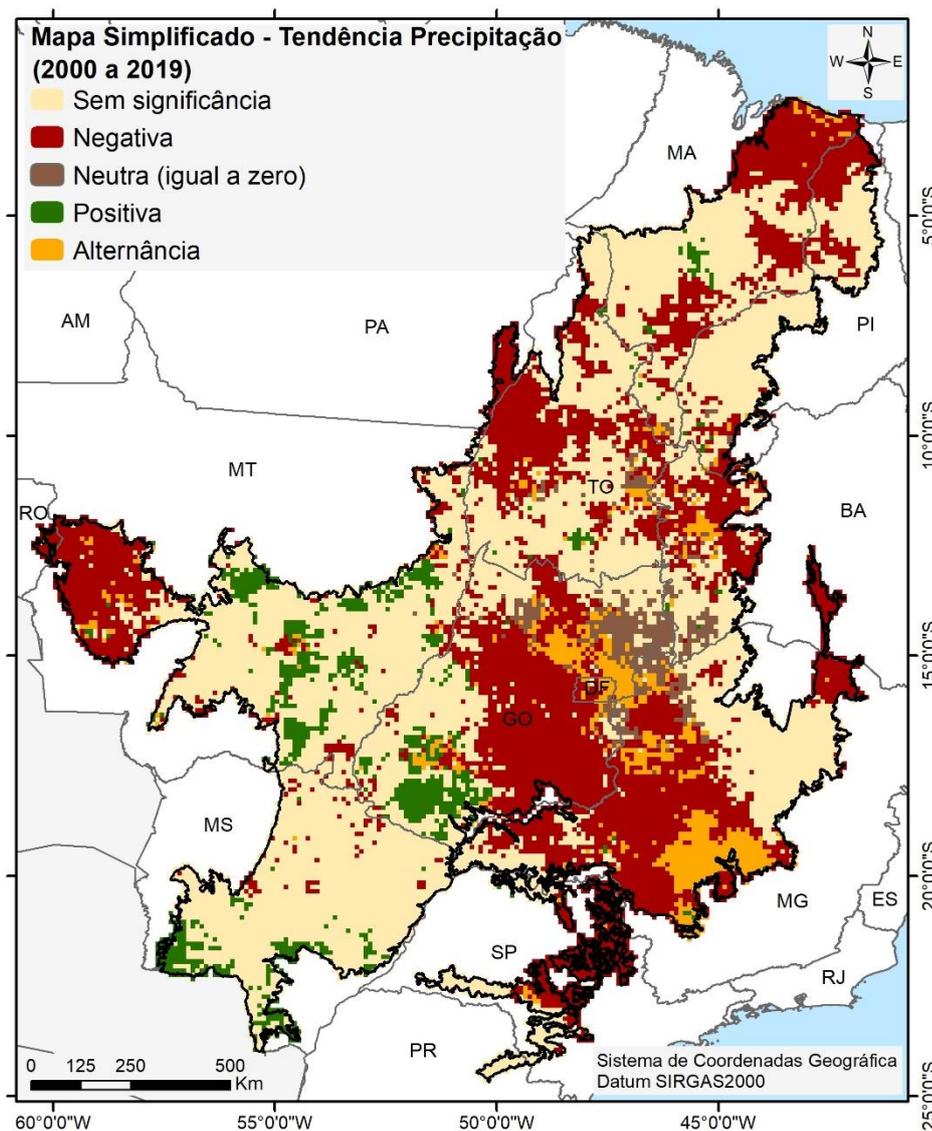
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As análises espaço-temporais mensais de tendência de precipitação ao longo do período analisado indicaram a ocorrência de áreas com tendência significativa negativa, principalmente em meses de seca no bioma Cerrado, especialmente julho e agosto, e também em meses chuvosos, especialmente dezembro. Tais resultados apontam a intensificação do período de seca no bioma e a ocorrência de veranicos.

3.2.2 Mapa simplificado de tendência de precipitação

A Figura 29 apresenta o que foi denominado “mapa simplificado de tendência de precipitação”, que conjugou todas as análises de tendência mensais ao longo do período 2000-2019 em um único mapa, conforme metodologia e regras de cruzamento descritas na Seção 2.4.2.1.

Figura 29 – “Mapa simplificado de tendência de precipitação” do bioma Cerrado para o período 2000-2019.



A Tabela 25 apresenta o percentual de ocupação de cada classe do mapa no bioma Cerrado. As áreas sem significância estatística ocuparam cerca de 52,61% do bioma (1.043.278 km²). As áreas que apresentaram tendência significativa negativa de precipitação ocuparam 34,08% (675.907 km²) do bioma, com valores mínimo e máximo de -14,67 mm/mês e -0,03 mm/mês, respectivamente. As áreas com tendência igual a zero, que se mantiveram neutras, ocuparam 2,73% (54.235 km²); as com tendência significativa positiva ocuparam 5,43% (107.702 km²) do bioma, com valores entre 0,06 mm/mês e 10,00 mm/mês. Já as áreas com alternância de tendências significativas representaram 5,14% do bioma (101,895 km²).

Tabela 25 – Percentual de ocupação de cada classe do “mapa simplificado de tendência de precipitação” no bioma Cerrado.

Classes	Porcentagem Ocupação Bioma	Área (km²)	Amplitude da Tendência (mm/mês)	Média Tendência (mm/mês)
Tendência sem significância	52,61	1.043.278	-	-
Tendência significativa negativa	34,08	675.907	-14,67 a -0,03	-2,74
Tendência neutra (igual a zero)	2,73	54.235	-	-
Tendência significativa positiva	5,43	107.702	0,06 a 10,00	5,18
Alternância de tendências	5,14	101.895	-	-
Total	100	1.983.017		

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

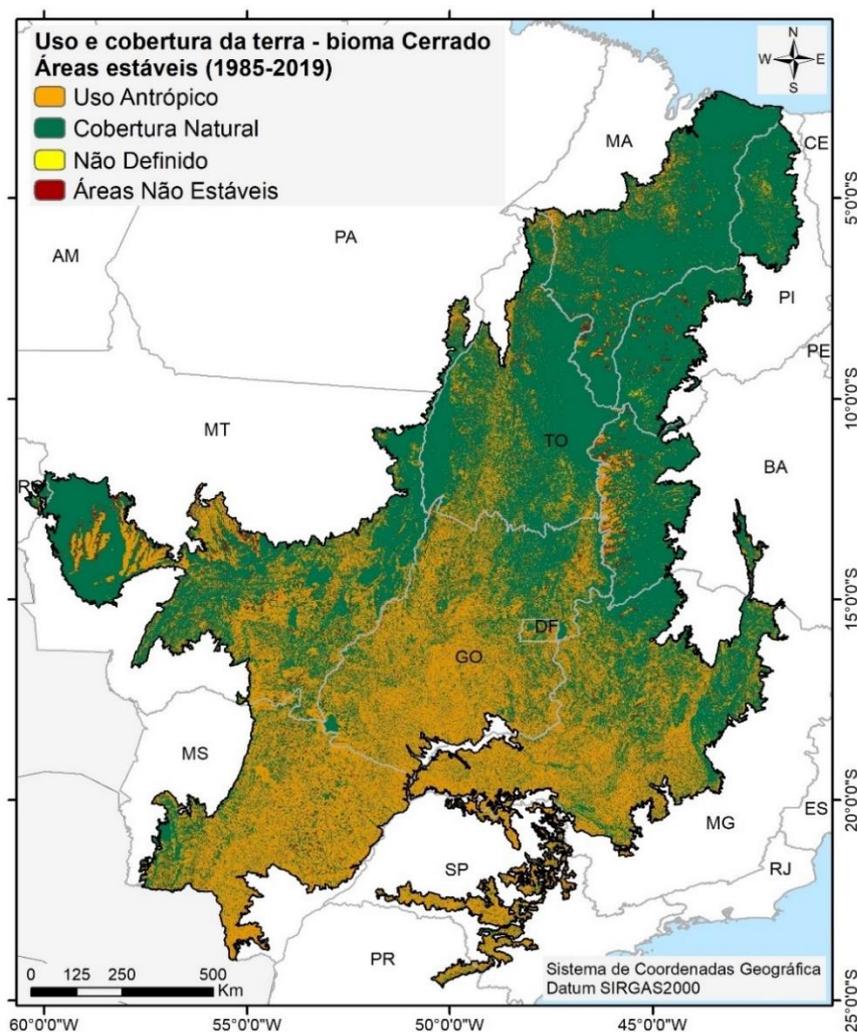
Observou-se, ainda, que a maior parte do Cerrado não apresentou tendências significativas de precipitação. Das áreas que apresentaram tendências significativas, a maior porcentagem de ocupação foi relativa às tendências negativas, apontando um decréscimo médio da precipitação ao longo desses anos de -2,74 mm/mês.

3.3 Áreas de tendência de precipitação e relações com uso e cobertura da terra

3.3.1 Mapa de áreas estáveis de uso e cobertura da terra

A Figura 30 apresenta o mapa de áreas estáveis de uso e cobertura da terra do bioma, discriminado conforme as classes consideradas em sua elaboração: “uso antrópico”, “cobertura natural” e “uso não definido”, as quais permaneceram por no mínimo 20 anos com a mesma classe temática, conforme metodologia descrita na Seção 2.4.2.2.

