

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Efeitos das mudanças de uso e cobertura do solo no regime de precipitação do
Cerrado**

Nathan de Oliveira Neumann
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

NATHAN DE OLIVEIRA NEUMANN

Efeitos das mudanças de uso e cobertura do solo no regime de precipitação do Cerrado

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Gabrielle Ferreira Pires

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

N492e
2025

Neumann, Nathan de Oliveira, 1999-

Efeitos das mudanças de uso e cobertura do solo no regime de precipitação do Cerrado / Nathan de Oliveira Neumann. – Viçosa, MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (56 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Gabrielle Ferreira Pires.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2025.

Referências bibliográficas: f. 52-56.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.683>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Chuvas. 2. Solo - Uso. 3. Desmatamento. 4. Mudanças climáticas. 5. Savanas. I. Pires, Gabrielle Ferreira, 1987-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada. III. Título.

CDD 22. ed. 551.577

NATHAN DE OLIVEIRA NEUMANN

Efeitos das mudanças de uso e cobertura do solo no regime de precipitação do Cerrado

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 1 de agosto de 2025.

Assentimento:

Nathan de Oliveira Neumann
Autor

Gabrielle Ferreira Pires
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 22/10/2025 às 10:20:36 e pela orientadora em 29/10/2025 às 08:22:56. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **XVQ9.1OF1.85AG** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Diversas pessoas contribuíram direta e indiretamente para a realização desse projeto, e por isso sou grato a todos, e espero que esse impacto positivo na minha vida seja retornado para a de cada uma.

Apesar de não me alongar em agradecimentos específicos a pessoas que sabem a importância que possuem na minha trajetória, eu dedico essa seção em memória do meu avô Odemar, que foi uma das pessoas que mais instigou minha busca por conhecimento desde a infância, me estimulando com a leitura de enciclopédias, almanaques e conversas sobre a história do Brasil e do mundo. Coincidentemente, ele me apelidava de mestre Nathan, o que faz esse título invocar boas memórias e ser ainda mais especial para mim. Espero que eu tenha me tornado a pessoa que você teria um orgulho imenso de ter como neto.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

NEUMANN, Nathan de Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2025. **Efeitos das mudanças de uso e cobertura do solo no regime de precipitação do Cerrado.** Orientadora: Gabrielle Ferreira Pires.

As mudanças de uso e cobertura do solo constituem um dos maiores problemas ambientais no Cerrado, impulsionadas majoritariamente pela expansão do setor agropecuário sobre áreas com vegetação nativa. Apesar dos impactos já documentados e da importância ecológica e econômica do bioma, sua proteção ainda é negligenciada, com legislação deficiente e áreas protegidas mal planejadas. Dessa forma, esse trabalho visou avaliar as possíveis relações entre as mudanças de uso e cobertura do solo e o regime de precipitação no Cerrado. Para isso, foi calculada a correlação de Spearman entre o uso do solo agropecuário e variáveis obtidas a partir de dados de chuva, como total precipitado, frequência de dias secos e os parâmetros da estação chuvosa (início, fim e duração). O total de precipitação e de dias secos foi analisado para cada trimestre: dezembro, janeiro e fevereiro (verão); março, abril e maio (outono); junho, julho e agosto (inverno); e setembro, outubro e novembro (primavera). Como o bioma apresenta grande heterogeneidade ambiental, ele foi dividido em vinte ecorregiões, com as análises conduzidas individualmente em cada uma, visto que cada local pode ter uma resposta diferente. Nos locais em que houve resultados estatisticamente significativos nas análises de correlação, as relações foram modeladas através de Modelos Aditivos Generalizados. Os resultados mostram correlações moderadas no geral, com todos eles indicando a intensificação de condições secas conforme o uso do solo agropecuário se expandiu, embora com magnitudes relativamente fracas e relações não lineares. Os resultados significativos se concentraram em trimestres com meses mais secos, quando a precipitação fica menos dependente de sistemas atmosféricos de larga escala. Durante o outono, foram observadas correlações com o total precipitado e com a frequência de dias secos em regiões na macrorregião do Centro-Oeste. No inverno, correlações com essas variáveis foram identificadas em áreas que abrangem o Tocantins, partes do Mato Grosso e de Goiás. Essas regiões também apresentaram correlações com a frequência de dias secos durante a primavera, bem como com o início e o fim da estação chuvosa, indicando, respectivamente, seu atraso e encurtamento à medida que a expansão agropecuária se intensificou nesses locais. Esse estudo demonstrou as áreas e épocas

potencialmente mais afetadas pelas mudanças de uso e cobertura do solo no Cerrado, a fim de contribuir para o conhecimento científico e ampliar o debate sobre a ainda ineficiente conservação do bioma.

Palavras-chave: chuva; desmatamento; savana; mudanças climáticas

ABSTRACT

NEUMANN, Nathan de Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2025. **Impacts of land use and land cover change on the Cerrado precipitation regime.** Adviser: Gabrielle Ferreira Pires.

Land use and land cover changes are amongst the major environmental problems in the Brazilian Cerrado, driven primarily by the agribusiness expansion over native vegetation. Despite the well-documented impacts and the region's ecological and economic relevance, the biome's protection remains neglected, with weak legislation and inadequately planned protected areas. Therefore, this study aimed to assess possible relationships between land use and land cover change and the precipitation regime in the Cerrado. Spearman correlation was performed between the farming land use and precipitation-related variables, namely total rainfall, dry day frequency and the rainy season parameters, which include its onset, demise and duration. The total precipitation and dry day frequency were analyzed for each quarter: December, January and February (summer); March, April and May (fall); June, July and August (winter); and September, October and November (spring). Due to the biome's climatic heterogeneity, it was divided into twenty ecoregions, with the analysis conducted individually for each, considering potentially different responses. In regions with statistically significant results, the relationship between variables was modelled using Generalized Additive Models. The results show moderate correlations in general, indicating the intensification of dry conditions according to the expansion of farming land use, despite relatively low magnitudes and predominantly non-linear relationships. Most of the results were found in quarters containing drier months, when precipitation is less dependent on large-scale atmospheric systems. In fall, Center-West regions exhibited correlations for both total rainfall and dry day frequency, a pattern also observed during winter in regions encompassing Tocantins and parts of Mato Grosso and Goiás. These regions also presented correlations with the dry day frequency during spring, as well as with the onset and duration of the rainy season, indicating, respectively, its delay and shortening as the agribusiness territory expanded in those areas. This research identified the regions and seasons potentially most affected by land use and land cover changes in the Cerrado, aiming to contribute to scientific understanding and support the debate on the biome's still insufficient conservation.

Keywords: rainfall; deforestation; savanna; climate change

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Delimitação territorial atual (IBGE, 2019) do Cerrado no Brasil.	15
Figura 2 – Precipitação anual média no Cerrado (1993-2022).	16
Figura 3 – Precipitação mensal média para o Cerrado e para as áreas do bioma contidas em cada estado (1993-2022).	17
Figura 4 – Subdivisão do Cerrado em ecorregiões de acordo com precipitação, vegetação, solo e relevo (Sano et al., 2018).	21
Figura 5 – Evolução histórica (1985-2022) do uso e cobertura do solo nas ecorregiões Complexo Bodoquena, Paraná Guimarães, Planalto Central, Basaltos do Paraná e Alto São Francisco.	25
Figura 6 – Evolução histórica (1985-2022) do uso e cobertura do solo nas ecorregiões Paracatu, Jequitinhonha, Bico do Papagaio, Chapadão do São Francisco e Depressão Cárstica do São Francisco.	26
Figura 7 – Evolução histórica (1985-2022) do uso e cobertura do solo nas ecorregiões Vão do Paranã, Araguaia Tocantins, Bananal, Chapada dos Parecis e Depressão Cuiabana.	27
Figura 8 – Evolução histórica (1985-2022) do uso e cobertura do solo nas ecorregiões Costeiro, Floresta de Cocais, Centro-norte Piauiense, Alto Parnaíba e Parnaguá.	28
Figura 9 – Normal climatológica (1993-2022) das variáveis ligadas à precipitação para as ecorregiões do Cerrado.	31
Figura 10 – Histogramas e resultados do teste de Shapiro-Wilk para cada variável padronizada (Z-score) nas regiões Alto Parnaíba, Alto São Francisco, Araguaia Tocantins e Bananal.	33
Figura 11 – Histogramas e resultados do teste de Shapiro-Wilk para cada variável padronizada (Z-score) nas regiões Basaltos do Paraná, Bico do Papagaio, Chapada dos Parecis e Chapadão do São Francisco.	34
Figura 12 – Histogramas e resultados do teste de Shapiro-Wilk para cada variável padronizada (Z-score) nas regiões Complexo Bodoquena, Costeiro, Depressão Cárstica do São Francisco e Depressão Cuiabana.	35

Figura 13 – Histogramas e resultados do teste de Shapiro-Wilk para cada variável padronizada (Z-score) nas regiões Jequitinhonha, Centro-norte Piauiense, Paracatu e Paraná-Guimarães.	36
Figura 14 – Histogramas e resultados do teste de Shapiro-Wilk para cada variável padronizada (Z-score) nas regiões Parnaguá, Planalto Central, Vão do Paraná e Floresta de Cocais.	37
Figura 15 – Resultados espacializados da correlação de Spearman entre a categoria <i>farming</i> e as variáveis de precipitação.	39
Figura 16 – Resultados em heatmap da correlação de Spearman entre a categoria <i>farming</i> e as variáveis de precipitação.	40
Figura 17 – Gráficos de dispersão entre os parâmetros da estação chuvosa (início, fim e duração) e o uso e cobertura do solo da categoria <i>farming</i> para a ecorregião do Vão do Paraná.	42
Figura 18 – Modelos aditivos generalizados das variáveis selecionadas nas análises de correlação.	44
Figura 19 – QQ plots dos modelos aditivos generalizados.	45
Figura 20 – Gráficos de resíduos x valores ajustados pelos Modelos Aditivos Generalizados.	46
Figura 21 – Heatmap com as diferenças entre o primeiro e último ano da série histórica (1985-2022) de acordo com os modelos aditivos generalizados, na escala original de cada variável.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis utilizadas no estudo, separadas em variáveis independentes Y (precipitação e frequência de dias secos trimestral, parâmetros da estação chuvosa) e variável dependente X (porcentagem de ocupação da ecorregião por pixels da categoria <i>farming</i>).	23
Tabela 2 – Crescimento relativo (em porcentagem) da categoria <i>farming</i> em cada ecorregião no Cerrado (1985-2022).	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Anomalous Accumulation

ADW – Angular distance weighting

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento

BR-DWGD - Brazilian Daily Weather Gridded Data

CNUC – Cadastro Nacional de Unidades de Conservação

DJF – dezembro, janeiro e fevereiro

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

GEE – Gases de efeito estufa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

JJA – junho, julho e agosto

MAG – Modelo Aditivo Generalizado

MAM – março, abril e maio

MATOPIBA – Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia

Mha – Mega hectares

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MUCS – Mudanças de uso e cobertura do solo SON – setembro, outubro e novembro

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa

UC – Unidade de Conservação

WMO – World Meteorological Organization

SUMÁRIO

1. Introdução	12
2. Objetivos	14
2.1. Objetivo geral	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. Metodologia	14
3.1. Área de estudo	14
3.2. Dados e variáveis utilizadas	18
3.2.1. Uso e cobertura do solo	18
3.2.2. Precipitação	19
3.2.3. Anomalous Accumulation	19
3.3. Agrupamento dos dados	20
3.4. Testes de normalidade, correlação e modelagem estatística	22
4. Resultados	24
4.1. Caracterização das mudanças de uso e cobertura do solo e do regime de precipitação	24
4.2. Relações entre as mudanças de uso e cobertura do solo e o regime de precipitação	31
5. Discussão	48
6. Conclusão	51
Referências	52

1. Introdução

O ser humano constantemente muda o ambiente ao seu redor a fim de adquirir recursos naturais para o desenvolvimento de suas atividades, tendo afetado cerca de 32% da área continental global em apenas seis décadas (Winkler et al., 2021). Apesar da necessidade de exploração, as mudanças de uso e cobertura do solo (MUCS) exigem controle em razão dos impactos que causam em serviços ambientais (Hasan et al., 2020) e em variáveis climáticas (Caballero et al., 2022; Lawrence e Vandekar, 2014). Um exemplo disso é a capacidade dessas mudanças de induzir *feedbacks* locais que afetam o regime de chuvas (Leite-Filho et al., 2021; Spracklen et al., 2018), prejudicando a biodiversidade e atividades econômicas de países como o Brasil, que é um dos principais agentes de MUCS mundialmente (Rosan et al., 2021).

Os níveis atuais de MUCS reportados no Brasil, com o desmatamento como o maior componente dessas mudanças (Souza et al., 2020), podem causar diversos problemas ambientais, econômicos e sociais, como impactos na qualidade (De Mello et al., 2020) e vazão dos corpos d'água (Salmona et al., 2023; Da Silva et al., 2021), reduções de evapotranspiração (Spera et al., 2016), aumento das temperaturas (Butt et al., 2023; Rodrigues et al., 2022), redução na produtividade agrícola (Rattis et al., 2021; Pires et al., 2016), perda de resiliência (Flores et al., 2024; Boulton et al., 2022) e biodiversidade (Brandão et al., 2020) dos ecossistemas, aumento da emissão de gases de efeito estufa (Rosan et al., 2021), além da criação e intensificação de conflitos pelo uso da água e do solo (Da Silva et al., 2021; De Jong et al., 2021).

Os regimes de precipitação também podem ser afetados pelas MUCS (Spracklen et al., 2018), com a maioria dos estudos que avaliam esses impactos no Brasil concentrada na Amazônia, demonstrando que a perda de vegetação nativa pelo desmatamento pode reduzir a precipitação (Smith et al., 2023; Leite-Filho et al., 2021), além de atrasar o início da estação chuvosa e aumentar os períodos de seca (Commar et al., 2023; Leite-Filho et al., 2019). Correlações entre a cobertura vegetal e o regime de chuvas também foram reportadas nas regiões de fronteira entre a Amazônia e o Cerrado por Debortoli et al. (2016), sugerindo que o desmatamento em larga escala pode afetar a distribuição sazonal de precipitação no sul do bioma amazônico.

No Cerrado, embora o desmatamento seja um problema, visto que ele foi o segundo bioma mais afetado nas últimas décadas no Brasil (Souza et al., 2020), o conhecimento sobre como essas MUCS afetam seu regime de precipitação ainda é escasso. As informações estão limitadas a fragmentos do bioma, como nas análises realizadas próximas à Amazônia por Debortoli et al. (2016) e em áreas de dupla safra no Cerrado, onde foram observadas reduções na precipitação e atrasos no início da estação chuvosa (Leite-Filho et al., 2024). O único estudo que considerou todo o bioma foi o de Salazar et al. (2016), que utilizou simulações via modelagem climática e não apresentou alterações significativas nos totais de chuva.

O maior responsável pelas MUCS no Cerrado é o setor agropecuário (Souza et al., 2020), que representa uma das principais atividades econômicas do país. No período de 1985 a 2023, cerca de 38 Mha da vegetação nativa do Cerrado, extensão equivalente a quase 20% de seu território,

foram convertidos predominantemente em áreas desse setor, representando uma perda líquida de 27,4% da vegetação natural do bioma, que atualmente ocupa apenas metade de seu território (MapBiomas, 2024a). Essa tendência de redução da vegetação nativa segue em projeções futuras, podendo chegar a 36,6% de ocupação no bioma em 2070, assumindo a continuidade das tendências socioeconômicas históricas e a plena implementação do Código Florestal (Colman et al., 2024), que é um dos principais mecanismos legislativos de controle de MUCS no Brasil.

O atual Código Florestal brasileiro (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012) exige que parte de uma propriedade rural mantenha a vegetação nativa, sendo permitido o manejo sustentável em algumas situações, caracterizando a Reserva Legal. No Cerrado, essa exigência é de 35% para as regiões dentro da Amazônia Legal e de 20% para as demais regiões, o que representa uma porcentagem muito baixa para preservação. Comparativamente, as propriedades na Amazônia devem preservar 80% de seus territórios como Reserva Legal, contraste este que ajuda a institucionalizar o desmatamento no Cerrado. O Código Florestal já foi repetidamente apontado como insuficiente para a preservação deste bioma ao longo da última década (Colman et al., 2024; Rausch et al., 2019; Vieira et al., 2018; Soares-Filho et al., 2014), o que reforça a necessidade de reformulação e criação de aparatos legais para diminuir o desmatamento, especialmente quando se considera o desmatamento ilegal, que pode agravar a situação ambiental do bioma para além dos níveis mínimos de conservação impostos pela legislação.

Outras ferramentas voltadas para a preservação ambiental no país são as Unidades de Conservação (UCs), regulamentadas pela Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. No Brasil, as UCs são divididas em duas categorias: uso sustentável e proteção integral, totalizando sete e cinco classes para cada categoria, respectivamente. Apenas 9,36% (18,5 Mha) do Cerrado está protegido em UCs, sendo que deste total aproximadamente dois terços (12,5 Mha) estão na classe de Área de Proteção Ambiental (MMA, 2025), que é a mais permissiva em relação ao uso antrópico entre todas as categorias de UC, sendo ineficaz no combate ao desmatamento (Françoso et al., 2015).

A permissividade do Código Florestal, a escassez de Unidades de Conservação efetivas e a repetida descontinuidade de programas de combate ao desmatamento, como o PPCerrado (atualmente em sua 4ª fase, tendo sido descontinuado precocemente na 1ª e na 3ª fases), revelam a vulnerabilidade político-ambiental na qual o bioma se encontra. Assim, este estudo buscou suprir a lacuna existente quanto a uma análise empírica sobre como as MUCS no Cerrado podem afetar seu regime de precipitação em escala sazonal, considerando toda a sua extensão territorial. Esse conhecimento é relevante especialmente quando se levam em conta as dimensões históricas e projeções futuras de desmatamento. Portanto, essa pesquisa pode reforçar a importância ambiental do Cerrado, auxiliar no planejamento territorial, e contribuir para a futura elaboração de políticas de mitigação do desmatamento e das mudanças climáticas, com o objetivo de minimizar os já existentes danos ecossistêmicos e econômicos no bioma.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

Esse estudo teve como objetivo identificar e quantificar as possíveis relações entre o uso e cobertura do solo e o regime de precipitação no Cerrado.

2.2. Objetivos específicos

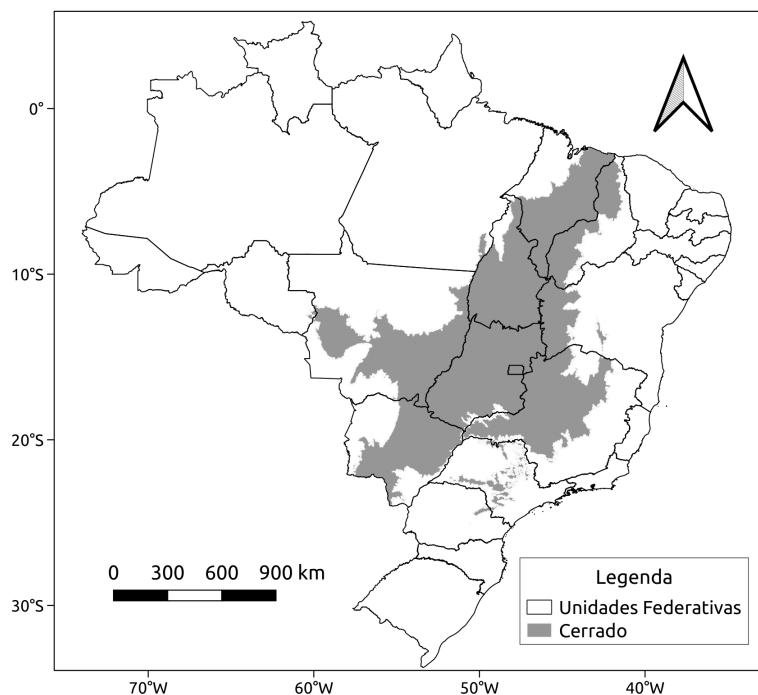
- Dividir o Cerrado em regiões homogêneas do ponto de vista ambiental;
- Avaliar a evolução anual de uso e cobertura do solo em diferentes regiões do Cerrado;
- Definir as regiões que apresentam correlações entre a expansão agropecuária e o regime de precipitação;
- Definir as estações do ano em que são observadas possíveis relações entre a expansão agropecuária e o regime de precipitação;
- Quantificar e identificar a forma funcional das potenciais relações entre o uso do solo agropecuário e o regime de precipitação.