Figura 30 – Mapa de áreas estáveis do bioma Cerrado, que permaneceram com a mesma classe de uso e cobertura da terra por no mínimo 20 anos, no período 1985-2019.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

A maior parte das áreas estáveis do bioma (58,53%; 1.160.643 km²) foi de cobertura natural, seguida de uso antrópico (37,99%; 753.253 km²) e de uso não definido (0,11%; 2.183 km²). Áreas que alternaram o uso e cobertura ao longo do período analisado ocuparam 3,28% do bioma (66.938 km²) (Tabela 26).

Tabela 26 – Porcentagem ocupada no bioma pelas classes do mapa de áreas estáveis do bioma Cerrado.

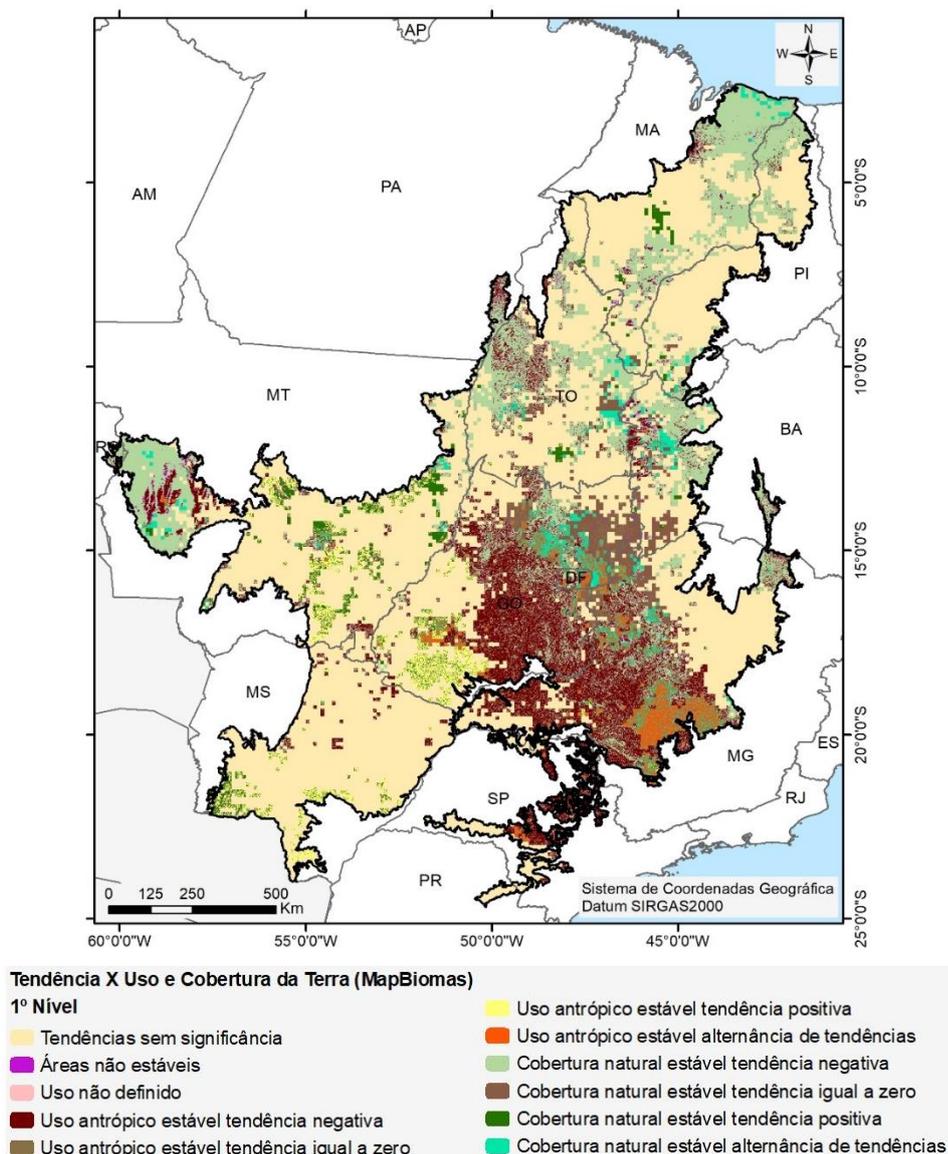
Classes	Porcentagem de Ocupação no Bioma	Área Km ²
Uso Antrópico	37,99	753.253
Cobertura Natural	58,53	1.160.643
Uso Não Definido	0,11	2.183
Áreas Não Estáveis	3,38	66.938
Total	100	1.983.017

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.3.2 Mapa simplificado de tendência de precipitação em áreas estáveis de uso e cobertura da terra – 1º nível

A partir do cruzamento entre o mapa simplificado de tendência de precipitação e o mapa de áreas estáveis de uso e cobertura da terra em um primeiro nível escalar, isto é, considerando as classes que compõe uso antrópico, cobertura natural e uso não definido, foi possível obter os resultados apresentados na Figura 31 e na Tabela 27. Para determinação da porcentagem de ocupação destas classes (áreas estáveis) no bioma, foram consideradas as áreas com tendências estatisticamente significativas.

Figura 31 – Mapa simplificado de tendência de precipitação em áreas estáveis de uso e cobertura da terra (uso antrópico e cobertura natural) no bioma Cerrado.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 27 – Percentual de ocupação de cada classe estável de uso e cobertura da terra (uso antrópico e cobertura vegetal) no “mapa simplificado de tendência de precipitação” do bioma Cerrado.

Classes	Porcentagem Ocupação Bioma	Área Km ²	Valores Máx. e Mín. Tendência (mm/mês)	Média Tendência (mm/mês)
Tendência sem significância	53,21	1.055.173	-	-
Áreas não estáveis	1,57	31.167	-	-
Uso não definido	0,05	917	-	-
Uso antrópico estável tendência negativa	12,31	244.101	-14,67 a -0,03	-2,58
Uso antrópico estável tendência neutra (igual a zero)	0,89	17.622	-	-
Uso antrópico estável tendência positiva	2,87	57.009	0,06 a 10,33	5,42
Uso antrópico estável alternância tendência	2,41	47.883	-	-
Cobertura natural estável tendência negativa	19,86	393.768	-14,67 a -0,03	-2,55
Cobertura natural estável tendência neutra (igual a zero)	1,93	38.254	-	-
Cobertura natural estável tendência positiva	2,22	44.044	0,06 a 10,33	4,66
Cobertura natural estável alternância tendência	2,68	53.079	-	-
Total	100,00	1.983.017		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

É possível observar que as tendências significativas negativas encontram-se, em sua maior parte, em áreas de cobertura natural estáveis: 19,86% (393.768 km²) do bioma, seguido de áreas antrópicas estáveis: 12,31% do bioma (244.101 km²). Esse resultado demonstra que nem sempre usos antrópicos influenciam mais na ocorrência de áreas de tendência significativamente negativas de precipitação no Cerrado, já que cobertura natural ocupa a maior área onde as tendências significativas negativas de precipitação ocorreram, seguida do uso antrópicos. Já 2,87% (57.009 km²) das áreas de tendência significativa positiva ocorrem em áreas estáveis de uso antrópico e 2,68% (53.078 km²) em áreas estáveis de cobertura natural.

Os valores mínimo e máximo das áreas que apresentaram tendências significativamente positivas e negativas variaram entre -14,67 mm/mês a -0,03 mm/mês, sendo que as médias para a tendência significativa negativa em áreas de uso antrópico foi de -2,58 mm/mês e em áreas de cobertura natural de -2,55 mm/mês. Já a média das áreas que

apresentaram tendências significativas positivas foi de 5,42 mm/mês para uso antrópico e de 4,66 mm/mês, valores muito próximos entre si em todos os casos.