3. Metodologia

3.1. Área de estudo

O Cerrado (Figura 1) é o segundo maior bioma do Brasil, com uma área de aproximadamente 198 Mha, equivalente a 23,3% do território nacional. A atual delimitação espacial do bioma (IBGE, 2019) foi utilizada neste estudo, abrangendo parte de 12 estados (Maranhão, Piauí, Tocantins, Bahia, Rondônia, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Distrito Federal, Minas Gerais, São Paulo e Paraná), estendendo-se desde latitudes próximas ao Equador até latitudes ao Sul do Trópico de Capricórnio. O Cerrado possui fronteiras com quatro outros biomas brasileiros (Amazônia, Pantanal, Mata Atlântica e Caatinga), que aliadas à grande extensão territorial do bioma, resultam em sua elevada diversidade fitofisionômica.

Figura 1 – Delimitação territorial atual (IBGE, 2019) do Cerrado no Brasil.



Fonte: o autor.

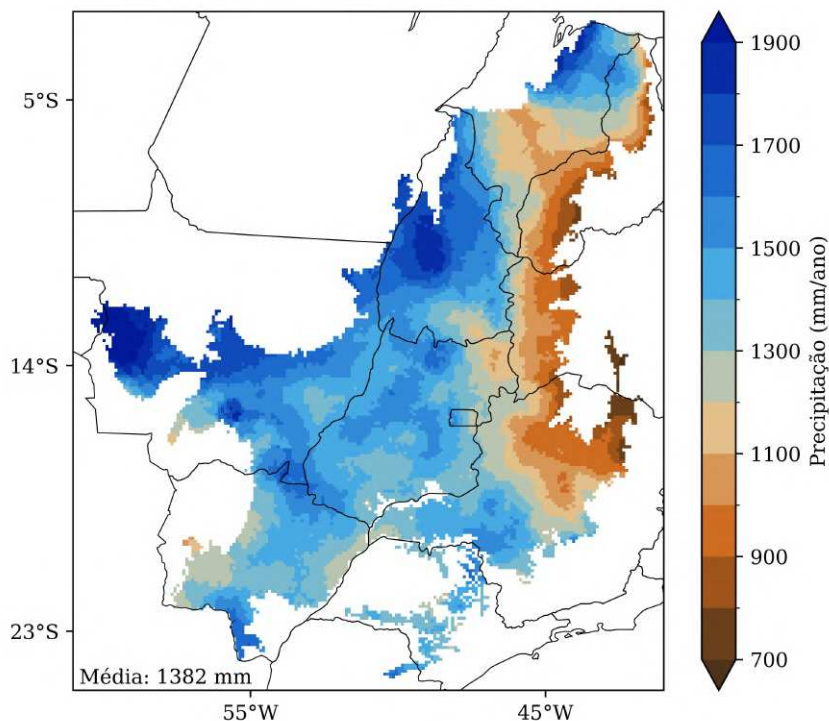
A heterogeneidade da vegetação natural no Cerrado pode ser categorizada em três classes, cada uma com determinados tipos fitofisionômicos: florestas, caracterizadas pelo dossel contínuo de espécies majoritariamente arbóreas (Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca, Cerradão); savanas, referentes a ecossistemas com vegetação arbórea e arbustiva distribuída em áreas cobertas por gramíneas (Cerrado Sentido Restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda); e campos, constituídos por espécies herbáceas e arbustivas, com ausência de árvores (Campo Rupestre, Campo Sujo e Campo Limpo). A caracterização mais detalhada de cada tipo fitofisionômico foi feita por Ribeiro e Walter (2008), que relatam espécies e tipos de solos associados a esses ecossistemas.

Embora essas classificações quanto à cobertura do solo no Cerrado considerem somente as formações naturais, pouco mais da metade (101 Mha) do bioma está atualmente coberta por vegetação nativa (MapBiomas, 2024a). O setor agropecuário domina o restante do território, com 93 Mha reportados em 2023, sendo os 4 Mha restantes ocupados por outros tipos de uso, como áreas urbanas, de mineração e corpos d'água.

O Cerrado também possui elevada variabilidade climática ao longo de seu território. Segundo a classificação de Köppen, o clima desse bioma se enquadra predominantemente no tipo Aw (tropical com inverno seco). Entretanto, há regiões dos tipos Cwa (subtropical com inverno seco e verão quente) e Cwb (subtropical com inverno seco e verão brando) em altitudes elevadas, além do tipo Am (clima de monção) perto da Amazônia (Alvares et al., 2013). Em termos de precipitação anual média no Cerrado (Figura 2), nota-se que as áreas mais úmidas, nas quais podem chover até 2000 mm, correspondem às regiões de fronteira com a Amazônia,

enquanto que a transição com a Caatinga concentra as regiões mais secas, onde as chuvas podem ficar abaixo de 700 mm anualmente.

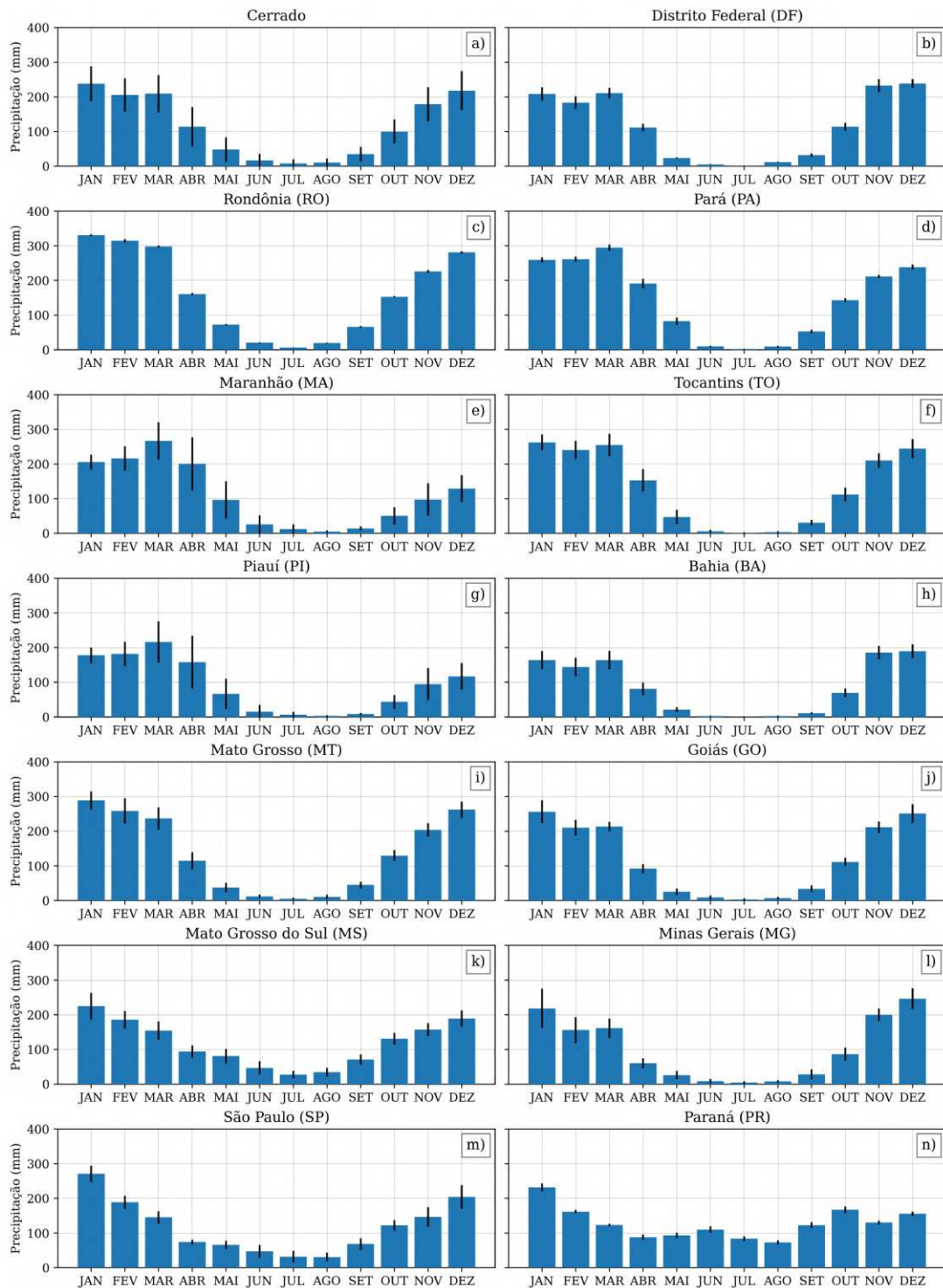
Figura 2 – Precipitação anual média no Cerrado (1993-2022).



Fonte: o autor. Base de dados utilizada: Brazilian Daily Weather Gridded Data (Xavier et al., 2022). A figura apresenta médias dos últimos 30 anos de dados utilizados no estudo.

Uma das características marcantes do clima no Cerrado é a sazonalidade da precipitação. A maior parte do bioma apresenta de forma bem definida uma estação chuvosa, geralmente se iniciando em torno de outubro/novembro e terminando em meados de março/abril, com a estação seca preenchendo o restante do ano (Figura 3). Apenas em áreas mais ao sul do estado de São Paulo e no Paraná que se observam distribuições mais homogêneas das chuvas ao longo do ano.

Figura 3 – Precipitação mensal média para o Cerrado e para as áreas do bioma contidas em cada estado (1993-2022).



Fonte: o autor. As barras verticais representam o desvio padrão dos dados, estes provenientes da base de dados Brazilian Daily Weather Gridded Data (Xavier et al., 2022). A figura apresenta médias dos últimos 30 anos de dados utilizados no estudo.

3.2. Dados e variáveis utilizadas

3.2.1. Uso e cobertura do solo

Os dados de uso e cobertura do solo foram retirados do projeto MapBiomass, que realiza o mapeamento em todo o território brasileiro, com dados a partir de 1985 até 2023 na Coleção 9 (MapBiomass, 2024a), que é a utilizada no estudo. Esse projeto fornece o mapeamento do solo em diferentes classes na resolução espacial de 30 metros e temporal anual.

O mapeamento do MapBiomass é realizado a partir de produtos de sensoriamento remoto da série Landsat, iniciando com a construção de mosaicos anuais com base no comportamento espectral das imagens de satélite. Para cada bioma, há características específicas que determinam o processo de seleção dessas imagens. Considerando o Cerrado, elas são coletadas entre abril e setembro (Alencar et al., 2024), abrangendo o final da estação chuvosa e parte da estação seca. Essa limitação do período de seleção ocorre devido a resposta do comportamento espectral da vegetação do Cerrado em relação a sazonalidade da precipitação. Durante a estação chuvosa, há maior probabilidade de obter imagens cobertas por nuvens e de superestimar as classes de floresta, devido às maiores tonalidades de verde da vegetação durante essa época. Por outro lado, utilizar o final da estação seca pode levar à subestimação das classes de floresta, pela menor chance de mapear florestas decíduais. Portanto, testes preliminares indicam que esse período entre abril e setembro é o ideal para balancear essas incertezas.

Após a criação dos mosaicos anuais, eles passam por um processo de classificação no *Google Earth Engine* com o uso de ferramentas de *Machine Learning*, como o *Random Forest*, que é um algoritmo baseado em árvores de decisão. Após essa classificação, que é feita separadamente para cada classe de uso e cobertura do solo, diferentes filtros (temporal, espacial, de frequência, de incidência e de preenchimento de dados faltantes) são aplicados para melhorar a consistência espacial e temporal do mapeamento. Por fim, os mapas de cada classe são integrados, passando por regras de prevalência para gerar o produto final sem sobreposições (MapBiomass, 2024b).

As análises de acurácia dos resultados são feitas a partir de mapas de referência, em que especialistas na vegetação do bioma analisam as amostras para verificar a acurácia das classes atribuídas pelo algoritmo. No Cerrado, cerca de 20.000 amostras foram utilizadas, distribuídas por todo o bioma. Todo o procedimento de processamento e validação é apresentado com maiores detalhes em MapBiomass (2024b).

Dessa forma, a categoria *farming* foi utilizada como variável de uso e cobertura do solo para as análises deste estudo, referente às áreas de agricultura (culturas temporárias e permanentes, IDs 39, 20, 40, 62, 41, 46, 47, 35 e 48 da base de dados), pastagens (ID 15) e mosaico de usos (ID 21), representando o setor agropecuário do Brasil. A acurácia geral para o nível das classes utilizadas aqui (nível 2 do MapBiomass) é de 80,11% para o Cerrado na Coleção 9 (MapBiomass, 2024a).

3.2.2. Precipitação

Para a precipitação, foi utilizada a base de dados *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD, Xavier et al. [2022]), disponível na escala temporal diária, com dados da última atualização partindo de 1961 até março de 2024, possuindo uma resolução espacial de $0,1^\circ$ ($\approx 10\text{km}$) para todo o território nacional.

O BR-DWGB foi construído através da interpolação de dados observados de diferentes medidores de precipitação e estações meteorológicas espalhadas pelo país, provenientes da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com 11.473 medidores e 1.252 estações no total. Dessa forma, diferentes formas de interpolação foram testadas, realizadas ao nível de bacia hidrográfica, executando a validação cruzada entre os dados observados e os resultados interpolados para definir o melhor método, a partir de métricas estatísticas como coeficiente de correlação, raiz quadrada do erro médio, erro médio absoluto, viés, erro relativo composto, critical success index e percent correct.

O método de interpolação escolhido ao final da validação cruzada foi o *angular distance weighting* (ADW, New et al. [2000]), utilizando dados das cinco estações mais próximas para cada pixel na malha. Naturalmente, regiões com maior densidade de dados observados têm resultados mais precisos para metodologias de interpolação, portanto, embora regiões próximas à fronteira Cerrado-Amazônia fossem carentes de medições anteriormente à década de 1980, nesse período houve um grande aumento na densidade de medições, principalmente na bacia do Tocantins e ao Norte da Bacia do Paraná (Xavier et al., 2022). Como esse estudo só poderia usar dados de precipitação após 1985 por conta da limitação temporal do MapBiomas, esse problema é minimizado e os resultados para o Cerrado como um todo se tornam mais precisos.

A partir dos dados diários de precipitação do BR-DWGB, foram calculadas 11 variáveis a serem utilizadas em análises posteriores, com algumas delas divididas em trimestres, que correspondem em grande parte às estações do ano: março, abril e maio (MAM) - outono; junho, julho, agosto (JJA) - inverno; setembro, outubro e novembro (SON) - primavera; e dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) - verão, sendo janeiro e fevereiro meses do ano seguinte para manter a consistência temporal do trimestre. Dessa maneira, foram calculados os totais de precipitação por trimestre (*prec_DJF*, *prec_MAM*, *prec_JJA*, *prec_SON*), a frequência de dias secos por trimestre (*dry_days_DJF*, *dry_days_MAM*, *dry_days_JJA*, *dry_days_SON*) e o início, fim e duração da estação chuvosa (*onset*, *demise* e *duration*, respectivamente), parâmetros cuja metodologia de cálculo é apresentada no tópico seguinte.

3.2.3. Anomalous Accumulation

Por ser um bioma com predominância de uma estação chuvosa bem definida durante o ano, é possível estimar as datas de início, fim e duração de cada estação, usando o *Anomalous Accumulation*, proposto por Liebmann et al. (2007). Essa metodologia consiste em calcular

a acumulação da anomalia de precipitação em relação a um valor de referência ao longo do período de um ano, conforme a Equação 1:

$$AA(dia) = \sum_{n=1}^{dia} R(n) - \bar{R} \quad (1)$$

Na qual AA é a variável Anomalous Accumulation, R(n) a precipitação diária e $\bar{R}$ o valor de referência que pode variar de acordo com o objetivo do estudo, como em Liebmann et al. (2007), que avaliou a estação chuvosa a partir de uma visão climatológica, e em Arvor et al. (2013), com viés agrícola. Neste estudo, partindo de uma visão de como a precipitação se comporta de acordo com o uso e cobertura do solo, o valor de referência adotado foi de 2,53mm, que se refere à média de evapotranspiração no Cerrado entre 2001-2023, calculada com o produto de sensoriamento remoto MOD16A2GF Versão 6.1. Esse produto contém dados de evapotranspiração na resolução espacial de 500 metros, baseados na equação de Penman-Monteith, e embora se trate da soma da evapotranspiração a cada 8 dias, ele fica disponível apenas após o fim de cada ano, por conta de seu algoritmo de *gap-filling*, que preenche os dados contaminados por efeitos de nuvens e aerossóis. Mais detalhes sobre o algoritmo de cálculo de evapotranspiração do MODIS foram descritos por Mu et al. (2011).

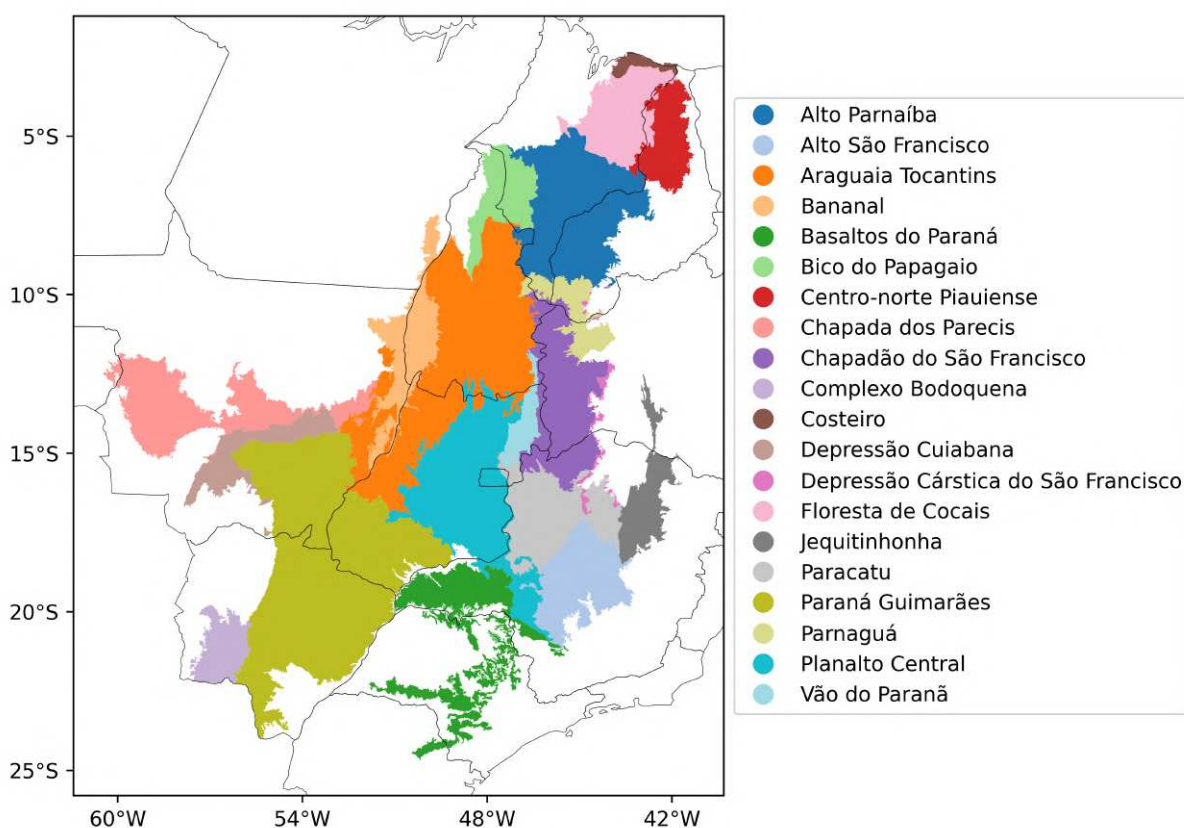
A escolha do dia para começar os cálculos do *Anomalous Accumulation* é arbitrária, porém é recomendado iniciar em algum momento da estação seca. Portanto, os cálculos partiram do primeiro dia do segundo semestre (1º de julho). Dessa forma, o começo da estação chuvosa é determinado como o início do maior período em que AA permanece positivo (i.e. a parte crescente do gráfico descrito pelo AA). Já o fim da estação chuvosa é descrito como o dia em que AA atinge seu máximo, o que faz com que a duração seja o intervalo entre esses dias. Uma particularidade descrita por Arvor et al. (2013) sobre este método é o problema de se utilizar um valor de referência superior à média diária de precipitação, como era o utilizado por Liebmann et al. (2007). Isso pode resultar nos valores máximo e mínimo do AA corresponderem, respectivamente, ao primeiro e último dia do somatório, resultando em erros na estimativa. Para evitar esse problema, que pode afetar regiões mais secas como as próximas às fronteiras com a Caatinga, foi realizado o mesmo procedimento descrito em Arvor et al. (2013), que consiste em calcular a derivada do AA, tomando seu valor máximo como ponto central da estação chuvosa, para então considerar seu início (fim) como o dia de mínimo (máximo) AA anterior (após) a esse dia central.