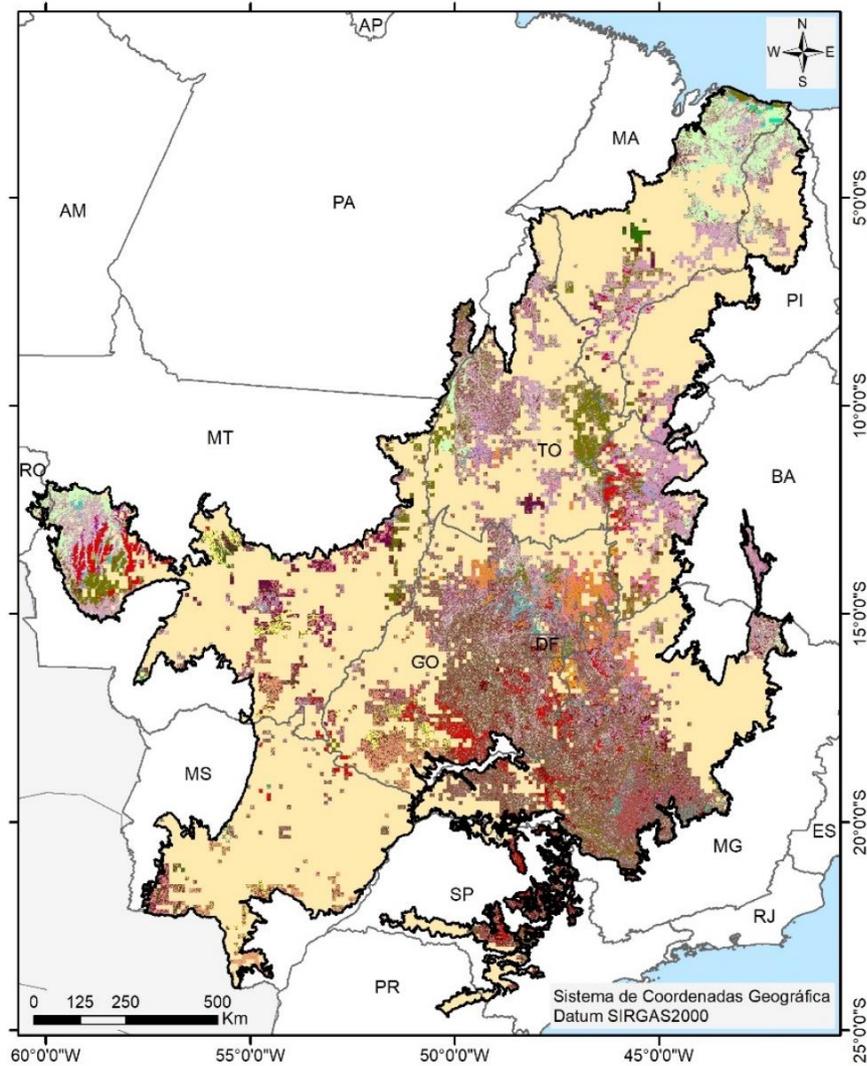
Vale ressaltar que, como os pixels dos dados GPM possuem resolução espacial de 0,1° (~11 km no Equador) e os mapeamentos de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomias possuem resolução de 30 metros, um pixel GPM engloba vários pixels do MapBiomias; ou seja, um pixel GPM é composto de diferentes classes de uso e cobertura da terra. Assim, os valores Sen's Slope máximo e mínimo, provenientes dos dados GPM de menor resolução espacial, geralmente são os mesmos para as distintas classes de uso e cobertura da terra.

Tais resultados demonstram que a relação entre as interferências antrópicas e o clima no Cerrado não é simples e direta, principalmente no que se refere à precipitação. Penereiro e Meschiatti (2018), ao analisarem tendências em séries anuais de precipitação e temperaturas no Brasil, identificaram ausência de tendência no índice de precipitação pluviométrica no Cerrado. Porém, identificaram tendências de aumento nas temperaturas mínima, média e máxima, especialmente em cidades que nas últimas duas décadas apresentaram um crescimento da zona urbana, seguido de desmatamentos e desenvolvimento agropecuário e industrial, sendo a temperatura uma variável climática mais sensível e responsiva às interferências antrópicas.

3.3.3 Mapa simplificado de tendência de precipitação em áreas estáveis de uso e cobertura da terra – 2º nível

A Figura 32 e a Tabela 28 se referem ao cruzamento entre o mapa simplificado de tendência de precipitação e o mapa de uso e cobertura da terra (áreas estáveis), agora com foco nas classes predominantes de uso antrópico: agricultura e pastagem e de cobertura natural: formações florestal e savânica. Para determinação da porcentagem de ocupação destas classes no bioma, foram consideradas as áreas com tendências estatisticamente significativas.

Figura 32 – Mapa simplificado de tendência de precipitação em áreas estáveis de uso e cobertura da terra (agricultura, pecuária, formação florestal e formação savânica) no bioma Cerrado.



Tendência x Uso e Cobertura da Terra (MapBiomias)

2º Nível

Tendências sem significância	Pastagem estável tendência igual a zero
Áreas não estáveis	Pastagem estável tendência positiva
Uso não definido	Pastagem estável alternância de tendências
Outros usos antrópicos	Formação florestal estável tendência negativa
Outras coberturas naturais	Formação florestal estável tendência igual a zero
Agricultura estável tendência negativa	Formação florestal estável tendência positiva
Agricultura estável tendência igual a zero	Formação florestal estável alternância de tendências
Agricultura estável tendência positiva	Formação savânica estável tendência negativa
Agricultura estável alternância de tendências	Formação savânica estável tendência igual a zero
Pastagem estável tendência negativa	Formação savânica estável tendência positiva
	Formação savânica estável alternância de tendências

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 28 – Percentual de ocupação de cada classe estável de uso e cobertura da terra (agricultura, pastagem, formação florestal e formação savânica) no “mapa simplificado de tendência de precipitação” do bioma Cerrado.

Classes	Porcentagem Ocupação Bioma	Área Km ²	Valores Máx. e Mín. Tendência (mm/mês)	Média Tendência (mm/mês)
Tendências sem significância	53,21	1.055.173	-	-
Áreas não estáveis	1,57	31.167	-	-
Uso não definido	0,05	917	-	-
Outros usos antrópicos	1,64	32.436	-	-
Outras coberturas naturais	5,46	108.273	-	-
Agricultura estável tendência negativa	2,02	40.059	-13,20 a -0,03	-3,27
Agricultura estável tendência neutra (igual a zero)	0,15	2.934	-	-
Agricultura estável tendência positiva	0,69	13.755	0,06 a 10,00	5,60
Agricultura estável alternância de tendências	0,31	6.219	-	-
Pastagem estável tendência negativa	9,14	181.291	-14,67 a -0,03	-2,35
Pastagem estável tendência neutra (igual a zero)	0,68	13.523	-	-
Pastagem estável tendência positiva	1,97	39.156	0,06 a 10,33	5,38
Pastagem estável alternância de tendências	1,88	37.243	-	-
Formação florestal estável tendência negativa	6,03	119.642	-14,67 a -0,03	-2,71
Formação florestal estável tendência neutra (igual a zero)	0,17	3.339	-	-
Formação florestal estável tendência positiva	0,73	14.467	0,06 a 10,33	5,17
Formação florestal estável alternância de tendências	0,60	11.928	-	-
Formação savânica estável tendência negativa	10,10	200.257	-14,67 a -0,03	-2,26
Formação savânica estável tendência neutra (igual a zero)	1,13	22.367	-	-
Formação savânica estável tendência positiva	1,11	21.923	0,06 a 10,33	4,54
Formação savânica estável alternância de tendências	1,36	26.949	-	-
Total	100,00	1.983.017		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nessa etapa, em relação às áreas que apresentaram tendências significativas negativas de precipitação no bioma Cerrado, é possível perceber que 10,10% (200.257 km²) se localizaram em formação savânica (classe de cobertura natural). Em seguida, as áreas de pastagem (classe de uso antrópico) ocuparam 9,14% (181.291 km²) das regiões que apresentaram essa tendência, seguidas de formação florestal (6,03%; 119,642 km²) e agricultura (2,02%, 40.059 km²), classes de cobertura natural e uso antrópico,

respectivamente. Já as áreas que apresentaram tendências significativas positivas de precipitação (apenas 5,43% do Cerrado) são ocupadas por pastagens (1,97%; 39.156 km²), seguida de formação savânica (1,11%; 21.293 km²).

Dessa forma, percebe-se que a precipitação no Cerrado sofre influências de fatores locais, como o uso e cobertura da terra, mas a relação/contribuição das áreas estáveis de uso antrópico e a ocorrência de áreas com tendência significativa de precipitação não é direta. Por exemplo, foi possível observar que a formação savânica ocupa a maior área onde as tendências significativas negativas de precipitação ocorreram, seguida de pastagens. Em relação às áreas que apresentaram tendência significativa positiva, têm-se na pastagem o maior percentual de ocupação nessas áreas, seguida da formação savânica.

Considerando as classes agricultura, pecuária, formação florestal e formação savânica, no que se refere aos valores máximos e mínimos das áreas que apresentaram tendências significativas, é possível observar que as áreas ocupadas com agricultura apresentaram valores variando entre -13,20 mm/mês a -0,03 mm/mês (tendência significativa negativa) e entre 0,06 mm/mês a 10,00 mm/mês (tendência significativa positiva). O restante das classes apresentaram tendências significativas negativas e positivas, variando de -14,67 mm/mês a -0,03 mm/mês e de 0,06 mm/mês a 10,33 mm/mês, respectivamente.

No que se refere aos valores médios de decréscimo de precipitação das áreas com tendência significativa negativa, a classe que apresentou o maior valor de Sen's Slope foi agricultura (-3,27 mm/mês), seguida de formação florestal, pastagem e formação savânica: -2,71 mm/mês, -2,35 mm/mês e -2,26 mm/mês, respectivamente. Já em relação ao valor médio de acréscimo de precipitação das áreas com tendência significativa positiva, a agricultura apresentou o maior valor (5,60 mm/mês), seguida de pastagem (5,38 mm/mês), seguida das formações florestal e savânica, com 5,17 mm/mês e 4,54 mm/mês, respectivamente. As relações entre decréscimo e acréscimo de precipitação e tais classes de uso e cobertura da terra provavelmente se dão devido às características intrínsecas das mesmas e interações com o ambiente ao longo dos anos.