3.3. Agrupamento dos dados

Avaliar o comportamento da precipitação em um pixel a partir de mudanças de uso e cobertura do solo isoladamente dentro dele carrega diversas incertezas, visto a dinâmica atmosférica complexa quanto aos processos de formação e circulação da umidade e de chuvas, principalmente em resoluções mais finas. Dito isto, todos os dados foram agregados ao nível de ecorregiões (Sano et al., 2018) (Figura 4), que são subdivisões fitofisionômicas do

Cerrado levando em conta precipitação, vegetação, solo e relevo, de forma que cada região seja relativamente uniforme quanto a esses termos. Em adição às 19 ecorregiões (Sano et al., 2018), o Centro-norte Piauiense foi adicionado na plataforma TerraBrasilis do INPE, a fim de abranger toda a área atual do bioma, totalizando 20 regiões a serem utilizadas neste estudo.

Figura 4 – Subdivisão do Cerrado em ecorregiões de acordo com precipitação, vegetação, solo e relevo (Sano et al., 2018).



Fonte: o autor.

Esse uso das ecorregiões parte do pressuposto de que regiões homogêneas em termos de precipitação, vegetação, solo e relevo, estão submetidas a condições climáticas e ambientais similares, de forma que mudanças de uso e cobertura do solo dentro delas cause uma resposta também homogênea na precipitação da região.

Dessa forma, a variável de uso e cobertura do solo deste estudo foi calculada por meio da porcentagem de cada ecorregião ocupada por pixels da categoria *farming*. Por outro lado, as variáveis ligadas à precipitação (precipitação trimestral, frequência de dias secos trimestral, e início, fim e duração da estação chuvosa) foram calculadas através da média de todos os pixels dentro de cada ecorregião. Todas essas variáveis foram calculadas para o período de 1985 a 2022. O ano de 2023 não foi incluso pela falta de dados para todo o primeiro semestre de 2024 no BR-DWGB, necessários para calcular os parâmetros da estação chuvosa de 2023, que leva em consideração dados de julho do ano atual a junho do ano seguinte.

3.4. Testes de normalidade, correlação e modelagem estatística

Todas as variáveis por ecorregião foram submetidas ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk (Shapiro e Wilk, 1965) no nível de significância (α) de 5%, além de serem dispostas em histogramas, com o objetivo de definir quais testes estatísticos são mais adequados para as séries utilizadas. O teste de Shapiro-Wilk opera sob a hipótese nula de que os dados sejam normalmente distribuídos, resultando em um coeficiente W com um p-valor associado. Quando este p-valor é inferior ao nível de significância estabelecido, a hipótese nula é rejeitada, inferindo que os dados não seguem a distribuição normal. Entretanto, um p-valor acima do nível de significância não necessariamente indica a presença de normalidade, o que torna a análise dos histogramas um bom complemento para essa avaliação. Nos casos em que a distribuição da variável diferiu da normal, ferramentas não paramétricas foram utilizadas para as posteriores análises de correlação e de modelagem estatística.

A estatística não paramétrica de correlação de Spearman (Spearman, 1904) foi utilizada para avaliar as correlações entre as variáveis de precipitação e a variável de uso e cobertura do solo, no nível de significância de 5%. Essa ferramenta identifica a presença de relações monotônicas, que são associações cujos valores tendem a crescer e/ou diminuir concomitantemente nas variáveis, sendo capaz de capturar relações não lineares entre elas.

A correlação de Spearman ordena os dados em postos (ranks) de acordo com seus valores, de forma que as posições dos ranks são avaliadas, ao invés de suas magnitudes. Isso significa que essa medida é robusta contra outliers (Schober et al., 2018), sendo capaz de lidar com a variabilidade interanual dos dados de precipitação.

A correlação resulta em um coeficiente ρ (coeficiente de correlação de postos de Spearman) que varia entre -1 e 1, expressando a força da relação monotônica entre duas variáveis. Uma relação monotônica ocorre quando essas variáveis tendem a mover-se na mesma direção relativa, porém não necessariamente de forma linear. Valores positivos do coeficiente indicam que ambas tendem ao mesmo sinal, crescendo ou diminuindo simultaneamente. Por outro lado, valores negativos apontam uma relação inversa, em que uma aumenta (diminui) conforme a outra diminui (aumenta). Valores próximos de 0 indicam a ausência de relação monotônica.

Atribuir classificações para definir se a força da correlação é fraca, moderada ou forte parte de decisões arbitrárias sobre os limites que compõe as classes e pode ser uma prática inconsistente (Schober et al., 2018), principalmente por essas definições variarem de acordo com o autor, instituição ou área de estudo (Akoglu, 2018). Entretanto, isso pode servir como uma referência dentro de um estudo para facilitar o entendimento e comparações entre correlações. Dito isto, essa pesquisa se baseou nas classificações dispostas em Schober et al. (2018), que indicam correlações negligenciáveis entre 0.00-0.10, fracas entre 0.10-0.39, moderadas entre 0.40-0.69, fortes entre 0.70-0.89 e muito fortes entre 0.90-1.00.

A divisão em ecorregiões parte do pressuposto de que cada região pode ter uma resposta diferente no regime de precipitação em relação às mudanças de uso e cobertura no solo, incluindo

a possibilidade de não haver relações entre essas variáveis em alguns locais. Dito isto, apenas os resultados estatisticamente significativos da correlação de Spearman foram posteriormente modelados para explorar mais a fundo esses efeitos. Essa abordagem conservadora visou identificar com mais confiança os locais e variáveis mais afetadas pelas mudanças de uso do solo.

É possível haver relações entre as variáveis mesmo com coeficientes próximos de 0 na correlação de Spearman (Schober et al., 2018), como as descritas por padrões quadráticos (curva em U ou U-invertido). Entretanto, essas correlações mais fracas não foram capturadas na correlação de Spearman por conta do tamanho da amostra ($N = 38$, um valor para cada ano na série histórica de 1985-2022), sendo necessário um tamanho maior para capturar correlações menores com significância estatística (Ramsey, 1989).

Após isso, as variáveis selecionadas foram modeladas com o uso de Modelos Aditivos Generalizados (MAGs), conforme a divisão em variáveis independentes e dependentes dispostas na Tabela 1. Os MAGs são modelos semi paramétricos capazes de descrever relações não lineares entre as variáveis analisadas, sem assumir previamente suas formas funcionais (se são polinomiais, exponenciais, logarítmicas, etc), permitindo que o modelo revele a estrutura dessas relações, o que é importante visto que o modo como a precipitação do Cerrado responde às MUCS ainda é desconhecido.

Tabela 1 – Variáveis utilizadas no estudo, separadas em variáveis independentes Y (precipitação e frequência de dias secos trimestral, parâmetros da estação chuvosa) e variável dependente X (porcentagem de ocupação da ecorregião por pixels da categoria *farming*).

Variáveis de precipitação (Y)	Variável de uso e cobertura do solo (X)
<i>prec MAM, prec JJA, prec SON, prec DJF</i>	
<i>dry days MAM, dry days JJA, dry days SON, dry days DJF</i>	<i>farming</i>
<i>onset, demise e duration</i>	

Fonte: o autor. *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset, demise e length* - início, fim e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

Os MAGs utilizam funções suaves para descrever o comportamento da variável dependente em relação às independentes, de acordo com a Equação 2:

$$g(E(Y)) = \beta_0 + f(X_1) + \dots + f(X_n) + E \quad (2)$$

Sendo $E(y)$ o valor esperado de Y de acordo com o modelo, $g()$ a função de ligação entre a variável independente e as variáveis preditoras, β_0 o intercepto, $f()$ as funções suaves previamente desconhecidas que o modelo ajustará, e E o erro associado no ajuste. A propriedade

aditiva desses modelos se refere ao fato de que cada função $f(X_n)$ representa o efeito isolado da variável X_n em Y , com esse efeito somado para os diferentes preditores. Por outro lado, a propriedade generalizada significa que o modelo pode lidar com variáveis Y que assumem distribuições tanto normais quanto não normais. Os MAGs são considerados semi paramétricos por combinar uma parte paramétrica, no que se refere à definição da distribuição da variável dependente Y e da função de ligação, e uma parte não paramétrica, referente às funções suaves $f()$ ajustadas pelo modelo.

Neste estudo, há apenas um preditor X , sendo ele o uso do solo. Como as variáveis Y tipicamente se aproximam da distribuição normal, ela foi selecionada para a construção dos modelos, consequentemente utilizando a função de ligação identidade. Os MAGs podem causar overfitting caso o grau de suavização das funções não seja controlado, o que pode ser feito através do parâmetro λ , que aplica penalidades à complexidade das funções. Esse controle deve ser feito para evitar que o modelo caracterize o ruído nos dados (a variabilidade interanual no presente estudo) ao invés da relação entre as variáveis X e Y . Dessa forma, foi estabelecido o valor de 10 para o fator λ .

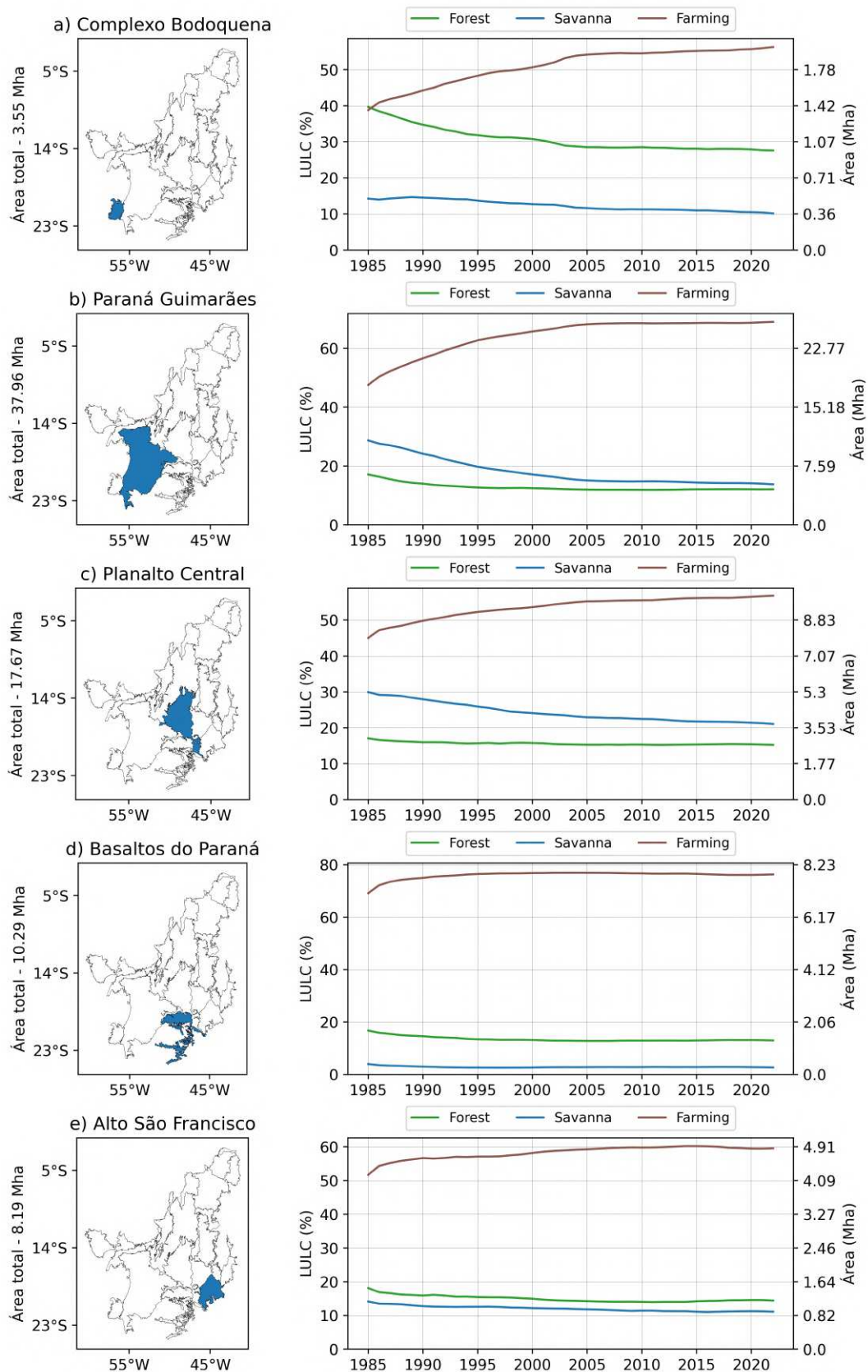
Após a construção dos modelos, seus ajustes foram examinados explorando a normalidade e a homocedasticidade dos resíduos no nível de significância de 5% para os testes formais. A normalidade foi averiguada através de QQ plots e do teste de Shapiro-Wilk. Por outro lado, a homocedasticidade foi verificada utilizando gráficos de resíduos x valores ajustados e por meio do teste de Breusch-Pagan. Esse teste avalia a presença de heterocedasticidade nos erros do modelo, indicada por um p-valor resultante inferior ao nível de significância estabelecido. Transformações na variável Y foram feitas para os modelos que não atenderam esses requisitos inicialmente, para possibilitar a construção de intervalos de confiança de 95% de forma mais robusta.

4. Resultados

4.1. Caracterização das mudanças de uso e cobertura do solo e do regime de precipitação

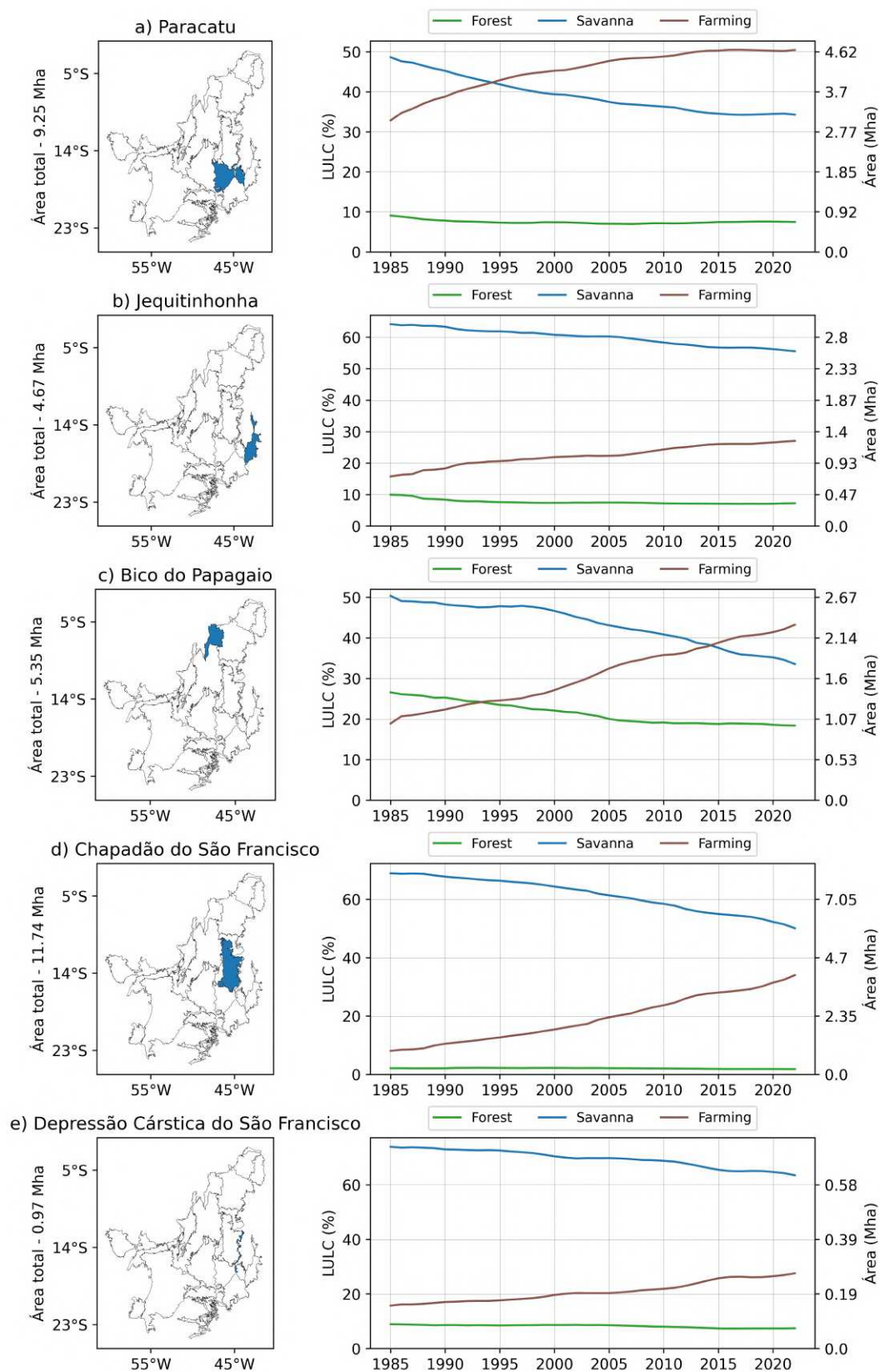
As alterações anuais (1985-2022) do uso e cobertura do solo nas ecorregiões do Cerrado estão dispostas nas Figuras 5-8, em termos de porcentagem da área total da ecorregião e em área absoluta (em Mha). Adicionalmente à categoria explorada diretamente neste trabalho (*farming*), duas outras categorias foram evidenciadas nessas figuras, sendo elas: forest, referente ao ID 3 das classes do MapBiomas, que considera a Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca, Cerradão e florestas estacionais semidecíduais; e savanna (ID 4), que são as formações savânicas do Cerrado Sentido Restrito. O uso dessas classes permite entender melhor quais são os tipos de vegetação mais convertidos em áreas da agropecuária no Cerrado e as dinâmicas espaciais e temporais desse processo em diferentes regiões do bioma.

Figura 5 – Evolução histórica (1985-2022) do uso e cobertura do solo nas ecorregiões Complexo Bodoquena, Paraná Guimarães, Planalto Central, Basaltos do Paraná e Alto São Francisco.



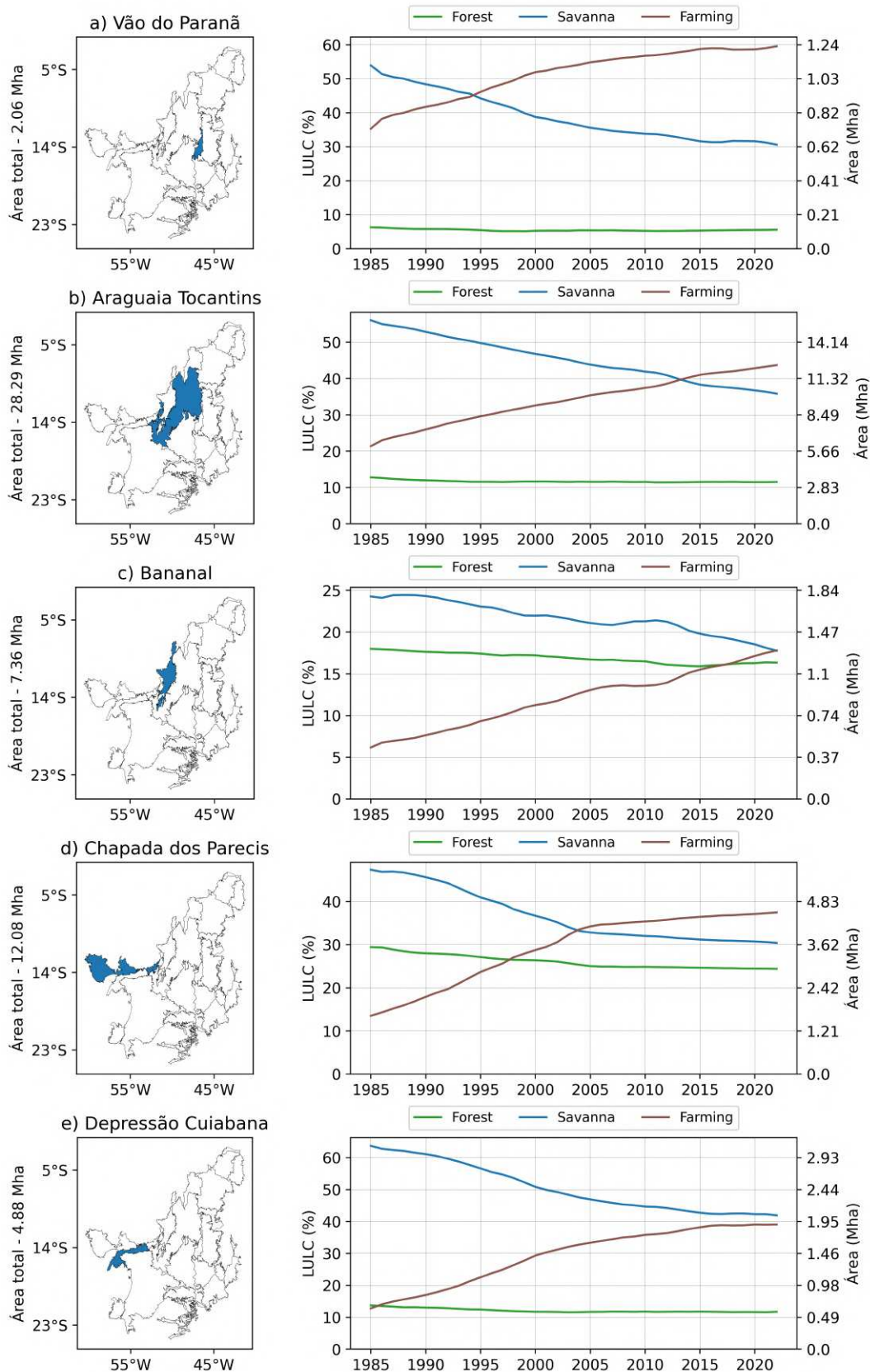
Fonte: o autor. LULC - *Land use and Land Cover* (uso e cobertura do solo); Forest - floresta; savanna - savana; farming - áreas de agricultura e pecuária.

Figura 6 – Evolução histórica (1985-2022) do uso e cobertura do solo nas ecorregiões Paracatu, Jequitinhonha, Bico do Papagaio, Chapadão do São Francisco e Depressão Cárstica do São Francisco.



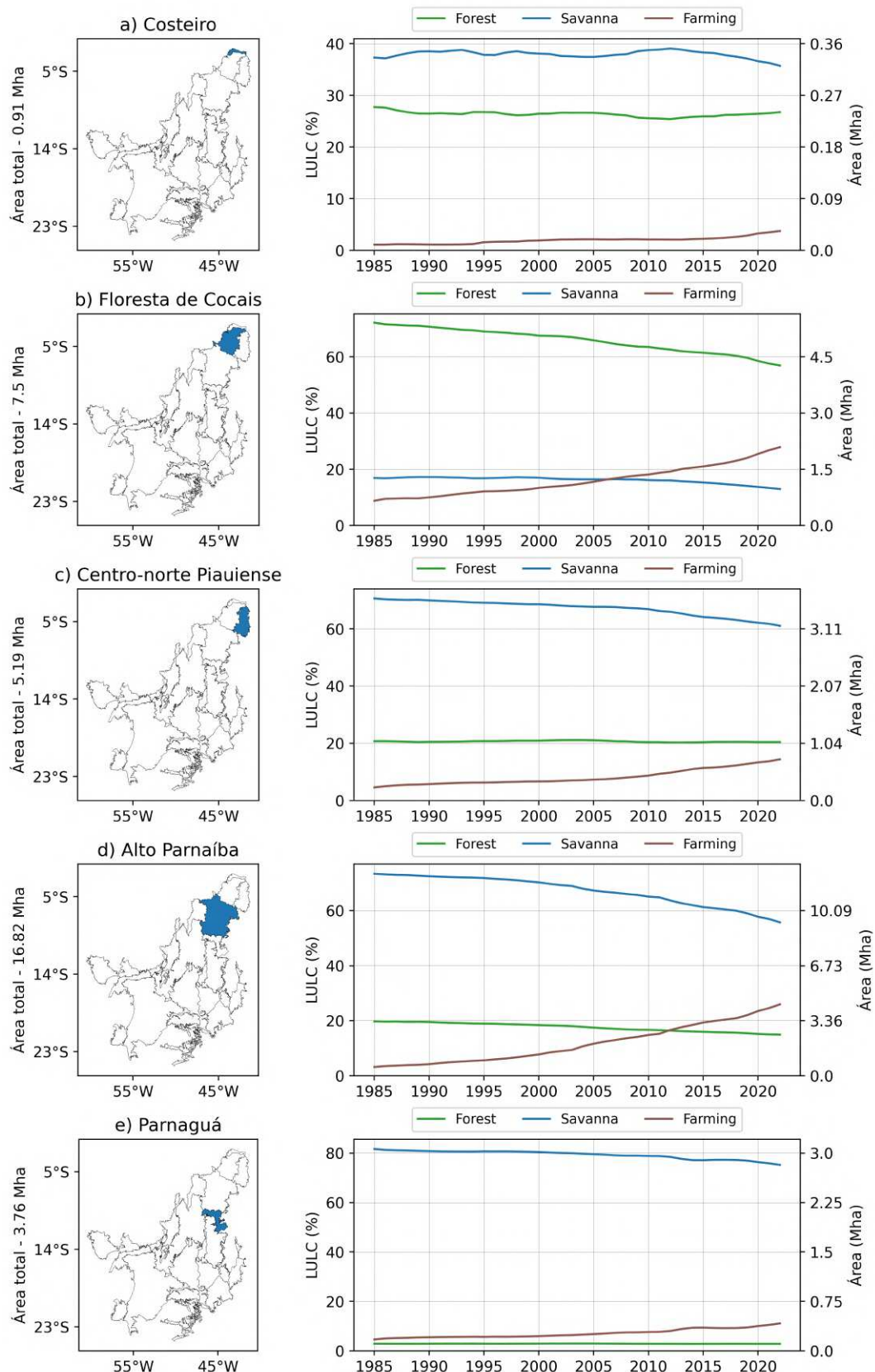
Fonte: o autor. LULC - *Land use and Land Cover* (uso e cobertura do solo); Forest - floresta; savanna - savana; farming - áreas de agricultura e pecuária.

Figura 7 – Evolução histórica (1985-2022) do uso e cobertura do solo nas ecorregiões Vão do Paranã, Araguaia Tocantins, Bananal, Chapada dos Parecis e Depressão Cuiabana.



Fonte: o autor. LULC - Land use and Land Cover (uso e cobertura do solo); Forest - floresta; savanna - savana; farming - áreas de agricultura e pecuária.

Figura 8 – Evolução histórica (1985-2022) do uso e cobertura do solo nas ecorregiões Costeiro, Floresta de Cocais, Centro-norte Piauiense, Alto Parnaíba e Parnaçuá.



Fonte: o autor. LULC - *Land use and Land Cover* (uso e cobertura do solo); Forest - floresta; savanna - savana; farming - áreas de agricultura e pecuária.

No início da série histórica analisada, diversas regiões na porção sul do Cerrado já estavam em estágios mais avançados do processo de expansão agropecuária, abrangendo os estados do Mato Grosso, Goiás, São Paulo, Minas Gerais e sul do Mato Grosso do Sul, mais especificamente nas regiões Complexo Bodoquena (38,78% de ocupação em 1985 pela categoria *farming* / 1,37 Mha de área absoluta), Paraná Guimarães (47,53% / 18,04 Mha), Planalto Central (45,03% / 7,95 Mha), Basaltos do Paraná (69,15% / 7,11 Mha), Alto São Francisco (51,7% / 4,23 Mha) e Paracatu (32,9% / 3,04 Mha) (Figuras 5 e 6). Essas regiões tenderam a se estabilizar em algum momento da série, como na região Sudeste (Basaltos do Paraná e Alto São Francisco) a partir da década de 1990 e no Centro-Oeste (Complexo Bodoquena, Paraná Guimarães e Planalto Central) a partir de 2005.

Por outro lado, regiões no norte do Mato Grosso, norte de Goiás e no Tocantins, tiveram crescimento contínuo da categoria *farming* até o final do período analisado, como no Bico do Papagaio (crescimento entre 1985-2022 de 24,31% / 1,3 Mha), Vão do Paranã (24,26% / 0,5 Mha), Araguaia Tocantins (22,29% / 6,3 Mha), Bananal (11,62% / 0,86 Mha), Chapada dos Parecis (23,95% / 2,89 Mha) e Depressão Cuiabana (26,27% / 1,28 Mha) (Figuras 7 e 8), refletindo os processos atuais de expansão do setor agropecuário em direção às fronteiras agrícolas da Amazônia e do MATOPIBA (acrônimo referente a parte dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia).

O MATOPIBA, considerado a última fronteira agrícola do Brasil, ainda não teve sua porção norte amplamente ocupada (Figura 8), como pode ser visto nas regiões Costeiro (3,74% de ocupação em 2022 pela categoria *farming* / 0,03 Mha de área absoluta), Parnaguá (11,1% / 0,41 Mha) e Centro-norte Piauiense (14,42% / 0,74 Mha). Embora a Floresta de Cocaís (27,83% / 2,08 Mha) e o Alto Parnaíba (25,97% / 4,36 Mha) possuam mais territórios agrícolas nessa porção, ainda são regiões menos extensamente exploradas que as localizadas mais ao sul no MATOPIBA, como o Araguaia Tocantins (43,68% / 12,36 Mha). Entretanto, destaca-se a intensificação das áreas de agricultura e pastagem no Alto Parnaíba, principalmente a partir da década de 2000, o tornando uma das ecorregiões com maior potencial de exploração por atividades agropecuárias nos próximos anos. Em contrapartida, regiões próximas à Caatinga, como Jequitinhonha, Depressão Cárstica do São Francisco e Parnaguá (Figuras 6 e 8) tendem a ter menos ocupação do solo pela categoria *farming*, com exceção do Chapadão do São Francisco (Figura 6), que abrange uma importante área agrícola nacional no oeste da Bahia.

A maior parte das regiões possui formações savânicas como cobertura natural dominante, que mostram uma evolução inversa com a categoria *farming*, com exceção da Floresta de Cocaís no Maranhão e Complexo Bodoquena no Mato Grosso do Sul, na fronteira com o bioma Pantanal, que possuem formações florestais mais predominantes, sendo estas mais convertidas para uso agropecuário nesses locais. Apesar de regiões no Sudeste brasileiro (Basaltos do Paraná e Alto São Francisco) possuírem cobertura florestal ligeiramente superior às formações savânicas, há poucas mudanças de uso e cobertura do solo ao longo do período analisado, o que dificulta a análise de suas relações com o clima nesses locais.

As regiões ordenadas de acordo com o crescimento relativo do território agropecuário estão dispostas na Tabela 2:

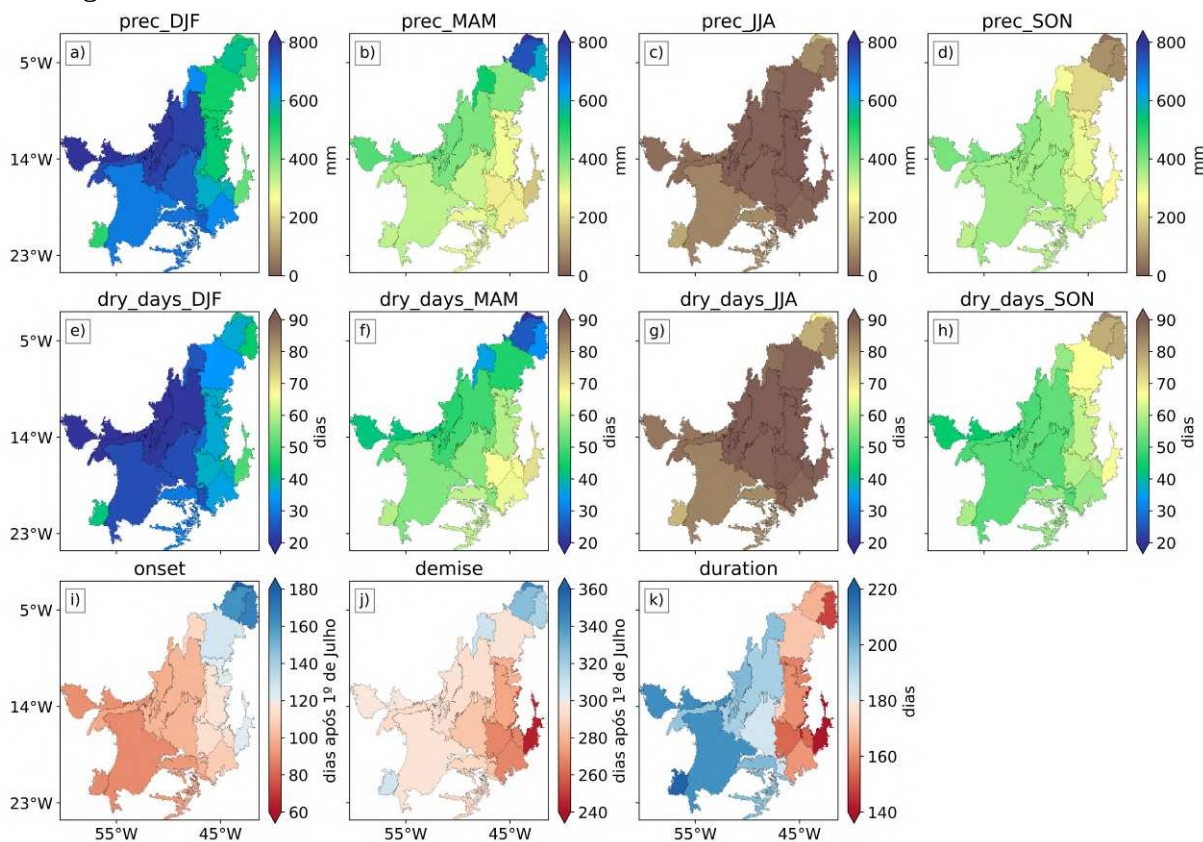
Tabela 2 – Crescimento relativo (em porcentagem) da categoria *farming* em cada ecorregião no Cerrado (1985-2022).

Região	Crescimento Relativo (%)	Região	Crescimento Relativo (%)
Costeiro	2.63	Paracatu	17.58
Parnaguá	6.49	Floresta de Cocais	19.09
Basaltos do Paraná	7.17	Paraná Guimarães	21.47
Alto São Francisco	7.85	Araguaia Tocantins	22.29
Centro-norte Piauiense	9.80	Alto Parnaíba	22.79
Jequitinhonha	11.27	Chapada dos Parecis	23.95
Bananal	11.62	Vão do Paranã	24.26
Planalto Central	11.77	Bico do Papagaio	24.32
Depressão Cárstica do São Francisco	11.84	Chapadão do São Francisco	25.97
Complexo Bodoquena	17.51	Depressão Cuiabana	26.27

Fonte: o autor.

O Cerrado possui elevada heterogeneidade climática ao longo de seu território, como pode ser visto na Figura 9, que caracteriza a normal climatológica dos últimos 30 anos da série (1993-2022) para todas as variáveis utilizadas nesse estudo.

Figura 9 – Normal climatológica (1993-2022) das variáveis ligadas à precipitação para as ecorregiões do Cerrado.