Campos (2018) apontou que 14% dos postos analisados em sua pesquisa apresentaram tendência significativa de queda de precipitação anual, os quais estão localizados predominantemente na região sul do bioma, que apresenta os maiores índices de desmatamento. No presente estudo, o foco foram as áreas estáveis com no mínimo 20 anos com o mesmo tipo de uso e cobertura da terra. Estudos futuros podem relacionar variáveis climáticas como precipitação com áreas de mudança e transição de uso e cobertura da terra no bioma Cerrado.

4 CONCLUSÕES

A análise de todos os pixels do bioma ao longo do período 2000-2019 demonstrou um significativo decréscimo de precipitação em dezembro (Sen's Slope de -3,29 mm/mês), o que aponta a ocorrência de veranicos nesse mês tipicamente chuvoso do bioma Cerrado. Este é um dos meses em que acontece o crescimento e desenvolvimento de cultivos agrícolas no bioma. A ocorrência de veranicos nessas fases pode prejudicar os rendimentos finais dos cultivos. Considerando a análise espaço-temporal pixel a pixel para este mês, foram observadas tendências significativas negativas em áreas consideráveis no sudeste do bioma (Minas Gerais) e na região central de Goiás. Vale ressaltar que, neste mês, foram apontadas somente tendências negativas, variando de -14,05 mm/mês a -2,53 mm/mês.

Foram apresentadas anomalias de precipitação positivas e negativas ao longo do período analisado, aparentemente não relacionadas com fenômenos ENOS, já que aconteceram em fases de neutralidades entre os mesmos.

Na análise pixel a pixel, foi possível constatar a intensificação do período de seca no bioma Cerrado, dada a presença de tendências significativas negativas de precipitação, especialmente nos meses de agosto e julho, ocupando 13,65% e 12,81% do bioma, respectivamente. Em agosto, tais tendências cobriram extensa área no estado de Goiás e DF, com valor de Sen's Slope chegando a -1,55 mm/mês, e nas regiões noroeste (estado de Mato Grosso) e sudeste do bioma (estado de Minas Gerais) no mês de julho, alcançando -3,68 mm/mês. Vale destacar a ocorrência de tendência significativa negativa na região norte do bioma, no estado do Maranhão, no mês de junho (período de seca no bioma), atingindo valor de Sen's Slope de -9,1 mm/mês, ocupando cerca de 3% do Cerrado. Tais resultados de decréscimo de precipitação corroboram com os alertas do PBMC nas projeções regionalizadas de clima para o bioma Cerrado, considerando os cenários de baixa e alta emissão de gases de efeito estufa.

O mapa simplificado de tendência de precipitação indicou que a maior parte do bioma 52,61% (1.043.278 km²) não apresentou tendência significativa de precipitação. As áreas que apresentaram tendência significativa negativa ocuparam 34,08% (675.907 km²). As áreas com tendência neutra (igual a zero) ocuparam 2,73% (54.235 km²); tendência significativa positiva ocuparam 5,43% (107.702 km²) do bioma. O decréscimo médio de precipitação nas áreas que apresentaram tendência significativa negativa no bioma foi de -2,74 mm/mês.

O mapa de áreas estáveis de uso e cobertura da terra no bioma (uso antrópico e cobertura natural), o qual considerou apenas as áreas que permaneceram com a mesma classe

de uso e cobertura da terra no período 1985-2019, demonstrou que a maior parte das áreas estáveis do bioma (58,53%; 1.160.643 km²) possui cobertura natural, seguidas de uso antrópico (37,99%; 753.253 km²) e uso não definido (0,11%; 2.183 km²). As áreas que alternaram o tipo de uso e cobertura ao longo do período analisado ocuparam 3,28% do bioma (66.938 km²).

A partir do cruzamento entre o mapa simplificado de tendência de precipitação e o mapa de uso e cobertura da terra - 1º nível (áreas estáveis de uso antrópico e de cobertura natural) foi possível observar que as tendências significativas negativas se encontram, em sua maior parte, em áreas de cobertura natural estáveis: 19,86% (393.768 km²) do bioma, seguido de áreas antrópicas estáveis: 12,31% (244.101 km²). Esse resultado destoa da hipótese de que as áreas antrópicas influenciam na ocorrência de áreas significativamente negativas de chuva no Cerrado. Já 2,87% (57.009 km²) das áreas de tendência significativa positiva ocorreram em áreas estáveis de uso antrópico e 2,68% (53.078 km²) em áreas estáveis de cobertura natural.

Nesse 1º nível de cruzamento de dados, para as áreas que apresentaram tendência significativa negativa, os valores médios de Sen's Slope para uso antrópico e cobertura natural ficaram muito próximos: -2,58 mm/mês e -2,55 mm/mês, respectivamente.

Ainda nessa etapa, em relação às áreas que apresentaram tendência significativa positiva, os valores médios de Sen's Slope foram de 5,42 mm/mês para uso antrópico e de 4,66 mm/mês para cobertura natural. Dessa forma, aproximadamente 20% do Cerrado coberto com vegetação nativa apresentou tendência de redução estatisticamente significativa de precipitação de -2,58 mm/mês e de -2,55 mm/mês em 12% da área total do Cerrado com cobertura antrópica. As áreas que apresentaram tendências significativas positivas de precipitação ocuparam 5% do Cerrado (aumento em torno de 5 mm/mês).

Tais resultados demonstram que a relação entre as interferências antropogênicas e o clima no Cerrado não é simples e direta, principalmente no que se refere à precipitação. Mesmo que seja evidente que a influência humana aqueceu a atmosfera, os oceanos e a superfície terrestre, e este seja senso comum da comunidade científica da atualidade, é necessário, no contexto de uma perspectiva científica crítica, questionar e estudar a fundo essas influências e relações de causa e efeito. Os resultados demonstram decréscimo de precipitação em ambos os tipos de uso e cobertura da terra.

Os resultados provenientes do cruzamento entre o mapa simplificado de tendência de precipitação e uso e cobertura da terra no 2º nível - áreas estáveis de agricultura, pastagem, formação florestal e formação savânica, que se referem às áreas que apresentaram tendências significativas negativas de precipitação no bioma Cerrado, demonstraram que 10,10% dessas

áreas (200.257 km²) se localizaram em formação savânica. Em seguida, as áreas de pastagem ocuparam 9,14% (181.291 km²) das regiões que apresentaram esse tipo de tendência.

Percebe-se que a precipitação no Cerrado sofre influências de fatores locais, como uso e cobertura da terra, mas a relação entre áreas estáveis de uso antrópico e de ocorrência de tendência significativa negativa de precipitação não é direta, pois a formação savânica ocupa a maior área onde as tendências significativas negativas de precipitação ocorreram, seguida de pastagens.

Nesse 2º nível de cruzamento de dados, no que se refere aos valores médios de decréscimo de precipitação das áreas com tendência significativa negativa no bioma, a classe que apresentou maior valor de Sen's Slope foi a agricultura (-3,27 mm/mês), seguida de formação florestal (-2,71 mm/mês), pastagem (-2,35 mm/mês) e formação savânica (-2,26 mm/mês). Quanto ao valor médio de acréscimo de precipitação das áreas com tendência positiva, a agricultura, com 5,60 mm/mês, apresentou o maior valor, seguida de pastagem (5,38 mm/mês). Na sequência, seguiram-se as formações florestal e savânica, com 5,17 mm/mês e 4,54 mm/mês, respectivamente. As relações entre decréscimo e acréscimo de precipitação e as referidas classes de uso e cobertura da terra provavelmente ocorrem devido às características intrínsecas das mesmas e interações com o ambiente ao longo dos anos.

Cabe apontar as limitações desse estudo decorrentes de escalas de trabalho diferentes: pixels GPM com resolução espacial de 0,1° (~11 km próximo à linha do Equador), e com 30 metros do projeto MapBiomas (base dados Landsat 5, 7 e 8). Além disso, existe o problema da variabilidade elevada da informação de chuva, devido à resolução espacial dos dados GPM ser bastante alta, pois representa uma média daquela área.

Nos cruzamentos entre as informações de precipitação e uso e cobertura da terra, acaba prevalecendo a informação do pixel de menor detalhamento (GPM) no que se refere à magnitude da tendência, tendo em vista que este pixel é preenchido com várias classes de uso e cobertura da terra que irão assumir os valores de Sen's Slope determinados pela GPM.

O presente estudo focou em áreas estáveis com no mínimo 20 anos com o mesmo tipo de uso e cobertura da terra. Dessa forma, não foram contempladas as áreas de mudança e transição. Novos estudos podem considerar as relações entre essas áreas e variáveis climáticas, como precipitação, e o aprofundamento da análise da influência de fenômenos globais como ENOS, da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), sistemas de alta pressão atmosférica como a Alta da Bolívia, eventos extremos de precipitação e seca, além do aumento da temperatura no bioma e relações solo-planta-clima. Essa pesquisa

aponta caminhos para outras possíveis análises, empregando a precipitação ou mesmo diferentes variáveis climáticas provenientes de outras fontes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASIL. **Outono e agricultura são influenciados pelo fenômeno La Niña**, 2021. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-03/outono-e-agricultura-sao-influenciados-pelo-fenomeno-la-nina>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

AHMAD, I.; TANG, D.; WANG, T.; WANG, M.; WAGAN, B. Precipitation trends over time using Mann-Kendall and Spearman's RHO tests in Swat River Basin, Pakistan. **Advances In Meteorology**, v. 2015, p. 1-15, 2015.