Fonte: o autor. A figura apresenta médias dos últimos 30 anos de dados utilizados no estudo, janela temporal adequada para a caracterização climática de um local. *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset*, *demise* e *length* - início, fim e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

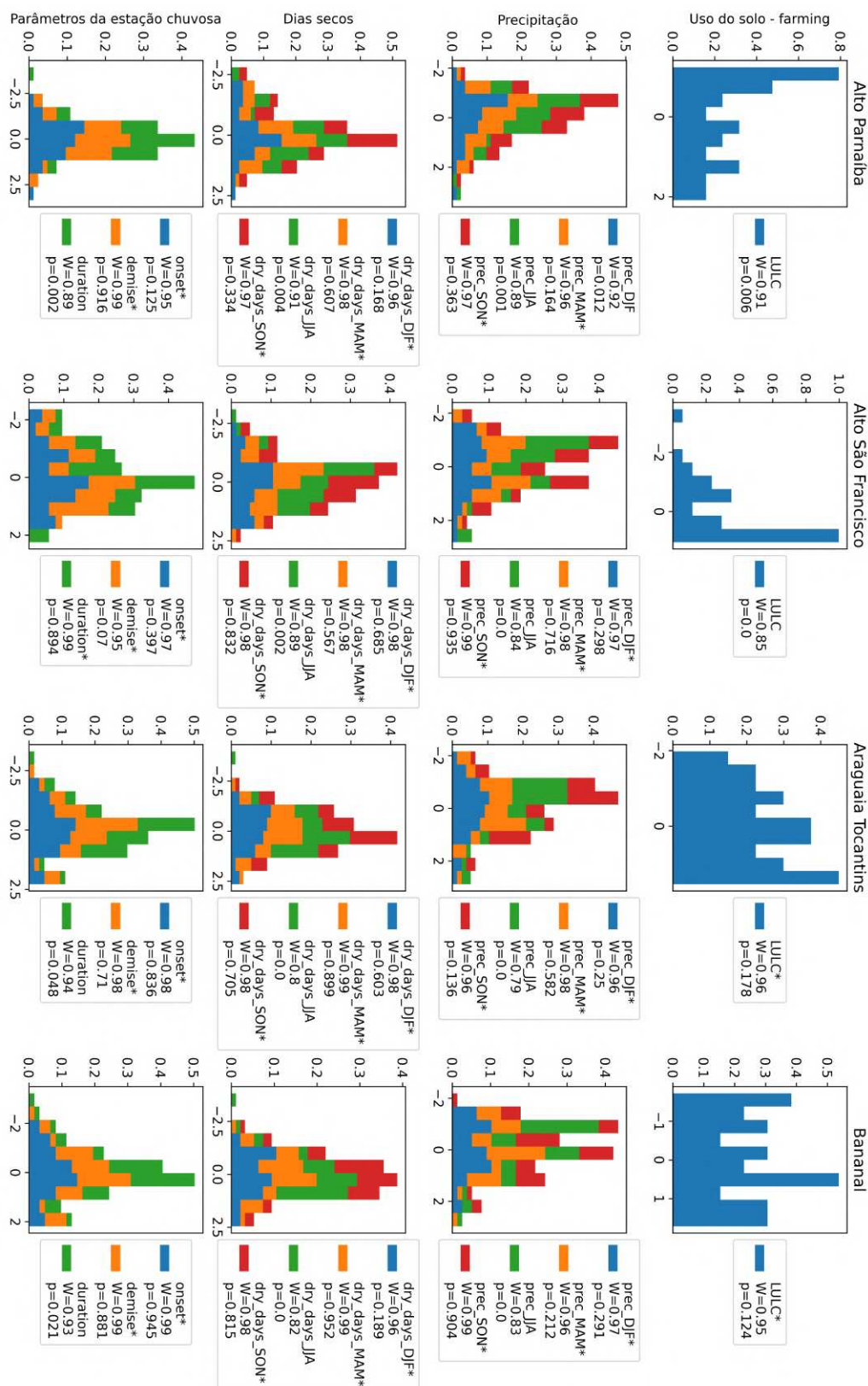
Os padrões de total precipitado e frequência de dias secos por trimestre são parecidos ao longo do Cerrado, revelando um contraste de leste a oeste que vai desde regiões mais áridas próximas à Caatinga até regiões com elevada precipitação na fronteira com a Amazônia. No geral, os trimestres DJF e JJA tendem a representar, respectivamente, períodos de auge da estação chuvosa e de seca para as ecorregiões no Cerrado, com os trimestres MAM e SON como períodos de transição. Entretanto, conforme se desloca em direção ao norte (em regiões como Floresta de Cocaís, Centro-norte Piauiense, Costeiro), essa sazonalidade tende a sair de fase em relação ao resto do bioma, com a estação chuvosa sendo mais marcada durante MAM, e um período de seca entre JJA e SON.

4.2. Relações entre as mudanças de uso e cobertura do solo e o regime de precipitação

As Figuras 10-14 mostram os resultados dos testes de normalidade e os histogramas de todas as variáveis da presente pesquisa. Longas séries de dados climáticos (≈ 30 anos) podem balancear tendências interanuais e fenômenos de larga escala como o ENSO (*El Niño - South Oscillation*), de forma que as distribuições estatísticas dos dados se aproximem da distribuição

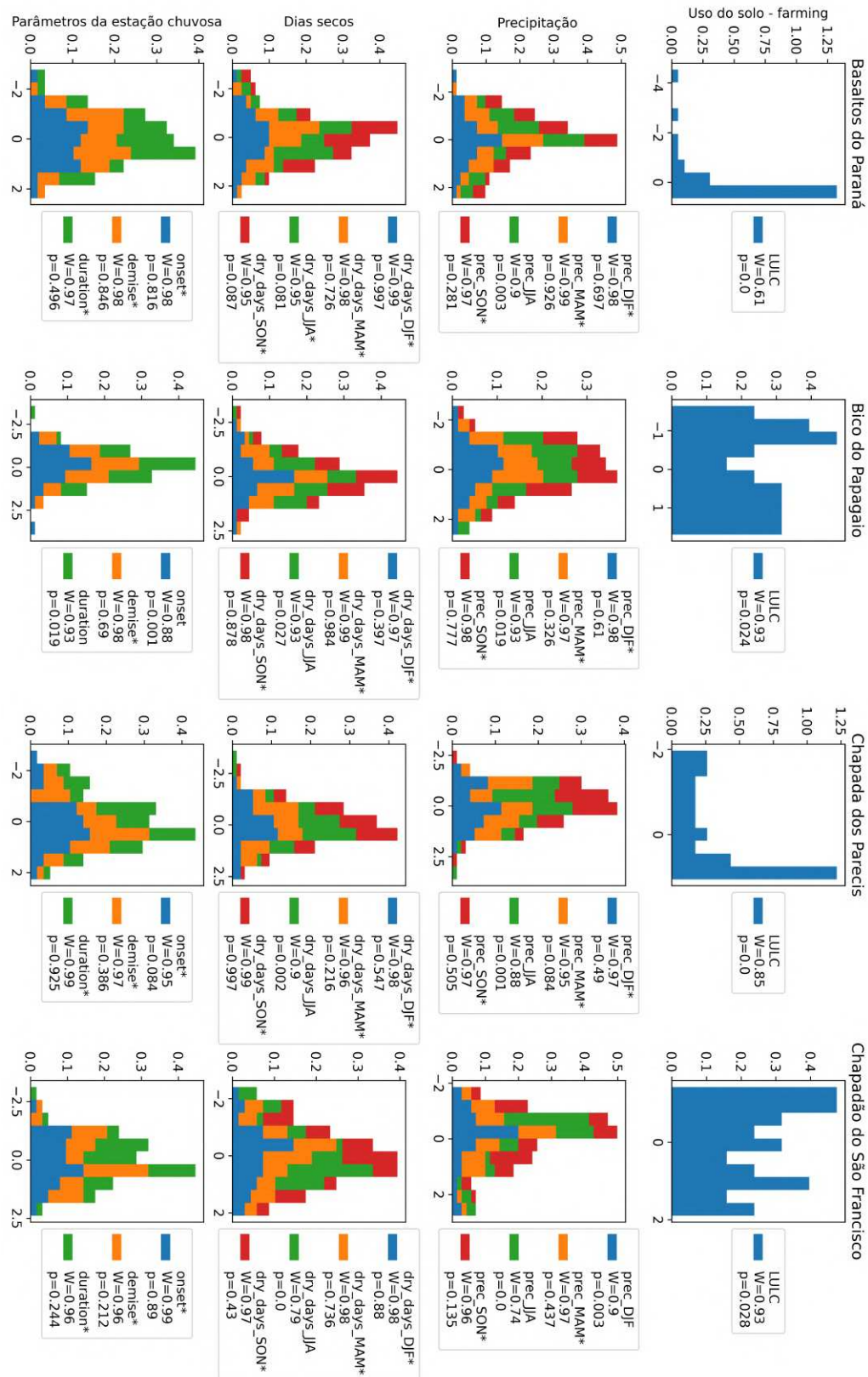
normal. Ao utilizar 38 anos de dados (1985-2022), foi possível observar que a maioria das variáveis climáticas se aproximaram da normalidade, com leves desvios em alguns casos. Entretanto, a porcentagem de uso do solo agropecuário não segue esse comportamento, com todas as ecorregiões apresentando distribuições não normais para essa variável, justificando o uso das ferramentas não paramétricas nas análises de correlação e modelagem estatística posteriores.

Figura 10 – Histogramas e resultados do teste de Shapiro-Wilk para cada variável padronizada (Z-score) nas regiões Alto Parnaíba, Alto São Francisco, Araguaia Tocantins e Bananal.



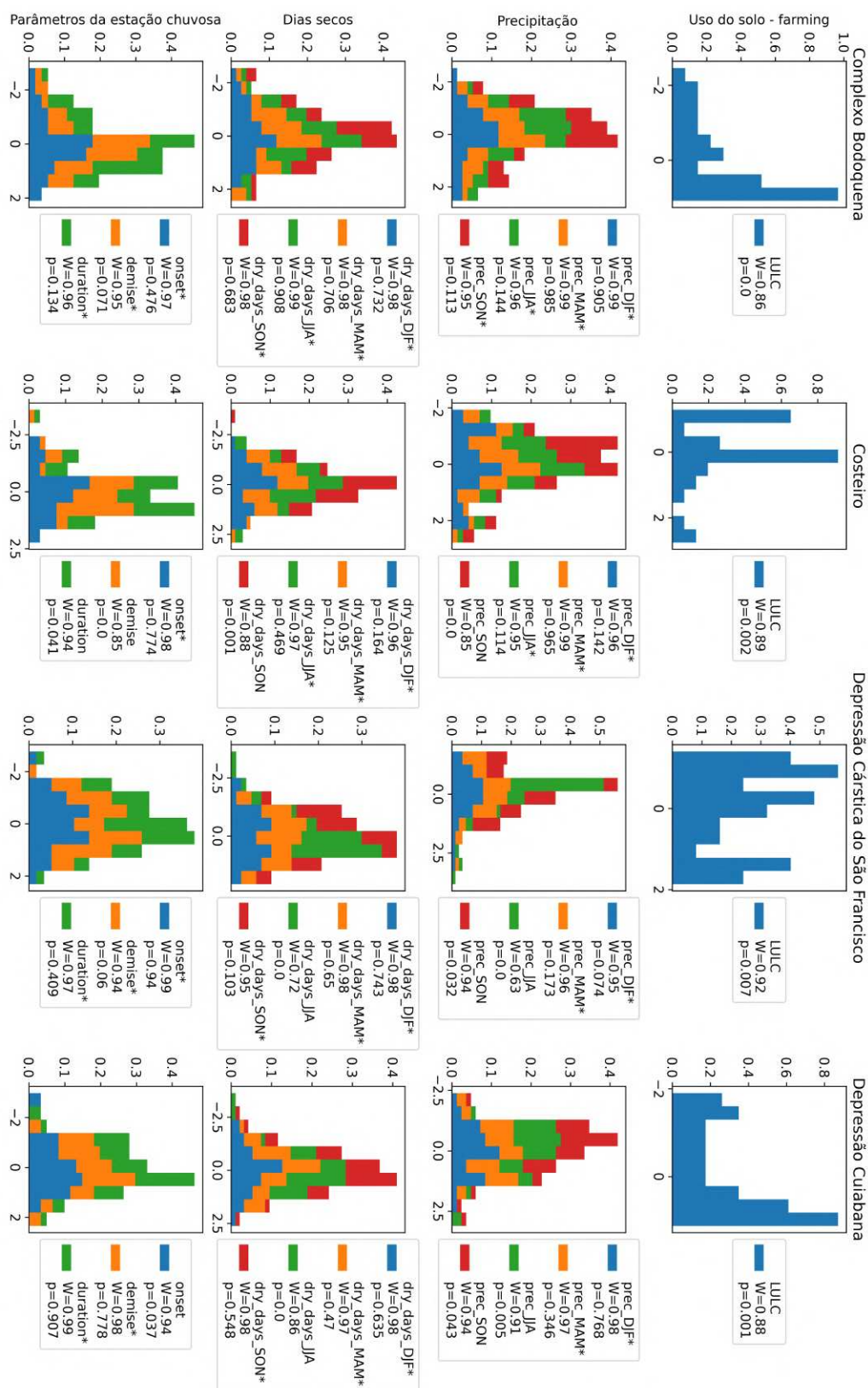
Fonte: o autor. Os resultados destacados com um asterisco são aqueles que não apresentam desvios da normalidade segundo o teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 5\%$). *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset*, *demise* e *length* - início, fim e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

Figura 11 – Histogramas e resultados do teste de Shapiro-Wilk para cada variável padronizada (Z-score) nas regiões Basaltos do Paraná, Bico do Papagaio, Chapada dos Parecis e Chapadão do São Francisco.



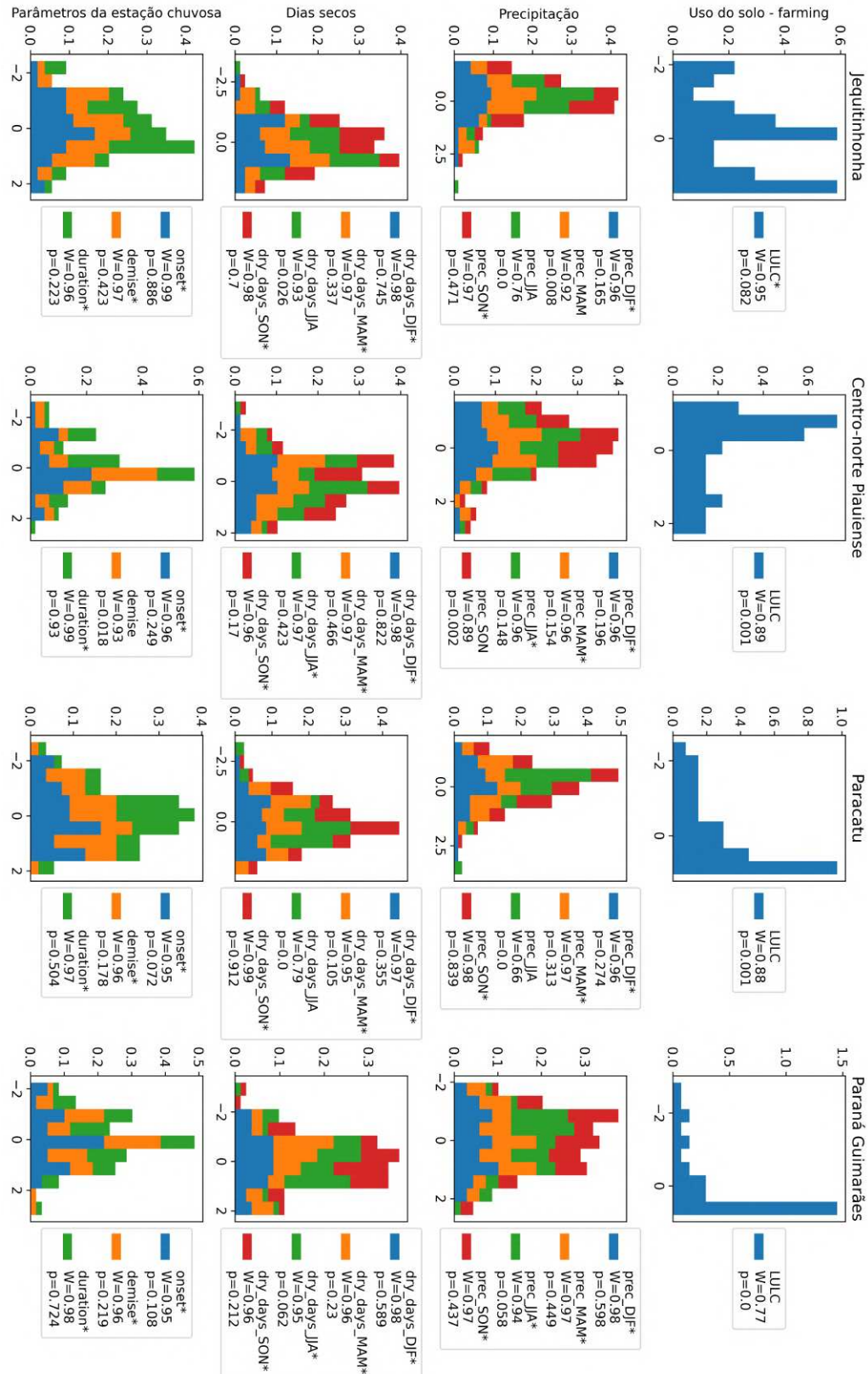
Fonte: o autor. Os resultados destacados com um asterisco são aqueles que não apresentam desvios da normalidade segundo o teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 5\%$). *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset*, *demise* e *length* - início, fim e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

Figura 12 – Histogramas e resultados do teste de Shapiro-Wilk para cada variável padronizada (Z-score) nas regiões Complexo Bodoquena, Costeiro, Depressão Cárstica do São Francisco e Depressão Cuiabana.



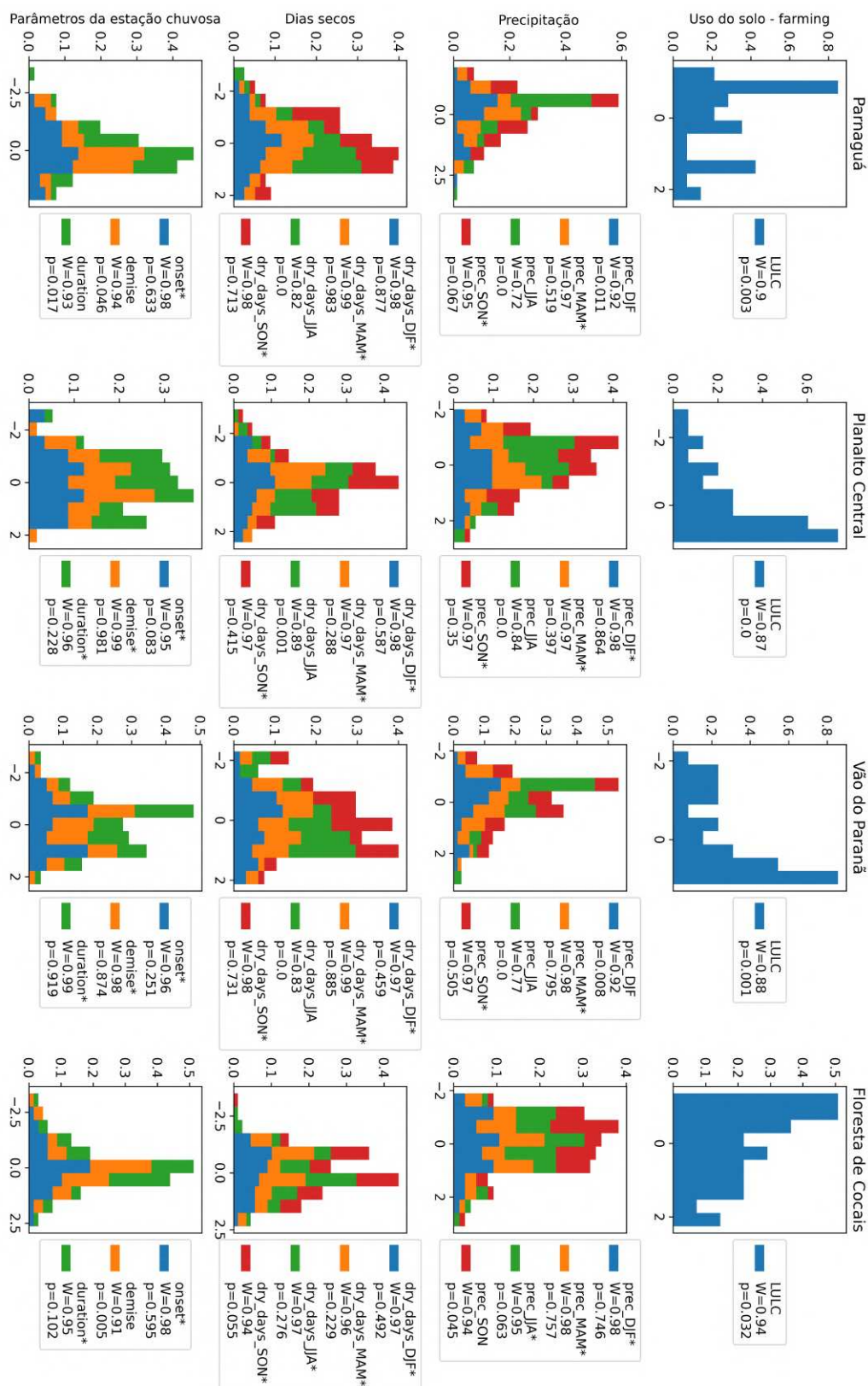
Fonte: o autor. Os resultados destacados com um asterisco são aqueles que não apresentam desvios da normalidade segundo o teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 5\%$). *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset*, *demise* e *length* - início, fim e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

Figura 13 – Histogramas e resultados do teste de Shapiro-Wilk para cada variável padronizada (Z-score) nas regiões Jequitinhonha, Centro-norte Piauiense, Paracatu e Paraná-Guimarães.