ALIZADEH-CHOOBARI, O.; NAJAFI, M. S. Extreme weather events in Iran under a changing climate. **Climate Dynamics**, v. 50, n. 1-2, p. 249-260, 2018.

ANDERSON, L. O.; MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LADLE, R.; ARAI, E.; BARBIER, N.; PHILLIPS, O. Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies. **New Phytologist**, v. 187, n. 3, p. 733-750, 2010.

ANGELO, Claudio; MARENGO, José Antonio. **IPCC AR6, WG1: Resumo Comentado**. Observatório do Clima, 2021. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2021/08/OC-IPCC-AR6-FACTSHEET_FINAL.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2021.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 7, p. 1-5, 2007.

ASSAD, E. D.; SANO, E. E.; MASUTOMO, R.; CASTRO, L. H. R.; SILBA, F. A. M. Veranicos na região dos Cerrados brasileiros frequência e probabilidade de ocorrência. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 9, p. 993-1003, 1993.

ASSAD, E. D.; VICTORIA, D. C.; CUADRA, S. V.; PUGLIERO, V. S.; ZANETTI, M. R. Efeito das mudanças climáticas na agricultura do Cerrado. In: BOLFE, É. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 213-228.

BISHT, D. S.; CHATTERJEE, C.; RAGHUWANSHI, N. S.; SRIDHAR, V. Spatio-temporal trends of rainfall across Indian river basins. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, n. 1-2, p. 419-436, 2018.

BOLFE, É. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, 2020, 312 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Mapeamento do Uso e Cobertura do Cerrado: Projeto TerraClass Cerrado**. Brasília-DF, 2015, 67p.

CAMPOS, J. O. **Variabilidade da precipitação no Cerrado e sua correlação com a mudança no uso da terra**. 2018. 132f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

CAMPOS, J. O.; CHAVES, H. M. L. 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, mar. 2020.

DEBORTOLI, N. S.; DUBREUIL, V.; FUNATSU, B.; DELAHAYE, F.; OLIVEIRA, C. H.; RODRIGUES-FILHO, S.; SAITO, C. H.; FETTER, R. Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). **Climatic Change**, v. 132, n. 2, p. 251-264, 2015.

GADÊLHA, A. N. **Análise da missão GPM (Global Precipitation Measurement) na estimativa da precipitação sobre território brasileiro**. 2018. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 2018.

GDAL - OGR contributors. **GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library**. Open Source Geospatial Foundation. Disponível em: <<https://gdal.org>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017.

HARRIS, C. R.; MILLMAN, K. J.; VAN DER WALT, S.J. et al. Array programming with NumPy. **Nature**, 585, 357–362, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.

HUSSAIN, Md. Manjurul; MAHMUD, Ishtiak. pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. **Journal of Open Source Software**, 4(39), 1556, 2019. <https://doi.org/10.21105/joss.01556>.

HOFMANN, G. S.; CARDOSO, M. F.; ALVES, R. J. V.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; TOLEDO, P. M.; PONTUAL, F. B.; SALLES, L. O.; HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; AQUINO, F. E.; OLIVEIRA, L. F. B. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, p. 1-14, 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. 168p.

INPE. Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC. **Condições atuais do ENOS: fase neutra**, 2021. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Perguntas Frequentes. Monitoramento do território: mudanças climáticas, 2021**. Disponível em:

<<http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=9>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

IPCC (2021a). Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J.B.R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B.(eds). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press. In Press, 2021, 41p.

IPCC (2021b). ARIAS, P. A.; BELLOUIN, N; COPPOLA, E.; JONES, R. G;. KRINNER, G.; MAROTZKE, J.; NAIK, V.; PALMER, M. D. *et al.* Technical Summary. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J.B.R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B.(eds). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press. In Press, 2021, 150p.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. 4. ed. London, UK: Griffin, 1975, 202 p.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245, 1945.

MARCUZZO, F. F. N.; ROMERO, V. Influência do El Niño e La Niña na precipitação máxima diária do estado de Goiás. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 429-440, dez. 2013.

MENDONÇA, F. A. Mudanças climáticas globais: controvérsias, participação brasileira e desafios à ciência. **Humboldt - Revista de Geografia Física e Meio Ambiente**, v. 1, n. 2, p. 1-28, 2021.

MOTTA, LUIZ PACHECO (2021a). Lapig msc giovana package – Cap. 4. Brasília (DF): Github. <https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/tree/main/cap_04/motta_2021a>. Acessado em: 08 ago. 2021.

MOTTA, LUIZ PACHECO (2021b). Lapig msc giovana package – Cap. 4. Brasília (DF): Github. <https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/tree/main/cap_04/motta_2021b>. Acessado em: 08 ago. 2021.

MOTTA, LUIZ PACHECO (2021c). Lapig msc giovana package – Cap. 4. Brasília (DF): Github. <https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/tree/main/cap_04/motta_2021c>. Acessado em: 08 ago. 2021.

MOTTA, LUIZ PACHECO (2021d). Lapig msc giovana package – Cap. 4. Brasília (DF):

Github. <https://github.com/lmotta/lapig_msc_giovana/tree/main/cap_04/motta_2021d>. Acessado em: 08 ago. 2021.

MOURATO, S.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J. A. M. Interannual variability of precipitation distribution patterns in Southern Portugal. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 12, p. 1784-1794, 2010.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, Jr. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **The Global Precipitation Measurement Mission (GPM)**, 2021a. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM>>. Acesso em: 24 jul. 2021.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **What are the differences between IMERG Early, Late, and Final Runs, and which should be used for research?** 2021b. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/resources/faq/what-are-differences-between-imerg-early-late-and-final-runs-and-which-should-be-used>>. Acesso em: 24 jul. 2021.

O'GORMAN, P. A. Precipitation extremes under climate change. **Current Climate Change Reports**, v. 1, n. 2, p. 49-59, 2015.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas.** AMBRIZZI, T.; ARAÚJO, M. A. (Eds.). COPPE: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014a, 464p.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.** Sumário Executivo do GT1. PBMC: Rio de Janeiro, Brasil. 2013a, 24p.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.** Sumário Executivo do GT2. PBMC: Rio de Janeiro, 2013b, 28p.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Contribuição do Grupo de Trabalho 3 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.** Sumário Executivo do GT3. PBMC: Rio de Janeiro, 2013c, 24p.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas.** Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. ASSAD, E. D.; MAGALHÃES, A. R. (Eds.). COPPE: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014b, 414p.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Mitigação das mudanças climáticas**. Contribuição do Grupo de Trabalho 3 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. BUSTAMANTE, M.; ROVERE, E. L. (Eds.). COPPE: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014c, 463p.

PENEREIRO, J. C.; MESCHIATTI, M. C. Tendências em séries anuais de precipitação e temperaturas no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 319-331, 2018.

POHLERT, T. **Trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection**. R package version 1.1.4, 2020. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=trend>>. Acesso em: 24 jul. 2021.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2020. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 24 jul. 2021.

SALESKA, S. R.; DIDAN, K.; HUETE, A. R.; ROCHA, H. R. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, v. 318, n. 5850, p. 612-612, 2007.

SANOOGO, S.; FINK, A. H.; OMOTOSHO, J. A.; BA, A.; REDL, R.; ERMERT, V. Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in West Africa. **International Journal of Climatology**, v. 35, n. 15, p. 4589-4605, 2015.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379-1389, 1968.

SILVA JUNIOR, C.; ALMEIDA, C.; SANTOS, J.; ANDERSON, L.; ARAGÃO, L.; SILVA, F. Spatiotemporal rainfall trends in the Brazilian Legal Amazon between the years 1998 and 2015. **Water**, v. 10, n. 9, 1220, 2018.