Fonte: o autor. Os resultados destacados com um asterisco são aqueles que não apresentam desvios da normalidade segundo o teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 5\%$). *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset*, *demise* e *length* - início, fim e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

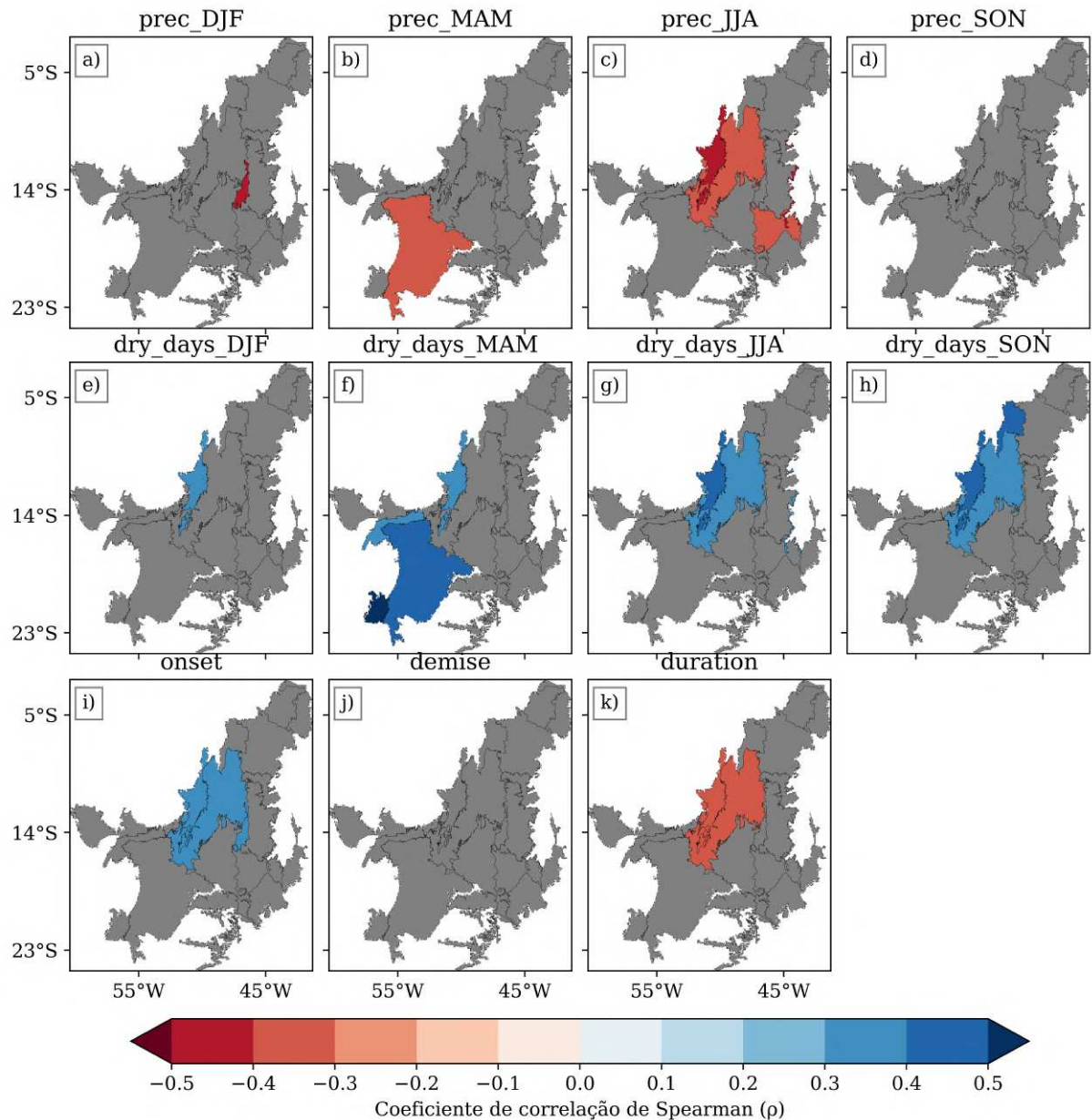
Figura 14 – Histogramas e resultados do teste de Shapiro-Wilk para cada variável padronizada (Z-score) nas regiões Parnaguá, Planalto Central, Vão do Paraná e Floresta de Cocais.



Fonte: o autor. Os resultados destacados com um asterisco são aqueles que não apresentam desvios da normalidade segundo o teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 5\%$). *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset*, *demise* e *length* - início, fim e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

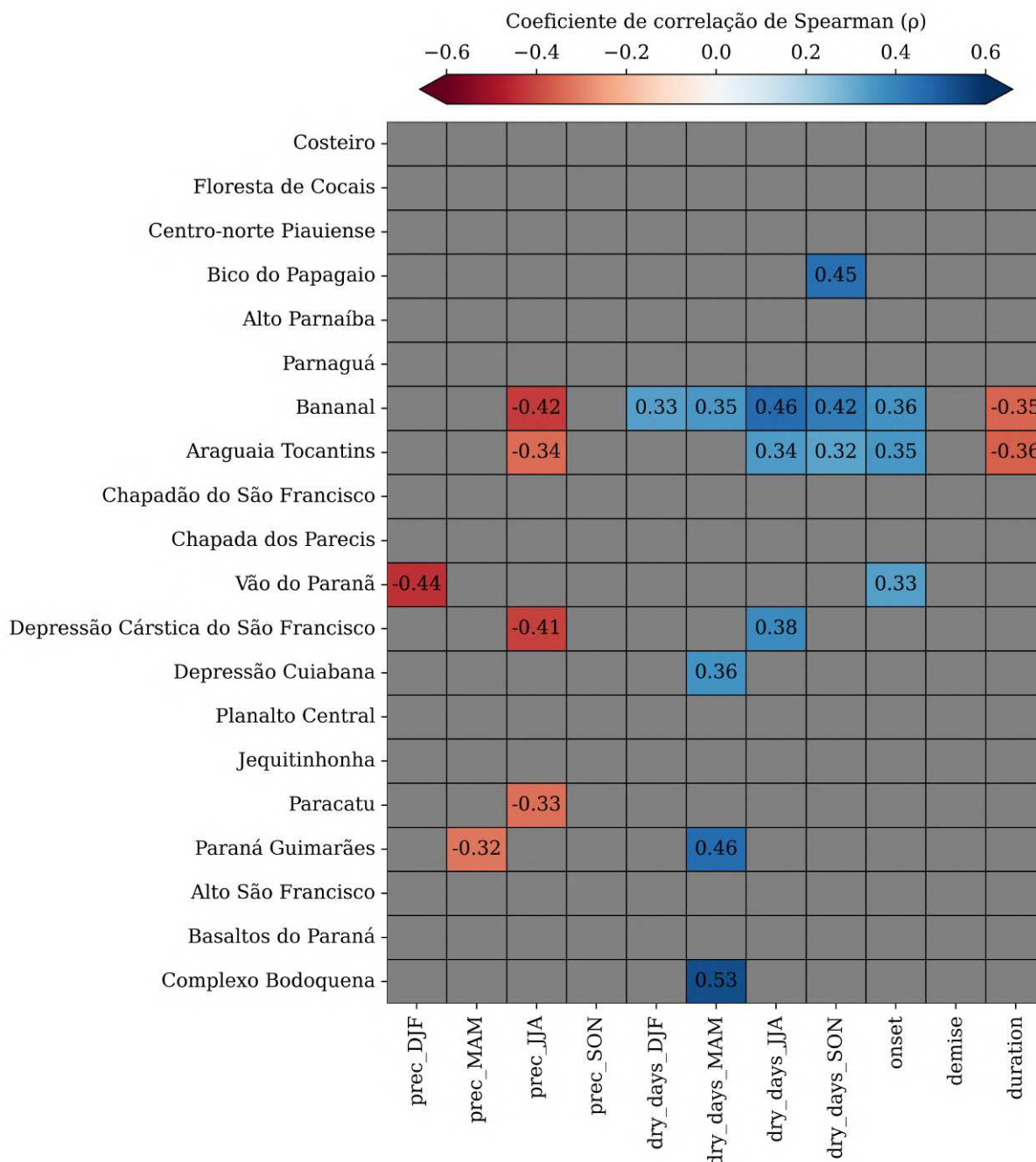
As análises da correlação de Spearman entre o uso agropecuário do solo e as variáveis de precipitação, frequência de dias secos e parâmetros da estação chuvosa estão apresentadas de maneira espacializada e em formato de heatmap nas Figuras 15 e 16, respectivamente. No total precipitado por trimestre, todas as ecorregiões que apresentaram resultados estatisticamente significativos ($\alpha = 5\%$) apontaram uma correlação inversa moderada (entre -0,32 e -0,44) entre a categoria *farming* e o total precipitado (Figura 15a-d), ou seja, conforme o setor agropecuário avançou nesses locais (Figuras 5-8), seus acumulados de chuva trimestral tenderam a diminuir. Durante o trimestre DJF (Figura 15a), apenas o Vão do Paranã, localizado no noroeste de Goiás, apresentou correlação ($\rho = -0.44$) entre o uso do solo e o total precipitado. Durante MAM (Figura 15b), também houve apenas uma correlação apontada, com um coeficiente $\rho = -0,32$ no Paraná Guimarães. No trimestre JJA (Figura 15c) foi possível observar o maior número de correlações entre essas variáveis, abrangendo as regiões Araguaia Tocantins ($\rho = -0.34$) e Bananal ($\rho = -0.42$) no Estado do Tocantins, além de Paracatu ($\rho = -0.33$) e Depressão Cárstica do São Francisco ($\rho = -0.41$). Nenhuma ecorregião apresentou correlações significativas entre a precipitação no trimestre SON e o uso do solo da categoria *farming*.

Figura 15 – Resultados espacializados da correlação de Spearman entre a categoria *farming* e as variáveis de precipitação.



Fonte: o autor. Ecorregiões em cinza são as que apresentaram p-valor inferior ao nível de significância estabelecido ($\alpha = 5\%$). *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset*, *demise* e *length* - início, fim e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

Figura 16 – Resultados em heatmap da correlação de Spearman entre a categoria *farming* e as variáveis de precipitação.



Fonte: o autor. Ecorregiões em cinza são as que apresentaram p-valor inferior ao nível de significância estabelecido ($\alpha = 5\%$). *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset*, *demise* e *length* - início, fim e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

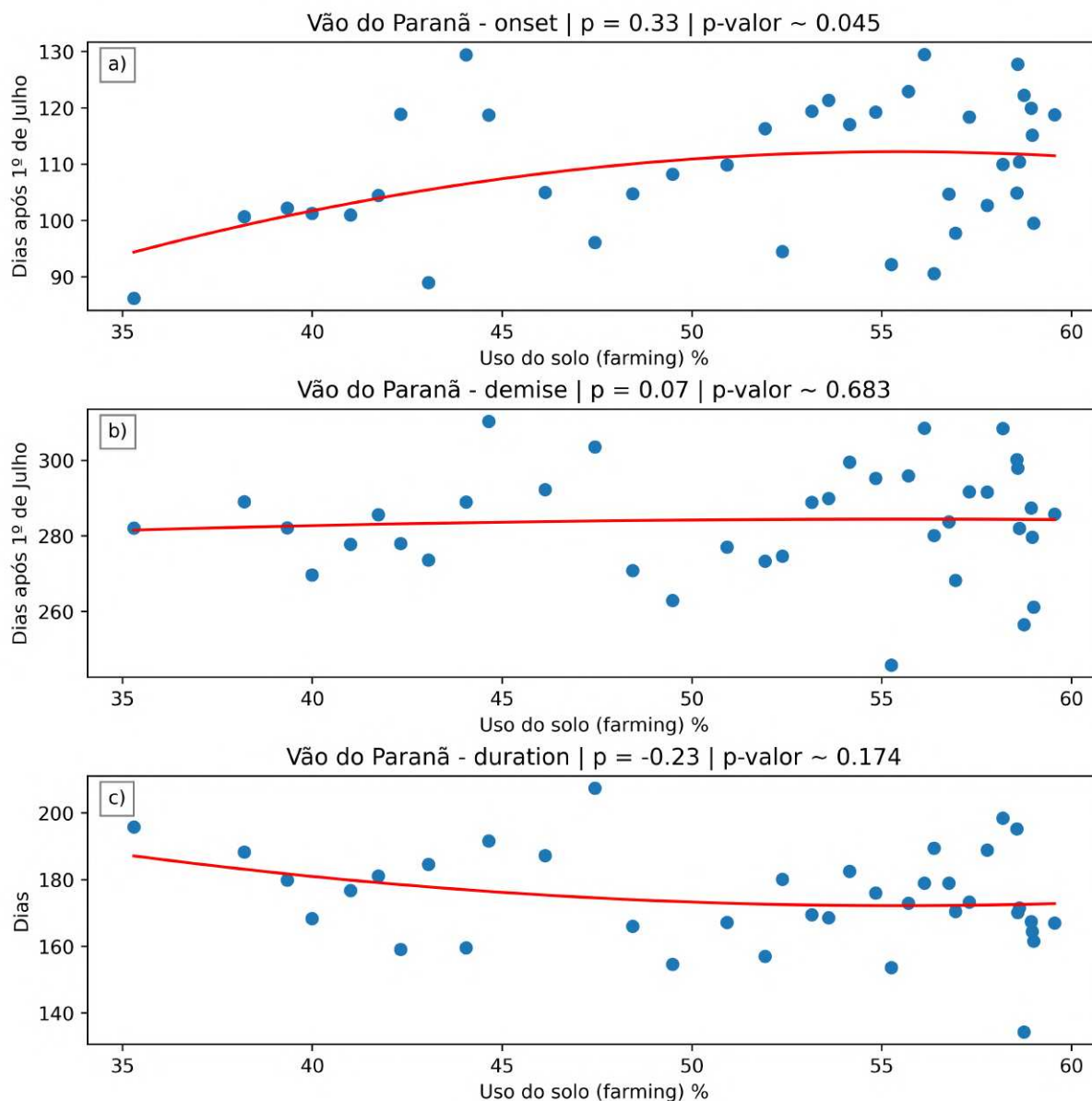
Correlações positivas moderadas (entre 0,32-0,53) foram atestadas nos resultados significativos entre a frequência de dias secos trimestral e o uso do solo agropecuário (Figura 15e-h). Todos esses resultados apontam para uma tendência de aumento do número de dias secos no trimestre conforme o avanço da categoria farming nessas regiões (Figuras 5-8). Durante DJF (Figura 15e), Bananal foi a única região com resultados significativos ($\rho = 0.33$). Em

MAM, além de Bananal ($\rho = 0.35$), também houve resultados em Depressão Cuiabana ($\rho = 0.36$), Paraná Guimarães ($\rho = 0.46$) e em Complexo Bodoquena ($\rho = 0.53$) no Centro-oeste brasileiro. Araguaia Tocantins ($\rho = 0.34$), Bananal ($\rho = 0.46$) e Depressão Cárstica do São Francisco ($\rho = 0.38$) compõem os resultados apontados em JJA, enquanto as duas regiões: Araguaia Tocantins ($\rho = 0.32$) e Bananal ($\rho = 0.42$) também são observadas em SON, além do Bico do Papagaio ($\rho = 0.45$) ao norte durante esse trimestre.

Nas correlações entre o uso do solo e os parâmetros da estação chuvosa (início, fim e duração), houve resultados significativos apenas em relação ao início e à duração da estação (Figura 15i-k). Araguaia Tocantins e Bananal apresentaram coeficientes positivos para o início ($\rho = 0.35$ e $\rho = 0.36$) e negativos para a duração ($\rho = -0.36$ e $\rho = -0.35$). As correlações positivas indicam um atraso do início da estação chuvosa conforme o avanço da área agropecuária, enquanto as correlações negativas indicam um encurtamento da estação em relação a este avanço.

O único resultado além destes para os parâmetros da estação chuvosa foi uma correlação positiva apenas no início da estação no Vão do Paranã ($\rho = 0.33$) o que levanta a questão de como essa variável pode ter sido afetada isoladamente, sem impactar a duração. É necessário levar em conta que a extensão da estação também depende das flutuações no seu final, que embora não apresente tendência, está sujeito a variações ao longo da série (Figura 17b) influenciando na duração e reduzindo a magnitude da correlação. Isso pode ser capaz de mascarar o resultado, visto que correlações mais fracas tendem a não ser estatisticamente significativas em amostras menores (Ramsey, 1989).

Figura 17 – Gráficos de dispersão entre os parâmetros da estação chuvosa (início, fim e duração) e o uso e cobertura do solo da categoria farming para a ecorregião do Vão do Paraná.



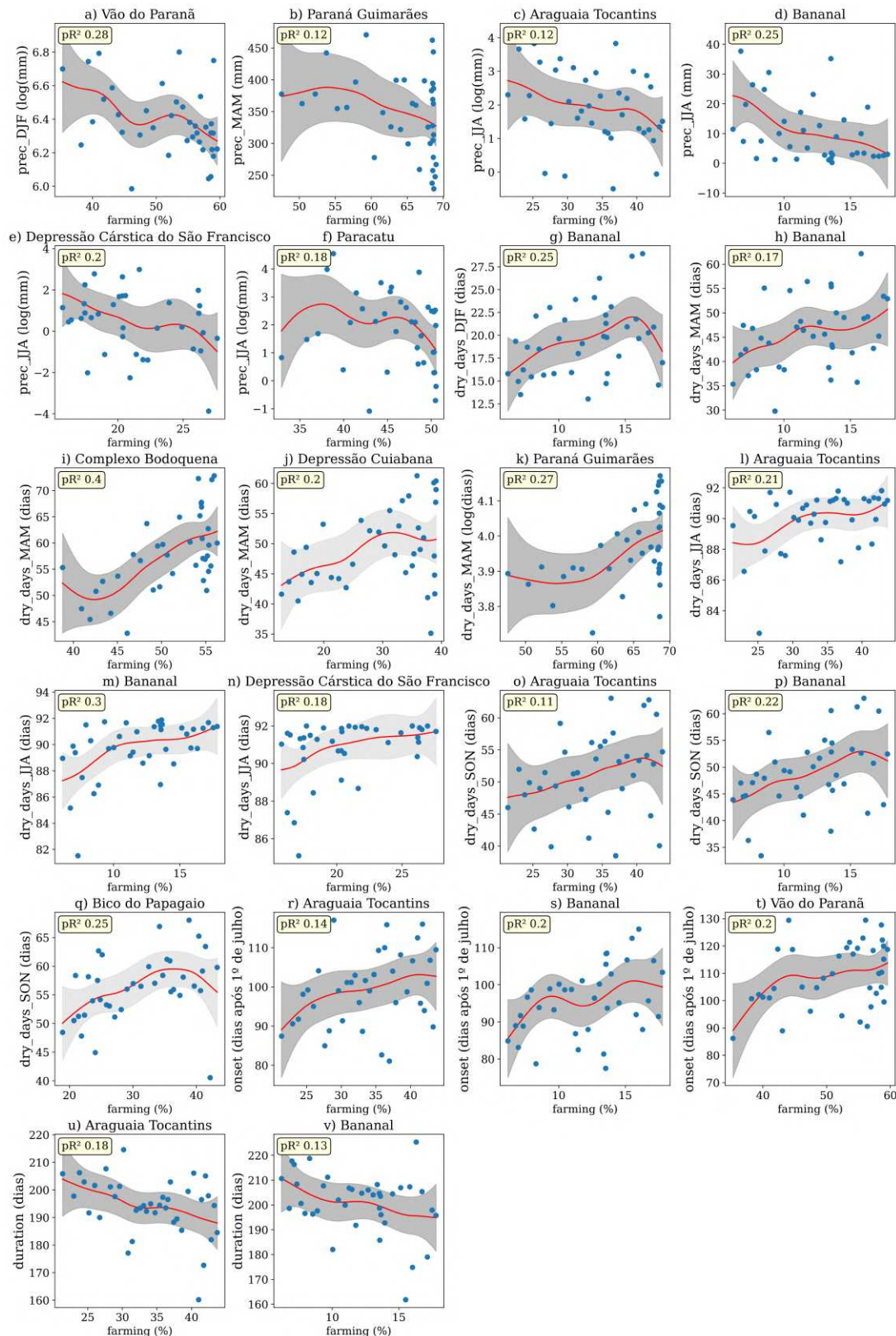
Fonte: o autor. A linha em vermelho representa a regressão polinomial de 2º grau entre as variáveis, para visualizar a tendência. O coeficiente de correlação de Spearman (ρ) e seu p-valor associado estão indicados no título de cada subgráfico. *onset*, *demise* e *length* - início, fim e duração da estação chuvosa

De maneira geral, as regiões cujos regimes de precipitação (incluindo os acumulados trimestrais, frequências de dias secos e padrões da estação chuvosa) apresentam correlação com o uso do solo da categoria farming, são as ecorregiões localizadas tipicamente no Estado do Tocantins e seus arredores (Araguaia Tocantins e Bananal) e no Centro-Oeste brasileiro (Paraná Guimarães), com todos os resultados apontando para condições mais secas conforme o avanço do setor agropecuário nestes locais, seja na forma de menos chuva, na maior frequência de dias secos ou no encurtamento da estação chuvosa.

Os modelos aditivos generalizados das variáveis que apresentam resultados significativos na análise de correlação foram dispostos nos gráficos da Figura 18, os *QQ plots* para

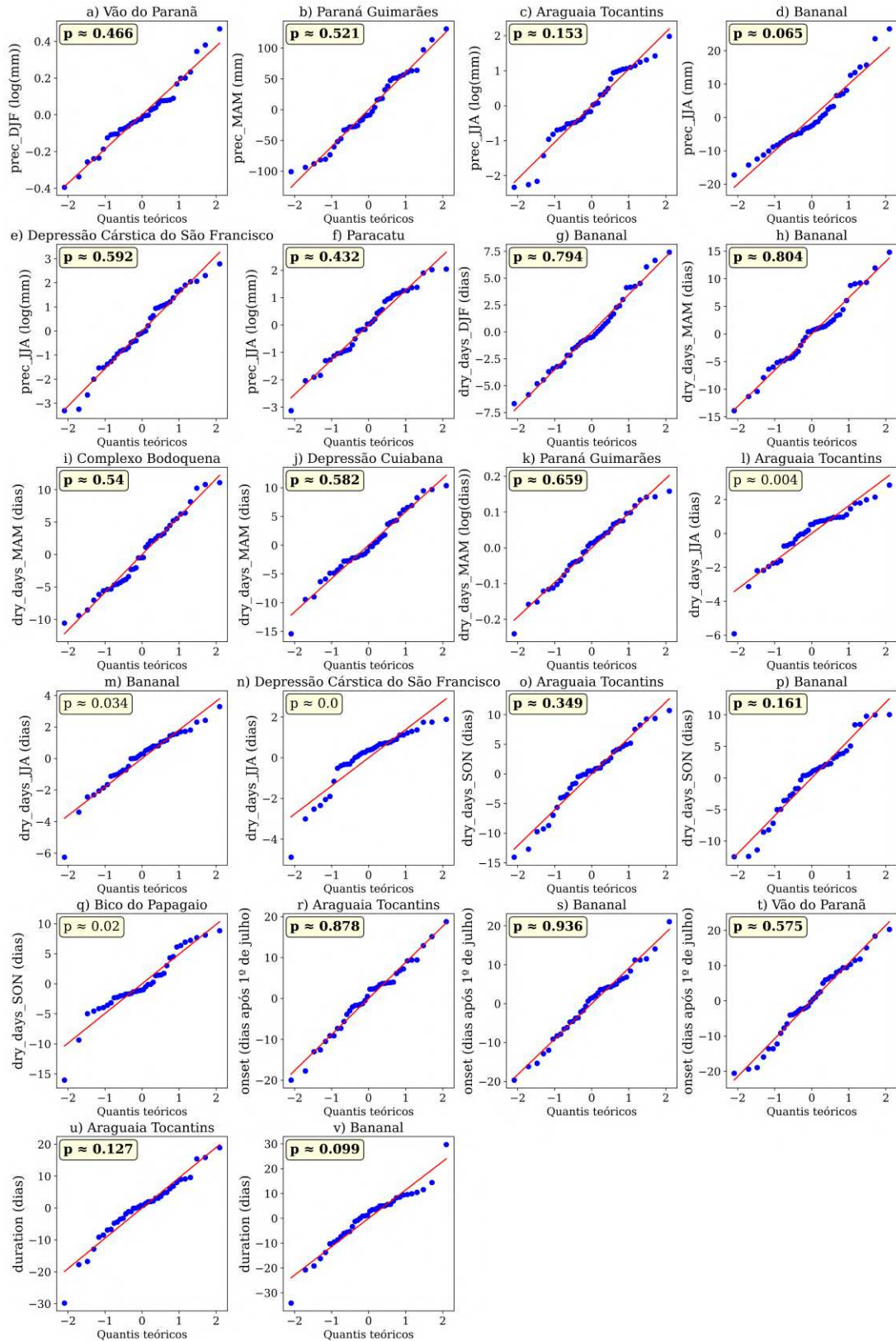
averiguar a normalidade de seus resíduos na Figura 19, enquanto a Figura 20 apresenta a análise de heterocedasticidade nos mesmos. A transformação $y = \log(y)$ foi utilizada em cinco modelos para que a normalidade/homocedasticidade dos resíduos fosse respeitada, sendo eles os modelos referentes aos seguintes pares de região-variável: Vão do Paranã - *prec_DJF* (Figura 18a); Araguaia Tocantins - *prec_JJA* (Figura 18c); Depressão Cárstica do São Francisco - *prec_JJA* (Figura 18e); Paracatu - *prec_JJA* (Figura 18f); e Paraná Guimarães - *dry_days_MAM* (Figura 18k). Não houve alterações no restante dos modelos com problemas na normalidade/homocedasticidade por apenas transformações mais complexas do tipo *Box-Cox* resolverem esses problemas. Como os MAGs já retornam funções complexas por natureza, essas transformações não foram realizadas para não prejudicar mais a interpretabilidade deles. Dessa forma, os intervalos de confiança (95%) desses modelos foram realçados com um sombreamento mais claro na Figura 18 para destacar suas possíveis imprecisões, sendo eles: Depressão Cuiabana - *dry_days_MAM* (Figura 18j); Araguaia Tocantins - *dry_days_JJA* (Figura 18l); Bananal - *dry_days_JJA* (Figura 18m); Depressão Cárstica do São Francisco - *dry_days_JJA* (Figura 18n); e Bico do Papagaio - *dry_days_SON* (Figura 18q).

Figura 18 – Modelos aditivos generalizados das variáveis selecionadas nas análises de correlação.



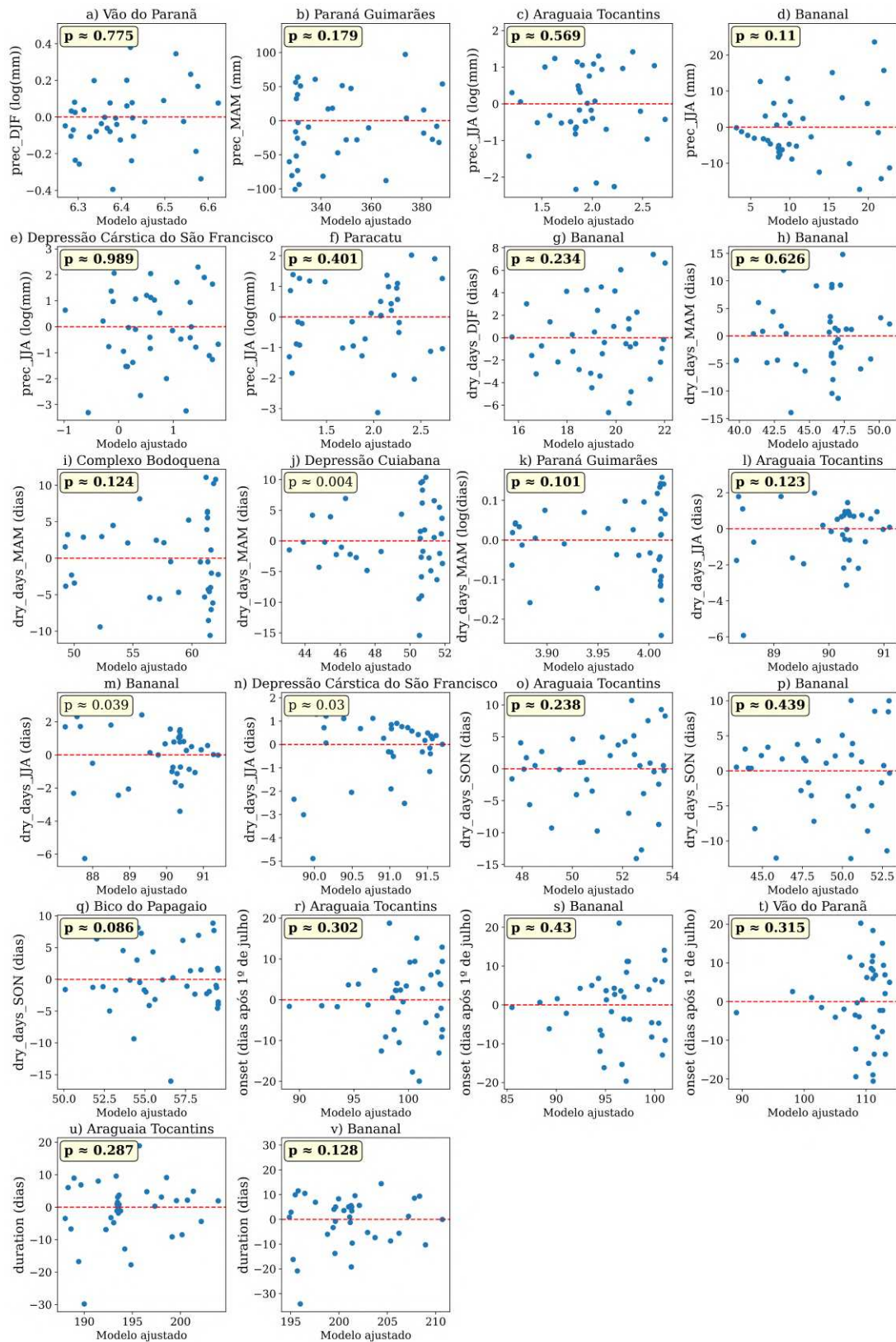
Fonte: o autor. Sombras em cinza representam o intervalo de confiança (95%). As sombras mais claras indicam modelos cuja normalidade/homocedasticidade dos resíduos não foi atingida. pR^2 se refere ao pseudo R^2 dos modelos. *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset* e *length* - início e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

Figura 19 – QQ plots dos modelos aditivos generalizados.



Fonte: o autor. O p-valor do teste formal de Shapiro-Wilk ($\alpha = 5\%$) está indicado por p. Valores em negrito são os que não apresentam desvio da normalidade segundo esse teste. *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset* e *length* - início e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

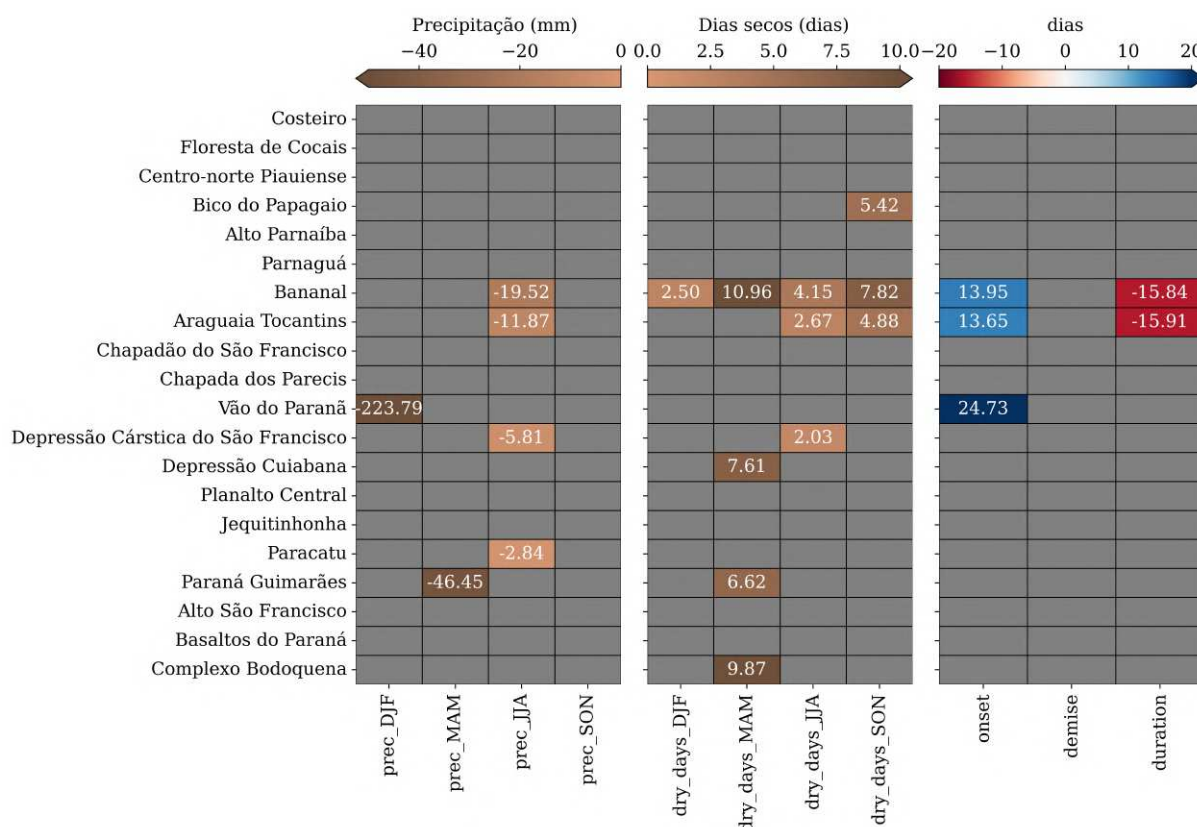
Figura 20 – Gráficos de resíduos x valores ajustados pelos Modelos Aditivos Generalizados.



Fonte: o autor. O p-valor do teste formal de Breusch-Pagan ($\alpha = 5\%$) está indicado por p. Valores em negrito são os modelos que não apresentam evidências de heterocedasticidade nos resíduos segundo esse teste. *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset* e *length* - início e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

Na Figura 18 é possível observar como a expansão agropecuária pode estar potencialmente relacionada com condições mais secas nas ecorregiões selecionadas, com padrões majoritariamente não lineares. Como houve transformações de algumas variáveis, foi criado um heatmap (Figura 21) com as diferenças entre o primeiro e o último ano da série de acordo com os modelos, já retornando para a escala original de cada parâmetro. As maiores diferenças na precipitação são observadas no Vão do Paranã durante DJF e em Paraná Guimarães no trimestre seguinte. Diferenças inferiores são observadas durante JJA, uma vez que são meses mais secos nas regiões apontadas (Bananal, Araguaia Tocantins, Depressão Cárstica do São Francisco e Paracatu). As maiores magnitudes de mudanças na frequência de dias secos se encontram nos trimestres de transição (MAM e SON), atingindo até cerca de 10 dias de diferença no Bananal segundo os modelos. Além disso, mudanças expressivas no início e duração da estação chuvosa foram estimadas para as regiões do Bananal e Araguaia Tocantins, com diferenças entre 14 e 16 dias nesses parâmetros, indicando o atraso e encurtamento da estação conforme as MUCS nessas regiões.

Figura 21 – Heatmap com as diferenças entre o primeiro e último ano da série histórica (1985-2022) de acordo com os modelos aditivos generalizados, na escala original de cada variável.



Fonte: o autor. *prec* - total precipitado; *dry days* - frequência de dias secos; *onset*, *demise* e *length* - início, fim e duração da estação chuvosa; MAM - março, abril e maio; JJA - junho, julho e agosto; SON - setembro, outubro, novembro; DJF - dezembro, janeiro e fevereiro.

5. Discussão

Os resultados mostram possíveis relações entre o avanço da agropecuária em algumas regiões do Cerrado e a intensificação de condições mais secas nesses locais. Há diversas formas diretas e indiretas em que as mudanças de uso do solo podem influenciar o regime de precipitação de uma região, seja através de fatores biogeoquímicos, com o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEEs), ou de fatores biogeofísicos, a partir de alterações em propriedades associadas à cobertura do solo, como evapotranspiração, índice de área foliar, albedo, profundidade das raízes e rugosidade da superfície (Caballero et al., 2021; Wierik et al., 2021; Spracklen et al., 2018). Alterações no índice de área foliar e profundidade das raízes podem modificar a evapotranspiração, afetando diretamente a quantidade de umidade a ser fornecida para a atmosfera, além de impactar no balanço de energia, uma vez que essa umidade carrega calor latente, que balanceado com o calor sensível, rege o balanço de energia entre a superfície e a atmosfera. Dessa forma, alterar o balanço de energia, que pode acontecer também com a mudança do albedo, pode afetar as dinâmicas de circulação atmosférica, potencialmente mudando os padrões de precipitação. A alteração da rugosidade da superfície também pode afetar a dinâmica da atmosfera, por impactar na mistura vertical de massa e energia. Todos esses possíveis impactos dependem da escala das mudanças de uso do solo, dos tipos de cobertura envolvidos nas transições, da dinâmica de circulação atmosférica, considerando os locais à jusante e à montante da região analisada, entre outras variáveis, sendo um processo complexo a ser explorado sob diferentes óticas em diversos estudos.

Dentre os resultados apresentados, correlações com a precipitação trimestral ocorrem principalmente no inverno (JJA), quando há maior dependência de fontes locais de umidade para a formação de chuvas na porção central do Brasil (Leyba et al., 2023), uma vez que o transporte de umidade entre regiões remotas é enfraquecido após o verão (DJF). Isso é observado na monção sul-americana, que enfraquece entre março e abril (De Carvalho e Cavalcanti, 2015), reduzindo o fluxo de umidade da Amazônia para outras regiões do país, como o Centro-Oeste, onde também é observada correlação entre o uso do solo e precipitação/frequência de dias secos durante o outono (MAM). Dessa forma, a precipitação passa a depender mais da evapotranspiração local nesses períodos, que é afetada pelas transições de uso do solo no Cerrado, sobretudo nas transições de floresta e savana em pastagens e áreas agrícolas (Rodrigues et al., 2022).

Parte da fronteira entre a Amazônia e o Cerrado, sobretudo no Tocantins, é uma região com grandes impactos climáticos, como na frequência de dias secos entre os meses de junho a outubro (Marengo et al., 2022). As correlações entre essa variável climática e o uso do solo durante o inverno e primavera (SON) nas ecorregiões Bananal, Araguaia Tocantins, e Bico do Papagaio demonstram a possível influência da expansão agrícola nesse fenômeno, que também já foi observado no sul da Amazônia (Espinoza et al., 2018), associado a mudanças atmosféricas no local, também extensamente explorado pelo setor agropecuário. O aumento da frequência de

dias secos conforme a expansão agrícola durante os meses que envolvem o final da estação seca, como na primavera, pode estar ligado aos resultados observados no atraso do início da estação chuvosa nas mesmas regiões do Bananal e Araguaia Tocantins.