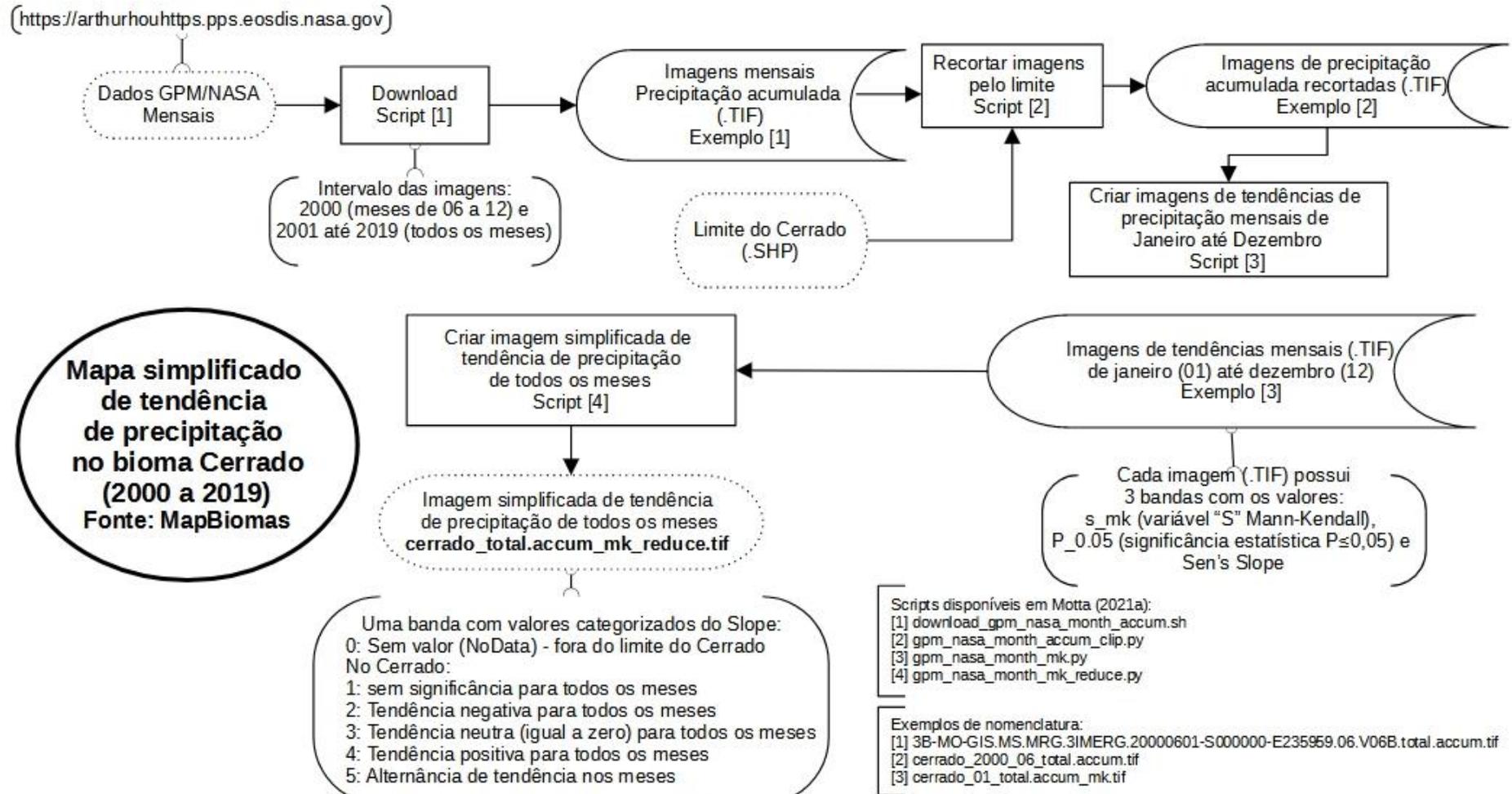
SILVA, C. A. **Precipitações no Cerrado: análise da variabilidade pluviométrica e influência do fenômeno El Niño Oscilação Sul**. 2018. 190 f. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SOUZA, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; FERREIRA NETO, L. C. F.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12172735>.

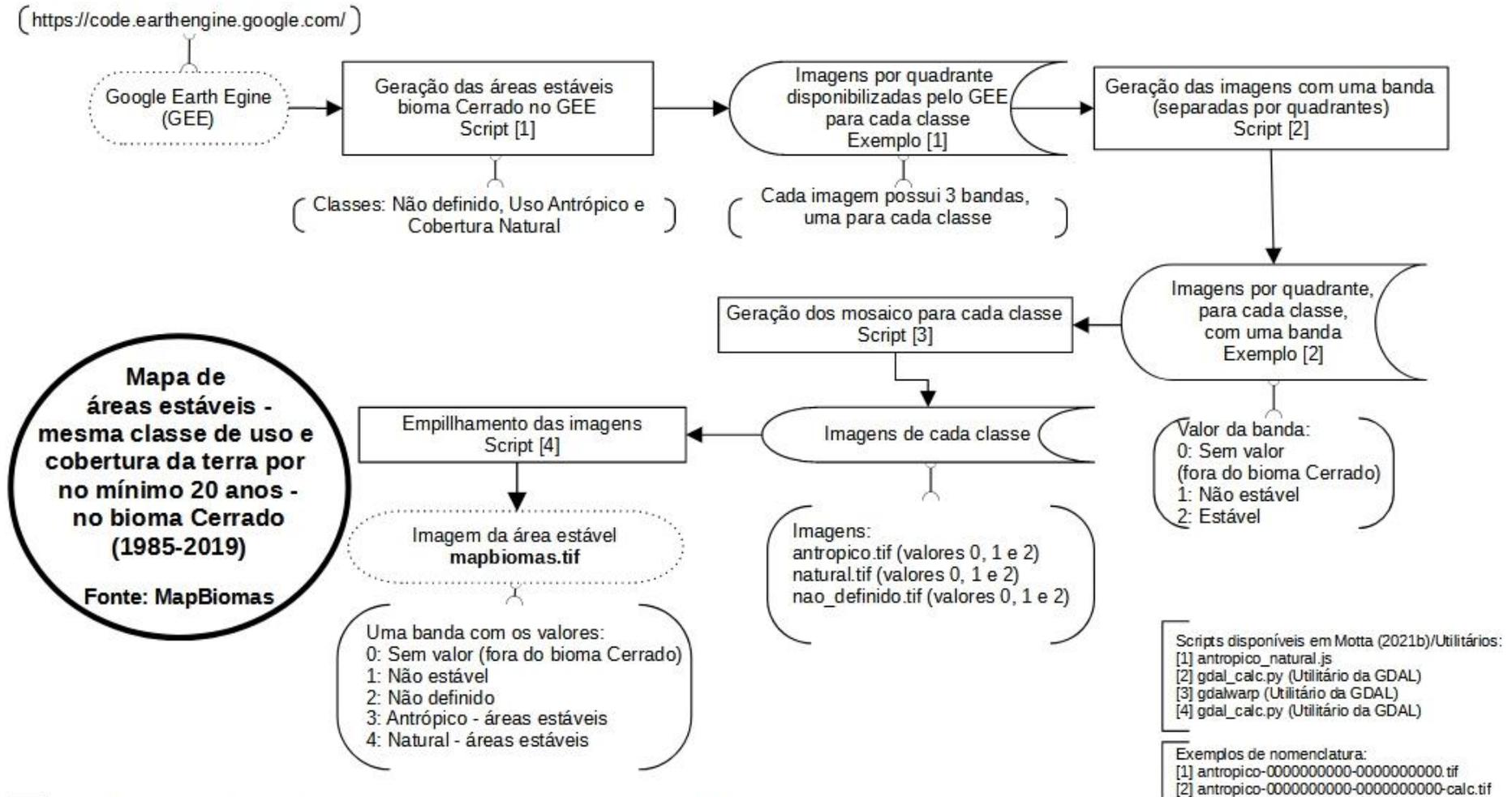
ZANDONADI, L.; ACQUAOTTA, F.; FRATIANNI, S.; ZAVATTINI, J. A. Changes in

precipitation extremes in Brazil (Paraná River Basin). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 123, n. 3-4, p. 741-756, 2016.

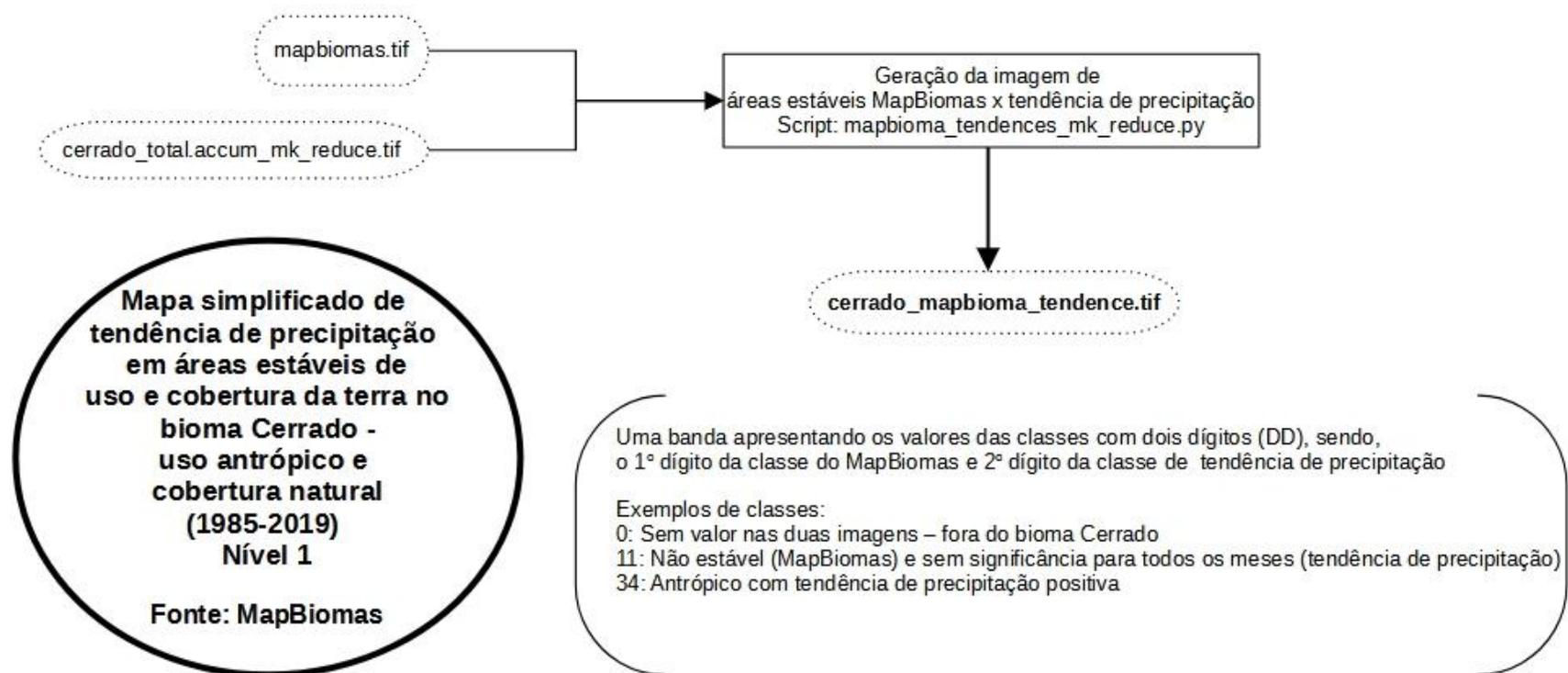
APÊNDICE A - Fluxograma dos *scripts* empregados no capítulo e disponibilizados em Motta (2021a)