O atraso da estação chuvosa já foi observado no sul da Amazônia (Leite-Filho et al., 2019) e no Mato Grosso (Commar et al., 2024), possivelmente ligado a mudanças de uso do solo (Commar et al., 2023). No Cerrado, Leite-Filho et al. (2024) mostrou que esse fenômeno também ocorre em áreas de dupla safra do bioma, principalmente nos locais com mais perdas de vegetação nativa. Essa é uma importante prática agrícola na região, consistindo no plantio sucessivo de duas culturas dentro da mesma estação chuvosa, período em que a maioria dos cultivos do Brasil são desenvolvidos (ANA, 2021). Assim, a expansão agrícola pode estar prejudicando o próprio setor, pois o atraso da estação chuvosa, e consequentemente o encurtamento de sua duração, prejudica a definição do melhor momento para iniciar o plantio e diminui o tempo disponível para as culturas se desenvolverem. Essa prática, que é mais produtiva (Xu et al., 2021) e mantém níveis de evapotranspiração mais próximos aos da vegetação natural do Cerrado (Spera et al., 2016), vem encontrando diversos obstáculos no bioma por conta de condições mais secas (Rattis et al., 2021), o que resulta em perdas econômicas e ambientais. Assim, a intensificação dessas condições por conta das MUCS podem representar um problema a mais para a agricultura nacional.

As mudanças climáticas biogeoquímicas são um dos fatores que contribuem para a incerteza na atribuição dos resultados. O Cerrado, como o segundo bioma brasileiro com mais emissões de GEEs (SEEG, 2024), ligadas à expansão agrícola (Noojipady et al., 2017), também é sujeito a este fenômeno global. Entretanto, a separação das contribuições entre esse componente e os fatores biogeofísicos é algo complexo de se realizar, visto que as próprias mudanças de uso e cobertura do solo são fontes relevantes de emissões (IPCC, 2023), sendo a principal atividade emissora no Brasil (SEEG, 2024), e uma das fontes com mais incertezas associadas nas estimativas (Friedlingstein et al., 2025). A evolução anual da concentração de gás carbônico na atmosfera, principal indicador em emissões de GEE, segue uma tendência monotônica crescente nas últimas décadas (WMO, 2024), similar ao que acontece com a evolução anual da categoria *farming* em algumas ecorregiões (Figuras 5-??), o que pode resultar em problemas de colinearidade em algumas ferramentas estatísticas. Uma das alternativas para avaliar os efeitos de alguma componente (biogeoquímica e/ou biogeofísica) isoladamente é através da modelagem climática, que é um caminho que pode ser explorado em pesquisas futuras.

A escolha da escala temporal a ser analisada é uma importante decisão metodológica. O Cerrado, que possui elevada sazonalidade por estar sujeito a sistemas atmosféricos sazonais como a monção sul-americana (De Carvalho e Cavalcanti, 2015) e à variabilidade da Alta Subtropical do Atlântico Sul (Hofmann et al., 2023; Sun et al., 2017), pode mascarar efeitos específicos de alguma estação caso seja analisado apenas a partir de totais anuais, como feito por Debortoli et al. (2016). Para exemplificar isso, todos os procedimentos do presente estudo foram realizados também com a variável de precipitação anual, considerando o ano a partir de

março até fevereiro do ano seguinte, para manter a consistência temporal e uma comparação correta em relação aos trimestres escolhidos. Dessa forma, a única ecorregião que apresentou resultados significativos foi o Vão do Paranã ($\rho = -0,40$), apesar dos resultados trimestrais apontarem correlações em outras regiões, sobretudo no inverno. A magnitude da precipitação durante o inverno é muito inferior àquela observada durante o verão, e mudanças durante as estações secas podem não ser captadas quando consideradas junto com o restante do ano. Isso também foi visto em um estudo recente sobre a resposta da precipitação na Amazônia em relação ao desmatamento (Yoon e Hohenegger, 2025), em que as reduções mais pronunciadas foram observadas analisando os meses mais secos, enquanto o total anual não apresentou alterações significativas.

Os resultados dos modelos apontam para diferenças relativamente baixas na magnitude das variáveis de acordo com o avanço de ocupação da categoria farming, com exceção do início e da duração da estação chuvosa (≈ 15 dias). Entretanto, é necessário um cuidado para não subestimar a importância do uso e cobertura do solo no sistema climático como um todo. Além dos impactos que podem ser observados em outras variáveis do Cerrado, como temperatura e evapotranspiração (Rodrigues et al., 2022), emissões de GEE (Noojipady et al., 2017), ocorrência de queimadas de origem antrópica (Arruda et al., 2024) e diversos outros fatores, é importante levar em conta a não linearidade das relações exploradas neste estudo. Apesar de algumas relações se aproximarem de um comportamento linear (Figura 18, subgráficos o, u e v), não é correto extrapolar essa relação para porcentagens maiores de ocupação agropecuária do uso do solo nas regiões. Isso pode ser observado também na Figura 18, nos subgráficos e, g e t, onde a relação se aproxima de um padrão linear apenas em um intervalo do gráfico, a partir do qual a forma funcional assume uma curva não linear. Esse cuidado é especialmente importante quando se considera as projeções futuras de uso e cobertura do solo no Cerrado, que apontam para grandes áreas com vegetação natural ainda disponíveis para serem desmatadas (Colman et al., 2024), mesmo seguindo com o Código Florestal, o que pode intensificar de maneira imprevisível as condições de seca no bioma futuramente.

O Código Florestal é um dos principais mecanismos de controle de uso e cobertura do solo no Brasil, com baixas exigências de conservação da vegetação natural no Cerrado. Sendo este um bioma amplamente ocupado por propriedades privadas (Colman et al., 2024), que tendem a ser mais ineficazes contra o desmatamento (Pacheco e Meyer, 2022), é necessário um nível de controle maior sobre o uso do solo. É possível a expansão de ferramentas como a Moratória da Soja para o bioma (Soterroni et al., 2019), visando proteger principalmente as áreas com mais possibilidades de ocupação futura, como o MATOPIBA (Colman et al., 2022). Esse acordo, que se mostrou eficiente na Amazônia (Heilmayr et al., 2020), é uma das formas para contribuir com o desenvolvimento sustentável do bioma e expandir o debate de conservação da vegetação natural para além das florestas (Bispo et al., 2023; Overbeck et al., 2015).

As Unidades de Conservação também são mecanismos eficientes para a preservação do bioma, porém, apenas a criação de novas unidades não basta para esse fim. Das 606 UCs no

Cerrado atualmente dispostas no Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC), 395 (65,18% do total) não possuem plano de manejo no sistema (MMA, 2025), considerando apenas as UCs criadas até 2019, que são as que já ultrapassaram o prazo de 5 anos estipulado por lei para a criação do plano (Lei nº 9.985, Artigo 27, parágrafo 3º), componente essencial para o bom funcionamento de uma unidade. A esfera governamental da unidade também deve ser levada em conta, uma vez que França et al. (2015) mostraram que as áreas protegidas no âmbito federal tendem a ser mais eficientes, embora menos numerosas, o que seria interessante para áreas mais críticas, como nas ecorregiões no Tocantins.

Esse estudo possui limitações que devem ser devidamente consideradas. Uma das mais relevantes é que não foram consideradas as interações de uso do solo entre ecorregiões distintas e de regiões à jusante da circulação atmosférica no bioma. É possível que o desmatamento da Amazônia tenha influência considerável no regime de precipitação do Cerrado, mas isso não foi contabilizado nas análises, que se limitaram ao uso e cobertura do solo dentro das próprias ecorregiões. Além disso, efeitos de larga escala, como o *El Niño* - Oscilação Sul, a Alta do Atlântico Sul, a Oscilação Antártica, entre outros, também influenciam na variabilidade de precipitação e não foram contabilizados nos procedimentos. A conformação espacial de algumas ecorregiões, principalmente as localizadas na borda do bioma, também podem ter afetado os resultados, por apresentarem similaridades com regiões vizinhas de outros biomas que não foram consideradas dentro da área de estudo.

6. Conclusão

Os resultados indicam que a progressão de uso e cobertura do solo no Cerrado parece ser capaz de influenciar nos seus padrões de precipitação, sobretudo durante os meses mais secos e no início e duração da estação chuvosa. Isso indica que a expansão agropecuária estaria prejudicando o próprio setor, ressaltando a importância de adotar práticas sustentáveis nessas atividades.

A presente análise visa enriquecer o conhecimento científico e amparar o debate público e político sobre o gerenciamento territorial do Cerrado, cuja proteção ainda é bastante negligenciada pela governança estatal, mesmo com as mudanças de uso e cobertura do solo apresentando potencial nocivo em diversas variáveis climáticas e ambientais.

Embora a metodologia não permita atribuir causalidade diretamente, estudos empíricos como esse podem servir como base para avaliar possíveis relações entre as variáveis, identificando as épocas e os locais mais críticos, o que por sua vez contribui para a elaboração e direcionamento de pesquisas futuras e na tomada de decisão sobre a proteção e priorização de áreas mais vulneráveis, colaborando para o desenvolvimento sustentável do bioma, mitigando os já existentes efeitos das mudanças climáticas e realçando a importância ambiental do Cerrado.

Referências

- AKOGLU, H. User's guide to correlation coefficients. **Turkish Journal of Emergency Medicine**. 2018 v. 18, n. 3, p. 91-93, Sep. 2018. doi: 10.1016/j.tjem.2018.08.001. PMID: 30191186; PMCID: PMC6107969.
- ALENCAR, A. A. et al. **MapBiomias General "Handbook" - Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) - Collection 9 - Cerrado - Appendix**. MapBiomias Data, V1, 2024.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, Dec. 2013.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas Irrigação 2021: Uso da Água na Agricultura Irrigada**. 2021.
- ARRUDA, V. L. D. S. et al. Assessing four decades of fire behavior dynamics in the Cerrado biome (1985 to 2022). **Fire Ecology**, v. 20, n. 1, jul. 2024.
- ARVOR, D. et al. Spatial patterns of rainfall regimes related to levels of double cropping agriculture systems in Mato Grosso (Brazil). **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 8, p. 2622–2633, nov. 2013.
- BISPO, P. D. C. et al. Overlooking vegetation loss outside forests imperils the Brazilian Cerrado and other non-forest biomes. **Nature Ecology and Evolution**, v. 8, n. 1, p. 12–13, nov. 2023.
- BOULTON, C.; LENTON, T. M.; BOERS, N. Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 3, p. 271–278, mar. 2022.
- BRANDÃO, A. et al. Estimating the Potential for Conservation and Farming in the Amazon and Cerrado under Four Policy Scenarios. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1277, fev. 2020.
- BUTT, E. W. et al. Amazon deforestation causes strong regional warming. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 120, n. 45, out. 2023.
- CABALLERO, C. B.; RUHOFF, A.; BIGGS, T. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. **The Science of the Total Environment**, v. 808, p. 152134, Dec. 2021.
- COLMAN, C. B. et al. Identifying priority regions and territorial planning strategies for conserving native vegetation in the Cerrado (Brazil) under different scenarios of land use changes. **The Science of the Total Environment**, v. 807, p. 150998, out. 2022.
- COLMAN, C. B. et al. Modeling the Brazilian Cerrado land use change highlights the need to account for private property sizes for biodiversity conservation. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, fev. 2024.
- COMMAR, L. F. S. et al. Mato Grosso's rainy season: past, present, and future trends justify immediate action. **Environmental Research Letters**, v. 19, n. 11, p. 114065, out. 2024.
- COMMAR, L. F. S.; ABRAHÃO, G. M.; COSTA, M. H. A possible deforestation- induced

synoptic-scale circulation that delays the rainy season onset in Amazonia. **Environmental Research Letters**, v. 18, n. 4, p. 044041, mar. 2023.

DA SILVA, A. L. et al. Water appropriation on the agricultural frontier in western Bahia and its contribution to streamflow reduction: Revisiting the debate in the Brazilian Cerrado. **Water**, v. 13, n. 8, p. 1054, abr. 2021.

DE CARVALHO, L. M. V.; CAVALCANTI, I. F. A. The South American Monsoon System (SAMS). **Springer climate**. 2015. p. 121–148.

DE JONG, L. et al. Understanding land-use change conflict: a systematic review of case studies. **Journal of Land Use Science**, v. 16, n. 3, p. 223–239, mai. 2021.

DE MELLO, K. et al. Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110879, set. 2020.

DEBORTOLI, N. et al. Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 6, p. 2889–2900, out. 2016.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **VISÃO 2030, O Futuro da Agricultura Brasileira**. 2018.

ESPINOZA, J. C. et al. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). **Climate Dynamics**, v. 52, n. 9–10, p. 5413–5430, set. 2018.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Agricultural production statistics 2000–2022. 2023. FLORES, B. M. et al. Critical transitions in the Amazon forest system. **Nature**, v. 626, n. 7999, p. 555–564, fev. 2024.

FRANÇOSO, R. D. et al. Habitat loss and the effectiveness of protected areas in the Cerrado Biodiversity Hotspot. **Natureza e Conservação**, v. 13, n. 1, p. 35–40, jan. 2015.

FRIEDLINGSTEIN, P. et al. Global Carbon Budget 2024. **Earth System Science Data**, v. 17, n. 3, p. 965–1039, mar. 2025.

HASAN, S. S. et al. Impact of land use change on ecosystem services: A review. **Environmental Development**, v. 34, p. 100527, jun. 2020.

HEILMAYR, R. et al. Brazil's Amazon Soy Moratorium reduced deforestation. **Nature Food**, v. 1, n. 12, p. 801–810, Dec. 2020.

HOFMANN, G. S. et al. Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, jul. 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFICA E ESTATÍSTICA (2019). **Biomass e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/biomass/#/home/>>. Acesso em: 24 mar. 2025.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023:**

Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.

LAWRENCE, D.; VANDECAR, K. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 1, p. 27–36, Dec. 2014.

LEITE-FILHO, A. T. et al. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, mai. 2021.

LEITE-FILHO, A. T. et al. Intensification of climate change impacts on agriculture in the Cerrado due to deforestation. **Nature Sustainability**, Dec. 2024.

LEITE-FILHO, A. T.; DE SOUSA PONTES, V. Y.; COSTA, M. H. Effects of deforestation on the onset of the rainy season and the duration of dry spells in southern Amazonia. **Journal of Geophysical Research. Atmospheres**, v. 124, n. 10, p. 5268–5281, mai. 2019.

LEYBA, I. M. et al. The South Atlantic Ocean as a moisture source region and its relation with precipitation in South America. **Climate Dynamics**, v. 61, n. 3–4, p. 1741–1756, jan. 2023.

LIEBMANN, B. et al. Onset and end of the rainy season in South America In observations and the ECHAM 4.5 Atmospheric General Circulation model. **Journal of Climate**, v. 20, n. 10, p. 2037–2050, mai. 2007.

MAPBIOMAS (2024a). **MapBiomass Brasil - Coleção 9**. <https://brasil.mapbiomas.org/>

MAPBIOMAS (2024b). **MapBiomass General “Handbook” - Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) - Collection 9**. 2024a. (MapBiomass Project).

MARENGO, J. A. et al. Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, jan. 2022.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Cadastro Nacional de Unidades de Conservação: Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza**. 2025.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781–1800, abr. 2011.

NEW, M.; HULME, M.; JONES, P. Representing Twentieth-Century Space–Time Climate Variability. Part II: Development of 1901–96 Monthly Grids of Terrestrial Surface Climate. **Journal of Climate**, v. 13, n. 13, p. 2217–2238, jul. 2000.

NOOJIPADY, P. et al. Forest carbon emissions from cropland expansion in the Brazilian Cerrado biome. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 2, p. 025004, jan. 2017.

OVERBECK, G. E. et al. Conservation in Brazil needs to include non-forest ecosystems. **Diversity and Distributions**, v. 21, n. 12, p. 1455–1460, out. 2015.

PACHECO, A.; MEYER, C. Land tenure drives Brazil’s deforestation rates across

socio-environmental contexts. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, out. 2022.

PIRES, G. F. et al. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 228–229, p. 286–298, nov. 2016.

RAMSEY, P. H. Critical values for Spearman's rank order correlation. *Journal of Educational Statistics*, v. 14, n. 3, p. 245, jan. 1989. RATTIS, L. et al. Climatic limit for agriculture in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 12, p. 1098–1104, nov. 2021.

RAUSCH, L. L. et al. Soy expansion in Brazil's Cerrado. **Conservation Letters**, v. 12, n. 6, ago. 2019.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma cerrado. **Cerrado: ecologia e flora**. 2.ed. Brasília, DF, Brazil: Embrapa Cerrados, 2008.

RODRIGUES, A. A. et al. Cerrado deforestation threatens regional climate and water availability for agriculture and ecosystems. **Global Change Biology**, v. 28, n. 22, p. 6807–6822, set. 2022.

ROSAN, T. M. et al. A multi-data assessment of land use and land cover emissions from Brazil during 2000–2019. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 7, p. 074004, jun. 2021.

SALAZAR, A. et al. Deforestation changes land–atmosphere interactions across South American biomes. **Global and Planetary Change**, v. 139, p. 97–108, jan. 2016.

SALMONA, Y. B. et al. A worrying future for river flows in the Brazilian Cerrado provoked by land use and climate changes. **Sustainability**, v. 15, n. 5, p. 4251, fev. 2023.

SANO, E. E. et al. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 818–828, Dec. 2018.

SCHOBER, P.; BOER, C.; SCHWARTE, L. A. Correlation Coefficients: appropriate use and interpretation. **Anesthesia and Analgesia**, v. 126, n. 5, p. 1763–1768, fev. 2018.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2023**. 2024.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (Complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591, Dec. 1965.

SMITH, C.; BAKER, J. C. A.; SPRACKLEN, D. V. Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation. **Nature**, v. 615, n. 7951, p. 270–275, mar. 2023.

SOARES-FILHO, B. et al. Cracking Brazil's forest code. **Science**, v. 344, n. 6182, p. 363–364, abr. 2014.

SOTERRONI, A. C. et al. Expanding the soy moratorium to Brazil's Cerrado. **Science Advances**, v. 5, n. 7, jul. 2019.

- SOUZA, C. et al. 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, ago. 2020.
- SPEARMAN, C. The Proof and Measurement of Association between Two Things. **The American Journal of Psychology**, v. 15, n. 1, p. 72, jan. 1904.
- SPERA, S. A. et al. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, n. 10, p. 3405–3413, jul. 2016.
- SPRACKLEN, D. V. et al. The effects of tropical vegetation on rainfall. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 43, n. 1, p. 193–218, ago. 2018.
- SUN, X.; COOK, K. H.; VIZY, E. K. The South Atlantic Subtropical High: Climatology and interannual variability. **Journal of Climate**, v. 30, n. 9, p. 3279– 3296, jan. 2017.
- VIEIRA, R. R. S. et al. Compliance to Brazil's Forest Code will not protect biodiversity and ecosystem services. **Diversity and Distributions**, v. 24, n. 4, p. 434– 438, Dec. 2017.
- WIERIK, S. a. T. et al. Reviewing the impact of land use and Land-Use change on moisture recycling and precipitation patterns. **Water Resources Research**, v. 57, n. 7, jun. 2021.
- WINKLER, K. et al. Global land use changes are four times greater than previously estimated. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, mai. 2021.
- WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023**. Geneva: WMO, 2024.
- XAVIER, A. C. et al. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961– 2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390–8404, mai. 2022.
- XU, J. et al. Double cropping and cropland expansion boost grain production in Brazil. **Nature Food**, v. 2, n. 4, p. 264–273, abr. 2021.
- YOON, A.; HOHENEGGER, C. Muted Amazon Rainfall response to deforestation in a global Storm-Resolving model. **Geophysical Research Letters**, v. 52, n. 4, fev. 2025.