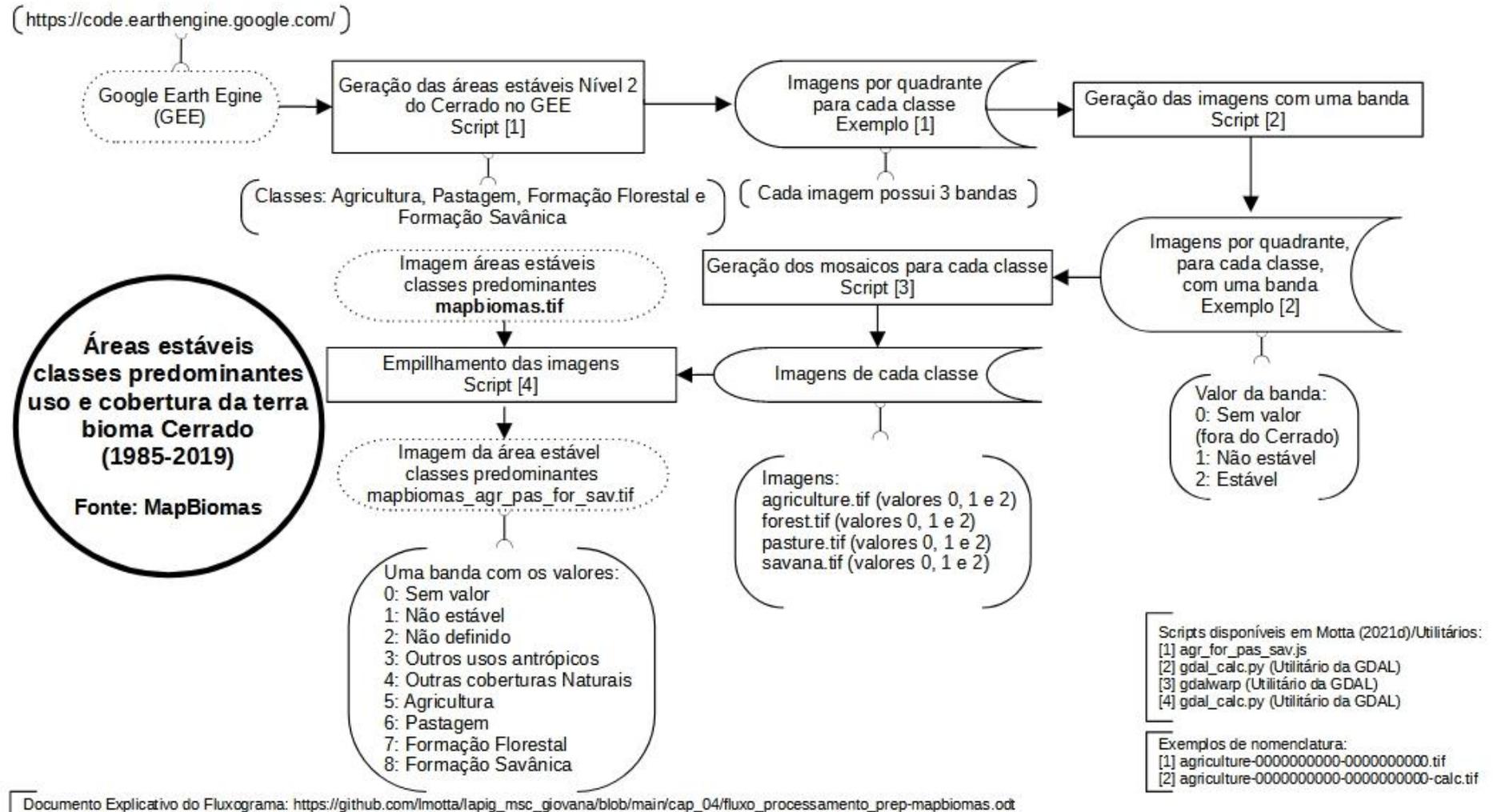
APÊNDICE B - Fluxograma dos *scripts* empregados no capítulo e disponibilizados em Motta (2021b)



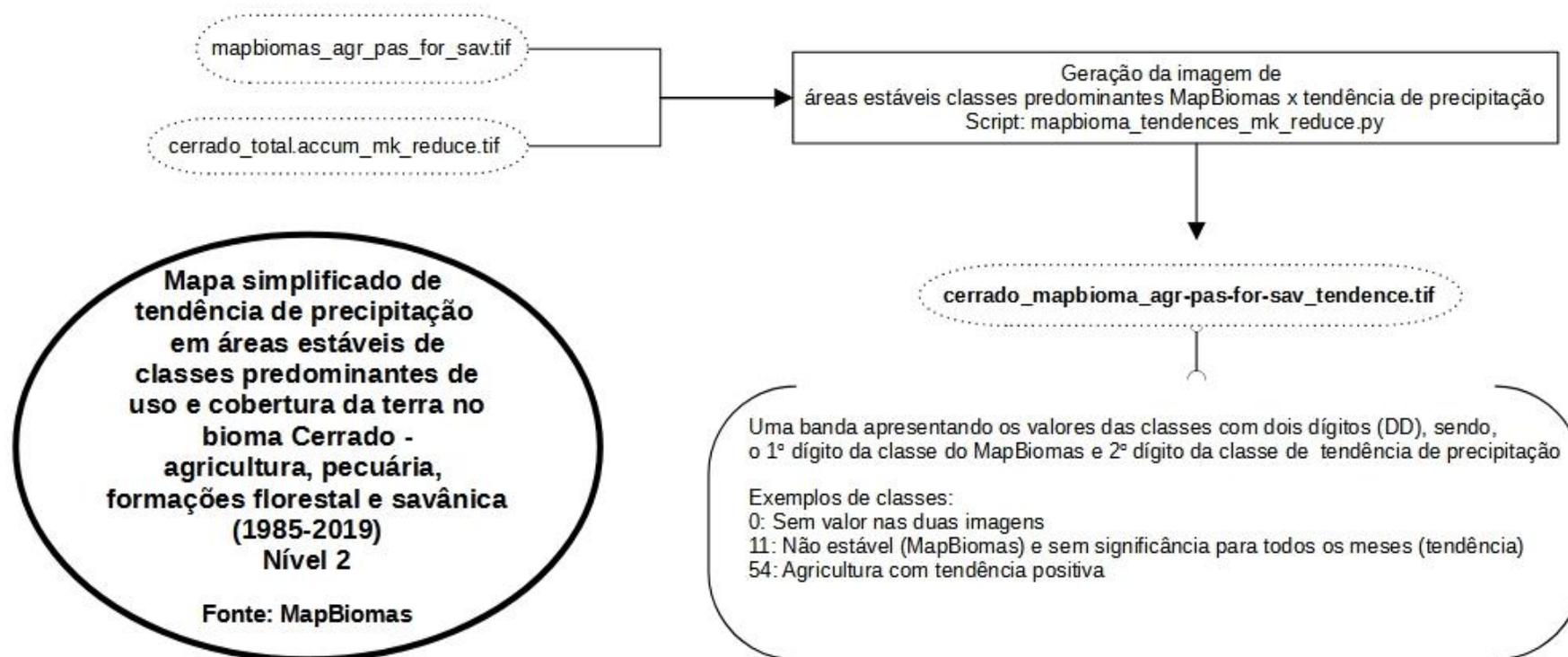
APÊNDICE C - Fluxograma dos *scripts* empregados no capítulo e disponibilizados em Motta (2021c)



APÊNDICE D - Fluxograma dos *scripts* empregados no capítulo e disponibilizados em Motta (2021d)



APÊNDICE D - Fluxograma dos *scripts* empregados no capítulo e disponibilizados em Motta (2021d) (continuação)



CONCLUSÕES GERAIS

No Capítulo II desse estudo, avaliou-se a conformidade de dois Modelos digitais de Elevação (MDEs) disponíveis gratuitamente, o Modelo Digital de Elevação Global 1 segundo de arco (NASADEM_HGT) versão 1 e o Modelo Digital de Superfície Global de Observação de Terra Avançado (ALOS AW3D30), versão 3.1, com as altitudes fornecidas por 1695 estações de referência do Sistema Geodésico Brasileiro. Ambos os modelos foram avaliados com base nos parâmetros recomendados no Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), que define tolerâncias de erro de acordo com oito escalas diferentes (de 1:1000 a 1:250.000) e classes A (tolerância mais rigorosa, por exemplo, 0,17 m para a escala 1:1000), B, C e D (tolerância menos rigorosa, por exemplo, 50 m para a escala 1:250.000). Considerando a classe A, o NASADEM_HGT alcança 1:250.000 e escalas inferiores, enquanto o AW3D30 alcança 1:100.000 e escalas inferiores; para a classe B, NASADEM_HGT alcança 1:100.000 e AW3D30 alcança 1:50.000. O MDE AW3D30 apresentou valores mais baixos de RMSE, desvio padrão e viés, indicando que apresenta maior precisão em relação ao NASADEM_HGT. Em oito dos municípios do Cerrado com a maior produção de grãos, as diferenças entre as altitudes médias, medidas pelo tamanho do Efeito Cohen, foram estatisticamente insignificantes. Os resultados obtidos pelo PEC-PCD para o bioma Cerrado indicam que ambos os modelos podem ser empregados em diferentes aplicações sobre este bioma, como por exemplo, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), respeitando-se as escalas apontadas neste capítulo para cada MDE.

A conformidade dos dados de precipitação GPM IMERG *Final Run*, com resolução espacial de 30 minutos, foi avaliada por meio da comparação com dados obtidos por estações automáticas meteorológicas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no III capítulo. Para tanto, análises estatísticas foram empregadas, como Erro Médio Absoluto (MAE), Viés Percentual (PBIAS), Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE), Erro Médio (ME), Coeficiente de Correlação de Pearson (r), acrescidos do Índice de Concordância de Willmott (d) e Índice de Confiança e Desempenho (c). Para quantificar a capacidade de detecção de precipitação das estimativas orbitais versus observações terrestres, foram utilizados os índices Probabilidade de Detecção (POD), Taxa de Alarme Falso (FAR), Índice de Sucesso Crítico (CSI, do inglês *Critical Success Index*), também conhecido como *Thread Score* (TS), e Porcentagem Correta (PC) para dados agrupados para todos os meses ao longo do período de 2017 a 2019, estações do ano e todos os dias desse período. Estes últimos índices foram espacializados.

Considerando a escala temporal mensal, os resultados mais fracos para esses índices foram encontrados para o período seco, especialmente para os meses de junho, julho e agosto, porém ainda bastante satisfatórios: $POD > 89\%$, $FAR < 25\%$, $CSI > 69\%$ e $PC > 74\%$. O índice POD foi muito próximo a 100% em todas as estações do ano. Já o índice FAR apresentou seu pior resultado no Inverno, 8,87%, por englobar meses secos (julho, agosto e setembro). Em relação aos índices CSI e PC , os menores resultados estão também associados ao Inverno. Ainda assim, estão acima de 90%, o que representa um ótimo resultado. Tomando-se como base a escala temporal diária, tendo em vista a resolução espacial da GPM e grande quantidade de dados analisados, os índices também se apresentaram bastante satisfatórios: $POD > 83\%$, $FAR < 31\%$, $CSI > 61\%$, $PC > 82\%$. Foi identificada a ocorrência de alarmes falsos - quando não há medição de chuva nas estações meteorológicas automáticas do INMET, mas a GPM detecta precipitação - principalmente no limite Nordeste do bioma Cerrado. Conclui-se, dessa forma, que os dados GPM possuem grande potencial para serem incorporados à metodologia do ZARC, especialmente para complementação da série histórica de dados provenientes de estações pluviométricas de superfície, observado o período de latência de disponibilização dos dados (3,5 meses), não sendo indicados para aplicações que necessitem de dados em tempo quase real ou real.

No capítulo IV, foi abordada a dinâmica da precipitação no bioma Cerrado, a partir da identificação espaço-temporal de áreas de tendências dessa variável climatológica e as suas relações com o uso e cobertura da terra, análise de suma importância para a agricultura, uma vez que foi identificada a intensificação dos meses de seca no bioma, considerando o período de 2000 a 2019. No mês de agosto, tendências significativas negativas cobriram extensa área no estado de Goiás e DF, com valor de Sen's Slope chegando a -1,55 mm/mês. No mês de junho, na região norte do bioma - estado do Maranhão - foram identificadas tendências significativas negativas, que alcançaram -9,1 mm/mês, assim como nas regiões noroeste (Mato Grosso) e sudeste do bioma (Minas Gerais) no mês de julho, alcançando -3,68 mm/mês. Também foi identificada no mês de dezembro decréscimo de chuva da ordem de -3,29 mm/mês. Anomalias de precipitação também foram identificadas, mas aparentemente não possuem relação com eventos ENOS La Niña e El Niño, uma vez que ocorreram na fase de neutralidade entre os fenômenos.

Os resultados do cruzamento da informação entre o mapa simplificado de precipitação, o qual conjuga em um só mapa todas as áreas identificadas que apresentaram tendência ao longo do período analisado - 2000 a 2019 - com áreas estáveis de uso e cobertura da terra (mínimo de 20 anos sem mudanças), em 2 níveis: uso antrópico e cobertura natural, e com as

classes predominantes de uso antrópico (agricultura pecuária) e cobertura natural (formações florestal e savânica), demonstram que essas questões sobre variações climáticas não são simples de serem respondidas. De acordo com a metodologia adotada nesse estudo, no 1º nível de cruzamento, as áreas de cobertura natural, que apresentaram tendência significativa negativa, ocuparam 19,86% (393.768 km²) do bioma Cerrado, com média Sen's slope de -2,58 mm/mês. Já áreas de uso antrópico ocuparam 12,31% do bioma (244.101 km²) do Cerrado e a apresentaram -2,55 mm/mês de decréscimo de precipitação. As médias dos valores para áreas positivas foram muito próximas para ambos.

Dessa forma, verificou-se que aproximadamente 20% do Cerrado coberto com vegetação nativa apresentou tendência de redução estatisticamente significativa de precipitação de -2,58 mm/mês e de -2,55 mm/mês em 12% da área total do Cerrado com cobertura antrópica. Assim, ambos os tipos de uso e cobertura da terra apresentaram redução de precipitação. As áreas que apresentaram tendências significativas positivas de precipitação ocuparam 5% do Cerrado (aumento em torno de 5 mm/mês).

Já no 2º nível de cruzamento, que considerou as classes predominantes de uso antrópico e cobertura natural, a saber: agricultura, pecuária, formações florestal e savânica (áreas estáveis), em relação às áreas que apresentaram tendências significativas negativas de precipitação no bioma Cerrado, é possível perceber que 10,10% (200.257 km²) se localizaram em formação savânica (classe de cobertura natural). Em seguida, as áreas de pastagem (classe de uso antrópico) ocuparam 9,14% (181.291 km²) das regiões que apresentaram essa tendência, seguidas de formação florestal – classe de cobertura natural (6,03%; 119.642 km²) e agricultura – classe de uso antrópico (2,02%, 40.059 km²). Já as áreas que apresentaram tendências significativas positivas de precipitação (apenas 5,43% do Cerrado) são ocupadas por pastagens (1,97%; 39.156 km²), seguida de formação savânica (1,11%; 21.293 km²).

No que se refere aos valores médios de decréscimo de precipitação das áreas com tendência significativa negativa, a classe que apresentou o maior valor de Sen's Slope foi agricultura (-3,27 mm/mês), seguida de formação florestal, pastagem e formação savânica: -2,71 mm/mês, -2,35 mm/mês e -2,26 mm/mês, respectivamente. Já em relação ao valor médio de acréscimo de precipitação das áreas com tendência significativa positiva, a agricultura apresentou o maior valor (5,60 mm/mês), seguida de pastagem (5,38 mm/mês) e das formações florestal e savânica, com 5,17 mm/mês e 4,54 mm/mês, respectivamente. As relações entre decréscimo e acréscimo de precipitação e tais classes de uso e cobertura da terra provavelmente se dão devido às características intrínsecas das mesmas e interações com o ambiente ao longo dos anos.

Dessa maneira, percebe-se que a precipitação no Cerrado sofre influências de fatores locais, como o uso e cobertura da terra, mas a relação/contribuição das áreas estáveis de uso antrópico e a ocorrência de áreas com tendência significativa de precipitação não é direta. Por exemplo, foi possível observar que a formação savânica ocupa a maior área onde as tendências significativas negativas de precipitação ocorreram, seguida de pastagens. Tais resultados apontam a necessidade da realização de estudos aprofundados para entender essas relações, interações dos diferentes usos e coberturas da terra com o ambiente, com a possibilidade de aplicação outras fontes de dados e variáveis climática, considerando, ainda, a influencia da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e o Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), sistemas de alta pressão atmosférica como a Alta da Bolívia, eventos extremos de precipitação e seca, além do aumento da temperatura no bioma e relações solo-planta-clima.